

**Michał Michna<sup>1</sup>, Dominik Adamczyk<sup>1</sup>, Filip Kut<sup>1</sup>, Mieczysław Ronkowski<sup>1</sup>, Jakub Bernatt<sup>2</sup>, Paweł Pistelok<sup>2</sup>, Emil Król<sup>2</sup>, Łukasz Kucharski<sup>3</sup>, Maciej Kwiatkowski<sup>3</sup>, Łukasz Byrski<sup>4</sup>, Mariusz Koziol<sup>4</sup>**

<sup>1</sup>Politechnika Gdańska, Gdańsk, <sup>2</sup>BOBRME Komel, Katowice,

<sup>3</sup>Impact Automotive Technologies, Pruszków, <sup>4</sup>CAR Technology, Kraków

## **KONCEPCJA, MODELOWANIE I SYMULACJA UKŁADU NAPĘDOWEGO PROTOTYPU SAMOCHODU ELEKTRYCZNEGO „ELV001”**

### **CONCEPTION, MODELLING AND SIMULATION OF DRIVE SYSTEM OF THE PROTOTYPE ELECTRIC VEHICLE "ELV001"**

**Abstract:** In this paper a conception, modelling and simulation tool for drive system of the prototype electric vehicle "ELV001" have been presented. The design and building of this vehicle have been carried out in frame of the project: "Building a market of electric vehicle and charging infrastructure - fundamentals of energy safety". The simulation tools are of great assistance to engineers and researchers to reduce product-development cycle time, improve the quality of the design, and simplify the analysis without costly and time-consuming experiments. The presented simulation tool has been developed using the system simulator Synpsys/Saber software. This user-friendly simulation package is able to simulate electric/electronic circuits and mechanical modules; i.e., it has capability for simulating the entire system of an automobile. Chosen simulation results of the electric vehicle "ELV001" has been presented.

#### **1. Wstęp**

Problematyka napędów elektrycznych do zastosowań w samochodach elektrycznych jest obecnie bardzo aktualna z uwagi na wdrażanie produkcji samochodów elektrycznych przez większość producentów samochodów o napędzie spalinowym [3, 14]. Publikowane są liczne prace dotyczące zagadnień struktury, projektowania, modelowania i symulacji oraz sterowania systemów napędu samochodów elektrycznych [4, 5, 6, 7, 9, 10, 11, 12, 13, 15, 16, 17, 18].

Obecnie w kraju w ramach Programu Operacyjnego „Innowacyjna Gospodarka Działanie 5.1-Dyfuzja Innowacji” realizowany jest projekt: „Budowa rynku pojazdów elektrycznych, infrastruktury ich ładowania – podstawą bezpieczeństwa energetycznego” [19]. Jednym z jego elementów jest „Zaprojektowanie, budowa i dostawa prototypu samochodu elektrycznego”. Powołane konsorcjum Electric Car zaprojektowało i zbudowało prototyp samochodu elektrycznego, oznaczonego symbolem „ELV001”.

W samochodzie „ELV001” przyjęto koncepcję przedniego napędu opartą na strukturze dwusilnikowego napędu z podwójną przekładnią pasową dla każdego silnika. Praca obu silników ze stałym momentem realizuje funkcję dyferencjału mechanicznego – elektrycznej przekładni planetarnej [6, 10]. Zastosowanie podwójnej

przekładni pasowej w napędzie „ELV001” nie jest rozwiązaniem optymalnym w aspekcie kosztów budowy, sprawności, cichobieżności, eksploatacji i niezawodności samochodu.

Rozwiązanie optymalne układu napędowego samochodu „ELV001”, w powyższym aspekcie, wymaga dalszych badań. Ich głównymi celami są:

- 1) rozszerzenie i pogłębienie wiedzy na temat zachodzących zjawisk elektromagnetycznych i elektromechanicznych w układach dwusilnikowego napędu samochodu elektrycznego;
- 2) rozwinięcie metodologii modelowania za pomocą podejścia energetycznego (metody grafów wiązań);
- 3) opracowanie modeli obwodowych adekwatnych do zastosowania w algorytmach sterowania i symulatorach obwodowych.

