

**Mateusz Wiślański, RIOT Technologies Sp. z o. o., Kraków**  
**Grzegorz Karpel, Daniel Prusak, Grzegorz Góra**  
**AGH, Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków**

## **ELEKTRONICZNY DYFERENCJAŁ W SAMOCHODZIE ELEKTRYCZNYM**

### **ELECTRONIC DIFFERENTIAL FOR ELECTRIC CAR**

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono projekt elektronicznego dyferencjału przeznaczonego dla samochodu elektrycznego. Konstrukcja pojazdu jest nowa i może być zasilana z akumulatorów lub ogniw wodorowych. W pierwszej części referatu opisano budowę samochodu. Wyjaśniono, dlaczego wymagane jest zastosowanie elektronicznego dyferencjału. Urządzenie zostało przygotowane dla samochodu wyposażonego w cztery silniki typu BLDC. Maksymalna moc dla każdego z napędów wynosi 50kW. Następnie pokazano algorytm zastosowany w układzie. Algorytm opiera się na wyliczeniach środka ciężkości pojazdu, oszacowaniu kierunku poruszania i ostatecznie korekty momentu. Dodatkowo w algorytmie zaimplementowano funkcję likwidacji poślizgu. Ostatnia część artykułu przedstawia implementację algorytmu. Jako platformę sprzętową wybrano układ FPGA Cyclone IV firmy Altera. Podsumowując opisano wady i zalety opracowanego urządzenia.

**Abstract:** The paper presents the design of electronic differential destined for the electric car. The construction of the vehicle is new and can be powered from batteries or hydrogen fuel. In the first part of the paper the construction of a car is shown. It explains why the electronic differential is required. The device has been prepared for a car with four BLDC motors. Maximum power for each drive is 50kW. Then, the algorithm used in the system is described. The algorithm is based on calculations of the center of gravity of the vehicle, estimating the direction of movement and adjustment of torque. Additionally, the elimination of the slip has been implemented. In the last part of the hardware implementation the algorithm is presented. As a hardware platform FPGA Altera Cyclone IV was used. In the conclusion the advantages and disadvantages of the system are described.

**Słowa kluczowe:** *samochód elektryczny, elektroniczny dyferencjał*  
**Keywords:** *electric car, electronic differential*

### **1. Wstęp**

W ostatnich latach poszukuje się rozwiązań, które pozwoliłyby na ekologiczne i ekonomiczne wykorzystanie napędów elektrycznych w dziedzinie transportu [1]. Szczególną uwagę zwraca się na możliwość zastosowania takich napędów w pojazdach osobowych [2]. Ważnym aspektem takiego podejścia jest minimalizacja elementów mechanicznych w układzie napędowym. Wśród wielu rozwiązań bada się konfigurację, gdzie w czterokołowym pojeździe, każde z kół napędzane jest poprzez osobny silnik [3]. Takie połączenie napędów wymaga zbudowania odpowiedniego układu sterowania, który zapewni kontrolowany rozkład momentów dla każdego z kół w zależności od sytuacji drogowej. Dodatkowo taki system umożliwia realizację innych funkcji, takich jak system antypoślizgowy lub system łagodnego ruszania ze wzniesienia.

### **2. Samochód elektryczny**

#### **2.1. Konstrukcja mechaniczna**

Na rysunku 1 pokazano opracowany i zbudowany samochód elektryczny wyposażony w elektroniczny dyferencjał. Samochód budowano w ramach projektu prowadzonego przez Wojskową Akademię Techniczną jako demonstrator technologii [4]. Głównym celem było zaprezentowanie możliwości wykorzystania ogniw wodorowych do zasilania między innymi pojazdów elektrycznych. Pojazd wykonywany był przez firmę typu spin-off RIOT Technologies przy współpracy naukowców z Akademią Górniczo-Hutniczą w Krakowie.

