

Robert Rossa, Emil Król
BOBRME „Komel”, Katowice

DWUSTREFOWA REGULACJA PRĘDKOŚCI OBROTOWEJ W NOWOCZESNYCH NAPĘDACH ELEKTRYCZNYCH OPARTYCH NA SILNIKACH SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI TRWAŁYMI

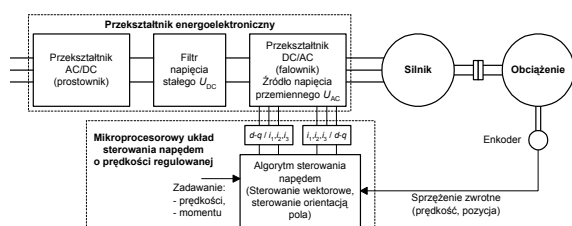
TWO-ZONES SPEED CONTROL IN MODERN ELECTRIC DRIVES WITH PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Abstract: The papers deals with the two-zones speed control of permanent magnet synchronous motors (PMSMs) in modern electric drives dedicated for variable speed applications. The electromechanical characteristic curves of variable speed drives are presented. Two speed control zones can be distinguish in these characteristic curves: the constant torque zone and the constant power zone. The principles of PMSM operation in each speed control zone are described. The constant power zone utilizes the flux weakening technology based on a constant-current-constant-voltage control strategy.

1. Wstęp

Każdy nowoczesny napęd elektryczny o prędkości regulowanej składa się z trzech podstawowych elementów (rys. 1):

- silnika elektrycznego (i podłączonego do niego obciążenia);
- przekształtnika energoelektronicznego (falownika) zasilającego silnik;
- mikroprocesorowego układu regulacji i sterowania pracą całego układu napędowego z zaimplementowanym, zoptymalizowanym dla danego napędu algorytmem sterowania (mikroprocesorowy układ sterowania często jest zintegrowany z przekształtnikiem energoelektronicznym).



Rys. 1. Schemat poglądowy napędu elektrycznego o prędkości regulowanej

Najistotniejszym elementem układu napędowego jest silnik elektryczny. To od parametrów elektromagnetycznych i właściwości mechanicznych jakimi charakteryzuje się silnik elektryczny zależy w stopniu decydującym, jak wydajny elektromechanicznie i jak sprawny energetycznie będzie napęd elektryczny oraz jaka będzie maksymalna dopuszczalna prędkość obrotowa ograniczająca od góry zakres

regulacji prędkości. W napędach elektrycznych o szeroko regulowanej prędkości stosowane są zwykle silniki indukcyjne, silniki reluktancyjne przełączalne, silniki bezszczotkowe prądu stałego oraz silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Trzy pierwsze wymienione rodzaje silników stosowane są w napędach, gdzie sprawność energetyczna, dynamika układu napędowego lub niski poziom tętnień momentu nie są czynnikami krytycznymi, lecz czynnikiem takim jest głównie cena układu napędowego. Natomiast w wysokowydajnych i wysoko-sprawnych napędach o szerokim zakresie regulowanej prędkości obrotowej, gdzie istotne są wszystkie wyżej wymienione czynniki, stosowane są w większości przypadków silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. Wynika to z głównych zalet tych silników:

- charakteryzują się one najwyższą sprawnością spośród wszystkich typów silników elektrycznych;
 - charakteryzują się one najwyższymi osiągalnymi obecnie współczynnikami momentu znamionowego i momentu maksymalnego do masy lub objętości silnika;
 - pozwalają uzyskać niski poziom tętnień momentu mechanicznego;
 - umożliwiają osiągnięcie wysokiej dynamiki i precyzji regulacji napędu.
- Jako napęd wysokowydajny rozumie się tu napęd elektryczny charakteryzujący się:
- wysoką wartością współczynnika uzyskiwanego momentu mechanicznego znamio-

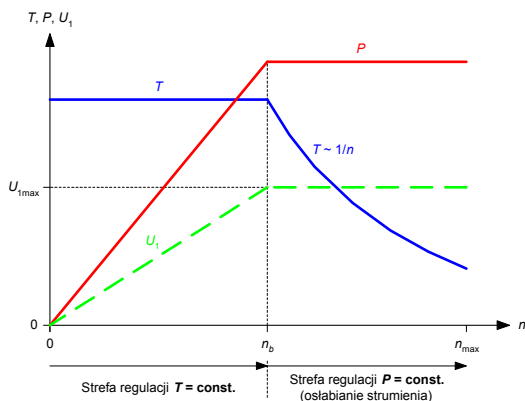
nowego przypadającego na jednostkę masy lub objętości silnika;

- wysokim współczynnikiem chwilowej przeciążalności momentem;
- niskimi niepożądanymi tętnieniami momentu mechanicznego;
- precyzyjną regulacją prędkości obrotowej;
- dobrymi parametrami dynamicznymi (szybka odpowiedź napędu na zmianę nastaw parametrów regulacyjnych).

