

Tadeusz GLINKA
Krzysztof KRYKOWSKI

KOMPUTEROWA SYMULACJA PRACY SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I KOMUTATOREM ELEKTRONICZNYM W PROGRAMIE TCAD

Streszczenie. W artykule opracowano model komputerowy silnika bezkomutatorowego z magnesami trwałymi, zasilanego poprzez komutator elektroniczny, zawierający zawory MOSFET. Przedstawiony model umożliwi symulację pracy napędu przy zmianach napięcia zasilającego obwód główny silnika oraz przy zmianie obciążenia. Przy budowie modelu wykorzystano program TCAD 6.2. Przeprowadzone rozważania teoretyczne uzupełniono badaniami symulacyjnymi, które potwierdziły poprawne działanie modelu.

COMPUTER SIMULATION OF OPERATION OF A PERMANENT MAGNET MOTOR WITH AN ELECTRONIC COMMUTATOR IN TCAD

Summary. A computer model of a permanent magnet brushless motor supplied by electronic commutator containing MOSFETs has been presented in the paper. The model makes possible simulation of the drive at changes of the voltage supplying the main motor circuit and at changes of the load. To realise the model software TCAD 6.2 has been used. Theoretical considerations have been completed with simulation investigations, which have confirmed correct performance of the model.

1. WPROWADZENIE

Symulacja komputerowa jest nowoczesną metodą badawczą, pozwalającą w istotny sposób skrócić czas i obniżyć koszty prac badawczych przy analizie i projektowaniu napędów przekształtnikowych. Zależnie od wymagań stawianych w procesie badawczym przyjmuje się założenia upraszczające i stosuje się modele o różnym stopniu dokładności. W artykule podjęto się opracowania modelu komputerowego zespołu przekształtnik tranzystorowy - silnik bezkomutatorowy małej mocy. Zespół ten jest wykorzystywany w opracowywanym w Instytucie Elektrotechniki Teoretycznej i Przemysłowej Politechniki Śląskiej układzie napędowym wózków inwalidzkich. Przy budowie modelu komputerowego zdecydowano się skorzystać z programu uniwersalnego TCAD [5], [8], przeznaczonego do modelowania układów energoelektronicznych. Program ten nie zawiera modelu silnika bezkomutatorowego, opracowano więc taki model korzystając z biblioteki programu TCAD w wersji 6.2.

2. DANE UKŁADU

Modelowany silnik małej mocy [3] z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym posiada budowę klasyczną. Magnesy trwałe z ferrytu strontu anizotropowego zostały zamocowane na ferromagnetycznym walcu wirnika. W polu magnetycznym wirnika umieszczono sensory (czujniki) halotronowe. Jarzmo stojana jest blachowane, a trójfazowe uzwojenie rozmieszczone w żłobkach. Silnik jest zasilany z baterii akumulatorów poprzez przekształtnik tranzystorowy z zaworami MOSFET typu IRFZ44, pracujący w układzie mostkowym. W układzie rzeczywistym [4] przekształtnik zawiera układ ograniczenia prądu włączający się, gdy prąd zasilający przekroczy nastawioną wartość maksymalną. Ważniejsze dane znamionowe prototypowego silnika typu PM40 są następujące:

- moc wejściowa znamionowa $P_{in} = 300 \text{ W}$,
- prędkość obrotowa $n_n = 3000 \text{ obr./min}$,
- sprawność $\eta_n = 85\%$,
- liczba par biegunów $p=2$,
- napięcie zasilające $U_n = 24\text{V}$,
- prąd znamionowy $I_{dn} = 12,5 \text{ A}$,
- prąd znamionowy fazowy $I_{fn} = 10,2 \text{ A}$,
- rezystancja jednej fazy uzwojenia $R_f = 0,14 \Omega$,
- indukcyjność jednej fazy uzwojenia $L_f = 0,35 \text{ mH}$,
- moment bezwładności $J = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

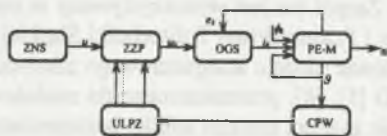
Ważniejsze założenia upraszczające przyjęte w opracowanym modelu to:

- obwód magnetyczny nienasycony i jednoznaczny,
- symetria obwodów elektrycznych,
- indukcja magnetyczna w szczelinie pod magnesami ma wartość stałą, zaś w strefie pomiędzy magnesami jest równa zero,
- moment reluktancyjny równy zero,
- magnesy trwałe obejmują 0,7 obwodu wirnika.