Konstrukcja samochodu oparta jest na stalowej ramie nośnej, do której przymocowane zostały poszczególne komponenty. Rama podzielona została na trzy główne części: część przednią, część środkową i część tylną. Część przednia obejmuje mocowania zawieszenia przedniego wraz z układem kierowniczym i napędowym,

ale także przedni pakiet baterii LiPoFe4 i chłodnicę do chłodzenia obiegu wody do silników. Część środkowa obejmuje dwuosobową kabinę dla kierowcy i pasażera wraz z otoczeniem kierowcy (deska rozdzielcza, wskaźniki, pedaliera oraz szyba przednia). Także w tej części ramy umieszczone zostały takie układy, jak płyta sterująca elektronicznego dyferencjału, ładowarka pakietów LiPoFe4, układ kontroli ładowania baterii, dotykowy ekran informacyjny oraz regulator kontroli ładowania akumulatorów z ogniwa wodorowego. Część tylna ramy obejmuje mocowanie zawieszenia tylnego, system napędu kół tylnych, pakiety baterii żelowych oraz mocowanie ogniwa paliwowego wraz z dedykowanym zbiornikiem wodorowym. Konstrukcja ramy wykonana jest jako spawana, a poszczególne jej części skręcane są ze sobą za pomocą śrub. Całość pomalowana jest proszkowo.



Rys. 1. Wygląd samochodu elektrycznego

Karoseria samochodu wykonana jest z materiałów kompozytowych, które mocowane są do ramy przy pomocy metalowych uchwytów profilowanych. Poszycie także zostało podzielone na trzy główne części składowe: maska z przodu, boki oraz kłapa tylna. Aby zmniejszyć stopień skomplikowania poszczególne elementy składowe wykonane zostały jako niezależne grupy elementów i zamocowane do stalowej konstrukcji ramowej. Część przednia obejmuje element środkowy oraz dwie części boczne, część środkowa obejmuje prawy i lewy pas boczny oraz niezależnie podnoszone drzwi, natomiast część tylna stanowi jednolity kawałek unoszony na zawiasach w kierunku górnym. Wszystkie elementy kompozytowe wykonane zostały z włókien węglowych z przekładką z tworzywa sztucznego przy zastosowaniu metody infuzji [5].

## 2.2. Układ napędowy

Układ napędowy zbudowano w oparciu o cztery silniki elektryczne typu BLDC (ang. BrushLess Direct-Current motor) HPM-20KW firmy Goldenmotor. Maksymalna chwilowa moc każdego z napędów to 50kW. Układ napędowy samochodu stanowią cztery silniki, napędzające w sposób niezależny każde z kół samochodu. Konstrukcja oparta jest o indywidualnie zaprojektowany zespół z przekładnią łańcuchową redukującą obroty silnika, dwoma przegubami typu tripod oraz zwrotnicą do której przymocowane jest koło wraz z układem hamulcowym. Silnik zamocowany jest do ramy, a moment obrotowy przekazywany jest za pomocą półosi. Dzięki temu zmniejszona jest masa nieresorowana w porównaniu z rozwiązaniami, gdzie silnik umieszczony jest wprost na zwrotnicy. Zawieszenie zbudowane jest jako podwójny wahacz typu A z dedykowanym gwintowanym amortyzatorem gazowym posiadającym możliwość regulacji skoku. Układ napędowy zbudowany został w taki sposób, że zamiast przekładni łańcuchowej można zastosować przekładnię pasową z paskiem zębatym.

## 3. Układ elektronicznego dyferencjału

### 3.1. Założenia

Zadaniem opracowanego układu elektronicznego dyferencjału jest kontrola zadawanego momentu na każdym kole tak, aby uzyskać stały wektor siły dla danego kierunku jazdy przy dowolnej chwilowej prędkości każdego z kół. Teoretycznie gdyby każdy z napędów dysponował stałym i identycznym momentem, to z punktu kinematyki ruchu elektroniczny dyferencjał nie byłby potrzebny. Gdyż stały moment generuje stałą siłę. Siła przyłożona w punkcie styku opony z podłożem nadaje stałe przyspieszenie. W sytuacji wejścia w zakręt, kąt skrętu kół przednich zmienia wektor siły generując przyspieszenie normalne.

