

*silnik PM BLDC, komutator elektroniczny,
uszkodzenia czujników położenia wirnika*

Marcin SKÓRA*, Czesław T. KOWALSKI

WPLYW USZKODZEŃ CZUJNIKÓW POŁOŻENIA WIRNIKA NA PRACĘ NAPĘDU Z SILNIKIEM PM BLDC

Układ sterowania silnika PM BLDC do poprawnej komutacji potrzebuje informacji o położeniu wirnika. Najtańszym i najprostszym sposobem jej pozyskania jest zastosowanie czujników położenia wirnika, hallotronowych lub optycznych. Przy korzystaniu z dodatkowych układów scalonych należy mieć na uwadze fakt, iż są to elementy zmniejszające niezawodność całego systemu. W pracy przedstawiono wpływ uszkodzenia czujnika położenia wirnika na przebiegi prądów fazowych, prędkości obrotowej i momentu elektromagnetycznego. Do oceny diagnostycznej wpływu uszkodzenia czujnika prędkości zastosowano hodografy wektora prądów fazowych na płaszczyźnie α - β oraz hodografu wektora sygnałów położenia wirnika. Wskazano na potencjalne problemy z rozruchem napędu z uszkodzonym układem pomiaru położenia wirnika.

1. WSTĘP

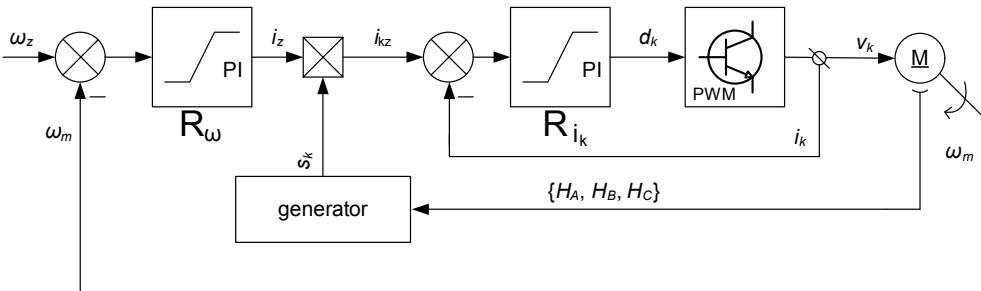
Jedną z alternatyw dla napędów z klasycznymi silnikami prądu stałego są silniki bezszczotkowe prądu stałego z magnesami trwałymi (PM BLDC, ang. *Permanent Magnet Brushless Direct Current Motor*). Przemawia za tym ich mniejsza bezwładność, wyższy stosunek uzyskiwanego momentu w stosunku do masy, lepsze odprowadzanie ciepła z nieruchomego stojana oraz dłuższa żywotność, spowodowana brakiem klasycznego komutatora [1], [3]. Ostatnia cecha sprawia, że silniki PM BLDC należą do maszyn komutowanych elektronicznie. Układ sterujący ma zadanie wykryć pozycję wirnika i zależnie od niej zasilac odpowiednie pasma uzwojenia stojana.

Wykrywanie pozycji wirnika nieruchomego i w ruchu można rozwiązać na kilka sposobów: zastosować metody bezczujnikowe, oparte o estymację położenia na podstawie mierzonych sygnałów elektrycznych, zamontować enkoder lub czujniki poło-

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław, e-mail: marcin.skora@pwr.wroc.pl, czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl

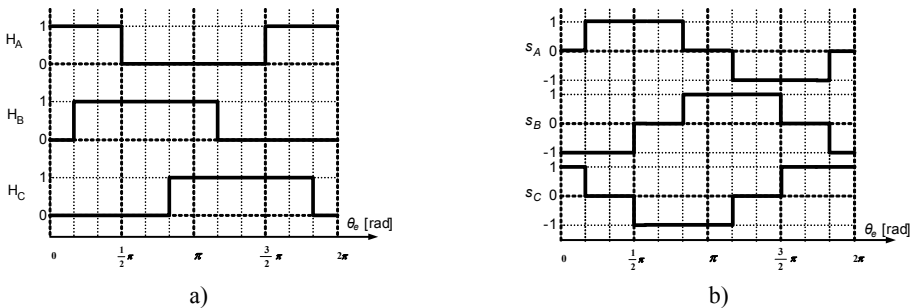
zenia wirnika (optyczne lub hallotronowe) [1]. Ostatnie rozwiązanie jest najprostsze, ale uszkodzenia czujników w trakcie pracy silnika mają wpływ na prawidłową pracę napędu.

