

Olgierd KASATY ¹⁾, Jan SZAJDAK ¹⁾

PARAMETRY UZWOJENIA MAGNETOELEKTRYCZNEGO SILNIKA KOMUTATOROWEGO ZASILANEGO POPRZEZ PROSTOWNIK BEZ FILTROWANIA

Streszczenie. Projektowanie uzwojenia silnika wzbudzanego magnesami trwałymi i zasilanego z prostownika niefiltrowanym napięciem pulsującym wymaga uwzględnienia rodzaju układu prostowniczego. Rozpatrzone układy: jednofazowy półokresowy i pełnookresowy oraz trójfazowy półokresowy. Podano zależności umożliwiające obliczenie wartości wejściowych i wyjściowych silnika oraz wytyczne do projektowania jego uzwojenia. Wykazano, że liczba zwojów uzwojenia wirnika powinna być dobrana tak, żeby indukowana w nim siła elektromotoryczna wynosiła 0,64...0,82 wartości maksymalnej sinusoidalnego napięcia zasilającego układ.

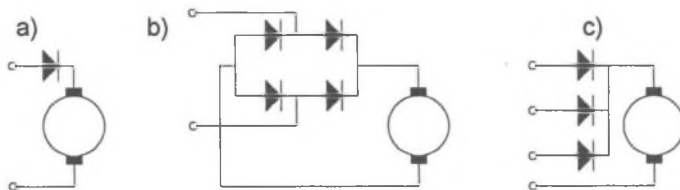
WINDING PARAMETERS OF PERMANENT MAGNET COMMUTATOR MOTOR FED FROM RECTIFIER WITHOUT FILTRATION

Summary. Design of winding of a motor excited by permanent magnets and fed from rectifier giving not filtered, pulsating voltage requires to take into account the kind of the applied rectifying system. A half-periodical and full periodical one-phase systems, and half-periodical three-phase system were considered. Dependences that enable calculations of input and output data of the motor, and additionally guidelines for design of its winding are given. It was proved that the number of turns of the rotor winding should be chosen in such a way, that the induced electromotive force could reach from 0.64 to 0.82 of the maximal value of sinusoidal voltage feeding the system.

Key words: electrotechnics, commutator motor, permanent magnets, pulsating voltage, design

1. WPROWADZENIE

Silnik komutatorowy wzbudzany magnesami trwałymi może być zasilany z sieci napięcia przemiennego poprzez układ prostowniczy. W wielu przypadkach zastosowania silnika może to być prosty i tani układ z prostownikiem bez filtracji, załączonym na napięcie jednofazowe lub trójfazowe z wprowadzonym zerem - rys. 1.



Rys. 1. Schemat połączeń silnika z układem prostowniczym: a) jednofazowym półokresowym, b) jednofazowym pełnookresowym, c) trójfazowym półokresowym

Fig. 1. Connection diagram of a motor with a rectifying system: a) one-phase half-periodical, b) one-phase full periodical, c) three-phase half-periodical

¹⁾ Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, tel.: (071) 320 32 83, fax: (071) 320 34 87, e-mail: imne@imne.pwr.wroc.pl

Przy założeniu takiego zasilania poprawne zaprojektowanie silnika a szczególnie jego uzwojenia wymaga uwzględnienia rodzaju układu prostowniczego i wynikających z jego zastosowania zależności między wielkościami wejściowymi a poszczególnymi parametrami ustalonymi w trakcie projektowania. Dlatego też jako wielkości wejściowe do projektowania, oprócz danych silnika takich jak moc na wale, prędkość obrotowa i inne, należy przyjąć maksymalną wartość napięcia zasilającego, jego pulsację i rodzaj układu prostowniczego.

Zasilanie bez filtrowania powoduje, że warunki pracy silnika są trudniejsze niż przy zasilaniu prądem stałym. Napięcie i prąd twornika są wielkościami zmiennymi, pulsującymi, o okresie zależnym od częstotliwości napięcia przemiennego sieci i od rodzaju układu prostowniczego.

