

Robert Rossa

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

ZAAWANSOWANE ROZWIĄZANIA TECHNICZNE W NAPĘDZIE ELEKTRYCZNYM „E-KIT” DLA MIEJSKIEGO SAMOCHODU OSOBOWEGO

ADVANCED TECHNICAL SOLUTIONS IN PURE ELECTRIC “E-KIT” DRIVE FOR CITY PASSENGER CAR

Streszczenie: W artykule opisano nowoczesne rozwiązania techniczne zastosowane w nowo opracowanych zestawach E-Kit do elektryfikacji miejskich samochodów osobowych. Przedstawiono rozwiązania dotyczące zastosowanego silnika elektrycznego, falownika energoelektronicznego, metody sterowania silnikiem, rozwiązania dotyczące konstrukcji baterii trakcyjnej i zastosowanych w niej modułów bateryjnych. Przedstawiono także charakterystyki elektromechaniczne napędu E-Kit dla samochodu osobowego zmierzone w trakcie prób laboratoryjnych.

Abstract: The paper describes the modern technical solutions used in the newly designed electrical component kits E-Kit intended for rebuilding of the combustion engine vehicles into the pure electric vehicles. The chosen technical solutions of electric motor, power electronic inverter, method of electric motor control and traction battery used in the E-Kit are described. The electromechanical characteristic curves of electric motor torque and mechanical power vs. rotor speed measured during laboratory tests of E-Kit drive are also presented.

Słowa kluczowe: *pojazd elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny, bateria trakcyjna*

Keywords: *electric vehicle, electric drive, synchronous motor, traction battery*

1. Wstęp

W latach 2011-2013 w Instytucie Komel realizowano projekt badawczy rozwojowy pt. „Bezemisyjny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3.5 t.”. W ramach projektu zaprojektowano i wdrożono kompleksowe rozwiązanie zestawów (tzw. E-Kitów) do konwersji samochodów z napędem spalinowym na pojazdy w pełni elektryczne. Silnik spalinowy elektryfikowanego pojazdu jest zastępowany wysokosprawnym silnikiem elektrycznym z magnesami trwałymi. Silnik ten jest zasilany z przekształtnika energoelektronicznego dedykowanego do zastosowań motoryzacyjnych. Zamiast zbiornika na paliwo płynne montowana jest nowoczesna bateria trakcyjna wykonana na bazie ogniw bateryjnych litowo-jonowych, z wymaganymi elektronicznymi układami zabezpieczającymi i sterującymi ładowaniem i rozładowaniem. Układ przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na koła zaprojektowano tak, by w możliwie dużym stopniu wykorzystać elementy przeniesienia napędu dostarczane oryginalnie z pojazdem. Układy pomocnicze pojazdu, takie jak wspomaganie układu kierowniczego, ha-

mulcowego itp., dostosowano do specyfiki napędu elektrycznego. Docelowo zestawy E-Kit mają być stosowane do elektryfikacji już posiadanych przez osoby prywatne lub firmy i instytucje samochodów z silnikami spalinowymi, m.in. w celu ograniczenia kosztów ich eksploatacji.

W ramach projektu badawczego opracowano dwa, nieznacznie różniące się technicznie zestawy E-Kit do elektryfikacji samochodów osobowych i dostawczych. W niniejszym artykule opisano rozwiązania techniczne zastosowane finalnie w zestawie E-Kit dla małego (miejskiego) samochodu osobowego. Demonstrator samochodu osobowego z napędem E-Kit wykonano na bazie Fiata Panda (model 2012).

2. Podstawowe założenia techniczne zestawu E-Kit dla pojazdu osobowego

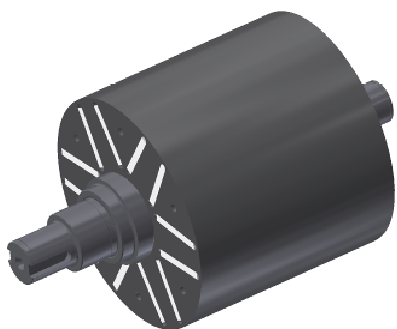
Jednym z głównych założeń projektu było to, że konwersja pojazdu spalinowego na elektryczny powinna być dla klienta możliwie tania. Z tego powodu w pojazdach poddawanych konwersji na bazie zestawów E-Kit pozostawiana jest standardowa skrzynia biegów wraz ze sprzęgłem i kołem zamachowym. Wykorzy-

stanie fabrycznej skrzyni biegów skutkuje narzuceniem z góry maksymalnej prędkości obrotowej silnika elektrycznego, która powinna być, ze względów mechanicznych, w przybliżeniu podobna jak dla silnika spalinowego.

