

# Badanie wpływu zakłóceń sygnałów wejściowych regulatorów typu PI w układzie sterowania polowo-zorientowanego z silnikiem indukcyjnym

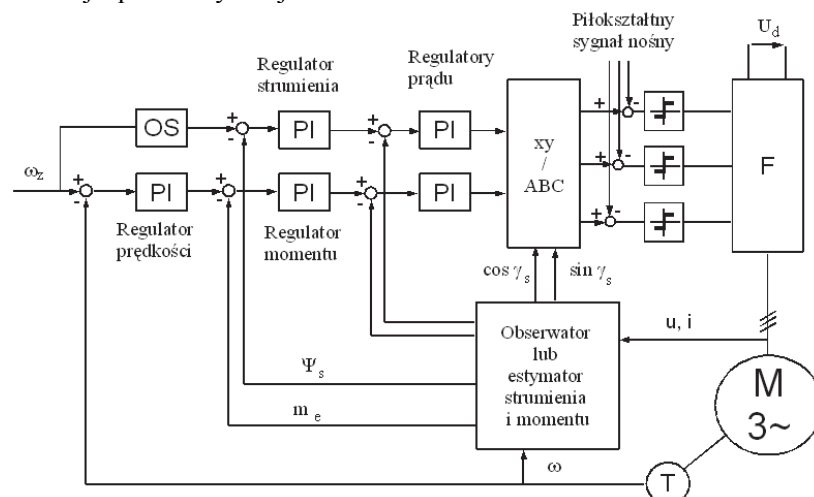
W artykule omówiono wpływ jakościowy zakłóceń działających na sygnały wejściowe poszczególnych regulatorów w układzie polowo-zorientowanym, w którym obiektem sterowania prędkością obrotową jest silnik indukcyjny. Nastawy regulatorów PI obliczono przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego. Badanie dynamiki układu przeprowadzono metodą komputerową, korzystając z oprogramowania MATLAB/Simulink.

słowa kluczowe: układ napędowy, silnik indukcyjny, system sterowania

## 1. WPROWADZENIE

Do budowy nowoczesnych układów napędowych stosuje się sterowniki zawierające programy do wektorowego sterowania prędkością obrotową silników. W chwili obecnej wykorzystuje się dwie metody sterowania wektorowego: metodę sterowania polowo-zorientowanego (ang. *Field Oriented Control*) oraz metodę bezpośredniego sterowania momentem elektromagnetycznym (ang. *Direct Torque Control*) [1, 2, 3, 5, 6, 7, 8]. Kluczowym zadaniem sterowania jest, by układ działał jak najbardziej efektywnie. Realizuje się to, dokonując optymalizacji parametrycznej układu

sterowania. Do dalszej analizy wybrano układ FOC z większą liczbą parametrów do optymalizacji. W podstawowej konfiguracji układ ten posiada 5 regulatorów typu PI (dwa regulatory prądu, regulator momentu elektromagnetycznego, regulator strumienia elektromagnetycznego oraz regulator prędkości obrotowej). W procesie optymalizacji parametrycznej należy obliczyć 10 parametrów (wzmocnień regulatorów oraz współczynników zależnych od czasów zdwojenia). Spośród wielu różnych konfiguracji układu FOC wybrano układ bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego (ang. *Direct Field Oriented Control*) [2, 3, 5, 6, 8], który przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Układ bezpośredniego sterowania polowo-zorientowanego [3, 6, 8]

Układ DFOC zrealizować można na dwa najczęściej spotykane sposoby, różniące się zastosowanymi regulatorami prądu falownika PWM [3, 6, 8]. Poddany analizie układ posiada liniowe regulatory prądu falownika.

## 2. BADANY UKŁAD STEROWANIA

Układ DFOC, który był przedmiotem analizy, przedstawiono na rys. 1.