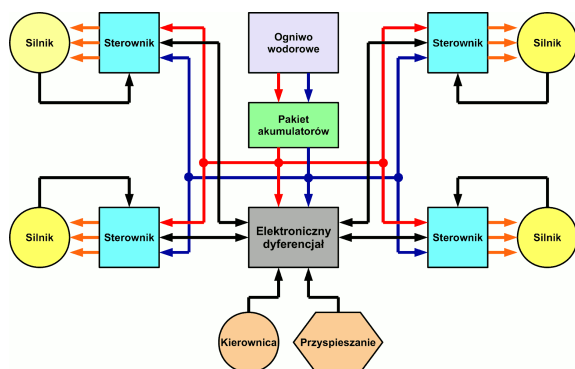
W praktyce pojawiają się dwa problemy, moment zadawany przez silnik nie jest stały i zmienia się (maleje) wraz z prędkością. Po drugie koło może utracić przyczepność i oszacowanie rzeczywistej prędkości może być niemożliwe. Dodatkowo rozkład masy i konstrukcja zawieszenia może powodować podsterowność lub nadsterowność pojazdu.

Oznacza to, że jeżeli udało się w sposób ciągły kontrolować moment na każdym kole, to możliwe byłoby polepszenie właściwości jezd-

nych pojazdu, bez rozbudowy układu o elementy mechaniczne. Opracowany układ powinien możliwie jak najmniej ingerować w obwód sterowania i powinna istnieć możliwość jego wyłączenia.

### 3.2. Schemat podłączenia

Schemat blokowy połączeń najważniejszych elementów układu napędowego pokazano na rysunku 2. Podstawą są cztery silniki wyposażone w czujnik Halla kontrolowane przez sterowniki VEC700. Sterownik ten potrafi pracować przy napięciach zasilania: 48V/72V/96V. Maksymalny zadawany prąd to 700A. Prąd ciągły szacuje się na poziomie 400A. Sterowniki zasilane są z pakietu akumulatorów o napięciu 72V, które to mogą być doładowywane przez ogniwo wodorowe. Dodatkowo sterownik umożliwia odzysk energii przy hamowaniu.



Rys. 2. Schemat połączeń dla elektronicznego dyferencjału

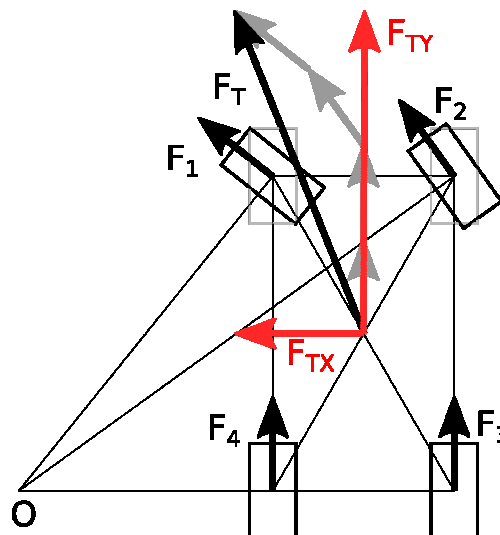
Podstawą systemu jest układ elektronicznego dyferencjału, do którego trafiają sygnały prędkości każdego z napędów oraz sygnały zadawane przez kierowcę takie jak kąt skręcenia kierownicy oraz położenie pedału przyspieszenia.

### 3.3. Algorytm

W pierwszym kroku algorytmu wyznaczana jest aktualna prędkość każdego z kół. Prędkość kół jest obliczana poprzez zliczenie liczby impulsów wzorcowych pomiędzy zmianą stanu z czujnika Halla. Prędkości z czterech kół zostają posortowane od najmniejszej do największej. Na tym etapie obliczeń odrzucana jest prędkość najmniejsza i dwie największe.

