

dr inż. WIKTOR HUDY

dr hab. inż. KAZIMIERZ JARACZ prof. Uniwersytetu Pedagogicznego
Uniwersytet Pedagogiczny im. KEN w Krakowie, Instytut Techniki

Analiza wyników symulacji ewolucyjnej optymalizacji parametrycznej różnych układów sterowania połowo-zorientowanego z silnikiem indukcyjnym

W chwili obecnej silniki indukcyjne (w tym pierścieniowe) są powszechnie stosowanymi maszynami prądu przemiennego. Na popularność wykorzystania tego typu maszyn elektrycznych wpływa niski koszt budowy oraz szybki rozwój układów sterowania wektorowego. W niniejszym artykule porównano układy sterowania DFOC, których wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny. 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

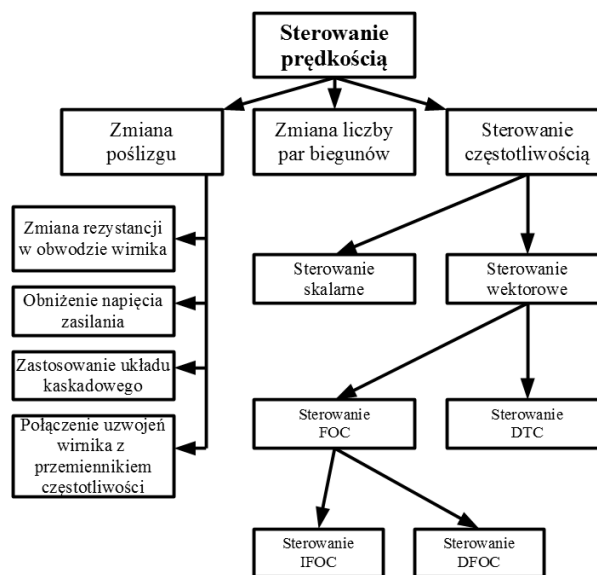
Nowoczesne układy sterowania prędkością obrotową z silnikami indukcyjnymi charakteryzują się precyzją nastawianej prędkości od stanu zatrzymania do wartości przekraczających znamionową wartość prędkości obrotowej zastosowanej maszyny elektrycznej dla znamionowej wartości momentu obrotowego. Dobór wartości nastaw regulatorów był przedmiotem wielu prac. W niniejszej pracy wykorzystano do tego celu algorytm ewolucyjny [1, 2, 3] o znanych parametrach [1, 2, 3].

2. RODZAJE UKŁADÓW STEROWANIA POŁOWO-ZORIENTOWANEGO

Sterowanie prędkością obrotową silnika indukcyjnego jest tematem wielu prac [1, 2, 3, 4, 5, 6, 7]. Najbardziej efektywnymi układami sterowania są układy sterowania wektorowego. Na rysunku 1 przedstawiono podział metod sterowania prędkością obrotową silnika indukcyjnego [7].

Zasada sterowania wektorowego oparta jest na zależnościach opisujących stany dynamiczne i statyczne silnika [1, 2, 3, 4, 7]. Postać układu równań uza-

leżniona jest od wyboru układu współrzędnych, w którym zapisano współrzędne wektorowe. W układzie sterowania wektorowego nastawiane są amplitudy i fazy wektorów przestrzennych: prądów, napięć i strumieni skojarzonych oraz prędkość kątowna wirnika. Jednostka sterująca układem sterowania oddziałuje na wzajemne położenie wektorów, zapewniając optymalną ich orientację w stanach ustalonych oraz



