

Piotr Szewczyk, Andrzej Łebkowski
Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., Gdynia

UKŁAD NAPĘDOWY DLA POJAZDÓW DOSTAWCZYCH I SPECJALISTYCZNYCH JAKO ODPOWIEDŹ NA ZAPOTRZEBOWANIE RYNKU ELEKTROMOBILNEGO

INNOVATIVE POWERTRAIN FOR DELIVERY AND SPECIAL VEHICLES AS A SOLUTION FOR ELECTROMOBILITY MARKET

Streszczenie: Dynamiczny rozwój rynku pojazdów elektrycznych, spowodowany wprowadzeniem ograniczeń legislacyjnych, związanych z ograniczeniem emisji spalin generowaną przez układy napędowe stosowane w pojazdach, przyczynia się do rozwoju nowych technologii układów napędowych. Przedsięwzięcia podejmowane przez Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., wpisują się w założenia tej polityki, dzięki czemu, firma opracowała i skonstruowała systemy i urządzenia elektrotechniczne, jakie mogą znaleźć zastosowanie w bezemisyjnych elektrycznych układach napędowych pojazdów. W publikacji przedstawiono elektryczny system napędowy, jaki może być zastosowany w pojazdach osobowych, dostawczych oraz specjalistycznych, który został opracowany na bazie własnych rozwiązań technologicznych firmy AREX Sp. z o.o. Zaprezentowano podstawowe parametry elementów elektrycznego systemu napędowego dedykowanego pojazdowi samochodowemu, takie jak: magazyny energii elektrycznej wraz z układami nadzorującymi ich pracę i zapewniającymi dopływ energii; falowniki; silniki; a także urządzenia wspomagające pracę systemu sterowania napędem. Przedstawiono analizy uzyskanych wyników badań trakcyjnych i laboratoryjnych, opracowanego elektrycznego układu napędowego.

Abstract: Dynamic development of the electric vehicle market, caused by the introduction of legislative restrictions related to the reduction of exhaust emissions generated by the propulsion systems used in vehicles, contributes to the development of new propulsion system technologies. Projects realized by Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o., are in line with this policy requirements, and the company has developed and constructed electrotechnical systems and devices that can be used in zero-emission electric vehicle powertrain systems. The publication presents an electric drive system that can be used in passenger, delivery and specialist vehicles, which were developed on the basis of proprietary technological solutions of AREX Sp. z o.o. The basic parameters of the major components of the electric drive system dedicated to motor vehicles were presented: electricity energy storage systems with power management systems supervising their operation and ensuring energy supply; inverters; engines; as well as devices supporting the operation of the drive control system. The analysis of obtained results of traction and laboratory tests, developed electric drive system is presented.

Słowa kluczowe: *elektryczny samochód dostawczy, zestaw do elektryfikacji, silnik synchroniczny*

Keywords: *electric delivery vehicle, electrification kit for a van, electric powertrain, synchronous motor*

1. Wstęp

Pierwsze pojazdy dostawcze z napędem elektrycznym znane były już w 1895 roku, kiedy to amerykańska firma Riker Electric Motor Co. z Nowego Jorku rozpoczęła produkcję dwumiejscowych trzykołowych ciężarówek. Pojazdy te charakteryzowały się możliwością przewożenia towarów do 5 ton, przy masie akumulatorów 1,5 tony, na dystansie do 50 km, z prędkością maksymalną na poziomie 10 km/h [1]. W późniejszym okresie firma Riker Electric Motor Co. opracowała około kilkudziesięciu różnych typów elektrycznych pojazdów użytkowych. Inne znane firmy zajmujące się produ-

kcją pojazdów elektrycznych w tamtym okresie to: General Electric (powstała z połączenia firm Edison Electric Light Company i Thomson-Houston Company); Baker Motor Vehicle Company; Electric Carriage and Wagon & Co.; Rauch & Lang; czy też firmy z Europy takie jak: Compagnie l'Abeille; System Krieger Electric Car Company; Bouquet, Garcin & Schivre (BGS); Société de Mobilité Electriques (Sovel); Motorfahrzeug und Motorenfabrik Berlin-Marienfelde (MMB); Mercedes-Electrique; Elektro-Daimler; oraz wiele innych [1].