Osiągnięcie założonych celów badawczych będzie punktem wyjścia do opracowania bardziej wydajnych sposobów przeniesienia napędu w samochodzie „ELV001”. Pozwoli, także na implementację i sprawdzenie zaawansowanych algorytmów sterowania trakcyjnego – ABS, ESP, dyferencjał elektryczny z ograniczonym poślizgiem. Opracowanie pakietu do symulacji pełnego układu napędowego w programie Synpsys/Saber, może stanowić wartościową ofertę dla przemysłu elektromaszynowego (krajowego

i zagranicznego) oraz producentów / projektantów samochodów elektrycznych. Główne obszary zastosowań takiego pakietu będą następujące:

- badanie stanów statycznych i dynamicznych napędu z dyferencjałem elektrycznym,
- projektowanie/optimalizacja napędu z dyferencjałem elektrycznym.

Na podstawie danych uzyskanych od konsorcjum Electric Car opracowano założenia i koncepcję modelu symulacyjnego napędu elektrycznego samochodu „ELV001”.

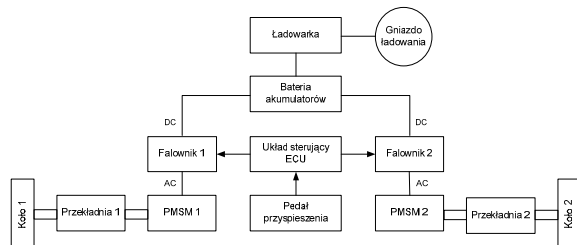
Obecnie realizowany program badań:

- opracowanie uproszczonego modelu napędu samochodu,
- opracowanie modelu napędu samochodu z uwzględnieniem dyferencjału elektrycznego oraz poślizgu wszystkich kół samochodu,
- implementacja modeli w symulatorze Synopsys/Saber oraz wykonanie badań symulacyjnych.

W pracy opisano opracowany uproszczony model symulacyjny napędu samochodu „ELV001” do analizy stanów statycznych. Przedstawiono wybrane wyniki symulacji ruchu samochodu dla przypadku znormalizowanego cyklu jazdy – cykliów stosowanych do oceny emisji spalin – zadawanych, jako tablica prędkości w funkcji czasu [20].

## 2. Ogólna struktura układu napędowego

Ogólną strukturę układu napędowego prototypu samochodu „ELV001” przedstawiono na rys. 1. Przyjęto koncepcję przedniego napędu opartą na strukturze dwusilnikowego napędu z podwójną przekładnią pasową (dla każdego silnika) i elektronicznym/elektrycznym dyferencjałem.



Rys. 1. Ogólna struktura układu napędowego samochodu „ELV001”

Podstawowe dane wybranych elementów układu są następujące.

- Silniki elektryczne:

bezszcotkowe z magnesami trwałymi zagłęzionymi (PMSM), seria prototypowa dedykowana do napędu pojazdów samochodowych [1, 2] – producent BOBRME Komel; podstawowe dane: typ SMwsPA132S4,  $P_n=15\text{kW}$ ,  $U_{dcn}=105\text{V}$ ,  $n_n=3400\text{obr/min}$ ,  $n_{max}=7000\text{obr/min}$ , chłodzenie wodne.

- Zasobnik energii:

zestaw baterii trakcyjnych wykonanych z ogniw Li-polimer firmy Kokam, bloki 7S1P53Ah – pojemność bloku 53Ah, konfiguracja 36S3P, napięcie  $U_{dcn}=105\text{V}$ , pojemność 19,5kWh.