Jako napęd wysokosprawny rozumie się tu napęd elektryczny charakteryzujący się wysoką sprawnością energetyczną (niskimi stratami przy przetwarzaniu energii elektrycznej na mechaniczną).

Liczba możliwych zastosowań wysokowydajnych, wysokosprawnych napędów elektrycznych o prędkości regulowanej jest duża. Napędy te są stosowane m.in. w: nowoczesnych pojazdach drogowych o napędzie elektrycznym lub hybrydowym i w pojazdach trakcji Elektrycznej, w pędnikach nowoczesnych jednostek morskich (np. napęd Azipod firmy ABB), w windach i podnośnikach, w obrabiarkach przemysłowych sterowanych numerycznie, w pompach, w robotyce i różnego typu układach automatyki przemysłowej.

2. Charakterystyki elektromechaniczne napędów o prędkości regulowanej



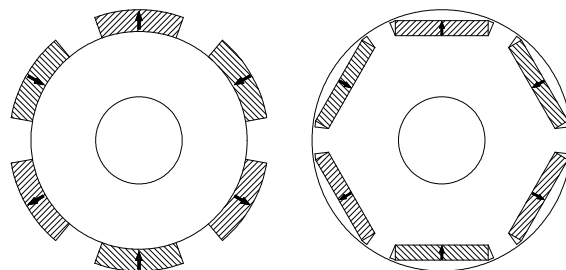
Rys. 2. Charakterystyki elektromechaniczne napędów elektrycznych o szerokim zakresie regulacji prędkości

Na rys. 2 pokazano typowe charakterystyki elektromechaniczne nowoczesnego napędu elektrycznego z silnikiem PMSM o szerokim zakresie regulacji prędkości obrotowej. Na charakterystykach tych wyróżnić można dwie strefy regulacji, tzw. strefę stałego momentu i strefę stałej mocy. W kolejnych punktach

omówiono sposób sterowania silnikami PMSM w obu strefach regulacji prędkości.

3. Strefa regulacji prędkości $T = \text{const.}$

W pierwszej strefie regulacji prędkości obrotowej, od zera aż do tzw. prędkości bazowej n_b , silniki PMSM są sterowane wg takiego algorytmu, by pracowały przy optimum ilorazu osiąganego momentu elektromagnetycznego do prądu zasilania T/I_1 [1 ÷ 4]. W zależności od zastosowanego w silniku typu wirnika (rys. 3), optymalny iloraz T/I_1 jest osiągany przy różnych kątach fazowych β wskaz prądu zasilania silnika I_1 , co ilustrują wynikające z dwufazowego $dq0$ modelu matematycznego maszyn synchronicznych wykresy wskazowe pokazane na rys. 4.

