

Wyznaczanie czasu komutacji w silnikach PM BLDC

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania czasu komutacji silników PM BLDC. Dotychczas znane metody wyznaczania czasu komutacji zakładały szereg uproszczeń, jak na przykład liniową zmianę prądu fazowego, zerową rezystancję uzwojeń czy też pomijały spadki napięć na diodach. W zaproponowanej metodzie uwzględniono te wartości, a obliczenia wykonano w oparciu o fazowy schemat zastępczy. Wyniki uzyskane za pomocą zaproponowanej metody zostały zweryfikowane laboratoryjnie.

Abstract. The article presents a method for determining the commutation time of PM BLDC motors. Previously known methods for determining the commutation time assumed a number of simplifications, such as the linear variation of the phase current, zero winding resistance and neglected the voltage drops on the diodes. The proposed method takes into account these values. Calculations in proposed method was carried out using the equivalent phase circuit. The results obtained by the proposed method has been verified in laboratory. (**Determining of commutation time in PM BLDC motors**).

Słowa kluczowe: czas komutacji, zjawisko komutacji, komutacja BLDC.

Keywords: commutation time, commutation phenomenon, commutation, BLDC.

doi:10.12915/pe.2014.11.49

1. Wstęp

W artykule [1] przedstawiono zagadnienia związane bezczujnikowym sterowaniem wysokoobrotowego silnika PM BLDC [2]. Zaproponowano między innymi bezczujnikową metodę sterowania wysokoobrotowym silnikiem PM BLDC bazującą na napięciach międzyprzewodowych silnika. Przedstawiona metoda pozwala na pracę silnika z kątem komutacji dochodzącym do 60°. O ile dla klasycznych silników kąt sześćdziesięciu stopni elektrycznych nie pozwala na pracę w pełnym zakresie prędkości i momentu, to już dla silników wysokoobrotowych ze względu na zupełnie inne wartości parametrów rezystancji i indukcyjności fazowej, wydaje się wielce prawdopodobne, że zaproponowana metoda sterowania bezczujnikowego pozwoli na pracę w pełnym zakresie prędkości i momentu. Dlatego podjęto prace nad wyznaczeniem czasu i kąta komutacji, w celu udowodnienia, że zaproponowana metoda sterowania bezczujnikowego jest odpowiednia dla silników wysokoobrotowych w pełnym zakresie momentu i prędkości.

Kąt komutacji wyrażony w stopniach jest określony za pomocą zależności (1).

$$(1) \quad \mu_Q = t_Q \cdot f \cdot 360^\circ$$

gdzie: μ_Q – kąt komutacji (wyrażony w stopniach), t_Q – czas komutacji, f – częstotliwość prądu silnika.

Z równania (1) widać, że aby wyznaczyć kąt komutacji, należy znać czas komutacji. W literaturze opisane zostały różne sposoby wyznaczania czasu komutacji. Różnice wynikają ze sposobu definiowania czasu komutacji. Na przykład w publikacji [3] autorzy określają czas komutacji za pomocą zależności (2), przy założeniu że czasy narastania i opadania prądów w fazach wstępującej i zstępującej są takie same. Ponadto autorzy definiują czas komutacji jako czas ustalania się prądów we wszystkich fazach silnika.

$$(2) \quad t_Q = \frac{3L_s I_{dav}}{2(U_d - E_s)}$$

gdzie: L_s – indukcyjność fazowa, I_{dav} – wartość średnia prądu zasilania, U_d – napięcie zasilania podane na zaciski komutatora elektronicznego, E_s – wartość siły elektromotorycznej w obszarze czynnym.

Czas komutacji może być również zdefiniowany w inny sposób, a mianowicie jako czas przejmowania prądu przez

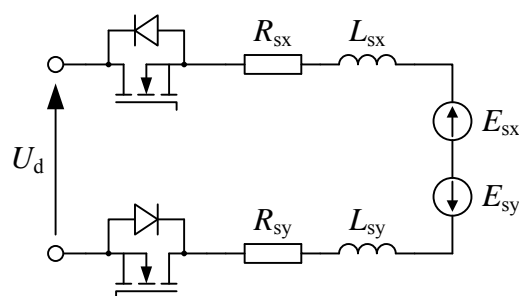
kolejny zawór komutatora elektronicznego [4]. Czas komutacji zdefiniowany w ten sposób jest określony zależnością (3).

$$(3) \quad t_Q = \frac{2L_s I_{dav}}{U_d}$$

Żadna z przedstawionych zależności nie uwzględnia rezystancji uzwojeń, ani spadków napięć na diodach znajdujących się w wewnętrznej strukturze tranzystorów komutatora elektronicznego. Ponadto przedstawione zależności zakładają liniową zmianę prądu fazowego. Z tego względu zdecydowano się wyprowadzić równanie na czas komutacji bez stosowania powyższych uproszczeń stosując dodatkowo założenie, że czasy narastania i opadania prądów w fazach wstępującej i zstępującej są takie same.