Analizę wpływu uszkodzenia czujnika położenia wirnika przeprowadzono dla kaskadowego układu napędowego z silnikiem PM BLDC, z nadrzędnym regulatorem prędkości i podrzędnymi regulatorami prądów fazowych, w strukturze jak na rys. 1. Silnik zasilany jest przez przekształtnik napięciowy z wykorzystaniem techniki PWM. Regulatory prądów fazowych wypracowują odpowiednie współczynniki wypełnienia d_k ($k \in \{A, B, C\}$) na podstawie porównania obliczonego prądu fazowego i_k i prądu zadanego (jako iloczynu amplitudy i_z , wygenerowanej przez regulator prędkości i znaku s_k związanego z położeniem wirnika). Znak prądu zadanego (rys. 2b) wyznaczany jest według (1) na podstawie informacji z czujników H_A, H_B, H_C , kodujących położenie wirnika (rys. 2a) [1], [3].



Rys. 1. Struktura sterowania układu napędowego z silnikiem PM BLDC

$$\begin{aligned}
 s_A &= \overline{H_C} \cap H_B - H_C \cap \overline{H_B} \\
 s_B &= \overline{H_A} \cap H_C - H_A \cap \overline{H_C} \\
 s_C &= \overline{H_B} \cap H_A - H_B \cap \overline{H_A}
 \end{aligned}
 \tag{1}$$



Rys. 2. Sygnały z czujników kodujących położenie wirnika a) oraz znak prądu zadanego w zależności od położenia wirnika b)

2. RODZAJE I PRZYCZYNY USZKODZEŃ CZUJNIKÓW POŁOŻENIA WIRNIKA

Podczas normalnej pracy napędu z silnikiem PM BLDC może wystąpić sytuacja awaryjna polegająca na uszkodzeniu przynajmniej jednego z czujników położenia wirnika, niezbędnych do procesu poprawnej komutacji. W jej wyniku, sygnał zwracany przez uszkodzone czujniki w szczególności może przyjąć stały poziom logiczny niski („0”) lub wysoki („1”), niezależnie od kąta położenia wirnika.

Przyczyny uszkodzeń mogą mieć różną naturę. Wśród elektrycznych można wyróżnić brak zasilania czujnika, brak podłączenia linii sygnałowej do komutatora elektronicznego, zwarcie linii sygnałowej do potencjału zasilania, przekroczenie dopuszczalnego prądu wyjściowego czy też np. uszkodzenia stopnia wyjściowego czujników z wyjściem typu otwarty kolektor. Za uszkodzenia czujników hallotronowych dodatkowo odpowiedzialne są zmiany we właściwościach magnetycznych magnesów, związanych z temperaturą, czy zmiany w kierunku indukowanego pola magnetycznego [4].

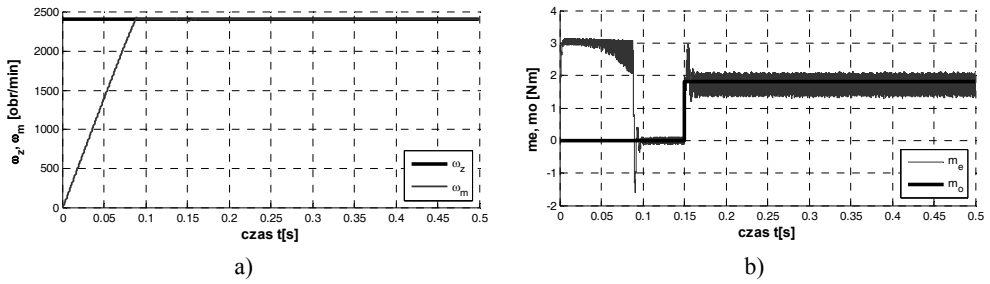
Innymi przyczynami nieprawidłowego działania komutatora elektronicznego są nierównomierne rozmieszczenie czujników położenia wirnika, czy też zła kolejność ich podłączenia do komutatora. Pierwsza z przyczyn powoduje zwiększenie ilości tętnień w wytwarzanym momencie elektromagnetycznym, natomiast druga z reguły uniemożliwia działanie napędu.

