

Andrzej Łebkowski
Akademia Morska w Gdyni, Gdynia

BADANIA EKSPLOATACYJNE ELEKTRYCZNEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO Z FALOWNIKIEM IGBT SAMOCHODU FIAT PANDA 2

EXPLOITATION TESTS OF AN ELECTRIC POWERTRAIN WITH IGBT INVERTER FOR AN EV FIAT PANDA

Streszczenie: W artykule zaprezentowano wyniki badań eksploatacyjnych układu napędowego zaimplementowanego w samochodzie osobowym Fiat Panda 2. Przedsięwzięcie podjęte przez Akademię Morską w Gdyni we współpracy z firmą ELTE GPS oraz firmą Auto-Mobil zaowocowało skonstruowaniem kilkunastu pojazdów tego typu, które eksploatowane są do dnia dzisiejszego w różnych regionach Polski, a w szczególności przez koncerny energetyczne. W trakcie eksploatacji parametry elektrycznego układu napędowego były monitorowane i rejestrowane. Na podstawie dokonanych zapisów, przedstawiono wyniki testów drogowych. W pracy przedstawiono konstrukcje oraz podzespoły zastosowane do konwersji pojazdu spalinowego na elektryczny zawierające takie elementy jak: trakcyjny silnik napędowy, falownik IGBT, pakiet akumulatorów wraz z systemem kondycjonowania klimatycznego i ładowarką, przetwornice DC/DC, a także komputer pokładowy wraz z cyfrową magistralą danych i zestawem wskaźników. Przedstawiono także dobór parametrów poszczególnych podzespołów, a w szczególności falownika IGBT oraz systemu BMS. W końcowej części pracy zamieszczono wyniki badań weryfikacyjnych związanych z osiąganymi parametrami eksploatacyjnymi przez pojazd, takimi jak moc układu napędowego, prędkość maksymalna, zużycie energii (zasięg w cyklu miejskim i pozamiejskim).

Abstract: The article presents the results of utilization testing of an electric powertrain implemented in a Fiat Panda 2 car. The project was undertaken by Gdynia Maritime Academy in cooperation with ELTE GPS and Auto-Mobil, and it resulted in construction of several cars of this type, which are operated to this day in various regions of Poland, mainly by electrical energy distribution companies. All powertrain parameters were monitored and recorded during the project, and it allowed to compile and present in the article a comprehensive road test report. Additionally, the paper presents the overview of elements used to convert a vehicle from internal combustion to electric propulsion, such as: the traction motor, the IGBT inverter, the battery pack with charger and climatic control unit, the DC/DC converter as well as an on-board computer with digital data bus and an instrument cluster. A method of tuning the parameters of sub-systems, especially the IGBT inverter and the Battery Management System. The article concludes with verification tests run in order to check the car's achievable operational parameters, such as: maximal powertrain power, top speed and energy consumption in both urban and extra-urban conditions.

Słowa kluczowe: *pojazd elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny, falownik IGBT*
Keywords: *electric vehicle, electric powertrain, synchronous motor, IGBT inverter*

1. Wstęp

Nieustanny rozwój technologiczny, a zarazem ograniczenia dotyczące składu emisji spalin w pojazdach samochodowych, stanowią inspirację dla wielu konstruktorów podejmujących się wyzwania budowy ekologicznych układów napędowych. Jednocześnie spekulacje dotyczące rynku paliw powodują ograniczenia w rozwijaniu ekologicznych układów napędowych. Niezależnie od wymienionych czynników, jednym z układów zaliczanych aktualnie do ekologicznych, jest elektryczny układ napędowy z uwagi na fakt, iż w miejscu jego użytkowania nie

emituje szkodliwych gazów, a także w ogóle nie zużywa tlenu tak niezbędnego dla funkcjonowania organizmów żywych. Tendencje w kierunku rozwoju napędów elektrycznych, niezależnie z jakich źródeł energii byłyby one zasilane (zasilanie czysto bateryjne, hybrydowe układy spalinowo elektryczne, ogniwa wodorowe) są widoczne w ofertach handlowych praktycznie wszystkich producentów samochodowych. Niestety wysublimowane technologicznie konstrukcje są bardzo drogie. Dodatkowo brak infrastruktury ładowania dla samo-

