

Rozszerzona metoda wyznaczania czasu komutacji w silnikach PM BLDC

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę wyznaczania czasu komutacji silników PM BLDC z uwzględnieniem przede wszystkim zmiennej wartości fazowej siły elektromotorycznej oraz dodatkowo niezerowej rezystancji uzwojeń, niezerowej wartości spadku napięcia na diodach komutatora elektronicznego oraz przy założeniu wykładniczego przebiegu prądu fazowego podczas komutacji.

Abstract. In the paper a method for determining the commutation time of PM BLDC motors was presented. The proposed method takes into account first and foremost variable phase electromotive force and, additionally, a non-zero winding resistance, a non-zero diode voltage drop and an exponential waveform of phase current during commutation. (**Extended method of determining commutation time in PM BLDC motors**).

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

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

Wstęp

W literaturze znane są różne sposoby wyznaczania czasu komutacji. Różnice wynikają z przyjętej definicji czasu komutacji oraz przyjętych uproszczeń. Na przykład w publikacji [1] autorzy definiują czas komutacji jako czas ustalania się prądów we wszystkich fazach silnika. Autorzy przytoczonej publikacji proponują wyznaczenie tak zdefiniowanego czasu komutacji za pomocą zależności (1):

$$(1) \quad t_Q = \frac{3L_s I_{\text{dav}}}{2(U_d - E_s)}$$

gdzie: t_Q – czas komutacji, L_s – wartość indukcyjności fazowej, I_{dav} – wartość średnia prądu zasilającego, U_d – napięcie zasilania na zaciskach komutatora, E_s – wartość siły elektromotorycznej w obszarze czynnym.

Z kolei w publikacji [2] zaproponowano wyznaczenie czasu komutacji za pomocą zależności (2). Warto w tym miejscu dodać, że w niniejszej publikacji czas komutacji zdefiniowano jako czas przejmowania prądu przez kolejny zawór komutatora elektronicznego.

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

Ponieważ powyższa metoda zakłada szereg uproszeń, dlatego w publikacji [3] zaproponowano metodę wyznaczania czasu komutacji z uwzględnieniem: rezystancji uzwojeń, spadków napięć na diodach komutatora elektronicznego oraz wykładniczego przebiegu prądu fazowego podczas komutacji. W wyniku wyprowadzeń otrzymano następującą zależność na czas komutacji.

$$(3) \quad t_Q = \frac{L_s}{R_s} \ln \left(1 - \frac{R_s I_{\text{dav}}}{U_Q - E_s} \right)$$

gdzie: R_s – rezystancja fazowa, U_Q – napięcie fazowe w czasie komutacji.

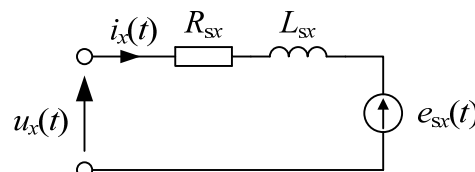
Wyprowadzając zależność (3) przyjęto jednak pewne uproszczenia, a mianowicie wzorując się na publikacji [1] założono stałą wartość siły elektromotorycznej E_s . Z tego też powodu zdecydowano się wyprowadzić zależność na czas komutacji z uwzględnieniem przede wszystkim zmiennej wartości fazowej siły elektromotorycznej oraz dodatkowo niezerowej rezystancji uzwojeń, niezerowej wartości spadku napięcia na diodach komutatora

elektronicznego oraz przy założeniu wykładniczego przebiegu prądu fazowego podczas komutacji.

Prace nad wyznaczeniem czasu komutacji podjęto w celu przebadania możliwości implementacji metody sterowania bezczujnikowego bazującej na napięciu międzyfazowym [4] do sterowania wysokoobrotowym silnikiem PM BLDC [5], [6].

Wyprowadzenie zależności na czas komutacji

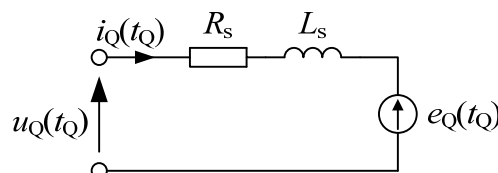
Punktem wyjścia przy wyprowadzaniu zależności na czas komutacji jest fazowy schemat zastępczy silnika (rys. 1).



Rys. 1. Fazowy schemat zastępczy

gdzie: $u_x(t)$ – wartość napięcia fazowego dla fazy x w chwili czasu t , $i_x(t)$ – wartość prądu fazowego w fazie x w chwili czasu t , R_{sx} – rezystancja fazowa fazy x , L_{sx} – indukcyjność fazowa fazy x , $e_{sx}(t)$ – wartość siły elektromotorycznej dla fazy x w chwili czasu t .

