

Andrzej Łebkowski
Akademia Morska w Gdyni, Gdynia

ROZWIĄZANIA TECHNOLOGICZNE ELEKTRYCZNEGO SAMOCHODU SPORTOWEGO SMOK

TECHNOLOGICAL SOLUTIONS IN THE SMOK ELECTRIC SPORTS CAR

Streszczenie: Rynek pojazdów elektrycznych w Polsce dopiero zaczyna się rozwijać. Na zaistniałą sytuację wpływ mają głównie wysokie lub bardzo wysokie ceny samochodów elektrycznych w porównaniu do zasila-nych paliwami kopalnymi oraz brak infrastruktury do ładowania tego typu pojazdów. Jeżeli chodzi o sportowe samochody elektryczne, to w tej klasie nie ma jakiegokolwiek poziomu odniesienia. Z tego względu, aby sprawdzić właściwości elektrycznego układu napędowego dla pojazdów sportowych, Akademia Morska w Gdyni wraz z firmą ELTE GPS skonstruowała i zbudowała pierwszy w Polsce prototyp elektrycznego samochodu sportowego, któremu nadano nazwę SMOK. W artykule zaprezentowano wyniki badań eksploatacyjnych układu napędowego w super-samochodzie sportowym SMOK. Przedstawiono rozwiązania konstrukcyjne jakie znalazły zastosowanie w elektrycznym układzie napędowym, który został skonstruowany specjalnie dla tego pojazdu. Opisano parametry układu napędowego oraz zaprezentowano systemy i układy pomocnicze wspierające eksploatację pojazdu. W końcowej części pracy zamieszczono wyniki badań na hamowni pojazdowej przeprowadzone przez niezależną firmę zewnętrzną.

Abstract: The market of electric vehicles in Poland has started to grow only recently. The main reasons are high to very high relative cost of electric to conventional vehicles, and virtually non existent infrastructure for charging such vehicles. Regarding the electric sports car class, there is virtually no alternative to conventional propulsion. It was the idea, which induced the Gdynia Maritime University together with ELTE GPS ltd. to design and construct the first prototype of an electric sports car built in Poland, which was called SMOK (polish for dragon). The paper presents the results of operational tests of the SMOK super sports car powertrain, as well as design solutions used in the powertrain which was constructed specifically for this vehicle. The article describes powertrain parameters and auxiliary systems which support the vehicle operation. The summary contains the results of an independent dyno test conducted by an outside company.

Słowa kluczowe: elektryczny samochód sportowy, napęd elektryczny, silnik synchroniczny
Keywords: electric sports car, electric powertrain, synchronous motor

1. Wstęp

Mówiąc o supersamochodach lub samochodach klasy G, mamy najczęściej na myśli szybkie sportowe pojazdy, które mogą być eksploatowane w normalnych warunkach ruchu drogowego. Dodatkowo samochody takie cechują się osiąganymi samochodów wyścigowych, które w momencie startu lub hamowania powodują, iż odczuwamy wciskanie w fotel, a przepływ krwi w organach powoduje zmiany ciśnienia w organizmie. Organizm ludzki odczuwa wpływ przyspieszenia (odpływ krwi z kończyn) już przy wartości ok. 0,6G (przyspieszenie ok. 4,5s do 100km/h). Jednocześnie pojazdy takie kojarzą się z kosmicznymi cenami sięgającymi milionów dolarów. Wraz z rozwojem rynku samochodów elektrycznych na świecie, pojawiają się też konstrukcje elektrycznych samochodów sportowych, które swoimi parametrami przewyższają niekiedy parametry

samochodów spalinowych. Oprócz dostępnych na rynku klasycznych samochodów elektrycznych, takich jak: BMW i3 (zużycie energii 170Wh/km, cena \$23k), Chevrolet Spark (177Wh/km, \$20k), Honda fit EV (181Wh/km, \$25k), VW e-Golf (182Wh/km, \$37k), Mitsubishi i-Miev (188Wh/km, \$23k), Nissan Leaf (188Wh/km, \$23k), Fiat 500e (188Wh/km, \$32k), Smart ForTwo (199Wh/km, \$26k), Ford Focus Electric (200Wh/km, \$30k), KIA Soul (203Wh/km, \$34k), TESLA S70 (210Wh/km, \$77k), Cadillac ELR (251Wh/km, \$69k), Mercedes-Benz B250e (251Wh/km, \$42k), TESLA X AWD-P90D (238Wh/km, \$142k), w ofercie producentów znajdują się też sportowe samochody hybrydowe i elektryczne, których ceny znacznie różnią się od przedstawionych powyżej, należą do nich: TESLA S AWD-P90D (227Wh/km, \$130k), BMW i8

(280Wh/km, \$140k), Audi R8 e-tron (330Wh/km, \$250k), Fisker Karma (390Wh/km, \$120k), Mercedes SLS AMG ED (240Wh/km, \$420k), Porsche 918 Spyder (320Wh/km, \$845k), Rimac (185Wh/km, \$980k), McLaren P1 (1060Wh/km, \$1150k), Ferrari LaFerrari (1300Wh/km, \$1700k) [1, 2].



