

Rafał Piotuch

Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie

ZMODYFIKOWANY PREDYKCYJNY REGULATOR PRĄDU SILNIKÓW SYNCHRONICZNYCH Z MAGNESAMI ZAGNIEŹDŻONYMI

MODIFIED PREDICTIVE CURRENT CONTROLLER FOR INTERIOR PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTORS

Streszczenie: W pracy przedstawiono koncepcję zmodyfikowanego predykcyjnego regulatora prądu dla silników synchronicznych z magnesami zagnieżdżonymi. Celem badań jest porównanie zaproponowanego regulatora prądu z klasycznym regulatorem predykcyjnym w strukturze sterowania zorientowanego połowo.

Po krótkim wprowadzeniu, przedstawiono cel stosowania regulatorów prądu w układach sterowania silnikami z magnesami trwałymi, następnie przedstawiono zasadę działania predykcyjnego regulatora prądu, a także przedstawiono model matematyczny maszyny zapisany w przestrzeni stanów. W rozdziale 4 i 5 zaproponowano koncepcję zmodyfikowanego predykcyjnego regulatora prądu. Przedstawione, w rozdziale 6, wybrane wyniki badań symulacyjnych wykonanych w środowisku Matlab/Simulink, dotyczą porównania pracy zaproponowanej struktury z klasycznym regulatorem predykcyjnym. Badania dotyczą pracy w stanie statycznym (pulsacja prądu) oraz dynamicznym (szybkość odpowiedzi).

Wyniki badań potwierdzają założenia autora – wykorzystując znajomość zmienności indukcyjności w funkcji prądu można stworzyć zmodyfikowany predykcyjny regulator prądu, który cechuje się małą pulsacją prądu w stanie statycznym, a zarazem dużą dynamiką kształtowania prądu. Dodatkowo, regulator zmodyfikowany zapewnia lepszą jakość regulacji w stanie głębokiego nasycenia obwodu magnetycznego maszyny w porównaniu z klasycznym rozwiązaniem.

Abstract: The paper presents a concept of a modified predictive current control for interior permanent magnet synchronous motors. The purpose of the proposed study is to compare the classical predictive current controller with a modified controller in field-oriented control structure.

After a brief introduction, the purpose of using current controllers in control system with permanent magnet synchronous motors is described. The paper shows the principle of operation of a predictive current controller, and presents a state space model of the machine. Chapters 4 and 5 propose the concept of the modified predictive current controller. In Chapter 6, results of simulation studies carried out in Matlab/Simulink environment, on the proposed structure work compared with the classic predictive controller are presented. The research focuses on the control quality in static state and dynamic states.

The results confirm authors assumptions - using information of inductance variation as a function of current may lead to a modified predictive current controller, which has a small current/torque ripple in static states, and very good dynamic capabilities. In addition, the modified controller provides better control in deep saturation of the magnetic circuit of the machine in comparison with the classical solution.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, sterowanie predykcyjne, regulator prądu

Keywords: synchronous motor, predictive control, current controller

1. Wprowadzenie

Maszyny prądu przemiennego zasilane z falowników napięcia są powszechnie wykorzystywane w nowoczesnych układach napędowych. Wszędzie tam, gdzie wymagana jest wysoka sprawność oraz dynamika (kształtowania momentu) zastosowanie znajdują silniki synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi. Posiadają one wiele zalet takich jak wysoka sprawność, duży moment znamionowy, duża przeciążalność momentem, mały moment bezwładno-

ści wirnika, a także łatwość sterowania. Doskonałe parametry maszyn uzyskiwane są dzięki postępowi w dziedzinie inżynierii materiałowej. Z punktu widzenia układu sterowania, podczas skokowych zmian momentu obciążenia lub też momentu zadanego, kluczową rolę odgrywa regulator prądu. Jego zadaniem jest możliwie wierne odtworzenie zadanego wektora prądu. Realizowane jest to poprzez wybór odpowiednich napięć przykładanych na uzwojenia silnika, które powodują wypracowanie odpowied-

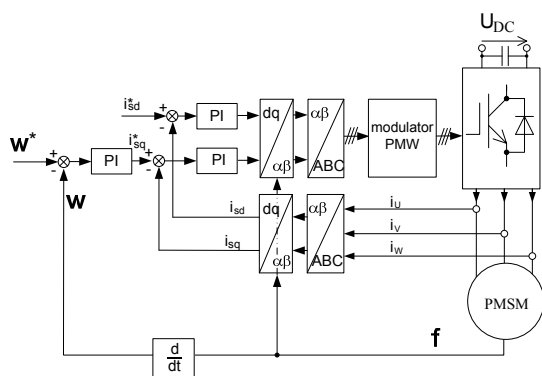
nich wartości składowych prądu – składowej d oraz składowej q .