chodów elektrycznych w Polsce, osłabia zainteresowanie użytkowników do eksploatacji pojazdów tego typu. Istotnym elementem, który oprócz aspektów finansowych eksploatacji pojazdów elektrycznych powinien być uwzględniany przy zakupie nowego pojazdu lub konwersji z spalinowego na elektryczny jest niski poziom emisji hałasu [8] przez takie pojazdy oraz obojętny wpływ na stan układu oddechowego ludzi. Według Światowej Organizacji Zdrowia (WHO) choroba niedokrwienna serca, udar i inne choroby naczyń mózgowych, zakażenia dolnych dróg oddechowych oraz przewlekła obturacyjna choroba płuc, to cztery najczęstsze przyczyny zgonów w skali świata [16]. Wśród najczęstszych skutków długoletniej ekspozycji na wysokie poziomy zanieczyszczeń powietrza wymienia się rozwój chorób oskrzelowo-płucnych, a także choroby układu sercowo-naczyniowego [3]. Wyniki badań przeprowadzonych w wielu uprzemysłowionych państwach wykazały, że zamieszkiwanie przy głównych ciągach komunikacyjnych będących źródłem zanieczyszczeń powietrza istotnie wpływa na zwiększenie liczby zachorowań z powodu przewlekłej obturacyjnej choroby płuc [1,5,6,7,10,11]. Przyjmując, że ponad 60% polskiego społeczeństwa zamieszkuje tereny miejskie, należałoby opracować metody umożliwiające zauważalne ograniczenie poziomów zanieczyszczeń w powietrzu, a w szczególności ich negatywny wpływ na mieszkańców. Zatem wsparcie rozwoju elektrycznej mobilności w Polsce jest tematem bardzo istotnym, szczególnie z punktu widzenia rozwoju polskiej gospodarki w kilku aspektach, zaczynając od ograniczenia jakości życia lub braku możliwości realizowania aktywności zawodowych, przez zwiększone wydatki na hospitalizację, farmakoterapię osób cierpiących z powodu chorób układu oddechowego i sercowo-naczyniowego spowodowanych zanieczyszczeniem powietrza, po koszty związane z absencją w miejscu pracy, koszty finansowania rent z tytułu utraty zdrowia oraz koszty skrócenia życia. Jedną z propozycji na poprawę istniejącego stanu rzeczy, oprócz innych rozwiązań prezentowanych w literaturze [2,4,12,13,14,15], jest zastosowanie przedstawionego elektrycznego układu napędowego z silnikiem synchronicznym, falownikiem IGBT oraz pakietem akumulatorów litowych.

2. Elektryczny układ napędowy

W ramach zamówień publicznych na dostawę samochodów z napędem elektrycznym ogłoszonych przez różne koncerny energetyczne, w 2011 roku został opracowany i zrealizowany projekt układu napędowego przez pracowników Akademii Morskiej w Gdyni we współpracy z firmą ELTE GPS Sp. z o.o. (dostawca podzespołów) oraz P.U.H. Auto-Mobil Sp. z o.o. (dostawcą pojazdów). Opracowana konstrukcja jest nieprzerwanie eksploatowana w różnych warunkach klimatycznych od roku 2011. Z samochodu marki Fiat Panda 2 wymontowano silnik benzynowy o pojemności 1200 ccm. W miejsce spalinowej jednostki napędowej zamontowany został silnik synchroniczny, którego prędkość obrotowa kontrolowana jest przez falownik umiejscowiony w centralnej przedniej części pasa przedniego pojazdu. Powyżej elektrycznego układu napędowego zamontowano pojemnik z pakietem akumulatorów litowo-fosforowo-żelazowych (LiFePO₄). Kolejne dwa pakiety akumulatorów tego samego typu zostały umiejscowione pod tylną kanapą pasażerów oraz w miejscu montażu koła zapasowego. Podobny sposób rozmieszczenia elementów układu napędowego został opisany na stronie internetowej EVPL.PL, przy okazji konwersji pojazdu Ford Eskort MK3 w roku 2005.