Na rysunku tym przyjęte symbole oznaczają:

- $\omega_z$  – zadana prędkość obrotowa sterowanego silnika indukcyjnego,
- OS – moduł osłabienia strumienia elektromagnetycznego,
- PI – liniowe regulatory typu PI,
- F – falownik,
- $U_d$  – napięcie odniesienia falownika F,
- $u, i$  – napięcia i prądy fazowe silnika indukcyjnego,
- $\cos \gamma_s, \sin \gamma_s$  – cosinus i sinus kąta potrzebnego do transformacji z układu xy do układu ABC,

- $\omega$  – bieżąca wartość prędkości obrotowej silnika indukcyjnego,
- $\Psi_s$  – estymowana wartość strumienia magnetycznego silnika,
- $m_e$  – estymowana wartość momentu elektromagnetycznego silnika.
- M – silnik indukcyjny małej mocy (Tamel SG90L-6),
- T – tachoprądnica (pomiar prędkości obrotowej silnika indukcyjnego).

Zaprezentowany układ charakteryzuje się tym, że kąt  $\gamma_s$ , którego znajomość jest konieczna do transformacji równań, jest określany na podstawie pomiarów prądów i napięć fazowych oraz na podstawie modelu matematycznego silnika indukcyjnego (parametry modelu matematycznego silnika indukcyjnego będącego obiektem sterowania wcześniej zidentyfikowano przy zastosowaniu metod ewolucyjnych [3, 6, 8]).

Na potrzeby niniejszego artykułu proces optymalizacji parametrycznej przeprowadzono metodą numeryczną przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego, który został napisany na podstawie modelu matematycznego tego układu sterowania. Dokonano obliczeń wymaganych parametrów regulatorów [2, 3]. Wyniki tych obliczeń przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Obliczone nastawy regulatorów PI układu DFOC przez algorytm ewolucyjny

$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	$K_{p,5}$	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$	$T_{p,3}$	$T_{p,4}$	$T_{p,5}$	F [obr/min]
13,2	14,9	11,9	0,20	1,91	3,04	2,01	3,96	0,49	8,8	$7,43 \cdot 10^5$

Przyjęte oznaczenia:

$K_{p,1}; K_{p,2}; K_{p,3}; K_{p,4}; K_{p,5}$  – wzmocnienia regulatorów, odpowiednio – regulatora prądu w pętli regulacji strumienia magnetycznego, regulatora prądu w pętli regulacji regulatora prędkości, regulatora strumienia magnetycznego, regulatora momentu elektromagnetycznego oraz regulatora prędkości obrotowej,

$T_{p,1}; T_{p,2}; T_{p,3}; T_{p,4}; T_{p,5}$  – współczynniki zależne od czasów zdwojenia regulatorów w pętli regulacji jw.,

F – kryterium jakości będące sumą modułów różnic wartości prędkości obrotowej wygenerowanej na podstawie bieżących nastaw regulatorów i wartości prędkości obrotowej zadanej układowi sterowania w dyskretnych momentach czasu (czas symulacji wynosił 5 s, krok czasu symulacji wynosił 0,001 s).

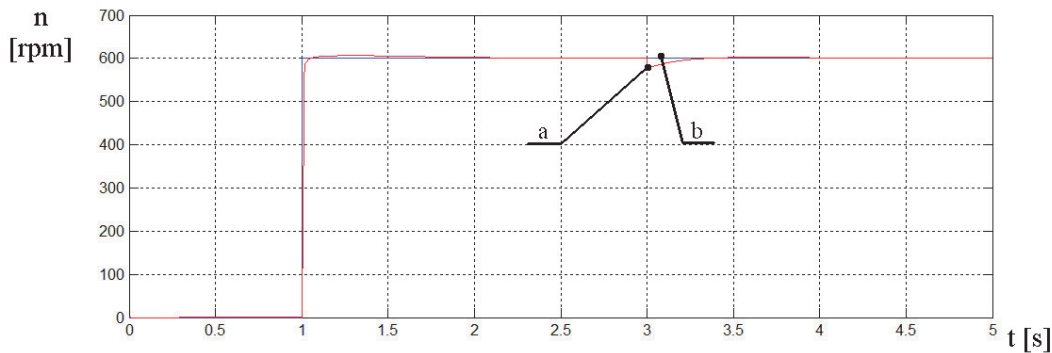
Przebiegami zadanymi do opisywanego układu sterowania były:

- skokowa zmiana prędkości obrotowej, którą ma realizować układ,

- skokowa zmiana momentu obciążenia po ustaleniu się prędkości obrotowej.

