

Dr hab. inż. Wojciech Skarka, prof. nzw. w Pol. Śl.
Politechnika Śląska, Instytut Podstaw Konstrukcji Maszyn
e-mail: wojciech.skarka@polsl.pl

INNOWACYJNE METODY POPRAWY EFEKTYWNOŚCI ENERGETYCZNEJ TRANSPORTU NA PRZYKŁADZIE ENERGOOSZCZĘDNEGO BOLIDU ELEKTRYCZNEGO MUSHHELLKA STARTUJĄCEGO W ŚWIATOWYCH WYŚCIGACH SHELL ECO- MARATHON

Streszczenie: Elektryczny bolid MuShellka budowany przez Politechnikę Śląską do startu w zawodach Shell Eco-marathon zawiera kompleksowe i innowacyjne rozwiązania mające na celu maksymalne ograniczenie energii zużywanej do jazdy bolidu. W zawodach w Rotterdamie w 2013 roku bolid przejechał 454,7 km na jednej kilowatogodzinie energii. W artykule przedstawiono metodykę projektowania całości pojazdu mającej na celu maksymalizację osiągnięć energooszczędności oraz podporządkowaną nowym technicznym rozwiązaniom w zakresie projektowania ergonomicznego, ograniczeniu masy konstrukcji nośnej kadłuba pojazdu, ograniczeniu oporów powietrza i oporów jazdy obejmujących opory toczenia kół pojazdu oraz straty energii w układzie przeniesienia napędu planowaniu strategii jazdy i określeniu wpływu poszczególnych cech poprzez zastosowanie modelu symulacyjnego pojazdu oraz energooszczędnemu sterownikowi silnika elektrycznego. W trakcie projektowania i wytwarzania pojazdu zastosowane zostały nowoczesne metody CAx gwarantujące uzyskanie takiego wyniku.

Słowa kluczowe: opory ruchu, opory powietrza, pojazd elektryczny, energooszczędność, optymalizacja konstrukcji, Bolid MuShellka, Shell Eco-marathon.

INNOVATIVE METHODS TO IMPROVE THE ENERGY EFFICIENCY OF TRANSPORT BASED ON THE EXAMPLE OF ENERGY-EFFICIENT ELECTRIC RACE CAR MUSHHELLKA COMPETING AT THE GLOBAL RACES SHELL ECO -MARATHON

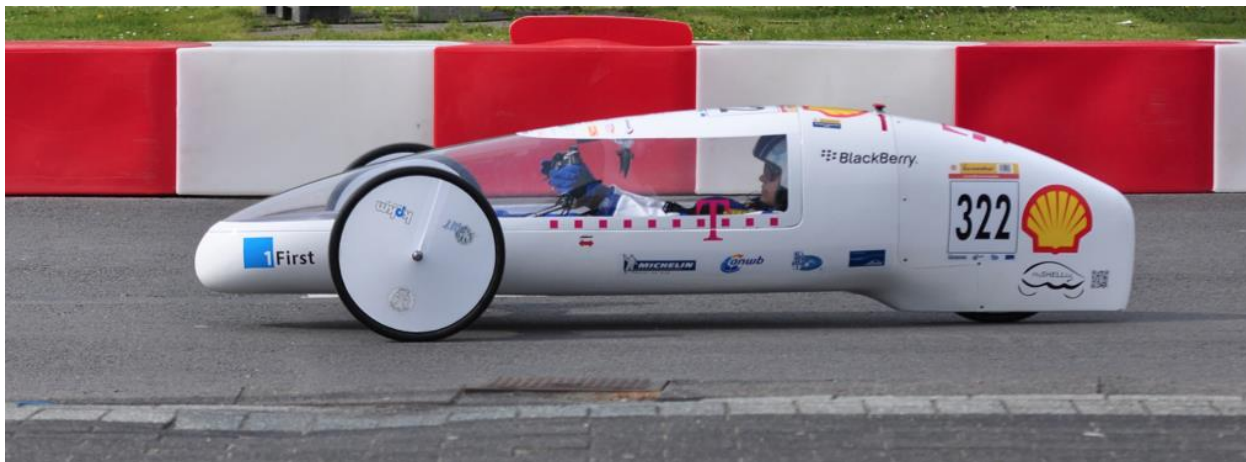
Abstract: Electric race car MuShellka built by Silesian University of Technology to compete in Shell Eco -marathon competition provides comprehensive and innovative solutions to the maximum limit of the energy used to drive the car. In the competition in Rotterdam in 2013, the car covered 454.7 kilometers on one kW of energy. The paper presents methodology of the whole vehicle design aimed at maximizing energy efficiency and in accordance with new technical solutions in the field of ergonomic design, reduced weight of the vehicle hull superstructure, reducing air resistance and driving resistance, covering the car rolling resistance and energy losses in the transmission system, planning driving strategies and determining the impact of individual characteristics by the use of a simulation model of the vehicle and energy-efficient electric motor controller . During the design and construction of the vehicle modern methods of CAx have been used which guarantee obtaining such a result.

Keywords: motion resistance, air resistance, electric vehicle, energy efficiency, optimization, race car MuShellka, Shell Eco-marathon.