Na etapie projektowania napędu elektrycznego E-Kit przyjęto także, że maksymalna wartość tzw. siły uciągu pojazdu z napędem E-Kit powinna być zbliżona do wartości tej siły jaką charakteryzuje się pojazd z napędem spalinowym. Przy niezmienionej skrzyni biegów (te same współczynniki przełożenia) skutkuje to koniecznością zapewnienia przez silnik elektryczny zbliżonej wartości momentu maksymalnego, jak dla silnika spalinowego.

3. Rozwiązania techniczne napędu E-Kit dla miejskiego pojazdu osobowego

Dla potrzeb finalnych wersji zestawów do elektryfikacji E-Kit zaprojektowano od podstaw dedykowany silnik synchroniczny z magnesami trwałymi (ang. skrót PMSM od Permanent magnet Synchronous Motor). Zastosowano konstrukcję obwodu magnetycznego silnika z magnesami trwałymi mocowanymi wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika (ang. skrót Interior PMSM, IPMSM), z rozmieszczeniem magnesów każdego bieguna magnetycznego w kształcie litery V [1]. W przyjętej konstrukcji wirnika można wyróżnić dwie osie symetrii magnetycznej, oś podłużną d i poprzeczną q .



Rys. 1. Rysunek wirnika z silnika IPMSM dla napędu E-Kit. Na rys. nie uwzględniono blach skrajnych w celu pokazania rozmieszczenia magnesów trwałych

Dzięki różnicy wartości permeancji w osiach magnetycznych d i q wirnika, użyteczny moment synchroniczny silnika IPMSM ma dwie składowe: składową od magnesów trwałych oraz składową reluktancyjną [2]. Zastosowana w zestawach E-Kit konstrukcja silnika IPMSM pozwoliła osiągnąć wysokie współczynniki momentu znamionowego i maksymalnego na

jednostkę masy lub objętości silnika oraz wysoki współczynnik gęstości mocy.

Podstawowe dane silnika IPMSM w napędzie E-Kit dla samochodu osobowego:

- moc znamionowa 41 kW;
- moment znamionowy 119 N·m;
- prąd znamionowy 182 A;
- prędkość obrotowa znamionowa (prędkość bazowa sterowania dwustrefowego, rys. 4) 3300 min⁻¹;
- moc maksymalna przy prędkości bazowej 62 kW;
- moment maksymalny 180 N·m;
- prąd maksymalny 280 A;
- typ chłodzenia: cieczą.



Rys. 2. Silnik IPMSM napędu E-Kit zmontowany z fabryczną skrzynią biegów samochodu osobowego

Silnik IPMSM jest zasilany w napędzie E-Kit z falownika energoelektronicznego firmy Sevcon, typ Gen4Size8. Jest to nowoczesny falownik dedykowany do zastosowań motoryzacyjnych. Falownik i silnik IPMSM napędu E-Kit są odpowiednio wzajemnie dopasowane pod względem prądowym, tzn. że wartości prądów znamionowego (ciągłego) i maksymalnego (dopuszczalnego chwilowego) falownika są bardzo zbliżone (nieznacznie większe) od wartości tych prądów dla silnika IPMSM.

Moce znamionowa i maksymalna falownika są wyższe niż wartości tych mocy osiągniętych przez silnik napędu E-Kit w samochodzie osobowym. Wynika to z unifikacji rozwiązań napędów E-Kit zastosowanych w samochodach osobowym i dostawczym, gdzie m.in. zastosowano ten sam typ falownika i ten sam silnik IPMSM. Napęd E-Kit w samochodzie dostawczym osiąga jednak większe moce znamionową i maksymalną, o wartościach zbliżonych do odpowiednich mocy falownika Gen4Size8, a jest to związane z zastosowaniem w tym samochodzie wyższego napięcia U_{DC} na szynie stałoprądowej baterii trakcyjnej (przy tym sa-

