

## Zastosowanie algorytmu Grey Wolf Optimizer w optymalizacji nastaw regulatora stanu układu trójmasowego

Mateusz Żychlewicz\*

\*Politechnika Wrocławska, Katedra Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych,  
ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław

**Streszczenie:** W artykule przedstawiono układ regulacji prędkości napędu złożonego napędu elektrycznego, uwzględniającego podwójne połączenie sprzężyste. W nadrzędnej pętli sterowania zaimplementowano regulator stanu. Głównym elementem pracy jest optymalizacja parametrów zewnętrznej części układu za pomocą algorytmu metaheurystycznego GWO (Grey Wolf Optimizer). Zaprojektowana w ten sposób struktura sterowania została porównana z klasycznym rozwiązaniem projektowym, w którym zastosowano metodę rozłożenia biegunów równania charakterystycznego do wyznaczenia nastaw regulatora. Uzyskano wysoką precyzję odtwarzania sygnału zadanego. Przeprowadzona została również analiza działania struktury sterowania w obecności zmian parametrów układu trójmasowego. Przedstawione rozważania teoretyczne zostały potwierdzone w testach obliczeniowych.

**Słowa kluczowe:** Grey Wolf Optimizer, regulator stanu, układ trójmasowy, napęd elektryczny

## Application of the Grey Wolf Optimizer in the optimization of state space controller for three-mass drive

**Abstract:** This article presents control structure of complex drive that contains two elastic couplings. In the outer control loop the state space controller was implemented. The main point of described work is optimization of parameters used in this part of the drive using metaheuristic algorithm called GWO (Grey Wolf Optimizer). The control structure, designed using mentioned optimization method, was compared to classic solution, known from control theory. High precision of reference speed tracking was achieved. An analysis of the system in the presence of mechanical parameters changes was also prepared. Theoretical considerations were confirmed in numerical tests.

**Keywords:** Grey Wolf Optimizer, state space controller, three-mass system, electrical drive

### 1. Wstęp

Zagadnienia analizowane w teorii sterowania oraz problemy spotykane w rozwiązaniach przemysłowych prowadzą do implementacji wielu nowych, efektywnych algorytmów sterowania. W wielu przypadkach proponowane regulatory są złożone obliczeniowo, jednak charakteryzują się istotnymi dla praktycznych aplikacji właściwościami (należą do nich odporność na zmiany parametrów obiektu, uproszczenia dotyczące etapu projektowania, itp.) [1]. Wśród najbardziej popularnych technik, które znalazły liczne zastosowania rzeczywiste można wyszczególnić, struktury sterowania wykorzystujące:

- układy adaptacyjne [2],

- modele rozmyte [3],
- sieci neuronowe [4],
- algorytmy predykcyjne [5],
- regulatory ślizgowe [6], itd.

Jednak nadal, najczęściej w zastosowaniach rzeczywistych, spotykane są regulatory PI/PID. Jest to związane z prostotą implementacyjną oraz znanymi metodami strojenia nastaw, zapewniającymi stabilność układu regulacji. Wadą powyższych rozwiązań jest zależność precyzji sterowania od dokładności identyfikacji obiektu (modelu matematycznego oraz jego parametrów). Bezpośrednią konsekwencją takiego podejścia jest konieczność wykonywania złożonych obliczeń projektowych. Należy również zaznaczyć, że najczęściej klasyczne metody strojenia regulatorów

http://ijes.pwr.wroc.pl

umożliwiają dobór nastaw regulatora, które są optymalne jedynie lokalnie, nie uwzględniają one zmian parametrów oraz dynamiki układu.

Korzystnym rozwiązaniem w projektowaniu układów regulacji wydaje się zastosowanie optymalizacyjnych algorytmów wywodzących się ze sztucznej inteligencji. Wśród korzystnych cech takich metod należy wymienić:

- uniwersalność metodyki implementacyjnej dla różnych zastosowań,
- brak konieczności obliczeń funkcji celu względem obliczanych parametrów,
- możliwość uniknięcia optimum lokalnego.

Najbardziej popularne rozwiązania, w tym zakresie, dotyczą zastosowań algorytmów metaheurystycznych, przykładem mogą być algorytmy genetyczne [7], [8]. W ostatnich latach często opisywane są aplikacje rozwiązań bazujących na cechach stadnych organizmów [9], [10]. Jednym z nowych algorytmów w tej grupie jest algorytm *BAT* [11]. Działanie tego optymalizatora opiera się na echolokacji nietoperzy podczas lotu. Algorytm ten został efektywnie zaaplikowany w optymalizacji nastaw regulatorów w napędzie elektrycznym [12]-[14]. Kolejnym algorytmem metaheurystycznym, jest *PSO (Particle Swarm Optimization)*. Bazując na ilości publikacji na temat tej metody oraz jej modyfikacji można stwierdzić, że jest to jeden z najbardziej rozpowszechnionych algorytmów optymalizacyjnych [15]-[17].

W niniejszym artykule opisano zastosowanie algorytmu *Grey Wolf Optimizer* [18] w optymalizacji regulatora prędkości specyficznego układu napędowego, w którym uwzględniona została rozbudowana część mechaniczna. Występowanie sprzężystych sprzęgieł, wprowadza dodatkowe zakłócenia w strukturze sterowania, w postaci drgań skrętnych. Zjawiska pojawiające się w takiej strukturze obserwowane są w maszynach walcowniczych, konstrukcjach robotów oraz urządzeniach przemysłowych zawierających długie elementy łączące [19]. Publikacja, po krótkim wprowadzeniu, przedstawia model matematyczny obiektu. Następnie zaprezentowano szczegóły obliczeń GWO oraz wyniki badań. Ostatni rozdział zawiera podsumowanie.