1. WPROWADZENIE

Elektryczny bolid „MuShellka” [4] (Rys. 1) został zaprojektowany, skonstruowany oraz zbudowany przez Studenckie Koło Modelowania Konstrukcji Maszyn na Wydziale Mechanicznym Technologicznym Politechniki Śląskiej. Bolid przeznaczony jest do startu w światowych wyścigach Shell Eco-marathon w Rotterdamie, w Holandii, w kategorii prototypów (Prototype), czyli małych pojazdów osiągających najlepsze wyniki (przejechanie najdłuższego dystansu na danej jednostce energii) [5]. Zawody polegają na przejechaniu dziesięciu okrążeń miejskiego toru wyścigowego zużywając jak najmniejszą

ilość energii. W 2013 roku bolid osiągnął wynik 454,7 km/kWh. Osiągnięcie tak dobrego wyniku było możliwe dzięki kompleksowemu podejściu do konstrukcji całego bolidu obejmującej optymalizację wszystkich podzespołów i układów bolidu pod kątem minimalizacji zużywanej energii. Wybrane rozwiązania zastosowane w bolidzie zostały opisane poniżej.



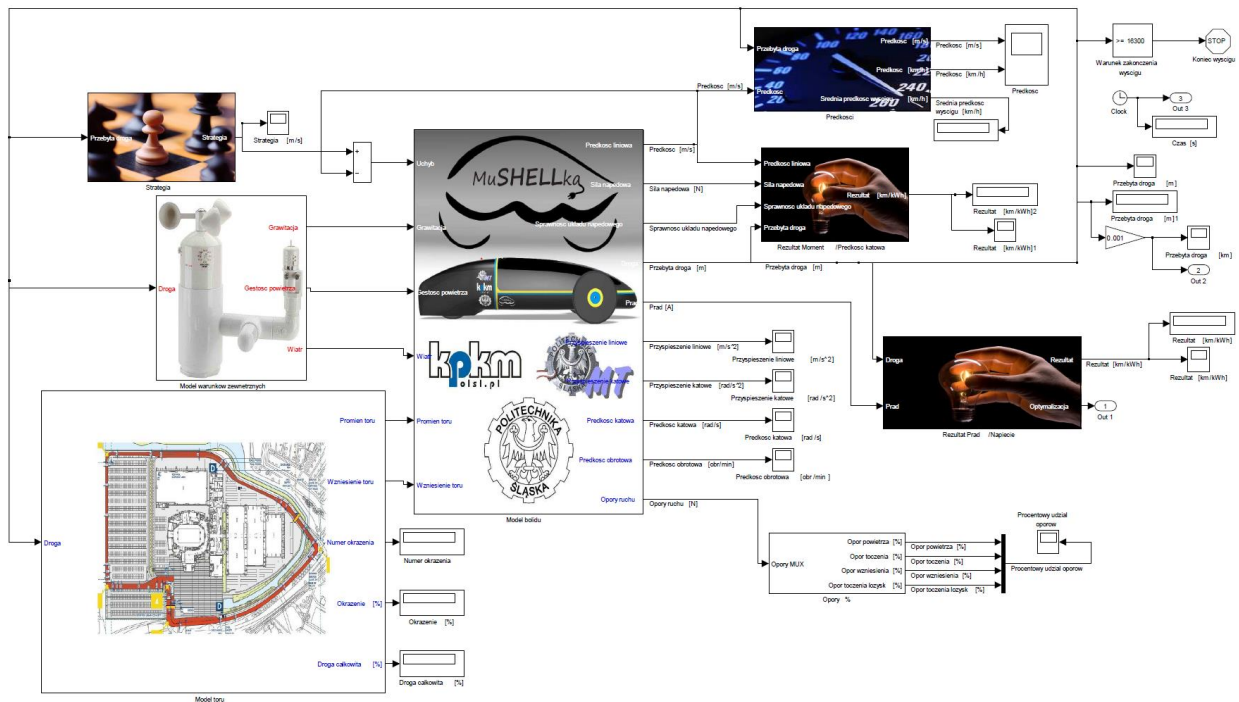
Rys. 1. Bolid MuShellka w trakcie wyścigów Shell Eco-marathon w Rotterdamie

2. METODYKA PROJEKTOWANIA BOLIDU Z WYKORZYSTANIEM MODELU SYMULACYJNEGO

W trakcie rozwoju konstrukcji zastosowano specjalnie opracowaną metodykę, której centralnym elementem jest symulacyjny model pojazdu. Metodyka i model symulacyjny w każdym momencie rozwoju pojazdu pozwala na określenie wpływu zakładanych cech konstrukcyjnych pojazdu na wynik sportowy wyścigu. Metodyka obejmuje między innymi następujące działania:

- budowa modułowego modelu symulacyjnego obejmującą identyfikację zjawisk zachodzących w trakcie wyścigu i opis tych zjawisk na bazie teoretycznych zależności z wykorzystaniem analitycznych form modelu,
- zastosowanie modelu symulacyjnego do określenia koncepcji konstrukcji poprzez symulację wyścigu i wpływu poszczególnych cech konstrukcyjnych na wynik,
- stopniowa weryfikacja stanowiskowa poszczególnych parametrów modelu symulacyjnego i weryfikacja cech konstrukcyjnych w trakcie budowy pierwszego egzemplarza konstrukcji,
- wyznaczanie strategii wyścigu i jej optymalizację,
- dalsza weryfikacja modelu symulacyjnego na podstawie wyników badań w warunkach wyścigowych, doskonalenie modelu z wykorzystaniem eksperymentalnych form modelu,
- badania symulacyjne mające na celu zidentyfikowanie wymaganych zmian konstrukcji mających największy wpływ na wynik,
- wprowadzenie zmian konstrukcyjnych i dalsze badania mające na celu weryfikację modelu symulacyjnego,
- dostosowanie modelu symulacyjnego do sterowania obiektem w czasie rzeczywistym oraz zaimplementowanie sterowania na obiekcie.