- Falowniki:

producent Semikron, typ SKAI LV 4201MD20, napięcie zasilania  $U_{dcn}=105\text{V}$ , wyposażony w procesor sygnałowy firmy Texas Instruments (TMS320 C2000), chłodzenie wodne.

- Ładowarka:

typ Supernova o napięciu wyjściowym 150V.

- Układ sterujący (centralna jednostka sterująca):

typ DEST ECU 3.0.

- Elektroniczny pedał przyspieszenia: typ Bitron T1990.

- Przekładnia:

pasowa dwustopniowa o przełożeniu całkowitym 6,721.

Masa samochodu:

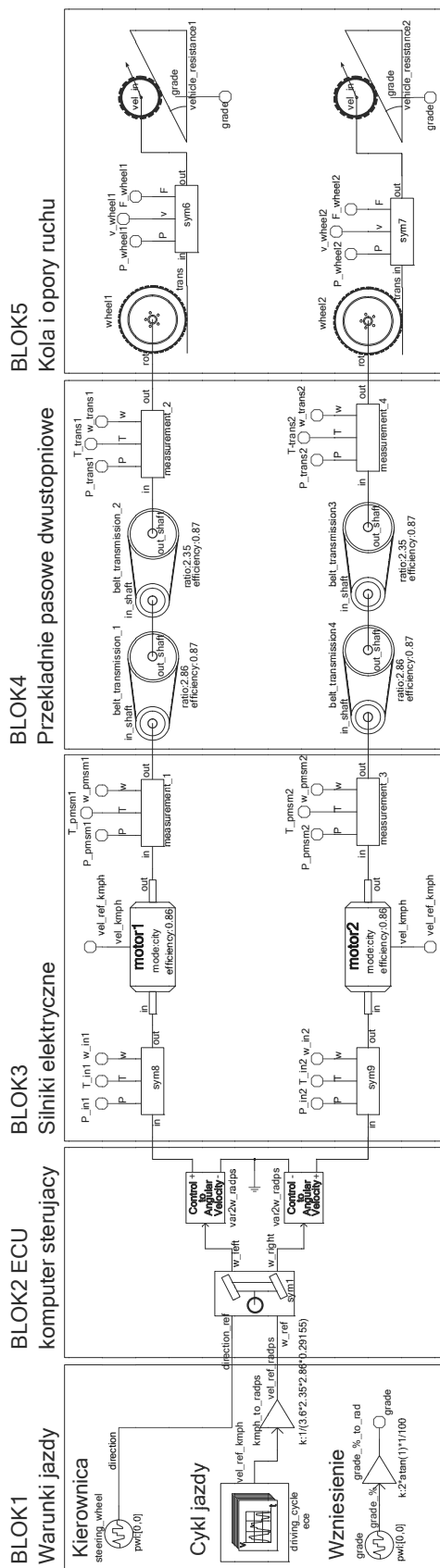
całkowita 1190 kg – w tym pojazdu 850 kg, baterii 250kg. Zasięg samochodu przy prędkości 50km/h około 160km.

## 3. Model symulacyjny układu napędowego

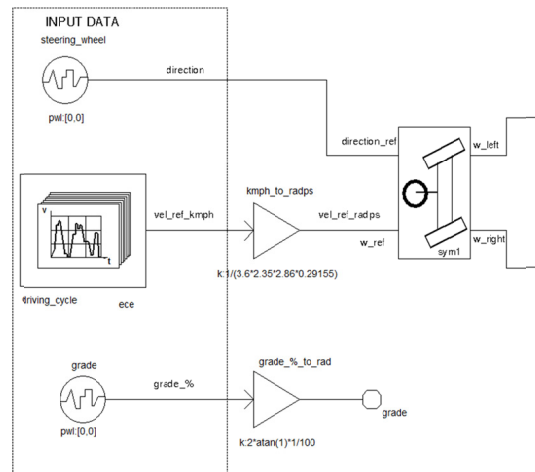
Strukturę blokową modelu symulacyjnego układu napędowego samochodu „ELV001” przedstawiono na rys. 2. Model opracowano w środowisku symulatora Synpsys/Saber [21]. Model złożony jest z następujących bloków: blok 1 – realizuje zadawanie warunków/parametrów jazdy; blok 2 – steruje pracą napędu; blok 3 – modeluje silniki elektryczne; blok 4 – modeluje przekładnie pasowe dwustopniowe; blok 5 – modeluje koła napędowe i opory ruchu.