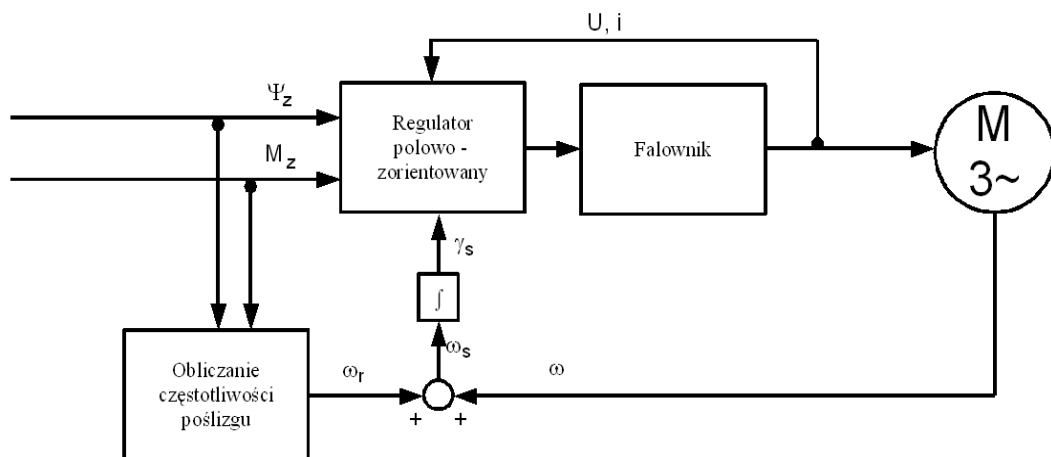
Rys. 1. Podział metod sterowania prędkością obrotową silnika indukcyjnego

dynamicznych. Niedogodnością jest konieczność wyznaczania w czasie rzeczywistym wartości i położenia wektora strumienia magnetycznego określonego w wirującym układzie współrzędnych.

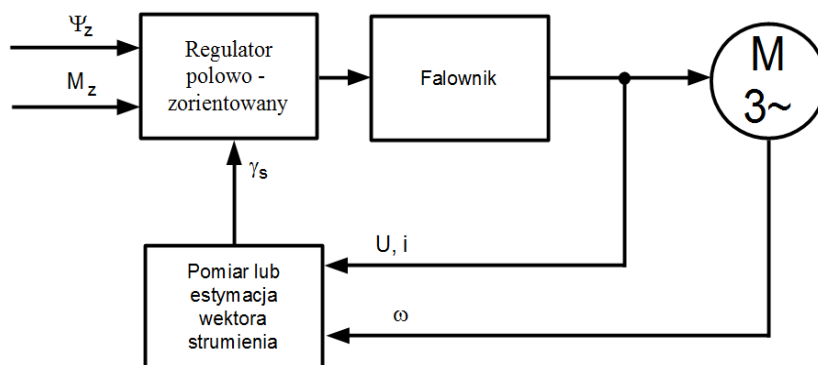
W badanym układzie we współrzędnych połowych [1, 2, 3, 7] (wirujących współbieżnie z wektorem strumienia skojarzonego wirnika ψ_r) wektor prądu stojana rozkłada się na dwie składowe i_{sx} , i_{sy} . Amplituda skojarzonego strumienia wirnika jest proporcjonalna do składowej i_{sx} , natomiast moment elektromagnetyczny wytwarzany przez silnik jest proporcjonalny do składowej i_{sy} . Podstawowym blokiem w układzie FOC jest blok transformacji współrzędnych z 0xy do ABC. Niezbędny do transformacji kąt γ_s jest wyznaczany na podstawie danych z pomiaru napięć, prądów i prędkości kątowej silnika [1, 2, 3, 7]. Znane układy sterowania połowo-zorientowanego różnią się głównie: metodą estymacji wektora strumienia, momentu elektromagnetycznego, liczbą regulatorów oraz metodą regulacji prądu falownika PWM. Do estymacji war-

tości amplitudy i położenia strumienia wirnika wykorzystuje się modele silnika lub obserwatory [7]. Regulacja prądu falownika odbywa się za pomocą nieliniowych regulatorów histerezowych lub regulatorów liniowych. W zależności od zastosowanej metody wyznaczania kąta położenia wektora pola γ_s sterowanie FOC można podzielić na [7]:

- pośrednie sterowanie połowo-zorientowane (IFOC – z ang. *Indirect Field-Oriented Control*). W układzie sterowania IFOC kąt niezbędny do transformacji γ_s wyznaczany jest na podstawie wartości zadanych momentu i strumienia oraz prędkości kątowej wału (rys. 2),
- bezpośrednie sterowanie połowo-zorientowane (DFOC – z ang. *Direct Field-Oriented Control*). W układzie sterowania DFOC kąt γ_s wyznaczany jest na podstawie bezpośredniego pomiaru (czujniki Halla, dodatkowe uzwojenia pomiarowe) lub estymacji wektora strumienia z wielkości mierzonych napięć lub prądów stojana (rys. 3).