Wśród wielu regulatorów prądu proponowanych w literaturze, sporym zainteresowaniem, w ostatniej dekadzie, cieszą się regulatory predykcyjne [1, 2, 3, 4]. Autor skupił się na zmodyfikowanym regulatorze prądu, bazującym na regulatorze hybrydowym zaproponowanym przez Morel et. al. [1, 4].

Regulator ten wykorzystuje zależności matematyczne opisujące dynamikę kształtowania prądu. W klasycznym modelu matematycznym silnika synchronicznego stosuje się założenie o stacjonarności parametrów. Dla maszyn z magnesami zagnieżdżonymi w wirniku, wartość indukcyjności nie jest stała i zmienia się w funkcji prądu [5, 6]. Autor proponuje wykorzystanie znajomości zmienności indukcyjności w osi d oraz q w równaniach regulatora prądu. Dla stanu głębokiego nasycenia obwodu magnetycznego (6-krotnego prądu znamionowego) zmienność indukcyjności w osi q w funkcji prądu sięga, w analizowanej strukturze, 50%. Zmienność indukcyjności w osi d oraz q jest o tyle istotna, że wpływa na kąt obciążenia, który pozwala wypracować zadany moment przy możliwie najmniejszej wartości skutecznej prądu fazowego, a także ma wpływ na dynamikę kształtowania prądu (momentu) w silniku. Warto również podkreślić, że zmienność indukcyjności ma wpływ na pracę przy odzwbudowaniu przy wysokich prędkościach obrotowych.

2. Regulatory prądu

Układ sterowania zorientowanego polowo zawiera w swojej strukturze kaskadowy układ regulacji, o dwóch wielkościach regulowanych, prędkości (pozycji) i prądu (rys. 1).

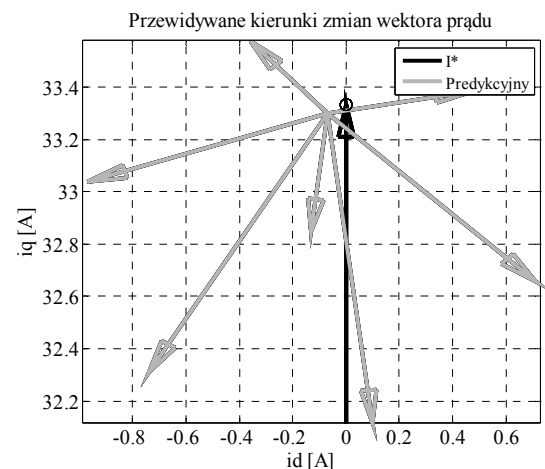


Rys. 1. Schemat klasycznego układu regulacji

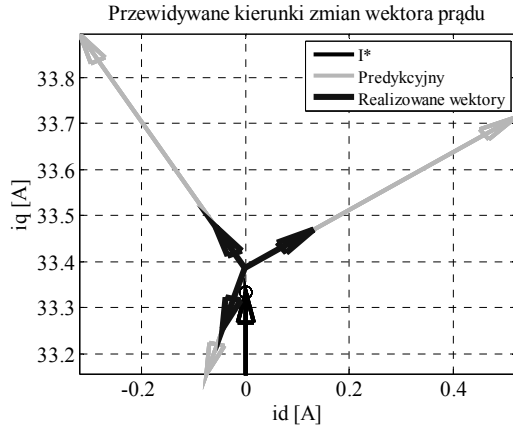
Z punktu widzenia wewnętrznej pętli regulacji sterowanie maszyną synchroniczną ze wzbudzeniem od magnesów trwałych polega na wymuszaniu odpowiednich przebiegów prądu w uzwojeniach stojana tej maszyny. Duży nacisk w przemysłowych rozwiązaniach położony jest więc właśnie na tą część układu regulacji [2]. Regulacja prądów może odbywać się w różnych układach współrzędnych – trójfazowych, dwufazowych, stacjonarnych i wirujących. Wykorzystanie prądów jako wielkości regulowanych, w układzie wirującym synchronicznie z wektorem strumienia od magnesów trwałych, stwarza możliwość sterowania silnikiem PMSM w sposób zbliżony do sterowania obcowzbudnym silnikiem prądu stałego, gdzie niezależnie kształtowany jest zarówno strumień jak i moment elektromagnetyczny [7, 8].