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu opisano tylko wybrane bloki.

Strukturę bloku 1 przedstawioną na rys. 3. Człon „kierownica” (steering wheel) zadaje kierunek jazdy, steruje prędkością zadaną na koło lewe i prawe.

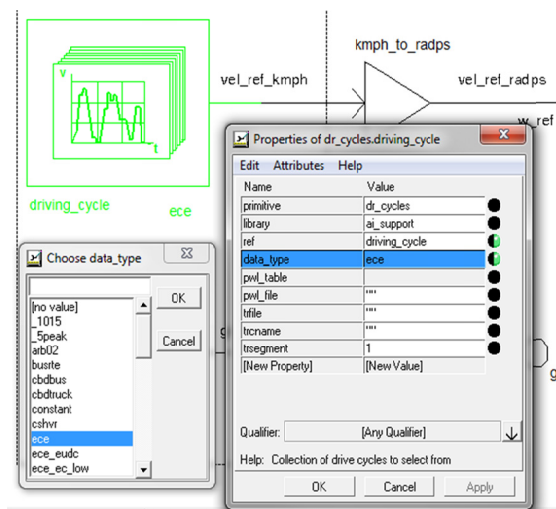


Rys.2. Schemat blokowy modelu układu napędowego prototypu samochodu „ELV001”



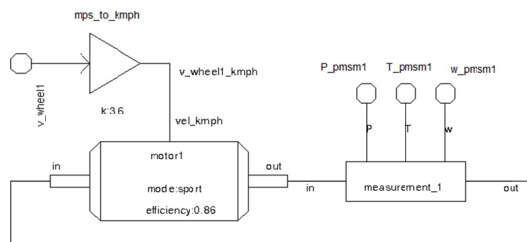
Rys.3. Blok 1 – zadawanie warunków /parametrów jazdy

Z kolei człon realizujący funkcje sterowania prędkością kół – elektronicznego/elektrycznego dyferencjału – pokazano na rys. 4. Elektroniczny/elektryczny dyferencjał realizowany jest wg dwóch opcji: 1) sterowanie prędkością kół w funkcji kąta obrotu kierownicy; 2) sterowanie prędkością kół metodą stałego momentu, tzn. silniki napędowe pracują ze stałym momentem. Człon realizujący funkcję sterowania prędkością kół opisany jest zależnościami podanymi w pracach [8, 10]. Znormalizowane cykle jazdy (driving\_cycle) zadawane są jako tablica prędkości [km/h] w funkcji czasu [s] (rys. 4). Przyjęto standardowe cykle jazdy stosowane do oceny emisji spalin [20].



Rys.4. Człon zadający cykl jazdy samochodu

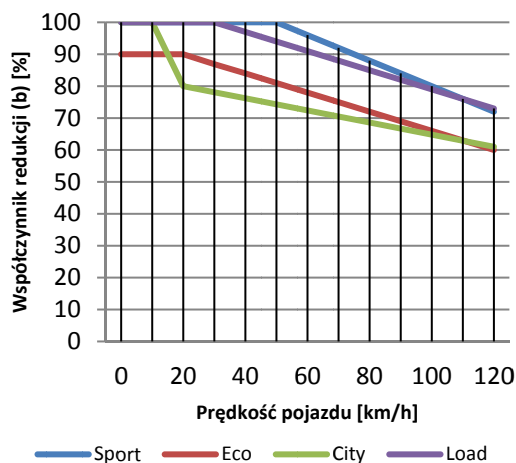
Człon modelujący bloki silników trakcyjnych przedstawiono na rys.5. W bloku silnika zrealizowano funkcję przełączania trybów jazdy oraz uwzględniono całkowitą sprawność silnika.