Wartość średnia prądu określająca moc silnika jest mniejsza od wartości skutecznej, decydującej o ciepłych stratach mocy w uzwojeniu, a więc o jego obciążalności. Gorsze są także warunki komutacji ze względu na występujące okresowo maksymalne wartości prądu pulsującego, dużo większe od wartości średniej.

2. PODSTAWOWE ZALEŻNOŚCI OKREŚLAJĄCE NAPIĘCIE I PRĄD SILNIKA

W czasie pracy silnika pod wpływem przemiennego napięcia zasilającego układ (rys.1) w obwodzie wimika płynie jednokierunkowy prąd zmienny, którego przebieg i wartość zależą od rezystancji R i indukcyjności L obwodu oraz od siły elektromotorycznej E indukowanej w uzwojeniu przez strumień magnesów. W czasie przepływu prądu obowiązuje równanie:

$$U_m \sin \omega t = i(R + r_z) + L \frac{di}{dt} + E + \Delta U_z, \quad (1)$$

przy czym r_z jest rezystancją zaworu a ΔU_z spadkiem napięcia na zaworze.

Wyznaczoną z równania (1) zależność określającą wartość chwilową prądu można zapisać w postaci [3]:

$$i = \frac{U_m}{R + r_z} \{ [\cos \psi \sin(\omega t - \psi) - \varepsilon] + [\varepsilon - \cos \psi \sin(\beta - \psi)] e^{-(\omega t - \beta) \cot \psi} \}, \quad (2)$$

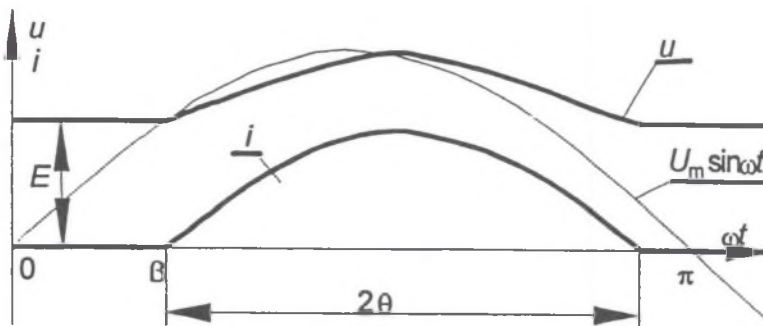
gdzie:

$$\varepsilon = \frac{E + \Delta U_z}{U_m}, \quad (3)$$

$$\beta = \arcsin \varepsilon, \quad (4)$$

$$\psi = \arctg \frac{\omega L}{R + r_z}. \quad (5)$$

Przebiegi napięcia i prądu silnika wykreślone na podstawie wzorów (1) i (2) podano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi napięcia i prądu silnika zasilanego przez prostownik
Fig. 2. Voltage and current waveforms of the motor fed by rectifier

Z przebiegów tych wyznaczyć można wartości średnie, skuteczne i maksymalne prądu zasilającego silnik i napięcia na jego zaciskach. Stosunkowo proste wyrażenia określające te wartości uzyskuje się przy pominięciu indukcyjności uzwojenia wirnika [2]. Są one funkcjami kąta przewodzenia zaworu 2θ (rys.2) i zależą od rodzaju układu prostowniczego.

Średnią wartość napięcia na zaciskach silnika obliczyć można z zależności:

$$U_o = U_m \frac{m}{\pi} \left[\sin \theta + \frac{(\pi - m\theta)}{m} \cos \theta \right]. \quad (6)$$

Skuteczna wartość napięcia jest równa:

$$U = U_m \sqrt{\frac{m}{2\pi} \left[(\theta + 0,5 \sin 2\theta) + 2 \left(\frac{\pi}{m} - \theta \right) \cos^2 \theta \right]}. \quad (7)$$

Średnia wartość prądu

$$I_o = \frac{U_m m}{R \pi} (\sin \theta - \theta \cos \theta). \quad (8)$$

Skuteczna wartość prądu

$$I = \frac{U_m}{R} \sqrt{\frac{m}{2\pi} (\theta + 2\theta \cos^2 \theta - 1,5 \sin 2\theta)}. \quad (9)$$