Rys. 2. Schemat układu sterowania IFOC



Rys. 3. Schemat układu sterowania DFOC

Oznaczenia na rysunkach:

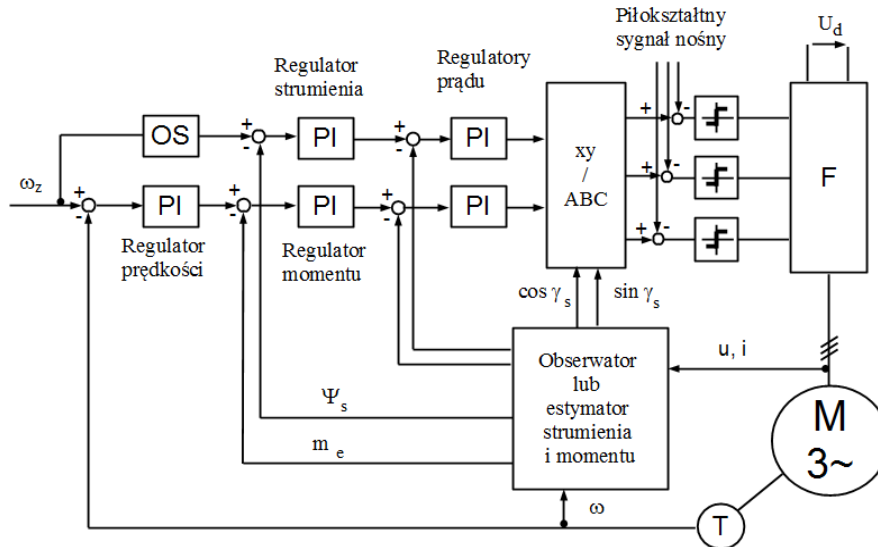
M_z – zadany moment elektromagnetyczny,

ω_r – pulsacja poślizgu,

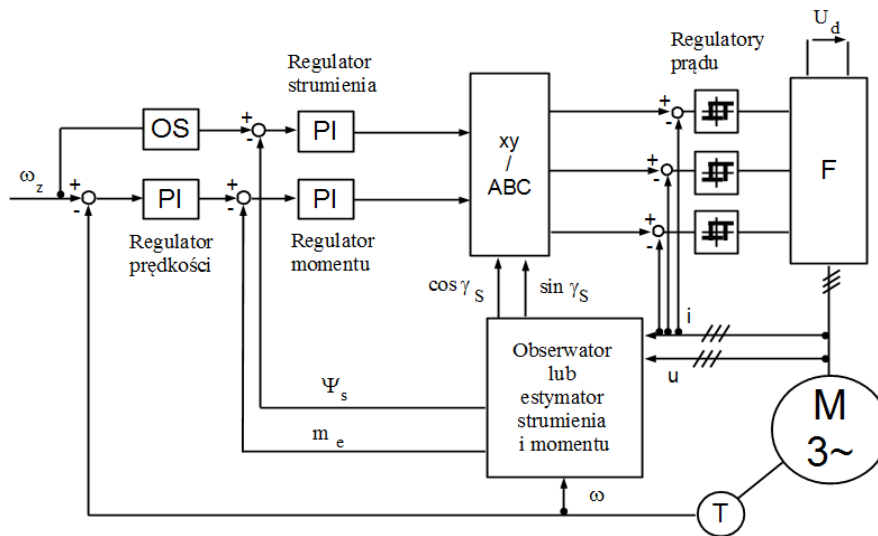
Ψ_z – strumień zadany.

Do dalszej analizy przyjęto układ sterowania DFOC. Układ ten można zrealizować na dwa podstawowe sposoby [7]: układ regulacji silnika indukcyjnego z regulatorami momentu elektromagnetycznego i linio-

wymi regulatorami prądów falownika PWM (rys. 4) oraz układ regulacji silnika indukcyjnego z regulatorami momentu elektromagnetycznego i histerezowymi regulatorami prądów falownika PWM (rys. 5).



Rys. 4. Układ regulacji silnika indukcyjnego z regulatorami momentu elektromagnetycznego i liniowymi regulatorami prądów falownika PWM



Rys. 5. Układ regulacji silnika indukcyjnego z regulatorami momentu elektromagnetycznego i histerezowymi regulatorami prądów falownika PWM

Do dalszej analizy wybrano układ sterowania DFOC z liniowymi regulatorami prądów falownika PWM.