Drugim krokiem jest odczyt położenia kąta skręcenia kierownicy. Kąt ten informuje nas o wymaganym kierunku jazdy. Zakładając, że rozkład sił jest taki, jak przedstawiono na rysunku 3, wyznacza się teoretyczną prędkość dla

pozostałych kół. Siła  $F_T$  jest wypadkową sił  $F_1, F_2, F_3, F_4$ . Składowa  $F_{TX}$  generuje siłę normalną, a  $F_{TY}$  styczną. Składowa styczna wpływa na prędkość, natomiast składowa normalna może być wykorzystana do korekty pod i nadsterowności pojazdu. Przewidywany tor pojazdu zaznaczono kolorem szarym.



Rys. 3. Rozkład sił dla pojazdu

W kolejnym etapie algorytmu następuje wykrycie poślizgu lub blokady któregoś z kół. Wykonuje się to poprzez porównanie prędkości teoretycznej każdego z kół z prędkością rzeczywistą. Jeżeli aktualna prędkość jest różna od teoretycznej o wartość przyjętego marginesu, uznaje się, że dane koło posiada prędkość błędną. Gdy prędkość koła jest zbyt duża oznacza to, iż koło znajduje się w poślizgu i w kolejnym etapie należy zastosować procedurę antypoślizgową.

Jeżeli jednak prędkość dla danego koła jest zgodna z oczekiwaną, to prędkość ta posłuży do ostatecznego określenia prędkości pojazdu i aktualnego wektora ruchu. Z kolei określenie prędkości pojazdu oraz zadanego i aktualnego wektora ruchu daje informację, co do wymaganych sił potrzebnych do rozpędzenia pojazdu. Zakładamy, że siła w miejscu styku opony z podłożem wynika wprost z przyłożonego momentu na kole.

Ostatnim i najtrudniejszym etapem jest zadanie momentu, ale tak, aby był on proporcjonalny do przyciśniętego pedału przyspieszenia. W przyjętym rozwiązaniu zakłada się, że układ elektronicznego dyferencjału nie może zadać dodatkowego momentu, ale jedynie ująć tam gdzie jest on za duży. Założenie to przyjęto ze względów bezpieczeństwa. Analogowy sygnał

z pedału przyspieszenia podawany jest poprzez wzmacniacze operacyjne na każdy ze sterowników. Tor ten jest niezależny. Równolegle do niego połączone są wyjścia z czterech generatorów PWM (ang. Pulse-Width Modulation) pochodzących z elektronicznego dyferencjału. Im większe jest wypełnienie tym bardziej obniżamy napięcie w torze podstawowym. Gwarantuje to sytuację, w której gdy kierowca przestanie zadawać przyspieszenie to wartość napięcia będzie równa zero bez względu na to, co będzie wynikiem z obliczeń algorytmu.

Znając charakterystyki napędów, można określić czy w danej konfiguracji ruchu jest możliwe uzyskanie wymaganego momentu w każdym napędzie. Jeżeli tak, oblicza się wartość korekcyjną napięcia i ustawia się wypełnienie tak, aby sygnał analogowy odpowiadał zadanemu momentowi. Najbardziej prawdopodobną sytuacją jest stan, gdzie nie jest już możliwe uzyskanie zadanego momentu. Przykładowo, prędkość napędu jest zbyt duża i wymagany moment wykracza poza możliwości napędu. W tym wypadku algorytm określa, jaki jest możliwy maksymalny moment dla danego silnika. Stosunek pomiędzy maksymalnym momentem możliwym do uzyskania przy danej prędkości, a wymaganym posłuży do korekty momentów na pozostałych napędach. W praktyce oznacza to, że samochód pokonując zakręt powyżej pewnej prędkości dysponuje mniejszym przyspieszeniem.

