

Elektroniczny dyferencjał w samochodzie elektrycznym

Grzegorz Karpel, Daniel Prusak, Grzegorz Góra

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 przez 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 przy współpracy naukowców z Akademią Górniczo-Hutniczej 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

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 50 kW. Następnie pokazano algo-

rytm zastosowany w układzie. Algorytm opiera się na wyliczeniach środka ciężkości pojazdu, oszacowaniu kierunku poruszania się 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.

Słowa kluczowe: samochód elektryczny, elektroniczny dyferencjał

🇬🇧 ELECTRONIC DIFFERENTIAL FOR ELECTRIC CAR

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.

Keywords: electric car, electronic differential

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, pedałiera 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



Rys. 1. Wygląd samochodu elektrycznego

wodorowym. Konstrukcja ramy wykonana jest jako spawana, a poszczególne jej części skręcane są ze sobą za pomocą śrub. Całość pomalowana jest proszkowo.

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 50 kW. 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

obrotu silnika, dwoma przegubami typu tripod oraz zwrotnicą, do której przytworzone 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 widzenia dynamiki ruchu elektroniczny dyferencjał nie byłby potrzebny, gdyż stały moment generuje stałą siłę napędową, a stała siła przyłożona w punkcie styku opony z podłożem nadaje stałe przyspieszenie. W sytuacji wejścia pojazdu w zakręt, kąt skrętu kół przednich wpływa tylko na przyspieszenie normalne wynikające z samej natury ruchu po okręgu.

W praktyce pojawiają się dwa problemy: po pierwsze, moment zadawany przez silnik nie jest stały i zmienia się (maleje) wraz z prędkością, a 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 udałoby się w sposób ciągły kontrolować moment na każdym kole, to możliwe byłoby polepszenie właściwości jezdnych 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

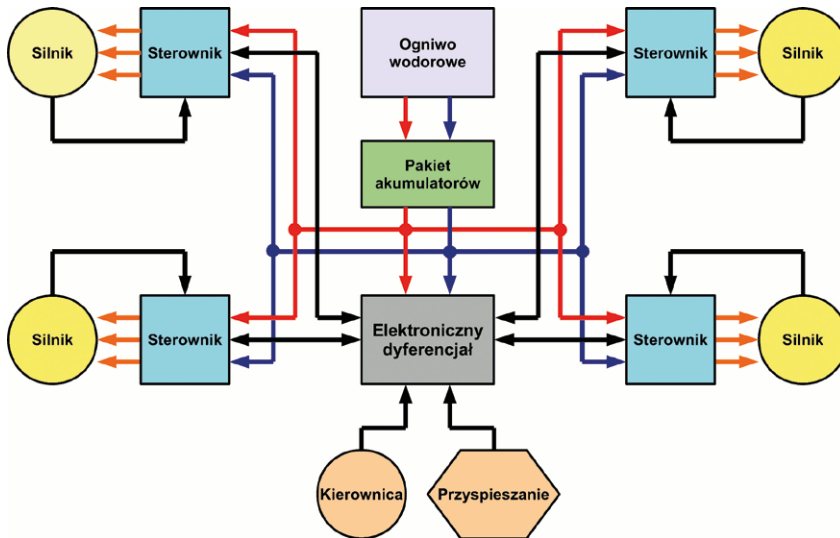
Schemat blokowy połączeń najważniejszych elementów układu napędowego pokazano na rysunku 2. Podstawą są cztery silniki wyposażone w czujnik Halla, kontrolowane przez sterowniki HPC500H96400. Sterownik ten potrafi pracować przy napięciach zasilania: 72 V / 96 V. Maksymalny chwilowy zadawany prąd to 400 A. Prąd ciągły szacuje się na poziomie 200 A. Sterowniki zasilane są z pakietu akumulatorów o napięciu 96 V (przód) 72 V (tył), które mogą być doładowywane przez ogniwo wodrowe. Dodatkowo sterownik umożliwia odzysk energii przy hamowaniu.

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 występujących pomiędzy zmianami stanu sygnału pochodzącego z czujnika Halla. Prędkości z czterech kół zostają posortowane od najmniejszej do największej. Na tym etapie obliczeń odrzucana jest prędkość najmniejsza i dwie największe.

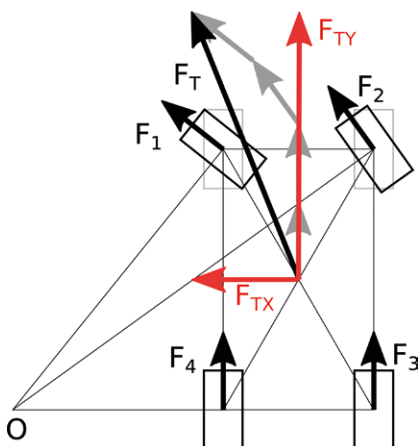
Drugim krokiem jest odczyt położenia kąta skręcenia kierownicy. Kąt ten



Rys. 2. Schemat połączeń dla elektronicznego dyferencjału

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.