Najistotniejszym elementem zastosowanej metodyki jest symulacyjny model numeryczny pojazdu (Rys. 2), który został zbudowany z wykorzystaniem oprogramowania Matlab/Simulink [3].



Rys. 2. Numeryczny model symulacyjny bolidu MuShellka

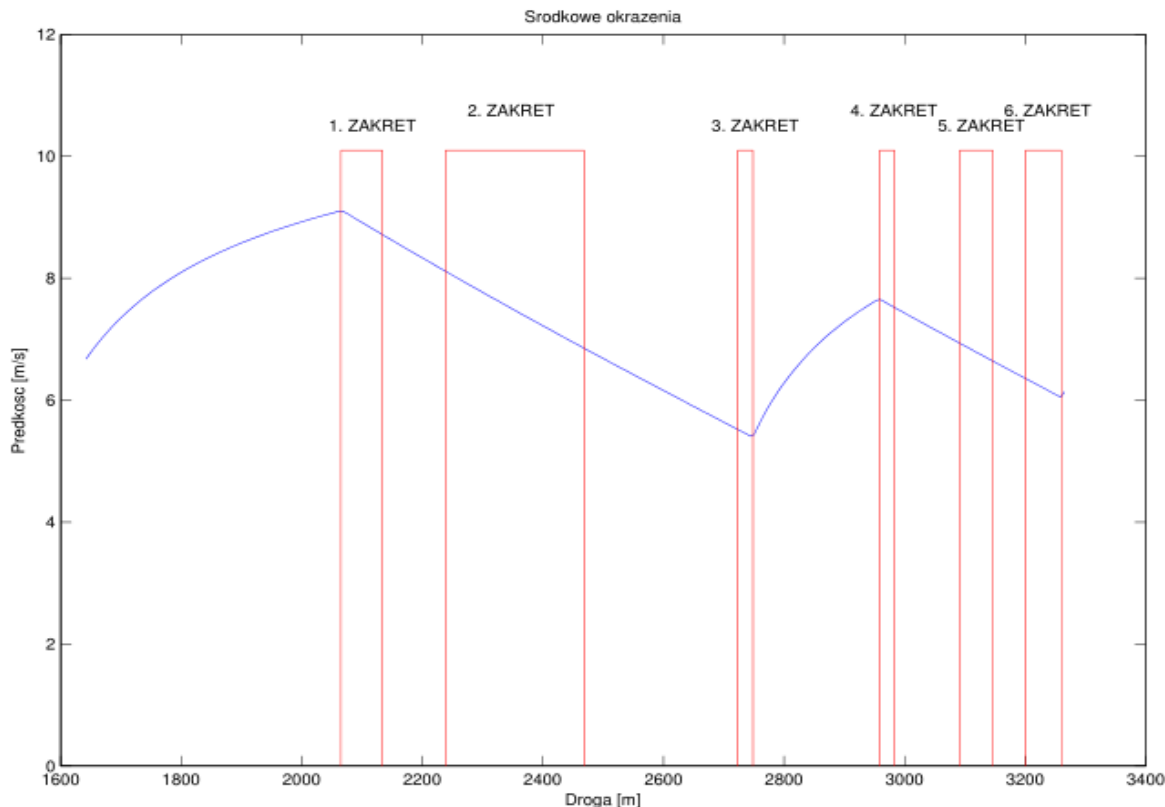
Model symulacyjny składa się z następujących modułów:

- **Model warunków zewnętrznych** opisujących warunki atmosferyczne w trakcie ruchu pojazdu
- **Model toru** opisujący postać geometryczną toru wyścigowego
- **Model pojazdu** opisujący cechy konstrukcyjne samego pojazdu
- **Model oporów ruchu** opisuje zjawiska energetyczne odpowiedzialne za konsumpcję energii
- **Model strategii** pozwala na definiowanie założeń do kierowania pojazdem oraz uruchamianiem odpowiednich podukładów pojazdu

Model symulacyjny oprócz bieżącego wykorzystywania do określenia kierunków rozwoju konstrukcji i oceny wpływu ustalanych cech konstrukcyjnych na wynik sportowy posłużył także do zaplanowania strategii jazdy na wyścigu.