3. Predykcyjny regulator prądu

Każdy układ sterowania, który wykorzystuje informacje o obiekcie regulacji do wnioskowania o optymalnym sposobie sterowania może być zaliczony do grupy regulatorów predykcyjnych [2]. Autor skupił się na nieliniowych regulatorach prądu. Nieliniowe regulatory predykcyjne wypracowują wektor napięcia na podstawie liniowych zależności opisujących model przekształtnik-silnik. Predykcja dotyczy przewidywania wartości napięcia, jakie należy kształtować na wyjściu przekształtnika, aby w następnym kroku próbkowania uzyskać przewidywany wektor prądu lub przynajmniej zbliżyć się do niego (rys. 2). Konieczne jest więc wyznaczenie przewidywanego przyrostu prądu w następnym kroku próbkowania dla każdej konfiguracji kluczy tranzystorowych.



Rys. 2. Schemat działania algorytmu predykcyjnego



Rys. 3. Realizowane wektory prądu

Przewidywanie to zazwyczaj odbywa się zgodnie z zasadami liniowej ekstrapolacji na podstawie kilku wcześniejszych próbek (lub też jednej próbki) [3, 4].

Nieliniowe regulatory predycyjne, ze względu na dużą liczbę operacji matematycznych, realizowane są powszechnie w układach mikroprocesorowych, najczęściej w procesorach sygnałowych dedykowanych do napędu elektrycznego [2, 3]. Dla przykładu procesor F28335 Delfino z powodzeniem może realizować algorytm predycyjnego regulatora prądu ze względu na dużą moc obliczeniową oraz odpowiednie interfejsy.

4. Model matematyczny bloku silnik-przekształtnik

Analizowany silnik synchroniczny zawiera trójfazowe uzwojenia stojana oraz magnesy trwałe zagnieżdżone w wirniku. Wykorzystując komplet równań zawarty w [7] można uzyskać następujący zestaw równań:

$$\begin{bmatrix} \dot{i}_d(t) \\ \dot{i}_q(t) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R}{L_d} & \omega(t) \\ -\omega(t) & -\frac{R}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(t) \\ i_q(t) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_q} & -\frac{\omega(t)}{L_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(t) \\ v_q(t) \\ \Psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

Gdzie i_d , i_q – prądy stojana, v_d , v_q – napięcia stojana, R – rezystancja uzwojenia fazowego, L_d , L_q – indukcyjności w osiach d oraz q , Ψ_{PM} – strumień od magnesów trwałych. Rozważając bardzo małą zmianę czasu – dużo mniejszą niż

stała czasowa elektromechaniczna i elektryczna silnika, można założyć, że zmiana pozycji i prędkości jest zaniedbywalnie mała. W tym przypadku równanie (1) może być zapisane w postaci:

$$\begin{bmatrix} i_d(k+1) \\ i_q(k+1) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R \cdot T}{L_d} & T \cdot \omega(k) \\ -T \cdot \omega(k) & 1 - \frac{R \cdot T}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d(k) \\ i_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} v_d(k) \\ v_q(k) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{T \cdot \omega(k)}{L_d} \cdot \Psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (2)$$

Wykorzystano w tym celu rozwinięcie w szereg Taylora.