Rys. 1. Elektryczny pojazd firmy Edison Lansden Company [1]

Dostawcze pojazdy z napędem elektrycznym wykorzystywane były w ówczesnych czasach głównie na terenach miejskich, do przewozu różnego rodzaju ładunków: jako pojazdy techniczne do stawiania słupów telefonicznych, jako samochody do rozwożenia mleka, pieczywa, produktów spożywczych, mobilne punkty sprzedaży posiłków, lodów, kawiarnie, samochody pocztowe, a nawet jako pojazdy policji, straży pożarnej i karetki pogotowia. Pojazdy te rozwijały prędkości ok. 50 km/h i zasięgi do 100 km. Po osiągnięciu historycznego szczytu liczby ok. 30 tys. pojazdów elektrycznych w 1912 roku, co stanowiło ok. 50% wszystkich pojazdów na świecie, nastąpił upadek technologii napędu elektrycznego, aż do początku XXI wieku.

Występujące zmiany klimatyczne w ostatnich dekadach, wymusiły na decydentach wprowadzenie rygorystycznych przepisów związanych z ograniczeniem emisji spalin przez transport samochodowy. Działania te zapoczątkowały ponowne odrodzenie się idei zastosowania układów elektrycznych do napędu pojazdów i odkurzenia większości technologii, które zostały opracowane na przełomie XIX i XX wieku (elektryczne silniki różnego typu umieszczone centralnie, poprzez przekładnie, silniki zamontowane w kołach, technologie hybrydowe, ogniwa paliwowe, itp.). Z początkiem XXI wieku, dla użytkowników pojazdów elektrycznych zaoferowano wiele przywilejów i udogodnień, w postaci możliwości poruszania się w centrach miast, korzystania z wydzielonych pasów ruchu drogowego, darmowych parkingów, darmowego ładowania zasobników energii elektrycznej czy też preferencyjnych dopłat do zakupu pojazdu. Dzięki takim działa-

niom ożywił się rynek dostawczych pojazdów z napędem elektrycznym. Aktualnie w ofercie handlowej można znaleźć dostawcze pojazdy elektryczne produkowane praktycznie pod logiem każdego znanego producenta motoryzacyjnego [2,3]. Jednocześnie pojazdy oferowane przez koncerny motoryzacyjne są stosunkowo drogie. Rozwiązaniem może być implementacja elektrycznego układu napędowego do istniejącego pojazdu dostawczego z klasycznym napędem spalinowym. Zastosowanie takiego układu umożliwi eksploatację pojazdu dostawczego z napędem elektrycznym w centrach miast i jednocześnie przemieszczanie się poza aglomeracjami miejskimi przy użyciu napędu spalinowego. Zaletą takiego układu napędowego jest też większa niezawodność pojazdu, dzięki możliwości osobnego użytkowania niezależnych układów napędowych. W proponowanej publikacji przedstawiono rozwiązanie umożliwiające elektryfikację dostawczego pojazdu z napędem spalinowym, opracowane i zrealizowane przez Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o. w Gdyni.

2. System elektryfikacji pojazdów dostawczych

Elektryfikację dowolnego pojazdu samochodowego można przeprowadzić wymieniając jego aktualną spalinową jednostkę napędową lub dostawiając dodatkowy układ napędowy. Dodatkowy elektryczny układ napędowy może być zainstalowany na przykład w postaci silników montowanych w kołach pojazdu [4], na linii istniejącego wału napędowego [5–8] lub w osi napędowej pojazdu [9]. Firma AREX Sp. z o.o. proponuje zastosowanie systemu do elektryfikacji pojazdów dostawczych, w którym silnik elektryczny poprzez wał pędny przekazuje moment obrotowy na most pojazdu. Proponowane rozwiązanie technologiczne umożliwia osobne wykorzystywanie napędu spalinowego napędzającego przednie koła pojazdu, napędu elektrycznego napędzającego tylne koła pojazdu, oraz obu napędów jednocześnie w trybie pracy generatorowej. Ostatnie rozwiązanie umożliwia ładowanie magazynu energii w trakcie jazdy przy użyciu napędu spalinowego, lub wspomaganie hamowania pojazdu i ładowanie magazynu energii podczas hamowania, bez utraty części energii kinetycznej pochodzącej od napędu spalinowego. Głównym elementem napędowym systemu elektrycznego, jest silnik synchroniczny z magnesami trwałymi o ozna-