Maksymalna wartość prądu

$$I_m = \frac{U_m}{R} (1 - \cos \theta). \quad (10)$$

W podanych zależnościach kąt θ , równy w przybliżeniu połowie kąta przewodzenia zaworu (rys. 2), określony jest zależnością:

$$\theta = \arccos \frac{E}{U_m}. \quad (11)$$

Liczba m zależy od rodzaju układu prostowniczego (rys.1); $m = 1$ przy układzie jednofazowym półokresowym, $m = 2$ dla układu jednofazowego pełnookresowego i $m = 3$ w układzie trójfazowym.

3. WYTYCZNE DO PROJEKTOWANIA UZWOJENIA SILNIKA ZASILANEGO NAPIĘCIEM PULSUJĄCYM

Projektowanie uzwojenia rozpoczyna się po ustaleniu wymiarów zasadniczych - średnicy D , długości pakietu wirnika l i po wykonaniu obliczeń obwodu magnetycznego silnika mających na celu wyznaczenie wartości indukcji magnetycznej B_s w szczelinie przytwornikowej. Obliczenia te można wykonać jak przy projektowaniu konwencjonalnych silników magnetoelektrycznych prądu stałego [1] przyjmując za moc obliczeniową silnika jego moc wewnętrzną P_w równą w przybliżeniu sumie zadanej mocy P na wale silnika i oszacowanych lub obliczonych łącznych strat w żelazie wirnika i strat mechanicznych

$$P_w = P + (\Delta P_{Fe} + \Delta P_m). \quad (12)$$

Przy zasilaniu silnika z układu prostowniczego moc wewnętrzną określa wyrażenie:

$$P_w = EI_o \quad (13)$$

Siłę elektromotoryczną E , przy zadanej wartości maksymalnej napięcia zasilającego U_m , określić można z zależności (11) zakładając wstępnie wartość kąta przewodzenia θ . Liczba zwojów uzwojenia twornika, przy której uzyskuje się tę sem , powinna być równa:

$$Z = \frac{60aU_m}{2p l_i b_i n B_s} z^*, \quad (14)$$

gdzie

$$z^* = \cos \theta. \quad (15)$$

Po przyjęciu liczby zwojów Z spełniającej warunki symetrii uzwojenia i po dobraniu przekroju przewodu obliczyć można, rezystancję uzwojenia R . Wartość tej rezystancji powinna być zbliżona do wartości wynikającej ze wzoru:

$$R = \frac{U^2}{P_w} \cdot r^* , \quad (16)$$

w którym

$$r^* = \frac{m \cos \theta}{\pi} \left[\sin \theta + \frac{\pi - m\theta}{m} \cos \theta \right] - \cos^2 \theta . \quad (17)$$

W końcowym etapie dokonuje się sprawdzenia i ewentualnej korekty obliczeń poszczególnych wielkości porównując ich wartości z wartościami założonymi lub obliczonymi wstępnie. Sprawdzeniu podlegają:

- siła elektromotoryczna E

$$E = \frac{pn\Phi}{60a} Z , \quad (18)$$

- równanie równowagi napięć dla składowej stałej

$$U_0 = E + I_0 R , \quad (19)$$

w którym średnia wartość prądu silnika I_0 wynosi:

$$I_0 = \frac{P_w}{U_m} i_0^* , \quad (20)$$

przy czym

$$i_0^* = \frac{1}{\cos \theta} , \quad (21)$$

- straty mocy w uzwojeniu twornika

$$\Delta P_{Cu} = I^2 R , \quad (22)$$

przy wartości skutecznej prądu pobieranego przez silnik

$$I = \frac{P_w}{U_m} i^* , \quad (23)$$

gdzie

$$i^* = \frac{\sqrt{\frac{\pi}{2m} (\theta + 2\theta \cos^2 \theta - \frac{3}{2} \sin 2\theta)}}{\cos \theta (\sin \theta - \theta \cos \theta)} . \quad (24)$$

Z podanych zależności wynika, że poszczególne wielkości związane z uzwojeniem wirnika są funkcjami kąta przewodzenia zaworu. Wartość tego kąta określa również pośrednio sprawność silnika

$$\eta = \frac{P}{P_1} = \frac{P}{P_w + I^2 R} = \frac{P}{P_w} \eta^* , \quad (25)$$

przy czym

$$\eta^* = \frac{1}{1 + i^{*2} r^*} . \quad (26)$$

Bardzo istotnym zagadnieniem występującym przy projektowaniu uzwojenia jest ocena warunków komutacji silnika. Warunki komutacji przy zasilaniu uzwojenia napięciem pulsującym są trudne ze względu na duże wartości maksymalne prądu pobieranego przez silnik. Dlatego też należy obliczyć tę wartość. Jest ona również funkcją kąta θ ; określa ją wzór:

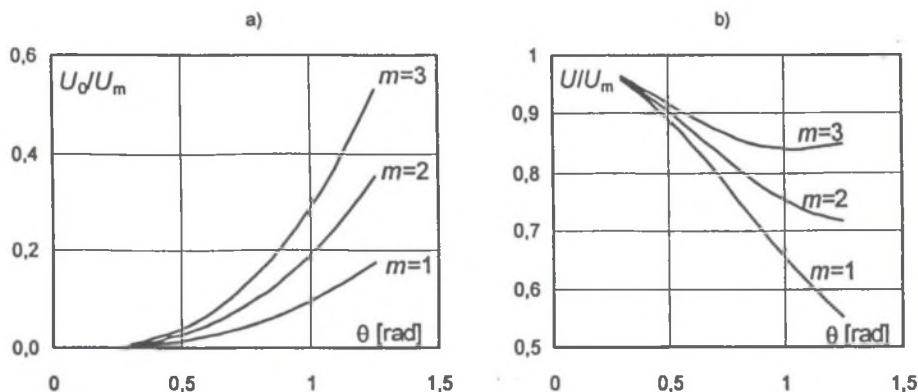
$$I_m = \frac{P_w}{U_m} i_m^* , \quad (27)$$

w którym

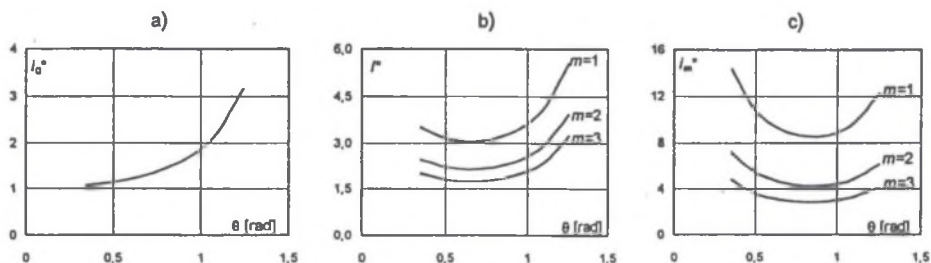
$$i_m^* = \frac{\pi(1 - \cos \theta)}{m \cos \theta (\sin \theta - \theta \cos \theta)} . \quad (28)$$

Przebiegi funkcji kąta θ określających poszczególne wielkości związane z uzwojeniem podano na rysunkach 3... 5. Wynika z nich, że wartości skuteczne i maksymalne prądu są najmniejsze w

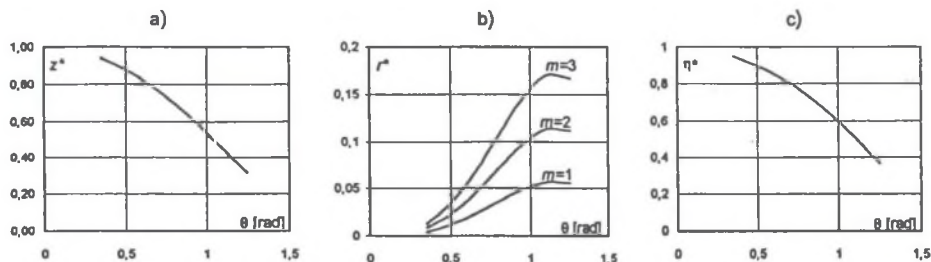
zakresie kąta $\theta = 35^\circ \dots 50^\circ$. Przy projektowaniu uzwojenia należy zatem przyjmować wartość θ z tego zakresu, co oznacza - na podstawie wzorów (11), (14) i (15) - przyjęcie takiej liczby zwojów, przy której obliczona siła elektromotoryczna wynosi 0,64...0,82 wartości maksymalnej sinusoidalnego napięcia zasilającego układ.