Przebiegi zadany oraz zrealizowany przez układ sterowania przedstawiono na rys. 2. Czas symulacji miał wartość 5 [s]. W pierwszej sekundzie skokowo zmieniono prędkość zadaną z wartości 0 [rpm] do wartości 800 [rpm]. Po kolejnych dwóch sekundach obciążono skokowo wał silnika z wartości 0 [Nm] do wartości 10 [Nm].

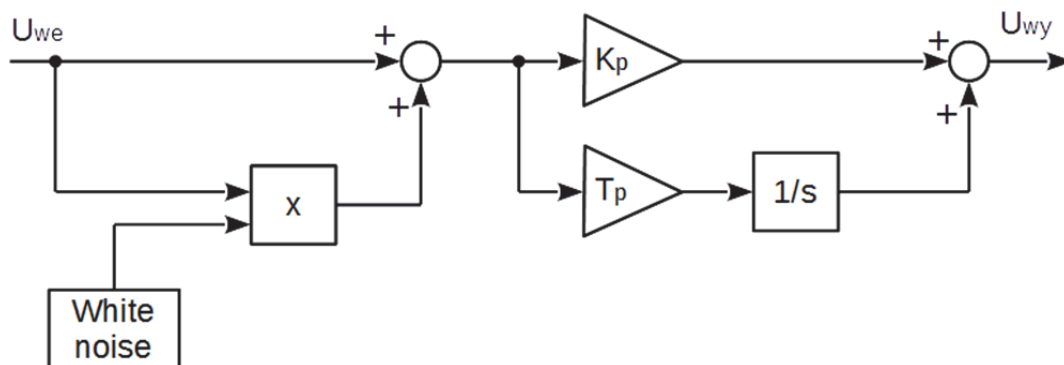
Dotychczas przedstawione obliczenia skupiały się głównie na poprawnym i suboptymalnym obliczeniu nastaw regulatorów typu PI [2, 3, 9]. Badano różne konfiguracje układu polowo-zorientowanego oraz wpływ różnych parametrów algorytmu ewolucyjnego na otrzymane wyniki. W dalszej części niniejszego artykułu zaprezentowane zostaną efekty badań rozpatrywanego układu pod kątem odporności na addytywne zakłócenia sygnałów szumem białym [4]. Badania te oparte były na symulacjach przeprowadzanych przy zastosowaniu pakietu MATLAB/Simulink.



Rys. 2. Przebiegi: zadany (b) oraz zrealizowany przez układ sterowania na podstawie obliczonych parametrów regulatorów typu PI (a) [opr. wł.]

### 3. BADANIA ODPORNOŚCI UKŁADU FOC NA ZAKŁÓCENIA SZUMEM BIAŁYM

Badania wpływu zakłóceń na dynamikę układu (rys. 3) przeprowadzono, stosując losowe zakłócenie w postaci szumu białego jako addytywnej składowej sygnału wejściowego regulatora.



Rys. 3. Schemat regulatora z uwzględnieniem szumu białego zawartego w sygnale wejściowym [opr. wł.]

gdzie:  $U_{we}$  – sygnał wejściowy regulatora,  $U_{wy}$  – sygnał wyjściowy regulatora,  $K_p$  – wzmacnienie regulatora,  $T_p$  – współczynnik zależny od czasu zdwojenia regulatora

Układ badano:

- wprowadzając szum biały do każdego z regulatorów osobno i obserwowano wyjściową prędkość obrotową,
- wprowadzając szum biały do wszystkich regulatorów jednocześnie i obserwowano prędkość obrotową.