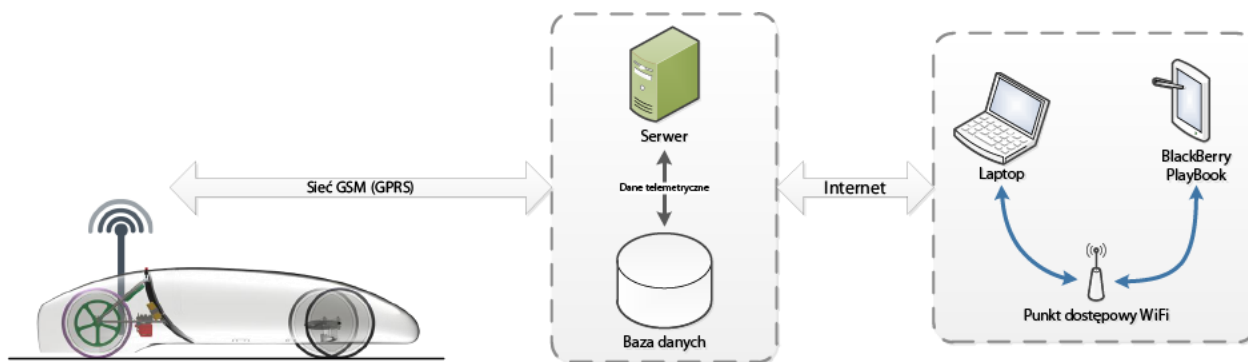
3. PLANOWANIE STRATEGII JAZDY NA WYŚCIGU

Model symulacyjny w późniejszym stadium rozwoju konstrukcji został zastosowany do określenia bieżącej strategii jazdy na wyścigu (Rys. 3). Na podstawie wyników aktualnych jazd testowych zostały zweryfikowane ostateczne parametry pojazdu i na drodze optymalizacji z wykorzystaniem algorytmów genetycznych została określona strategia jazdy na wyścigu. Wyniki uzyskane po optymalizacji sposobu jazdy w trakcie wyścigu wskazywały, że w stosunku do intuicyjnej strategii określonej przez zespół możliwe jest poprawienie wyniku o prawie 100%. Przewidywany przez model symulacyjny wynik rzędu 450km/kWh został osiągnięty z zadziwiającą dokładnością (454,7km/kWh). Zaplanowana strategia określała szczegółowo prędkości chwilowe jakie powinny być osiągnięte w trakcie całego wyścigu. Zadaniem kierowcy było utrzymanie zaplanowanych prędkości.



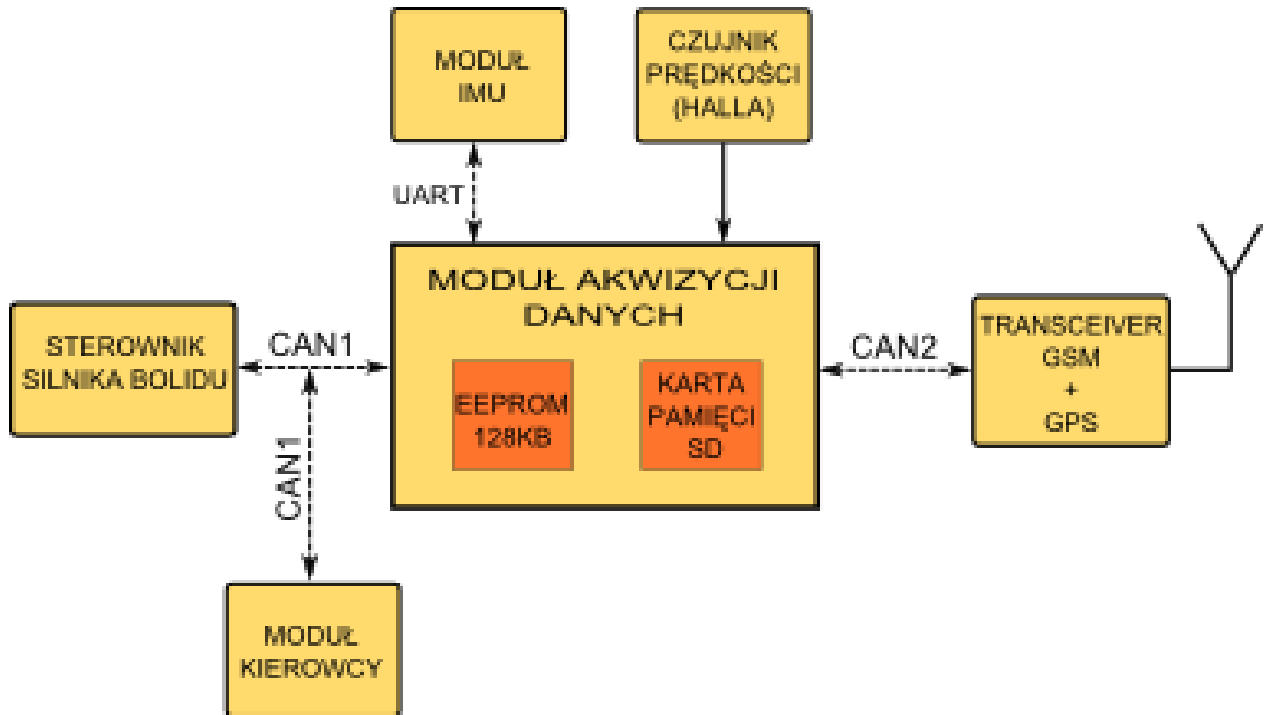
Rys. 3. Fragment wykresu opisującego strategię jazdy na wyścigu

Nad całością czuwał zespół strategów komunikujący się z kierowcą i wspomagający go w trakcie analizy bieżącej sytuacji na torze. Zespół strategów zbiera na bieżąco dane z jazdy poprzez system telemetryczny utrzymujący komunikację poprzez sieć GSM.