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 danego koła jest różna od prędkości teoretycznej



Rys. 3. Rozkład sił dla pojazdu

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 rozpędzania 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. Równoległe 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%.

W sytuacji, gdy określono, iż dane koło znajduje się w poślizgu, ustawiany jest współczynnik wypełnienia na 0%, co odpowiada zadanemu momentowi równemu 0 Nm.

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 CycloneIV EP4CE22F17C6N firmy Altera. W pierwszej kolejności

zbudowano architekturę typu SOPC (ang. *System on a Programmable Chip*) [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.

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 przeznaczono 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 (rysunek 5). Całość połączono w dedykowanej aplikacji Quartus [7].

Rezultatem opracowanego systemu jest architektura sprzętowo-programowa, w której część programowa jest wspomagana przez część sprzętową [8]. Dla samego systemu SOPC wymagane są 5864 elementy logiczne, 3533 przerzutniki i 118144 bity pamięci.

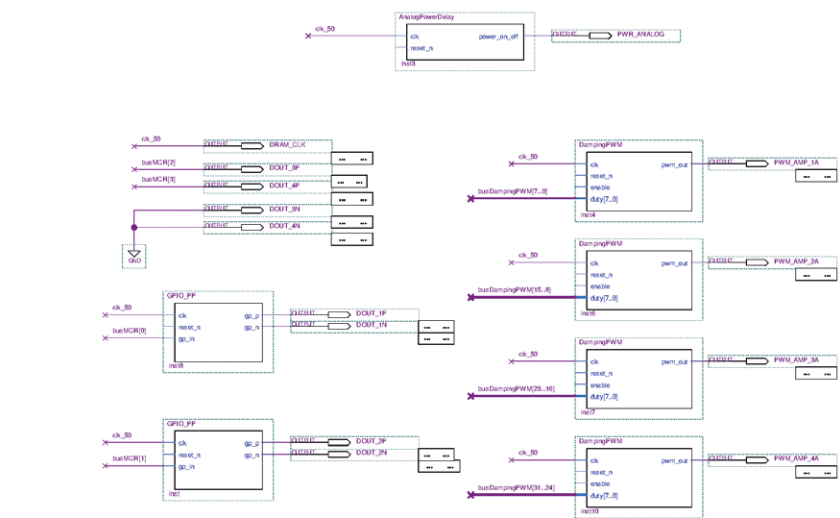
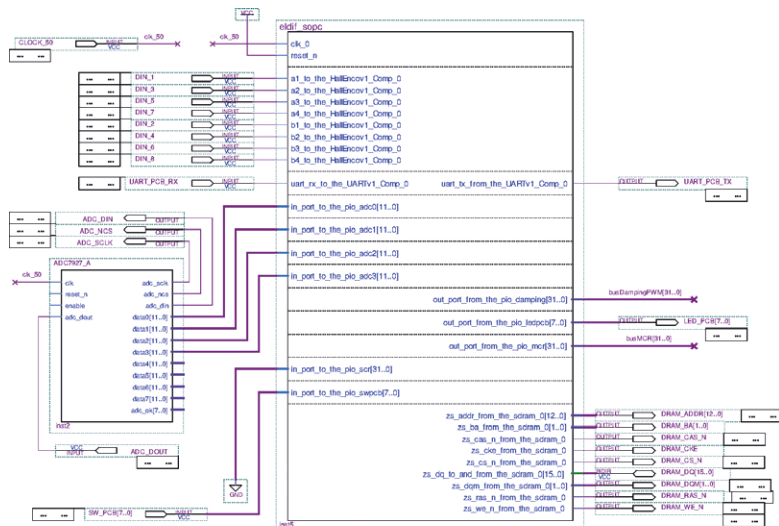
Zasoby potrzebne do realizacji całego systemu elektronicznego dyferencjału zebrano w tabeli 1.

3.5. Płyta główna

Płyta główna elektronicznego dyferencjału składa się z dwóch części: modułu edukacyjno-rozwojowego Terasic DE0-Nano z układem FPGA z rodziny Cyclone IV firmy Altera oraz dedykowanego obwodu drukowanego, stanowiącego interfejs z układami peryferyjnymi dyferencjału. Płytę główną pokazano na rysunku 6. Podstawowym elementem płyty głównej są cztery torry analogowe przeznaczone do niezależnego sterowania momentowego każdego z kół pojazdu. Zadaniem każdego z torów jest odtworzenie na wyjściu napięciowego sygnału wejściowego zadanego przez

