

Krzysztof KRYKOWSKI

Aleksander BODORA

Maciej SAJKOWSKI

SYMULACJA PRACY SILNIKA Z MAGNESAMI TRWAŁYMI I KOMUTATOREM ELEKTRONICZNYM W PRZYPADKU DWUBIEGUNOWEJ MODULACJI SZEROKOŚCI IMPULSÓW

Streszczenie. W artykule opracowano model komputerowy silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym, zawierającym zawory MOSFET. Przedstawiony model umożliwia symulację pracy napędu sterowanego poprzez dwubiegunową modulację szerokości impulsów napięcia zasilającego obwód główny silnika. Przy budowie modelu wykorzystano program TCAD 6.2. Przeprowadzone rozważania teoretyczne uzupełniono badaniami symulacyjnymi, które potwierdziły poprawne działanie modelu.

SIMULATION OF OPERATION OF A PERMANENT MAGNET MOTOR WITH AN ELECTRONIC COMMUTATOR AND BIPOLAR PULSE WIDTH MODULATION

Summary. A computer model of a permanent magnet brushless motor supplied through electronic commutator containing MOSFETs, has been presented in the paper. The model makes possible simulation of the drive controlled by bipolar pulse width modulation of the voltage supplying the main motor circuit. To realize 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

W przypadku badań symulacyjnych układów energoelektronicznych i napędowych powszechnie stosuje się uniwersalne programy komputerowe. Stosowane w energoelektronice programy uniwersalne zazwyczaj nie posiadają w swoich bibliotekach modeli silników z magnesami trwałymi, zasilanych poprzez komutator elektroniczny. Chcąc te programy wykorzystywać w badaniach symulacyjnych zespołu przekształtnik tranzystorowy - silnik

bezkomutatorowy małej mocy należy dla wybranych programów uniwersalnych opracować modele silnika. Sposoby budowy takich modeli dla programów uniwersalnych TCAD i PSPICE przedstawiono w [3], [4], [6]. Opracowane tam modele komputerowe silnika bezkomutatorowego z magnesami trwałymi, zasilanego poprzez komutator elektroniczny, zawierającego zawory MOSFET, umożliwia badania symulacyjne napędu przy pracy ustalonej oraz w stanach przejściowych, spowodowanych zmianą obciążenia lub zmianą wartości napięcia źródła. Modele te nie zapewniają natomiast możliwości symulacji napędu, w którym sterowanie prędkości obrotowej silnika jest realizowane elektronicznie, poprzez dwubiegunową modulację szerokości impulsów napięcia obwodu głównego. Celem rozważań jest opracowanie modelu komputerowego silnika bezkomutatorowego z magnesami trwałymi zasilanego poprzez komutator elektroniczny zawierający zawory MOSFET o postaci, która umożliwiałaby również symulację pracy napędu sterowanego poprzez dwubiegunową modulację szerokości impulsów napięcia zasilającego obwód główny silnika.

2. MODEL KOMPUTEROWY SILNIKA

Model matematyczny silnika bazuje na modelu matematycznym silnika komutatorowego o trzech zębach twornika [2], [4], [5], [6]. Ważniejsze założenia upraszczające przyjęte w rozważaniach :

- 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.

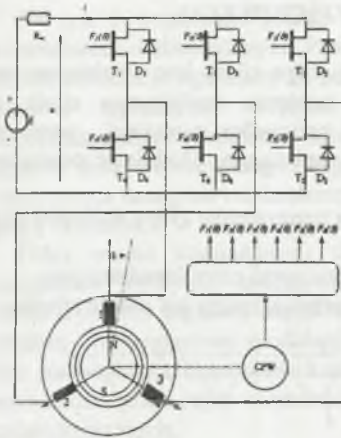
Na rys. 2 pokazano schemat analizowanego silnika. Silnik ten jest opisany następującymi równaniami [4], [6]:

$$u_k = Ri_k + L \frac{di_k}{dt} + e_k, \quad (1) \quad e_k = z\omega \left(-\frac{d\Phi_k}{d\vartheta} \right), \quad (2)$$

$$M_k = zi_k \left(-\frac{d\Phi_k}{d\vartheta} \right), \quad (3) \quad \phi_k = \Phi_o F_\Phi(\vartheta_k), \quad (4)$$

$$\vartheta_k = \vartheta - \frac{2\pi(k-1)}{m}, \quad (5) \quad i = \sum_{k=1}^m i_k, \quad (6)$$

$$M = \sum_{k=1}^m M_k, \quad (7) \quad \frac{d\vartheta}{dt} = \omega, \quad (8)$$