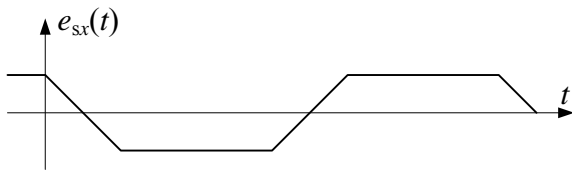
Fazowy schemat zastępczy pozwala na opisanie dowolnej chwili pracy silnika, również w trakcie procesu komutacji. Z tego też względu do opisu wielkości charakteryzujących proces komutacji wprowadzono specjalne oznaczenie indeksem Q (rys. 2).



Rys. 2. Fazowy schemat zastępczy odnoszący się do zjawiska komutacji

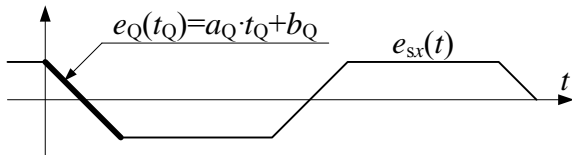
gdzie: $u_Q(t_Q)$ – wartość napięcia fazowego w trakcie procesu komutacji w chwili czasu t_Q , $i_Q(t_Q)$ – wartość prądu fazowego w trakcie procesu komutacji w chwili czasu t_Q , $e_Q(t_Q)$ – wartość siły elektromotorycznej w trakcie procesu komutacji w chwili czasu t_Q .

Przebieg fazowej siły elektromotorycznej silnika PM BLDC ma kształt jak na rysunku 3.



Rys. 3: Przebieg fazowej siły elektromotorycznej silnika PM BLDC

Liniową aproksymację przebiegu fazowej siły elektromotorycznej w trakcie trwania procesu komutacji zilustrowano na rysunku 4.



Rys. 4: Liniowa aproksymacja przebiegu siły elektromotorycznej w trakcie procesu komutacji

Współczynniki a_Q oraz b_Q liniowej funkcji aproksymującej wynoszą odpowiednio (4) oraz (5).

$$(4) \quad a_Q = -12E_s \cdot f$$

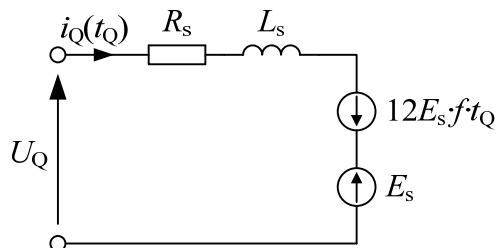
$$(5) \quad b_Q = E_s$$

gdzie: f – częstotliwość przebiegu fazowej siły elektromotorycznej.

Na podstawie współczynników (4) oraz (5) można określić liniową funkcję aproksymującą siłę elektromotoryczną w trakcie procesu komutacji (6).

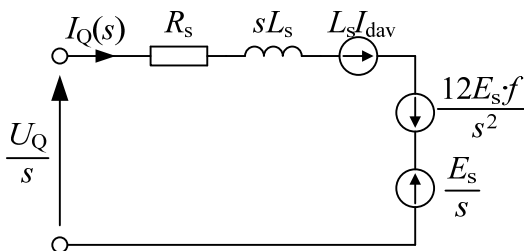
$$(6) \quad e_Q(t_Q) = -12E_s \cdot f \cdot t_Q + E_s$$

Na podstawie zależności (6), fazowy schemat zastępczy obowiązujący w trakcie procesu komutacji będzie miał postać jak na rysunku 5.



Rys. 5: Fazowy schemat zastępczy obowiązujący w trakcie procesu komutacji

Na rysunku 6 przedstawiono natomiast fazowy schemat zastępczy w postaci operatorowej po wykonaniu przekształcenia Laplace'a.



Rys. 6: Fazowy schemat zastępczy obowiązujący w trakcie procesu komutacji w postaci operatorowej

Na podstawie schematu z rysunku 6 można wyznaczyć prąd komutacji w postaci operatorowej (7).

$$(7) \quad I_Q(s) = \frac{U_Q}{s(R_s + sL_s)} + \frac{L_s I_{dav}}{(R_s + sL_s)} + \frac{12E_s \cdot f}{s^2(R_s + sL_s)} - \frac{E_s}{s(R_s + sL_s)}$$

Po wykonaniu odwrotnego przekształcenia Laplace'a otrzymuje się równanie na przebieg prądu fazowego w czasie komutacji (8).