Rys. 4. Schemat układu telemetrycznego

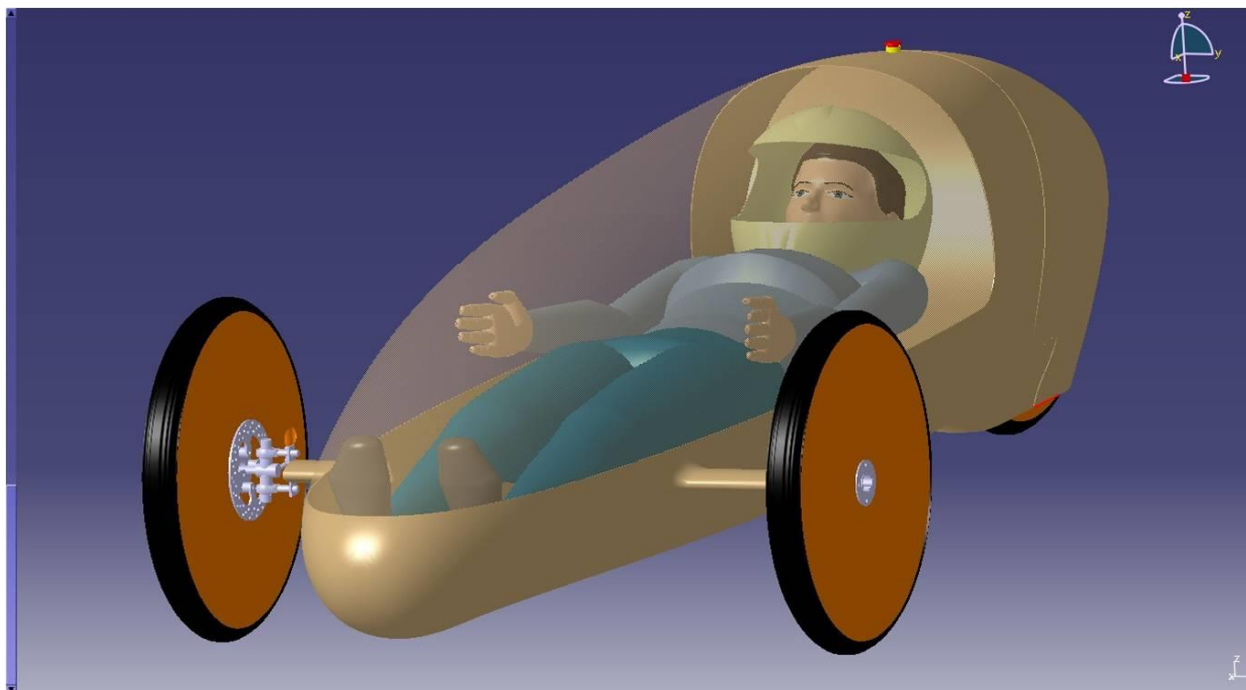
Całość układu akwizycji danych zbiera informacje o stanie podukładów pojazdu oraz bieżących parametrów ruchu i przekazuje do centrum strategów oraz zapisuje na karcie pamięci w pojeździe (Rys. 4). Niektóre z tych danych są prezentowane kierowcy poprzez interfejs kierowcy. Do komunikacji na pojeździe wykorzystywana jest przede wszystkim odporna na zakłócenia sieć typu CAN wykorzystywana przede wszystkim w technice motoryzacyjnej (Rys. 5).



Rys. 5. Schemat układu akwizycji danych

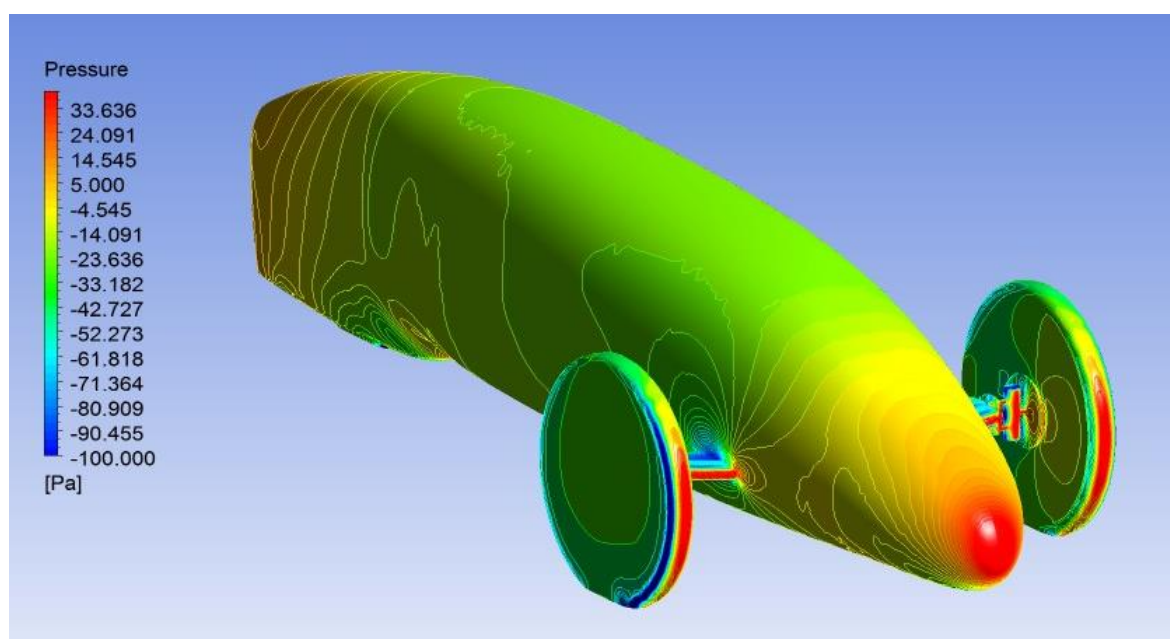
4. WYKORZYSTANIE NOWOCZESNYCH METOD CAx W PROJEKTOWANIU I WYTWARZANIU BOLIDU ORAZ JEGO PODZESPOŁÓW

