

# Badania eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego z falownikiem IGBT samochodu Fiat Panda 2

Andrzej Łebkowski

## 1. Wstęp

Wprowadzane ograniczenia dotyczące składu emisji spalin w pojazdach samochodowych, stanowią inspirację dla wielu konstruktorów podejmujących się wyzwania budowy ekologicznych i bezemisyjnych 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 swego 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. Również w literaturze możemy odnaleźć informacje związane z elektrycznymi układami napędowymi [2, 4, 12, 13]. Niestety wysublimowane technologicznie konstrukcje są bardzo drogie. Dodatkowo brak rozwiniętej infrastruktury ładowania dla samochodów elektrycznych w Polsce osłabia zainteresowanie użytkowników eksploatacją pojazdów tego typu. Istotnym elementem przy zakupie lub konwersji pojazdu spalinowego na elektryczny – oprócz aspektów finansowych związanych z niskimi kosztami eksploatacji tego typu pojazdów – jest niski poziom emisji hałasu w trakcie eksploatacji (dla dwóch pojazdów tego samego typu (Fiat Panda EV / Fiat Panda Diesel) różnice emisji hałasu przy prędkości

**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).

Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny, falownik IGBT

## 🇬🇧 EXPLOITATION TESTS OF AN ELECTRIC POWERTRAIN WITH IGBT INVERTER FOR AN EV FIAT PANDA 2

**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 University 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 propul-

sion, 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.

Keywords: electric vehicle, electric powertrain, synchronous motor, IGBT inverter

poniżej 50 km/h wynosiły ok. 7 dB i 3 dB dla prędkości powyżej 50 km/h. [8]) 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 [14]. 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. W niniejszej publikacji przedstawiono autorski elektryczny układ napędowy, jaki poddano badaniom eksploatacyjnym w warunkach drogowych oraz na hamowni podwoziowej.

## 2. Elektryczny układ napędowy

W ramach zamówień publicznych na dostawę samochodów z napędem elektrycznym, ogłaszanych 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 PUH 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 z magnesami trwałymi, zamontowanymi powierzchniowo na płaszczyźnie wirnika (SM-PMSM, ang. *Surface-Mounted Permanent Magnet Synchronous Motor*), 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 (LiFePO<sub>4</sub>). Kolejne dwa pakiety akumulatorów tego samego typu zostały umiejscowione pod tylną kanapą pasażerów oraz w miejscu



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

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.

Głównym elementem napędowym układu jest silnik synchroniczny SM-PMSM z ośmiobiegunowym wirnikiem i dwunastoma cewkami skupionymi na obwodzie stojana.

Silnik własnej konstrukcji, przy zachowaniu umiarkowanych kosztów produkcji, charakteryzuje 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.

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. 360 mm, szer.–wys. 190 mm;
- typ chłodzenia: strumień powietrza;
- masa silnika 54 kg.

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



Rys. 2. Silnik synchroniczny PMSM



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



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

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 V DC;
- typ chłodzenia: strumień powietrza;
- masa falownika 27 kg.

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 LiFePO<sub>4</sub>. W omawianym pojeździe zastosowano łącznie 36 ogniw LiFePO<sub>4</sub> o pojemności 160 Ah każde, co pozwoliło na uzyskanie całkowitej pojemności pakietu na poziomie 19 kWh o masie 202 kg. 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 POWER-SYS. Zakres eksploatacji ogniw litowych ustawiony został w granicach od 2,5 V do 3,8 V 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 spalinywego na elektryczny wchodzi komputer



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

reklama

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 klapką wlewu paliwa oraz układ sterujący pracą przetwornicy DC/DC. Sterowanie wymienionych elementów realizowane jest w sposób automatyczny lub zdalny za pomocą przycisków znajdujących się po lewej i prawej stronie zestawu wskaźników pojazdu.

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.