## 2. Model struktury sterowania

Schemat układu trójmasowego wraz ze strukturą sterowania przedstawiono na rysunku 1. Obiekt ten składa się z dwóch silników, przekładni i wałów napędowych które łączą poszczególne elementy. Równania (1)-(5) przedstawiają opis matematyczny omawianego obiektu [20]:

$$T_1 \frac{d\omega_1(t)}{dt} = m_e(t) - m_{12s}(t), \quad (1)$$

$$T_2 \frac{d\omega_2(t)}{dt} = m_{12s}(t) - m_{23s}(t), \quad (2)$$

$$T_3 \frac{d\omega_3(t)}{dt} = m_{23s}(t) - m_L(t), \quad (3)$$

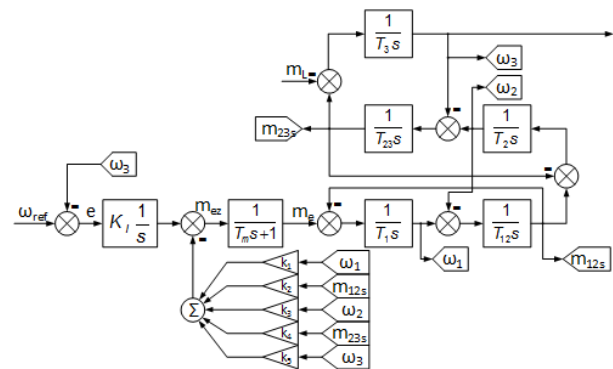
$$T_{12} \frac{dm_{12s}(t)}{dt} = \omega_1(t) - \omega_2(t), \quad (4)$$

$$T_{23} \frac{dm_{23s}(t)}{dt} = \omega_2(t) - \omega_3(t), \quad (5)$$

gdzie:  $T_1, T_2, T_3$  - stałe czasowe silnika napędowego, przekładni oraz obciążenia,  $T_{12}, T_{23}$  - stałe czasowe wałów,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3$  - prędkości silnika, przekładni, obciążenia,  $m_e$  - moment elektromagnetyczny,  $m_L$  - moment obciążenia,  $m_{12s}, m_{23s}$  - momenty skrętne występujące pomiędzy kolejnymi masami.

Przyjęto, że stałe czasowe silników oraz przekładni są równe, wynoszą  $T_1 = T_2 = T_3 = 0,203s$ , podobnie dla elementów sprzężystych  $T_{12} = T_{23} = 2,6ms$ . W celu uproszczenia analizy założono, że stała czasowa  $T_m$  zawarta w bloku kształtowania momentu elektromagnetycznego jest równa 0. Sygnał wyjściowy regulatora stanu można opisać zależnością:

$$m_{ez}(t) = \frac{K_I}{s} (\omega_{ref}(t) - \omega_3(t)) - (k_1\omega_1(t) + k_3\omega_2(t) + k_5\omega_3(t)) - (k_2m_{12s}(t) + k_4m_{23s}(t)). \quad (6)$$



Rys. 1. Regulator stanu zaimplementowany w strukturze sterowania układem trójmasowym

Zgodnie z klasycznymi rozwiązaniami, znanymi z teorii sterowania, w celu wyprowadzenia wzorów opisujących poszczególne wzmocnienia należy przyrównać mianownik transmitancji przewodniej do wielomianu odniesienia o tym samym stopniu. W związku z tym wyznaczono transmitancję układu regulacji:

$$G_{\omega_3}^p(s) = \frac{\omega_3}{\omega_{ref}} = \frac{K_I}{c_6s^6 + c_5s^5 + c_4s^4 + c_3s^3 + c_2s^2 + c_1s + K_I}, \quad (7)$$

w której poszczególne współczynniki opisane są poniżej przedstawionymi zależnościami:

$$c_1 = k_1 + k_3 + k_5, \quad (8)$$

$$c_2 = T_1 + T_2 + T_3 + k_2 T_2 + k_2 T_3 + k_4 T_3, \quad (9)$$

$$c_3 = k_1 T_{12} T_2 + k_1 T_{12} T_3 + k_1 T_{23} T_3 + k_3 T_{23} T_3, \quad (10)$$

$$c_4 = T_1 T_{12} T_2 + T_1 T_{12} T_3 + T_1 T_{23} T_3 + T_2 T_{23} T_3 + k_2 T_2 T_{23} T_3, \quad (11)$$

$$c_5 = k_1 T_{12} T_2 T_{23} T_3, \quad (12)$$

$$c_6 = T_1 T_{12} T_2 T_{23} T_3, \quad (13)$$

$$G_{ch}(s) = (s^2 + 2\xi\omega_0 s + \omega_0^2)^3 = s^6 + s^5 6\xi\omega_0 + s^4 (3\omega_0^2 + 12\xi^2\omega_0^2) + s^3 (12\xi\omega_0^3 + 8\xi^3\omega_0^3) +$$

$$+ s^2 (3\omega_0^4 + 12\xi^2\omega_0^4) + s (6\xi\omega_0^5) + \omega_0^6, \quad (14)$$