2. Fazowy schemat zastępczy

W literaturze na temat silników PM BLDC bardzo często stosuje się schemat zastępczy, który wynika z toru przepływu prądu przez uzwojenia silnika. Zakłada się, że w każdym momencie pracy silnika PM BLDC przewodzi dokładnie dwa uzwojenia. W związku z tym silnikowi PM BLDC można przyporządkować następujący schemat zastępczy (rysunek 1).



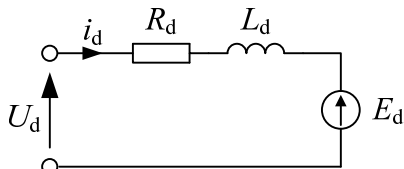
Rys.1. Schemat zastępczy silnika PM BLDC

Poszczególne symbole z rysunku 1 oznaczają:
 R_{sx}, R_{sy} – rezystancje uzwojeń dwóch dowolnych faz silnika,
 L_{sx}, L_{sy} – indukcyjności uzwojeń dwóch dowolnych faz silnika,
 E_{sx}, E_{sy} – wartości sił elektromotorycznych obszaru czynnego dwóch dowolnych faz silnika,

Oprócz tego na rysunku 1 zamieszczono dwa tranzystory komutatora elektronicznego. Ponieważ w przyjętych założeniach w każdej chwili pracy silnika przewodzą zawsze tylko dwie fazy, w związku z tym w każdej chwili pracy przewodzą tylko dwa tranzystory komutatora elektronicznego jeden z grupy katodowej, a drugi z grupy anodowej.

Napięcie U_d jest generowane przez zewnętrzny regulator napięcia dołączony do komutatora elektronicznego. Dzięki takiemu rozwiązaniu eliminuje się metodę PWM, co pozwala znacznie zmniejszyć częstotliwość przełączania zaworów komutatora elektronicznego.

Schemat zastępczy z rysunku 1 można zastąpić uproszczonym schematem zastępczym (rysunek 2).



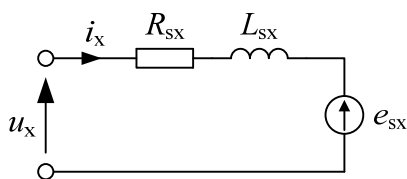
Rys.2. Uproszczony schemat zastępczy silnika PM BLDC

W uproszczonym schemacie zastępczym zakłada się, że tranzystory są idealne. Ponadto poszczególne symbole określone są równaniami (4) – (6):

$$\begin{aligned} (4) \quad R_d &= R_{sx} + R_{sy} \\ (5) \quad L_d &= L_{sx} + L_{sy} \\ (6) \quad E_d &= E_{sx} - E_{sy} \end{aligned}$$

Ze względu na przyjęte założenia, uproszczony schemat zastępczy pomija wiele zjawisk zachodzących w silniku, między innymi zjawisko komutacji, podczas którego, jak wiadomo przewodzą wszystkie trzy fazy silnika. Dlatego do analizy zjawiska komutacji wygodniej będzie posłużyć się fazowym schematem zastępczym silnika PM BLDC (rysunek 3).

Fazowy schemat zastępczy pozwala na analizę pracy silnika w dowolnej chwili czasu, przy założeniu, że dostępny jest punkt neutralny silnika oraz że znane są przebiegi napięcia fazowego oraz fazowej siły elektromotorycznej dla każdej chwili czasu.



Rys.3. Fazowy schemat zastępczy silnika PM BLDC

Poszczególne symbole z rysunku 3 oznaczają:

u_x – przebieg napięcia fazowego dowolnej fazy silnika,
 e_{sx} – przebieg siły elektromotorycznej dowolnej fazy silnika,
 i_x – prąd dowolnej fazy silnika.

3. Wyznaczenie czasu komutacji

Na podstawie fazowego schematu zastępczego można wyznaczyć równanie (7).

$$(7) \quad \frac{di_x}{dt} = \frac{u_x - R_{sx}i_x - e_{sx}}{L_{sx}}$$

W celu wyznaczenia czasu komutacji należy wyznaczyć równanie odwrotne z równania (7). Po przekształceniach otrzymuje się równanie różniczkowe nieliniowe parametryczne (8).

$$(8) \quad \frac{dt}{di_x} = \frac{L_{sx}}{u_x - R_{sx}i_x - e_{sx}}$$

Ponieważ równanie (8) opisuje dowolną chwilę pracy silnika, z tego względu aby wyznaczyć czas komutacji w obliczeniach należy wziąć pod uwagę wartości napięcia fazowego, prądu fazowego i siły elektromotorycznej występujące w czasie komutacji. Z tego względu równanie (8) można zapisać w postaci (9).

$$(9) \quad \frac{dt_Q}{di_Q} = \frac{L_{sx}}{u_Q - R_{sx}i_Q - e_Q}$$

gdzie: t_Q – czas komutacji, i_Q – prąd w czasie komutacji, u_Q – napięcie fazowe w czasie komutacji, e_Q – siła elektromotoryczna w czasie komutacji.

W wyniku licznych pomiarów przeprowadzonych przez autora artykułu okazało się, że założenie stałej wartości siły elektromotorycznej ma niewielki wpływ na dokładność wyznaczenia czasu komutacji, dlatego w obliczeniach przyjęto stałą wartość siły elektromotorycznej z początku procesu komutacji (10). Podobne założenie zostało również przyjęte w publikacji [3].

$$(10) \quad e_Q = E_Q = E_{\max} \sin\left(\frac{\pi}{6}\right) = \frac{1}{2} E_{\max}$$

gdzie: E_{\max} – wartość maksymalna siły elektromotorycznej.

Napięcie fazowe podczas procesu komutacji jest stałe i wynosi (11).

$$(11) \quad u_Q = U_Q = -\frac{1}{3}(U_d + U_{\text{diody}})$$

gdzie: U_{diody} – spadek napięcia na diodzie komutatora elektronicznego.

Dzięki przyjęciu stałej wartości siły elektromotorycznej (niezależnej od czasu komutacji) możliwe jest rozwiązanie równania różniczkowego (9). Podstawiając stałe współczynniki E_Q i U_Q do równania różniczkowego (9), otrzymuje się równanie (12).

$$(12) \quad \frac{dt_Q}{di_Q} = \frac{L_{sx}}{U_Q - R_{sx}i_Q - E_Q}$$

przekształcając równanie różniczkowe (12) otrzymuje się równanie (13).

$$(13) \quad dt_Q = \frac{L_{sx}}{U_Q - R_{sx}i_Q - E_Q} di_Q$$

Ponieważ średni prąd fazowy w czasie przewodzenia jest równy średniemu prądowi źródła I_{dav} , dlatego można przyjąć, że prąd w czasie komutacji zmienia się od wartości I_{dav} do 0. W związku z tym rozwiązując równanie (13), należy przyjąć granice całkowania od I_{dav} do 0 (14).

$$(14) \quad dt_Q = \int_{I_{\text{dav}}}^0 \frac{L_{sx}}{U_Q - R_{sx}i_Q - E_Q} di_Q$$

Po rozwiązaniu równania (14), otrzymuje się równanie (15).

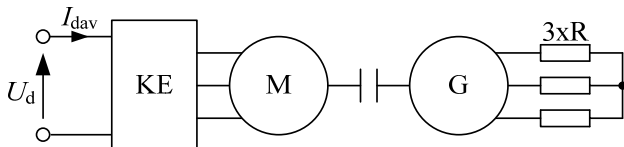
$$(15) \quad t_Q = \frac{L_{sx}}{R_{sx}} \ln\left(1 - \frac{R_{sx}I_{\text{dav}}}{U_Q - E_Q}\right)$$

Po podstawieniu współczynników U_Q i E_Q otrzymuje się równanie na czas komutacji w silniku PM BLDC (16).

$$(16) \quad t_Q = \frac{L_{sx}}{R_{sx}} \ln \left(1 - \frac{R_{sx} I_{dav}}{\frac{1}{3}(U_d - U_{diody}) - \frac{1}{2}E_{max}} \right)$$

4. Badania laboratoryjne

Poprawność wyników zweryfikowano laboratoryjnie układzie napędowym z rysunku 4.



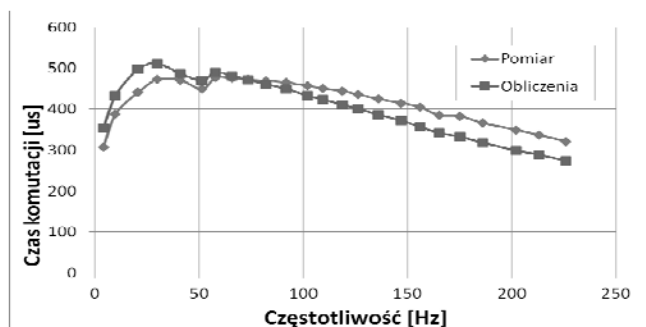
Rys.4. Układ napędowy

gdzie: KE – komutator elektroniczny, M – silnik (Dunkermotoren BG75x50), G – prądnicza (Dunkermotoren BG75x50).

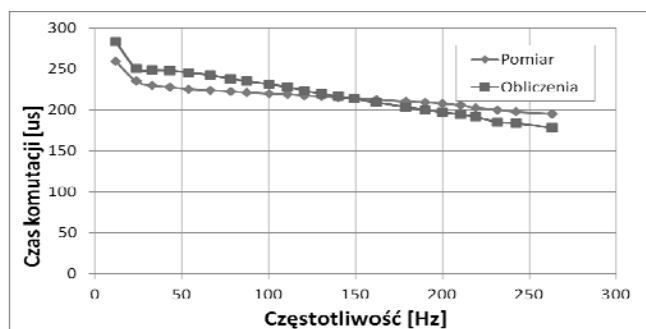
W układzie z rysunku 4 zadawano napięcie U_d w przedziale od 0 do 24 V dla czterech obciążeń:

- $R=0,1 \Omega$,
- $R=0,47 \Omega$,
- $R=2,2 \Omega$,
- $R \rightarrow \infty$ (stan jałowy).

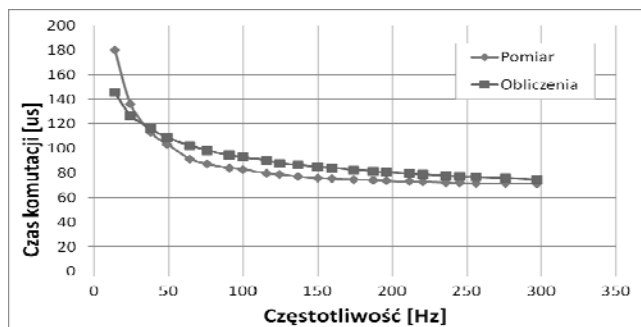
Pomiar czasu komutacji wykonano przy pomocy oscyloskopu. W wyniku pomiarów i obliczeń teoretycznych otrzymano następujące charakterystyki (rysunki 5-8).



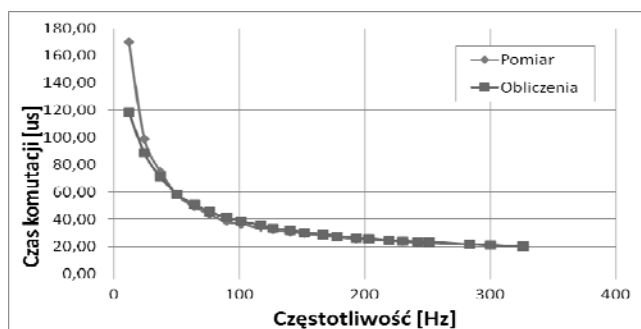
Rys.5. Charakterystyki czasu komutacji dla obciążenia $R=0,1 \Omega$



Rys.6. Charakterystyki czasu komutacji dla obciążenia $R=0,47 \Omega$



Rys.7. Charakterystyki czasu komutacji dla obciążenia $R=2,2 \Omega$



Rys.8. Charakterystyki czasu komutacji dla stanu jałowego

5. Podsumowanie

Uzyskano dużą zgodność pomiędzy pomiarami laboratoryjnymi, a obliczeniami teoretycznymi, co pozwala stwierdzić, że zaproponowana metoda wyznaczania czasu komutacji jest słuszną.

Wszystkie badania wykonano w ramach grantu nr UDA-POIG.01.03.01-00-058/08-00 zatytułowanego "Innowacyjne materiały do zastosowań w energooszczędnych i proekologicznych urządzeniach elektrycznych", zadanie nr 5 pt. "Badania aplikacyjne", podzadanie nr 5.3 pt. "Opracowanie konstrukcji silników wysokoobrotowych wzbudzanych magnetoelektrycznie".

LITERATURA

- [1] Makiela D., Tomaszczyk T., Bezczytnikowe sterowanie silnika wysokoobrotowego PM BLDC przy pomocy metody bazującej na napięciach międzyfazowych, Przegląd Elektrotechniczny, (2014), w druku
- [2] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J., Wysokoobrotowy silnik PM BLDC, Przegląd Elektrotechniczny, 86 (2010), nr 2, 160-163.
- [3] Carlson R., Lajoie-Mazenc M., Fagundes J., Analysis of Torque Ripple Due to Phase Commutation in Brushless dc Machines, IEEE Transaction on Industry Applications, (1992).
- [4] Krykowski K., Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice, (2011)

Autor:

mgr inż. Dawid Makiela, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki, ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice
E-mail: Dawid.Makiela@polsl.pl.