Rys. 1. Elektryczny samochód RIMAC

Analiza rynku pojazdów elektrycznych na świecie wykazuje, iż z roku na rok wzrasta sprzedaż pojazdów elektrycznych (UK 65%) [3].



Rys. 2. Prototyp elektrycznego samochodu TOROIDION

Ponadto zmianie ulega zużycie energii wykazywanej przez producentów. W niektórych modelach wzrosło średnie zużycie energii elektrycznej. Na przykład Nissan Leaf z roku 2015 z pakietem 24kWh wykazuje zużycie na poziomie 187Wh/km, natomiast Nissan Leaf z roku 2016 z pakietem 30kWh wykazuje zużycie już na poziomie 188Wh/km [2].



Rys. 3. Projekt karoserii elektrycznego samochodu SMOK

Pewne modele samochodów zniknęły z rynku, na przykład BYD e6, Venturi Volage 300HP, Ultimate Aero 1000HP EV, VOLAR-e 1000HP lub brytyjski Lightning GT 700HP. Jednocześnie pojawiają się małoseryjne produkcje lub pojedyncze prototypy pojazdów sportowych,

jak na przykład fiński Toroidion 1MW. Do grupy tej należy także polski samochód sportowy SMOK, który jest efektem współpracy Akademii Morskiej w Gdyni z firmą ELTE GPS z Krakowa.

2. Elektryczny układ napędowy

Właściwości silników elektrycznych powodują, iż przewyższają one praktycznie w każdej dziedzinie silniki spalinowe [4]. Niewielkie rozmiary w stosunku do rozwijanej mocy, duży moment obrotowy, szybka reakcja na zmiany wartości zadanej oraz możliwość zastosowania hamowania odzyskowego powodują, iż napędy tego typu przechodzą ponowne odrodzenie i są coraz częściej stosowane w konstrukcjach samochodów. Innowacyjne technologie, które stosowane są w elektrycznych układach napędowych sprawiają, iż możliwe jest zastosowanie silników elektrycznych nawet do napędu supersamochodów. Przykładem takiej konstrukcji jest elektryczny układ napędowy opracowany w Akademii Morskiej w Gdyni wspólnie z firmą ELTE GPS z Krakowa dla samochodu elektrycznego SMOK. Głównymi elementami pozwalającymi na osiągnięcie wysokiej mocy i momentu obrotowego, są silnik i falownik. Specjalnie opracowany silnik dla tego pojazdu został skonstruowany z wykorzystaniem blach elektrotechnicznych, stalowego trzpienia wirnika, drutu miedzianego, aluminiowego korpusu, łożysk oraz magnesów neodymowych. Silnik synchroniczny PMSM, połączony został poprzez sprzęgło z skrzynią biegów zapożyczoną z innego sportowego pojazdu.

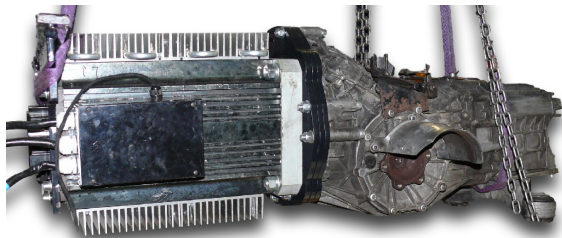


Rys. 4. Prototyp karoserii elektrycznego samochodu SMOK

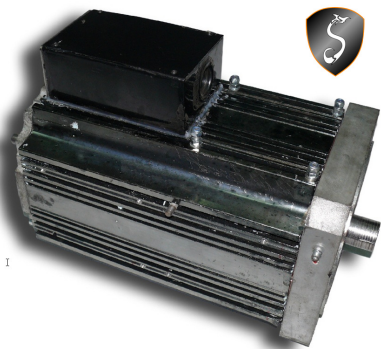
Napęd z silnika trakcyjnego zamontowanego w tylnej części pojazdu przekazywany jest poprzez sześciostopniową skrzynię biegów, bezpośrednio na tylne koła samochodu.