Rys. 1. Widok komory silnika Fiat Panda 2 z elektrycznym układem napędowym

Głównym elementem napędowym układu jest silnik synchroniczny z sinusoidalnym przebiegiem siły elektromotorycznej (PMSM, ang. *Permanent Magnet Synchronous Motor*), z ośmiobiegunowym wirnikiem i dwunastoma cewkami skupionymi na obwodzie stojana. Silnik własnej konstrukcji przy zachowaniu umiarkowanych kosztów produkcji, charaktery-

zuje się dobrymi właściwościami regulacyjnymi, wysoką sprawnością oraz bezawaryjnością, a także korzystnym współczynnikiem masy i objętości w stosunku do rozwijanej mocy. Wysoka sprawność jednostki napędowej wyklucza konieczność stosowania cieczowego układu chłodzenia. Konstrukcja korpusu silnika wspomagana wymuszonym obiegiem powietrza zapewnia prawidłowe parametry eksploatacyjne praktycznie w każdych warunkach klimatycznych.



Rys. 2. Silnik synchroniczny PMSM

Podstawowe dane silnika PMSM:

- moc znamionowa 50 kW,
- moc maksymalna 85 kW,
- prąd znamionowy 260 A,
- prąd maksymalny 440 A,
- moment znamionowy 105 Nm,
- moment maksymalny 190 Nm,
- prędkość obrotowa znamionowa 4300 RPM,
- wymiary: dł. 360mm, szer. - wys. 190mm,
- typ chłodzenia: strumień powietrza.

Silnik wraz z łącznikiem, kołem zamachowym i sprzęgłem, poprzez płytę montażową przykręcony jest do manualnej skrzyni biegów.



Rys. 3. Napęd pojazdu Fiat Panda 2 z falownikiem IGBT

Głównym elementem decydującym o parametrach rozwijanych przez pojazd jest falownik IGBT. Poprzez zmiany w oprogramowaniu

możliwe jest korygowanie charakterystyk elektromechanicznych układu napędowego.

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.

W omawianej konstrukcji zastosowano falownik z tranzystorami mocy IGBT zamontowanymi na stopie radiatora chłodzonego strumieniem powietrza. Konstrukcja radiatora została tak dobrana i wyprofilowana, że stanowi jednocześnie podstawę do umieszczenia układu sterującego pracą tranzystorów mocy IGBT odizolowanego elektromagnetycznie oraz zapewnia miejsce do przykręcenia obudowy z wyprowadzonymi złączami obwodu wejściowego (układ pośredniczący), złączami obwodu końcowego (wyjściowego) falownika oraz złączem sygnałowym.

Do falownika doprowadzone jest zasilanie z rozproszonego pakietu akumulatorów litowo-fosforowo-żelazowych LiFePO₄. W omawianym pojeździe zastosowano łącznie 36 ogniw LiFePO₄ o pojemności 160Ah każde, co pozwoliło na uzyskanie całkowitej pojemności pakietu na poziomie 19kWh. Pakiet akumulatorów ładowany jest zestawem składającym się z ładowarki oraz systemu BMS (*ang. Battery Management System*). Zestaw do ładowania pakietu akumulatorów opracowany został przy współpracy z firmą POWERSYS. Zakres eksploatacji ogniw litowych ustawiony został w granicach od 2,5V do 3,8V na pojedynczym ogniwie. Dodatkowo pakiet akumulatorów może być podgrzewany w okresie zimowym, co zwiększa jego wydajność. Oprócz wymienionych podzespołów związanych z układem napędowym pojazdu, w skład elementów, które zostały opracowane samodzielnie w ramach konwersji pojazdu spalinowego na elektryczny wchodzi komputer pokładowy sterujący pracą: pompki próżniowej wspomagającej układ hamulcowy, cieczowy układ ogrzewania kabiny (pompa obiegowa, grzałka), układ włączający zasilanie dla obwodu trakcyjnego, zestaw wskaźników zintegrowany z konsolą prędkościomierza, system podgrzewania pakietu akumulatorów, układ sygnalizacji ładowania pod kłapką wlewu paliwa oraz układ sterujący pracą przetwornicy DC/DC. Sterowanie wymienio-

nych elementów realizowane jest w sposób automatyczny lub zdalny za pomocą przycisków znajdujących po lewej i prawej stronie zestawu wskaźników pojazdu.