$$(8) \quad i_Q(t_Q) = \left(\left(\frac{E_s}{R_s} - \frac{U_Q}{R_s} + I_{dav} + \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s f}{R_s} \right) e^{-\frac{R_s}{L_s} t_Q} - \left(\frac{E_s}{R_s} + \frac{U_Q}{R_s} - \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s f}{R_s} + \frac{12E_s f}{R_s} t_Q \right) \right) 1(t_Q)$$

W celu uproszczenia przekształceń oraz większej czytelności, zapis równania (8) można uprościć wprowadzając czynniki pomocnicze A_Q , B_Q , C_Q (9).

$$(9) \quad i_Q(t_Q) = A_Q \cdot e^{-\frac{R_s}{L_s} t_Q} + B_Q + C_Q \cdot t_Q$$

Poszczególne czynniki pomocnicze A_Q , B_Q , C_Q z równania (9) odpowiednio wynoszą (10), (11) i (12).

$$(10) \quad A_Q = \frac{E_s}{R_s} - \frac{U_Q}{R_s} + I_{dav} + \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s \cdot f}{R_s}$$

$$(11) \quad B_Q = -\frac{E_s}{R_s} + \frac{U_Q}{R_s} - \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s \cdot f}{R_s}$$

$$(12) \quad C_Q = \frac{12E_s \cdot f}{R_s}$$

Ponieważ z równania (9) nie da się analitycznie wyznaczyć czasu trwania komutacji, stąd konieczność użycia metod przybliżonych i rozwinięcia funkcji eksponentialnej z równania (9) w szereg Maclaurina (13).

$$(13) \quad e^x = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{x^k}{k!}$$

Po podstawieniu zależności (14) do zależności (13), rozwinięcie w szereg Maclaurina przyjmie postać (15).

$$(14) \quad x = -\frac{R_s}{L_s} t_Q$$

$$(15) \quad f_{\exp(\infty)}(t_Q) = e^{-\frac{R_s}{L_s} t_Q} = \sum_{k=0}^{\infty} \frac{\left(-\frac{R_s}{L_s} t_Q \right)^k}{k!}$$

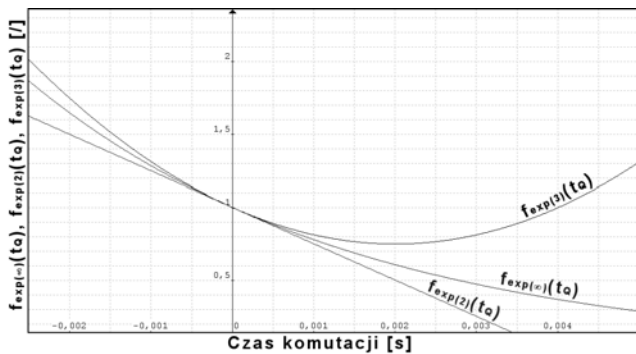
Do dalszych rozważań wybrano dwa rozwinięcia: dla dwóch pierwszych wyrazów szeregu (16) oraz dla trzech pierwszych wyrazów szeregu (17). Taki wybór podyktowany jest przede wszystkim możliwością analitycznego wyznaczenia czasu t_Q .

$$(16) \quad f_{\exp(2)}(t_Q) = 1 - \frac{R_s}{L_s} t_Q$$

$$(17) \quad f_{\exp(3)}(t_Q) = 1 - \frac{R_s}{L_s} t_Q + \left(\frac{R_s}{L_s} \right)^2 t_Q^2$$

Na rysunku 7 przedstawiono porównanie powyższych aproksymacji: za pomocą dwóch oraz trzech pierwszych

wyrazów szeregu Maclaurina dla przykładowych parametrów $R_s=31,2 \text{ m}\Omega$ oraz $L_s=125 \text{ }\mu\text{H}$.



Rys. 7: Porównanie aproksymacji funkcji eksponentialnej

Z rysunku 7 widać, że lepszy rezultat aproksymacji uzyskuje się dla rozwinięcia składającego się z dwóch wyrazów szeregu. Ponadto należy wspomnieć, że dla czasów komutacji mniejszych niż $500 \text{ }\mu\text{s}$, dla rozwinięcia składającego się tylko z dwóch wyrazów szeregu błąd aproksymacji jest mniejszy niż $0,84\%$. W związku z powyższym do dalszych rozważań użyto przybliżenia danego zależnością (18).

$$(18) \quad \text{dla } t_Q \rightarrow 0 \quad e^{-\frac{R_s t_Q}{L_s}} \approx 1 - \frac{R_s}{L_s} t_Q$$

Po uwzględnieniu zależności (18) w równaniu określającym prąd komutacji (9), otrzymuje się zależność (19).