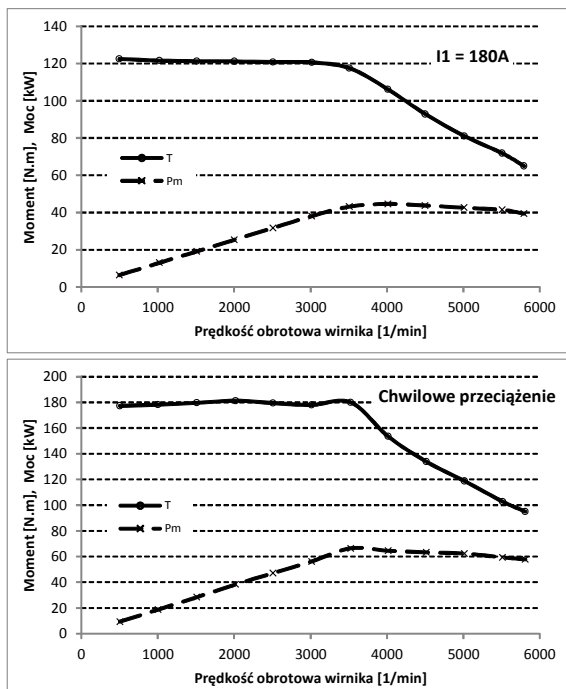
mym znamionowym i maksymalnym prądzie I_{DC}). Wyższe napięcie U_{DC} przekłada się na nieco inne charakterystyki elektromechaniczne: momentu na wale i mocy silnika w funkcji prędkości obrotowej wirnika, dla napędów E-Kit do pojazdów dostawczych, niż te pokazane na rys. 4.



Rys. 3. Falownik Sevcon Gen4Size8 zamontowany w samochodzie osobowym, za nim widoczny silnik IPMSM i skrzynia biegów

Podstawowe dane falownika Gen4Size8:

- moc znamionowa 60 kW;
- moc maksymalna 100 kW;
- zakres napięcia stałego U_{DC} : 128 ÷ 400 V;
- znamionowy prąd fazowy silnika 200 A;
- prąd chwilowy 2-min. 300 A;
- typ chłodzenia: cieczą.

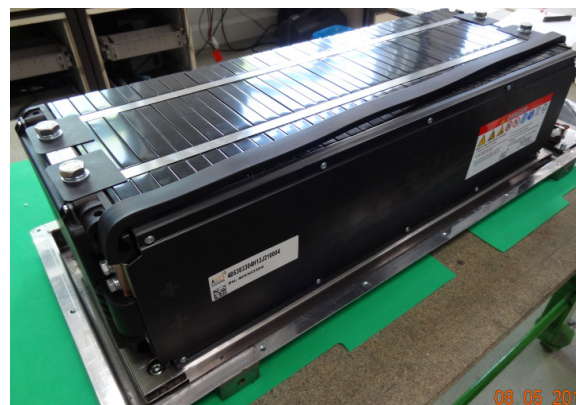


Rys. 4. Charakterystyki elektromechaniczne momentu $T = f(n)$ i mocy na wale $P_m = f(n)$ zmierzone w trakcie badań laboratoryjnych napędu E-Kit dla miejskiego samochodu osobowego

Oprogramowanie falownika Gen4Size8 realizuje zaawansowane, tzw. zorientowane polowo (ang. Field Oriented Control, FOC) sterowanie silnikiem IPMSM. Zastosowano tzw. sterowanie dwustrefowe [3 ÷ 7], tzn. na charakterystykach elektromechanicznych silnika pokazanych na rys. 4 można wyróżnić dwie strefy pracy napędu, ze stałym momentem do prędkości bazowej (ok. 3300 obr/min) i ze stałą mocą powyżej prędkości bazowej.

4. Bateria trakcyjna i układ ładowania

Baterię trakcyjną pojazdu osobowego z napędem E-Kit zaprojektowano na bazie modułów bateryjnych amerykańskiej firmy A123. Firma ta opatentowała technologię ogniw bateryjnych litowo-jonowych (Li-ion) nanofosfatowych. Wg wielu ekspertów, z aktualnie dostępnych na rynku ogniw bateryjnych, ogniwa Li-ion nanofosfatowe A123 najlepiej spełniają wymagania stawiane bateriom trakcyjnym pojazdów elektrycznych. Główne ich zalety to: doskonała żywotność liczona w cyklach pełnego ładowania, wysoka wydolność energetyczna w szerokim zakresie stanu naładowania (ogniwo może dostarczyć 75 % mocy znamionowej przy stanie jego rozładowania 90 %), doskonała odporność na temperaturę otoczenia.



