

Emil Król

**Sieć Badawcza Łukasiewicz - Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, Katowice
Marcin Maciążek, Politechnika Śląska, Gliwice**

NOWOCZESNE NAPĘDY ELEKTRYCZNE DO POJAZDÓW CIĘŻAROWYCH I AUTOBUSÓW

MODERN ELECTRIC DRIVES FOR VEHICLES TRUCKS AND BUSES

Streszczenie: W artykule zaprezentowano najważniejsze zalety silników PMSM wykorzystywanych jako napęd główny w pojazdach ciężarowych oraz autobusach elektrycznych. W dalszej części artykułu opisano najważniejsze kryteria, którymi należy się kierować przy projektowaniu i doborze silników trakcyjnych do napędów autobusowych, ciężarowych lub innych wymagających bardzo dużego momentu rozruchowego oraz pracy w szerokim zakresie prędkości obrotowych. Przedstawiono najważniejsze parametry elektromechaniczne silników zaprojektowanych i wykonanych w Łukasiewicz – KOMEL, a także metodę doboru i kształtowania optymalnej charakterystyki napędu. Podczas projektowania zwrócono szczególną uwagę na parametry wibroakustyczne silników, jak również na odpowiedni dobór akumulatorów trakcyjnych zasilających napęd.

Abstract: The most important advantages of PMSM electric motors used as the main drive system in electric trucks and buses are presented in the paper. The most important criteria that should be used in the design of motors applied in bus drives (or other drives requiring great starting torques and operation within a wide range of rotational speeds) have been described. The electromechanical parameters of the motors with are designed and produced in Łukasiewicz - KOMEL are presented together with the procedures for selecting and shaping of the optimum drive characteristic. In motor design, particular attention has been paid to vibroacoustic parameters of the motors, as well as proper selection of traction batteries supplying the drive.

Słowa kluczowe: Ciężarówka elektryczna, autobus elektryczny, napęd elektryczny, PMSM

Keywords: Electric trucks, electric bus, electric drives, PMSM

1. Wstęp

Ciężarówki oraz autobusy z napędem elektrycznym są pojazdami, które bardzo dobrze nadają do wykorzystania w warunkach miejskich i podmiejskich. Ich głównymi zaletami jest wysoka sprawność przetwarzania energii w elektrycznych układach napędowych oraz niska emisja hałasu i innych zanieczyszczeń, które emitują pojazdy z napędem spalinowym. Napędy elektryczne cechują się również niższymi od spalinowych kosztami eksploatacji [1]. O parametrach trakcyjnych pojazdów ciężarowych decyduje głównie napęd elektryczny tzn. odpowiednio dobrany silnik wraz z falownikiem, które powinny zapewnić wymaganą charakterystykę generowanego momentu w funkcji prędkości obrotowej. Dodatkowo należy zadbać również o to, żeby pozostałe elementy układu napędowego nie miały wpływu na ograniczenie charakterystyki trakcyjnej silnika. Największy wpływ na charakterystykę trakcyjną napędu oprócz samego silnika ma wydajność prądowa baterii trakcyjnej [2], ale także elementy mechaniczne przeniesienia na-

napędu np. most z mechanizmem różnicowym czy półosie. Istotnym parametrem pojazdów poruszających się w ruchu miejskim jest sprawność układu napędowego, na którą największy wpływ ma sprawność silnika. Silniki z najwyższą sprawnością to silniki z magnesami trwałymi. Wysoka sprawność układu napędowego przekłada się na zasięg pojazdu dlatego, że w cyklu miejskim bardzo często mamy do czynienia z tzw. hamowaniem regeneracyjnym. Kolejnym parametrem, na który należy zwrócić uwagę to drgania i hałas [3]. Są one o tyle istotne, że hałas generowany przez silniki elektryczne jest hałasem wysokoczęstotliwościowym, który jest szczególnie nieprzyjemny dla ludzi [4]. W poniższym artykule analizowane będą jedynie silniki synchroniczne z magnesami trwałymi o sinusoidalnym kształcie siły elektromotorycznej (PMSM), które zostały zaprojektowane i wyko-

nane specjalnie do napędu pojazdów ciężarowych oraz autobusów.