W ostatnim etapie, ustalane są wypełnienia czterech generatorów PWM, których średnie napięcie jest mnożone przez zadaną wartość analogową uzyskaną z pedału przyspieszenia. Mnożenie wykonywane jest w torze analogowym przy wykorzystaniu wzmacniaczy operacyjnych. Przykładowo, jeżeli kierowca przycisnął pedał przyspieszenia w pozycji 60%, a z obliczeń algorytmu wynika, że dane koło powinno mieć tylko 30% wartość wypełnienia sygnału PWM ustawiana jest na 50%. Podsumowując, im bardziej chcemy zmniejszyć moment na danym kole, tym mniejsze wypełnienie powinno być ustawiane. W sytuacji gdy określono, iż dane koło znajduje się w poślizgu, ustawiany jest współczynnik wypełnienia na 0%, co odpowiada zadanemu momentowi równemu 0Nm.

Wypełnienie równe 100% możliwe jest w dwóch przypadkach. Gdy żadne z kół nie jest w poślizgu i tor ruchu, to jazda na wprost lub elektroniczny dyferencjał jest wyłączony.

### 3.4. Implementacja

Algorytm zaimplementowano w układzie FPGA Cyclone IV EP4CE22F17C6N firmy Altera. W pierwszej kolejności zbudowano architekturę typu SOPC (ang. System on a Programmable Chip Builder)[6]. Podstawowym elementem tego systemu jest 32-bitowy procesor NIOS II oraz pamięć typu SDRAM. Procesor połączono z elementami systemu poprzez magistralę AVALON (rysunek 4).

Algorytm elektronicznego dyferencjału zapisano w języku C przy wykorzystaniu dedykowanego środowiska Eclipse.

Use	Conn...	Name	Description	Clock	Base	End	I/O	Tags
<input checked="" type="checkbox"/>		cpu_0	Nios II Processor	clk_0				
		instruction_master	Avalon Memory Mapped Master	clk_0				
		data_master	Avalon Memory Mapped Master	clk_0				
		jtag_debug_module	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0				
<input checked="" type="checkbox"/>		sdram_0	SDRAM Controller	clk_0	0x0400_0800	0x0400_0fff		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0200_0000	0x03ff_ffff		
<input checked="" type="checkbox"/>		jtag_uart_0	JTAG UART	clk_0	0x0400_1998	0x0400_199f		
		avalon_jtag_slave	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1998	0x0400_199f		
<input checked="" type="checkbox"/>		sysid	SystemID Peripheral	clk_0	0x0400_1890	0x0400_1897		
		control_slave	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1890	0x0400_1897		
<input checked="" type="checkbox"/>		UART1_Comp_0	UART1_Comp	clk_0	0x0400_1400	0x0400_17ff		
		avalon_slave_0	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1400	0x0400_17ff		
<input checked="" type="checkbox"/>		HallEncov1_Comp_0	HallEncov1_Comp	clk_0	0x0400_1000	0x0400_13ff		
		avalon_slave_0	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1000	0x0400_13ff		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_ledpcb	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1880	0x0400_188f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1880	0x0400_188f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_swpcb	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1870	0x0400_187f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1870	0x0400_187f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_damping	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1860	0x0400_186f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1860	0x0400_186f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_adc0	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1850	0x0400_185f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1850	0x0400_185f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_adc1	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1840	0x0400_184f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1840	0x0400_184f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_adc2	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1830	0x0400_183f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1830	0x0400_183f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_adc3	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1820	0x0400_182f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1820	0x0400_182f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_mcr	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1810	0x0400_181f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1810	0x0400_181f		
<input checked="" type="checkbox"/>		pio_scr	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1800	0x0400_180f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1800	0x0400_180f		

Rys. 4. Architektura SOPC

Dodatkowo system wyposażono w komunikację szeregową UART oraz cyfrowe porty wejścia/wyjścia. Porty wejściowe odpowiadają za transmisję wartości odczytanych z przetworników analogowo-cyfrowych oraz przełączników jednobitowych. Porty wyjściowe przeznaczone jako rejestry do określenia wartości wypełnień dla generatorów PWM oraz do aktywacji dodatkowych urządzeń w pojeździe, takich jak wentylatory czy oświetlenie.