czeniu DCE-200. Silnik ten może być użytkowany zarówno w przemyśle ciężkim jak i motoryzacyjnym, do napędu pojazdów samochodowych, dostawczych, użytkowych oraz specjalistycznych. Widok silnika DCE-200 przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Silnik synchroniczny DCE-200

Silnik DCE-200 charakteryzuje się dużą dynamiką pracy, w szerokim zakresie prędkości obrotowej. Może pracować w zakresie temperatur od -40 do $+65$ °C. Posiada cztery wbudowane czujniki temperaturowe, dzięki którym możliwa jest precyzyjna kontrola warunków jego pracy i sterowanie cieczowym układem chłodzenia. Nominalne napięcie pracy silnika DCE-200 wynosi 500 VAC, a nominalna wartość skuteczna prądu 150 A. Silnik charakteryzuje się wysokim momentem obrotowym sięgającym 2400 Nm. Ma możliwość rozwinięcia prędkości obrotowej do 2800 RPM. Silnik DCE-200 charakteryzuje się wysokim poziomem sprawności sięgającym 96%. Do sterowania pracą silnika DCE-200 opracowany został falownik STS-202. Sterownik silnika elektrycznego STS-202 przeznaczony jest do zasilania i sterowania pracą maszyn elektrycznych prądu przemiennego stosowanych w pojazdach z napędem elektrycznym. Falownik STS-202 wyposażony został w nowoczesny procesor sygnałowy oraz układ programowalny FPGA. Dzięki temu możliwa jest szeroka diagnostyka parametrów i realizowanych funkcji przy użyciu systemu rejestracji i podglądu zdarzeń. Posiada szereg konfigurowalnych wejść/wyjść (sygnałowe 5 + 2, dowolnie konfigurowalne DIO lub AIO 0..32V, dwa wejścia bezpieczeństwa) do sterowania i komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi współpracującymi w ramach opracowanego systemu napędowego, jak na przykład porty komunikacyjne CAN oraz RS422.



Rys. 3. Falownik STS-202

Zakres napięcia zasilania sięga 850 VDC. Pomocnicze napięcie zasilania może oscylować w zakresie 7÷35 VDC. Maksymalna moc wyjściowa falownika wynosi 300 kW, a szczytowa wartość skuteczna prądu sięga 400 A. Falownik jest w stanie współpracować z silnikami synchronicznymi, w których położenie wirnika odczytywane jest za pomocą resolwera lub czujników Halla. Falownik został wyposażony w szereg zabezpieczeń sprzętowych i programowych, do których należą zabezpieczenia: nadprądowe, nadnapięciowe, podnapięciowe, temperaturowe oraz bezpieczeństwa.



Rys. 4. Charakterystyka strat mocy falownika STS-202 w zależności od mocy wyjściowej

Zastosowanie cieczowego systemu chłodzenia pozwala na pracę falownika w szerokim zakresie temperatur otoczenia od -40 do $+105$ °C. Falownik może być wykonany w dwóch wersjach produkcyjnych z użyciem tranzystorów IGBT lub SiC. Falownik STS-202 charakteryzuje się wysokim poziomem sprawności sięgającym 98%. Obudowa falownika STS-202, odizolowana elektrycznie, wykonana została z anodyzowanego aluminium, a zastosowane złącza sygnałowe wykonano w technologii przemysłowej lub militarnej. Dzięki temu uzyskano stopień ochrony obudowy IP67. Moc niezbędna do zasilania falownika STS-202 dostarczana jest z magazynu energii BAT-201, który w zależności od zapotrzebowania może składać się z różnej ilości modułów bateryjnych BMU-201.