$$k_1 = 6\xi\omega_0 T_1, \quad (15)$$

$$k_2 = 3T_1 T_{12} (\omega_0^2 + 4\xi^2\omega_0^2) - \frac{1}{T_2 T_{23} T_3} (T_1 T_{12} (T_2 + T_3) + T_{23} T_3 (T_1 + T_2)), \quad (16)$$

$$k_3 = 4T_1 T_{12} T_2 (3\xi\omega_0^3 + 2\xi^3\omega_0^3) - \frac{k_1}{T_{23} T_3} (T_{12} T_2 + T_{12} T_3 + T_{23} T_3), \quad (17)$$

$$k_4 = 3(\omega_0^4 + 4\xi^2\omega_0^4) T_1 T_{12} T_2 T_{23} - \frac{1}{T_3} (T_1 + T_2 + T_3 + k_2 T_2 + k_2 T_3), \quad (18)$$

$$k_5 = 6\xi\omega_0^5 T_1 T_{12} T_2 T_{23} T_3 - k_1 - k_3, \quad (19)$$

$$K_I = \omega_0^6 T_1 T_{12} T_2 T_{23} T_3, \quad (20)$$

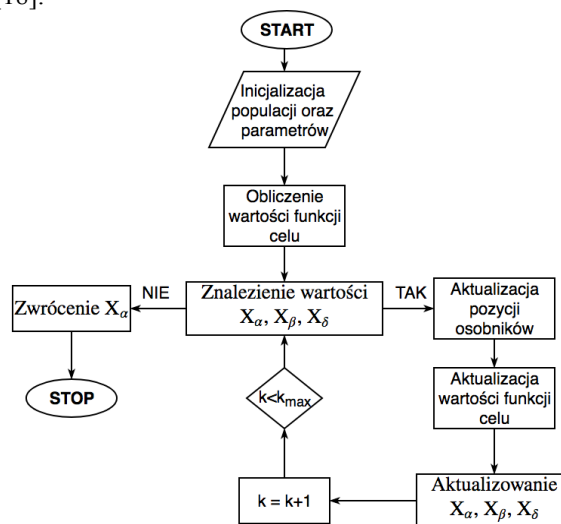
gdzie:  $[k_1, k_2, k_3, k_4, k_5] = K$  – wektor zawierający współczynniki wzmocnień dla odpowiednich zmiennych stanu (zgodnie z oznaczeniami na rysunku 1). Składowe równania charakterystycznego (8)-(13), przyrównano do wartości przy odpowiednich potęgach operatora Laplace'a modelu odniesienia (14). W ten sposób uzyskano układ równań. Po przekształceniach otrzymano wzory (15)-(20), umożliwiając one kształtowanie odpowiedzi napędu poprzez odpowiedni dobór współczynnika tłumienia  $\xi$  oraz pulsacji rezonansowej  $\omega_0$ .

### 3. Opis algorytmu *Grey Wolf Optimizer*

Złożoność obliczeń, związanych z zastosowaniem standardowych sposobów pozwalających na wyznaczenie równań opisujących parametry regulatora stanu, przedstawiono w poprzednim punkcie pracy. Należy zaznaczyć, że nieznaczne modyfikacje struktury wymagają powtórzenia obliczeń. Pewien uniwersalny sposób postępowania wprowadzają algorytmy metaheurystyczne, których obliczenia są uzależnione od układu regulacji poprzez funkcję celu. W niniejszej części prac, zadaniem było zastosowanie algorytmu *Grey Wolf Optimizer* w celu optymalizacji współczynników wzmocnień regulatora stanu.

Zasada działania tej metody opiera się na zachowaniu grupy osobników szukającej celu (nazwa algorytmu pochodzi od watahy wilków polujących na ofiarę). Algorytm realizowany jest poprzez szereg obliczeń iteracyjnych. Po zdefiniowaniu niezbędnych parametrów takich jak liczba powtórzeń, czy warunki zakończenia optymalizacji, program wykonuje obliczenia w kilku etapach dla każdej iteracji. W pierwszej kolejności obliczana jest funkcja celu dla danego osobnika populacji. Następnie modyfikowane są parametry całej populacji. Tak zmodyfikowana grupa przystępuje do kolejnej iteracji (rysunek 2).

Wzory (21) oraz (22) prezentują matematyczne zależności wykorzystywane do implementacji algorytmu [18].



Rys. 2. Schemat prezentujący przebieg obliczeń algorytmu *GWO*

Równania opisujące punkt w którym znajduje się aktualne rozwiązanie w stosunku do wyniku zakładanego

http://ijes.pwr.wroc.pl

oraz kolejny punkt w którym podąża grupa, zgodnie z algorytmem mogą zostać zapisane zgodnie z zależnościami:

$$D = |C \cdot X_p(k) - X(k)|, \quad (21)$$

$$X(k+1) = X_p(k) - A \cdot D, \quad (22)$$

gdzie:  $X_p$  – wartości optymalne uzyskane z poprzedniej iteracji,  $X$  – element zbioru rozwiązań,  $k$  – wartość aktualnej iteracji. W każdej iteracji algorytmu parametry  $A$  oraz  $C$  (22) podlegają modyfikacji zgodnie z równaniami (23) i (24) (takie działanie pozwala na ciągłą ewolucję uzyskiwanych rozwiązań, podobnie jak w algorytmie genetycznym czy innych algorytmach metaheurystycznych):

$$C = 2 \cdot r_1, \quad (23)$$

$$A = 2 \cdot a \cdot r_2. \quad (24)$$

Zmienne  $r_1$ ,  $r_2$  są losowane z przedziału  $[0,1]$ . Wartość parametru  $a$ , w powyższych wzorach, dobierana jest z zakresu  $[2,0]$ , w trakcie obliczeń współczynnik modyfikowany jest malejąco (wraz z kolejnymi iteracjami obliczeń algorytmu) według wzoru:

$$a = 2 \left( 1 - \frac{k_{iter}}{k_{max}} \right), \quad (25)$$

gdzie:  $k_{iter}$  – numer aktualnej iteracji,  $k_{max}$  – liczba wszystkich iteracji.

Zmniejszanie wartości tego parametru pozwala na ciągłe zawężenie obszaru poszukiwań, w pobliżu punktu optymalnego. Precyzując obliczenia opisane zależnością (21), na podstawie wzorów (26)-(28) można wyznaczyć odległość pomiędzy 3 najlepszymi rozwiązaniami z całej populacji ( $X_\alpha$ ,  $X_\beta$ ,  $X_\delta$ ) oraz potencjalnymi rozwiązaniami analizowanego zbioru:

$$D_\alpha = |C_1 \cdot X_\alpha - X|, \quad (26)$$

$$D_\beta = |C_2 \cdot X_\beta - X|, \quad (27)$$

$$D_\delta = |C_3 \cdot X_\delta - X|. \quad (28)$$

W kolejnym etapie aktualizacja elementów populacji jest realizowana zgodnie z zależnościami:

$$X_1 = X_\alpha - A_1 \cdot D_\alpha, \quad (29)$$

$$X_2 = X_\beta - A_2 \cdot D_\beta, \quad (30)$$

$$X_3 = X_\delta - A_3 \cdot D_\delta, \quad (31)$$

$$X(k+1) = \frac{\sum_{i=1}^3 X_i}{3}. \quad (32)$$

Zastosowana, w obliczeniach algorytmu *GWO*, funkcja celu składa się z dwóch elementów: pierwszy z nich odpowiedzialny jest za przeskalowaną ( $t_{prob}$ ) wartość błędu dla całego testu, drugi zaś odpowiada za wrażliwość funkcji celu ( $r$ ) na oscylacje mogące wystąpić przy skokowym przełączaniu momentu obciążenia. Funkcja celu, zapisana w ten sposób, pozwala na określenie wpływu zmian dostrajanych parametrów na działanie układu trójmasowego:

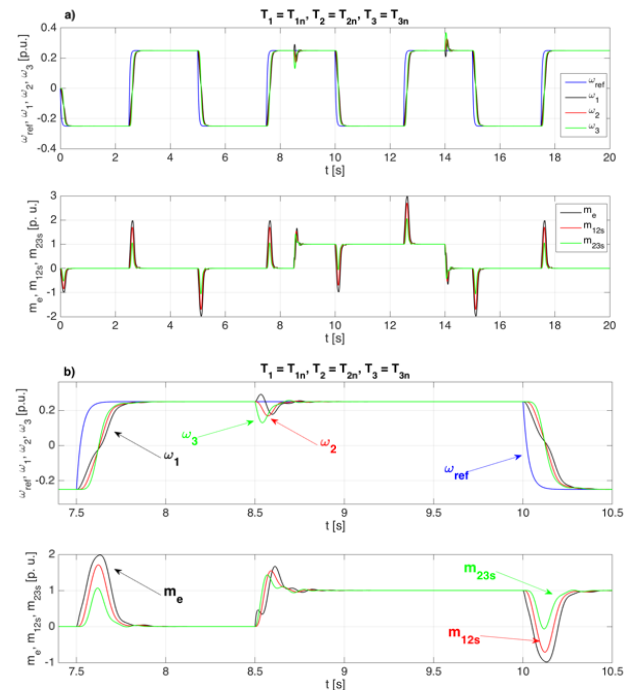
$$f_{fit} = \left( \sum_{i=1}^m (\omega_{ref} - \omega_3) t_{prob} \right) + \left( \sum_p^q (\omega_{ref} - \omega_3) t_{prob} \right) \cdot r, \quad (33)$$

gdzie:  $m$  – liczba wszystkich próbek,  $t_{prob}$  – okres próbkowania,  $p$ ,  $q$  – zakres próbek, w którym załączany jest moment obciążenia,  $r$  – współczynnik zwiększający czułość funkcji celu.

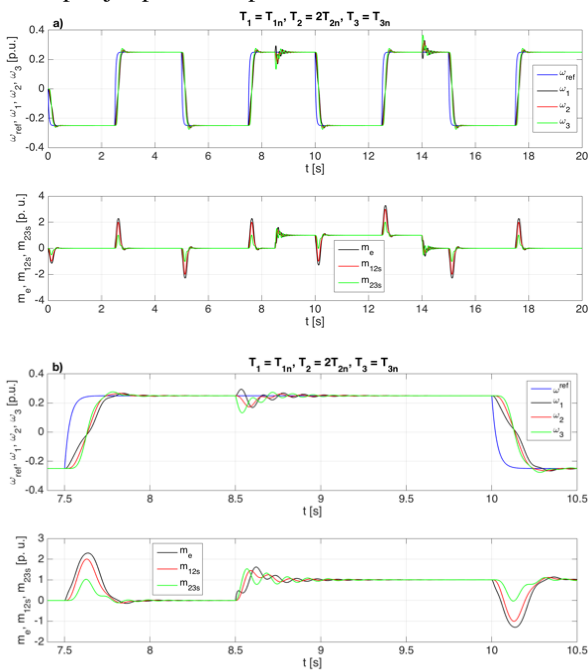
Przedstawiony w tym rozdziale algorytm został pomyślnie zaimplementowany w celu optymalizacji nastaw regulatora stanu. Otrzymano następujące wartości nastaw regulatora stanu:  $k_1 = 30,9169$ ,  $k_2 = 2,5431$ ,  $k_3 = -9,9681$ ,  $k_4 = -0,5131$ ,  $k_5 = 14,9566$ ,  $K_I = 353,5784$ . Po kilkukrotnym uruchomieniu algorytmu zaobserwowano powtarzalność uzyskiwanych wyników.

