

# Ewolucyjny dobór parametrów regulatorów PI w układzie sterowania połowo-zorientowanego z silnikiem pierścieniowym

Współczesne układy napędowe z silnikami indukcyjnymi (w tym pierścieniowymi) budowane są z wykorzystaniem przemienników częstotliwości, często z możliwością odzyskiwania energii. Są to układy z bezpośrednim sterowaniem momentem lub ze sterowaniem połowo-zorientowanym. W niniejszej pracy wykorzystując algorytm ewolucyjny dobrano wartości nastaw regulatorów (strumienia, prędkości, momentu elektromagnetycznego i prądów) w układzie sterowania połowo-zorientowanego z silnikiem pierścieniowym s211e44. Funkcją uczącą była skokowa zmiana wartości prędkości obrotowej oraz skokowo zadana zmiana momentu obciążenia podczas pracy silnika. Układ sterowania zweryfikowano przy pomocy pakietu MATLAB/Simulink.

## 1. WSTĘP

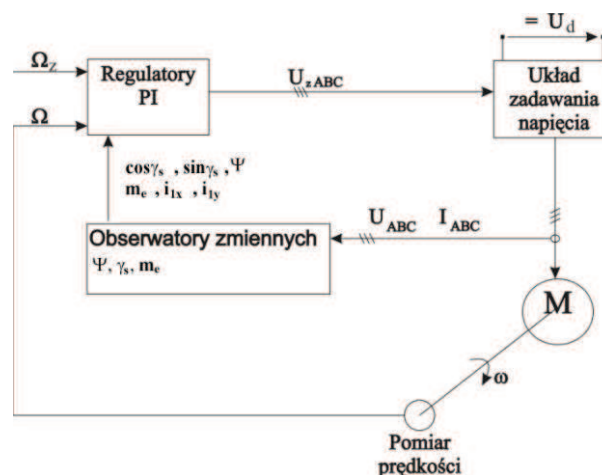
Współczesne układy napędowe z silnikami pierścieniowymi budowane są w oparciu o przemienniki częstotliwości. Są to układy zamknięte ze sterowaniem połowo-zorientowanym (ang. *Field Oriented Control* – w skrócie FOC) lub z bezpośrednim sterowaniem momentem (ang. *Direct Torque Control* – w skrócie DTC). W niniejszej pracy do analizy wybrano układ FOC [2,3,5,6].

W układzie ze sterowaniem połowym wektor prądu stojana jest rozłożony na składowe prostokątne  $i_1^x, i_1^y$ . Amplituda skojarzonego strumienia wirnika jest proporcjonalna do składowej  $i_1^x$ , natomiast moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik pierścieniowy jest proporcjonalny do składowej prądu  $i_1^y$ .

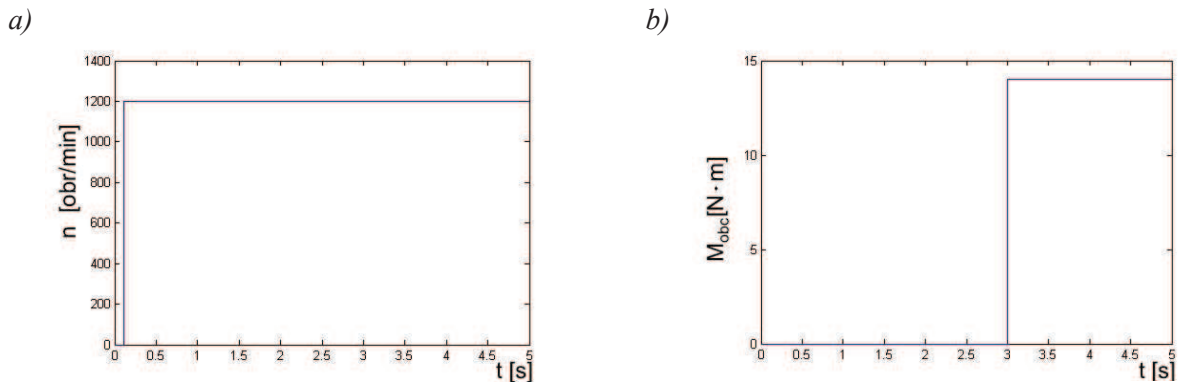
Głównym blokiem opisywanego układu sterowania jest blok transformacji wielkości z prostokątnego układu 0xy wirującego z prędkością  $d\gamma_s/dt$ , do układu  $0\alpha\beta$  związanego sztywno ze stojanem. Niezbędny do transformacji kąt  $\gamma_s$  (a dokładniej sinus i cosinus tego kąta) otrzymuje się np. przez wykorzystanie obserwatora strumienia zbudowanego na podstawie modelu matematycznego silnika pierścieniowego [4]. Z obserwatora otrzymuje się też wartość momentu elektromagnetycznego oraz amplitudę sko-

jarzonego strumienia wirnika silnika. Na rys. 1 przedstawiono schemat blokowy układu sterowania FOC z silnikiem pierścieniowym.

Dobór parametrów regulatorów PI w rozpatrywanym układzie jest zadaniem trudnym. Jedną z metod jest przedstawiona w dalszym ciągu metoda ewolucyjna wykorzystująca do optymalizacji parametrycznej odpowiedni algorytm ewolucyjny (AE) [1,2].



Rys. 1. Schemat blokowy układu sterowania FOC z silnikiem pierścieniowym



Rys. 2. Przebieg prędkości zadanej (a) oraz przebieg momentu obciążenia (b) w układzie sterowania FOC z silnikiem pierścieniowym

**Tabela 1**  
Parametry algorytmu ewolucyjnego

Liczba pokoleń	1 000 000
Wielkość populacji	200
Liczba krzyżowań / pokolenie	80
Liczba mutacji / pokolenie	80
Liczba mutacji postępowej / pokolenie	od 30 do 100. Co każde 10 000 pokoleń liczbę tę zwiększono od 30 co 1 do granicy 100 na pokolenie
Szerokość zakresu mutacji zwykłej	$0,4 \times i$ -ty zakres
Szerokość zakresu mutacji postępowej	$0,01 \times i$ -ty zakres
Liczba punktów, w których obliczone są kryteria (P)	150
$N_{r,i}$	wielkość maksymalna uzyskana dla $i$ -tej charakterystyki pomiarowej

W niniejszej pracy wykorzystano jedno kryterium jakości będące sumą wartości bezwzględnych różnicy między przebiegiem zadany a przebiegiem otrzymanym dla bieżących wartości nastaw regulatorów w dyskretnych momentach czasu. Funkcja oceny była obliczana w każdej chwili czasowej, w której rozwiązywane były równania różniczkowe i całkowe. Zastosowano dwie metody selekcji [1]: metodę turnieju oraz metodę deterministyczną w proporcjach czasowych 70% / 30%. Przebiegi prędkości zadanej oraz momentu obciążenia, jakie realizować miał układ sterowania, przedstawiono na rys. 2.

## 2. DOBÓR NASTAW REGULATORÓW PI W UKŁADZIE FOC Z SILNIKIEM PIERŚCIENIOWYM s211e44

Dobór nastaw regulatorów polegał na jednoczesnym obliczeniu przez AE o parametrach z tabeli 1 wzmocnień regulatorów  $K_{p,i}$  oraz współczynników  $T_{p,i}$  według wzoru (1).

AE dokonywał obliczeń wszystkich dziesięciu parametrów. Dla każdego silnika przeprowadzono po dziesięć niezależnych procesów ewolucji. Identyfikowane współczynniki zależne od czasów zdwojenia wyrażają się wzorem:

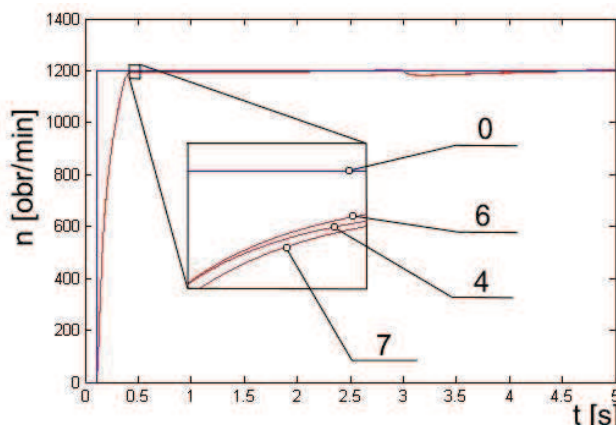
$$T_{p,i} = \frac{K_{p,i}}{T_{i,i}}, \text{ dla } i = 1..5 \quad (1)$$

Współczynniki  $K_{p,i}$  oraz  $T_{p,i}$  są parametrami regulatorów  $P_{Ti}$  ( $i = 1..5$ ) z rys. 1. Wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny jednocześnie (tabela 2).

**Tabela 2**  
Wyniki ewolucji wzmocnień regulatorów oraz parametrów  $T_{p,i}$  regulatorów PI dla silnika s211e44

p	$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	$K_{p,5}$
1	30,1	0,81	20,1	0,50	10,1
2	29,8	0,80	20,2	0,49	9,8
3	30,3	0,79	20,0	0,52	10,2
4	30,2	0,77	19,9	0,50	9,9
5	30,0	0,80	19,8	0,49	10,1
6	30,4	0,79	20,1	0,51	9,8
7	29,9	0,82	19,9	0,48	10,2
8	29,8	0,78	20,0	0,52	9,9
9	30,0	0,82	19,7	0,51	10,0
10	30,1	0,81	20,3	0,48	9,8

Lp.	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$	$T_{p,3}$	$T_{p,4}$	$T_{p,5}$	K [obr/min]
1	2,00	0,051	20,1	0,09	2,99	$1,47 \cdot 10^6$
2	2,01	0,050	20,2	0,09	2,98	$1,56 \cdot 10^6$
3	1,98	0,049	19,7	0,09	3,01	$1,49 \cdot 10^6$
4	1,99	0,052	20,0	0,11	3,02	$1,40 \cdot 10^6$
5	1,99	0,048	19,9	0,08	2,97	$1,61 \cdot 10^6$
6	2,01	0,052	20,0	0,11	2,96	$1,39 \cdot 10^6$
7	2,02	0,049	19,7	0,10	2,96	$1,42 \cdot 10^6$
8	1,97	0,051	20,1	0,10	3,00	$1,44 \cdot 10^6$
9	2,02	0,050	19,8	0,09	2,99	$1,45 \cdot 10^6$
10	2,00	0,048	20,1	0,10	3,02	$1,46 \cdot 10^6$



Rys. 3. Przebiegi prędkości obrotowej: zadanej '0' oraz odpowiadające nastawom regulatorów reprezentowanych przez osobniki '4', '6' i '7'

Na rys. 3 wykreślono przebiegi prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania zadany oznaczony jako '0' oraz w układach sterowania odpowiadającym osobnikom '4', '6', '7' o najmniejszej wartości funkcji oceny z tabeli 2.

Jak wynika z tabeli 2 najlepszym osobnikiem jest osobnik '6' reprezentujący najbardziej optymalne nastawy regulatorów PI w układzie sterowania z silnikiem s211e44.

### 3. PODSUMOWANIE

Silnik s211e44 posiada dużą bezwładność, co uniemożliwia szybkie zmiany wartości prędkości obrotowej układu sterowania tym silnikiem. Układ dobrze odtwarzał zadane przebiegi prędkości obrotowej i momentu obciążenia w przyjętym przedziale dokładności obliczeń. Należy stwierdzić, że dobór nastaw regulatorów PI został przeprowadzony poprawnie, a otrzymane wyniki są zadowalające. Oznacza to, że zaprojektowany algorytm ewolucyjny nadaje się do określania wartości doboru nastaw regulatorów PI<sub>i</sub> w układzie sterowania polowozorientowanego z silnikiem pierścieniowym, którego parametry modelu matematycznego są znane.

#### Literatura

1. Hudy W., Jaracz K.: Porównanie identyfikacji parametrów modelu matematycznego silnika indukcyjnego przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego oraz addytywnego i multiplikatywnego wskaźnika jakości. 36 Konferencja Automatyka, Telekomunikacja Informatyka – ATI 2008, Szczyrk 28-30 maj 2008.

2. Hudy W., Jaracz K.: Dobór parametrów w układzie sterowania polowozorientowanego z silnikiem indukcyjnym przy zastosowaniu algorytmu ewolucyjnego. XIII Scientific Conference Computer Applications in Electrical Engineering, ZKwE'2007 Poznań 16-18 kwiecień 2007 r., str. 281-282.
3. Kaźmierkowski M.P.: Porównanie metody sterowania polowozorientowanego z metodą bezpośredniej regulacji momentu silnika klatkowego. Przegląd Elektrotechniczny 4/98, Warszawa 1998.
4. Orłowska-Kowalska T.: Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
5. Sieklucki G., Orzechowski T., Sykulski R.: Prosty sposób optymalizacji parametrycznej w metodzie FOC dla silnika indukcyjnego. Elektrotechnika i Elektronika: półrocznik AGH – 2005 t. 24 z. 1 s. 93-99
6. Sieklucki G., Orzechowski T., Sykulski R.: Tuning of Speed Loop in Indirect Field Oriented Control of Induction Motors. W: ICC'2003: proceedings of 4th International Carpathian Control Conference (ICCC'2003).

Recenzent: dr hab. inż. Z. Głowacz