Rys. 5. Magazyn energii BAT-201

Podczas prowadzonych badań wykorzystywany był magazyn energii BAT-201 składający się z 6 modułów baterijnych BMU-201. Do budowy modułów baterijnych BMU-201 zastosowano ogniwa litowo-fosforowo-żelazowe (LiFePO₄). Łączna pojemność magazynu energii BAT-201 wynosi 63,4 kWh, napięcie nominalne 633,6V. Maksymalny prąd szczytowy pobierany z BAT-201 może wynosić 1000 A.



Rys. 6. Dwukierunkowa ładowarka PBC-200 dla pojazdów elektrycznych

Do uzupełniania energii w magazynie BAT-201 (G2V) lub przekazywania jej do sieci elektroenergetycznej (V2G) opracowano dwukierunkową ładowarkę stacjonarną PBC-200 [10] o mocy nominalnej 45 kW, oraz ładowarkę pokładową PBC-201 o mocy 3,3 kW. Aby podczas użytkowania pojazdu w trybie napędu elektrycznego, zapewnić odpowiednie zasilanie w instalacji pokładowej 12 VDC, opracowana została przetwornica PSU-203. Przetwornica PSU-203 przeznaczona jest do zasilania urządzeń pokładowych w pojeździe, podłączonych do instalacji niskiego napięcia (LV), z energii pochodzącej z wysokonapięciowego źródła zasilania (HV), jakim jest magazyn BAT-201. Przetwornica PSU-203 umożliwia także monitorowanie parametrów akumulatora (napięcia,

prądu, temperatury) zasilającego pokładową instalację niskonapięciową (12V/24V) oraz realizację funkcji ładowania zgodnie z zaprogramowaną charakterystyką. Przetwornica DC-DC (HV/LV) w zależności od poziomu napięcia w instalacji pokładowej jest w stanie zapewnić moc 1,5 kW dla 12 VDC oraz 3 kW dla 24VDC.



Rys. 7. Przetwornica pokładowa PSU-203

PSU-203 charakteryzuje się możliwością pracy w trybie zasilacza, zasilacza buforowego lub ładowarki. Umożliwia skalowanie mocy w obwodzie zasilającym poprzez sposobność równoległego połączenia większej ilości takich urządzeń. Dzięki zastosowaniu nowoczesnego procesora sygnałowego, przetwornica PSU-203 zapewnia wysoką stabilność prądu i napięcia wyjściowego, kompensację spadku napięcia na przewodach DC, a także dzięki wbudowanej magistrali komunikacyjnej CAN, możliwość współpracy z nadrzędnym systemem sterującym jakim jest na przykład VCU-200.

Komputer pokładowy VCU-200 wraz z panelem sterującym został opracowany w celu możliwości zarządzania pracą elektrycznego układu napędowego pojazdu wyposażonego w dwa niezależne układy napędowe. VCU-200 umożliwia nadzór nad układem trakcyjnym oraz systemem zarządzania magazynem energii i układami pomocniczymi. Monitoruje urządzenia peryferyjne poprzez kanały komunikacyjne oraz archiwizuje parametry pracy.