Do największych zalet silników PMSM należą [5,6,7]:

- wysoka sprawność energetyczna w całym zakresie prędkości obrotowej;
- szeroki zakres efektywnej prędkości obrotowej;
- duża przeciążalność momentem;
- mniejsze wymiary gabarytowe w porównaniu do silników elektrycznych innych typów;
- efektywna regulacja prędkości obrotowej;

Do wad omawianych silników możemy zaliczyć [5,8,9]:

- konieczność zastosowania falownika;
- wyższą cenę w porównaniu do silników indukcyjnych;
- konieczność zastosowania enkodera lub innych czujników położenia kąтового wirnika.

Opisywane silniki PMSM typu SMwsK280M16A oraz SMwsK280M16B są przystosowane do pracy z osią napędową o jednym przełożeniu wyposażoną w mechanizm różnicowy.

2. Rozwiązania konstrukcji napędów

Upraszczając układ napędowy rezygnuje się z klasycznej skrzyni biegów, pozostaje wyłącznie silnik i przekładnia główna z mechanizmem różnicowym. Taki zabieg wymaga od silnika bardzo wysokich momentów rozruchowych oraz pracy przy wysokich prędkościach obrotowych [1,2,5]. Spełnienie obu warunków równocześnie jest trudne i wymaga kompromisu przy doborze tych parametrów. Dodatkowo od napędów trakcyjnych wymaga się, aby ich masa i gabaryty były jak najmniejsze. To wymusza minimalizację strat mocy oraz zastosowanie bardzo wydajnego układu chłodzenia zarówno w silniku jak i w falownikach. W zaprojektowanych przez Łukasiewicza - KOMEL silnikach w celu minimalizacji strat mocy zastosowano specjalne niskostatne blachy elektrotechniczne, z których wykonany jest pakiet stojana oraz pakiet wirnika. Zaprojektowano wydajny układ chłodzenia cieczowego, który efektywnie odprowadza ciepło z pakietu stojana, a także pośrednio pakietu wirnika oraz uzwojeń. Dotyczy to zarówno uzwojeń znajdujących się w żłobkach jak również wyprowadzeń czołowych. Uzwojenia zastosowane w silniku mogą pracować zarówno jako trójfazowe lub jako sześciofazowe przy zachowaniu minimalnej indukcyjności wzajemnej obu

uzwojeń. Tryb pracy uzwojeń konfigurowany jest poza silnikiem, z którego wyprowadzono sześć przyłączy zasilania. Uzwojenia silnika można połączyć równolegle co pozwala wykorzystać jego pełną moc i prędkość maksymalną przy zasilaniu z jednego falownika trójfazowego (o odpowiedniej wysokiej wydajności prądowej). Natomiast w przypadku wykorzystania konfiguracji sześciofazowej możemy zasilić silnik z dwóch niezależnych falowników trójfazowych lub jednego falownika sześciofazowego. W przypadkach awarii jednego z falowników możemy zasilac tylko jedno uzwojenie silnika, jednak w tym przypadku musimy liczyć się z ograniczeniem do 50% momentu maksymalnego, a także ograniczeniem prędkości maksymalnej, gdyż napędy wykorzystują możliwości pracy w trzech strefach regulacji. Silniki mogą być zasilane falownikami o odpowiedniej wydajności prądowej oraz możliwości sterowania pracą silników PMSM wykorzystującymi moment reluktancyjny.



Rys.1. Widok silnika SMwsK280M16A/B umieszczonego w ramie montażowej

Jednym z ważniejszych aspektów projektowania napędów elektrycznych z magnesami trwałymi pracującymi jako napędy główne pojazdów szczególnie dużych mocy są parametry wibroakustyczne silników. W tego typu silnikach dąży się do zwiększania współczynnika generowanej mocy w stosunku do masy. W związku z czym zredukowana jest masa kadłuba oraz tarcz, a także obwodu elektromagnetycznego stojana. W wyniku takich działań zmniejsza się sztywność całej konstrukcji silnika a duże siły magnetyczne mogą prowadzić do okresowych odkształceń

stojana i kadłuba. W wyniku tych sił generowane są wibracje i hałas silnika.