Rys. 4. Widok zestawu wskaźników w pojeździe Fiat Panda 2

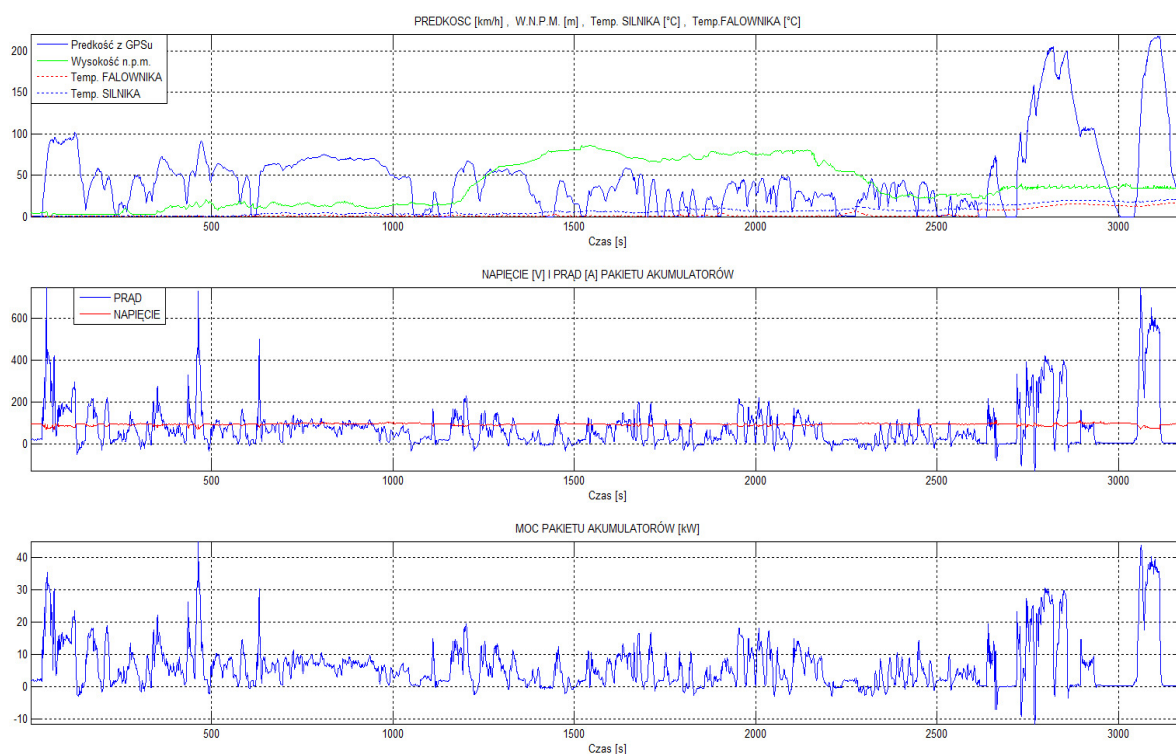
Przedmiotowy układ napędowy z falownikiem IGBT instalowany był w pojazdach marki Fiat Panda 2 w wersjach nadwozia osobowej i osobowo-ciężarowej w taki sposób, że w jakimkolwiek stopniu nie naruszono przestrzeni pasażersko ładunkowej.