Use	Conn...	Name	Description	Clock	Base	End	IRQ	Tags
✓		cpu_0	Nios II Processor	[clk]				
		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	0x0400_0800	0x0400_0fff	IRQ 0	IRQ 31
✓		sdram_0	SDRAMController	clk_0				
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0200_0000	0x03ff_ffff		
✓		jtag_uart_0	JTAG UART	clk_0				
		avalon_jtag_slave	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1898	0x0400_189f		
✓		sysid	SystemID Peripheral	clk_0				
		control_slave	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1890	0x0400_1897		
✓		UARTv1_Comp_0	UARTv1_Comp	[clock]				
		avalon_slave_0	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1400	0x0400_17ff		
✓		HallEncov1_Comp_0	HallEncov1_Comp	[clock]				
		avalon_slave_0	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1000	0x0400_13ff		
✓		pio_ledpcb	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1880	0x0400_188f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1880	0x0400_188f		
✓		pio_swpcb	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1870	0x0400_187f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1870	0x0400_187f		
✓		pio_damping	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1860	0x0400_186f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1860	0x0400_186f		
✓		pio_adc0	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1850	0x0400_185f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1850	0x0400_185f		
✓		pio_adc1	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1840	0x0400_184f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1840	0x0400_184f		
✓		pio_adc2	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1830	0x0400_183f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1830	0x0400_183f		
✓		pio_adc3	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1820	0x0400_182f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1820	0x0400_182f		
✓		pio_mcr	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1810	0x0400_181f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1810	0x0400_181f		
✓		pio_scr	PIO(ParallelIO)	clk_0	0x0400_1800	0x0400_180f		
		s1	Avalon Memory Mapped Slave	clk_0	0x0400_1800	0x0400_180f		

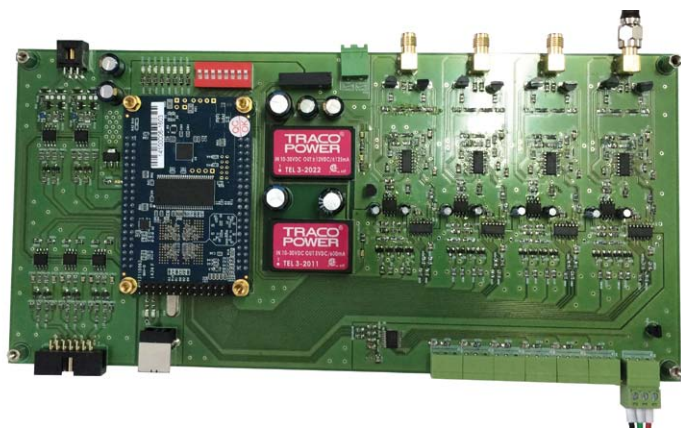
Rys. 4. Architektura SOPC



Rys. 5. Bloki sprzętowe zbudowane w aplikacji Quartus

Tabela 1. Zasoby układu FPGA potrzebne do realizacji algorytmu elektronicznego dyferencjału

Nazwa	Wymagane	Limit	[%]
Elementy logiczne	6216	22320	28
Układy kombinacyjne	5529	22320	25
Dedykowane rejestry	3659	22320	16
Wszystkie rejestry	3728	22320	16
Liczba pinów	103	154	67
Bitów pamięci	118144	608256	19
Dedykowane 9-bitowe bloki	4	132	3



Rys. 6. Płyta główna elektronicznego dyferencjału

kierowcę samochodu z uwzględnieniem tłumienia, którego poziom jest wyliczany na podstawie algorytmu zaimplementowanego w układzie FPGA.

W skład pozostałych elementów płyty wchodzi: interfejs komunikacyjny USB, tor pomiarowy wejściowych sygnałów analogowych, układ zasilania, a także izolowane galwanicznie cyfrowe wejścia oraz wyjścia o szerokim paśmie przeniesienia. Każde z wejść może pracować w standardzie napięciowym od +3V3 do +12 V, natomiast każde cyfrowe wyjście może zostać skonfigurowane do pracy jako wyjście symetryczne (ang. *push-pull*) lub z otwartym kolektorem (ang. *open collector*).

4. Wnioski

Przedstawione w artykule rozwiązanie elektronicznego dyferencjału zostało zaprojektowane dla nowej konstrukcji pojazdu. Jednak rozwiązanie to może być stosowane do innych analogicznych konfiguracji, również takich, gdzie tylko dwa koła są napędzane.

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 wspomaganie startu ze wzniesienia. W takiej konfiguracji zostanie użyty czujnik orientacji, w który wyposażona jest płyta DE-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.

Literatura

- [1] BOGUSZ P., KORKOSZ M., PROKOP J.: *Analiza porównawcza różnych konstrukcji maszyn reluktancyjnych przełączalnych, przeznaczonych do napędu lekkiego pojazdu elektrycznego*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problematyczne” 1/2015.
- [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”, vol. 4 iss. 6, 2015.
- [6] Altera SOPC Builder.: https://www.altera.com/en_US/pdfs/literature/ug/ug_sopc_builder.pdf, 2016-02-03.
- [7] Altera Quartus.: <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

dr inż. Grzegorz Karpiel – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: gkarpiel@agh.edu.pl;

dr inż. Daniel Prusak – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: daniel.prusak@agh.edu.pl

mgr inż. Grzegorz Góra – Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie, e-mail: ggora@agh.edu.pl