Już od pierwszego momentu pracy w licznych zespołach projektantów założono, że w trakcie rozwoju konstrukcji bardzo intensywnie zostaną zastosowane różne narzędzia CAx wspomagające pracę konstruktorów. Projekt oprócz istotnego innowacyjnego i naukowo-badawczego charakteru ma przede wszystkim charakter dydaktyczny i studenci wykorzystując bogaty zestaw narzędzi CAx mają możliwość zastosowania w praktyce zdobytych wcześniej wiadomości teoretycznych oraz doskonalenia umiejętności w posługiwaniu się nowoczesnym warsztatem projektanta. Jednym z pierwszych zadań jakie stanęło przed projektantami to pogodzenie ergonomii działań kierowcy z wymaganiami minimalizacji masy a przede wszystkim minimalizacji pola przekroju poprzecznego oraz kształtu kadłuba mającymi istotny wpływ na opory aerodynamiczne. Konieczne było zbudowanie manekina odpowiadającego parametrom przewidzianych do jazdy kierowców zespołu. Bolid jak zaawansowane konstrukcje pojazdów wyścigowych został zaprojektowany i zbudowany pod konkretnych kierowców lub innych kierowców posiadających podobne parametry (Rys. 6). Minimalizacja wagi i wymiarów kierowców do limitu określonego regulaminem stała się priorytetem tego wstępnego zadania. Dopiero na bazie takiego manekina w oparciu o założenia regulaminowych wymiarów pojazdu zbudowano pierwsze koncepcje bryły nadwozia.



Rys. 6. Model kierowcy i pojazdu przeznaczony do badań ergonomicznych

Jednocześnie dokonywano na bieżąco weryfikacji aerodynamicznych kadłuba i całości zewnętrznego obrysu pojazdu. Dokonano weryfikacji wielu alternatywnych wersji stopniowo doskonaląc postać zewnętrznego obrysu pojazdu w kontekście minimalizacji oporów aerodynamicznych (Rys. 7). Badania przeprowadzono z zastosowaniem oprogramowania do analizy z zastosowaniem metody elementów skończonych Ansys CFD.



Rys. 7. Mapa ciśnienia powietrza z symulacji aerodynamicznych bolidu MuShellka

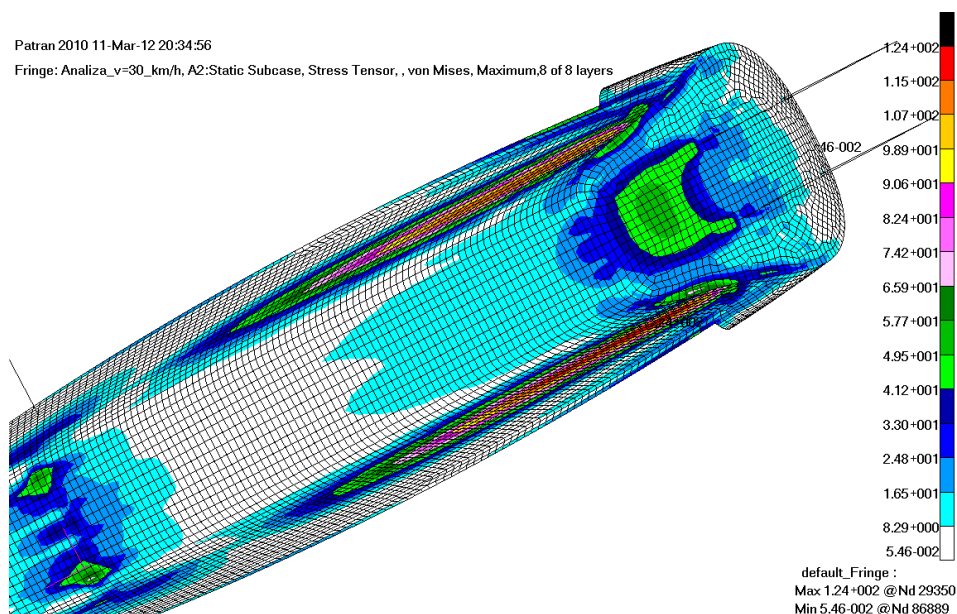
Ostateczna weryfikacja założeń i cech aerodynamicznych nastąpiła w trakcie wyścigu. Do weryfikacji wartości współczynnika oporu powietrza dodatkowo wykorzystano w trakcie wyścigu specjalną numeryczną metodę weryfikacji opartą o odwrotny model symulacyjny oraz zastosowanie metod optymalizacji z zastosowaniem algorytmów genetycznych.



Rys. 8. Badanie cech aerodynamicznych bolidu w tunelu aerodynamicznym w Instytucie Lotnictwa w Warszawie

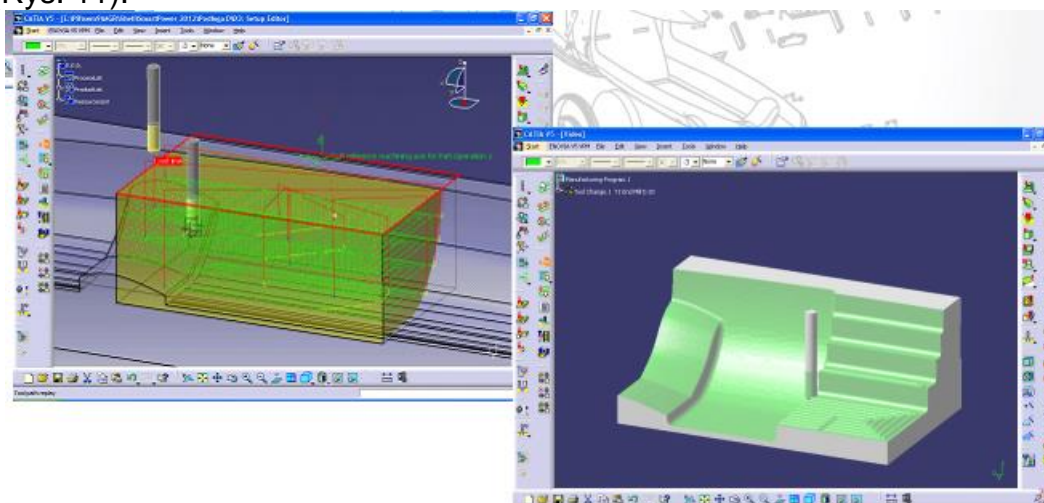
Po wyścigach udało się dodatkowo zweryfikować określone wcześniej w drodze obliczeń cechy aerodynamiczne pojazdu w badaniach doświadczalnych w Instytucie Lotnictwa w Warszawie (Rys. 8). Badania te potwierdziły określone wcześniej dwoma metodami cechy aerodynamiczne.