Rys. 8. Komputer pokładowy VCU-200

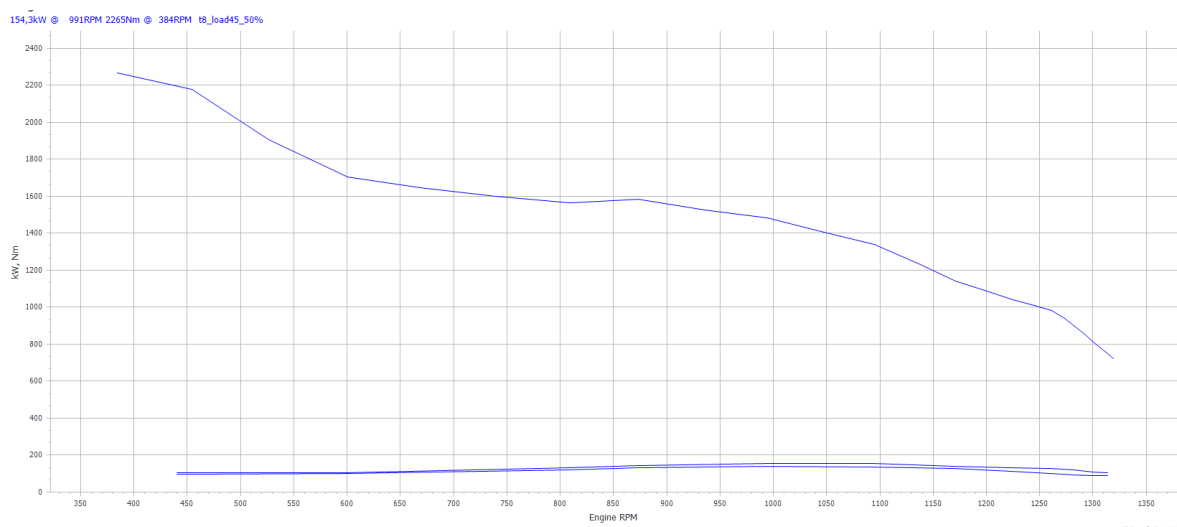
Widok pojazdu z elektrycznym układem napędowym zaprojektowanym i zrealizowanym przez Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o. w Gdyni przedstawiono na rysunku 9. Oprócz wymienionych podzespołów elektrycznego systemu napędowego, firma AREX Sp z o.o., opracowała wiele elementów i systemów, umożliwiających kompleksową budowę i eksploatację różnego rodzaju pojazdów z napędem elektrycznym.



Rys. 9. Widok pojazdu z elektrycznym układem napędowym firmy AREX Sp. z o.o.

3. Wyniki badań eksploatacyjnych

W trakcie prowadzonych badań elektrycznego układu napędowego pojazdu dostawczego, rejestrowane były parametry związane z napięciem i prądem pakietu akumulatorów, prędkością przemieszczania się pojazdu oraz temperatury falownika i silnika. Na rysunku 10 zaprezentowano dane zarejestrowane na hamowni pojazdowej. Podczas badań na hamowni podwozowej rejestrowano moment i moc generowane przez silnik DCE-200 przekazujący moment obrotowy przez wałek napędowy na most napędowy znajdujący się w tylnej osi pojazdu. W górnej części wykresu przedstawiono moment osiągnięty przez silnik DCE-200, natomiast poniżej osiąganą moc.

