

Napęd elektryczny „E-KIT” dla miejskiego samochodu osobowego

Andrzej Białas, Robert Rossa

1. Wstęp

W latach 2011–2013 w Instytucie Komel realizowany był projekt badawczy rozwojowy pt. „Bezemisny napęd elektryczny nowej generacji (E-Kit) do samochodów osobowych i dostawczych o masie całkowitej do 3,5 t”. Celem projektu było zaprojektowanie i wdrożenie kompleksowego rozwiązania w pełni elektrycznego napędu samochodów osobowych lub dostawczych, będącego zamiennikiem dla fabrycznie montowanych napędów spalinowych. Dla napędu tego przyjęto nazwę E-Kit. W miejsce silnika spalinowego zastosowano wysoko sprawny silnik elektryczny z magnesami trwałymi, zasilany za pośrednictwem przekształtnika energoelektronicznego. Zbiornik z paliwem płynnym został zastąpiony nowoczesnym zespołem akumulatorowym, sterowanym i nadzorowanym przez inteligentny układ elektroniczny. Układ przeniesienia napędu z wału silnika elektrycznego na koła został przeprojektowany tak, by w możliwie dużym stopniu wykorzystać elementy dostarczane oryginalnie z pojazdem. Układy pomocnicze pojazdu, takie jak wspomaganie układu kierowniczego, hamulcowego itp., zostały dostosowane do specyfiki napędu elektrycznego. Docelowo napęd E-Kit ma być stosowany do elektryfikacji już posiadanych przez osoby prywatne lub firmy i instytucje samochodów z silnikami spalinowymi, m.in. w celu ograniczenia kosztów ich eksploatacji.

2. Rozwiązania elementów elektrycznych i energoelektrycznych napędu E-Kit

Obwód elektromagnetyczny

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 .

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 pozwala osiągnąć wysokie współczynniki momentu znamionowego i maksymalnego na jednostkę masy lub objętości silnika oraz wysoki współczynnik gęstości mocy.

Streszczenie: Artykuł dotyczy nowoczesnego napędu elektrycznego o szeroko regulowanej prędkości obrotowej E-Kit, dedykowanego do elektryfikacji używanych, małych miejskich samochodów osobowych z silnikami spalinowymi. Opisano główne założenia przyjęte przy pracach nad napędem E-Kit. 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.

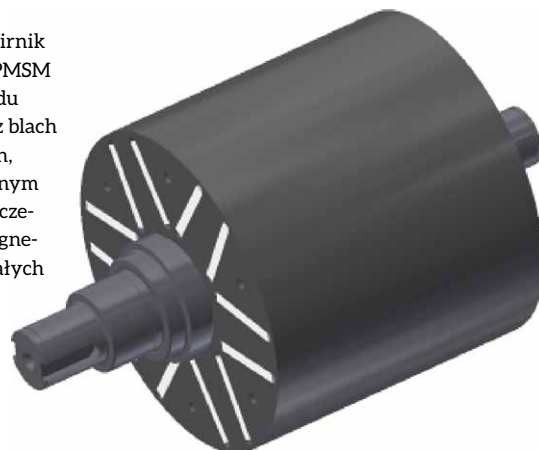
Słowa kluczowe: pojazd elektryczny, napęd elektryczny, silnik synchroniczny, bateria trakcyjna

🇬🇧 ELECTRIC „E-KIT” DRIVE FOR CITY PASSENGER CAR

Abstract: The paper deals with the modern variable-speed electric drive named E-Kit, dedicated to electrification of used small passenger cars with combustion engines. The main assumptions taken into account when designing E-Kit drive are described in the paper. 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.

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

Rys. 1. Wirnik silnika IPMSM dla napędu E-Kit, bez blach skrajnych, z widocznym rozmieszczeniem magnesów trwałych



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

- moc znamionowa: 41 kW;
- moment znamionowy: 119 Nm;
- prąd znamionowy: 182 A;
- prędkość obrotowa znamionowa (prędkość bazowa sterowania dwustrefowego, rys. 3): 3300 min⁻¹;
- moc maksymalna przy prędkości bazowej: 62 kW;
- moment maksymalny: 180 Nm;
- prąd maksymalny: 280 A;
- typ chłodzenia: ciecżą.