Kolejnym polem do zastosowań metody elementów skończonych była weryfikacja wytrzymałościowa (Rys. 9) elementów nośnych pojazdu a w szczególności kompozytowego kadłuba. Kadłub został zbudowany jako złożona przekładkowa i przestrzenna konstrukcja kompozytowa z zastosowaniem wzmocnienia z włókien węglowych, szklanych i aramidowych. Złożone obliczenia były wykonywane iteracyjnie by doprowadzić do ostatecznej wersji kadłuba o masie tylko 13 kg.



Rys. 9. Wyniki obliczeń MES kadłuba pojazdu

Tak zweryfikowany model trafił w ręce technologów. Komputerowy model konstrukcji posłużył do zaplanowania produkcji kadłuba. W module CAM systemu CATIA została zweryfikowana metoda frezowania formy kadłuba (Rys. 10). Wykorzystując kod wygenerowany na maszynę sterowaną numerycznie wyprodukowano formę do produkcji kadłuba (Rys. 11).

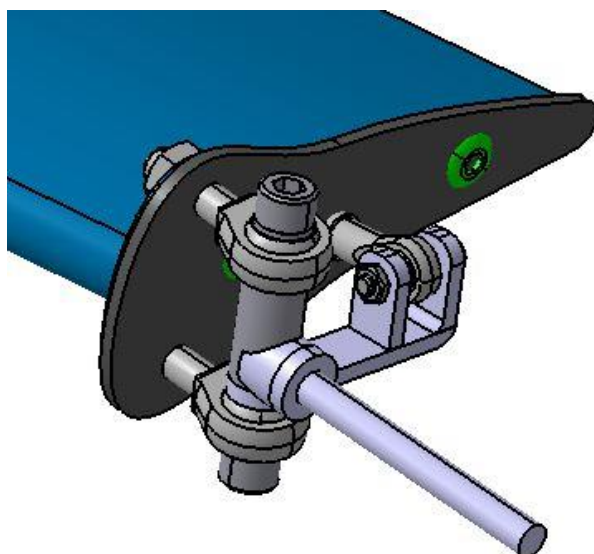


Rys. 10. Weryfikacja procesu frezowania formy kadłuba i belki zawieszenia pojazdu



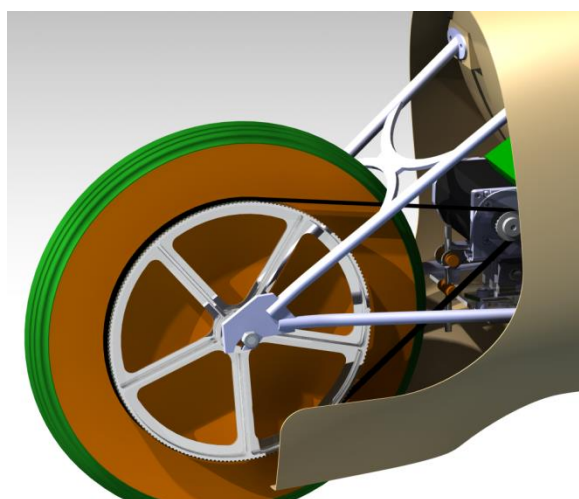
Rys. 11. Proces wytwarzania kompozytowego kadłuba pojazdu

W zakresie całości procesu rozwoju pojazdu podstawową formą zapisu konstrukcji był komputerowy model geometryczny (Rys. 12). Z łatwością więc można było zastosować wiele różnych komputerowych metod wykorzystujących zbudowany wcześniej komputerowy model geometryczny takich jak wyżej wymienione obliczenia wytrzymałościowe i aerodynamiczne, planowanie procesu produkcji oraz wirtualna weryfikację montażu i działania mechanizmów pojazdu zwanych także inaczej wirtualnym prototypowaniem.



Rys. 12. Fragment modelu geometrycznego – zwrotnica pojazdu MuShellka

W ten sposób weryfikowano układ kierowniczy pojazdu oraz zawieszenie przednie i tylne w szczególności zaplanowanie niezwykle gęsto zabudowanej komory tylnego zawieszenia, w którym upakowano zawieszenie tylne, układ napędowy wraz z silnikiem i przekładnią, układ hamulcowy, układ zasilania i elektronikę pojazdu (Rys. 13).



