

Wiktor HUDY*
Kazimierz JARACZ*

WPLYW ADDYTYWNYCH ZAKŁÓCEŃ TYPU SINUSOIDALNEGO SYGNAŁÓW WEJŚCIOWYCH REGULATORÓW PI W UKŁADZIE FOC Z SILNIKIEM INDUKCYJNYM NA PRĘDKOŚĆ OBROTOWĄ

W artykule przedstawiono wyniki badań wpływu addytywnych zakłóceń sinusoidalnych sygnałów wejściowych regulatorów PI w układzie polowo-zorientowanym z silnikiem indukcyjnym na prędkość obrotową silnika. Wszystkie parametry regulatorów PI obliczono wcześniej przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego. Do sygnałów wejściowych wprowadzono dodatkowe zakłócenia sinusoidalne o zadanej amplitudzie oraz częstotliwości. Obserwowano jak zachowuje się wartość prędkości obrotowej w zależności od amplitudy i częstotliwości sinusoidalnie zmiennych zakłóceń. Wszystkie obliczenia wykonano przy wykorzystaniu pakietu MATLAB/Simulink.

SŁOWA KLUCZOWE: układ polowo-zorientowany, addytywne zakłócenia, algorytm ewolucyjny

1. WSTĘP

W nowoczesnych układach napędowych służących do sterowania prędkością obrotową silników indukcyjnych stosuje się układy sterowane wektorowo. W chwili obecnej użytkownik może wybrać spośród dwóch typów układów: układ z bezpośrednim sterowaniem momentem oraz układ sterowania polowo-zorientowanego [1, 5, 6]. Każdy z tych układów charakteryzuje się odmiennymi cechami. W układzie polowo-zorientowanym (ang. Field Oriented Control - FOC), który autorzy wzięli pod uwagę, stosuje się m.in. regulatory ciągłe PI. Układ ten można zrealizować na wiele sposobów. Do dalszej analizy wybrano układ bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego z rys. 1 [1, 2, 3, 4, 5, 6].

Jak wiadomo na jakość sterowania sygnałów wyjściowych badanego układu sterowania mają wpływ parametry regulatorów. Parametry regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny [2, 3, 7]. Wyniki obliczone przez algorytmy ewolucyjne nie są optymalne. Przyjmuje się, że najlepsze znalezione

* Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN w Krakowie.

Przyjęte oznaczenia stanowią współczynniki wzmocnień:

- K_p –regulatora:
 - $K_{p,1}$ – prądu w pętli regulacji strumienia magnetycznego,
 - $K_{p,2}$ – prądu w pętli regulacji prędkości obrotowej,
 - $K_{p,3}$ – strumienia magnetycznego,
 - $K_{p,4}$ – momentu elektromagnetycznego,
 - $K_{p,5}$ – prędkości obrotowej.
- T_p –zależnego od czasu zdwojenia regulatora:
 - $T_{p,1}$ – prądu w pętli regulacji strumienia magnetycznego,
 - $T_{p,2}$ – prądu w pętli regulacji prędkości obrotowej,
 - $T_{p,3}$ – strumienia magnetycznego,
 - $T_{p,4}$ – momentu elektromagnetycznego,
 - $T_{p,5}$ – prędkości obrotowej.

Optymalizacja parametryczna badanego układu sterowania została przeprowadzona przy założeniu, że miał on zapewnić:

- przebieg skokowej wartości prędkości obrotowej 0-800 [rpm] w pierwszej sekundzie symulacji,
- przebieg skokowej wartości momentu obciążenia 0-10 [Nm] w trzeciej sekundzie symulacji.

Obliczone nastawy regulatorów z tabeli 1 odpowiadają nastawom układu, który charakteryzował się tym, że bezwzględna różnica między przebiegiem zadany skokowo a wygenerowanym przez ten układ sterowania była minimalna. Za minimalną wartość tej różnicy przyjęto wartość najmniejszą znaną przez algorytm ewolucyjny.

W niniejszym artykule badano wpływ zakłóceń addytywnych, które wprowadzono na wejście poszczególnych regulatorów. Praca jest kontynuacją badań [4]. Zakłóceniem były sygnały sinusoidalne o różnej amplitudzie i częstotliwości. W przypadku badania dwóch i więcej sygnałów zakłócających fazy początkowe tych sygnałów były dobierane w sposób losowy.

2. BADANIA ODPORNOŚCI UKŁADU FOC NA ZAKŁÓCENIA SINUSOIDALNE O RÓŻNEJ CZĘSTOTLIWOŚCI

Badania podzielono na dwa etapy. W pierwszym etapie wprowadzono addytywne zakłócenia sinusoidalne do sygnału wejściowy pojedynczego regulatora. W drugim etapie wprowadzono zakłócenia sinusoidalne do sygnałów wejściowych wszystkich pięciu regulatorów. Dodatkowo założono, że w drugim przypadku fazy początkowe sinusoid są wybierane losowo. Ponadto by wyeliminować błędy przypadkowe, każdorazowo przeprowadzono symulacje dziesięciokrotnie. Wszystkie poniższe dane są średnimi wartościami z dziesięciu pomiarów.

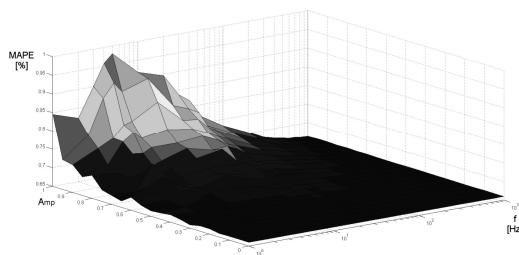
Miarę wyjściową stanowi średnia wartość bezwzględnego błędu procentowego wyrażona wzorem [4]:

$$MAPE = \frac{1}{2} \sum_{i=1}^n \left| \frac{x_{zi} - x_i}{x_{zi}} \right| 100\% \quad (1)$$

gdzie: MAPE – wartość średniego bezwzględnego błędu procentowego (ang. Mean Absolute Percentage Error), n – liczba momentów czasu w którym mierzono wartości błędów ($t = 5$ s, $\Delta t = 0.001$ s, $n = 5000$), x_{zi} – wartość zadana prędkości obrotowej mierzonej w kolejnej i -tej chwili czasu, x_i – wartość wyjściowa układu sterowania FOC w kolejnej chwili czasu i .

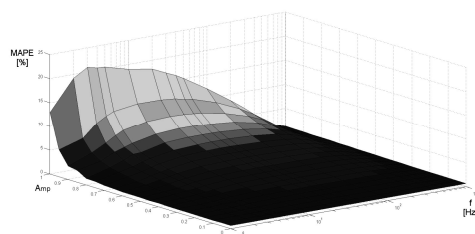
Chwilowa amplituda addytywnego sygnału zakłócającego jest taka sama jak chwilowa amplituda sygnału zakłócanego. Dalsze rozważania prowadzone są dla wartości amplitud z przedziału $[0,1]$ gdzie wartość 0 oznacza brak zakłóceń natomiast wartość 1 oznacza zakłócenia na poziomie 100% sygnału zakłócanego. Wielkość amplitudy jest wielkością bezwymiarową.

Na rysunku 1-6 zaprezentowano wyniki obliczeń. Na rys. 1 przedstawiono wartość współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prądu w torze regulacji strumienia magnetycznego.



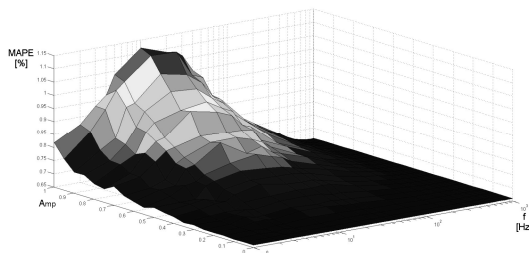
Rys. 1. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prądu w torze regulacji strumienia magnetycznego

Na rys. 2 przedstawiono powierzchnię wartości współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prądu w torze regulacji prędkości obrotowej.



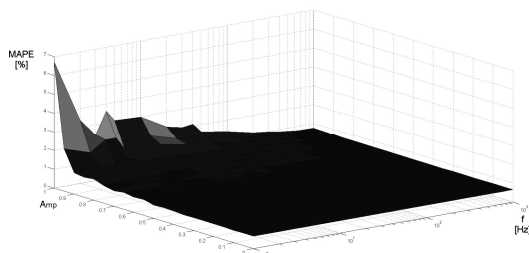
Rys. 2. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prądu w torze regulacji prędkości obrotowej

Na rys. 3 przedstawiono powierzchnię wartości współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora strumienia magnetycznego.



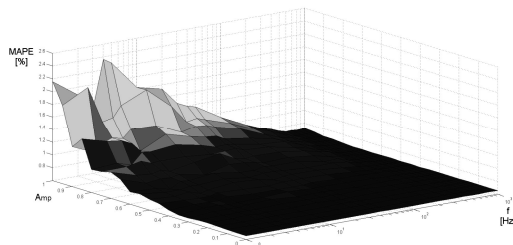
Rys. 3. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora strumienia magnetycznego

Na rys. 4 przedstawiono powierzchnię wartości współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora momentu elektromagnetycznego.



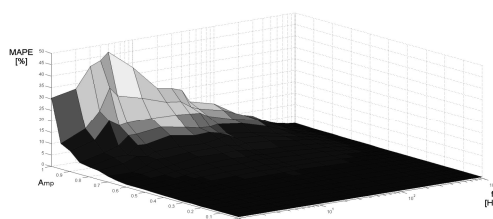
Rys. 4. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora momentu elektromagnetycznego

Na rys. 5 przedstawiono powierzchnię wartości współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prędkości obrotowej.



Rys. 5. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnału wejściowego regulatora prędkości obrotowej

Na rys. 6 przedstawiono powierzchnię wartości współczynnika MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnałów wejściowych wszystkich regulatorów PI.



Rys. 6. Powierzchnia wartości MAPE dla zakłóceń wprowadzonych do sygnałów wejściowych wszystkich regulatorów PI

PODSUMOWANIE

Jak wynika z rys. 1-6 wartości wskaźnika MAPE maleją wraz ze wzrostem częstotliwości oraz maleją wraz ze spadkiem wartości amplitudy addytywnych zakłóceń wprowadzanych na wejścia regulatorów PI w układzie sterowania połowo zorientowanego z silnikiem indukcyjnym małej mocy. Na rys. 1, 2, 3 oraz 6 dla dużych wartości amplitudy [0.8 – 1] wraz ze wzrostem częstotliwości sygnału zakłócającego od 1 do 10 Hz wartość wskaźnika MAPE rośnie. Spowodowane jest to wolnozmiennym charakterem zakłóceń. Układ sterowania FOC dla tych wartości częstotliwości nadaża z ich korekcją. Maksimum wartości wskaźnika MAPE dla większości przypadków (w tym przypadku, kiedy sygnał zakłócający wprowadzono do sygnałów wejściowych wszystkich regulatorów) przypada na wartość 10 [Hz]. Przy dalszym wzroście częstotliwości wartość wskaźnika MAPE maleje, wzrasta jakość sterowania prędkością obrotową silnika indukcyjnego. Największą wartość współczynnika MAPE zaobserwowano w przypadku wprowadzenia sygnału zakłócającego do sygnału wejściowego regulatora prądu w torze regulacji prędkości obrotowej i wynosił on $MAPE = 20.95\%$. W przypadku wprowadzania sygnału zakłócającego na wejścia sygnałów wszystkich regulatorów maksymalna wartość $MAPE = 46.43\%$. W tych warunkach nie ma możliwości sterowania wartością prędkości obrotowej. Zakładając, że maksymalna wartość wskaźnika MAPE nie może być większa niż 2% (2% zaszumienie sygnału wyjściowego), wartość amplitudy addytywnych sygnałów zakłócających nie może być wyższa niż $A_{mp} < 0.35$ lub częstotliwość tego sygnału musi być większa niż $f > 800$ [Hz]. Układ sterowania dla $A_{mp} < 0.35$ oraz $f > 800$ [Hz] charakteryzował się stabilnością oraz akceptowalną wartością zakłóceń w wartości sygnału prędkości obrotowej. Zawartość zakłóceń w przebiegu sygnału wyjściowego wzrośnie przy addytywnym sygnale zakłócającym, którego harmoniczna będzie miała częstotliwość $f < 800$ [Hz] oraz jej amplituda będzie większa niż 35% wartości amplitudy sygnału zakłócanego.

LITERATURA

- [1] Leonard W.: *Control of Electrical Drives*. Springer Verlag, Berlin 1985.
- [2] Hudy W., Jaracz K.: The analysis of results of evolutionary parametric optimization of field-oriented control system with slip-ring motor for different evolutionary algorithm parameters, *Electrical Engineering*, Issue 72, Poznan University of Technology Academic Journals, Poznan 2012, ISSN 1897-0737.
- [3] Hudy W.: Analysis of parametric optimization of field-oriented control of 3-Phase induction motor with using evolutionary algorithm, *Transactions of the VŠB – Technical University of Ostrava, Mechanical Series No. 2*, 2013, vol. LIX, article No. 1959, Ostrava 2013.
- [4] Hudy W., Jaracz K.: Wpływ zakłóceń sygnałów wejściowych regulatorów typu PI w układzie polowo-zorientowanym z silnikiem indukcyjnym, XV Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej, Szczyrk/Gliwice 24-26 września 2014, ISBN 978-83-61553-32-8, str. 105-111.
- [5] Kaźmierkowski M.P.: Porównanie metody sterowania polowo-zorientowanego z metodą bezpośredniej regulacji momentu silnika klatkowego. *Przegląd Elektrotechniczny* 4/98, Warszawa 1998.
- [6] Orłowska-Kowalska T., *Control systems of the induction motors without sensors*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław (2003).
- [7] Vítěčková, M., Vítěček, A. *Vybrané metody seřizování regulátorů*. VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojí, Ostrava 2011, ISBN 978-80-248-2503-8, 230.

INFLUENCE OF ADDITIVE SINUSOIDAL TYPE INTERFERENCE OF ENTRY SIGNALS' OF REGULATORS TYPE PI IN FIELD ORIENTED CONTROL SYSTEM WITH INDUCTION MOTOR ON ROTATIONAL SPEED

In the article influence of additive sinusoidal type interference of entry signals' of regulators type PI in field oriented control with induction motor on rotational speed were examined. All PI regulators parameters were calculated with using evolutionary algorithm. To entry signals there were inputted additional sinusoidal interference with set amplitude and frequency. There were also observed the behavior of rotational speed value depending on the amplitude and frequency of the sinusoidal interference. All calculations were performed using MATLAB / Simulink.