W części sprzętowej zbudowano własne bloki realizujące generację sygnału PWM i obsługę przetworników analogowo-cyfrowych (rys. 5). Całość połączono w dedykowanej aplikacji Quartus II [7].

Rezultatem opracowanego systemu jest architektura sprzętowo-programowa, w której część programowa jest wspomagana przez część sprzętową [8]. Dla samego systemu SOPC wymagane jest 5864 elementów logicznych, 3533 przerzutników i 118144 bitów pamięci.



Zastosowana architektura sprzętowo-programowa oparta na układzie FPGA pozwala na dużą elastyczność w dostosowaniu algorytmu do rzeczywistego mechanizmu. Oprócz kalkulacji związanych z samym algorytmem, możliwe jest jej użycie do kontroli innych podsystemów samochodu. W następnym kroku badań układ elektronicznego dyferencjału zostanie połączony z nadrzędnym systemem autonomicznym.

Algorytm elektronicznego dyferencjału obejmuje tylko kontrolę momentu dla ruchu na wprost i w zakręcie. Dodatkowo wprowadzono system antypoślizgowy.

W przyszłości planuje się rozbudowę algorytmu o system wspomagania startu ze wzniesienia. W takiej konfiguracji zostanie użyty czujnik orientacji, w który to wyposażona jest płyta DE0-nano.

Możliwe też jest stworzenie bazy parametrów dla różnej techniki jazdy i tak na przykład przy jeździe sportowej można zwiększyć margines wykrywania poślizgu, a przy jeździe ekonomicznej minimalizować wysokie przyspieszenia.

## 5. Literatura

- [1]. Bogusz P., Korkosz M., Prokop J.: „Analiza porównawcza różnych konstrukcji maszyn reluktancyjnych przełączalnych przeznaczonych do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, nr 1, str. 113-118, 2015.
- [2]. Ehsani M., Gao Y., Emadi A.: „Modern electric, hybrid electric and fuel cell vehicles”, CRC Press 2010.
- [3]. Husain I.: „Electric and hybrid vehicle - design fundamentals”, CRC Press LLC, 2003.
- [4]. Wojskowa Akademia Techniczna.: „Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowanie” POIG.01.03.01-14-016/08.
- [5]. Faron H., Marcinkowski W., Prusak D.: „Composite bodywork design and creation process in FSAE : case study AGH Racing”, *International Journal of Mechanical Engineering*, ISSN 2319-2240. — 2015 vol. 4 iss. 6, str. 13–20.
- [6]. Altera SOPC Builder.: [https://www.altera.com/en\\_US/pdfs/literature/ug/ug\\_sopc\\_builder.pdf](https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/ug_sopc_builder.pdf), 2016-02-03.
- [7]. Altera Quartus II.: <http://www.altera.com>, 2016-02-03.
- [8]. Petko M., Gac K., Góra G., Karpiel G., Ochoński J.: „Acceleration of parallel robot trajectory generation in FPGA”, *IEEE Conference on Industrial Electronics and Applications*, 2013

## Autorzy

mgr inż. Mateusz Wiślański  
RIOT Technologies Sp. z o. o.  
ul. Czarnowiejska 50b, 30-054 Kraków  
kontakt@riot.com.pl; budowa pojazdu

dr inż. Grzegorz Karpiel  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
gkarpiel@agh.edu.pl;  
algorytm elektronicznego dyferencjału

dr inż. Daniel Prusak  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
daniel.prusak@agh.edu.pl  
konstrukcja mechaniczna

mgr inż. Grzegorz Góra  
Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie  
al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków  
ggora@agh.edu.pl; implementacja sprzętowa

***Samochód zbudowano w ramach projektu POIG.01.03.01-14-016/08 „Nowe materiały fotoniczne i ich zaawansowane zastosowania”***