#### 4. Wyniki badań

Kolejnym etapem badań były testy obliczeniowe wykonane dla zaprojektowanej struktury sterowania. Analizowano układ przedstawiony na rysunku 1. Okres próbkowania wynosił  $t_{prob} = 0,1$ ms. W trakcie testów wymuszano nawroty silników przy prędkości zadanej  $\omega_{ref} = 25\%$  prędkości znamionowej. W chwilach czasowych  $t = 8,5$ s oraz  $t = 14$ s następuje przełączanie momentu obciążenia. Badania, przedstawione na rysunku 4a, prezentują działanie układu napędowego w warunkach znamionowych. Uzyskane przebiegi charakteryzują się wysoką dynamiką oraz brakiem przeregulowania. Zauważalne jest występowanie nieznacznych oscylacji podczas przełączania momentu obciążenia (rysunek 4b).

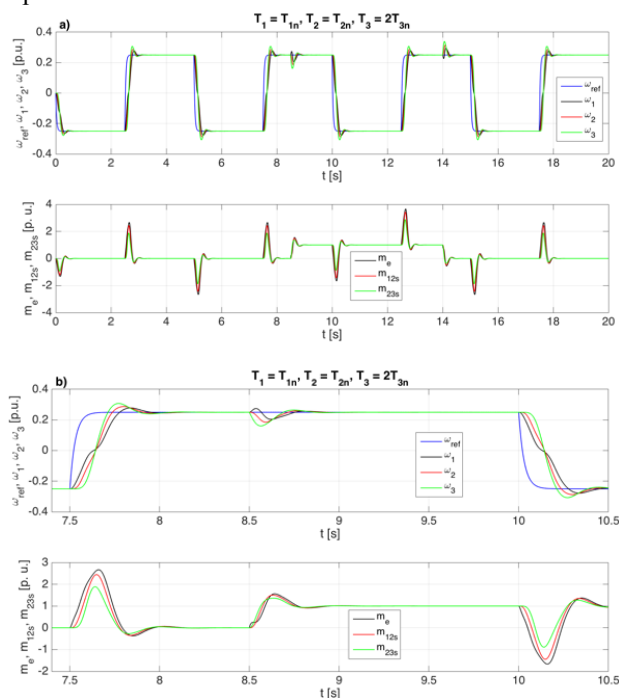


Rys. 4. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego (a) oraz powiększenie wybranego fragmentu wykresów (b) – nominalne parametry obiektu



Rys. 5. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego (a) oraz powiększenie wybranego fragmentu wykresów (b) –  $T_2=2T_{2n}$

Przeprowadzono również testy, dla zoptymalizowanego regulatora stanu, które prezentują wpływ zmian wybranych parametrów układu trójmasowego na uzyskiwane wyniki. Celem była ocena jakości sterowania w obecności zakłóceń parametrycznych. Zmiany stałych czasowych wprowadzano skokowo.

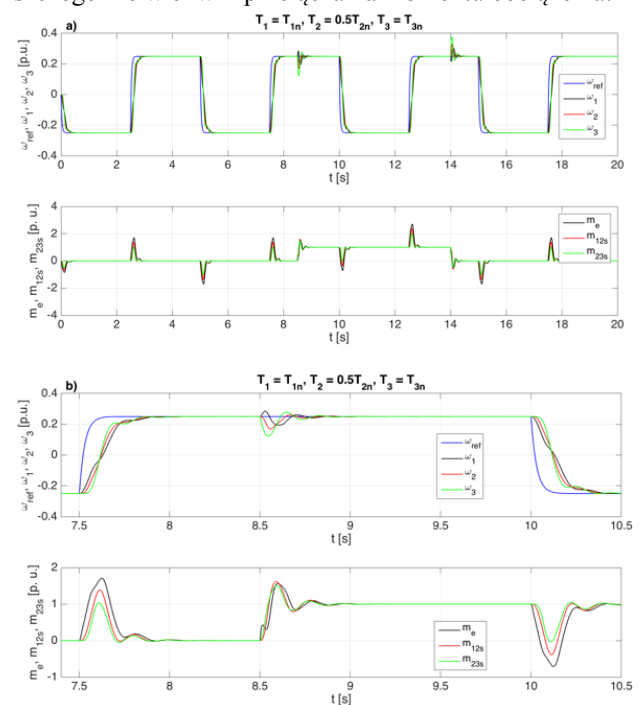


Rys. 6. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego (a) oraz powiększenie wybranego fragmentu wykresów (b) –  $T_3=2T_{3n}$

Jest to ekstremalny przypadek, który umożliwia założenie, że dla zmian liniowych (rozłożone w czasie) regulator będzie działał poprawnie (w badanym zakresie).