Układ napędowy zawiera następujące podzespoły:

- 1) źródło zasilania napięciem stałym (ZNS),
- 2) zespół zaworów przełączających (ZZP), które pełnią funkcję komutatora elektronicznego,
- 3) obwody główne silnika (OGS) zawierające elementy typu RLE,
- 4) przetwornik elektromechaniczny (PE-M),
- 5) czujnik położenia wirnika CPW),
- 6) układ logiczny wypracowujący funkcję przełączania zaworów komutatora elektronicznego (ULPZ).

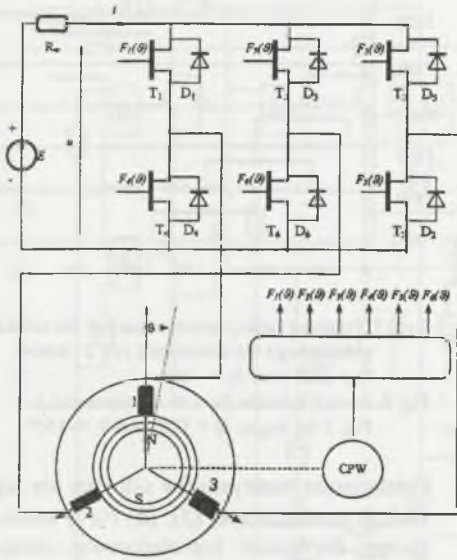
Wzajemne relacje pomiędzy tymi podzespołami przedstawiono blokowo na rys. 1.



Rys. 1. Blokowe przedstawienie silnika prądu stałego z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym
Fig. 1. Block diagram of a permanent magnet d.c. motor with an electronic commutator

3. OPIS MATEMATYCZNY

Na rys. 2 pokazano schemat analizowanego silnika. Silnik ten jest opisany następującymi równaniami [5], [6]:



Rys. 2. Schemat połączeń elektrycznych 3-fazowego silnika z komutatorem elektronicznym
 Fig. 2. Scheme of electrical connection of a 3-phase permanent magnet motor with an electronic commutator

$$u_k = Ri_k + L \frac{di_k}{dt} + e_k, \quad (1)$$

$$e_k = z\omega \left(-\frac{d\Phi_k}{d\theta} \right), \quad (2)$$

$$M_k = zi_k \left(-\frac{d\Phi_k}{d\theta} \right), \quad (3)$$

$$\phi_k = \Phi_o F_\Phi(\theta_k), \quad (4)$$

$$\theta_k = \theta - \frac{2\pi(k-1)}{m}, \quad (5)$$

$$i = \sum_{k=1}^m i_k, \quad (6)$$

$$M = \sum_{k=1}^m M_k, \quad (7)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = \omega, \quad (8)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[M(\theta) - M_L - D\omega - M_f \frac{\omega}{\omega_o} \right]. \quad (9)$$

Po podstawieniu zależności (4) do wyrażeń (2) oraz (3) i wykonaniu podstawienia

$$\Psi_k(\theta) = z\Phi_o \frac{dF_\Phi}{d\theta} \quad (10)$$

uzyska się:

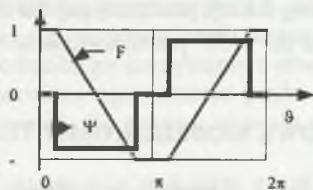
$$e_k = \omega \Psi_k(\theta) \quad (11)$$

oraz

$$M_k = i_k \Psi_k(\theta). \quad (12)$$

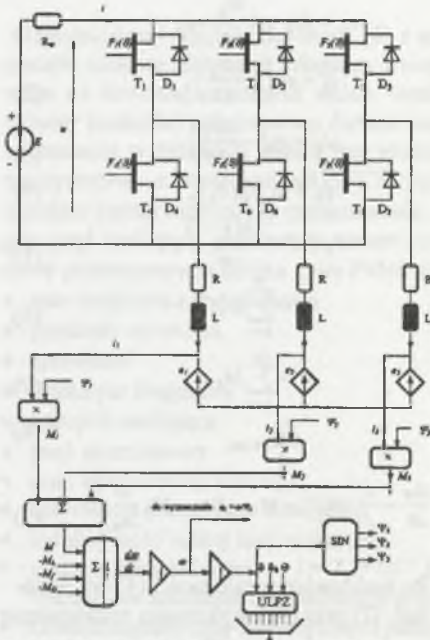
Przebieg strumienia wirnika skojarzonego z uzwojeniami stojana ma w przybliżeniu kształt trapezowy, a opisującą go funkcję $F_\Phi(\theta_k)$, dla pierwszego uzwojenia ($k=1$), przedstawiono graficznie na rys. 3. Dla takiego rozkładu strumienia zachodzi:

$$\Psi_k(\theta_k) = \begin{cases} -\frac{2}{0,7\pi} z\Phi_o \approx -0,91z\Phi_o & \text{dla } \theta_k \in (0,15\pi, 0,85\pi) \\ \frac{2}{0,7\pi} z\Phi_o \approx 0,91z\Phi_o & \text{dla } \theta_k \in (1,15\pi, 1,85\pi) \\ 0 & \text{w pozostałych przypadkach} \end{cases} \quad (13)$$



Rys. 3. Funkcja $F_\Phi(\theta_1)$ rozkładu strumienia skojarzonego z fazą 1 oraz jej pochodna Ψ_k
 Fig. 3. Function $F_\Phi(\theta_1)$ of flux distribution and its derivative Ψ_k ; flux is coupled with phase 1

Równaniom (1) oraz (5)-(13) można przyporządkować schemat przedstawiony na rys. 4



Rys. 4. Schemat obwodów głównych silnika i obwodów sterowania komutatorem dla silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym

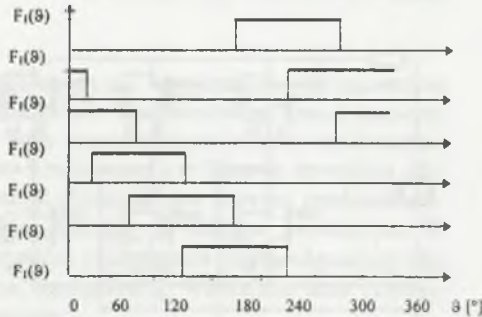
Fig. 4. Scheme of main circuits of motor and control circuits of the electronic commutator for 3-phase permanent magnet motor with an electronic commutator

$$F_k(\vartheta) = 1 \quad \text{dla } \vartheta_k - \vartheta_0 \in (0, \Theta) \quad (14)$$

Przebieg funkcji przełączającej dla silnika połączonego wg schematu z rys. 2 i kątów $\Theta = 120^\circ$ oraz $\vartheta_0 = -150^\circ$ przedstawiono na rys. 5.

4. BUDOWA MODELU KOMPUTEROWEGO I BADANIA SYMULACYJNE

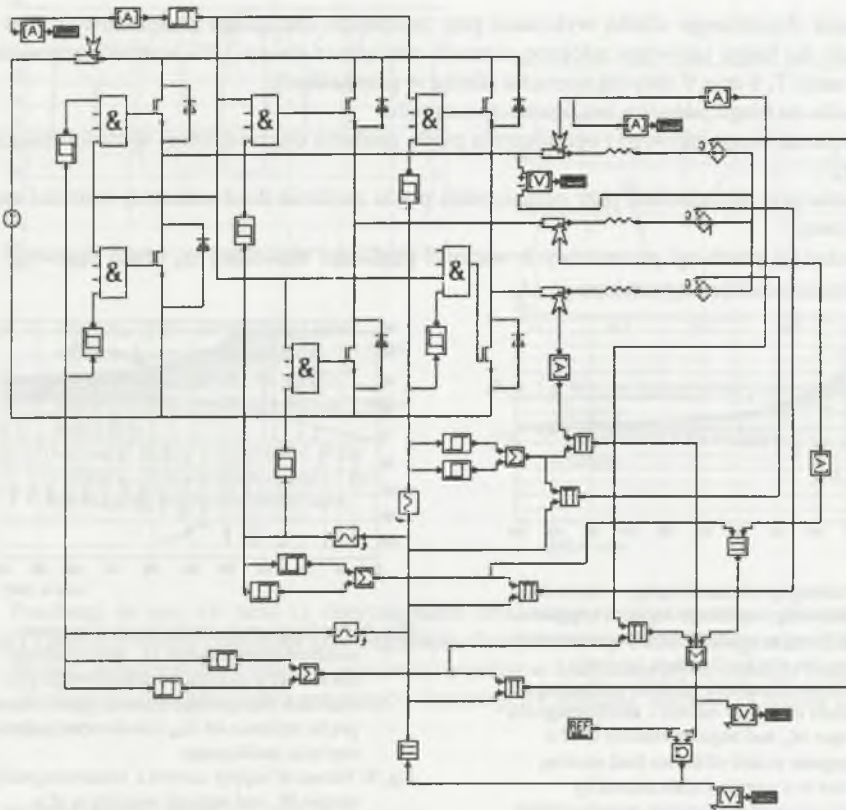
Większość elementów i podzespołów występujących w obwodowym schemacie silnika przedstawionym na rys. 4 ma swoje odpowiedniki w bibliotece programu TCAD 6.2. Do elementów tych należą między innymi: zawory, źródła sterowane i niesterowane, elementy bierne R , L , C , człony logiczne i mnożące (Π), sumatory (Σ), równanie ruchu silnika (Ω). Przetwarzanie prędkości kątowej na kąt obrotu można zrealizować za pomocą generatora napięć sinusoidalnych o sterowanej częstotliwości (\sim), a nieliniowości opisane zależnością (13) można odwzorować układem składającym się z dwóch elementów z histerezą i sumatora, umieszczonym na wyjściu generatora o sterowanej częstotliwości odwzorowującej kąt obrotu.



Rys. 5. Przebieg funkcji przełączających dla silnika połączonego wg schematu z rys. 2 i kątów $\Theta = 120^\circ$ oraz $\vartheta_0 = -150^\circ$

Fig. 5. Switch function for a motor presented in Fig. 2 for angles $\Theta = 120^\circ$ and $\vartheta = -150^\circ$

Przełączanie tranzystorów odbywa się wg funkcji przełączającej [5], [6] $F_k(\vartheta)$ analogicznej do funkcji komutatorowej, stosowanej [2] w mikrosilnikach z komutatorem mechanicznym. Tranzystor jest załączony, gdy jego funkcja przełączająca jest równa jeden, wyłączony, gdy funkcja przełączająca jest równa zero. Jeśli przez ϑ_0 oznaczyć kąt położenia wirnika w chwili załączenia tranzystora pierwszego, a przez Θ kąt wirnika odpowiadający czasowi załączenia tranzystora, to funkcję przełączającą dla k -tego tranzystora spełnia warunek:



Rys. 6. Model silnika z komutatorem elektronicznym wg programu TCAD 6.2
 Fig. 6. Model of an electronic commutated motor discribed in TCAD v.6.2

Korzystając z przedstawionych uwag narysowano za pomocą edytora graficznego programu TCAD 6.2 schemat obwodowy silnika o magnesach trwałych i z komutatorem elektronicznym w postaci jak na rys. 6. Po narysowaniu schematu w poszczególne bloki wpisano wartości parametrów występujących w układzie rzeczywistym i w ten sposób uzyskano model komputerowy w postaci nadającej się do prowadzenia badań symulacyjnych. Jak widać, nie zachodzi tu potrzeba bezpośredniego korzystania z równań różniczkowych opisujących układ. W układzie zastosowano ograniczenie prądu wejściowego poprzez blokadę impulsów sterujących zaworami dla prądów obwodu zasilania przekraczających założoną wartość maksymalną.

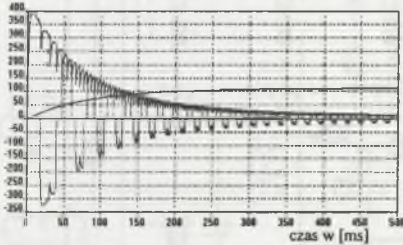
Na rys. 7-12 pokazano przykładowe przebiegi wybranych wielkości uzyskane przy symulacji z zastosowaniem programów uniwersalnych. Przedstawiono tam przebiegi prądu zasilania i , prądu fazowego i_1 , napięcia fazowego silnika u_1 , momentu elektromagnetycznego M_e oraz prędkości kątowej ω . Wszystkie te wielkości wyrażono jako procentowe, przy czym jako wielkości odniesienia przyjęto:

dla napięć	$U_n = 24V$,	dla prędkości	$\omega_n = 314,16 \text{ s}^{-1}$,
dla prądów	$I_{dn} = 12,5 \text{ A}$,	dla momentów	$M_n = 0,812 \text{ N}\cdot\text{m}$.

Badania obciążonego silnika wykonano przy momencie obciążenia znamionowym, zaś w badaniach dla biegu jałowego założono moment obciążenia równy 10% wartości znamionowej. Rysunki 7, 8 oraz 9 dotyczą rozruchu silnika w przypadkach:

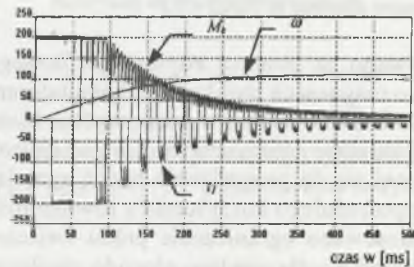
- rozruchu na biegu jałowym bez ograniczenia prądu,
- rozruchu na biegu jałowym i ograniczenia prądu zasilania do dwukrotnej wartości znamionowej,
- rozruchu pod obciążeniem przy ograniczeniu prądu zasilania do dwukrotnej wartości znamionowej

i przedstawiają przebiegi procentowych wartości prędkości obrotowej ω , prądu fazowego i_f oraz momentu elektromagnetycznego M_e .



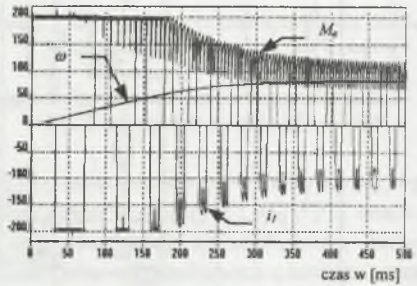
Rys. 7. Przebiegi prądu zasilającego i , momentu elektromagnetycznego M_e oraz prędkości obrotowej ω modelu komputerowego przy rozruchu silnika dla biegu jałowego i skokowym zadaniu napięcia zasilającego

Fig. 7. Values of supply current i , electromagnetic torque M_e , and angular velocity ω of a computer model of the no load running motor in a transient state caused by application of the constant supply voltage



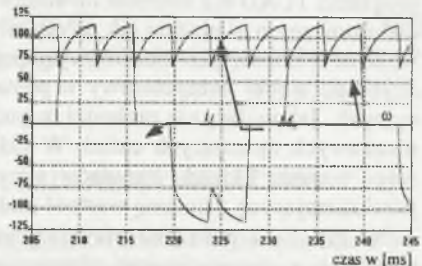
Rys. 8. Przebiegi prądu zasilającego i , momentu elektromagnetycznego M_e oraz prędkości obrotowej ω modelu komputerowego przy rozruchu dla biegu jałowego silnika, ograniczeniu prądu zasilania do $2I_{dn}$ i skokowym zadaniu napięcia zasilającego

Fig. 8. Values of supply current i , electromagnetic torque M_e , and angular velocity ω of a computer model of the no load running motor with a current limiter for $2I_{dn}$ in a transient state caused by application of the constant supply voltage



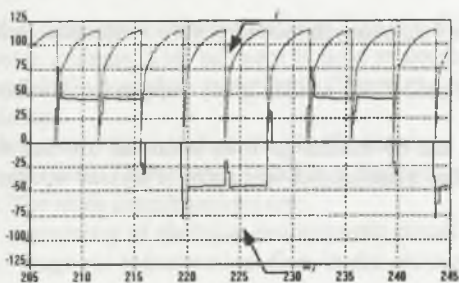
Rys. 9. Przebiegi prądu zasilającego i , momentu elektromagnetycznego M_e oraz prędkości obrotowej ω modelu komputerowego przy rozruchu obciążonego silnika, ograniczeniu prądu zasilania do $2I_{dn}$ i skokowym zadaniu napięcia zasilającego

Fig. 9. Values of supply current i , electromagnetic torque M_e , and angular velocity ω of a computer model of the nominal loaded motor with a current limiter for $2I_{dn}$ in a transient state caused by application of constant supply voltage



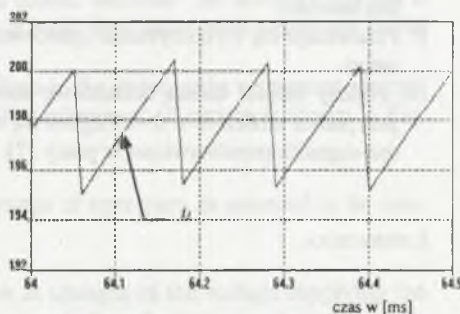
Rys. 10. Przebiegi prądu fazowego i_f , momentu elektromagnetycznego M_e oraz prędkości obrotowej ω modelu komputerowego badanego silnika w stanie ustalonym

Fig. 10. Values of phase current i_f , electromagnetic torque M_e , and angular velocity ω of a computer model of the investigated motor in a steady state



Rys. 11. Przebiegi prądu zasilającego i oraz napięcia fazowego silnika u_1 , $m^{\text{czas w [ms]}}$ elektromagnetycznego M_e modelu komputerowego badanego silnika w stanie ustalonym

Fig. 11. Values of supply current i , and phase voltage u_1 , of a computer model of the investigated motor in a steady state



Rys. 12. Wpływ ograniczenia prądu na prąd fazowy

Fig. 12. Influence of a current limiter on phase current

Przebiegi na rys. 10 oraz 11 dotyczą stanu ustalonego i znamionowego obciążenia. Na rys.12 zarejestrowano natomiast przebieg prądu obciążenia przy działaniu ogranicznika prądu.

Wyniki symulacji porównano z wynikami pomiarów laboratoryjnych modelu rzeczywistego. Stwierdzono podobieństwo przebiegów czasowych i zbliżone wartości liczbowe wyników pomiarów.

5. PODSUMOWANIE

1. W wyniku przeprowadzonych rozważań uzyskano model komputerowy bezkomutatorowego napędu przekształtnikowego z silnikiem o magnesach trwałych i z komutatorem elektronicznym.
2. Model ten zapewnia możliwość szybkiego określania charakterystyk statycznych i dynamicznych podstawowych wielkości wyjściowych, charakteryzujących pracę napędu w przypadku zmiany wartości napięcia zasilającego lub zmiany obciążenia bezkomutatorowego silnika o magnesach trwałych.
3. Otrzymany model nie zapewnia możliwości symulacji pracy napędu w przypadku dwubiegunowej modulacji napięcia obwodu głównego.
4. Model został przedstawiony:
 - w postaci zestawu równań (1)-(13),
 - w postaci schematu zawierającego obwody elektryczne (rys. 4).
5. Przedstawione postacie modelu umożliwiają jego wykorzystanie również w przypadku korzystania z innych uniwersalnych programów symulacyjnych, zawierających edytor graficzny (np. PSPICE).
6. Model został zweryfikowany badaniami laboratoryjnymi.
7. Przewiduje się wykorzystanie opracowanego modelu w badaniach dotyczących aplikacji napędu z komutatorem elektronicznym do zasilania wózków inwalidzkich.