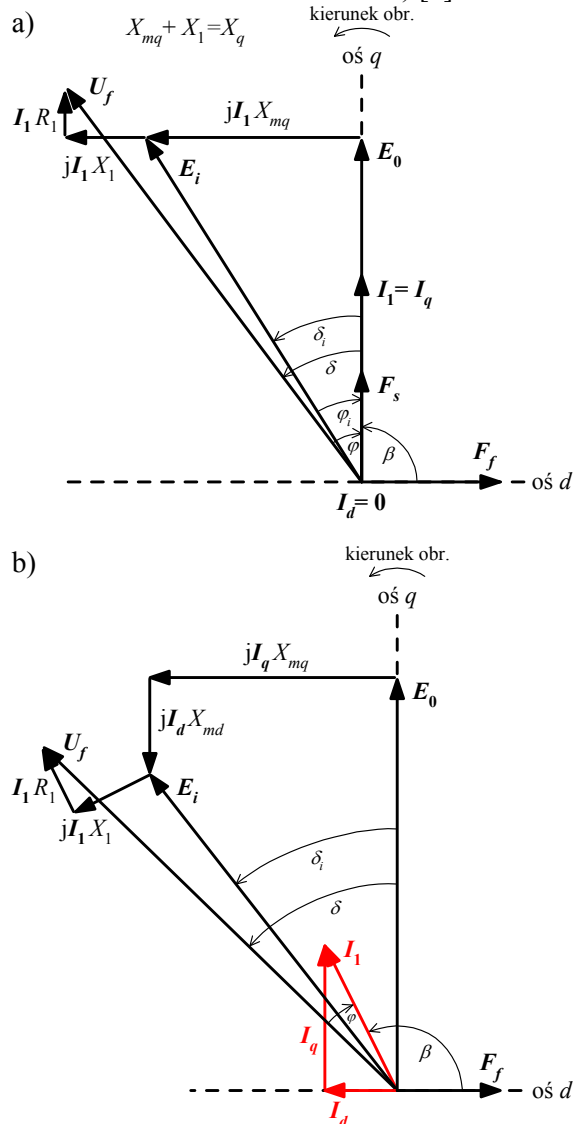


Rys. 3. Przykładowe przekroje poprzeczne wirników w silnikach: a) SMPMSM, b) IPMSM.

W silnikach PMSM z magnesami trwałymi zamocowanymi na powierzchni cylindrycznego jarzma wirnika (ang. skrót Surface Mounted PMSM lub SMPMSM), dla których pomiędzy reaktancjami synchronicznymi w osiach magnetycznych wirnika podłużnej d i poprzecznej q zachodzi zależność: $X_d = X_q$, optimum ilorazu T/I_1 otrzymywane jest gdy wskaz prądu I_1 , a więc także wektor siły magnetomotorycznej (SMM) stojana F_s , wyprzedza wektor SMM wirnika (wzbudzenia od magnesów trwałych) F_f o kąt fazowy $\beta = \beta_{\text{optimum}} = 90^\circ \text{el.}$ (rys. 4.a). Jest to równoznaczne z zasilaniem uzwojenia silnika wyłącznie tzw. prądem poprzecznym, tzn. $I_1 = I_q$.

W konstrukcjach silników PMSM z wirnikami magnetycznie niesymetrycznymi, dla których zachodzi związek: $X_q > X_d$, optimum ilorazu T/I_1 otrzymywane jest gdy wskaz prądu I_1 wyprzedza wektor SMM wirnika F_f o kąt fazowy $\beta = \beta_{\text{optimum}} > 90^\circ \text{el.}$ (rys. 4.b). Jest to związane z występowaniem składowej reluktancyjnej momentu elektromagnetycznego w tego typu konstrukcjach. Niesymetrię magnetyczną charakteryzują się przede wszystkim silniki PMSM z magnesami mocowanymi

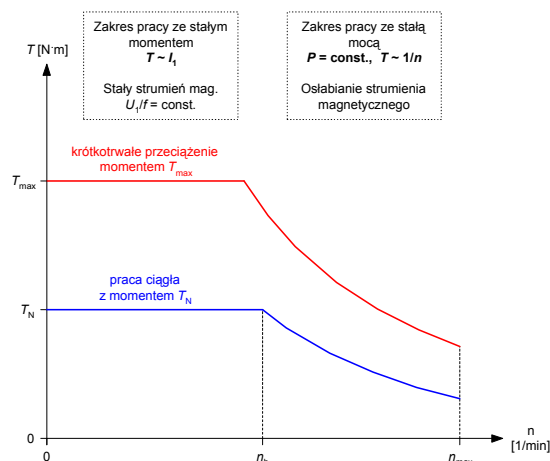
wewnątrz rdzenia magnetycznego wirnika (ang. skrót Interior PMSM lub IPMSM) [1].