Z uwagi na umiejscowienie silnika w tylnej części pojazdu opracowano dla niego cieczowy układ chłodzenia składający się z radiatorów zamontowanych na powierzchni silnika elektry-

cznego, chłodnicy z wentylatorem umieszczonej w tylnej części pojazdu, pompy obiegowej oraz zestawu czujników temperatury i układu sterującego. Widok elektrycznego silnika trakcyjnego przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 5. Elementy elektrycznego układu napędowego samochodu SMOK: silnik-skrzynia biegów (masa układu 226kg)



Rys. 6. Silnik PMSM zastosowany do napędu samochodu SMOK

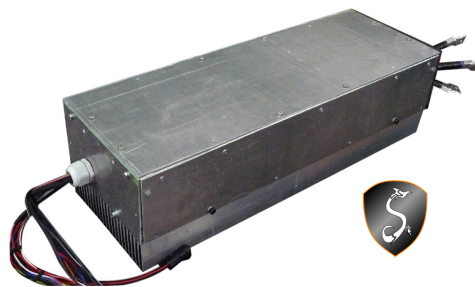
Podstawowe dane silnika PMSM:

- moc znamionowa 160 kW,
- moc maksymalna 270 kW,
- prąd znamionowy 240 A,
- prąd maksymalny 405 A,
- moment znamionowy 355 Nm,
- moment maksymalny 550 Nm,
- prędkość obrotowa znamionowa 4300 RPM,
- typ chłodzenia: powietrzno-cieczowe.

Prędkość obrotowa silnika sterowana jest poprzez falownik, który został skonstruowany specjalnie dla tego zadania. Algorytmy zastosowane w falowniku umożliwiają regulację mocy osiąganą przez napęd, jak również poziomu hamowania odzyskowego lub odzyskania energii.

Podstawowe dane falownika IGBT:

- moc znamionowa 200 kW,
- moc maksymalna 350 kW,
- prąd znamionowy 500 A,
- prąd maksymalny 800 A,
- zakres napięcia wejściowego: 12-1000 VDC,
- typ chłodzenia: strumień powietrza.



Rys. 6. Falownik IGBT zastosowany do napędu samochodu SMOK

Moc niezbędna do zasilania falownika dostarczana jest z pakietu 112 akumulatorów litowo-fosforowo-żelazowych (LiFePO4) o łącznej pojemności ok. 33kWh.



Rys. 8. Widok pakietu akumulatorów LiFePO4 z systemem BMS

Za uzupełnienie energii skonsumowanej przez pojazd podczas eksploatacji odpowiada ładowarka TC Charger TCCH-H389-12 o mocy 4kW. Czas ładowania pakietu akumulatorów wynosi ok. 8 godzin i może być skrócony przy zastosowaniu zewnętrznej ładowarki dysponującej większą mocą. Dzięki możliwości sterowania ładowarki przez sieć CAN, opracowane zostały wytyczne do budowy systemu BMS, który nadzoruje stan wszystkich cel pakietu akumulatorów, monitorując ich temperaturę, płynące prądy oraz napięcia. Układ BMS został wykonany przez firmę POWERSYS.



Rys. 9. Ładowarka pakietu akumulatorów LiFePO4 - TCCH-H389-12

Widok samochodu SMOK podczas ładowania pakietu akumulatorów LiFePO₄ oraz sygnalizacja ładowania i "wyrównywania" poziomu napięć na celach przedstawiona została na rysunku 10.



Rys. 10. Samochód SMOK podczas ładowania pakietu akumulatorów

Oprócz wymienionych podzespołów elektrycznego układu napędowego samochodu, w ramach projektu SMOK, opracowano wiele elementów i systemów, których celem jest ułatwienie eksploatacji pojazdu. Należą do nich między innymi: system ogrzewania kabiny pojazdu, system klimatyzacji, system wspomagania układu hamulcowego, system wspomagania układu kierowniczego, cieczowy system chłodzenia silnika trakcyjnego wraz z powietrznym systemem chłodzenia komory silnika, system kondycjonowania pakietu akumulatorów, system oświetlenia zewnętrznego, system audio-video wraz z dekodermem telewizji cyfrowej oraz układ wskaźników parametrów eksploatacyjnych pojazdu. Dodatkowo na pojeździe, zamontowano jeden z najlepszych w kraju, system monitoringu pojazdów SMOK, produkcji ELTE GPS z Krakowa.



Rys. 11. Układ wskaźników parametrów eksploatacyjnych pojazdu SMOK

Układ wskaźników parametrów eksploatacyjnych samochodu SMOK umożliwia obserwację wartości prędkości obrotowej silnika, temperatur silnika, falownika i pakietu akumulatorów, stanu naładowania pakietu akumulatorów oraz mocy generowanej przez układ napędowy.