Kolejno przedstawione przebiegi prezentują wpływ zmian parametrów mechanicznych układu napędowego ( $T_2$  – rysunek 5 oraz  $T_3$  – rysunek 6) na jakość odtwarzanej trajektorii. Po zwiększeniu bezwładności silnika obciążającego można zauważyć nieznaczne przeregulowanie w przebiegach prędkości. Zaobserwowano również mniejsze oscylacje zmiennych stanu po obciążeniu napędu w porównaniu do obserwowanych wyników dla warunków znamionowych.

Przeprowadzone zostały także testy dla przypadku ze zmniejszonymi stałymi czasowymi: przekładni oraz obciążenia (rysunek 7 oraz rysunek 8). W obu przypadkach zmniejszenie wartości stałej czasowej nie stanowi dla układu napędowego dodatkowego zakłócenia, nie występuje również przeregulowanie. Zmiana stałej  $T_3$  implikuje natomiast pojawienie się oscylacji w przebiegach zmiennych stanu, widoczne szczególnie w chwili przełączania momentu obciążenia.

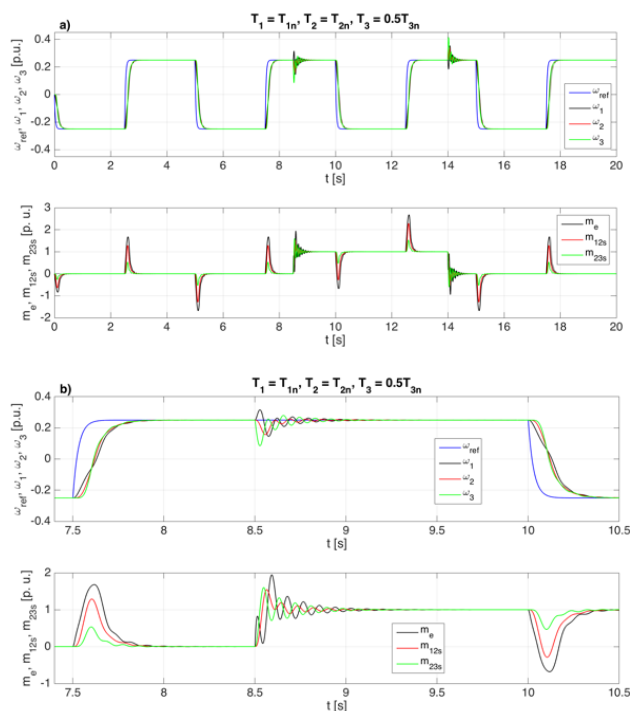


Rys. 7. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego (a) oraz powiększenie wybranego fragmentu wykresów (b) –  $T_2=0,5T_{2n}$

Sygnal wejściowy układu regulacji wpływa na wartości sygnału sterującego. Jeżeli odniesiemy analizowany układ trójmasowy (jak we wcześniejszych założeniach) do części mechanicznej rzeczywistego napędu elektrycznego, wartości wyjściowe regulatora prędkości mogą wymuszać znaczny poziom momentu elektromagnetycznego, a ostatecznie prądu. Dlatego, na wyjściu regulatorów stosowanych w pętli regulacji prędkości, stosowane są ograniczenia sygnału. Implementacja algorytmu GWO w procesie

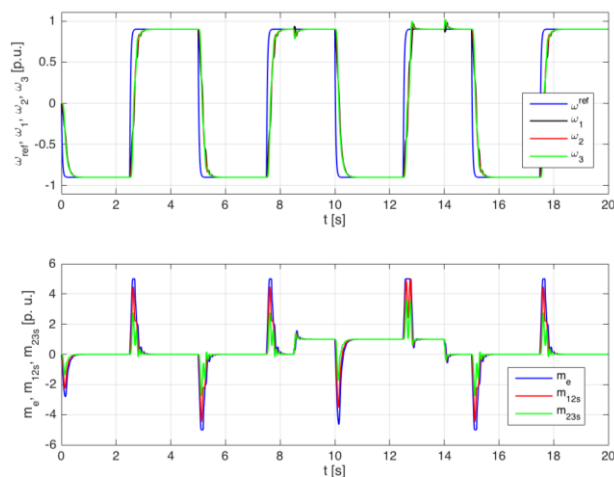
http://ijes.pwr.wroc.pl

projektowania, umożliwia uwzględnienie odpowiednich limitów, które mogą być wprowadzone w modelu zastosowanym w trakcie obliczeń.



Rys. 8. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego (a) oraz powiększenie wybranego fragmentu wykresów (b) –  $T_3=0,5T_{3n}$

Ewentualne zakłócenia wynikające z takiego działania będą wtedy sygnalizowane poprzez znaczne wartości funkcji celu, a następnie eliminowane w trakcie optymalizacji. Zatem, możliwy jest dobór parametrów regulatora, które nie powodują przekroczenia założonego poziomu sygnału sterującego.



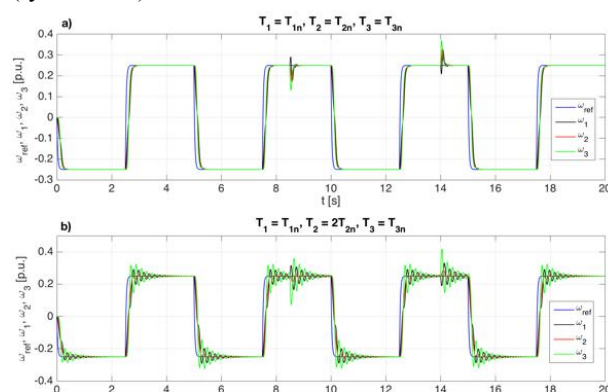
Rys. 9. Przebiegi zmiennych stanu układu trójmasowego dla 90% wartości znamionowej prędkości

W związku z tym, ostatnimi badaniami prezentowanymi w tej sekcji artykułu są przebiegi zmiennych stanu dla struktury, w której prędkość zadana

wynosiła 90% wartości znamionowej, a na wyjściu regulatora zastosowano ograniczenie (rysunek 9). Wprowadzone zostało ograniczenie na poziomie 5 [p.u.], wartość ta została dobrana w odniesieniu do rzeczywistego napędu elektrycznego. Ponadto założono, że ograniczane wartości prądu są krótkotrwałe, występują w trakcie wymuszania nawrotów układu napędowego. Struktura, dla opisanych warunków pracy, działa poprawnie.

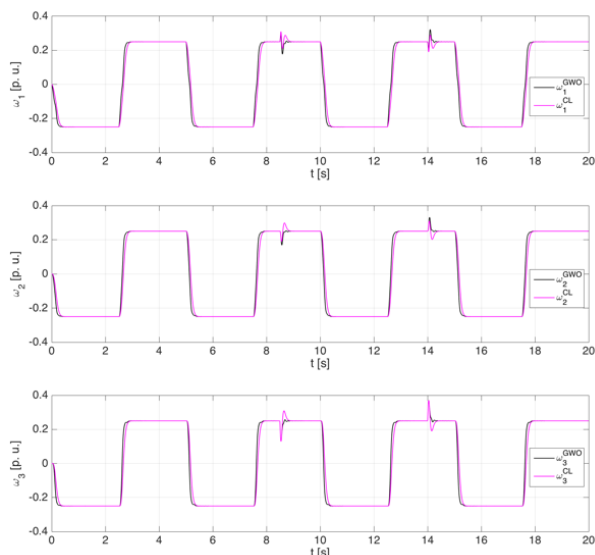
## 5. Analiza porównawcza regulatorów stanu strojonych różnymi metodami

W następnym etapie testów porównano rezultaty uzyskane dla regulatora stanu strojonego według równań (15)-(20) oraz wyniki badań zarejestrowanych po zastosowaniu parametrów dobranych obliczonych poprzez algorytm *GWO*. W celu obliczenia nastaw regulatora stanu metodą rozłożenia biegunów należy dobrać współczynniki  $\zeta$  oraz  $\omega_0$ . Parametry te zostały wyznaczone w ten sposób, aby dynamika obu układów regulacji była jak najbardziej zbliżona. Poza tym, założono konieczność uzyskania skutecznego tłumienia oscylacji zmiennych stanu w układzie regulacji. W związku z tym wprowadzono w testach następujące wartości:  $\zeta = 1$ ,  $\omega_0 = 40$  rad/s. Należy uprzednio zaznaczyć, że zmniejszenie współczynnika tłumienia do wartości  $\zeta = 0,7$ , powoduje istotne zakłócenia przy zmianach stałych czasowych układu trójmasowego (rysunek 10).



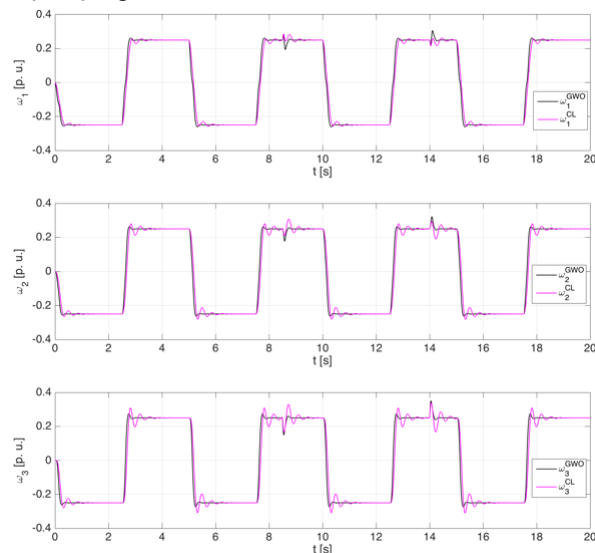
Rys. 10. Przebiegi prędkości układu trójmasowego dla warunków znamionowych (a) oraz po zwiększeniu stałej czasowej przekładni (b) –  $\zeta = 0,7$ ,  $\omega_0 = 40$  rad/s

Porównanie uzyskanych wyników, dla warunków znamionowych napędu, zaprezentowano na rysunku 11. Różnica w przebiegach prędkości widoczna jest głównie w stanach przejściowych (w trakcie zmian wartości prędkości lub podczas przełączania obciążenia). Po optymalizacji, przy wykorzystaniu algorytmu *GWO*, poszczególnych współczynników regulatora stanu, otrzymane wyniki charakteryzują się wysoką dynamiką oraz dokładniejszym podążaniem za trajektorią zadaną.