3. UKŁAD DFOC Z PIĘCIOMA LINIOWYMI REGULATORAMI TYPU PI

Badany układ sterowania przedstawiono na rysunku 4 [1, 3]. Algorytm ewolucyjny obliczał nastawy pięciu regulatorów PI: wartości wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ oraz parametry $T_{p,i}$ zależne od wartości czasów zdwojenia $T_{i,i}$ i dane wzorem:

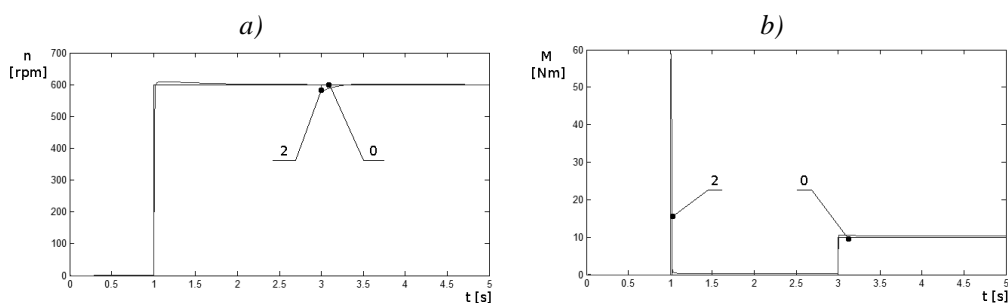
$$T_{i,i} = \frac{K_{p,i}}{T_{p,i}} \tag{1}$$

Współczynniki $K_{p,i}$ oraz $T_{p,i}$ są parametrami regulatorów PI_{*i*} ($i = 1..5$) z rysunku 4. Wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny jednocześnie (tabela 1).

Tabela 1

Wyniki obliczeń wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ oraz parametrów $T_{p,i}$ regulatorów PI dla silnika klatkowego Sg90L-6 przy pomocy algorytmu ewolucyjnego

Lp.	$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	$K_{p,5}$	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$	$T_{p,3}$	$T_{p,4}$	$T_{p,5}$	K [obr/min]
1	13.0	14.9	12.0	0.19	1.88	3.03	1.99	4.00	0.51	8.99	$1.7556 \cdot 10^4$
2	12.9	15.0	12.1	0.21	1.91	2.99	2.00	3.96	0.52	9.02	$1.7148 \cdot 10^4$
3	13.1	15.2	12.1	0.19	1.90	3.02	2.00	4.00	0.51	9.00	$1.7420 \cdot 10^4$
4	13.1	15.1	11.9	0.21	1.89	3.03	2.01	4.00	0.48	8.98	$1.7293 \cdot 10^4$
5	12.9	14.9	11.9	0.19	1.89	3.03	1.99	3.98	0.50	9.02	$1.7608 \cdot 10^4$
6	13.0	15.0	11.9	0.21	1.91	2.97	1.99	3.99	0.49	9.00	$1.7266 \cdot 10^4$
7	13.1	15.0	12.1	0.20	1.89	2.99	1.98	4.02	0.48	8.98	$1.7430 \cdot 10^4$
8	13.0	15.1	12.0	0.19	1.90	3.03	2.01	4.02	0.50	9.01	$1.7505 \cdot 10^4$
9	12.9	14.9	12.0	0.20	1.89	2.98	1.98	4.02	0.49	8.98	$1.7459 \cdot 10^4$
10	13.1	15.0	12.1	0.20	1.91	3.02	2.01	3.99	0.48	9.02	$1.7399 \cdot 10^4$