Rys. 12. Prototyp elektrycznego super-samochodu SMOK

Układ umożliwia także podgląd parametrów serwisowych pojazdu po aktywacji niejawnej kombinacji przycisków. Dzięki temu, bez konieczności podłączania komputera, możliwe jest wejście w menu serwisowe i przeglądanie poszczególnych parametrów eksploatacyjnych, jak na przykład: napięcie, prądów, temperatur, ciśnień, przepływów, danych magistrali CAN, itp.

3. Wyniki badań eksploatacyjnych

W trakcie prowadzonych badań elektrycznego układu napędowego samochodu SMOK, rejestrowane były parametry związane z napięciem i prądem pakietu akumulatorów, prędkość przemieszczania się pojazdu oraz temperatury falownika i silnika [5]. Poniżej zaprezentowano dane zarejestrowane na hamowni pojazdowej zewnętrznej firmy. Na rysunku 14 przedstawiono charakterystykę mocy i momentu silnika trakcyjnego w zależności od prędkości obrotowej.

W górnej części wykresu zaprezentowano moment (1) osiągnięty przez silnik, w środkowej części przedstawiono osiąganą moc (2), natomiast w dolnej części rysunku zaprezentowano moc oporów i strat (3). Przedstawione wartości zarejestrowano dla ustawień na poziomie 70% możliwości układu napędowego. Przekroczenie tej wartości skutkowało urywaniem przegubów półosi napędowych podczas startu napędu.

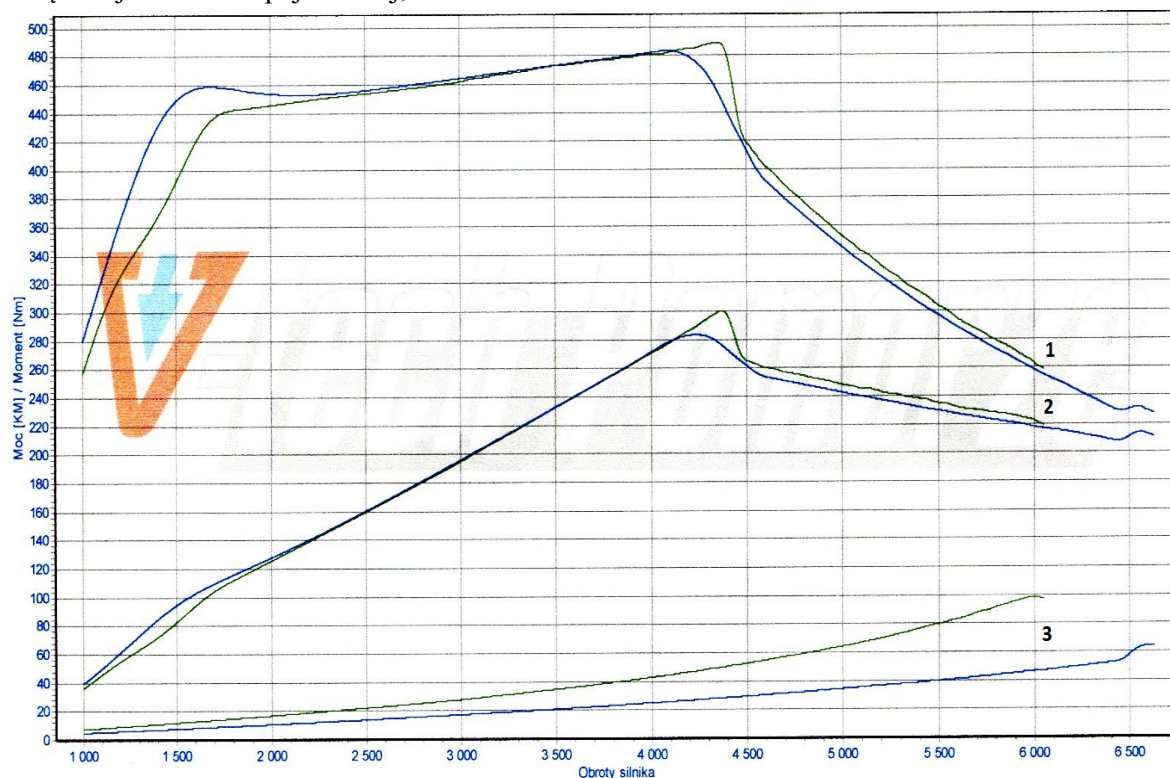
4. Dyskusja wyników

Eksploatacja prototypu elektrycznego samochodu klasy G o nazwie SMOK, skonstruowanego w Akademii Morskiej w Gdyni we współpracy z firmą ELETE GPS z Krakowa, potwierdziła, iż możliwe jest skonstruowanie pojazdu, który osiąga prędkość ponad 300km/h. Realizacja projektu udowodniła, iż możliwe jest w Polsce skonstruowanie elektrycznego samochodu dysponującego parametrami samochodów wyścigowych. Podczas badań na zewnętrznej hamowni pojazdowej, dla ustawień