Rys. 5. Moduł bateryjny firmy A123, z ogniwami przyzmatycznymi Li-ion nanofosfatowymi, o pojemności 5 kWh

Dedykowane dla przemysłu samochodowego moduły bateryjne produkowane przez A123 z wykorzystaniem wspomnianych ogniw przeszły pomyślnie testy organizacji EUCAR (The European Council for Automotive Research and Development) opracowane dla systemów magazynowania energii elektrycznej w pojazdach. Testy te obejmują m.in. następujące grupy narażeń: narażenie przeładowaniem baterii, narażenie nadmiernym rozładowaniem, stabilność

termiczna, narażenie zwarcie, kontrolowane rozbitcie modułu bateryjnego, przebicie modułu prętem ze stali miękkiej.

Wymienione wyżej zalety ogniw Li-ion nanofosfatowych A123 powodują, że doskonale nadają się one do zastosowania w napędzie E-Kit. Dzięki gwarantowanej (a typowo znacznie większej) żywotności ogniw wynoszącej 3000 cykli pełnego ładowania, elektryfikowany samochód powinien być w stanie na tej samej baterii przejechać teoretycznie ponad 360000 km (przyjęto ostrożnie zasięg 120 km na jednym ładowaniu), tzn. zamontowana w elektryfikowanym pojeździe bateria trakcyjna powinna wystarczyć na cały okres użytkowania pojazdu. Szeroki zakres bezpiecznych temperatur pracy ogniw bateryjnych A123 nanofosfatowych, od -30 do 55 °C, pozwala na wyeliminowanie z konstrukcji baterii trakcyjnej skomplikowanych i drogich układów kontroli i regulacji temperatury ogniw w celu utrzymania ich temperatury w dopuszczalnym zakresie roboczym. W dotychczasowych rozwiązaniach, przy niskich temperaturach otoczenia, baterie trakcyjne pojazdów elektrycznych (np. polski trójkołowiec SAM Re-Volt) były przed uruchomieniem pojazdu podgrzewane, odpowiednio sterowanymi ogniwami Peltiera zabudowanymi w tych bateriach.

Bateria trakcyjna samochodu osobowego z napędem E-Kit złożona jest z trzech identycznych modułów bateryjnych A123, rozlokowanych w różnych miejscach samochodu (komora silnika przy podszyciu, zamiast zbiornika paliwa płynnego przed tylną osią i w tylnej przestrzeni bagażowej). Miejsca montażu dobrano tak, aby moduły bateryjne były możliwie najlepiej chronione przed skutkami kolizji. Każdy z modułów bateryjnych wykonany jest z ogniw (cel) bateryjnych pryzmatycznych typu AMP20M1HD-A o następujących parametrach:

- pojemność pojedynczej celi 20 Ah;
- ilość gromadzonej energii w celi 65 Wh;
- nominalna moc rozładowania celi 1200 W (przy stanie naładowania 50 %);
- znamionowe napięcie celi 3.3 V;
- gęstość mocy w celi 2400 W/kg;
- gęstość energii 131 Wh/kg;
- temperaturowy zakres pracy $-30 \div 55$ °C;
- gwarantowana ilość cykli ładowania ze stanu pełnego rozładowania 3000 (przy trwałej utracie pojemności o 10 %).



Rys. 6. Rozmieszczenie modułów 5 kWh baterii trakcyjnej w samochodzie osobowym z napędem E-Kit, od góry: w komorze silnika, zamiast zbiornika paliwa, w bagażniku

Łączna pojemność baterii trakcyjnej w samochodzie osobowym z napędem E-Kit wynosi 15 kWh (3 x 5 kWh). Napięcie znamionowe jednego modułu bateryjnego wynosi 85.8 V, a znamionowe napięcie szyny stałoprądowej pełnej baterii trakcyjnej $U_{DC} = 257.4$ V.