3. Parametry silników napędowych

Omawiane silniki napędowe zostały zaprojektowane i wykonane jako synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika. Liczba biegunów magnetycznych wynosi $2p = 16$. Taka ilość biegunów oraz asymetryczna reluktancyjnie konstrukcja wirnika pozwoliła uzyskać wysoki moment elektromagnetyczny pochodzący od magnesów trwałych, a jednocześnie różnice w reaktancjach w osi d i q powodują, że wirniki charakteryzują około 25% momentem reluktancyjnym przy prądzie maksymalnym. Wzór na moment elektromagnetyczny T_e w maszynie z asymetrycznym reluktancyjnie wirnikiem przyjmuje postać:

$$T_e = \frac{3 \cdot p}{2} [I_q \psi_{mag} + (L_d - L_q) I_d I_q] \quad (1)$$

gdzie:

ψ_{mag} – strumień wzbudzenia od magnesów trwałych skojarzony z uzwojeniem stojana;

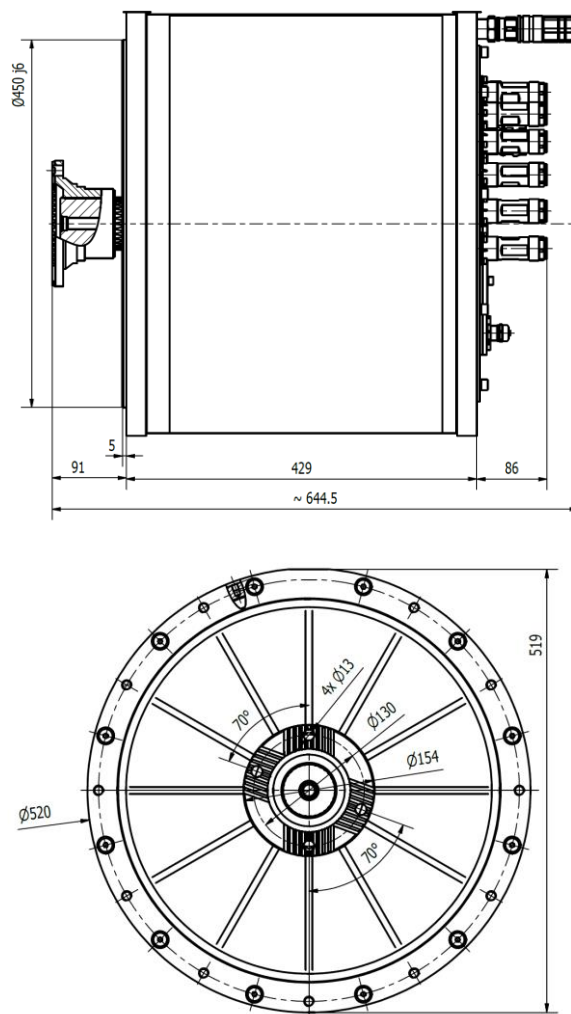
L_d, L_q – indukcyjności odpowiednio w osi d i q ;

p – liczba par biegunów;

I_d, I_q – składowe prądów uzwojenia stojana w osi d i q .

Przy wykorzystaniu odpowiednio skonfigurowanego falownika lub falowników możemy wykorzystać zarówno moment pochodzący od magnesów trwałych jak również moment reluktancyjny. Wypadkowa wartość momentu elektromagnetycznego silnika asymetrycznego reluktancyjnie zależy od różnicy reaktancji w osiach d i q silnika. Różnicę tę można maksymalizować poprzez odpowiednią konstrukcję mechaniczną wirnika, co pozwala zaprojektować silnik o wyższym momencie na wale bez zwiększania jego gabarytów i masy. Silniki napędowe zostały tak zaprojektowane, aby dwa różne typy silników wykorzystywały ten sam kadłub i ten sam układ chłodzenia. Na rysunku 2 przedstawiono wymiary gabarytowe z układem wyprowadzeń zasilania oraz przyłącza układu chłodzenia kadłuba wykorzystywanego do obu typów silników. W tego typu silnikach dąży się do zwiększania współczynnika generowanej mocy w stosunku do masy. W związku z czym często redukowana jest masa obudowy oraz części czynnej stojana.

W wyniku zmniejsza się sztywność całej konstrukcji, a duże siły magnetyczne mogą prowadzić do okresowych odkształceń [3], w wyniku których generowane są wibracje i hałas.



Rys. 2. Wymiary gabarytowe obu silników napędowych

W tabeli 1 i 2 przedstawiono podstawowe parametry elektromechaniczne silników napędowych zaprojektowanych i wykonanych w Łukasiewicz-KOMEL. Silniki różnią użytymi materiałami obwodu magnetycznego oraz kosztem wykonania. Założono, że falowniki obu typów silników, będą zasilane z akumulatora trakcyjnego o napięciu znamionowym 710V DC.

Tabela. 1.