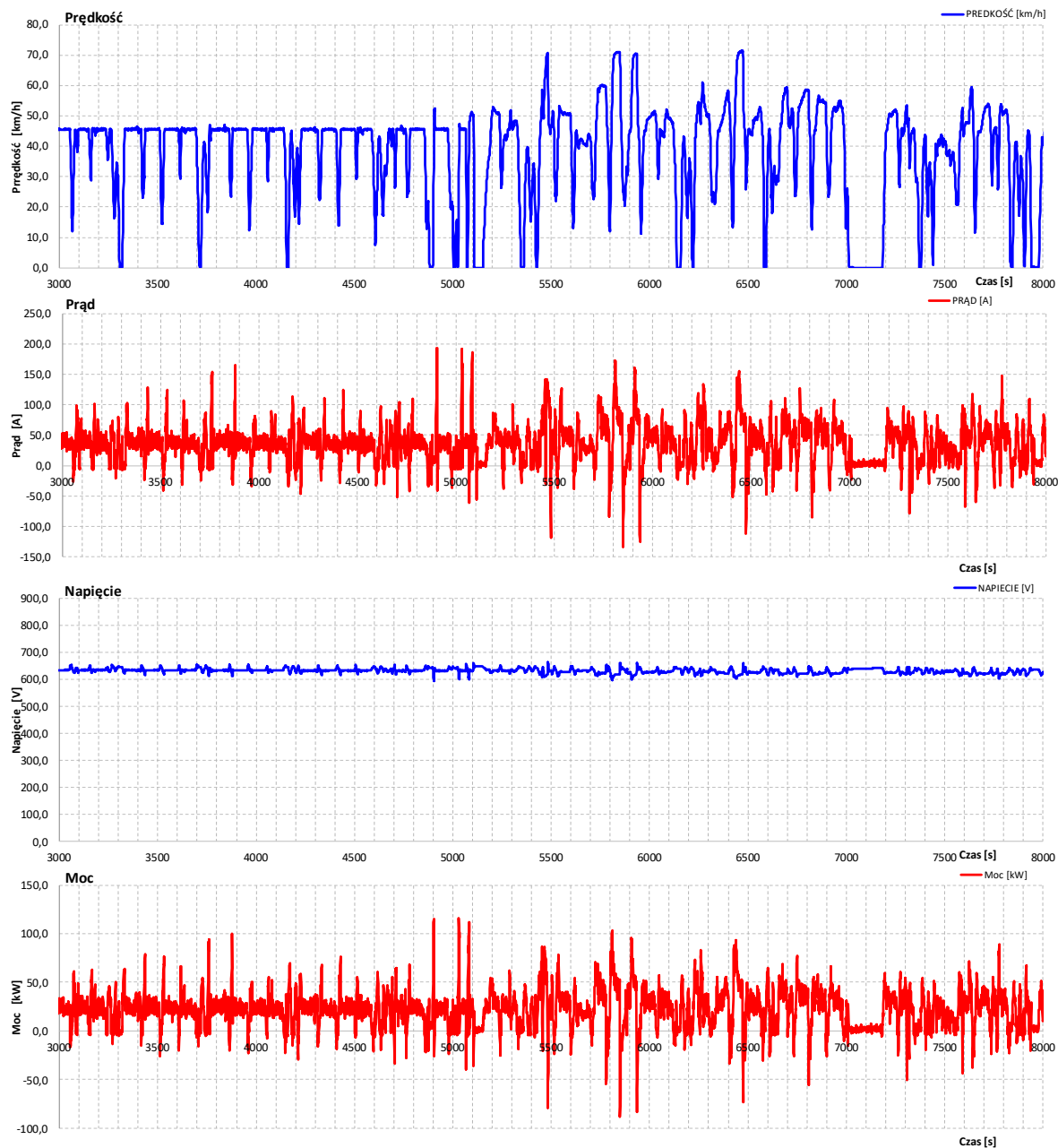


Rys. 10. Przykładowe przebiegi momentu i mocy elektrycznego układu napędowego z silnikiem DCE-200 i falownikiem STS-202, dla pojazdu dostawczego, zarejestrowane na hamowni podwozowej

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowe parametry eksploatacyjne elektrycznego układu napędowego zarejestrowane podczas badań w rzeczywistych warunkach drogowych. Przedstawione zostały przykładowe wartości prędkości rozwijanej przez pojazd i odpowiadające jej wartości napięcia, prądu, oraz mocy pobieranej z magazynu energii przy pracy silnikowej i oddawanej podczas realizacji hamowania odzyskowego.

4. Dyskusja wyników

Opracowany przez Zakład Automatyki i Urządzeń Pomiarowych AREX Sp. z o.o. system do elektryfikacji pojazdów dostawczych potwierdził swoją praktyczną użyteczność. Podczas prowadzonych badań na hamowni podwozowej, pomimo obniżonego napięcia zasilania silnik DCE-200 bez problemu wygenerował moc ponad 150 kW i moment obrotowy na poziomie 2265 Nm. Przedstawione wartości zapewniają dostateczną dynamikę dla pojazdu dostawczego o DMC do 3,5 tony poruszającego się w ruchu miejskim. W trakcie realizacji badań, dzięki algorytmom sterowania zaszytym w falowniku STS-200, związanym z odzyskaniem energii silnika oraz hamowaniem odzyskowym, bez problemu uzyskiwano prędkości pojazdu ponad 100 km/h. W trakcie realizacji badań trakcyjnych w rzeczywistym ruchu drogowym, badano dynamikę pojazdu oraz zużycie energii.



Rys. 11. Przykładowe przebiegi prędkości, prądu, napięcia i mocy układu napędowego z silnikiem DCE-200 i falownikiem STS-202, dla pojazdu dostawczego, zarejestrowane na hamowni podwoziowej

W trakcie realizacji badań, testowany pojazd pokonał dystans 105 km, zużywając energię na poziomie ok. 50 kWh. Średnia wartość zużycia energii przez pojazd w trakcie badania wyniosła ok. 480 Wh/km. Ilość energii zgromadzonej w magazynie umożliwiłaby pokonanie dystansu na poziomie 130 km, co dla eksploatacji pojazdu w warunkach miejskich jest wartością wystarczającą. Dla porównania zużycia energii przez testowany pojazd, zrealizowano tę samą trasę z udziałem napędu spalinowego. Zużycie oleju napędowego wyniosło 13,69 l/100km, co

odpowiada równoważnemu zużyciu energii elektrycznej na poziomie ok. 1465 Wh/km.