Rys. 5. Fiat Panda 2 po realizacji konwersji na pojazd elektryczny

3. Wyniki badań eksploatacyjnych

W trakcie prowadzonych testów elektrycznego układu napędowego z falownikiem IGBT rejestrowano parametry związane z napięciem i prądem pakietu akumulatorów, prędkość przemieszczania się pojazdu oraz temperatury falownika i silnika. Parametry były rejestrowane za pomocą opracowanego urządzenia do monitoringu pojazdu [9] bez aktywacji funkcji sterowania podzespołami pojazdu na odległość.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi wielkości zarejestrowanych podczas testów w terenie niezabudowanym, zabudowanym oraz na terenie zamkniętym

W czasie testów pojazd przemieszczał się po drogach województwa pomorskiego, a także odcinkach wyłączonych z ruchu. Wyniki pomiarów przedstawiono na rysunku 6.

4. Dyskusja wyników

Otrzymane wyniki pomiarów w trakcie prowadzenia testów potwierdziły zasadność przeprowadzenia procesu konwersji dla pojazdu spalinowego Fiat Panda 2 wyposażonego w falownik IGBT oraz silnik synchroniczny PMSM. Zasięg jaki otrzymano w czasie testów w cyklu mieszanym to 170km (przy chwilowej prędkości maksymalnej na odcinku specjalnym 150km/h). Średnie zużycie energii elektrycznej na poziomie 112Wh/km w cyklu mieszanym można uznać jako wynik dobry. Możliwość ustawienia parametrów falownika w dowolny żądany sposób przez kierującego pojazdem sprawia, że przedstawione parametry opisujące zużycie energii mogą być zmienne, a o ich wielkości decyduje w głównej mierze styl jazdy kierującego (jazda spokojna, jazda sportowa). Prędkość maksymalna jaka została zarejestrowana na hamowni podczas testów to 217km/h (przy tej wartości nastąpiło uszkodzenie ogumienia ze względu na przekroczenie indeksu prędkości). Możliwość regulacji parametrów falownika IGBT (hamowanie odzyskowe, odzyskanie) powoduje, iż właściwości trakcyjne pojazdu mogą ulec zmianie - zwiększony zasięg, większe prędkości. Średni poziom energii uzyskanej podczas hamowania odzyskowego wyniósł ok. 6% i w głównej mierze jest on zależny od stylu jazdy kierującego pojazdem ale także od ustawienia parametrów falownika. Zaprojektowany i zrealizowany układ napędowy w Akademii Morskiej w Gdyni wykazał swoją praktyczną przydatność w napędzie samochodu osobowego. Wysoka sprawność i dobór parametrów falownika IGBT została potwierdzona faktem zastosowania do chłodzenia podzespołów układu napędowego chłodzeniem powietrzem. W trakcie prowadzonych testów przyrost temperatury elementów układu napędowego wyniósł ok. 25°C (maksymalny przyrost temperatury, jaki zaobserwowano podczas eksploatacji pojazdu wyniósł 35°C). Oznacza to, iż układ napędowy został prawidłowo dobrany i dostrojony do parametrów pojazdu. Należy zauważyć, iż w trakcie testów w terenie zabudowanym, moc pobierana z pakietu akumulatorów nie przekraczała 25kW, przy zachowaniu płynności ruchu wraz z innymi użyt-

kownikami drogi. Zapotrzebowanie na większą moc, pojawiało się przy rozwijaniu dużych prędkości i realizacji szybkich przyspieszeń.

5. Podsumowanie

Stosując pojazdy z napędem elektrycznym:

- uzyskujemy znaczne ograniczenie zużycia energii (ok. 120Wh/km) przeznaczanej na ruch pojazdu w stosunku do samochodów spalinowych (ok. 680Wh/km),
- uzyskujemy znaczne ograniczenie kosztów eksploatacji pojazdu (ok. 5zł/100km) w stosunku do samochodów spalinowych (ok. 30zł/km (średnie zużycie Pb 7,5l/100km)),
- znacznie ograniczamy lokalną emisję szkodliwych gazów, z uwagi na fakt, iż samochody elektryczne nie zużywają tlenu i pozostają obojętne dla środowiska,
- emitujemy niższy poziom hałasu szczególnie w zakresie prędkości do 60km/h,
- na drodze konwersji z spalinowego, otrzymujemy tańszy pojazd niż fabryczny, przy zachowaniu co najmniej takich samych funkcjonalności,
- powinniśmy mieć świadomość (aktualnie) ograniczonych możliwości takich konstrukcji, w stosunku do aut hybrydowych i spalinowych, z uwagi na osiągnięty zasięg i czas ładowania pakietu akumulatorów.