3. WYBRANE WYNIKI BADAŃ

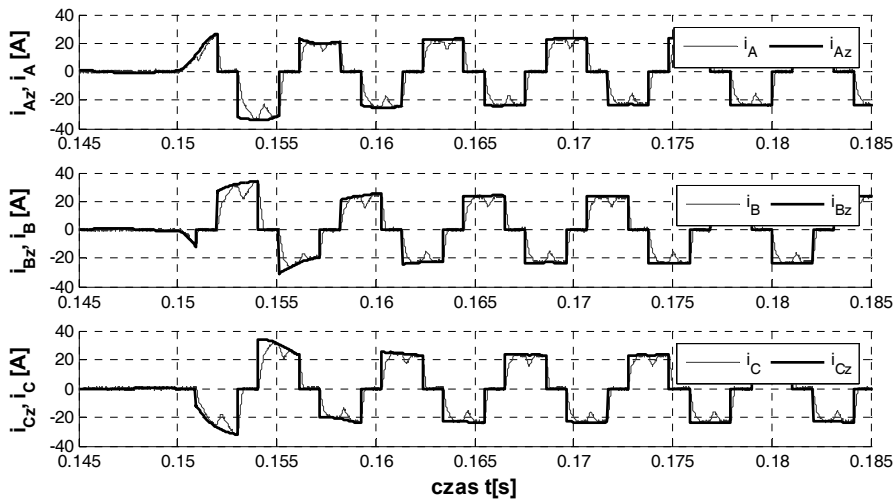
Badania symulacyjne przeprowadzone zostały w środowisku Matlab-Simulink, z wykorzystaniem modelu układu napędowego z silnikiem PM BLDC przedstawionego w [3], w strukturze przedstawionej na rysunku 1. Badania symulacyjne wykonano metodą całkowania *ode1* (metoda Eulera) z krokiem $5 \mu\text{s}$ dla trójfazowego silnika typu BN34-55AF-01 firmy MOOG o parametrach przedstawionych w załączniku 1. Przyjęto ograniczenie wartości prądów zadanych na poziomie $\pm 1,5I_N$ oraz bezwładność układu napędowego jako $J = 6J_s$.

Przedstawione wyniki badań uzyskano dla przypadku pracy silnika z nominalną prędkością oraz przy znamionowym momencie obciążenia, załączanym w czasie $t = 0,2 \text{ s}$. Uszkodzenie czujnika H_A położenia wirnika następowało w czasie $t_{\text{uszk}} = 0,3 \text{ s}$. Ponadto przeprowadzono symulację rozruchu silnika z uszkodzonym czujnikiem H_A . Symulację uszkodzeń przeprowadzono poprzez zadanie stałego poziomu logicznego (wysokiego lub niskiego).

Na rysunkach 3 i 4 przedstawione przebiegi uzyskane w sprawnym układzie. Wynika z nich, że przy braku awarii prądy fazowe mają kształt prostokątny, a w prędkości obrotowej nie występują oscylacje.



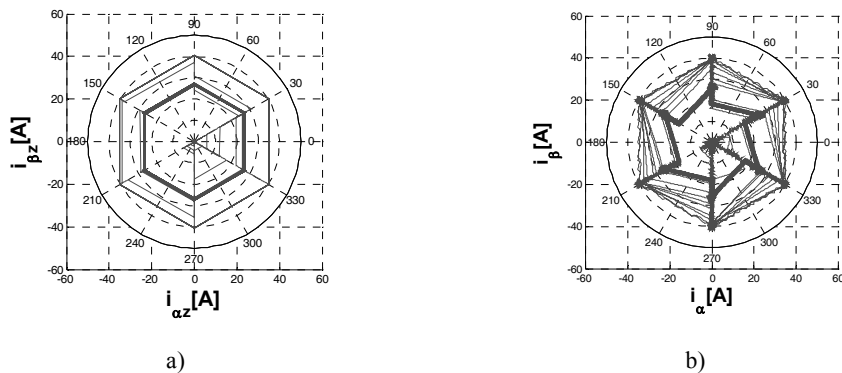
Rys. 3. Przebiegi prędkości zadanej i obliczonej a) oraz momentu elektromagnetycznego i obciążenia b) w sprawnym układzie napędowym



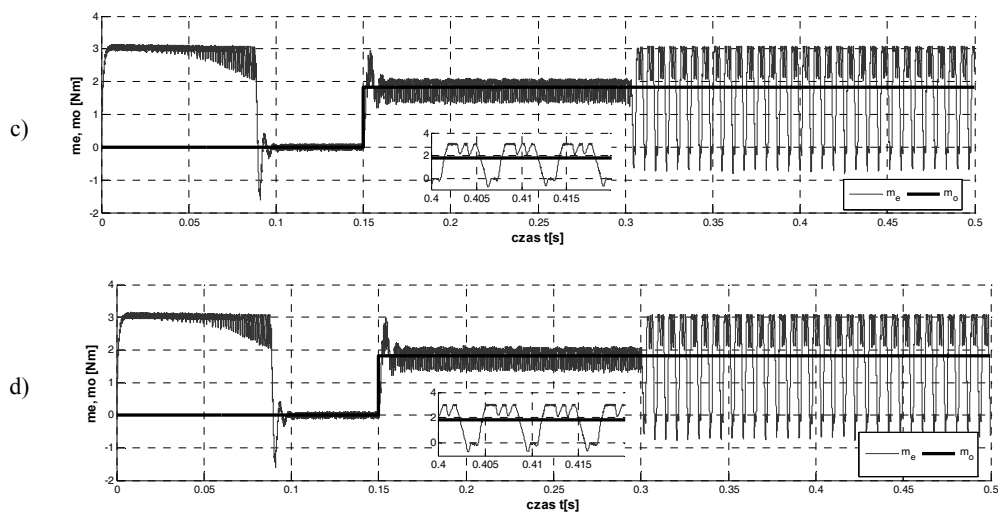
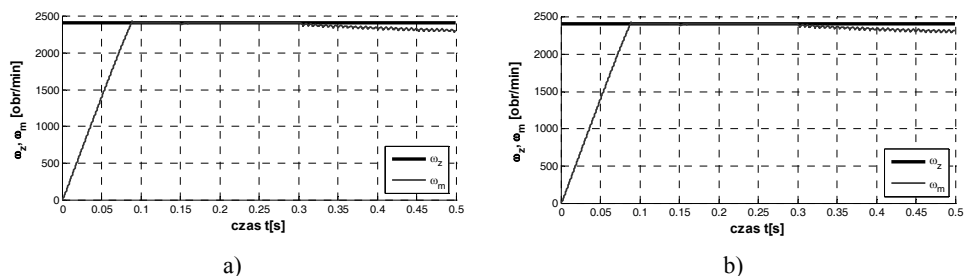
Rys. 4. Przebiegi fazowych prądów zadanych i obliczonych w sprawnym układzie, po załączeniu momentu obciążenia

W celu analizy porównawczej wyników otrzymane wektory prądów fazowych, obliczonych i zadanych, zostały przeliczone według (2) z trójfazowego układu ABC do dwufazowego układu współrzędnych prostokątnych α - β i przedstawione na płaszczyźnie zespolonej w postaci hodografów. Jak wynika z rysunku 5, w sprawnym układzie hodograf wektora zadanych prądów fazowych przyjmuje kształt symetryczny, sześciokątny, natomiast hodograf wektora prądów obliczonych – kształt zbliżony do symetrycznego, sześciokątnego, z odkształceniami wynikającymi z dynamiki narostu i spadkami wartości prądu w momencie zmiany komutujących faz.

$$\begin{aligned} i_{\alpha} &= \frac{2}{3} (i_A - \frac{1}{2} i_B - \frac{1}{2} i_C) \\ i_{\beta} &= \frac{2}{3} (\frac{\sqrt{3}}{2} i_B - \frac{\sqrt{3}}{2} i_C) \end{aligned} \quad (2)$$



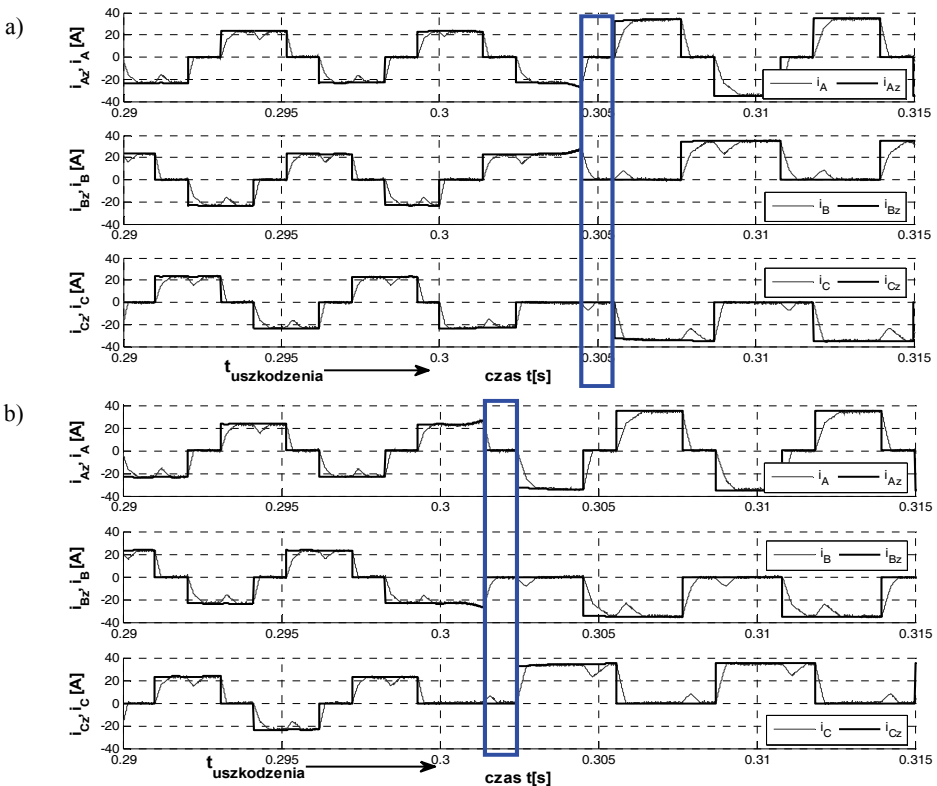
Rys. 5. Hodografy wektorów prądów stojana wyznaczone z prądów zadanych (a) i obliczonych (b), na podstawie całek symulacji – układ sprawny



Rys. 6. Porównanie prędkości zadanych i obliczonych oraz momentu elektromagnetycznego i obciążenia uzyskanych w układzie z uszkodzonym czujnikiem położenia wirnika.

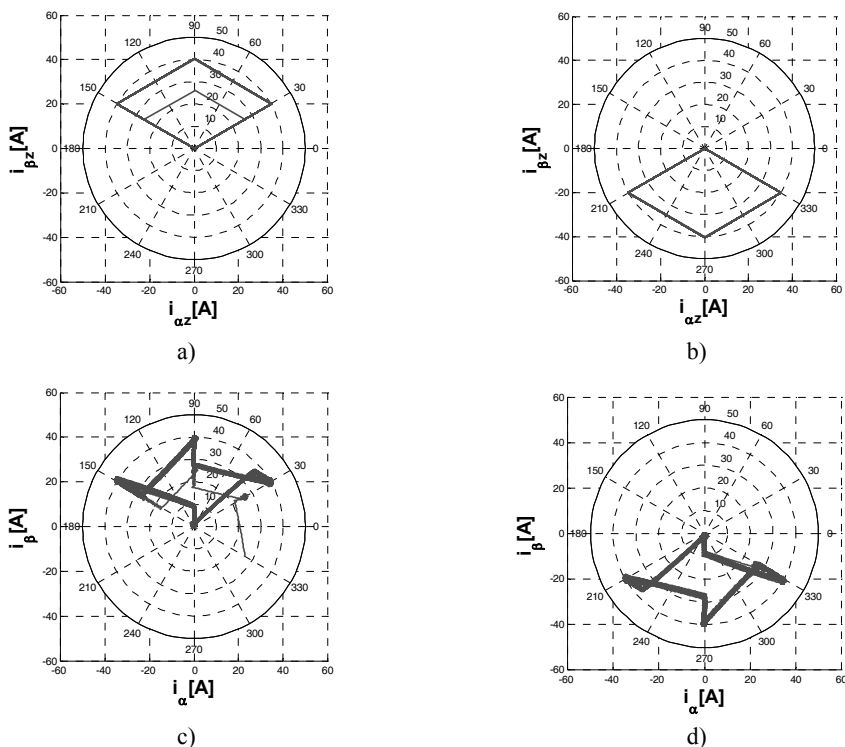
Po czasie $t_{uszk} = 0,3$ s następuje uszkodzenie czujnika H_A typu $H_A = 0$ (a, c) oraz typu $H_A = 1$ (b, d)

Na rysunku 6 przedstawiono wyniki symulacji otrzymane w układach z uszkodzeniem czujnika położenia wirnika H_A . Czujnik zwracał stale wartość logiczną niską („0”) – typ uszkodzenia nazwany $H_A = 0$ lub wartość logiczną wysoką („1”) – typ nazwany $H_A = 1$. Każde z tych uszkodzeń powoduje podobne efekty: układ sterowania nie jest w stanie utrzymać prędkości, w której pojawiają się oscylacje, natomiast w przebiegu momentu elektromagnetycznego zdarzają się chwilowe zaniki (rys. 6). Przyczynę takiego zachowania układu wyjaśnia rysunek 7 i zależność (1). Nieprawidłowe sygnały pochodzące z czujników położenia wirnika powodują wprowadzanie do komutatora elektronicznego błędnej informacji o położeniu wirnika, na podstawie której zasilane są poszczególne uzwojenia. Nie występują wszystkie dozwolone kombinacje wartości zwracanych przez czujniki położenia wirnika, dlatego też kształt zadanych prądów fazowych jest zniekształcony. Dodatkowo okresowo występuje niedozwolona kombinacja wartości czujników H_A, H_B, H_C (000 lub 111), powodująca chwilowe odłączenie zasilania (przykład w ramce na rysunku 7a i 7b), gdyż takiej kombinacji nie ma w zależności (1) na generację zadanych prądów fazowych.



Rys. 7. Porównanie fazowych prądów zadanych i obliczonych podczas wystąpienia uszkodzenia, dla typu $H_A = 0$ (a) oraz $H_A = 1$ (b)

Analiza hodografów w obu rodzajach uszkodzeń (rys. 8) doprowadza do następujących wniosków: w obu przypadkach następuje zanik pewnej części hodografu wektora prądów, obliczonych oraz zadanych, pozostaje część zawierająca się w wycinku koła o kącie 120° . Części te są względem siebie przeciwne, tzn. obrócone o 180° , tak jak przeciwne są rodzaje uszkodzeń.

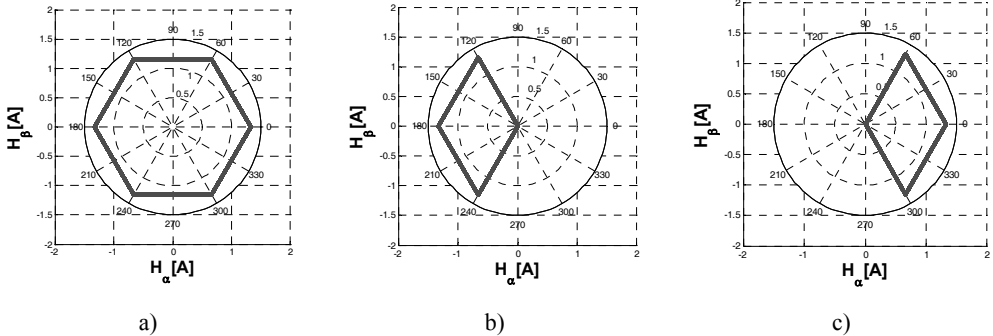


Rys. 8. Hodograf wektora prądów stojana wyznaczony z prądów zadanych (a, b) i obliczonych (c, d), na podstawie prądów fazowych po wystąpieniu uszkodzenia typu $H_A = 0$ (a, c) oraz $H_A = 1$ (b, d)

Przeprowadzono również analizę hodografów wektora sygnału położenia wirnika. W tym celu sygnały kodujące położenie H_A, H_B, H_C zostały poddane procesowi symetryzacji względem zera według (3), a następnie przeliczone według (4) do układu współrzędnych prostokątnych α - β [2]. Na podstawie otrzymanych wyników (rys. 9) stwierdzono, że w uszkodzonych układach następuje odkształcenie hodografu w porównaniu do hodografu uzyskanego w sprawnym układzie napędowym, mianowicie zanika jego pewna charakterystyczna dla danego uszkodzenia część.

$$\overline{H}_k = 2H_k - 1, k \in \{A, B, C\} \quad (3)$$

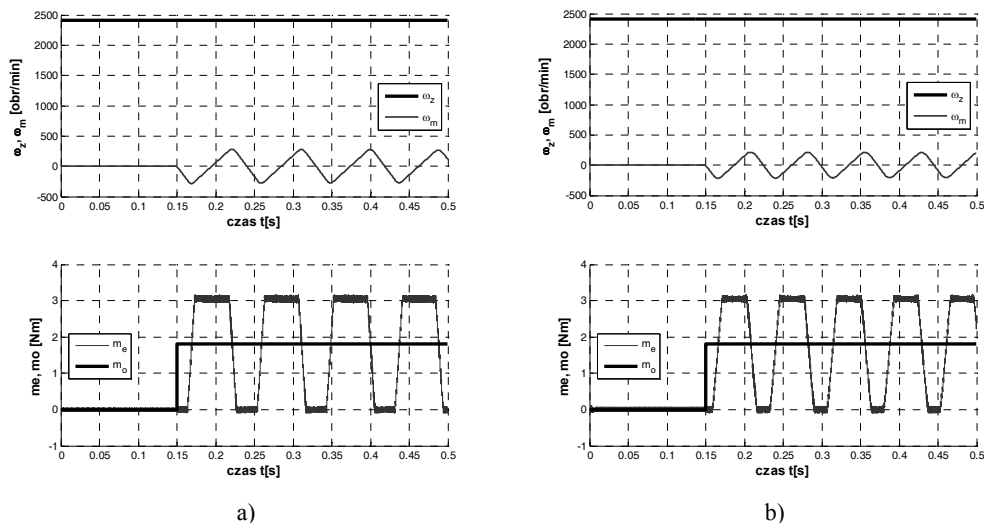
$$\begin{aligned}
 H_\alpha &= \frac{2}{3}(\overline{H}_A - \frac{1}{2}\overline{H}_B - \frac{1}{2}\overline{H}_C) \\
 H_\beta &= \frac{2}{3}(\frac{\sqrt{3}}{2}\overline{H}_B - \frac{\sqrt{3}}{2}\overline{H}_C)
 \end{aligned}
 \tag{4}$$



Rys. 9. Hodografy wektorów sygnałów położenia wirnika, w sprawnym układzie napędowym (a), z uszkodzeniem typu $H_A = 0$ (b) oraz z uszkodzeniem typu $H_A = 1$ (c)

Błędne działanie czujników położenia wirnika może powodować problemy nie tylko podczas działania napędu, lecz także przy próbie rozruchu silnika z uszkodzonym wcześniej czujnikiem. Jeśli wirnik zatrzyma się w takim położeniu, że czujniki będą wskazywać na niedozwoloną kombinację (000 lub 111), to układ sterowania nie będzie w stanie stwierdzić, w jakiej pozycji jest wirnik, a w konsekwencji nie zasili uzwojeń (sytuacja jak w ramce na rysunku 7b). Przykład nieudanej próby rozruchu silnika z wirnikiem zatrzymanym w takiej pozycji pokazano na rysunku 10. Zatrzymanie się wirnika w innej pozycji pozwoliłoby na rozruch takiego napędu. Dlatego też ze względów bezpieczeństwa, szczególnie pojazdy elektryczne (wózki inwalidzkie, samochody) powinny być zabezpieczone na wypadek tego typu awarii. Wykrycie uszkodzenia jednego z czujników (lub kilku, ale tego samego typu) jest stosunkowo łatwe – wystarczy sprawdzać, czy nie występuje zabroniona kombinacja wskazań czujników. Procedura taka powinna być wbudowana w gotowe scalone sterowniki silników PM BLDC – po wykryciu nieprawidłowego działania czujników zgłaszany jest błąd i następuje blokowanie napędu. Dokładna identyfikacja uszkodzonego elementu nie jest już tak trywialna.

Przy uszkodzeniach innych czujników (H_B i H_C) kształt pozostałej części hodografów wektora prądów fazowych oraz wektora sygnałów położenia wirnika na płaszczyźnie nie ulega zmianie, w dalszym ciągu jest to jedna trzecia hodografów sprawnego układu, natomiast zmienia się jego orientacja na płaszczyźnie.



Rys. 10. Porównanie prędkości zadanych i obliczonych oraz momentu elektromagnetycznego i obciążenia uzyskanych podczas nieudanej próby rozruchu z uszkodzonym czujnikiem położenia wirnika: z uszkodzeniem typu $H_A = 0$ z pozycji początkowej $\theta_{e0} = 1/12\pi$ (a), z uszkodzeniem typu $H_A = 1$ z pozycji początkowej $\theta_{e0} = 11/12\pi$ (b)

5. PODSUMOWANIE

Układ napędowy z silnikiem bezszczotkowym prądu stałego w porównaniu do układu klasycznego, z silnikiem prądu stałego, ma sporo zalet. Jednocześnie wzrost skomplikowania układu sterowania wpływa na niezawodność. Do prawidłowej komutacji elektronicznej silnika PM BLDC potrzebna jest prawidłowa informacja o położeniu wirnika, z wystarczającą dokładnością do 60° elektrycznych. W niniejszej pracy pokazano, jaką rolę w takim układzie spełniają czujniki położenia wirnika i jaki jest wpływ ich nieprawidłowego działania na pracę napędu. Rozważano dwa typy uszkodzeń wybranego czujnika H_A . Jako narzędzie do analizy przebiegów wykorzystano hodografy wektora prądów oraz hodografy wektora sygnałów kodujących położenie wirnika. Wykres hodografu zawiera w sobie informację diagnostyczną pozwalającą wykryć i zidentyfikować rodzaj uszkodzenia, co może zostać wykorzystane w systemie diagnostycznym. Niezależnie od niego napędy odporne na uszkodzenia powinny odpowiednio reagować na próbę rozruchu silnika, którego wirnik znajduje się w nieznannej pozycji.

Praca została wykonana z wykorzystaniem Infrastruktury PL-Grid.

ZAŁĄCZNIK 1. PARAMETRY BADANEGO SILNIKA

Prędkość znamionowa mechaniczna	$\omega_{mN} = 2410$ obr/min
Liczba par biegunów	$p=4$
Stała wzbudzenia	$K_e = 0,0876$ V/(rad/s),
Stała momentu	$K_t = 0,0876$ Nm/A
Napięcie znamionowe	$U_{DC} = 24$ V,
Rezystancja fazy uzwojenia	$R_s = 0,043$ Ω
Zastępcza indukcyjność fazowa	$L_s = 0,135$ mH
Moment bezwładności wirnika	$J_s = 169,37 \cdot 10^{-6}$ kg m ²
Moment znamionowy silnika	$m_{eN} = 1,82$ Nm
Prąd znamionowy	$I_N = 23,3$ A
Współczynnik oporu zależny od prędkości	$B = 5 \cdot 10^{-5}$ Nm/(rad/s)

LITERATURA

- [1] KRYKOWSKI K., *Silnik PM BLDC w napędzie elektrycznym. Analiza, właściwości, modelowanie*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [2] SCELBA G., SCARCELLA G. i in., *Fault Tolerant Rotor Position and Velocity Estimation Using Binary Hall-Effect Sensors for Low Cost Vector Control Drives*, Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2013, 2123–2130.
- [3] SKÓRA M., *Porównanie strategii sterowania prądem silnika PM BLDC. Badania symulacyjne*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Nr 67, Seria Studia i Materiały, Nr 33, Ofic. Wyd. PWr., Wrocław 2013.
- [4] TASHAKORI A., EKTESABI M., *A Simple Fault Tolerant Control System for Hall, Effect Sensors Failure of BLDC Motor*, 2013 IEEE 8th Conference on Industrial Electronics and Applications (ICIEA), 2013, 1011–1016.

IMPACT OF THE ROTOR POSITION SENSOR FAILURE TO THE PM BLDC DRIVE

The PM BLDC motor control system needs the information about the rotor position to ensure the correct commutation. The cheapest and the easiest way to obtain the rotor position seems to be the use of the Hall effect or optical sensors. It should be noted that these additional elements can reduce the reliability of the whole system. Influence of damage of such sensors on speed and electromagnetic torque waveforms is shown in this work. A comparison between healthy and faulty conditions is based on the analysis of the phase currents vector hodograph on the α - β plane. Potential problems with start-up from some rotor positions have been pointed.