### 3. Wyniki badań eksploatacyjnych

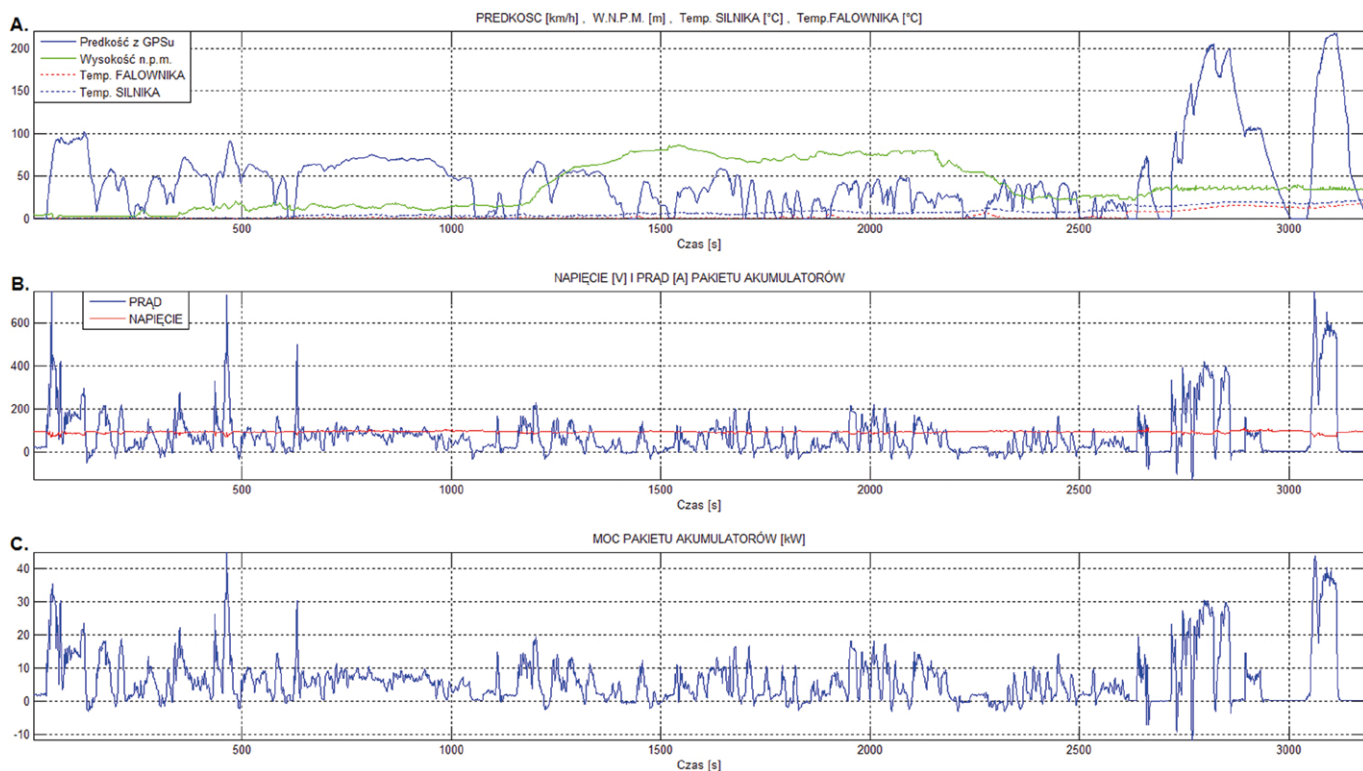
W trakcie prowadzonych testów elektrycznego układu napędowego z falownikiem IGBT rejestrowano parametry związane z napięciem i prądem pakietu akumulatorów, prędkość przemieszczania się pojazdu oraz temperatury falownika i silnika. Parametry były rejestrowane za pomocą opracowanego urządzenia do monitoringu pojazdu [9] bez aktywacji funkcji sterowania podzespołami pojazdu na odległość. W czasie testów pojazd przemieszczał się po drogach województwa pomorskiego, a także odcinków 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 170 km (przy chwilowej prędkości maksymalnej na odcinku specjalnym 150 km/h). Średnie zużycie energii elektrycznej na poziomie 112 Wh/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 217 km/h (przy tej wartości nastąpiło uszkodzenie ogumienia ze względu na przekroczenie indeksu prędkości). Możliwość regulacji parametrów falownika IGBT (hamowanie odzyskowe, odzyskiwanie) 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, zostały potwierdzone faktem zastosowania do chłodzenia podzespołów układu napędowego chłodzenia powietrznego. W trakcie prowadzonych testów przyrost temperatury elementów układu napędowego wyniósł ok. 25°C (maksymalny przyrost temperatury, jaki zaobserwowano podczas eksploatacji pojazdu, wyniósł