8. Rozważa się potrzebę i możliwości rozbudowy uzyskanych modeli w celu zwiększenia ich dokładności.
9. Przewiduje się wykorzystanie opracowanego modelu do analizy pracy napędu dwusilnikowego.
10. Należy zalecić dalszą rozbudowę modelu, tak by można go było stosować również w przypadku układów z dwubiegunową modulacją szerokości impulsów. Przykład takiego rozwiązania przedstawiono w pracy [7].

LITERATURA

1. Dote Y., Kinoshita S.: Brushless Servomotors. Fundamentals and applications. Oxford 1990.
2. Glinka T.: Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi. Podręcznik akademicki. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 1995.
3. Glinka T.: Silnik z komutatorem elektronicznym do napędu wózków inwalidzkich. Materiały X Międzynarodowego Sympozjum Mikromaszyn i Serwonapędów, organizowanego przez Instytut Elektrotechniki, Rydzyna 23-27.09.1996.
4. Glinka T., Krykowski K.: Sterowanie komutatora elektronicznego silnika napędowego wózka inwalidzkiego. VII Sympozjum PPEE'97 Gliwice-Ustroń, marzec 1997.
5. Glinka T, Krykowski K.: Zastosowanie programu symulacyjnego TCAD do modelowania bezkomutatorowego napędu przekształtnikowego z silnikiem o magnesach trwałych XXXII SPETO, Gliwice-Ustroń, maj 1997.
6. Glinka T, Krykowski K.: Model silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym XXXIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'97. Poznań-Kiekrz, czerwiec 1997.
7. Krykowski K., Bodora A., Sajkowski M.: Komputerowa symulacja pracy silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym w przypadku dwubiegunowej modulacji szerokości impulsów. Zesz. Nauk. Pol. Śląskiej, s.Elektryka z.160, Gliwice 1997.
8. Nieznański J., Iwan K., Szczęsny R., Ronkowski M.: TCAD for Windows. Softech. Gdańsk 1996.

Recenzent: Dr hab.inż. Maciej Tondos

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

Abstract

Computer simulation essentially decreases the time and reduce the costs of research and design. Simplifications are made according to the requirements therefore the obtained models have a different accuracy. A computer model of a system inverter - low power brushless motor with permanent magnet is presented in the paper. The system is applied to invalid carriage drive, which is being designed in the Institute of Theoretical and Industrial Electrotechnics of Silesian Technical University.

A simulation software package TCAD v.6.2 is appropriated for simulation of power electronic systems. This software is used to construct a model. Because the software has not a model of a brushless motor in its library, the motor is built from those parts which are in the library.

The motor, which is described in [2], has three windings in the stator and a permanent magnet in the rotor. The inverter works in a bridge system. The scheme of all system is shown in Fig. 2. The main simplifications are:

- symmetry of electrical and magnetic circuits,
- magnetic induction and flux, in the anticipated range of operation, is assumed to be constant,
- the reluctance torque is neglected.

The model makes possible simulation of the drive at changes of the voltage supplying the main motor circuit and at changes of the load. The system is described by equations (1) - (14). The model in fig. 3 is constructed according to the equations. Coefficients of the model are the same as in a real system with a brushless motor with a rated input power of 300 W.

Supply current i , phase current i_l , electromagnetic torque M_e , and angular velocity ω are shown in Figs.5 and 6. Comparison of these values and of the real system values allow the statement that the presented model is accurate enough for anticipated applications.