Napięcia w osi d i q można wyrazić za pomocą następujących równań:

$$\begin{bmatrix} v_d(k) \\ v_q(k) \end{bmatrix} = \mathbf{M}(k) \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}(k) \quad (3)$$

$$\mathbf{u}(k) = \begin{bmatrix} u_a(k) \\ u_b(k) \\ u_c(k) \end{bmatrix} \quad (4)$$

$$\mathbf{D} = U_{DC} \cdot \sqrt{\frac{2}{3}} \cdot \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (5)$$

$$\mathbf{M}(k) = \begin{bmatrix} \cos \theta(k) & \sin \theta(k) \\ -\sin \theta(k) & \cos \theta(k) \end{bmatrix} \quad (6)$$

Ostatecznie równanie opisujące przyszłe wartości składowych wektora prądu, osiągane poprzez przyłożenie odpowiedniego napięcia na uzwojenia fazowe silnika, ma postać:

$$\mathbf{X}_i(k+1) = \mathbf{F}(k) \cdot \mathbf{X}(k) + \mathbf{G} \cdot \mathbf{M}(k) \cdot \mathbf{D} \cdot \mathbf{u}_i(k) + \mathbf{H}(k) \quad (7)$$

gdzie:

$$\mathbf{X}(k) = \begin{bmatrix} i_d(k) & i_q(k) \end{bmatrix}^T \quad (8)$$

$$\mathbf{F}(k) = \begin{bmatrix} 1 - \frac{R \cdot T}{L_d} & T \cdot \omega(k) \\ -T \cdot \omega(k) & 1 - \frac{R \cdot T}{L_q} \end{bmatrix} \quad (9)$$

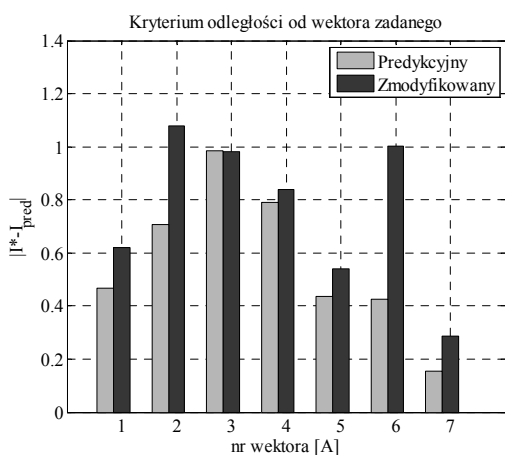
$$\mathbf{G}(k) = \begin{bmatrix} \frac{T}{L_d} & 0 \\ 0 & \frac{T}{L_q} \end{bmatrix} \quad (10)$$

$$\mathbf{H}(k) = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{T \cdot \omega(k)}{L_d} \cdot \Psi_{PM} \end{bmatrix} \quad (11)$$

natomiast $\mathbf{u}_i(k)$ jest wektorem wejściowym dla każdej z 7 konfiguracji kluczy, U_{DC} napięciem na szynie DC, a T okresem próbkowania.

W każdym kroku obliczeniowym dokonywany jest pomiar prądu i pomiar pozycji wirnika w celu wyznaczenia macierzy \mathbf{F} , \mathbf{M} oraz \mathbf{H} . Dla każdej konfiguracji wejściowego wektora napięć wyznaczone są przyszłe wartości składowych wektora prądu.

W klasycznej strukturze predykcyjnego regulatora prądu wybierany jest ten wektor napięcia, który minimalizuje wybrane kryterium jakości regulacji (rys. 4.).



Rys. 4. Odległość pomiędzy końcami predykowanego i zadanego wektora prądu dla 7 konfiguracji kluczy tranzystorowych

Kryterium tym jest zazwyczaj kąt pomiędzy zadanym wektorem prądu, a przewidywanym wektorem prądu lub odległość pomiędzy końcami tych wektorów [1, 4]. Wybraną funkcję celu opisuje wzór (12).

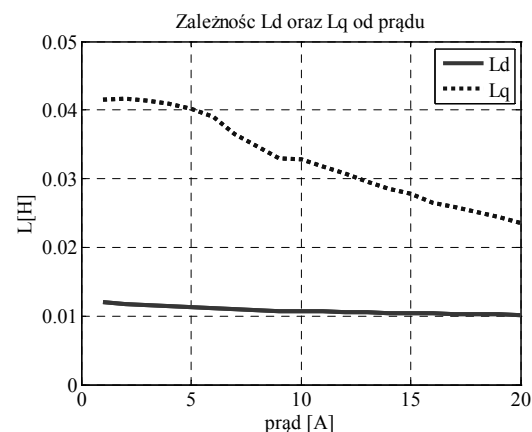
$$\min(|\mathbf{X}_i(k+1) - \mathbf{X}^*(k)|) \quad (12)$$