$$(19) \quad i_Q(t_Q) = A_Q \left(1 - \frac{R_s}{L_s} t_Q \right) + B_Q + C_Q \cdot t_Q$$

Po wykonaniu prostych przekształceń, z równania (19) można wyznaczyć funkcję odwrotną $t_Q(i_Q)$ (20).

$$(20) \quad t_Q(i_Q) = \frac{A_Q + B_Q - i_Q}{A_Q \frac{R_s}{L_s} - C_Q}$$

Jeżeli przyjąć definicję komutacji, że komutacja kończy się, gdy prąd w fazie ustępującej zaniknie do zera, wówczas w równaniu (20) można zastosować podstawienie $i_Q=0$. Wówczas otrzymuje się równanie (21).

$$(21) \quad t_Q = \frac{A_Q + B_Q}{A_Q \frac{R_s}{L_s} - C_Q}$$

Po podstawieniu czynników pomocniczych (10), (11), (12) otrzymuje się zależność (22).

$$(22) \quad t_Q = \frac{\frac{E_s}{R_s} - \frac{U_Q}{R_s} + I_{\text{dav}} + \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s \cdot f}{R_s} - \frac{E_s}{R_s} + \frac{U_Q}{R_s} - \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s \cdot f}{R_s}}{\left(\frac{E_s}{R_s} - \frac{U_Q}{R_s} + I_{\text{dav}} + \frac{L_s}{R_s} \frac{12E_s \cdot f}{R_s} \right) \frac{R_s}{L_s} - \frac{12E_s \cdot f}{R_s}}$$

kóra po uproszczeniu przybierze postać (23).

$$(23) \quad t_Q = \frac{I_{\text{dav}}}{\frac{E_s}{L_s} - \frac{U_Q}{L_s} + \frac{R_s}{L_s} I_{\text{dav}}}$$

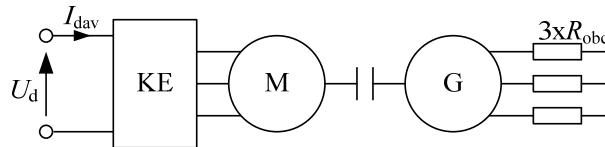
Ostatecznie po przeniesieniu współczynnika L_s do licznika, otrzymuje się pełną zależność na czas komutacji

uwzględniając między innymi zmienną wartość siły elektromotorycznej podczas komutacji (24).

$$(24) \quad t_Q = \frac{L_s I_{\text{dav}}}{E_s - U_Q + R_s I_{\text{dav}}}$$

Badania laboratoryjne

Rzeczywiste charakterystyki czasu komutacji zmierzono w układzie napędowym przedstawionym na rysunku 8.



Rys. 8: Porównanie aproksymacji funkcji eksponentialnej

gdzie: KE – komutator elektroniczny, M – silnik, G – prądnica, R_{obc} – rezystancyjne obciążenie prądnicy.

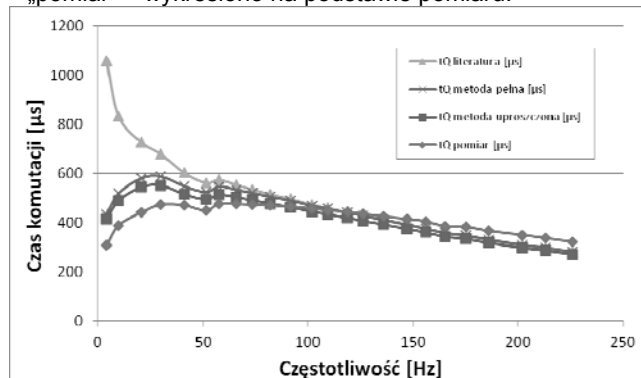
W układzie napędowym z rysunku 8 zadawano napięcie zasilania U_d w zakresie od 1 do 24 V dla:

- $R_{\text{obc}}=0,1 \text{ }\Omega$,
- $R_{\text{obc}} \rightarrow \infty$ (stan jałowy).

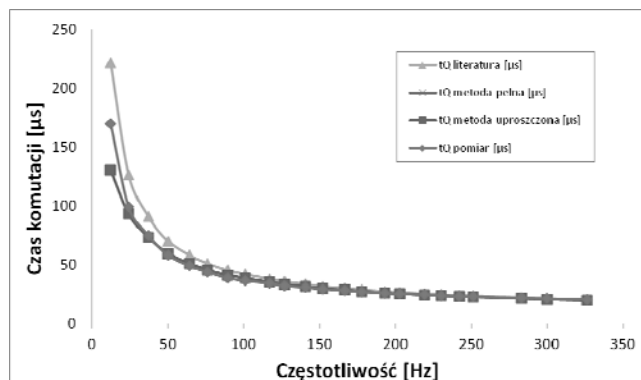
Weryfikację wyprowadzonej zależności przeprowadzono dla dwóch typów silników: Dunkermotoren BG75x50 oraz Elkar RTMct85-1.

Pomiar czasu komutacji wykonano przy pomocy oscyloskopu. W wyniku pomiarów i obliczeń teoretycznych otrzymano następujące charakterystyki (rys. 9-12).

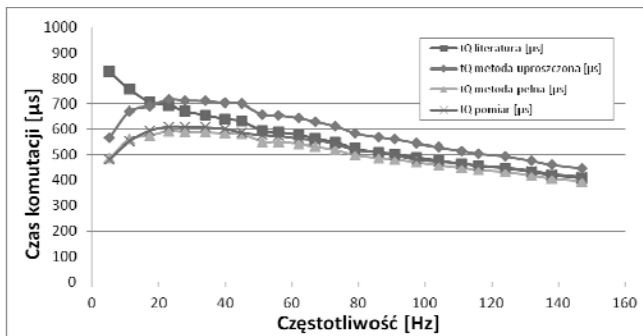
- „literatura” – wykreślono na podstawie równania (2) [2],
- „metoda pełna” – wykreślono na podstawie równania (24),
- „metoda uproszczona” – wykreślono na podstawie równania (3) [3],
- „pomiar” – wykreślono na podstawie pomiaru.



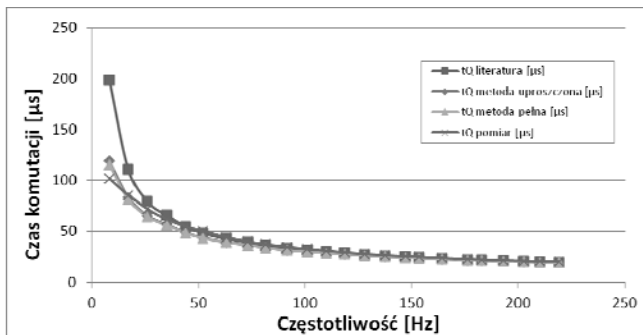
Rys. 9: Charakterystyki czasu komutacji dla $R_{\text{obc}}=0,1 \text{ }\Omega$, dla silnika Dunkermotorem BG75x50



Rys. 10: Charakterystyki czasu komutacji dla stanu jałowego, $R_{\text{obc}} \rightarrow \infty$, dla silnika Dunkermotorem BG75x50



Rys. 11: Charakterystyki czasu komutacji dla $R_{obc}=0,1 \Omega$, dla silnika Elkar RTMct85-1



Rys. 12: Charakterystyki czasu komutacji dla stanu jałowego, $R_{obc} \rightarrow \infty$, dla silnika Elkar RTMct85-1

Podsumowanie

W pracy wyprowadzono i przebadano analityczną zależność na czas komutacji silnika PM BLDC z uwzględnieniem przede wszystkim zmiennej wartości fazowej siły elektromotorycznej oraz dodatkowo niezerowej rezystancji uzwojeń, spadków napięć na diodach

komutatora elektronicznego oraz wykładniczej zmiany prądu fazowego podczas komutacji.

Charakterystyki wyznaczone z zależności analitycznych wykazują bardzo duże podobieństwo do charakterystyk rzeczywistych. W związku z tym można uznać, że wyznaczona zależność analityczna na czas komutacji jest prawidłowa.

Badania wykonano w ramach projektu BMN Sterowanie w energoelektronice i napędzie elektrycznym.

LITERATURA

- [1] 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), 632-638
- [2] Krykowski Krzysztof: Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym, *Wydawnictwo Politechniki Śląskiej*, Gliwice, (2011), 61
- [3] Makiela D. Wyznaczanie czasu komutacji w silnikach PM BLDC. *Przegląd elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 2, 193-195
- [4] Makiela D., Tomaszczyk T.: Bezcujnikowe sterowanie silnika wysokoobrotowego PM BLDC przy pomocy metody bazującej na napięciach międzyfazowych, *Przegląd elektrotechniczny*, 90 (2014), nr 4, 92-96
- [5] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J.: Budowa i realizacja wysokoobrotowego silnika wzbudzanego magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 42-45
- [6] Gałuszkiewicz Z., Krykowski K., Miksiewicz R., Hetmańczyk J.: Wysokoobrotowy silnik PM BLDC, *Przegląd elektrotechniczny*, 86 (2010), nr 2, 160-163

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