Rys.5. Blok 3 – modelujący silniki trakcyjne

Z prób prototypu samochodu „ELV001 na hamowni wynika, że układ napędowy posiada całkowitą sprawność na poziomie 0,65. W modelu układu napędowego założono, że sprawność silnika wynosi 0,86 oraz sprawność przekładni pasowych 0,87.

Układ ECU realizuje, m.in., funkcję przełączania trybów jazdy. W tym celu zdefiniowano współczynnik redukcji  $b$  dla czterech trybów jazdy (*Eco*, *City*, *Load*, *Sport*). Przy czym, dla każdego trybu używana jest inna tablica, opisująca współczynnik  $b$  – redukcję momentu. Współczynnik redukcji  $b$  modeluje charakterystyka/krzywa opisująca maksymalny moment obrotowy przy aktualnej prędkości samochodu (rys.6). Każda krzywa opisana jest za pomocą 32 punktów (od 0 km/h do 120 km/h) z równym odstępem pomiędzy sąsiednimi punktami wynoszącym ok. 4 km/h.

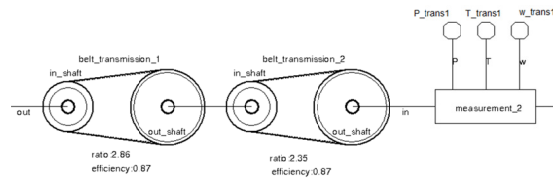


Rys.6. Wykres współczynnika redukcji  $b$  opisujący maksymalny moment obrotowy przy aktualnej prędkości samochodu

Wykres współczynnika redukcji  $b$  zrealizowano w bloku 3 (silnika) przy użyciu funkcji TLU (Table Look-Up) – w zależności od prędkości samochodu redukowany jest moment wyjściowy silnika  $T_{out}$  wg wzoru:

$$T_{out} = T_{max} \frac{b}{100} \eta \quad (1)$$

Blok 4 – modelujący przekładnie pasowe przedstawiono na rys.7.



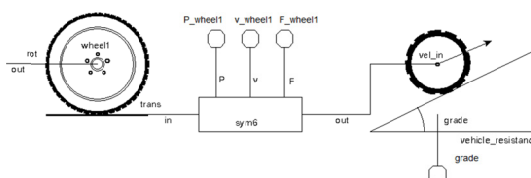
Rys.7. Blok 4 – modelujący przekładnie pasowe

Przekładnia pasowa dwustopniowa ma następujące parametry:

| Parametr                        | I stopień | II stopień |
|---------------------------------|-----------|------------|
| Przełożenie                     | 2,86      | 2,35       |
| Przełożenie całkowite           | 6,721     |            |
| Liczba zębów koła napędzającego | 28        | 34         |
| Liczba zębów koła napędzanego   | 80        | 80         |

Przyjęto jednakową sprawność 0,87 dla obu przekładni pasowych.

Blok 5 – modelujący koła, opory ruchu oraz zadawania poziomu wzniesienia przedstawiono na rys.8.



Rys.8. Blok 5 – modelujący koła i opory ruchu i zadawania poziomu wzniesienia

Na podstawie wymiarów opony (średnica felgi, szerokość opony) i wskaźnik profilu opony przeliczana jest prędkość kątowna koła na prędkość liniową samochodu.