$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[M(\vartheta) - M_L - D\omega - M_f \frac{\omega}{\omega_0} \right], \quad (9)$$

$$\Psi_k(\vartheta) = z\Phi_o \frac{dF_k}{d\vartheta}, \quad (10)$$

$$e_k = \omega \Psi_k(\vartheta), \quad (11)$$

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

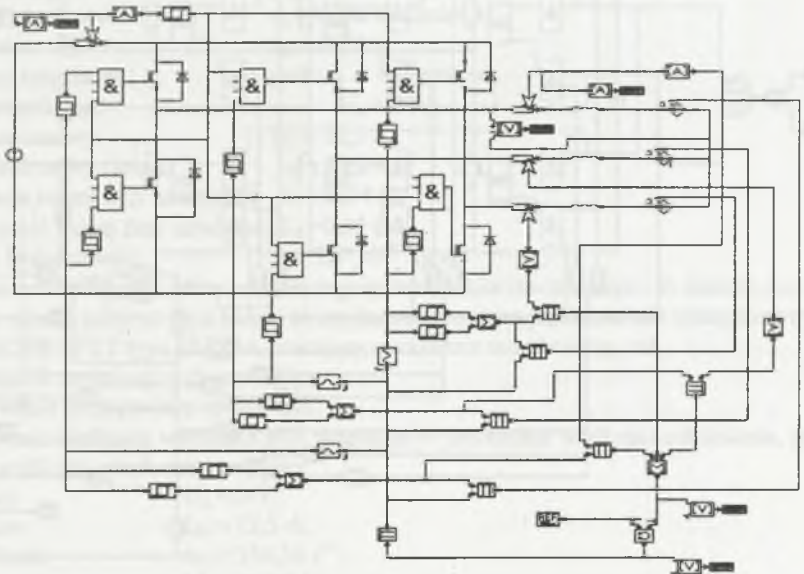
Jeśli przez ϑ_0 oznaczyć kąt położenia wirnika w chwili załączenia tranzystora pierwszego a przez Θ kąt wirnika odpowiadający czasowi załączenia tranzystora, to funkcję przełączającą [5], [6] dla k-tego tranzystora spełnia warunek:

$$F_k(\vartheta) = 1 \quad \text{dla} \quad \vartheta_k - \vartheta_0 < (0, \Theta) \quad (13)$$

Większość elementów i podzespołów występujących w schemacie silnika przedstawionym na rys.1 ma swoje odpowiedniki w bibliotece programu TCAD 6.2 [7].

Stosując edytor graficzny uzyskano [6] model silnika wg programu TCAD 6.2 o postaci pokazanej na rys.2.

Rys. 1. Schemat połączeń elektrycznych 3-fazowego silnika z komutatorem elektronicznym
 Fig.1. Scheme of electrical connections of a 3 - phase permanent magnet motor with an electronic commutator



Rys. 2. Model silnika z komutatorem elektronicznym wg programu TCAD 6.2
 Fig.2 . Model of a brushless dc. motor in TCAD 6.2

3. MODEL UKŁADU Z REGULACJĄ NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO

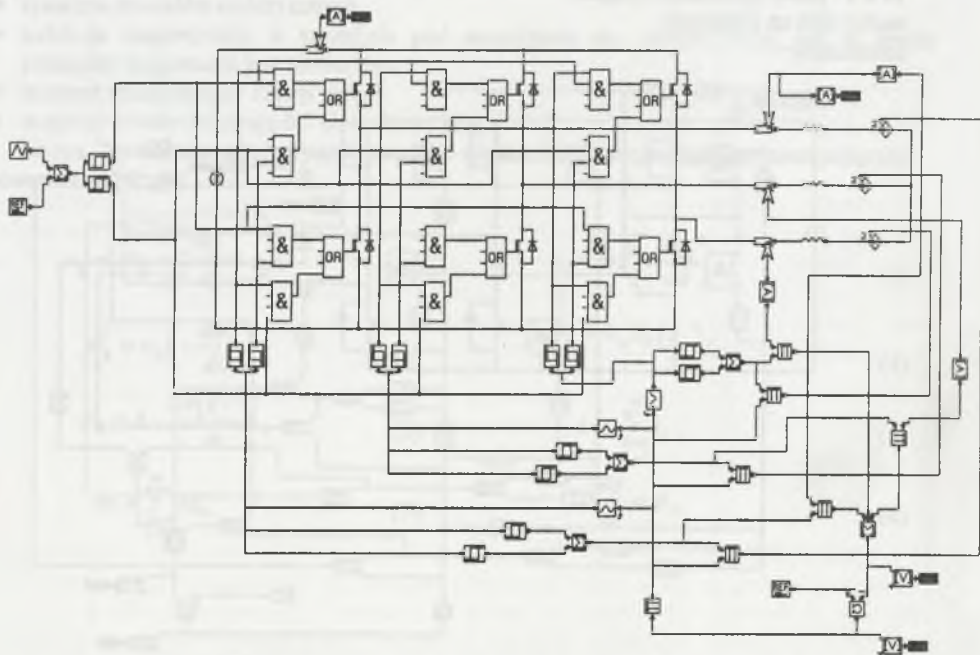
Podstawową metodą regulacji wartości napięcia zasilającego silnik jest dwubiegunowa modulacja szerokości impulsu. Zasady modulacji napięcia zasilającego silnik z komutatorem elektronicznym są analogicznie jak w przypadku modulacji napięcia wyjściowego falownika, zasilającego silnik prądu przemiennego. Modulator powinien przy tym spełniać następujące wymagania:

- dla sygnału zadającego napięcie dodatnie czas załączania tranzystorów grupy dodatniej jest większy od czasu załączania tyrystorów grupy ujemnej,
- zespół zaworów załączających każdą z faz silnika może pracować czterokwadrantowo,
- biegunowość napięcia zasilającego silnik jest narzucona przez aktualny kąt obrotu silnika.



Rys. 3. Schemat blokowy modulatora wg programu TCAD oraz podstawowe przebiegi wyjściowe

Fig.3. Block diagram of the modulator in TCAD and transients in the modulator circuits



Rys. 4. Model komputerowy napędu z silnikiem bezkomutatorowym z magnesami trwałymi, sterowanym poprzez dwubiegunową modulację szerokości impulsu

Fig.4. A model of the brushless dc. motor with bipolar Pulse Width Modulator

Na rys. 3 wyjaśniono zasadę modulacji dwubiegunowej napięcia zasilającego silnik z komutatorem elektronicznym. Przedstawiono tam, dla jednej fazy silnika, schemat modelu układu modulacji wykonany za pomocą programu uniwersalnego TCAD 6.2 oraz przebiegi czasowe wybranych wielkości charakteryzujących pracę modulatora. W przyjętym rozwiązaniu układ modulatora składa się z generatora przebiegu trójkątnego oraz generatora sygnału skokowo zmiennego. Sygnały S_n oraz U_{ref} z tych generatorów podane są na węzeł sumacyjny, a następnie rozdzielone na komparatory generujące impulsy na dodatnią i ujemną grupę zaworów.

Pełny model komputerowy układu napędowego z silnikiem bezkomutatorowym z magnesami trwałymi, zasilanym poprzez komutator elektroniczny zawierający zawory MOSFET i przy regulacji napięcia zasilającego (a przez to również prędkości obrotowej) za pomocą dwubiegunowej modulacji szerokości impulsu, przedstawiono na rys.4. W modelu tym na wejścia tranzystorów każdej fazy modelu silnika z rys.2 podłączono wyjścia z modulatora, przy czym modulatory dla poszczególnych faz są sterowane z tego samego zadajnika napięcia.

4. BADANIA SYMULACYJNE

Badania symulacyjne wykonano dla prototypowego silnika małej mocy typu PM40 z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym oraz z czujnikami halotronowymi, informującymi o aktualnym położeniu wirnika. Ważniejsze dane znamionowe silnika [3], [6] są następujące:

- moc wejściowa znamionowa $P_{1n} = 300 \text{ W}$,
- 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 $J = 7,7 \cdot 10^{-4} \text{ kg} \cdot \text{m}^2$.