Na podstawie wyznaczonych przewidywanych wektorów prądu wybrane mogą być trzy konfiguracje tranzystorów (dwie aktywne i jedna nieaktywna), które powodują odtworzenie zadanego wektora prądu (rys. 3). Nieaktywne wektory napięcia mają takie same działanie, ale wybierając odpowiedni z nich można minimalizować liczbę przełączeń tranzystorów. Dodatkowo na podstawie prostych zależności matematycznych wyznaczany jest czas przyłożenia każdego z napięć na uzwojenia silnika [1]. Nieliniowy regulator prądu pełni w ten sposób rolę modulatora wektora przestrzennego napięcia.

5. Zmodyfikowany predykcyjny regulator prądu

W konstrukcjach silników synchronicznych z magnesami zagnieżdżonymi oprócz składowej momentu elektromagnetycznego związanej z siłą magnetomotoryczną magnesów trwałych, występuje dodatkowa składowa momentu elektromagnetycznego zwana momentem reluktancyjnym. Wynika ona z asymetrii obwodu magnetycznego. Zjawisko powstawania momentu reluktancyjnego może zostać uwzględnione w modelu obwodowym maszyny w postaci różnych indukcyjności w osi d oraz q .

Dodatkowo warto zaznaczyć, że wartości indukcyjności nie są stałe i zależą od stanu namagnesowania maszyny. Autor wykorzystał metodę elementów skończonych do wyznaczenia indukcyjności badanego silnika [5] (rys.5).



Rys. 5. Indukcyjności w osi d oraz q

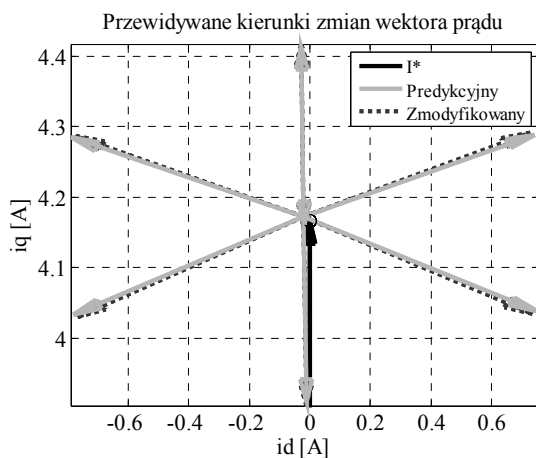
W oparciu o wyznaczone parametry zaproponowany został zmodyfikowany model silnika synchronicznego uwzględniający zmiany

indukcyjności w osi d oraz q w funkcji prądu [6, 9, 10] w równaniach (9)-(11).

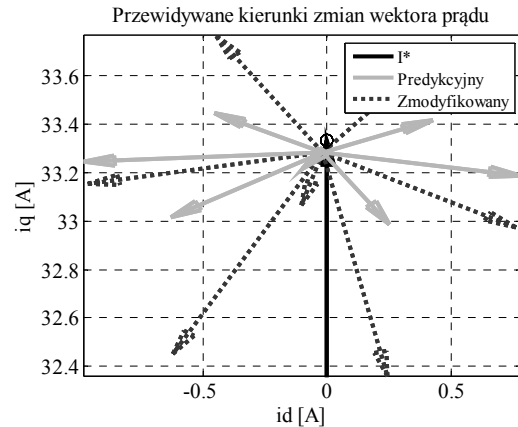
6. Wyniki badań symulacyjnych

Zmodyfikowany regulator prądu został zamodelowany w środowisku Matlab/Simulink. Symulacje przeprowadzono dla silnika z magnesami zagnieżdżonymi – jego parametry zostały wyznaczone z wykorzystaniem narzędzi polowych, a następnie poprawność modelu poddano weryfikacji (metodami obwodowymi).