Opory ruchu opisano zależnościami:

- opory toczenia

$$F_r = cmg \cos(\alpha) \quad (2)$$

gdzie:  $m$  – masa pojazdu [kg],  $\alpha$  – kąt nachylenia wzniesienia [rad],  $c$  – współczynnik oporów toczenia;

- opory wzniesienia

$$F_g = mg \sin(\alpha) \quad (3)$$

$$G = \frac{\alpha}{\pi/2} 100 \quad (4)$$

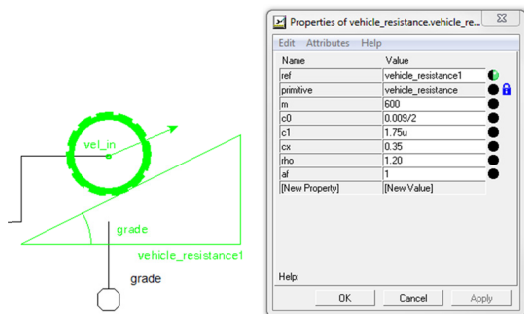
gdzie:  $\alpha$  – kąt nachylenia wzniesienia [rad],  $G$  – wielkość wzniesienia [%] (grade);

- opory powietrza

$$F_a = C_x \frac{\rho}{2} A_f v^2 \quad (5)$$

gdzie:  $C_x$  – współczynnik oporów powietrza,  $\rho=1,226 \text{ kg/m}^3$  – gęstość powietrza,  $A_f$  – powierzchnia czołowa pojazdu,  $v$  – prędkość pojazdu.

Zadawanie parametrów oporów ruchu i poziomu wzniesienia przedstawiono rys. 9.



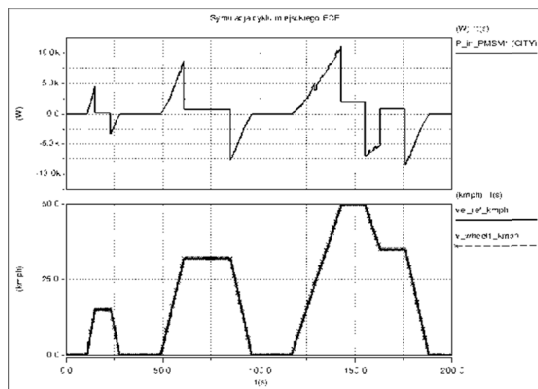
Rys.9. Zadawanie parametrów oporów ruchu i poziomu wzniesienia

#### 4. Wyniki symulacji

Ze względu na ograniczoną objętość artykułu przedstawiono tylko wybrane wyniki symulacji samochodu „ELV001” (rys.10, rys.11).

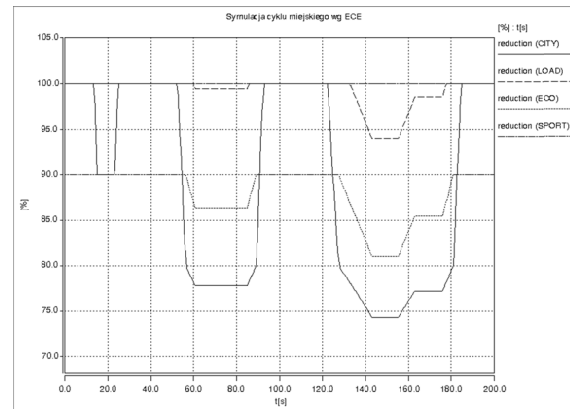
Wykonano symulację cyklu miejskiego ECE [20] dla różnych trybów jazdy pojazdu.

Pobór mocy jednego z silników ( $P_{PMSM1}$ ) oraz prędkość zadana ( $vel\_ref\_kmph$ ) w cyklu miejskim ECE przedstawiono na rys.10.



Rys.10. Pobór mocy silnika ( $P_{PMSM1}$ ) oraz prędkość zadana ( $vel\_ref\_kmph$ ) w cyklu miejskim ECE

Na rys. 11 przedstawiono zmianę współczynnika redukcji momentu wyjściowego w zależności od prędkości pojazdu w cyklu miejskim dla różnych trybów jazdy.



Rys.11. Zmiana współczynnika redukcji w zależności od trybu jazdy – cykl miejski ECE

#### 5. Podsumowanie

Opracowany model symulacyjny zostanie wykorzystany do optymalizacji struktury i algorytmów sterowania układu napędowego prototypu samochodu „ELV001”.

W pierwszym etapie model zostanie zweryfikowany eksperymentalnie – wyniki symulacji zostaną porównane z wynikami badań samochodu „ELV001” na hamowni.

W następnym etapie zweryfikowany model będzie punktem wyjścia do opracowania bardziej wydajnych metod przeniesienia napędu i zastosowania zaawansowanych algorytmów sterowania trakcyjnego w samochodzie „ELV001” – ABS, ESP i dyferencjału elektrycznego z ograniczonym poślizgiem.

Opracowanie pakietu do symulacji nowoczesnych układów napędowych samochodów elektrycznych w programie Synopsys/Saber, może stanowić wartościową ofertę dla projektantów i producentów samochodów elektrycznych.

#### 6. Literatura

- [1] Bernatt J., Gawron S., Król E.: Nowoczesne silniki z magnesami trwałymi do zastosowań trakcyjnych, Materiały konferencyjne MET 2009, s. 146-150.
- [2] Bernatt J., Król E.: *Comparison of Two Versions of Electric Motors Used in a Drivetrain of an Electric Car*, The 25th World Battery, Hybrid and Fuel Cell Electric Vehicle Symposium & Exhibition EVS-25 Shenzhen, China, Nov. 5-9, 2010, pp. 1-4.
- [3] Chan, C.C.: *The state of the art of electric, hybrid, and fuel cell vehicles*, Proceedings of the IEEE Vol.: 95, Issue: 4, 2007, pp. 704 – 718.

- [4] Chau, K.T.; Chan, C.C.; Chunhua Liu: *Overview of Permanent-Magnet Brushless Drives for Electric and Hybrid Electric Vehicles*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol. 55, Issue 6, 2008, pp. 2246 – 2257.
- [5] Chen K., Bouscayrol A., Berthon A., Delarue Ph., Hissel D., and Trigui R.: *Global modeling of different vehicles*, IEEE Vehicular Technology Magazine, JUNE 2009, pp. 80-89.
- [6] Drabek T., Mikula S.: *Synteza układu sterowania pojazdu samochodowego z napędem elektrycznym*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 87 Nr 4, 2011, pp. 203-206.
- [7] Gao D.W., Mi Ch., Emadi A.: *Modeling and Simulation of Electric and Hybrid Vehicles*, Proceedings of the IEEE Vol.: 95, Issue: 4, 2007, pp. 729 – 745.
- [8] Gillespie Thomas D., *Fundamentals of Vehicle Dynamics*, Society of Automotive Engineers SAE, 1992.
- [9] Hori Y.: *Future vehicle driven by electricity and Control-research on four-wheel-motored "UOT electric march II"*, Industrial Electronics, IEEE Transactions on, Vol.: 51, Issue: 5, 2004, pp. 954 – 962.
- [10] Magallan G.A., De Angelo C.H., Bisheimer G., Garcia G.: *A neighborhood electric vehicle with electronic differential traction control*. 34th Annual Conference of IEEE Industrial Electronics, 2008. IECON 2008. pp. 2757 – 2763.
- [11] Onoda S. Emadi A.: *PSIM-based modeling of automotive power systems: conventional, electric, and hybrid electric vehicles*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, VOL. 53, NO. 2, MARCH 2004, pp. 390 – 400.
- [12] Paweletz A.: *Efficient Energy Conversion through the Evolution of the Electrical Machine Topology*, Przegląd Elektrotechniczny, R. 84 Nr 6, 2008, pp. 49-58.
- [13] Ritchie E., Tutelea L.: *An overview of electric vehicle in-wheel drive systems*, 39th International Symposium on Electrical Machines SME'2003, 9 – 11 June 2003, Gdańsk – Jurata, Poland, pp.1-21.
- [14] Santini D. J. *Highway Vehicle Electric Drive in the United States: Current Status and Issues*. A Discussion Paper for Clean Cities Coalitions and Stakeholders to Develop Strategies for the Future, September 2009, ([http://www1.eere.energy.gov/cleancities/pdfs/santini\\_electric\\_drive\\_briefing.pdf](http://www1.eere.energy.gov/cleancities/pdfs/santini_electric_drive_briefing.pdf)).
- [15] Shimizu H., Harada J., Bland C., Kawakami K., and Chan L.: *Advanced Concepts in Electric Vehicle Design*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, VOL. 44, NO. 1, FEBRUARY 1997, pp. 14-18.
- [16] Wang, L.; Collins, E. G.; Li, H.: *Optimal Design and Real-Time Control for Energy Management in Electric Vehicles*, Vehicular Technology, IEEE Transactions on, vol.60, no.4, pp.1419-1429, May 2011.
- [17] Williamson S. S, Lukic S. M., , IEEE, and Emadi A.: *Comprehensive Drive Train Efficiency Analysis of Hybrid Electric and Fuel Cell Vehicles Based on Motor-Controller Efficiency Modeling*, IEEE Transactions on Power Electronics, VOL. 21, NO. 3, MAY 2006, pp. 730-740.
- [18] Zhu Z. Q., Howe D.: *Electrical Machines and Drives for Electric, Hybrid, and Fuel Cell Vehicles*, Proceedings of the IEEE Vol.: 95, Issue: 4, 2007, pp. 746 – 765.
- [19] „Innowacyjna Gospodarka Działanie 5.1- Dyfuzja Innowacji” realizowany jest projekt: „Budowa rynku pojazdów elektrycznych, infrastruktury ich ładowania – podstawą bezpieczeństwa energetycznego” Mielecka Agencja Rozwoju Regionalnego MARR (<http://www.marr.com.pl/poig/index-1.html>; <http://www.marr.com.pl/poig/index-6.html>).
- [20] *Standardowe cykle jazdy stosowane do oceny emisji spalin* (<http://www.dieselnet.com/>).
- [21] Symulator Synopsys/Saber: (<http://www.synopsys.com/Systems/Saber/Pages/default.aspx>)

### Autorzy:

- Dr inż. Michał Michna, tel. 058347 2979,  
email: mchina@ely.pg.gda.pl
- Mgr inż. Dominik Adamczyk, tel. 058347 1939  
email: dadamc@ely.pg.gda.pl
- Mgr inż. Filip Kutt, tel. 058347 1939  
email: fkutt@ely.pg.gda.pl
- Dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski, prof. nadzw. PG  
tel. 058347 2087, email: m.ronkowski@ely.pg.gda.pl  
Politechnika Gdańska, Wydział Elektrotechniki  
i Automatyki, ul. G. Narutowicza 11/12, 80-233 Gdańsk
- Dr inż. Jakub Bernatt, tel. 0322582041  
email: j.bernatt@komel.katowice.pl
- Mgr inż. Paweł Pistelok,  
email: p.pistelok@komel.katowice.pl
- Mgr inż. Emil Król, email: e.krol@komel.katowice.pl  
Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”, 40-203 Katowice,  
al. Roździeńskiego 188.
- Mgr inż. Łukasz Kucharski, tel. 0227596672|  
lukasz.kucharski@imotive.pl
- Maciej Kwiatkowski  
maciej.kwiatkowski@imotive.pl  
Impact Automotive Technologies, ul. Sienkiewicza 19,  
05-800 Pruszków
- Łukasz Byrski, tel. 0126192390  
l.byrski@car-t.com
- Mariusz Koziół, tel. 0126192390  
m.koziol@car-t.com  
CAR Technology, Al. Jana Pawła II 41L, 31-864 Kraków

### Recenzent

Prof. dr hab. inż. Ryszard Pałka