Miarą wyjściową była średnia wartość bezwzględnego błędu procentowego wyrażona powszechnie znanym wzorem:

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

gdzie:

- $MAPE$  – wartość średniego bezwzględnego błędu procentowego (ang. *Mean Absolute Percentage Error*),
- $n$  – liczba momentów czasu, w którym mierzono wartości błędów ( $n = 5000$ ,  $t = 5$  s,  $\Delta t = 0,001$  s),
- $x_{zi}$  – wartość zadana prędkości obrotowej mierzonej w kolejnej  $i$ -tej chwili czasu,
- $x_i$  – wartość wyjściowa układu sterowania FOC w kolejnej chwili czasu  $i$ .

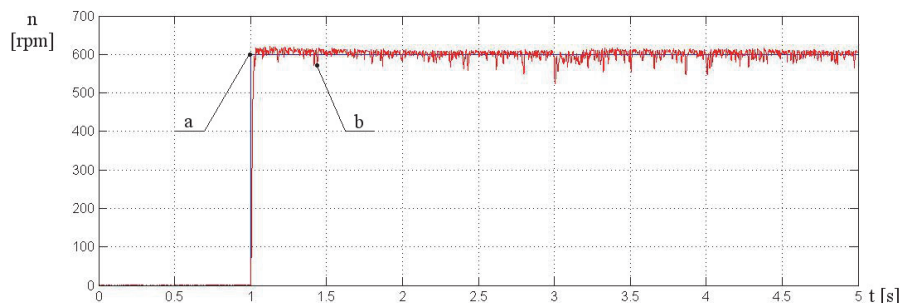
Wyniki obliczeń przedstawiono w tabeli 2.

Tabela 2.

## Wartości średniego bezwzględnego błędu procentowego dla poszczególnych regulatorów

Regulatory, na których wejście podano szum biały	Wartości MAPE sygnału wejściowego	Wartości MAPE prędkości obrotowej
Bez wprowadzonych zakłóceń	0%	0,6601%
Szum biały podawano na wejście regulatora prądu w torze strumienia magnetycznego	1%	0,6601%
	2%	0,6601%
	5%	0,6602%
	10%	0,6602%
	20%	0,6604%
	25%	0,6605%
	50%	0,6611%
	100%	0,6639%
Szum biały podawano na wejście regulatora prądu w torze prędkości obrotowej	1%	0,6601%
	2%	0,6603%
	5%	0,6640%
	10%	0,6788%
	20%	0,7316%
	25%	0,7611%
	50%	0,9889%
	100%	1,7637%
Szum biały podawano na wejście regulatora strumienia magnetycznego	1%	0,6601%
	2%	0,6600%
	5%	0,6598%
	10%	0,6595%
	20%	0,6589%
	25%	0,6588%
	50%	0,6590%
	100%	0,6648%
Szum biały podawano na wejście regulatora momentu elektromagnetycznego	1%	0,6601%
	2%	0,6601%
	5%	0,6600%
	10%	0,6601%
	20%	0,6605%
	25%	0,6609%
	50%	0,6659%
	100%	0,6988%
Szum biały podawano na wejście regulatora prędkości obrotowej	1%	0,6602%
	2%	0,6602%
	5%	0,6604%
	10%	0,6608%
	20%	0,6616%
	25%	0,6621%
	50%	0,6676%
	100%	0,6933%
Szum biały podawano na wejścia wszystkich regulatorów	1%	0,6600%
	2%	0,6602%
	5%	0,6632%
	10%	0,6757%
	20%	0,7239%
	25%	0,7569%
	50%	0,9717%
	100%	1,6833%

Na rys. 4. przedstawiono przebieg prędkości obrotowej silnika przy zakłóconych wejściach regulatorów oraz zakłóconym sygnale momentu obciążenia.



Rys. 4. Przebiegi prędkości obrotowej: zadanej (a) oraz obliczonej, będącej odpowiedzią układu sterowania z wprowadzonymi szumami na wszystkich wejściach regulatorów na poziomie 100% na skok jednostkowy prędkości obrotowej oraz skok obciążenia (b) [opr. wł.]

#### 4. PODSUMOWANIE

Niezerowa wartość średnia bezwzględnego błędu procentowego wielkości wyjściowej układu bez wprowadzonych zakłóceń wynika z faktu, że wartość zadana prędkości obrotowej nie jest równa wartości prędkości obrotowej, jaką realizował układ sterowania. W przypadku układu sterowania bez zakłóceń występuje przeregulowanie, a przebieg charakteryzuje się długim czasem regulacji (rys. 2). Ponadto w 3. sekundzie symulacji obciążono skokowo silnik indukcyjny. Różnice w przebiegach a i b na rys. 2. powodują, że wartość wskaźnika MAPE jest niezerowa.

W sytuacji, kiedy szum biały występował na wejściu regulatora strumienia magnetycznego, wartość wskaźnika MAPE była mniejsza niż w przypadku bez zakłóceń. W przypadku występowania szumu białego na wejściu regulatora prądu w torze prędkości obrotowej zaobserwowano największą, lecz akceptowalną wartość wskaźnika MAPE. Spowodowane to jest nieoptymalnymi nastawami regulatora. Jak wspomniano wcześniej, nastawy te zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny, gdzie na wstępie zakłada się jego nieoptymalne wyniki, różniące się do 5% od wartości optymalnych. Dodana do sygnału niezakłóconego wartość zakłóceń charakteryzowała się amplitudą równą amplitudzie sygnału niezakłóconego dla wszystkich regulatorów.

Jak wynika z rys. 4., tak duże zakłócenie sygnałów wejściowych regulatorów niekorzystnie wpływa na przebieg prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania. Może to spowodować wystąpienie dużych drgań całego układu, a przez to jego znacznie

Wartość średnia badanych szumów jest równa 100% amplitudy sygnału zadającego prędkość obrotową oraz momentu obciążenia.

szybsze zużycie. Przy dobranych nastawach regulatorów układ charakteryzuje się dużą odpornością na zakłócenia, jest stabilny.

#### Literatura

- Głowacz A., Głowacz Z.: *Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words — Diagnostyka silnika indukcyjnego oparta na analizie sygnałów akustycznych z zastosowaniem FFT i klasyfikatora opartego na Archives of Metallurgy and Materials*, Polish Academy of Sciences, Committee of Metallurgy, Institute of Metallurgy and Materials Science, ISSN 1733-3490, 2010, vol. 55, iss. 3, pp. 707-712.
- 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, vol. LIX, article No. 1959, Ostrava 2013.
- Hudy W., Jaracz K.: *Evolutionary operators impact on results of evolutionary parametric optimization of FOC system with induction motor (Wpływ operatorów ewolucyjnych na wyniki ewolucyjnej optymalizacji parametrycznej układu FOC z silnikiem indukcyjnym)*, 39. Konferencja „Automatyka Telekomunikacja Informatyka ATI 2013”, Zakopane, 30 września – 2 października 2013 r. (in Polish).
- Jaracz K.: *Rozszerzone modele wrażliwości maszyn prądu stałego przy zakłóceniach niezdeterminowanych*, Wydawnictwo naukowe WSP, Kraków 1998.
- Kaźmierkowski M.P.: *Porównanie metody sterowania polowzorowanego z metodą bezpośredniej regulacji momentu silnika klatkowego*. „Przegląd Elektrotechniczny”, 1998, nr 4.
- Leonard W.: *Control of Electrical Drives*, Springer Verlag, Berlin 1985.
- Miksiewicz R.: *Maszyny elektryczne*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- Orłowska-Kowalska T., *Control systems of the induction motors without sensors*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- Vítečková M., Vítěček A.: *Vybrané metody seřizování regulátorů*, VŠB-TU Ostrava, Fakulta strojní, Ostrava 2011, ISBN 978-80-248-2503-8, 230.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.