Rys. 4. Wykresy wskazowe odpowiadające pracy silników PMSM o różnych typach wirników przy optimum ilorazu T/I_1 : a) SMPMSM, b) IPMSM

W strefie regulacji prędkości $T = \text{const.}$ moment elektromagnetyczny silnika jest w przybliżeniu liniowo zależny od wartości skutecznej prądu zasilania I_1 . Wartość maksymalna tego momentu T_{max} ograniczona jest przez jeden z czynników: dopuszczalną wartość składowej przemiennej prądu wyjściowego przekształtnika energoelektronicznego, dopuszczalną wartość prądu stojana silnika wynikającą z ograniczeń cieplnych uzwojenia i magnesów, dopuszczalną wartość prądu stojana nie powodującą trwałego odmagnesowania magnesów trwałych, nasycenie się rdzenia magnetycznego silnika. Zakładając że utrzymujemy stałą wartość

skuteczną I_1 oraz stałą (optymalną) wartość kąta fazowego β wskazu prądu I_1 w całej strefie regulacji prędkości $T = \text{const.}$, wzrost mechanicznej prędkości kątowej wirnika ω_m w tej strefie regulacji powoduje liniowy wzrost siły elektromotorycznej (SEM) E_0 indukowanej w uzwojeniu twornika przez stały strumień wzbudzenia od magnesów trwałych, liniowy wzrost napięcia szczelinowego E_i indukowanego w uzwojeniu przez wypadkowy strumień magnetyczny główny w szczelinie powietrznej oraz liniowy wzrost napięcia U_1 na zaciskach silnika PMSM (rys. 2). W tym reżimie pracy silniki PMSM pracują zatem przy stałym stosunku napięcia do częstotliwości U_1/f , czyli przy stałym strumieniu skojarzonym z uzwojeniem.

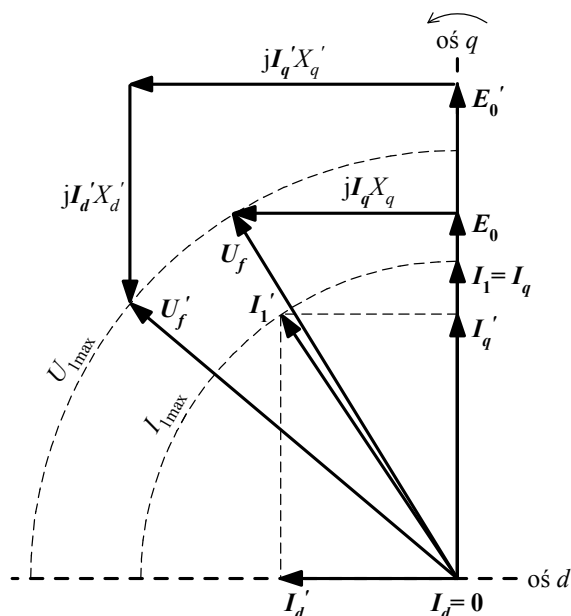


Rys. 5. Wpływ obciążenia silnika na prędkość bazową – granicę dwóch stref regulacji

Dla określonych wartości I_1 i $\beta = \beta_{\text{optimum}}$, przy pewnej mechanicznej prędkości kątowej wirnika $\omega_m = \omega_b$, napięcie U_1 osiąga maksymalną wartość $U_{1\text{max}}$, jaką może wygenerować przekształtnik energoelektroniczny zasilający silnik. Prędkość kątowa ω_b nazywana jest prędkością kątową bazową. Odpowiada jej prędkość obrotowa bazowa n_b . Prędkość bazowa ω_b stanowi granicę pomiędzy strefami regulacji $T = \text{const.}$ i $P = \text{const.}$ Znamionowemu prądowi zasilania I_{1N} odpowiada znamionowa prędkość bazowa ω_{bN} . Przy prądach $I_1 > I_{1N}$, (chwilowe przeciążenie) maksimum napięcia $U_{1\text{max}}$ osiągnane jest przy prędkościach kątowych $\omega_m < \omega_{bN}$ (rys. 5), co wynika ze zwiększonych spadków napięcia na reaktancji synchronicznej poprzecznej X_q oraz na rezystancji stojana R_1 . Przy prądach $I_1 < I_{1N}$ maksimum napięcia $U_{1\text{max}}$ osiągnane jest przy prędkościach kątowych $\omega_m > \omega_{bN}$.

4. Strefa regulacji prędkości $P = \text{const.}$ Praca z osłabianiem strumienia magnetycznego

Powyżej prędkości bazowej ω_b silnik pracuje w drugiej strefie regulacji prędkości, w której wzrost napięcia na zaciskach silnika U_1 nie jest już możliwy. Dalsze zwiększanie prędkości kątovej wirnika ω_m osiągane jest dzięki zastosowaniu techniki osłabiania strumienia magnetycznego głównego Φ w szczeliny powietrznej silnika. Osłabianie strumienia w silnikach PMSM uzyskuje się poprzez wytworzenie odpowiedniej dla danej prędkości $\omega_m > \omega_b$ ujemnej podłużnej reakcji twornika, skutkującej nieprzekroczeniem limitu napięcia $U_{1\text{max}}$.



Rys. 6. Wykres wskazowy dla silnika SMPMSM przedstawiający zasadę osłabiania strumienia magnetycznego w drugiej strefie regulacji prędkości. Wielkości oznaczone „prim” odpowiadają prędkości większej od bazowej. Pominięto wpływ rezystancji uzwojenia twornika R_1

Posługując się parametrami skupionymi dwufazowego modelu obwodowego $dq0$ i wykresem wskazowym silnika PMSM można to wyjaśnić tak, iż osłabianie strumienia jest realizowane poprzez takie sterowanie wskazem prądu zasilania I_1 w drugiej ćwiartce układu $dq0$, aby uzyskać odpowiednio dużą dla danej prędkości $\omega_m > \omega_b$ ujemną składową podłużną I_d tegoż wskaz i tym samym odpowiednio długi wektor spadku napięcia $jI_d X_d$ na reaktancji synchronicznej X_d . Dla ujemnych składowych I_d wektor $jI_d X_d$ ma zwrot przeciwny do zwrotu wektora

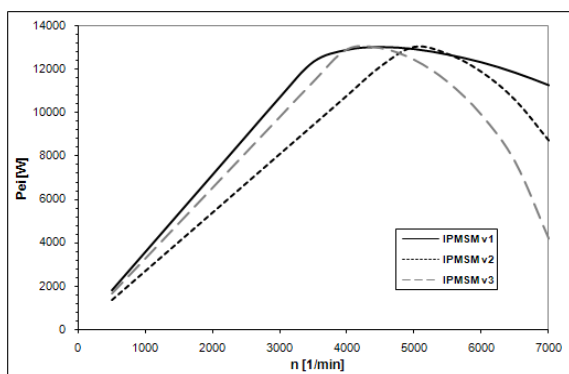
napięcia indukowanego przez magnesy trwałe E_0 (rys. 4.b i 6). Jednocześnie zakładając, że w całej drugiej strefie regulacji prędkości moduł prądu zasilania $I_1 = \text{const.}$, np. prąd zasilania jest równy prądowi znamionowemu $I_1 = I_{1N}$ lub maksymalnemu dopuszczalnemu chwilowo prądowi $I_1 = I_{1\text{max}}$, zwiększaniu składowej podłużnej prądu I_d towarzyszy zmniejszanie składowej poprzecznej I_q , tak by moduły składowych spełniały zależność: $I_1 = (I_d^2 + I_q^2)^{1/2}$. Przy danej prędkości kątovej ω_m zmniejszanie składowej I_q prądu skutkuje zmniejszaniem długości wektora spadku napięcia $jI_q X_q$ na reaktancji synchronicznej X_q . Zatem właściwie sterując wskazem prądu zasilania I_1 można spowodować, że moduł U_f wskaz napięcia fazowego zasilania U_f zostanie ograniczony do wymaganej wartości. W efekcie takiego sterowania, w drugiej strefie regulacji prędkości $P = \text{const.}$, wartość skuteczna napięcia na zaciskach silnika utrzymywana jest stałe na wartości maksymalnej $U_{1\text{max}}$ (rys. 2), a strumień magnetyczny Φ jest odwrotnie proporcjonalny do prędkości kątovej wirnika ω_m .

Ponieważ część prądu zasilania I_1 jest wykorzystywana przy pracy w drugiej strefie regulacji prędkości wyłącznie do wytworzenia odpowiedniej ujemnej podłużnej reakcji twornika, osłabiającej strumień główny Φ , i ta część prądu nie bierze udziału w wytwarzaniu momentu elektromagnetycznego, zatem w tej strefie regulacji moment elektromagnetyczny T silnika nie jest już liniowo zależny od wartości skutecznej prądu I_1 . Przy utrzymywaniu stałej wartości prądu I_1 w całej drugiej strefie regulacji oraz przy odpowiednim zaprojektowaniu obwodu elektromagnetycznego silnika PMSM [3, 5], moment elektromagnetyczny T maleje w tej strefie w przybliżeniu proporcjonalnie do wzrostu prędkości wirnika ($T \sim 1/\omega_m$ lub $T \sim 1/n$). W takim przypadku moc mechaniczna na wale silnika P_m jest w drugiej strefie regulacji w przybliżeniu stała i stąd nazwa tego zakresu regulacji prędkości – $P = \text{const.}$

5. Podsumowanie

Opisana wyżej strategia sterowania silnikiem PMSM w drugiej strefie regulacji z osłabianiem strumienia magnetycznego w szczeliny powietrznej silnika jest określana mianem stały-prąd-stałe-napięcie (ang. skrót CCCV od Constant Current Constant Voltage) lub strategią optymalnego wektora prądu (ang. skrót OCV od Optimum Current Vector). W strategii tej,

powyżej prędkości bazowej moduły wektorów napięcia i prądu zasilania silnika mają stałe wartości (np. U_{1max} , I_{1N}). Moc mechaniczna na wale silnika może być w przybliżeniu także stała, jednakże warunkiem tego jest odpowiednie zaprojektowanie obwodu elektromagnetycznego silnika. Dla większości silników PMSM, zastosowanie strategii CCCV w celu zwiększenia prędkości wirnika powyżej prędkości bazowej skutkuje otrzymaniem charakterystyk mocy podobnych do pokazanych na rys. 7. Charakterystyki te jak widać nie są liniowe i jest to cecha charakterystyczna dla strategii CCCV. W publikacjach [3, 5] zdefiniowano kryteria dla konstrukcji silników PMSM, spełnienie których prowadzi do uzyskania zbliżonej do liniowej charakterystyki $P = f(\omega_m)$ dla prędkości kątowych $\omega_m > \omega_b$ przy sterowaniu CCCV. Oprócz strategii CCCV, do sterowania prędkością silników PMSM z osłabianiem strumienia magnetycznego, stosowana jest także często strategia stałe-napięcie-stała-moc (ang. CVCP od Constant Voltage Constant Power) oraz rzadziej strategia stały-prąd-stała-moc (ang. CCCP od Constant Current Constant Power). Strategia CCCV jest jednak zalecana dla napędów elektrycznych o regulowanej prędkości ze względu na uzyskiwanie najszerszego zakresu regulacji prędkości wirnika (wyższe prędkości maksymalne), osiąganie w strefie regulacji z osłabianiem strumienia najwyższych wartości momentu dla danych prędkości.



Rys. 7. Przykładowe charakterystyki mocy szcze-linowej w funkcji prędkości obrotowej $P_{ei} = f(n)$ silników PMSM wielkości mech. 132 mm, $2p=4$, o identycznych stojanach (pakiety blach i dane nawojowe), tym samym prądzie zasilania i różnych konstrukcjach wirników

W napędach o prędkości regulowanej w szerokim zakresie silniki PMSM są zwykle zasilane z przekształtników energoelektronicznych (fa-

lowników) o charakterze źródła napięcia (ang. skrót VSI od Voltage Source Inverter). Odpowiednie fale napięć są generowane na wyjściach falowników za pośrednictwem sygnałów prostokątnych o modulowanej szerokości impulsów (ang. PWM od Pulse With Modulation). W przypadku napędów elektrycznych o prędkości regulowanej w szerokim zakresie, optymalną dla uzyskania fal napięcia techniką modulacji PWM jest tzw. modulacja metodą wektora przestrzennego napięcia (ang. Space Vector Pulse With Modulation) [6]. Jest to technika modulacji PWM najczęściej obecnie spotykana w nowoczesnych napędach elektrycznych o prędkości regulowanej.

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]. Morimoto S., Hatanaka K., Tong Y., Takeda Y., Hirasaka 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.
- [3]. 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.
- [4]. 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.
- [5]. Schiferl R.F., Lipo T.A., *Power Capability of Salient Pole Permanent Magnet Synchronous Motors in Variable Speed Drive Applications*, IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 26, No. 1, pp. 115-123, Jan./Feb. 1990.
- [6]. Bose B.K., *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall Inc., 2002, ISBN 0130167436.

Praca naukowa finansowana ze środków na naukę w latach 2007 ÷ 2009 jako projekt badawczy rozwojowy.

Autorzy

dr inż. Robert Rossa
r.rossa@komel.katowice.pl
mgr inż. Emil Król
e.krol@komel.katowice.pl

Branżowy Ośrodek Badawczo-Rozwojowy Maszyn Elektrycznych „KOMEL”
40-203 Katowice, al. Roździeńskiego 188.