Rys. 7. Ładowarki baterii trakcyjnej zamontowano w przestrzeni koła zapasowego. Zastosowano dwie ładowarki o łącznej mocy 6 kW

Samochód osobowy z napędem E-Kit wyposażono w pokładowy układ ładowania baterii trakcyjnej. Głównymi podzespołami tego układu są dwie ładowarki firmy Eltek, każda o mocy 3 kW. Układ ładowania jest przeznaczony dla sieci 3-fazowej 400 V. Przy łącznej mocy układu ładowania baterii trakcyjnej wynoszącej 6 kW, czas pełnego ładowania wynosi ok. 2.5 godz.

5. Podsumowanie

Rozwiązania techniczne silnika elektrycznego, falownika energoelektronicznego i baterii trakcyjnej zastosowane w zestawach do elektryfikacji osobowych pojazdów spalinowych E-Kit są na najwyższym aktualnie poziomie światowym. Dzięki tym rozwiązaniom napęd w pełni elektryczny E-Kit charakteryzuje się bardzo dobrymi osiąganiami i wysoką sprawnością. Sprawność dedykowanego silnika IPMSM sięga 95 % i jest wysoka, powyżej 93 %, w szerokim zakresie prędkości obrotowych wirnika. Sprawność falownika sięga 98 %, a wypadkowa sprawność systemu silnika i falownika przekracza 91 % w szerokim zakresie pracy napędu i osiąga do ok. 93 %.

Oprócz zestawu E-Kit do elektryfikacji miejskich samochodów osobowych opracowano także podobny zestaw dla małych samochodów dostawczych. Zestaw E-Kit dla samochodów dostawczych bazuje na tym samym silniku IPMSM i falowniku oraz na tych samych modułach bateryjnych firmy A123 z ogniwami Li-ion nanofosfatowymi. Główna różnica polega na zastosowaniu większej ilości (cztery zamiast trzech) szeregowo łączonych modułów bateryjnych, przez co pojemność baterii trakcyjnej zwiększono do 20 kWh, a napięcie na szynie stałoprądowej baterii trakcyjnej do ok. 343 V. Wyższe napięcie baterii trakcyjnej skutkuje podniesieniem tzw. prędkości bazowej na charakterystykach elektromechanicznych napędu E-Kit i w efekcie wyższą mocą znamionową i maksymalną napędu samochodu dostawczego w stosunku do wersji dla samochodu osobowego, odpowiednio 55 i 83 kW.

Literatura

- [1]. Jahns T.M., Kliman G.B., Neumann T.W., *Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors for Adjustable-Speed Drives*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 22, No. 4, pp. 738-747, July/Aug. 1986.
- [2]. Rossa R., *Obliczanie charakterystyk elektromechanicznych silnika reluktancyjnego dowzbudzanego magnesami trwałymi*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 75/2006, str. 59-69, BOBRME „Komel”
- [3]. Rossa R., Król E., *Regulacja prędkości obrotowej w napędzie elektrycznym „E-Kit” dedykowanym do elektryfikacji małych samochodów osobowych i dostawczych*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 4/2012 (97), str. 75-80, BOBRME „Komel”
- [4]. Morimoto S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasa T., *Servo Drive System and Control Characteristics of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motor*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 29, No. 2, pp. 338-343, Mar./Apr. 1993.
- [5]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., Taniguchi K., *Optimum Machine Parameters and Design of Inverter-Driven Synchronous Motors for Wide Constant Power Operation*, Ind. Appl. Society Annual Meeting, 1994, Conference Record of the 1994 IEEE, pp. 177-182.
- [6]. Morimoto S., Sanada M., Takeda Y., *Wide-Speed Operation of Interior Permanent Magnet Synchronous Motors with High-Performance Current Regulator*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 30, No. 4, pp. 920-926, July/Aug. 1994.
- [7]. Fręchowicz A., Dukalski P., Białas A., *Projekt napędu samochodu elektrycznego z dwustrefowym układem sterowania współpracującym z silnikiem PMBLDC*, Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 3/2012 (96), str. 115-121, BOBRME „Komel”.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2011 ÷ 2013 jako projekt badawczy rozwojowy nr NR01-0084-10.

Autor

dr inż. Robert Rossa
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL
40-203 Katowice,
al. Roździeńskiego 188.