Falownik energoelektroniczny

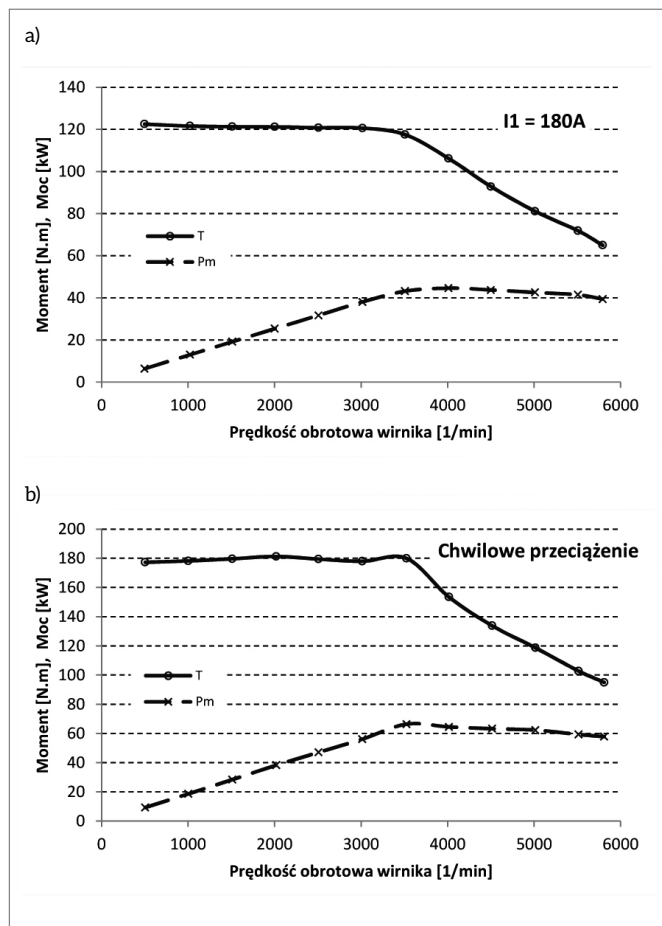
Silnik IPMSM jest zasilany w napędzie E-Kit z falownika energoelektronicznego (rys. 2). Zastosowano nowoczesny falownik dedykowany do zastosowań motoryzacyjnych. Falownik i silnik IPMSM napędu E-Kit są odpowiednio wzajemnie dopasowane pod względem prądowym, tzn. że wartości prądów znamionowego (ciągłego) 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 osiąganych przez silnik napędu E-Kit w samochodzie osobowym. Wynika to z unifikacji rozwiązań napędów E-Kit przeznaczonych dla dwóch różnych typów samo-



Rys. 2. Falownik energoelektroniczny zamontowany w samochodzie osobowym, za nim widoczny silnik IPMSM i skrzynia biegów

chodów, osobowego i dostawczego, 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, a jest to związane z zastosowaniem w tym samochodzie wyższego napięcia U_{DC} na szynie stałoprądowej baterii trakcyjnej (przy tym samym 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,



Rys. 3. 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: a - dla obciążenia znamionowego; b - dla obciążenia maksymalnego

dla napędów E-Kit do pojazdów dostawczych, niż te pokazane na rys. 3.

Podstawowe dane zastosowanego falownika:

- 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: ciecżą.

Oprogramowanie falownika 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. 3 można wyróżnić dwie strefy pracy napędu, ze stałym momentem do prędkości bazowej (ok. 3300 obr/min) i ze stałą mocą powyżej prędkości bazowej.

Bateria trakcyjna i układ ładowania

Baterię trakcyjną pojazdu osobowego z napędem E-Kit zaprojektowano na bazie modułów bateryjnych A123 (rys. 4). Ich producent opatentował 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 sta-



Rys. 4. Moduł baterijny A123 z ogniwami pryzmatycznymi Li-ion nanofosfatowymi, o pojemności 5 kWh

wiane 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.

Dedykowane dla przemysłu samochodowego moduły bateryjne A123 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 zwarcieniem, kontrolowane rozbitcie modułu baterijnego, przebitcie 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 praktycznie znacznie większej) żywotności ogniw, wynoszącej 3000 cykli pełnego ładowania, elektryfikowany samochód powinien być w stanie na tej samej baterii przejechać teoretycznie ponad 360 000 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 podszybiu, zamiast zbiornika paliwa płynnego przed tylną osią i w tylnej przestrzeni bagażowej). Miejsca monta-



Rys. 5. Ładowarki baterii trakcyjnej zamontowano w przestrzeni koła zapasowego. Zastosowano dwie ładowarki o łącznej mocy 6 kW

żu 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 od -30 do 55°C;
- gwarantowana ilość cykli ładowania ze stanu pełnego rozładowania 3000 (przy trwałej utracie pojemności o 10%).