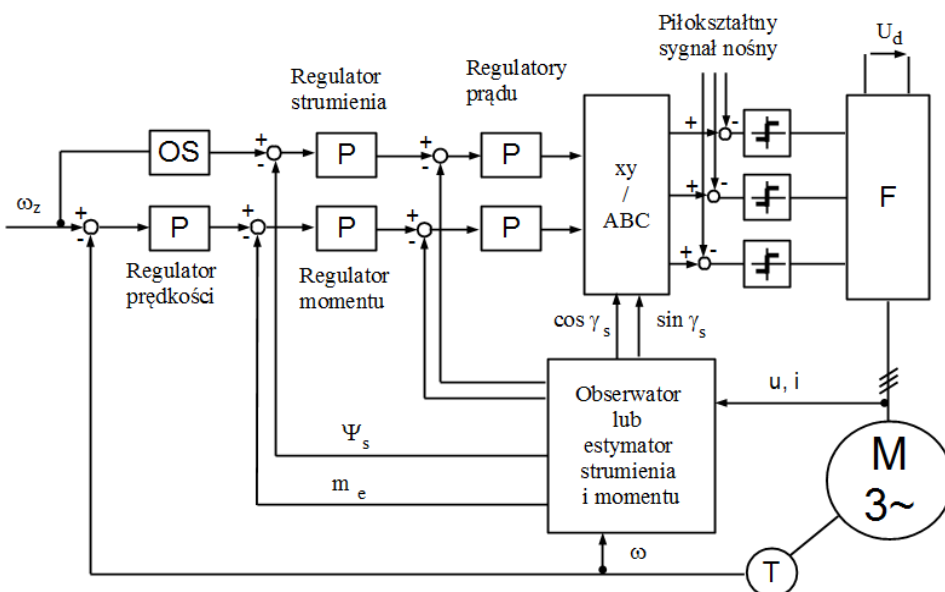
Rys. 6. Przebiegi prędkości obrotowej (a) oraz momentu obciążenia (b): zadanej '0' oraz odpowiadający nastawom regulatorów reprezentowanych przez osobnik '2'

Na rysunku 6 wykreślono przebiegi prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania: zadany oznaczony jako '0' oraz w układzie sterowania odpowiadającemu osobnikowi '2' o najmniejszej wartości funkcji oceny z tabeli 1.

Jak wynika z tabeli 1 najlepszym osobnikiem jest osobnik '2' reprezentujący optymalne nastawy regulatorów PI w badanym układzie sterowania z silnikiem klatkowym.

4. UKŁAD DFOC Z PIĘCIOMA LINIOWYMI REGULATORAMI TYPU P

Badany układ sterowania przedstawiono na rysunku 7. Algorytm ewolucyjny obliczał wartości nastaw wzmocnień $K_{p,i}$ pięciu regulatorów typu P.



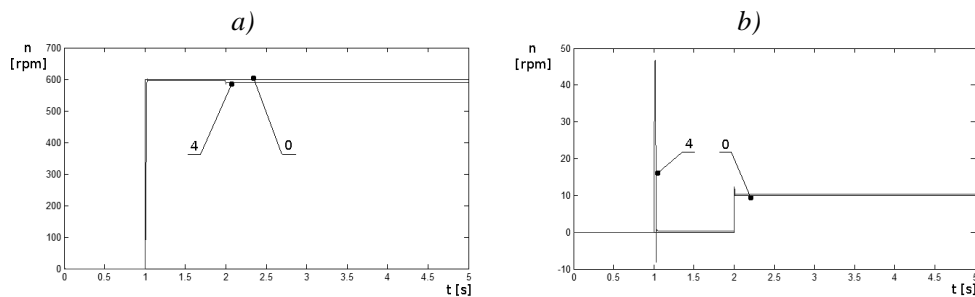
Rys. 7. Układ DFOC z pięcioma liniowymi regulatorami typu P

Wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny jednocześnie (tabela 2).

Tabela 2

Wyniki obliczeń wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ dla silnika klatkowego Sg90L-6 przy pomocy algorytmu ewolucyjnego

Lp.	$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	$K_{p,5}$	K [obr/min]
1	12.8	14.8	4.0	0.52	4.99	$4.2509 \cdot 10^4$
2	13.0	15.0	3.8	0.49	5.01	$4.3712 \cdot 10^4$
3	13.2	15.1	4.1	0.52	4.98	$4.2127 \cdot 10^4$
4	13.1	14.9	3.8	0.54	5.02	$4.1186 \cdot 10^4$
5	12.8	15.2	4.0	0.49	5.02	$4.3359 \cdot 10^4$
6	13.0	15.0	4.0	0.51	4.97	$4.2870 \cdot 10^4$
7	12.9	14.9	4.1	0.49	4.97	$4.4132 \cdot 10^4$
8	13.2	15.2	3.9	0.48	5.03	$4.3846 \cdot 10^4$
9	12.8	15.0	3.8	0.51	5.00	$4.2695 \cdot 10^4$
10	12.9	14.7	4.1	0.53	5.03	$4.1872 \cdot 10^4$



Rys. 8. Przebiegi prędkości obrotowej (a) oraz momentu obciążenia (b): zadanej '0' oraz odpowiadającego nastawom regulatorów reprezentowanych przez osobnik '4'

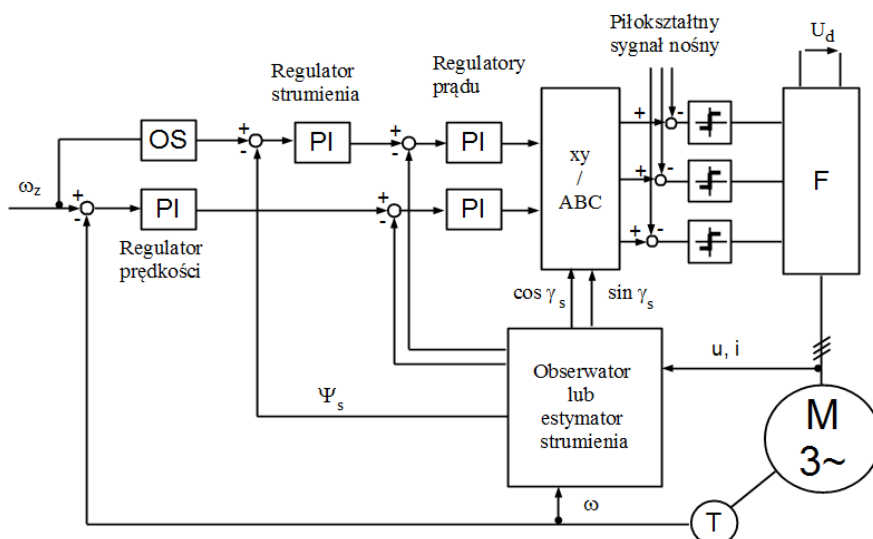
Na rysunku 8 wykreślono przebiegi prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania: zadany oznaczony jako '0' oraz w układach sterowania odpowiadającego osobnikowi '4' o najmniejszej wartości funkcji oceny z tabeli 2.

Jak wynika z tabeli 2 najlepszym osobnikiem jest osobnik '4' reprezentujący najbardziej korzystne na-

stawy regulatorów P w badanym układzie sterowania z silnikiem klatkowym.

5. UKŁAD DFOC Z CZTEREMA LINIOWYMI REGULATORAMI TYPU PI

Badany układ sterowania przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Układ DFOC z czterema liniowymi regulatorami typu PI

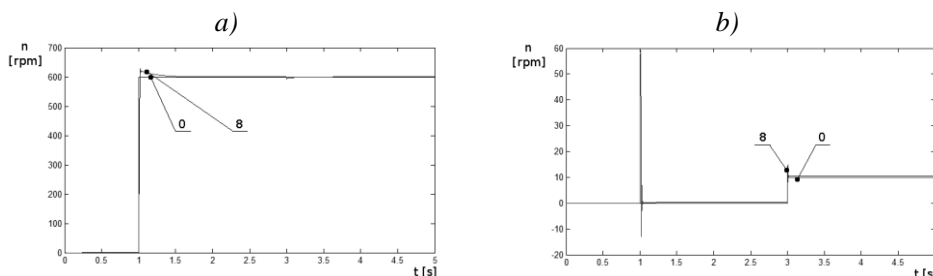
Algorytm ewolucyjny obliczał nastawy czterech regulatorów PI: wartości wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ oraz parametry $T_{p,i}$ zależne od wartości czasów zdwojenia $T_{i,i}$.

Współczynniki $K_{p,i}$ oraz $T_{p,i}$ są parametrami regulatorów PI_{*i*} (*i* = 1..4) z rysunku 9. Wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny jednocześnie (tabela 3).