Rys. 3. Napięcie na zaciskach silnika: a) wartość średnia, b) wartość skuteczna
Fig. 3. Voltage on the motor terminals: a) mean value, b) root-mean square value



Rys. 4. Wartości prądu pobieranego przez silnik: a) średnia, b) skuteczna, c) maksymalna
Fig. 4. Motor supply current: a) mean value, b) root-mean square value, c) maximal value



Rys. 5. Wykresy następujących wielkości: a) liczby zwojów uzwojenia, b) rezystancji, c) sprawności silnika
Fig. 5. Plots of the following quantities: a) number of winding turns, b) winding resistance, c) motor efficiency

4. PODSUMOWANIE

1). Projektowanie uzwojenia silnika magnetoelektrycznego zasilanego z układu prostowniczego bez filtracji napięcia wyjściowego wymaga uwzględnienia rodzaju układu prostowniczego. W zależności od przyjętego układu uzyskuje się różne wartości skuteczne i maksymalne prądu zasilającego silnik; inne są także wartości napięcia na jego zaciskach. Wielkości te, a także wszystkie wielkości wyjściowe silnika, takie jak: moc oddawana, prędkość obrotowa sprawność są funkcjami kąta przewodzenia diody.

2). Przy projektowaniu silnika zasilanego niefiltrowanym napięciem pulsującym należy przyjmować taką liczbę zwojów uzwojenia, przy której kąt θ (równy połowie kąta przewodzenia diody) wynosi $35^\circ \dots 50^\circ$. Uzyskuje się wówczas najmniejsze wartości skuteczne i maksymalne prądu pobieranego przez silnik.

3). Właściwości silnika zasilanego z układu jednofazowego półokresowego są wyraźnie gorsze niż przy innych układach. Bardzo duża wartość maksymalna prądu pobieranego przez silnik powoduje pogorszenie warunków komutacji i zwiększenie zakłóceń radioelektrycznych emitowanych przez silnik. Wyższy jest także poziom drgań i hałasu silnika.

LITERATURA

1. Bałagurow W.W., Gałtiew F.F., Łarionow A.I.: Maszyny elektryczne o magnesach trwałych. WNT, Warszawa 1967.
2. Szajdak J.: Analiza stosowania silników komutatorowych mocy ułamkowej z wimikiem bezzłobkowym. Komunikat nr 51 Instytutu Układów Elektromaszynowych Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1975.
3. Tunia H., Winiarski B.: Układy elektroniczne w automatyce napędowej. WNT, Warszawa 1971.

Recenzent: Dr hab. inż. Mieczysław Ronkowski
 Profesor Politechniki Gdańskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 2001 r.

Abstract

Winding design of a permanent magnet motor fed by a rectifying system without filtration of input voltage (Fig. 1) requires to take into account the type of the applied rectifying system. Both input values – voltage and current of the motor (Figs. 2, 3 and 4), as well as the other ones which take part in the calculations of the motor winding – number of turns, winding resistance, efficiency (Fig.5), are functions of an angle θ described by equation (11). The angle is roughly equal to half of the used diode conducting angle. The number of winding turns Z (given by equation (14) and (15), while designing the motor, should be chosen appropriately to the angle $\theta = 35^\circ \dots 50^\circ$. Then, the root-mean square and maximal values of the motor supply current are the lowest. Half-periodical one-phase supply is not advisable, because the high values of the peak current make the conditions of the motor commutations significantly worse.