Literatura

- [1]. Andersen Z.J., Hvidberg M., Jensen S.S., Ketzler M., Loft S., Sorensen M., Tjonneland A.: *Overvad K., Raaschou-Nielsen O., „Chronic obstructive pulmonary disease and long-term exposure to traffic-related air pollution: a cohort study”*, American journal of respiratory and critical care medicine, vol. 183, no. 4, pp. 455-461, 2011.
- [2]. Białas A., Król E.: *„Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi w napędzie pojazdu hybrydowego”*, Napędy i Sterowanie ISSN: 1507-7764, Nr 11/2014.
- [3]. Colais P., Faustini A., Stafoggia M., Berti G., Bisanti L., Cadum E., Cernigliaro A., Mallone S., Pacelli B., Serinelli M., Simonato L., Vigotti M.A., Forastiere F.: *„Particulate Air Pollution and Hospital Admissions for Cardiac Diseases in Potentially Sensitive Subgroups”*, Epidemiology (Cambridge, Mass.), 2012.
- [4]. Fręchowicz A., Dukalski P., Białas A.: *„Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMSM”*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe, Nr 3/2012 (96).

- [5]. Gan W.Q., Koehoorn M., Davies H.W., Demers P.A., Tamburic L., Brauer, M.: „*Long-Term Exposure to Traffic-Related Air Pollution and the Risk of Coronary Heart Disease Hospitalization and Mortality*”, Environmental health perspectives, 2010
- [6]. Jacobs, L., Emmerechts, J., Hoylaerts, M.F., Mathieu, C., Hoet, P.H., Nemery, B. & Nawrot, T.S.: „*Traffic Air Pollution and Oxidized LDL*”, PLOS one, vol. 6, no. 1, 2011.
- [7]. Lindgren A., Stroh E., Montnemery P., Nihlen U., Jakobsson K., Axmon A.: „*Traffic-related air pollution associated with prevalence of asthma and COPD/chronic bronchitis. A cross-sectional study in Southern Sweden*”, International Journal of Health Geographics, vol. 8, no. 1, pp. 2, 2009.
- [8]. Łebkowski A.: „*Emisja hałas w pojazdach z napędem elektrycznym*”, *Ekonomika i Organizacja Przedsiębiorstwa*, Nr 7/2015.
- [9]. Łebkowski A.: „*Układ monitorowania parametrów pakietu akumulatorów pojazdu z napędem elektrycznym z wykorzystaniem technik GSM/GPS*”, *Przegląd Telekomunikacyjny - Wiadomości Telekomunikacyjne*, Nr 11/2014.
- [10]. Nafstad P., Haheim L.L., Wisloff T., Gram F., Oftedal B., Holme I., Hjermmann I., Leren P.: „*Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men*”, Environmental health perspectives, vol. 112, no. 5, pp. 610-615, 2004
- [11]. Peacock J.L., Anderson H.R., Bremner S.A., Marston L., Seemungal T.A., Strachan D.P., Wedzicha J.A.: „*Outdoor air pollution and respiratory health in patients with COPD*”, *Thorax*, 2011.
- [12]. Radwański W., Będkowski B., Białas A., Rossa R.: „*Koncepcja napędu elektrycznego E-Kit dla miejskich samochodów osobowych*”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 4/2012 (97).
- [13]. Rossa R., Król E.: „*Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 4/2012 (97).
- [14]. Król E.: „*Silniki synchroniczne w napędach pojazdów sportowo-rekreacyjnych*”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2014.
- [15]. Rossa R., Król E.: „*Badanie napędu elektrycznego E-kit w małym samochodzie osobowym w aspekcie zwiększenia zasięgu jazdy*”, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, Nr 2/2015 (106).
- [16]. World Health Organization: „*The top 10 causes of death*”, Fact sheet N°310, January 2015.

Autor

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