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi	Typ: SMwsK280M16A
	Chłodzenie cieczą
Napięcie zasilnia dwóch falowników: 710 V _{DC}	
Moc znamionowa: 275 kW	Moc maksymalna: 460 kW
Prąd znamionowy: 2x220 A	Prąd maksymalny: 2x1000 A
Prędkość obr znam: 1700 obr/min	Prędkość maksymalna: 3000 obr/min
Moment znamionowy: 1545 Nm	Moment maksymalny: 4000 Nm
Praca: S2-120 min	Masa: 300 kg
Sprawność: 96.9 %	IP: 55

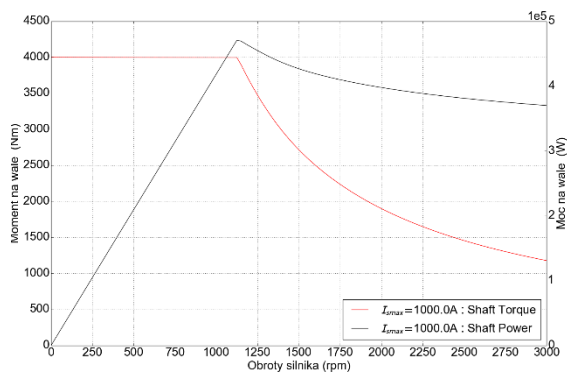
Tabela. 2.

Silnik synchroniczny z magnesami trwałymi	Typ: SMwsK280M16B
	Chłodzenie cieczą
Napięcie zasilnia dwóch falowników: 710 V _{DC}	
Moc znamionowa: 320 kW	Moc maksymalna: 650 kW
Prąd znamionowy: 2x220 A	Prąd maksymalny: 2x1000 A
Prędkość obr znam: 1700 obr/min	Prędkość maksymalna: 3000 obr/min
Moment znamionowy: 1800 Nm	Moment maksymalny: 6000 Nm
Praca: S2-120 min	Masa: 300 kg
Sprawność: 97.1 %	IP: 55

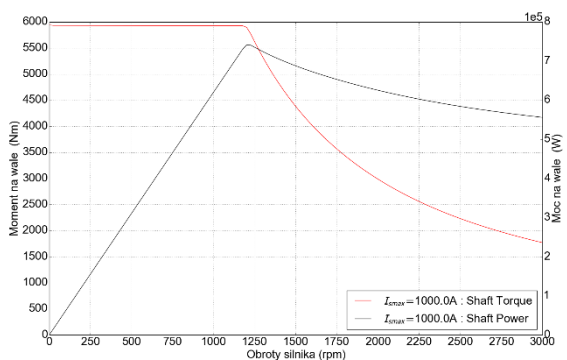
4. Charakterystyki trakcyjne napędów

Silniki synchroniczne z magnesami trwałymi umieszczonymi wewnątrz wirnika są w większości sterowane jako silniki synchroniczne tzw. PMSM IPM lub PMSM DPM. Dlatego typu silników możliwa jest efektywna praca we wszystkich strefach regulacji. Szczególnie istotna jest praca w drugiej strefie regulacji (FWC Field Weakening Control) jest to strefa stałej mocy oraz trzeciej strefie regulacji (MTPV - Maximum Torque Per Volt). W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej od zera aż do tzw. prędkości bazowej limitowanej napięciem stałym zasilania falownika, silniki PMSM są sterowane przez falownik algorytmem, który wymusza, aby pracowały przy optimum ilorazu momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania [1,2,7] (MTPA- Maximum Torque Per Ampere). W drugiej strefie regulacji prędkości, powyżej prędkości bazowej, silnik pracuje w strefie stałej