Tabela 3

Wyniki obliczeń wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ oraz parametrów $T_{p,i}$ regulatorów PI dla silnika klatkowego Sg90L-6 przy pomocy algorytmu ewolucyjnego

Lp.	$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	$T_{p,1}$	$T_{p,2}$	$T_{p,3}$	$T_{p,4}$	K [obr/min]
1	13.0	14.8	12.1	1.91	2.99	1.97	4.00	8.97	$1.2089 \cdot 10^4$
2	12.9	15.0	12.2	1.90	3.03	1.99	4.02	9.02	$1.2084 \cdot 10^4$
3	13.1	15.2	12.0	1.88	2.97	2.00	4.03	9.00	$1.2116 \cdot 10^4$
4	13.0	14.9	12.1	1.88	3.01	1.97	4.01	9.02	$1.2093 \cdot 10^4$
5	13.2	15.0	11.9	1.90	3.00	2.00	4.00	8.98	$1.2127 \cdot 10^4$
6	12.9	15.2	11.8	1.92	3.02	1.98	4.00	9.03	$1.2166 \cdot 10^4$
7	13.1	14.8	12.0	1.91	2.96	2.00	4.04	9.00	$1.2101 \cdot 10^4$
8	13.0	15.0	12.3	1.89	3.04	2.02	3.98	8.98	$1.2075 \cdot 10^4$
9	12.8	15.1	11.9	1.92	2.98	2.01	3.98	9.00	$1.2166 \cdot 10^4$
10	12.9	14.9	12.0	1.90	3.00	1.99	3.99	8.99	$1.2126 \cdot 10^4$



Rys. 10. Przebiegi prędkości obrotowej (a) oraz momentu obciążenia (b): zadanej '0' oraz odpowiadający nastawom regulatorów reprezentowanych przez osobnik '8'

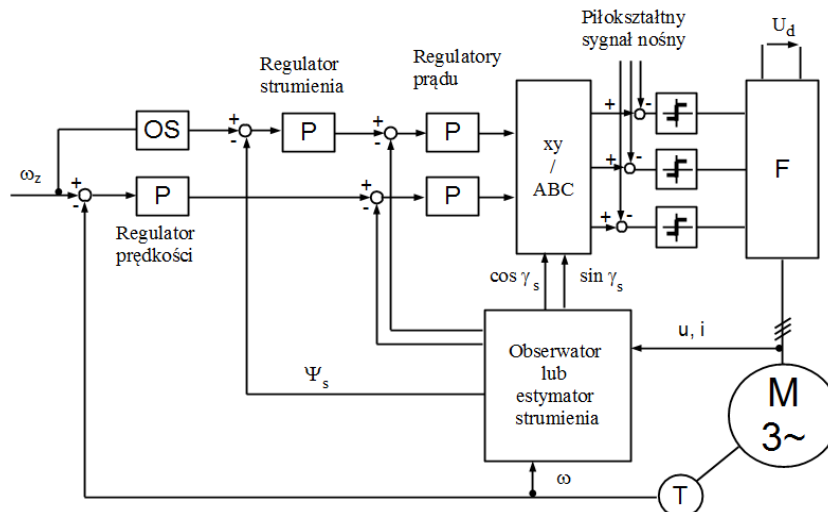
Na rysunku 10 wykreślono przebiegi prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania: zadany oznaczony jako '0' oraz odpowiadający osobnikowi '8' o najmniejszej wartości funkcji oceny z tabeli 3.

Jak wynika z tabeli 3 najlepszym osobnikiem jest osobnik '8' reprezentujący optymalne nastawy regu-

latorów PI w badanym układzie sterowania z silnikiem klatkowym.

6. UKŁAD DFOC Z CZTEREMA LINIOWYMI REGULATORAMI TYPU P

Badany układ sterowania przedstawiono na rys. 11.



Rys. 11. Układ DFOC z czterema liniowymi regulatorami typu P

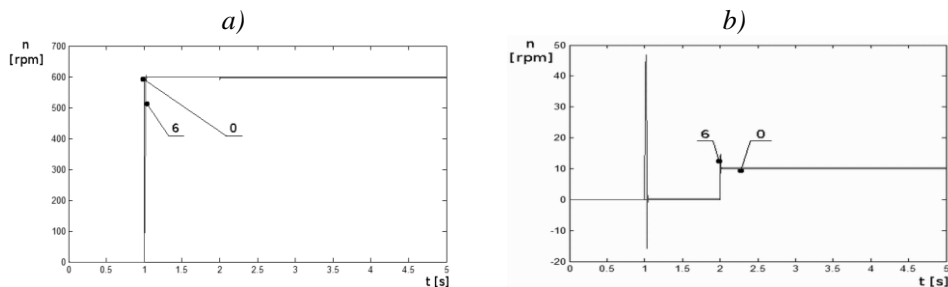
Algorytm ewolucyjny obliczał wartości nastaw wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ czterech regulatorów typu P. Współczynniki $K_{p,i}$ są parametrami regulatorów

P_i ($i = 1..4$) z rysunku 11. Wartości nastaw regulatorów zostały obliczone przez algorytm ewolucyjny jednocześnie (tabela 4).

Tabela 4

Wyniki obliczeń wzmocnień regulatorów $K_{p,i}$ dla silnika klatkowego Sg90L-6 przy pomocy algorytmu ewolucyjnego

Lp.	$K_{p,1}$	$K_{p,2}$	$K_{p,3}$	$K_{p,4}$	K [obr/min]
1	12.7	14.9	3.96	5.00	$2.3268 \cdot 10^4$
2	12.9	14.7	4.00	5.00	$2.3392 \cdot 10^4$
3	12.4	14.8	3.98	5.01	$2.3325 \cdot 10^4$
4	12.8	14.8	4.05	4.96	$2.3418 \cdot 10^4$
5	12.6	15.0	4.00	4.99	$2.3214 \cdot 10^4$
6	12.6	15.1	3.96	5.02	$2.3073 \cdot 10^4$
7	12.8	15.1	4.03	4.97	$2.3175 \cdot 10^4$
8	12.5	15.0	4.00	5.02	$2.3137 \cdot 10^4$
9	12.9	15.0	4.01	4.98	$2.3222 \cdot 10^4$
10	12.5	14.8	4.00	4.98	$2.3396 \cdot 10^4$



Rys. 12. Przebiegi prędkości obrotowej (a) oraz momentu obciążenia (b): zadanej '0' oraz odpowiadający nastawom regulatorów reprezentowanych przez osobnik '6'

Na rysunku 12 wykreślono przebiegi prędkości obrotowej realizowanej przez układ sterowania: zadany oznaczony jako '0' oraz układ odpowiadający osobnikowi '6' o najmniejszej wartości funkcji oceny z tabeli 4.

Jak wynika z tabeli 4 najlepszym osobnikiem jest osobnik '6' reprezentujący najkorzystniejsze nastawy regulatorów PI w badanym układzie sterowania z silnikiem klatkowym.

7. PODSUMOWANIE

Jak wynika z tabel 1-4 zastosowany algorytm ewolucyjny był zbieżny. Wyniki były powtarzalne. Najdokładniejszym układem sterowania jest układ DFOC z pięcioma regulatorami PI, ale proces ewolucji, ze względu na obliczanie 10. parametrów jednocześnie, trwał najdłużej. Najkrótszym procesem ewolucji był proces z obliczaniem wartości nastaw czterech wzmocnień regulatorów P w układzie DFOC, lecz układ ten jest najmniej dokładny ze względu na występowanie uchybu statycznego oraz znacznych skoków momentu elektromagnetycznego.

Literatura

1. Hudy W., Jaracz K.: Dobór parametrów w układzie sterowania połowo-zorientowanego 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.
2. Hudy W., Jaracz K.: Ewolucyjny dobór parametrów regulatorów PI w układzie sterowania połowo-zorientowanego z silnikiem pierścieniowym. 37 Konferencja Automatyka, Telekomunikacja Informatyka - ATI 2009 Szczyrk 30 wrzesień - 02 październik 2009.
3. Hudy W., Jaracz K.: Porównanie wyników symulacji ewolucyjnej optymalizacji parametrycznej układów sterowania FOC z silnikiem klatkowym z regulatorem momentu oraz bez regulatora momentu. XIII Krajowa Konferencja Elektryki Górniczej, Szczyrk 16-18 czerwca 2010.
4. Kalus M., Skoczowski T.: Sterowanie napędami asynchronicznymi i prądu stałego. Pracownia Komputerowa Jacka Skalmierskiego. Gliwice 2003.
5. Kaźmierkowski M.P.: Porównanie metody sterowania połowo-zorientowanego z metodą bezpośredniej regulacji momentu silnika klatkowego. Przegląd Elektrotechniczny 1998, nr 4. Warszawa 1998.
6. Leonard W.: Control of Electrical Drives. Springer Verlag. Berlin 1985.
7. Orłowska-Kowalska T.: BezczyJNIkowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej. Wrocław 2003.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Zygfryd Głowacz