Na przedstawionych wykresach pokazano wyniki badań, jakie zostały uzyskane dla regulatora predykcyjnego i zmodyfikowanego regulatora predykcyjnego. Badanie regulatorów polegało na wymuszeniu zadanego prądu w osi q proporcjonalnego do momentu obciążenia. W czasie 0.02s następuje skokowa zmiana momentu obciążenia od 0 do $10M_n$. Natomiast w czasie 0.04s następuje skokowa zmiana momentu z wartości $10M_n$ do $-10M_n$. Zadana wartość prądu w osi d wynosiła 0A. Początkowa prędkość kątowna wirnika to 0rad/s. Na rys. od 7 do 10 przedstawiono przebiegi prądów w stanie statycznym oraz dynamicznym bez wykorzystania pętli prędkości. Czas próbkowania obu regulatorów wynosił $40\mu s$ (25kHz – częstotliwość przełączania tranzystorów). Oba regulatory wypracowywały w każdym okresie próbkowania trzy konfiguracje kluczy tranzystorowych w oparciu o równanie (12). Na rys. 6. pokazano, że różnice w predykcji pomiędzy regulatorem predykcyjnym, a zmodyfikowanym są pomijalnie małe dla małej wartości prądu zadanego. Jest to spowodowane podobnymi wartościami indukcyjności w równaniach obu regulatorów.

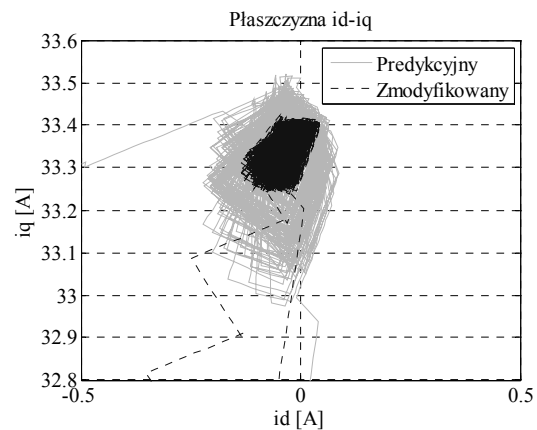


Rys. 6. Działanie algorytmu predykcji dla $M=4Nm$

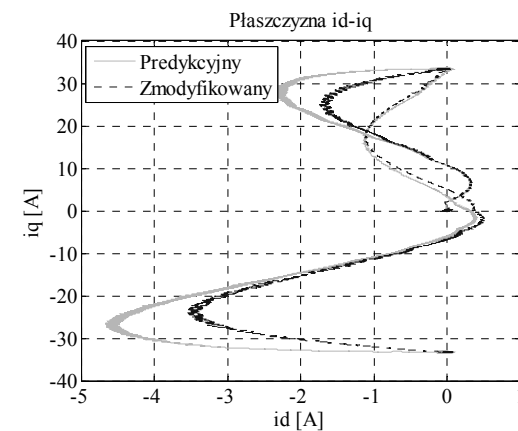


Rys. 7. Działanie algorytmu predykcji dla $M=40Nm$ ($10M_n$)

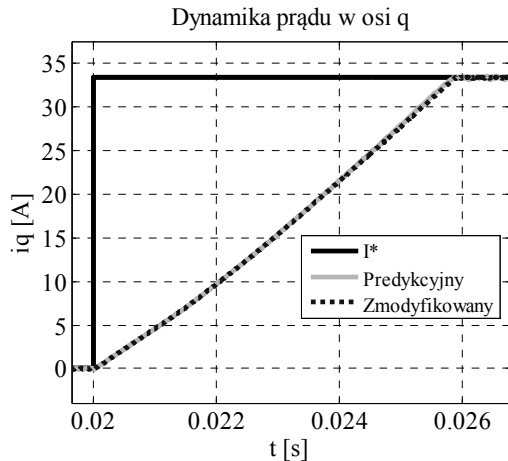
Na rys. 8. widać istotną różnicę pomiędzy polami uchybu prądu jakie wypracowują regulator predykcyjny i regulator zmodyfikowany. Dla głębokiego stanu nasycenia klasyczny predykcyjny regulator dokonuje niepoprawnej predykcji w oparciu o znamionowe wartości indukcyjności (rys. 7.).