mocy [1,2,7]. Trzecia strefa regulacji (MTPV) jest wykorzystywana w napędach trakcyjnych, które muszą pracować w szerokim zakresie prędkości obrotowych oraz wysokich momentach. Zwiększanie prędkości obrotowej silnika jest realizowane przez odpowiednie osłabianie strumienia magnetycznego w szczelinie powietrznej silnika, co wiąże się również z obniżeniem momentu elektromagnetycznego wytwarzanego przez silnik [5, 6]. W silnikach z magnesami trwałymi chwilowy moment obciążenia może być kilkakrotnie większy od momentu znamionowego, jest on ograniczony chwilową wydajnością prądową falowników zasilających silnik. Dla rzeczywistych falowników dostępnych na rynku przeciążalność prądowa wynosi od 2 do 3 razy. Przeciążalność prądowa całego napędu decyduje o wartości momentu maksymalnego, jak również o dynamice działania napędu i całego pojazdu. Napędy wyposażone w silniki z magnesami mają jednakowe charakterystyki przy pracy silnikowej jak i generatorowej. Kształtowanie charakterystyki momentowej dla pracy silnikowej i generatorowej jest jednym z ważniejszych aspektów konfiguracji końcowej napędów pojazdów ciężarowych i autobusów. Aby zapewnić porównywalną dynamikę autobusu z napędem elektrycznym, do autobusu z napędem spalinowym, silnik elektryczny powinien mieć zbliżony kształt charakterystyki mechanicznej do wypadkowej charakterystyki użycia wszystkich biegów w autobusie z silnikiem spalinowym. Idealna charakterystyka silnika elektrycznego dla autobusu powinna mieć bardzo wysoki moment maksymalny, który silnik musi utrzymać do 30% wartości prędkości maksymalnej prędkości obrotowej. Aby uzyskać wymagany kształt charakterystyki należy sztucznie (programowo) ograniczyć parametry silnika w konfiguracji falowników. Jednak ze względu ze ograniczanie programowe może być wykonane tylko poprzez obniżanie parametrów, sam silnik musi być przewymiarowany mocowo a falowniki prądowo. Poniżej przedstawiono nieograniczone programowo charakterystyki momentu oraz mocy dla obu typów silników oraz mapy sprawności silników w całym zakresie obciążenia oraz pełnym zakresie prędkości obrotowych przy których silniki mogą pracować. Docelowe charakterystyki napędu w pojazdach będą wycinkami z pełnych charakterystyk oraz będą dopasowane mocowo do wydajności prądowej akumulatorów pojazdu.

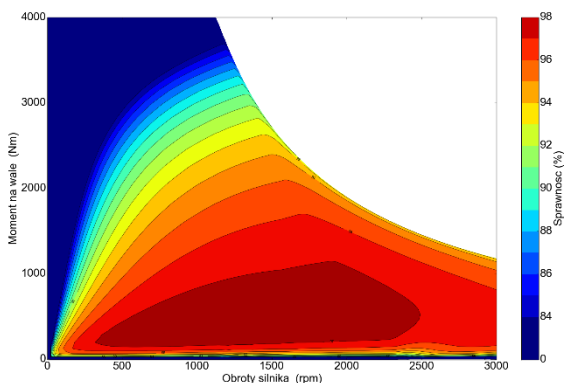


Rys. 3. Charakterystyki trakcyjne silnika SMwsK280M16A dla prądu maksymalnego

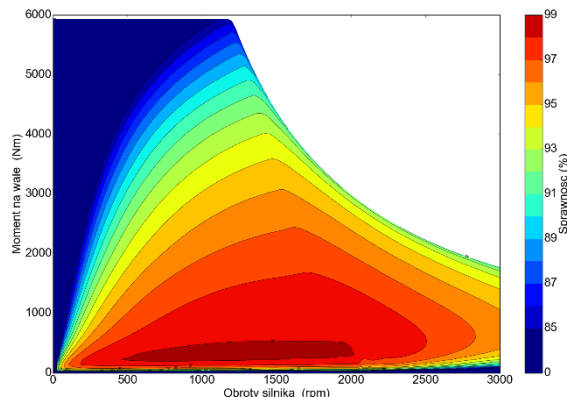


Rys. 4. Charakterystyki trakcyjne silnika SMwsK280M16B dla prądu maksymalnego

Przewymiarowanie mocowe silnika napędowego w pojazdach niekorzystnie wpływa na jego masę i objętość, jak również na koszty wykonania. Objętość i masa silnika są kolejnym elementem ograniczeń jakie narzuca budowa nowoczesnego napędu trakcyjnego. Nie mniej istotnym parametrem napędu elektrycznego jest sprawność. Od sprawności napędu, szczególnie w warunkach miejskich, gdzie wykonywana jest duża ilość hamowań zależy zasięg pojazdu.



Rys. 5. Mapa sprawności silnika SMwsK280M16A dla prądu maksymalnego



Rys. 6. Mapa sprawności silnika SMwsK280M16B dla prądu maksymalnego

5. Podsumowanie

Rozwój elektromobilności powoduje, że nie tylko samochody osobowe będą coraz częściej wykorzystywać napęd elektryczny. Autobusy elektryczne są już faktem w wielu miastach na świecie, w tym również polskich. Jednak w dalszym ciągu brakuje elektrycznych samochodów ciężarowych mogących przewozić różne towary i materiały w obszarach miejskich oraz pozamiejskich. Międzynarodowy lub międzymiastowy transport towarów z wykorzystaniem pojazdów elektrycznych jest obecnie trudny do realizacji ze względu na brak odpowiednio pojemnych magazynów energii. Jednak już same silniki elektryczne są przygotowane na nadchodzące zmiany. Aby sprostać obecnym wymaganiom napęd elektryczny, a w tym głównie silnik, falownik i akumulator trakcyjny musi spełniać szereg wymogów, które zostały opisane w tym artykule. Jednym z najważniejszych parametrów jest przewymiarowanie mocowe silnika, ze względu na wymagany moment maksymalny na wale, jak również na prędkość maksymalną. Przewymiarowanie mocowe silnika, pociąga za sobą konieczność przewymiarowania prądowego falownika. Ograniczenie prędkości bazowej silnika zmniejsza moc, którą do silnika musi dostarczyć akumulator trakcyjny. Takie kształtowanie charakterystyki trakcyjnej całego napędu jest najczęściej stosowaną metodą kształtowania i dopasowania charakterystyki trakcyjnej napędu do różnego typu pojazdów. „Ubočnym” pozytywnym skutkiem zastosowania tej metody kształtowania charakterystyki trakcyjnej jest wysoka sprawność napędu, a negatywnym zwiększona masa. Często stosowaną metodą kształtowania charakterystyki trakcyjnej silników z magnesami trwałymi jest zwielokrotnienie liczby faz silnika do sześciu lub dziewięciu.

Dzięki zwielokrotnieniu mamy możliwość zastosowania większej liczby falowników co skutkuje znaczącym podniesieniem ich sumarycznej wydajności prądowej. Metoda ta stosowana jest w silnikach dużej mocy, gdzie bardzo trudno wykonać pojedyncze falowniki o odpowiedniej wydajności prądowej. Każdy z falowników w takim układzie pracuje na oddzielnym uzwojeniu odizolowanym galwanicznie od innych falowników zasilających jeden silnik. Metoda ta wymaga specjalnej konstrukcji silnika oraz falowników 3-faz ze specjalnym oprogramowaniem. Cechą charakterystyczną napędu elektrycznego połączonego na stałe z mostem mechanicznym ze zintegrowanym mechanizmem różnicowym jest to, że autobusem z tym napędem można poruszać się jak autobusem z automatyczną skrzynią biegów. Ze względu na brak możliwości odłączania mechanizmu przenoszącego moment od silnika elektrycznego można wykorzystywać silnik w całym zakresie pracy silnikowej i prądnicowej. Taki stan pracy bardzo łatwo wykorzystać przy hamowaniu regeneracyjnym, które nie tylko pozwala kierowcy odzyskać część energii z hamowania co znacząco może wypłynąć na zasięg takiego pojazdu w ruchu miejskim, ale również pozwala zmniejszyć zapylenie wynikające ze zużywających się klocków układu hamulcowego.

6. Literatura

- [1]. 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), str. 75-80.
- [2]. Król E. Wolnik T.: *Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych - właściwości układu zasilania ograniczające parametry silnika*, *Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe* Nr 2/2021 ISSN 0239-3646.
- [3]. Night noise guidelines for Europe; Hurlley, C., World Health Organization, Eds.; World Health Organization Europe: Copenhagen, Denmark, 2009; ISBN 978-92-890-4173-7.
- [4]. Fastl, H.; Zwicker, E. *Psychoacoustics: Facts and Models*; Springer series in information sciences; 3rd. ed.; Springer: Berlin ; New York, 2007; ISBN 978-3-540-23159-2.
- [5]. 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), str. 75-80.
- [6]. 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.
- [7]. 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.
- [8]. Wolnik T, Król E.: *Silniki PMSM do zastosowań trakcyjnych - czy moc znamionowa silnika decyduje o jego gabarycie i masie?*, *Maszyny Elektryczne Zeszyty Problemowe* Nr 2/2019 ISSN 0239-3646.
- [9]. Bernatt J.: „Obwody elektryczne i magnetyczne maszyn elektrycznych wzbudzanych magnesami trwałymi”, Wydawnictwo BOBRME Komel Katowice 2011.

Autorzy

mgr inż. Emil Król
Sieć Badawcza Łukasiewicz-
Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych
KOMEL
40-203 Katowice,
al. Roździeńskiego 188

dr hab. inż. Marcin Maciążek, prof. PŚ.
Politechnika Śląska - Wydział Elektryczny - Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki
ul. B. Krzywoustego 2
44-100 Gliwice