5. Podsumowanie

Opracowany elektryczny system napędowy dla pojazdów dostawczych (i innych), wykazał swoją praktyczną przydatność poprzez:

- ograniczenie lokalnej emisji szkodliwych gazów, z uwagi na fakt, iż elektryczny układ napędowy nie zużywa tlenu i nie emituje gazów,
- ograniczenie poziomu hałasu, szczególnie podczas ruszania z miejsca i przyspieszania,

- ograniczenie zużycia energii (ok. 480 Wh/km) przeznaczanej na przemieszczanie się pojazdu z użyciem napędu elektrycznego w stosunku do napędu spalinowego (ok. 1465 Wh/km),
- ograniczenie kosztów eksploatacji pojazdu z udziałem napędu elektrycznego w stosunku do użycia napędu spalinowego,
- ograniczenie kosztów eksploatacji, poprzez możliwość wykorzystania energii kinetycznej pojazdu do ładowania magazynu energii w procesie hamowania odzyskowego, w trakcie eksploatacji układu spalinowego.

Literatura

- [1]. Desmond, K.; Pretto, U. de. *Electric trucks. A history of delivery vehicles, semis, forklifts and others*; McFarland & Company Inc. publishers: Jefferson North Carolina, 2020, ISBN 9781476676159.
- [2]. EVTrader. Electric Truck Manufacturers. <https://evtrader.com/c/electric-truck-manufacturers/> (dostęp 24 stycznia 2020).
- [3]. EVTrader. Electric Car Manufacturers. www.evtrader.com/c/electric-car-manufacturers/ (dostęp 26 lutego 2020).
- [4]. Będkowski, B.; Dukalski, P.; Jarek, T.; Wolnik, T.; Parczewski, K.; Wnęk, H.; Urbaś, A.; Augustynek, K. Badania prototypowego silnika elektrycznego do zabudowy w kołach samochodu. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* **2019**, 167–172.
- [5]. Król E., Rossa R.: Badanie napędu elektrycznego e-kit w małym samochodzie osobowym w aspekcie zwiększenia zasięgu jazdy. „Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe” 2015, nr 2, s. 257-261.
- [6]. Król, E. Badanie efektywności energetycznej pojazdu hybrydowego bimodalnego. *Logistyka*, 6/2014, 6103–6112.
- [7]. Jeffrey M. Reiss. 2004 BMW 530i EMIS. www.evalbum.com/2098 (dostęp 20 lutego 2020).
- [8]. Berg Tom. XL Hybrids Shows System for Ford's F-150. www.constructionequipment.com/xl-hybrids-shows-system-fords-f-150 (dostęp 20 lutego 2020).
- [9]. Rosenberger, T. Paul Nutzfahrzeuge baut Mercedes Vario um. www.eurotransport.de/artikel/e-mobilitaet-von-bpw-zum-nachruersten-paul-nutzfahrzeuge-baut-mercedes-vario-um-9835418.html (dostęp 1 marca 2020).
- [10]. Banach, P.; Milewski, P., *Projektowanie i badania wysokosprawnej ładowarki dwukierunkowej z tranzystorami z węgla krzemu (SiC)*; Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym "SENE 2019", Łódź, 20-22 listopada 2019, 20-22 listopada 2019.

Autorzy

mgr inż. Piotr Szewczyk
dr inż. Andrzej Łebkowski

AREX Sp. z o.o., ul. Hutnicza 3, 81-212 Gdynia
kontakt: piotr.szewczyk@arex.pl

Informacje dodatkowe

Pełna treść artykułu zgłoszona została i przyjęta jako referat konferencyjny XXVIII Konferencji Naukowo - Technicznej PEMINE w dniu 1.03.2020r.