Rys. 8. Pole uchybu wektora prądu



Rys. 9. Trajektorie składowych wektora prądu



Rys. 10. Odpowiedź regulatorów na skokową zmianę prądu zadanego

Wyniki przedstawione na rys. od 7 do 10 dotyczą pracy regulatora zmodyfikowanego. Równolegle obliczany był algorytm pracy klasycznego regulatora predykcynnego. Zadane wartości prądów były takie same dla obu struktur regulatora. Zarówno jedno i drugie rozwiązanie cechuje się powstaniem sporego uchybu prądu w osi d w warunkach skokowych zmian wartości zadanej momentu. Dynamika kształtowania prądu w osi q jest bardzo podobna dla obu regulatorów.

7. Podsumowanie

Nieliniowe predykcynne regulatory prądu stanowią interesującą grupę regulatorów, które cechują się wysoką dynamiką kształtowania prądu. Autor uwzględnił fakt nasycania się obwodu magnetycznego sterowanej maszyny w równaniach regulatora predykcynnego. Pozwoliło to poprawić jakość regulacji w stanie głębokiego nasycenia, a także zweryfikowało poprawność koncepcji autora.

Istotne różnice pomiędzy klasycznym predykcynnym regulatorem prądu, a regulatorem zmodyfikowanym dotyczą pracy w stanie głębokiego nasycenia obwodu magnetycznego – przewidywane kierunki zmian wektora prądu dla tej samej konfiguracji łączników energoelektronicznych mają zarówno różne długości jak i tworzą różne kąty z zadanim wektorem prądu.

Projekt został sfinansowany ze środków Narodowego Centrum Nauki, nr projektu N N510 508040 (2011-2013).

8. Literatura

[1]. Morel F., Xuefang L.-S., R'etif J.-M., Allard B.: A predictive current control applied to a permanent magnet synchronous machine, comparison with

a classical direct torque control, ScienceDirect, Vol. 78, Issue 8, 2008, France. s. 1437-1447

[2]. Rusczyk A.: Nowe algorytmy predykcynnych metod regulacji prądów przekształtników AC/DC i DC/AC, Rozprawa doktorska, Politechnika Białostocka, Wydział Elektryczny, 2005.

[3]. Heydari F., Sheikholeslami A., Firouzjah K. G., Lesan S.: Predictive Field-Oriented Control of PMSM with Space Vector Modulation Technique, Higher Education Press and Springer-Verlag, 2009.

[4]. Piotuch R., Pałka R.: Porównanie wybranych regulatorów prądu w układzie sterowania silnikiem synchronicznym ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 93/2011, s. 173-178.

[5]. Gratkowski S. Pałka R.: Komputerowo wspomaganą analizą i projektowanie urządzeń i układów elektromagnetycznych, Wydawnictwo Uczelniane Politechniki Szczecińskiej, 2001, Szczecin, ISBN: 83-87423-99-8.

[6]. Shchur I., Rusek A., Makarchuk O.: Modelowanie symulacyjno-komputerowe silnika synchronicznego z magnesami trwałymi na podstawie wyników badań polowych, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 3/2012 (96), Komel Katowice, s. 189-195.

[7]. Tunia H., Kaźmierkowski M.: Podstawy automatyki napędu elektrycznego, PWN, 1983, Warszawa.

[8]. Świerczyński D.: Direct Torque Control with Space Vector Modulation (DTC-SVM) of Inverter-Fed Permanent Magnet Synchronous Motor Drive, Rozprawa doktorska, 2005, Politechnika Warszawska.

[9]. Pałka R., Paplicki P., Piotuch R., Wardach M.: Analiza polowa i obwodowa silnika synchronicznego z magnesami trwałymi sterowanego regulatorem histerezowym, Przegląd Elektrotechniczny, Warszawa, 02b/2013, s. 147-149.

[10]. Jagieła M., Grabiec T.: Coupling electromagnetic (FE) models to multidomain simulator to analyze electrical drives and complex control systems, Archives of Electrical Engineering. Vol. 59, No. 3-4, 2010, Poland.

Autor

Mgr inż. Rafał Piotuch, Zachodniopomorski Uniwersytet Technologiczny w Szczecinie, Wydział Elektryczny, ul. Sikorskiego 37, 70-313 Szczecin, tel.: +48 91 449 46 59, e-mail: rpiotuch@zut.edu.pl

Recenzent

prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski