

Tętnienia prądu zasilającego bezszczotkowy silnik prądu stałego

Streszczenie. Przeprowadzone rozważania dotyczyły bezszczotkowego silnika prądu stałego wzbudzanego magnesami trwałymi i z komutatorem elektronicznym o strukturze mostka 3-fazowego. W artykule opisano zjawisko pojawiania się, przy dużych obciążeniach, ujemnej składowej tętniącej w prądzie zasilającym taki silnik. Zwrócono uwagę na zmiany struktury przekształtnika w zależności od prędkości wirowania, indukcyjności silnika oraz wielkości obciążenia. Przeanalizowano wpływ indukcyjności silnika i prędkości wirowania silnika na pojawianie się w prądzie źródła ujemnej składowej tętniącej i określono wpływ tej składowej na tętnienia momentu oraz na charakterystyki mechaniczne silnika. Analizę teoretyczną poparto badaniami symulacyjnymi na modelach komputerowych wykonanych dla oprogramowania Matlab-Simulink.

Abstract. The conducted considerations concerned PM BLDC motor controlled by electronic commutator, based on the 3-phase bridge. A phenomenon of negative pulsating component appearing in current, which powers the motor in case of high load is described in the paper. The attention has been paid on changes of the converter structure depending on rotational velocity, inductance and load of the motor. Influence of motor inductance and rotational velocity on appearance of negative pulsating component in motor current has been analyzed. The influence of that component on torque pulsations and mechanical characteristics of the motor has been defined. Theoretical analysis was supported by simulation research realized on computer models elaborated in Matlab-Simulink software. (Current ripples in PM BLDC motor supply)

Słowa kluczowe: Bezszytkowy silnik prądu stałego, napęd elektryczny, energoelektronika, silniki wzbudzone magnetoelektrycznie.

Keywords: Permanent magnet brushless, electric drive, power electronics, motors with PM excitation.

doi:10.12915/pe.2014.06.22

Wprowadzenie

Zasada działania i podstawowe właściwości silnika PM BLDC są obszernie opisane między innymi [1, 2 oraz 3]. W idealnym silniku bezszczotkowym prądu stałego (PM BLDC) przełączanie uzwojeń komutatora elektronicznego następuje momentalnie i przez cały czas pracy silnika przewodzą dwa uzwojenia fazowe. W rzeczywistym silniku PM BLDC, ze względu na indukcyjności uzwojenia pojawiają się stany, w których przewodzą trzy uzwojenia. Spowodowane jest to tym, że energia zgromadzona w indukcyjności uzwojeń fazy wyłączanej rozładowuje się przez diodę zwrotną. W efekcie opisanego zjawiska pojawiają się pulsury prądu i momentu elektromagnetycznego, a w obwodzie głównym występują dodatkowe spadki napięcia. Te spadki napięcia powodują zmniejszenie prędkości wirowania silnika, a charakterystyka mechaniczna silnika staje się bardziej podatna [4].

Jako silniki PM BLDC o dużej indukcyjności przyjęto układy, w których rozładowanie energii zgromadzonej w indukcyjności fazowej trwa dłużej niż 1/6 okresu napięcia fazowego. O pojęciu dużej indukcyjności decyduje więc wartość iloczynu $\omega L_{s/d}$. Ta sama wartość indukcyjności, która w przypadku silnika pracującego w zakresie typowych prędkości jest uważana za małą, może być dużą wartością indukcyjności w przypadku silnika wysokoobrotowego, wirującego z dużą prędkością.

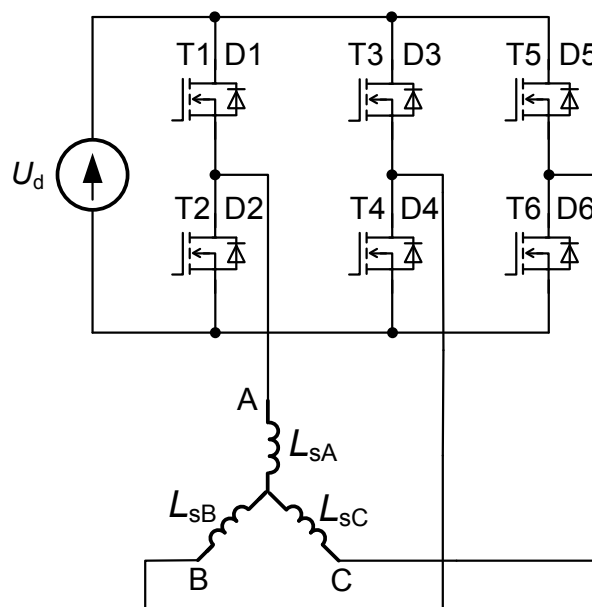
W przypadku silników o małej indukcyjności przedziały czasu, w których przewodzą wszystkie trzy fazy są stosunkowo krótkie, a w czasie ich trwania komutator elektroniczny pracuje w strukturze 2T+D.

W przypadku silników o dużej indukcyjności czas przełączania prądów uzwojeń trwa na tyle długo, że dochodzi do sytuacji, w której podczas pracy silnika zawsze przewodzą trzy zawory komutatora. Stan taki można nazwać komutacją złożoną. Występowanie tego rodzaju komutacji prądów fazowych silnika uzależnione jest od jego parametrów oraz aktualnego obciążenia i rozwijanej prędkości [5, 6]. W szczególności występowanie tego rodzaju komutacji ma miejsce przypadkach pracy silnika z dużym obciążeniem lub w stanach dynamicznych, np. podczas rozruchu.

Praca komutatora elektronicznego w układzie z zewnętrznym regulatorem napięcia

Na rysunku 1 przedstawiono analizowaną strukturę komutatora elektronicznego w układzie pełnego mostka

z zewnętrznym regulatorem napięcia, przy czym T oznacza zawór sterowany – tranzystor, natomiast D oznacza zawór niesterowany – diodę przeciwrównoległą do danego zaworu sterowanego. Na rysunku 1 zaznaczono również zewnętrzne napięcie U_d oraz uzwojenia fazowe silnika PM BLDC.

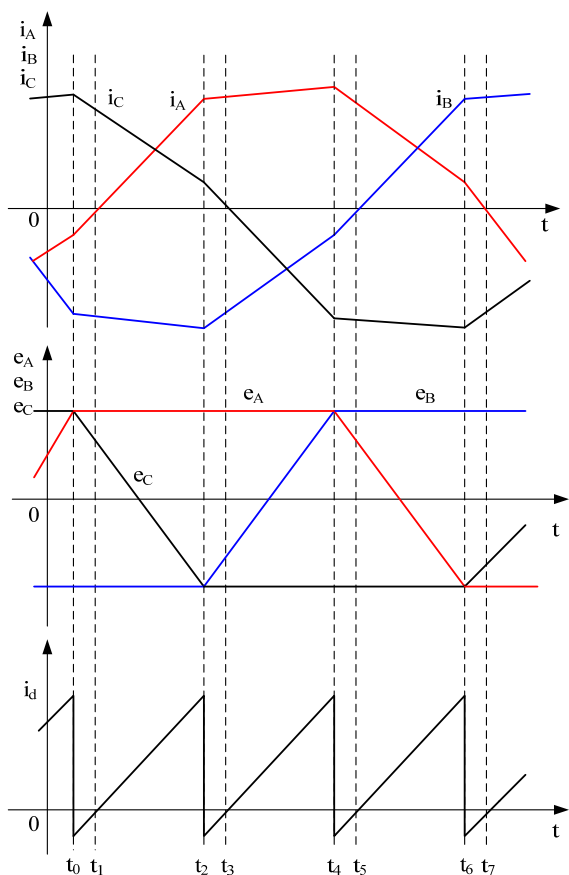


Rys.1. Struktura komutatora elektronicznego oraz układ połączeń uzwojeń silnika i źródła zasilającego U_d

W dalszej analizie przyjęto założenia:

- załączanie i wyłączanie zaworów odbywa się w sposób natychmiastowy,
- zawory mogą przewodzić prąd tylko w jednym kierunku,
- kierunki prądów, tranzystora T oraz diody przeciwrównoległej D, oznaczonych tym samym wyróżnikiem cyfrowym, są przeciwne,
- źródło zasilające U_d ma charakter idealnego źródła napięciowego sterowanego,
- oprócz uzwojeń fazowych silnika, w układzie nie występują inne indukcyjności,
- prądy fazowe silnika narastają i opadają liniowo.

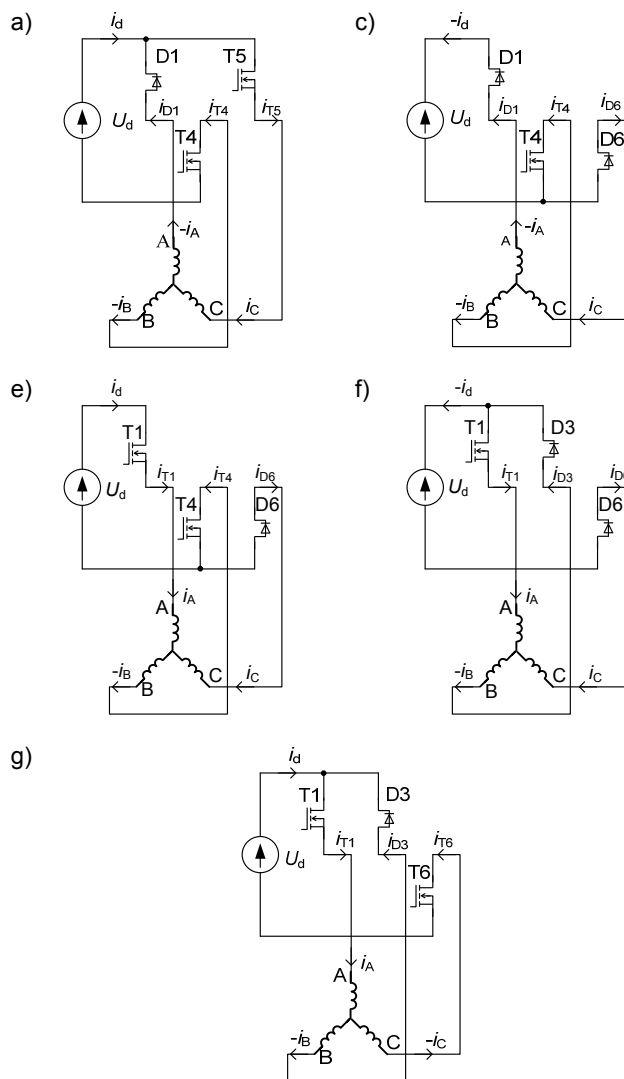
Przebiegi prądów fazowych i fazowych sił elektromotorycznych silnika PM BLDC oraz prądu źródła zasilającego komutator elektroniczny dla przypadku komutacji złożonej pokazano na rysunku 2. Na rysunku 3 przedstawiono grafy obowiązujące w trakcie komutacji złożonej. Grafy te ilustrują poszczególne przedziały pracy komutatora, zaznaczone na rysunku 2.



Struktura na rys.3 a) c) e) f) g)

Rys.2. Przebiegi prądów fazowych silnika PM BLDC oraz prądu zasilającego komutator elektroniczny i_d w przypadku komutacji złożonej, przy dużych obciążeniach silnika

W przypadku silnika o małej indukcyjności uzwojeń, załączanie kolejnego tranzystora komutatora następuje w chwili wyłączenia poprzedniego tranzystora danej grupy. W przypadku dużych indukcyjności i dużych obciążeń pojawia się sytuacja, że przez diodę przeciwnoległą do danego tranzystora płynie prąd uniemożliwiający załączenie tego tranzystora. Zjawisko to pokazano na rysunku 2 i rysunku 3, przy czym analizę pracy komutatora elektronicznego rozpoczęto dla czasu $t < t_0$, gdy przewodzą tranzystory T5 (faza C) i T4 (faza B) oraz dioda D1 (faza A), obowiązuje wtedy graf (rys.3a). W chwili t_0 , po wyłączeniu tranzystora T5 przewodzą tranzystory T4 (faza B) oraz diody D1 (faza A) i D6 (faza C) - obowiązuje graf jak na rysunku 3c. Tranzystor T1 może zacząć przewodzić dopiero w chwili t_1 , gdy prąd diody D1 zmaleje do 0. Po załączeniu w chwili t_1 tranzystora T1 układ przyjmuje strukturę (rys.3e). Po wyłączeniu w chwili t_2 tranzystora T4 jego obciążenie przejmuje dioda D3, zaczyna obowiązywać graf (rys.3f). Gdy prąd diody D6 w chwili t_3 zmaleje do 0 zaczyna przewodzić tranzystor T6 (rys.3g).

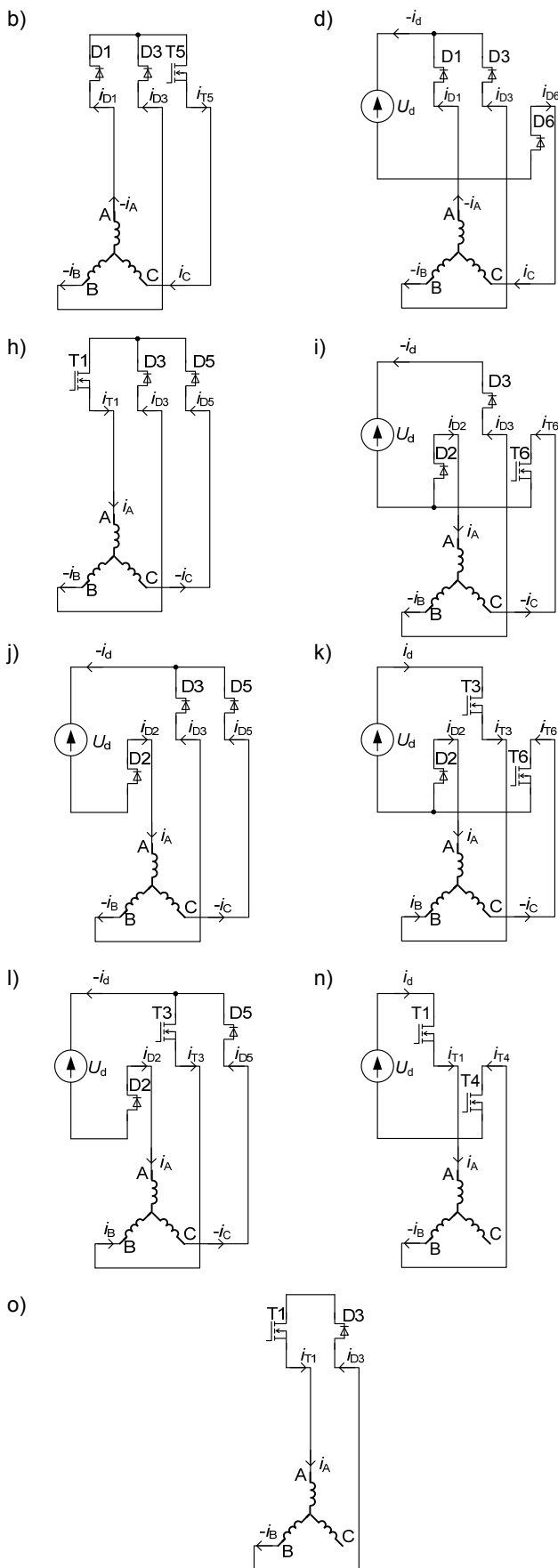


Rys.3. Grafy obrazujące struktury komutatora elektronicznego w przypadku komutacji złożonej oraz obowiązujące dla nich rozkłady prądów

Opisany cykl przełączeń występuje dla kolejnych tranzystorów i diod. Prąd źródła jest opisany zależnością:

$$(1) \quad i_d = \begin{cases} i_{T5} - i_{D1} = i_{T4} = -i_B & \text{dla } t < t_0 \\ -i_{D1} = i_{T4} - i_{D6} = i_A & \text{dla } t_0 \leq t < t_1 \\ i_{T1} = i_{T4} - i_{D6} = i_A & \text{dla } t_1 \leq t < t_2 \\ i_{T1} - i_{D3} = -i_{D6} = -i_C & \text{dla } t_2 \leq t < t_3 \\ i_{T1} - i_{D3} = i_{T6} = -i_C & \text{dla } t_3 \leq t < t_4 \\ i_{T6} - i_{D2} = -i_{D3} = i_B & \text{dla } t_4 \leq t < t_5 \\ i_{T6} - i_{D2} = i_{T3} = i_B & \text{dla } t_5 \leq t < t_6 \\ i_{T3} - i_{D5} = -i_{D2} = -i_A & \text{dla } t_6 \leq t < t_7 \\ \text{ itd.} & \end{cases}$$

Z przytoczonych rozważań i z zależności (1) wynika, że w przedziałach czasowych $t_0 \div t_1$, $t_2 \div t_3$, $t_4 \div t_5$, ... itd., pojawiają się ujemne pulsy prądu źródła, następuje także zwrot energii zgromadzonej w indukcyjnościach do źródła zasilającego U_d .



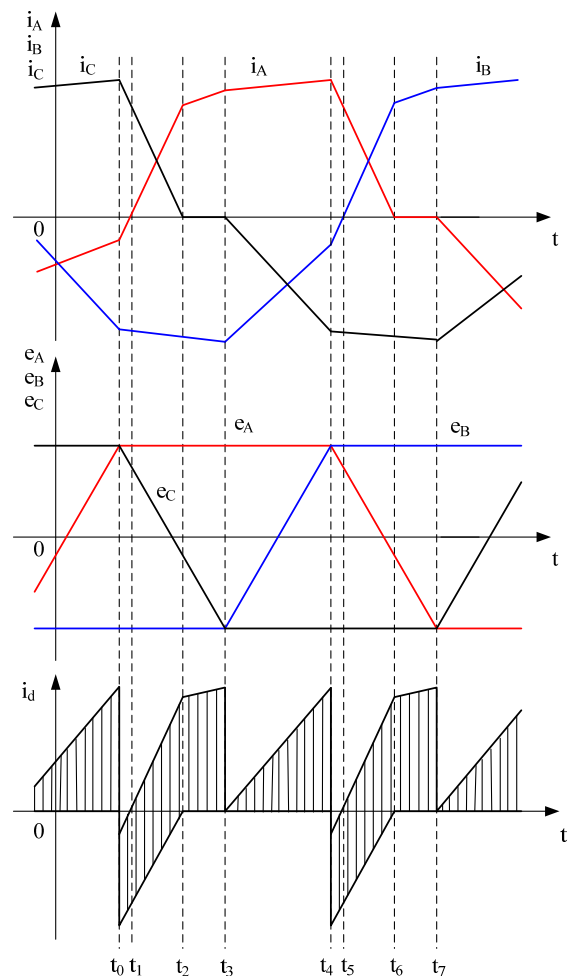
Rys.4. Grafy obrazujące dodatkowe struktury komutatora elektronicznego oraz obowiązujące dla nich rozptyły prądów występujące w przypadku regulacji w komutatorze elektronicznym

Z przeprowadzonej analizy wynika, że podczas pracy silnika dla rozpatrywanego zakresu pracy i komutacji złożonej, zawsze przewodzą trzy zawory komutatora elektronicznego. Mogą to być dwa zawory sterowane i jeden niesterowany (struktura 2T+D) albo jeden zawór sterowany i dwa niesterowane (struktura T+2D).

Występowanie komutacji złożonej podczas pracy silnika powoduje pojawienie się przedziałów czasu, w których prąd źródła zmienia znak. Dla układów zasilających, w których przepływ energii jest jednokierunkowy i wyposażonych w kondensator na wyjściu [7], np. przekształtnik typu boost [8], w tych przedziałach czasu, energia oddawana w procesie komutacji gromadzona jest w kondensatorze. Powoduje to chwilowe przyrosty napięcia zasilającego komutator elektroniczny. Ponadto, w przypadku układów regulacji prądu obwodu zastępczego prądu stałego silnika, ujemne impulsy prądowe mogą niekorzystnie wpływać na układ sterowania.

Układ z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym

W przypadku regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym pojawiają się dodatkowe struktury. Na rysunku 4 pokazano struktury, występujące dodatkowo w przypadku strategii sterowania typu 120Q- [9] i regulacji napięcia przez modulację PWM w komutatorze elektronicznym. Na rysunku 5 pokazano natomiast przebiegi prądów i fazowych sił elektromotorycznych dla ww. sposobu sterowania.



Rys.5. Przebiegi prądów fazowych silnika PM BLDC oraz prądu zasilającego komutator elektroniczny w przypadku komutacji złożonej, dla regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym w ujemnej grupie zaworów

W tabeli 1 zamieszczono przyporządkowanie grafów zamieszczonych na rysunkach 3 i 4 do przedziałów czasowych występujących na rysunku 5.

Tabela 1. Przedziały obowiązywania grafów

Przedział czasu	Obowiązujący graf dla PWM =1	Obowiązujący graf dla PWM =0
$t < t_0$	rys.3a	rys.4b
$t_0 \leq t < t_1$	rys.3c	rys.4d
$t_1 \leq t < t_2$	rys.3e	rys.3f
$t_2 \leq t < t_3$	rys.4n	rys.4o
$t_3 \leq t < t_4$	rys.3g	rys.4h
$t_4 \leq t < t_5$	rys.4i	rys.4j
$t_5 \leq t < t_6$	rys.4k	rys.4l

Prąd pobierany ze źródła jest teraz opisany zależnością:

$$(2) \quad i_d = \begin{cases} i_{T5} - i_{D1} = i_{T4} = -i_B & \text{dla } t < t_0 \quad \text{i PWM} = 1 \\ 0 & \text{dla } t < t_0 \quad \text{i PWM} = 0 \\ -i_{D1} = i_{D6} - i_{T4} = i_A & \text{dla } t_0 \leq t < t_1 \quad \text{i PWM} = 1 \\ -i_{D6} = -i_{D1} - i_{D3} = -i_C & \text{dla } t_0 \leq t < t_1 \quad \text{i PWM} = 0 \\ i_{T1} = i_{T4} - i_{D6} = i_A & \text{dla } t_1 \leq t < t_2 \quad \text{i PWM} = 1 \\ -i_{D6} = i_{T1} - i_{D3} = -i_C & \text{dla } t_1 \leq t < t_2 \quad \text{i PWM} = 0 \\ i_{T4} = i_{T1} = i_A = -i_B & \text{dla } t_2 \leq t < t_3 \quad \text{i PWM} = 1 \\ 0 & \text{dla } t_2 \leq t < t_3 \quad \text{i PWM} = 0 \\ i_{T1} - i_{D3} = i_{T6} = -i_C & \text{dla } t_3 \leq t < t_4 \quad \text{i PWM} = 1 \\ 0 & \text{dla } t_3 \leq t < t_4 \quad \text{i PWM} = 0 \\ -i_{D3} = i_{D2} - i_{T6} = i_B & \text{dla } t_4 \leq t < t_5 \quad \text{i PWM} = 1 \\ -i_{D2} = -i_{D3} - i_{D5} = -i_A & \text{dla } t_4 \leq t < t_5 \quad \text{i PWM} = 0 \\ i_{T3} = i_{T6} - i_{D2} = i_B & \text{dla } t_5 \leq t < t_6 \quad \text{i PWM} = 1 \\ -i_{D2} = i_{T3} - i_{D5} = -i_A & \text{dla } t_5 \leq t < t_6 \quad \text{i PWM} = 0 \\ i_{T3} = i_{T6} = -i_C = i_B & \text{dla } t_6 \leq t < t_7 \quad \text{i PWM} = 1 \\ 0 & \text{dla } t_6 \leq t < t_7 \quad \text{i PWM} = 0 \\ \text{itd.} & \end{cases}$$

Z przytoczonych rozważań i z zależności (2) wynika, że w przedziałach czasowych $t_0 \div t_1$, $t_1 \div t_2$ (dla PWM = 0), $t_4 \div t_5$, $t_5 \div t_6$ (dla PWM = 0), itd. pojawiają się ujemne pulsy prądu źródła. Następuje wtedy zwrot energii zgromadzonej w indukcyjności do źródła zasilającego U_d .

Z przeprowadzonej analizy wynika, że w cyklu pracy silnika przy regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym, prowadzonej z wykorzystaniem strategii 120Q-, występuje pięć wariantów jednoczesnego przewodzenia zaworów przekształtnika. Trzy warianty, w których przewodzą jednocześnie trzy zawory (struktury 2T+D lub T+2D lub 3D) oraz dwa warianty gdy przewodzą jednocześnie dwa zawory (struktury 2T lub T+D).

Występowanie komutacji złożonej podczas pracy silnika z regulacją napięcia w komutatorze powoduje pojawienie się przedziałów, w których prąd źródła zmienia znak. Dla układów zasilających z jednokierunkowym przekazywaniem energii i kondensatorem na wyjściu, we wspomnianych przedziałach czasu, energia oddawana w procesie komutacji gromadzona jest w kondensatorze. Powoduje to chwilowe przyrosty napięcia zasilającego komutator elektroniczny. Przełączanie zaworów komutatora w procesie regulacji z wykorzystaniem impulsów PWM może powodować pojawianie się impulsów przepięciowych w przebiegach prądowych. Impulsy te mogą zakłócać

sygnały pomiarowe wykorzystywane w układzie regulacji prądu silnika.

W przypadku pracy silnika z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym, odbywającą się z wykorzystaniem strategii 120Q- lub 120Q+, wyraźnie zauważalna jest asymetria przebiegów pomiędzy dodatnimi a ujemnymi przedziałami prądów fazowych. Przy regulacji napięcia w ujemnej grupie zaworów komutatora elektronicznego, w przebiegu prądu fazy nie biorącej udziału w komutacji uwidacznia się głębsze załamanie w przebiegu prądu fazowego, w przedziale prądów ujemnych.

W obu omówionych przypadkach, wpływ komutacji złożonej na przebieg prądu źródła jest zjawiskiem dalece niekorzystnym dla działania układów regulacji prądu obwodu zastępczego prądu stałego silnika. Zakłócenia jakie mogą pojawiać się w przebiegach sygnałów pomiarowych prądów powodują konieczność stosowania filtrów, które mogą w znacznym stopniu pogorszyć parametry dynamiczne układu regulacji prądu silnika.

Tętnienia momentu elektromagnetycznego występujące podczas pracy silnika PM BLDC o dużej wartości stałej elektromagnetycznej przy dużych obciążeniach

Całkowity moment elektromagnetyczny silnika PM BLDC jest sumą momentów elektromagnetycznych pochodzących od poszczególnych faz i dla silnika 3-fazowego wynosi:

$$(3) \quad M_e = \sum_{k=A}^C M_{ek}$$

przy czym moment elektromagnetyczny wytwarzany przez k-tą fazę wynosi:

$$(4) \quad M_{ek} = i_k k_{fk}$$

W przypadku silników PM BLDC o dużej indukcyjności, zanik prądu podczas komutacji w k-tej fazie (zstępującej) może przebiegać na tyle długo, że wcześniej następuje w tej fazie zmiana znaku fazowego współczynnika wzbudzenia k_{fk} . Powoduje to pojawienie się przedziałów czasowych, w których moment elektromagnetyczny wytwarzany w tej fazie ma znak przeciwny, jest więc momentem hamującym. Istnienie składowej hamującej momentu elektromagnetycznego powiększa straty w uzwojeniach silnika oraz w zaworach komutatora.

Na rysunku 6 przedstawiono przebiegi fazowych współczynników wzbudzenia, prądów fazowych i wywołanych nimi fazowych momentów elektromagnetycznych oraz całkowitego momentu wytwarzanego przez silnik PM BLDC. Przebiegi te wyznaczono dla stanu pracy bez regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym.

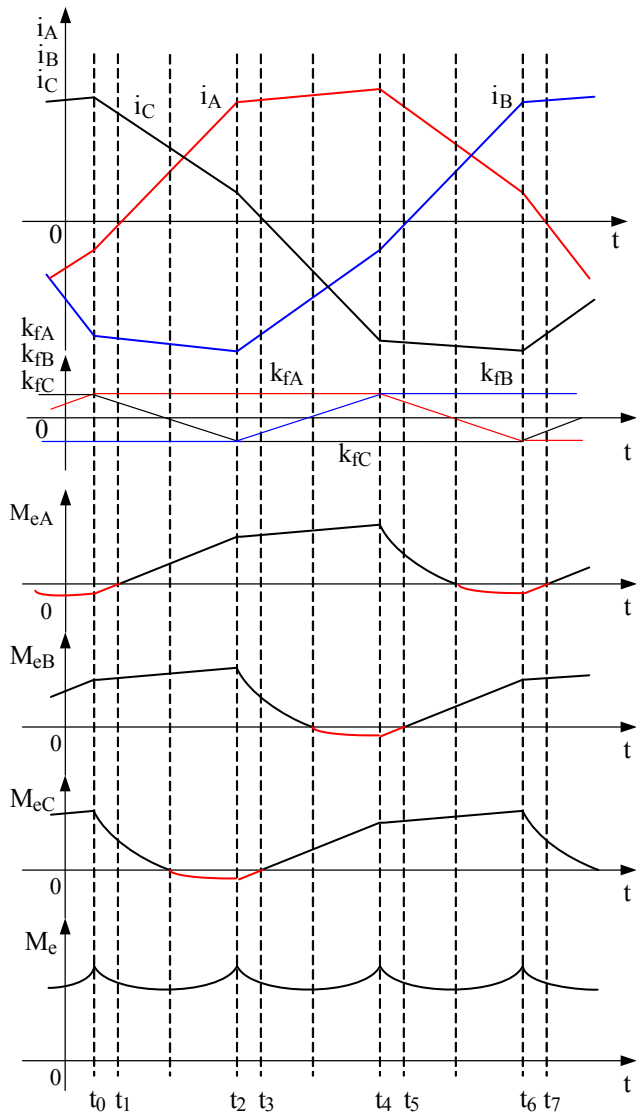
Na skutek dużej indukcyjności uzwojeń silnika PM BLDC, przy dużych obciążeniach, w każdej chwili czasowej trwa proces komutacji. Skutkiem tego jest powstawanie tętnień momentu elektromagnetycznego, których okres wynosi:

$$(5) \quad T_{Me} = \frac{\pi}{3p\omega}$$

gdzie: p jest liczbą par biegunów silnika.

W przypadku regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym z wykorzystaniem powszechnie stosowanej strategii 120Q- lub 120Q+, jak już wspomniano w poprzednim rozdziale, występuje asymetria pomiędzy dodatnimi i ujemnymi przedziałami przebiegów prądów fazowych. Skutkuje to pojawieniem się asymetrii w przebiegu momentu elektromagnetycznego silnika.

Tętnienia momentu elektromagnetycznego w silniku PM BLDC, spowodowane wpływem dużej indukcyjności uzwojeń przy dużych obciążeniach, powodują powstawanie tętnień prędkości kątowej silnika, co jest zjawiskiem dalece niekorzystnym w układach napędowych. Podobny charakter mają również przebiegi momentu elektromagnetycznego w układach z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym, ale przebieg ich jest bardziej złożony.



Rys.6. Przebiegi prądów fazowych silnika PM BLDC oraz momentów elektromagnetycznych fazowych i całkowitego momentu elektromagnetycznego silnika

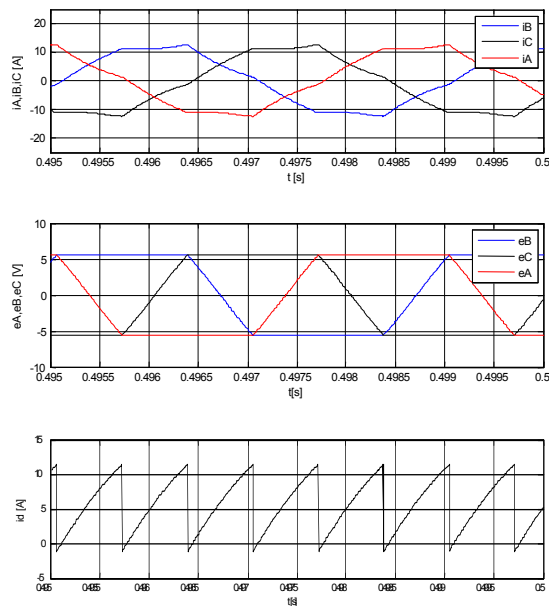
Badania symulacyjne

W celu weryfikacji wyników analizy przeprowadzono badania symulacyjne z wykorzystaniem oprogramowania Matlab/Simulink, dla modelu układu napędowego z silnikiem PM BLDC, którego parametry odpowiadały silnikowi typu BG65x50 produkcji firmy Dunkermotoren: napięcie znamionowe $U_n = 24 \text{ V}$, znamionowa prędkość kątowa 324 rad/s , moment znamionowy $0,26 \text{ N.m}$, rezystancja fazowa $0,915 \Omega$, zastępcza indukcyjność fazowa $0,715 \text{ mH}$, elektromagnetyczna stała czasowa $\tau_e = 7,8 \text{ ms}$.

W ramach badań symulacyjnych, przeprowadzono, m.in. obserwację przebiegów prądów fazowych, fazowych SEM, prądu zasilającego mostek komutatora elektronicznego oraz przebiegi fazowych momentów

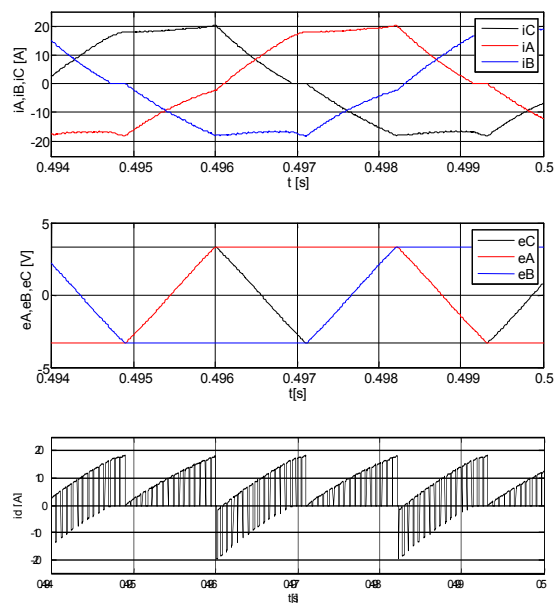
elektromagnetycznych i przebieg całkowitego momentu elektromagnetycznego silnika dla rozpatrywanych warunków pracy.

Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi prądów fazowych, fazowych SEM oraz przebieg prądu i_d zasilającego komutator elektroniczny silnika PM BLDC, pracującego bez regulacji w komutatorze elektronicznym.



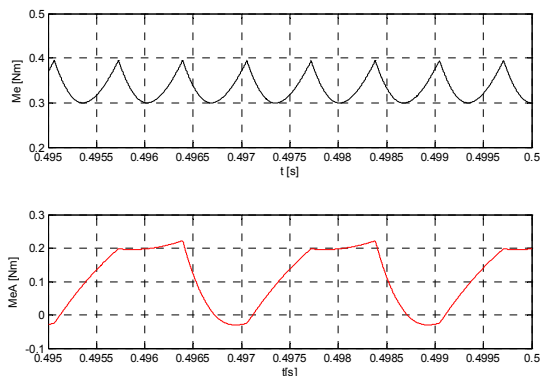
Rys.7. Przebiegi prądów fazowych, fazowych SEM oraz przebieg prądu zasilającego komutator elektroniczny i_d , uzyskane w drodze symulacji, dla pracy silnika bez regulacji w komutatorze elektronicznym

Na rysunku 8 przedstawiono przebiegi prądów fazowych, fazowych SEM oraz przebieg prądu i_d zasilającego komutator elektroniczny silnika PM BLDC, pracującego z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym.



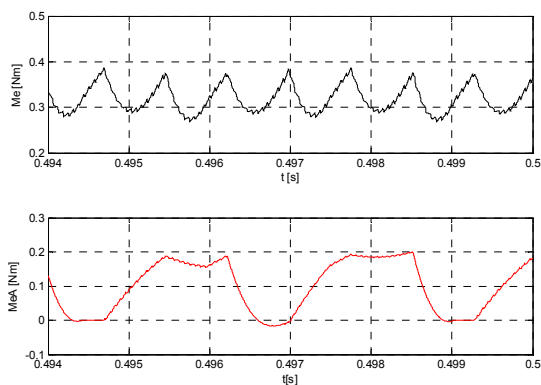
Rys.8. Przebiegi prądów fazowych silnika, fazowych SEM oraz przebieg prądu zasilającego komutator elektroniczny i_d , uzyskane w drodze symulacji, w przypadku pracy silnika z regulacją napięcia w komutatorze elektronicznym

Na rysunku 9 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego pochodzącego od prądu wybranej fazy silnika oraz momentu całkowitego silnika PM BLDC o dużej indukcyjności uzwojeń dla obciążenia znamionowego $M_L = 0,26$ N.m, uzyskane w drodze symulacji modelu.



Rys.9. Przebiegi momentu elektromagnetycznego pochodzącego od prądu wybranej fazy A oraz momentu całkowitego silnika o dużej indukcyjności uzwojeń dla obciążenia znamionowego $M_L = 0,26$ N.m, uzyskane w drodze symulacji modelu

Na rysunku 10 przedstawiono przebiegi momentu elektromagnetycznego pochodzącego od prądu wybranej fazy silnika oraz całkowitego momentu elektromagnetycznego silnika PM BLDC o dużej indukcyjności uzwojeń dla obciążenia znamionowego $M_L = 0,26$ N.m, przy regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym, dla współczynnika wypełniania impulsów przebiegu sterującego PWM $a_{KE} = 0,8$, uzyskane w drodze symulacji modelu.



Rys.10. Przebiegi momentu elektromagnetycznego wybranej fazy silnika oraz momentu całkowitego silnika PM BLDC o dużej indukcyjności uzwojeń dla obciążenia znamionowego $M_L = 0,26$ N.m, przy regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym, dla $a_{KE} = 0,8$; uzyskane w drodze symulacji modelu.

Podsumowanie. Wnioski końcowe

1. Na podstawie analiz i przeprowadzonych badań symulacyjnych można stwierdzić, że w przypadku silnika PM BLDC cechującego się dużą indukcyjnością uzwojeń, dla pracy bez regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym, przy dużych obciążeniach silnika, może dojść do sytuacji, w której przewodzą zawsze trzy zawory komutatora. Dwa zawory sterowalne i jeden niesterowalny, lub jeden zawór sterowalny i dwa niesterowalne.
2. W przypadku regulacji napięcia w komutatorze elektronicznym, prowadzonej z wykorzystaniem strategii

120Q+ lub 120Q-, w przypadku silnika o dużej indukcyjności uzwojeń i przy dużych obciążeniach może zachodzić komutacja złożona, w której przewodzą jednocześnie trzy zawory komutatora. Dwa zawory sterowalne i jeden niesterowalny albo jeden zwór sterowalny i dwa zawory niesterowalne albo trzy zawory niesterowalne. Ponadto występują przedziały, w których przewodzą jednocześnie dwa zawory sterowalne lub jeden sterowalny i jeden niesterowalny.

3. Występowanie komutacji złożonej powoduje pojawianie się ujemnych pulsów prądowych w przebiegu prądu zasilającego komutator elektroniczny, co może zakłócać funkcjonowanie układów regulacji prądu obwodu zastępczego prądu stałego silnika PM BLDC.
4. Występowanie komutacji złożonej powoduje pojawianie się przedziałów, w których występują momenty hamujące pogarszające sprawność układu napędowego z silnikiem PM BLDC.
5. Komutacja złożona zachodząca podczas pracy silnika PM BLDC powoduje powstawanie tętnień momentu elektromagnetycznego, co skutkuje tętnieniami prędkości kątowej silnika.
6. Należy pamiętać, że pod pojęciem duża indukcyjność przyjęto indukcyjność o dużej wartości iloczynu $\omega L_s I_d$. W przypadku silników wysokobrotowych może, więc wystąpić sytuacja, że indukcyjność o małej wartości będzie w zakresie niniejszych rozważań dużą indukcyjnością.

LITERATURA

- [1] Krishnan R., Electric Motor Drives, Modeling, Analysis and Control, *Prentice Hall*, New Jersey 2001
- [2] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym analiza, właściwości, modelowanie, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice 2011
- [3] Miller T.J.E., Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives, Oxford 1989
- [4] Krykowski K., Hetmańczyk J., Makiela D., Impact of windings switching on torque-speed curves of PM BLDC motor, *COMPEL - The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering*, 32, (2013), n.4, 1300–1314
- [5] Domoracki A., Hetmańczyk J., Ograniczenie komutacyjnych tętnień momentu w bezszczotkowym silniku prądu stałego, *Przegląd Elektrotechniczny* (2004), nr 3, 205-207
- [6] Ursanu G., Diaconescu C., Baluta G., Torque ripple reduction in brushless DC motor drives, *International Conference and Exposition on Electrical and Power Engineering - EPE 2012*, Iasi, Rumunia (2012), 385–390
- [7] Barlik R., Nowak M., Poradnik inżyniera energoelektronika. *WNT*, Warszawa 1998
- [8] Krykowski K., Piwowarczyk R., Radczuk Cz., Poszerzenie zakresu prędkości silnika bezszczotkowego prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC) przez zastosowanie przekształtnika podwyższającego BOOST, VIII Krajowa Konferencja Naukowa Sterowanie w Energoelektronice i Napędzie Elektrycznym - SENE 2007, Łódź (2007), 259-266
- [9] Hendershot J.R., Miller T.J.E., Design of brushless permanent magnet motors. *Magna physics publishing and Clarendon Press*, Oxford 1994

Autorzy: mgr inż. Robert Piwowarczyk, prof. dr hab. inż. Krzysztof Krykowski, dr inż. Janusz Hetmańczyk, Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: p.robert@interia.pl, Krzysztof.Krykowski@polsl.pl, Janusz.Hetmanczyk@polsl.pl