Rys. 13. Prototyp elektrycznego samochodu SMOK na hamowni pojazdowej

Badanie właściwości układu napędowego dla wyższych mocy nie było możliwe, ze względu na zbyt duży moment obrotowy powodujący urywanie przegubów półosi napędowych. Zarejestrowana wartość prędkości maksymalnej na poziomie 310km/h nie była też maksymalną wartością, jaką może wygenerować opracowany układ napędowy. Zarejestrowana wartość prędkości pojazdu wynikała z ograniczeń przed-



Rys. 14. Przebiegi mocy oporów i strat (3), oraz momentu (1) i mocy (2) elektrycznego układu napędowego pojazdu SMOK zrealizowane na hamowni V-TECH Pomorze

na poziomie 70% możliwości układu napędowego, uzyskano moment obrotowy na poziomie 490Nm oraz moc na poziomie 300kW (220kW).

kościowych hamowni, które ustalone były na poziomie 300km/h.

Zasięg jaki otrzymano w czasie realizacji testów drogowych przy stosowaniu zasad eco-drivingu w cyklu mieszanym wyniósł ok. 180km. Średnie zużycie energii elektrycznej

wyniosło 183Wh/km. Zarejestrowano przyspieszenie poniżej 5 sekund do 100km/h, 12 sekund do 200km/h i 20 sekund do 300km/h.

Ze względu na ograniczony budżet (nie korzystano z jakiegokolwiek wsparcia finansowego ani grantów unijnych) projekt ma charakter rozwojowy. W przyszłości, dzięki zastosowaniu innych komponentów i materiałów, można byłoby uzyskać znacznie korzystniejsze wyniki trakcyjne. Zaprojektowany i zrealizowany układ napędowy w Akademii Morskiej w Gdyni przy współpracy z firmą ELTE GPS z Krakowa wykazał swoją praktyczną przydatność w napędzie elektrycznego samochodu sportowego SMOK.

5. Podsumowanie

Opracowany elektryczny układ napędowy dla samochodu klasy G, wykazał swoją praktyczną przydatność poprzez:

- osiągnięcie parametrów trakcyjnych zarezerwowanych dla klasy supersamochodów (prędkość maksymalna powyżej 300km/h, przyspieszenie poniżej 5s do 100km/h),
- znaczne ograniczenie kosztów eksploatacji samochodu (ok. 7÷15zł/100km (II,I taryfa)) w stosunku do samochodów spalinowych tej klasy (ok. 100zł/100km (średnie zużycie Pb 25l/100km)),
- znaczne ograniczenie zużycia energii (ok. 180Wh/km) przeznaczanej na ruch pojazdu w stosunku do odpowiedników spalinowych (ok. 2268Wh/km),
- znaczne ograniczenie lokalnej emisji szkodliwych gazów, z uwagi na fakt, iż SMOK nie zużywa tlenu i nie emituje gazów,
- znaczne ograniczenie poziomu hałasu, szczególnie podczas startu i przyspieszania.

Literatura

- [1]. <http://www.autobytel.com/hybrid-cars/car-buying-guides/best-electric-sports-cars-128503>
Best Electric Sports Cars (02/2016).
- [2]. The official U.S. government source for fuel economy information.
<https://www.fueleconomy.gov/feg/byfuel/byfueltypeNF.shtml> (02/2016)
- [3]. Best electric cars of 2016 revealed.
<http://www.carbuyer.co.uk/reviews/recommended/best-electric-cars#ixzz3zU0Gjr2e> (02/2016).
- [4]. Król E.: „Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2014.

[5]. Łebkowski A.: „Układ monitorowania parametrów pakietu akumulatorów pojazdu z napędem elektrycznym z wykorzystaniem technik GSM/GPS”, *Przegląd Telekomunikacyjny - Wiadomości Telekomunikacyjne*, Nr 11/2014.

Autor

dr inż. Andrzej Łebkowski
Katedra Automatyki Okrętowej
Akademia Morska w Gdyni
ul. Morska 83, 81-225 Gdynia
andrzej1@am.gdynia.pl