reklama



**Rys. 6.** Przykładowe przebiegi wielkości zarejestrowanych podczas testów w terenie niezabudowanym, zabudowanym oraz odcinkach zamkniętych (A – prędkość pojazdu, wysokość nad poziomem morza, temperatura silnika, temperatura falownika; B – napięcie i prąd zarejestrowane na zaciskach pakietu akumulatorów; C – przepływ mocy z pakietu akumulatorów)

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 25 kW, przy zachowaniu płynności ruchu wraz z innymi użytkownikami drogi. Zapotrzebowanie na większą moc pojawiało się przy rozwijaniu dużych prędkości i realizacji przyspieszeń.

## 5. Podsumowanie

Stosując pojazdy z napędem elektrycznym:

- uzyskujemy znaczne ograniczenie zużycia energii (ok. 120 Wh/km) przeznaczanej na ruch pojazdu w stosunku do samochodów spalinowych (ok. 680 Wh/km);
- uzyskujemy znaczne ograniczenie kosztów eksploatacji pojazdu (ok. 5 zł/100 km) w stosunku do samochodów spalinowych (ok. 30 zł/km (średnie zużycie Pb 7,5 l/100 km));

- 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 60 km/h;
- na drodze konwersji ze 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., KETZEL M., LOFT S., SORENSEN M., TJONNELAND A., OVE-RVAD 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, 2011.

[2] BIAŁAS A., KRÓL E.: *Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi w napędzie pojazdu hybrydowego.* „Napędy i Sterowanie” 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] FODOREAN D.; SARRAZIN M.M.; MARTIS C.S.; ANTHONIS J.; VAN DER AUWERAE H.: *Electromagnetic and Structural Analysis for a Surface-Mounted PMSM Used for Light-EV.* „IEEE Transactions on Industry Applications”, Volume: 52, Issue: 4, July-Aug. 2016, DOI: 10.1109/TIA.2016.2537784.

- [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., EMMERECHE, 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., NIHLÉN 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, 2009.
- [8] ŁEBKOWSKI A.: *Samochody elektryczne – dźwięk ciszy*. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 1/2016.
- [9] ŁEBKOWSKI A.: *Układ monitorowania parametrów pakietu akumulatorów pojazdu z napędem elektrycznym z wykorzystaniem technik GSM/GPS*. „Przegląd Telekomunikacyjny – Wiadomości Telekomunikacyjne” 11/2014.
- [10] NAFSTAD P., HAHEIM L.L., WISLOFF T., GRAM F., OFTEDAL B., HOLME I., HJERMANN I., LEREN P.: *Urban air pollution and mortality in a cohort of Norwegian men*. „Environmental health perspectives”, vol. 112, no. 5, 2004.
- [11] PEACOCK J.L., ANDERSON H.R., BRENNER 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] RUBA M.; FODOREAN D.: *Motor-drive solution for light electric vehicles based on a switched reluctance machine*. Automation, Quality and Testing, Robotics (AQTR), 2016 IEEE International Conference, DOI: 10.1109/AQTR.2016.7501372.
- [13] ROSSA R., KRÓL E.: *Badanie napędu elektrycznego E-kit w małym samochodzie osobowym w aspekcie zwiększenia zasięgu jazdy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 2/2015.
- [14] World Health Organization: *The top 10 causes of death*. Fact sheet N°310, January 2015.

 dr inż. Andrzej Łebkowski -  
Katedra Automatyki Okrętowej;  
Akademia Morska w Gdyni;  
e-mail: andrzejl@am.gdynia.pl

artykuł recenzowany