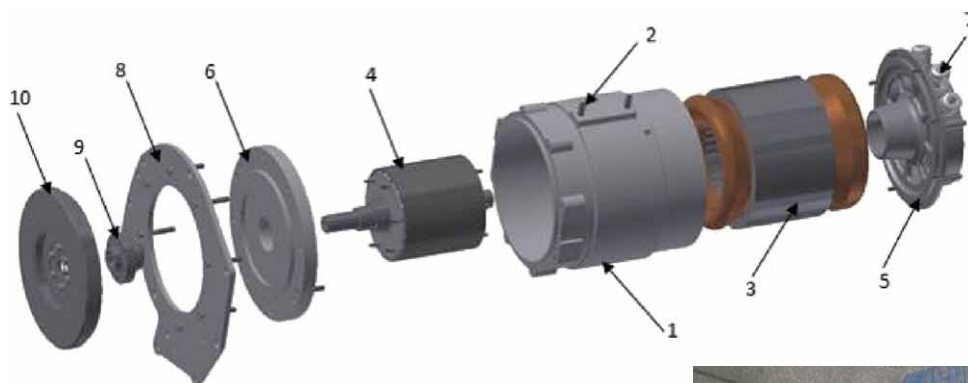
Łączna pojemność baterii trakcyjnej w samochodzie osobowym z napędem E-Kit wynosi 15 kWh (3 × 5 kWh). Napięcie znamionowe jednego modułu bateryjnego wynosi 85,8 V, a znamionowe napięcie szyny stałoprądowej pełnej baterii trakcyjnej $U_{DC} = 257,4$ V.

Samochód osobowy z napędem E-Kit wyposażono w pokładowy układ ładowania baterii trakcyjnej (rys. 5). Głównymi podzespołami tego układu są dwie ładowarki energoelektroniczne, 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.

3. Konstrukcja mechaniczna napędu elektrycznego E-Kit

W ramach projektu został zaprojektowany oraz wykonany model silnika elektrycznego typu SMKwsg132-6.

Na rysunku 6 przedstawiono rozłożony model 3D silnika IPMSM typ SMKwsg132-6, na którym zostały zaznaczone główne części oraz charakterystyczne rozwiązania konstrukcyjne silnika, takie jak: kadłub silnika (1), pakiet stojana uzwojony (3), wirnik z magnesami trwałymi (4), tarcza łożyskowa od strony napędu (6), tarcza przeciwnapędowa (5). W celu zmniejszenia masy silnika, tarcze łożyskowe od strony napędowej i przeciwnapędowej oraz kadłub zostały wykonane ze stopu aluminium o odpowiednich właściwościach wytrzymałościowych oraz odpornych na korozję. Kadłub silnika jest wyposażony w spiralny obieg cieczy chłodzącej, o przepływie wymuszonym przez pompę elektryczną. Chłodziwo jest doprowadzane do złączek (2). Jednym z założeń była możliwość bezpośredniego zesprzężenia silnika ze skrzynią biegów. Połączenie takie jest realizowane poprzez płytę pośrednią (8), zapewniającą osiowe ich połączenie poprzez zamek znajdujący się na tarczy łożyskowej od strony napędu (6) oraz tuleje znajdujące się w skrzyni biegów. Dodatkowo czop końcowy wirnika (4) wraz z adapterem (9) pozwalają na odpowiednie zamontowanie koła zamachowego (10) zespołu sprzęgłowego, umożliwiające bezpośrednie przeniesienie momentu napędowego z silnika elektrycznego poprzez zespół



Rys. 6. Rozłożony model 3D silnika IPMSM typu SMKwsg132-6

sprzęgłowy do skrzyni biegów. W tarczy przeciwnapędowej dławnicę (7) przeznaczone są do wyprowadzenia przewodów z uzwojenia stojana oraz do wyprowadzenia przewodów sterowniczych, czyli przewodów enkodera i czujników temperatury. Zdaniem autorów artykułu wybrany sposób połączenia silnika wraz z przekładnią był najprostszym z możliwych i przeanalizowanych dopuszczalnych rozwiązań [8].

Na rysunku 7 pokazano model rzeczywisty napędu – silnik elektryczny wraz ze skrzynią biegów zastosowany w pojeździe Fiat Panda.



Rys. 7. Napęd E-Kit dla samochodu Fiat Panda

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 jest wysoka, osiąga 93–96% w szerokim zakresie prędkości obrotowych wirnika. Sprawność falownika osiąga 98%, a wypadkowa sprawność systemu silnika i falownika osiąga wartość 90–94% w szerokim zakresie pracy napędu.

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 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 zwiększa się 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” 75/2006, s. 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” 4/2012 (97), s. 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” 3/2012 (96), s. 115–121, BOBRME „Komel”.
- [8] Zgłoszenie patentowe nr P.408189 Sposób połączenia silnika elektrycznego z przekładnią mechaniczną w pojeździe.

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

mgr inż. Andrzej Białas, dr inż. Robert Rossa
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice

artykuł recenzowany