Założono warunki pracy takie, jakie występują w układzie rzeczywistym, to znaczy, że:

- zasilanie silnika odbywa się z baterii akumulatorów poprzez przekształtnik tranzystorowy z zaworami MOSFET typu IRFZ44, pracujący w układzie mostkowym, zaś
- częstotliwość modulacji wynosi 4 kHz.

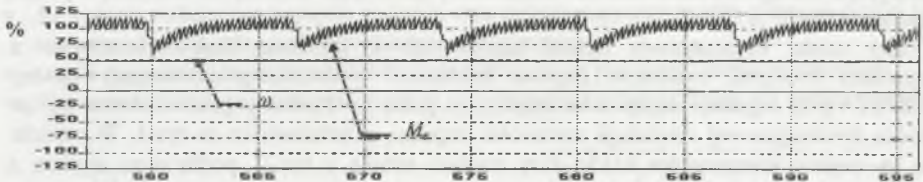
Krok całkowania przyjęto jako równy $5 \mu\text{s}$.

Analizowane wielkości wyrażono jako względne w procentach wielkości odniesienia, przy czym jako wielkości odniesienia przyjęto:

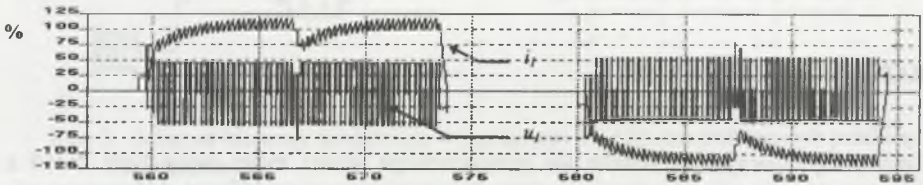
- dla napięć $U_n = 24 \text{ V}$,
- dla prądów $I_{dn} = 12,5 \text{ A}$,
- dla prędkości $\omega_n = 314,16 \text{ s}^{-1}$
- dla momentów $M_n = 0,812 \text{ N} \cdot \text{m}$.

Aby zwiększyć czytelność wykresów dla niektórych przebiegów wielkość prędkości kątowej powielono 5-krotnie.

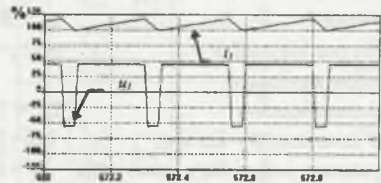
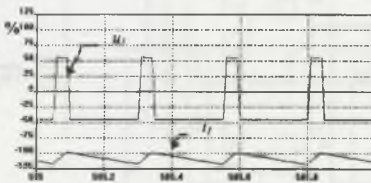
Na rys. 5-11 pokazano przykładowe przebiegi symulacji wybranych wielkości w stanach ustalonych i przejściowych, uzyskane przy dwubiegunowej modulacji napięcia zasilającego. Przedstawiono tam przebiegi napięcia zadanego u_{ref} prądu zasilania i , prądu fazowego i_f , napięcia fazowego silnika u_f , momentu elektromagnetycznego M_e , momentu obciążenia M_m oraz prędkości kątowej ω .



a)



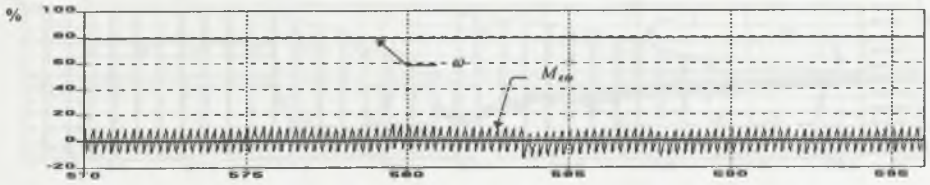
b)



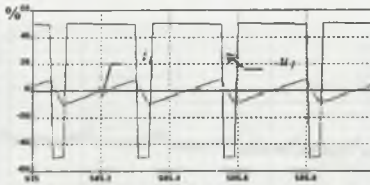
c)

Rys.5. Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e obciążenia M_m i prędkości kątowej ω (a) oraz prądu i_f i napięcia u_f pierwszej fazy silnika dla pracy ustalonej przy obciążeniu znamionowym (b,c,d)

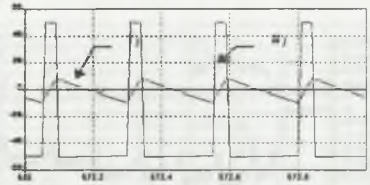
Fig.5. Values of electromagnetic torque M_e load torque M_m angular velocity ω (a) phase current i_f and voltage u_f (b,c,d) of the nominal loaded motor in a steady state



a)



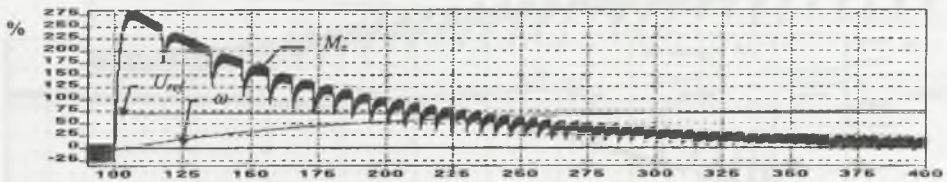
b)



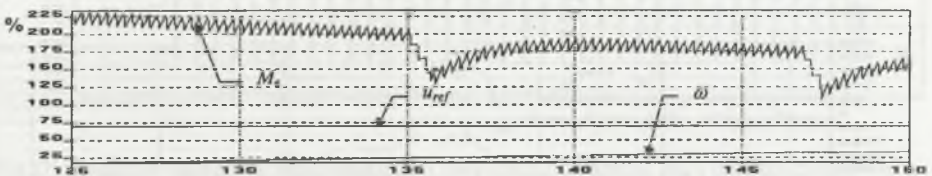
c)

Rys.6 Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e , obciążenia M_m i prędkości kątowej ω oraz prądu i_1 i napięcia u_1 fazowego silnika dla pracy na biegu jałowym (b,c)

Fig.6. Values of electromagnetic torque M_e load torque M_m , angular velocity ω (a) phase current i_1 and voltage u_1 (b,c) of the no load running motor in a steady state



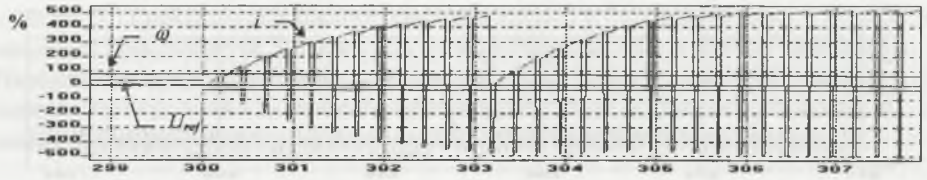
a)



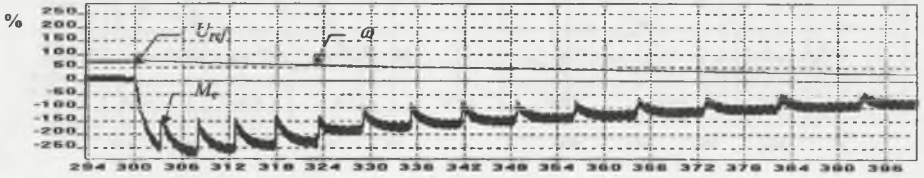
b)

Rys.7.Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e ,i prędkości kątowej ω .silnika dla pracy ustalonej przy znamionowym obciążeniu

Fig.7.Values of electromagnetic torque M_e and angular velocity ω of the nominal loaded motor in a transient state caused by application of the constant supply voltage



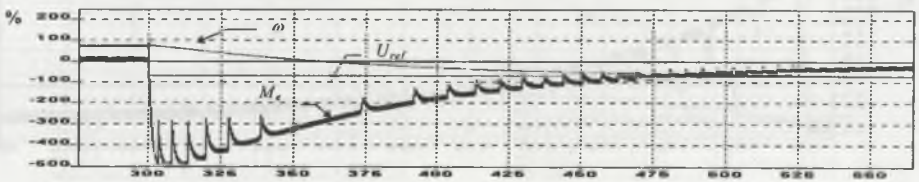
a)



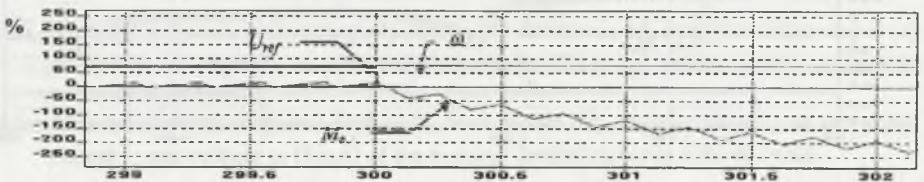
b)

Rys.8. Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e prędkości kątowej ω i napięcia zadane-
go u_{ref} silnika przy rewersji na biegu jałowym

Fig.8. Values of electromagnetic torque M_e angular velocity ω and reference voltage u_{ref} of
the no load running motor in a transient state during reversion



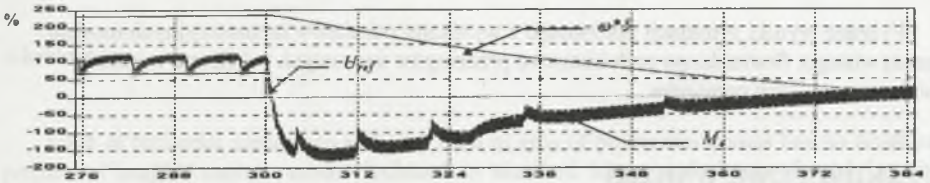
a)



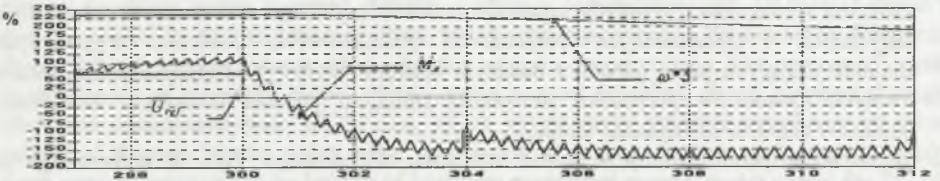
b)

Rys.9 Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e , prędkości kątowej ω i napięcia zadane-
go u_{ref} silnika przy hamowaniu dynamicznym na biegu jałowym

Fig.9. Values of electromagnetic torque M_e , angular velocity ω and reference voltage u_{ref} of
the no load running motor in transient state during dynamic braking

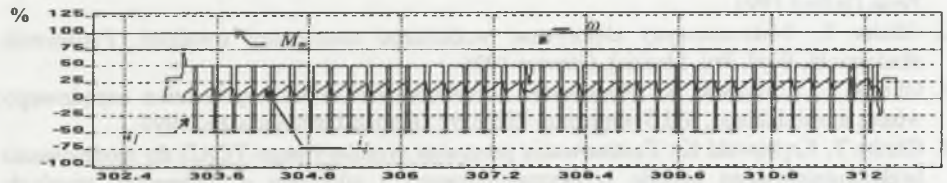
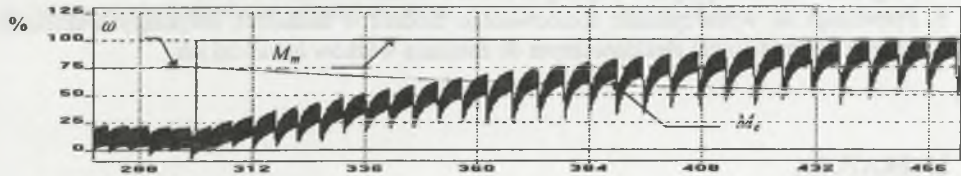


a)



b)

Rys.10 Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e , prędkości kątejowej ω i napięcia zadanego u_{ref} silnika przy hamowaniu dynamicznym i znamionowo obciążonym
 Fig.10. Values of electromagnetic torque M_e angular velocity ω and reference voltage u_{ref} of the nominal loaded motor in a transient state during dynamic braking



Rys.11 Przebiegi momentu elektromagnetycznego M_e , obciążenia M_m i prędkości kątejowej ω .
 (a) oraz prądu i_1 i napięcia u_1 fazowego (b) pracującego na biegu jałowym obciążonego znamionowo
 Fig.11. Values of electromagnetic torque M_e load torque M_m angular velocity ω (a) phase current i_1 and voltage u_1 (b) of the no load motor in transient state caused by application of the nominal load torque

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

5. ZAKOŃCZENIE. WNIOSKI

1. Otrzymany model komputerowy bezkomutatorowego napędu przekształtnikowego z silnikiem o magnesach trwałych zapewnia możliwość szybkiego określania charakterystyk statycznych i dynamicznych dotyczących podstawowych wielkości wyjściowych charakteryzujących pracę napędu z badanym bezkomutatorowym silnikiem o magnesach trwałych również w przypadku sterowania silnikiem poprzez modulację szerokości impulsów napięcia zasilającego silnik. .
2. Model został przedstawiony w postaci schematu obwodowego (rys. 4) wykonanego w oparciu o elementy programu TCAD 6.2. W schemacie tym można wyróżnić model silnika [6] przedstawiony na rys. 2 oraz model modulatora przedstawiony na rys. 3.
3. Przedstawiony model można adoptować dla innych uniwersalnych programów symulacyjnych posiadających edytor graficzny.
4. Ze względu na ograniczoną ilość elementów dopuszczaną w układach modelowanych przy pomocy programu TCAD 6.2 rozważa się możliwość zastąpienia programu TCAD programem symulacyjnym o większych możliwościach obliczeniowych.
5. Przewiduje się wykorzystanie opracowanego modelu w badaniach dotyczących aplikacji napędu z komutatorem elektronicznym do zasilania wózków inwalidzkich.

LITERATURA

1. Dote Y, Kinoshita S.: *Brushless Servomotors Fundamentals and Applications*. Clarendon Press Oxford 1990.
2. Glinka T.: *Mikromaszyny elektryczne wzbudzone magnesami trwałymi*. Podręcznik akademicki. Wyd. Pol. Śląskiej. Gliwice 1995.
3. Glinka T., Krykowski K.: *Sterowanie komutatora elektronicznego silnika napędowego wózka inwalidzkiego*. VII Sympozjum PPEE'97 Gliwice-Ustroń marzec 1997
4. Glinka T, Krykowski K.: *Zastosowanie programu symulacyjnego TCAD do modelowania bezkomutatorowego napędu przekształtnikowego z silnikiem o magnesach trwałych XXXII SPETO, Gliwice-Ustroń maj 1997*.
5. Glinka T, Krykowski K.: *Model silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym XXXIII Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME'97. Poznań-Kiekrz czerwiec 1997*.
6. Glinka T, Krykowski K.: *Komputerowa symulacja pracy silnika z magnesami trwałymi i komutatorem elektronicznym w programie TCAD. Zeszyt Naukowy Pol. Śl. s. Elektryka z.160, Gliwice 1997*.
7. Nieznański J., Iwan K., Szczęśny R., Ronkowski M.: *TCAD for Windows*. Softech. Gdańsk 1996.

Recenzent: Dr hab.inż. Maciej Tondos

Wpłynęło do Redakcji dnia 20 lipca 1997 r.

Abstract

Most of universal simulation software used in area of power electronics has no brushless permanent magnet motor model included in standard libraries. In case of applying that software in simulation research of brushless motor it is necessary to design special brushless motor models for these simulation software. Manner of creation such models for TCAD simulation software is presented in [3] and [4]. Designed computer model of permanent magnet brushless motor powered through electronic commutator with MOSFETs doesn't provide possibility of simulation of drive, which rotational speed is controlled by electronic device through bipolar pulse width modulation of main circuit voltage. The purpose of work is developing of computer model of permanent magnet brushless motor powered through electronic commutator with MOSFETs, which would make possible simulation of drive controlled through bipolar pulse width modulation of voltage feeding main motor circuit. Such a model was created by linking of brushless permanent magnet motor model for TCAD 6.2 simulation software with bipolar pulse width modulation device model, also for TCAD 6.2 software, worked out in this paper. Model was developed to provide possibility of modulation of each phase voltage, corresponding to conditions imposed by voltage control device. Theoretical considerations were completed with simulation research, which confirmed correct model performance. Some of the traces of quantities acquired in process simulation were inserted in this paper. It is expected application of model in drive simulation research, including research of power wheelchair drive.