Rys. 13. Rozplanowanie tylnej komory pojazdu (model komputerowy i prototyp pojazdu)

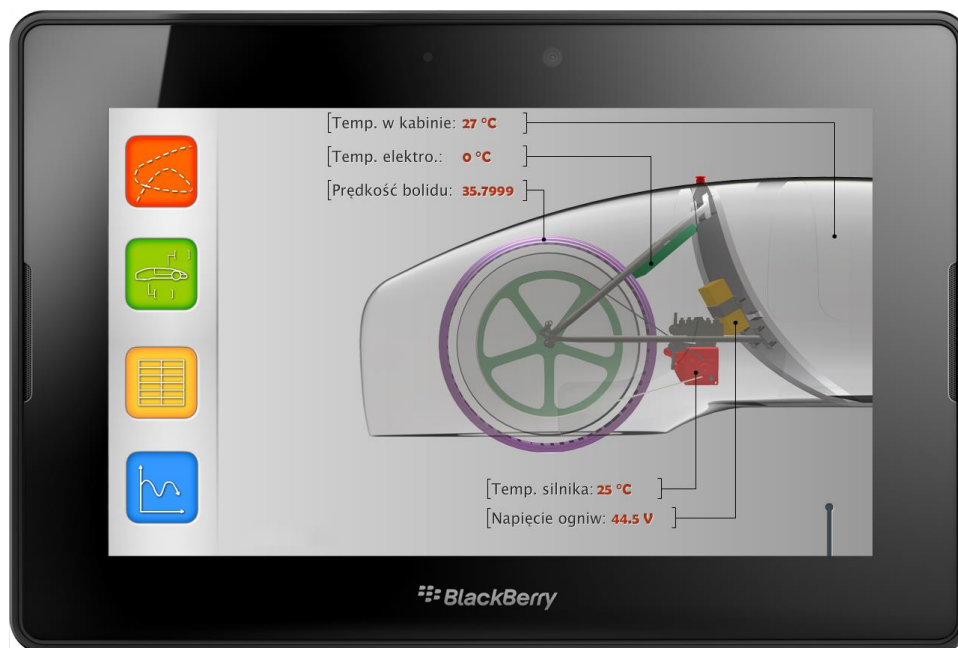
Jednym z ważniejszych podzespołów w planowaniu energooszczędnej jazdy był silnik oraz układ regulacji silnika. Do napędu pojazdu wykorzystano silnik bezszczotkowy prądu stałego (BLDC) oraz regulator silnika własnej konstrukcji o następujących cechach:

- Możliwość implementacji różnych metod sterowania
- Sprzężenie zwrotne z czujników halla oraz enkodera

- Możliwość podłączenia magnetycznego enkodera
- Sterowanie silnikiem ze względu na maksymalizację sprawności
- Obwody mocy o minimalnej rezystancji
- Tranzystory mocy o minimalnej rezystancji
- Drivery tranzystorów o stromym zboczu sygnały wyjściowego
- Energooszczędne drivery tranzystorów
- Czujnik prądu o minimalnej rezystancji
- Energooszczędne stabilizatory impulsowe

Dla pojazdu zaplanowano ponadto zastosowanie układu akwizycji danych zbierających dane z czujników rozmieszczonych na całym pojeździe (Rys. 4), (Rys. 5). Dane te posłużyły do bieżących obliczeń weryfikujących strategię jazdy w trakcie wyścigu. Gromadzone dane na bieżąco są zapisywane na karcie SD w pojeździe oraz wysyłane przez układ telematyczny do centrum. Dane są wykorzystywane do obliczeń oraz wizualizowane tak aby można było ingerować w trakcie jazdy gdy nastąpią odchylenia od przewidywanych parametrów ruchu.

Dla obserwacji parametrów ruchu pojazdu opracowano aplikację z przyjaznym interfejsem wspomagającą prezentowanie najważniejszych parametrów ruchu pojazdu oraz stanu podzespołów pojazdu (Rys. 14).



Rys. 14. Aplikacja wizualizująca parametry jazdy pojazdu

5. PODSUMOWANIE

W trakcie pracy nad innowacyjnym projektem energooszczędnego pojazdu elektrycznego (Rys. 15) startującego w zawodach Shell Eco-marathon. Zaprojektowano i wdrożono wiele rozwiązań mających istotny wpływ na zużycie energii potrzebnej do jazdy pojazdu. Całość projektu podporządkowano kryterium oszczędności energii i na każdym etapie analizowano wszystkie parametry i rozwiązania pod tym kątem stosując specjalnie opracowaną metodykę z zastosowaniem numerycznego modelu symulacyjnego. W trakcie projektowania zastosowano na każdym etapie nowoczesne metody projektowania i narzędzia CAD/CAM/CAE analizując alternatywne wersje podzespołów pojazdu. Poszczególne rozwiązania pozwoliły na uzyskanie rewolucyjnego najlepszego w kraju wyniku zużycia energii 454,7 km/kWh.



Rys. 15. Zespół Smart Power w Rotterdamie

6. LITERATURA

- [1] Skarka W., Otrębska M., Zamorski P., (2013) "Simulation of dangerous operation incidents in designing advanced driver assistance systems", XII International Technical Systems Degradation Conference: Liptowský Mikulaš, Polskie Naukowo-Techniczne Towarzystwo Eksploatacyjne, Warsaw
- [2] Skarka W., Otrębska M., Zamorski P., Cichoński K. "Designing safety systems for electric race car". 13th International Conference on Transport Systems Telematics. TST 2013, Katowice-Ustroń, Poland, October 23-26, 2013. Springer, 2013. (In print).
- [3] Sternal K., Cholewa A., Skarka W., Targosz. M. „Electric vehicle for the students Shell Eco-marathon competition. Design of the car and telemetry system.” Telematics in the transport environment. 12th International Conference on Transport Systems Telematics. TST 2012, Katowice-Ustroń, Poland, October 10-13, 2012. Selected papers. Ed. Jerzy Mikulski. Berlin : Springer, 2012, s. 26-33, bibliogr. 9 poz. (Communications in Computer and Information Science ; vol. 329)
- [4] Strona internetowa (2013) - www.mkm.polsl.pl (wrzesień 2013)
- [5] Strona internetowa (2013) - www.shell.com (wrzesień 2013)