Rys. 11. Porównanie uzyskanych przebiegów prędkości  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  dla warunków znamionowych napędu (*CL* – regulator strojony metodą klasyczną, *GWO* – regulator strojony z wykorzystaniem algorytmu metaheurystycznego)

Zestawienie przebiegów prędkości silnika, przekładni oraz obciążenia w układzie napędowym, w którym dwukrotnie zwiększono stałą czasową  $T_2$  przedstawiono na rysunku 12. Obserwowana jest utrata precyzji sterowania poszczególnymi prędkościami (dla klasycznej metody doboru parametrów regulatora stanu), widoczne są oscylacje. Jednak regulator stanu projektowany z wykorzystaniem algorytmu metaheurystycznego wykazuje lepsze właściwości, większą odporność.

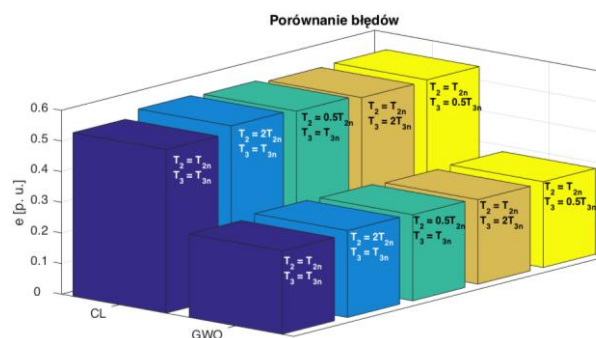


Rys. 12. Porównanie przebiegów prędkości  $\omega_1$ ,  $\omega_2$ ,  $\omega_3$  po dwukrotnym zwiększeniu stałej czasowej  $T_2$  (*CL* – regulator strojony metodą klasyczną, *GWO* – regulator strojony algorytmem metaheurystycznym)

W trakcie wymuszania nawrotów przez układ z napędowy z regulatorem, którego nastawy dobierane były metodą klasyczną przeregulowanie jest większe, a drgania są tłumione mniej skutecznie w porównaniu do układu z regulatorem stanu po optymalizacji *GWO*. Podobną zależność można zauważyć w czasie przełączania zakłócenia w obiekcie. W kolejnej części badań wykonano porównanie działania obu układów regulacji w testach zakładających zakłócenia parametryczne wprowadzane w obiekcie. W celu oceny numerycznej zdefiniowano błąd:

$$e = \frac{\dot{a} \sum_{i=1}^N (w_{ref}(i) - w_3(i))}{N}, \quad (34)$$

w którym  $i$  – numer próbki,  $N$  – całkowita liczba próbek. Wykres (rysunek 13) prezentuje zestawienie błędów, obliczonych zgodnie z równaniem (34), wyznaczonych dla układu napędowego przetestowanego dla warunków znamionowych oraz przy zmianie parametrów mechanicznych stałych czasowych  $T_2$  oraz  $T_3$ . Modyfikacji parametrów dokonywano w zakresie 50-200% wartości znamionowych.



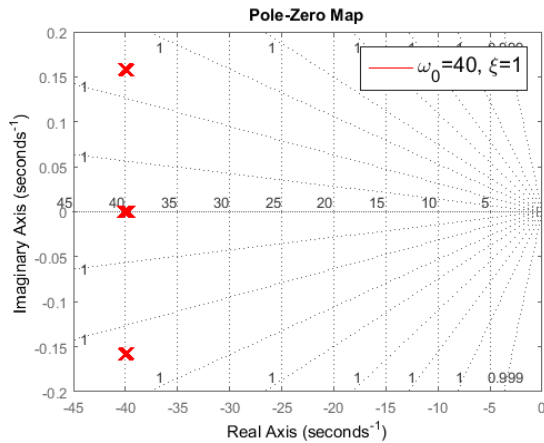
Rys. 13. Porównanie wartości błędów w strukturze sterowania układem trójmasowym (*CL* – regulator strojony metodą klasyczną, *GWO* – regulator strojony algorytmem metaheurystycznym)

Najmniejszą wartość błędu uzyskano dla regulatora stanu, którego nastawy optymalizowano algorytmem *GWO* przy warunkach znamionowych. Wartość ta nieznacznie wzrasta po zmianie stałych czasowych. Przedstawione zestawienie wykazuje, że w kolejnych warunkach pracy napędu, precyzja sterowania była większa po wprowadzeniu wartości wzmocnień regulatora uzyskanych za pomocą algorytmu *GWO*.

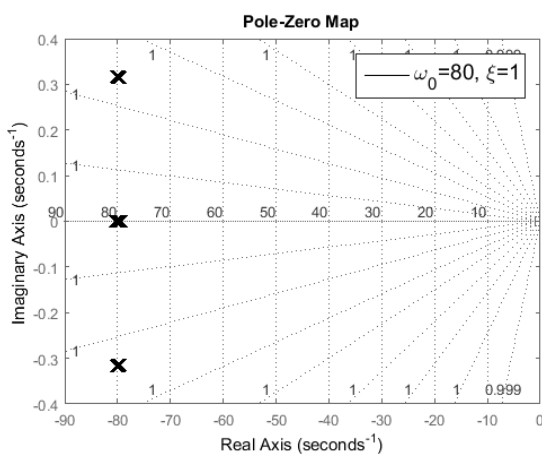
## 6. Analiza stabilności

Wykresy na rysunku 14 zawierają zbiory punktów, które są biegunami transmitancji przewodniej (7). Wyniki zostały opracowane dla różnych wartości pulsacji rezonansowej  $\omega_0$ , a także prezentują przykładowe rezultaty dla nastaw uzyskanych za pomocą *GWO* (w celu potwierdzenia stabilności układu regulacji).

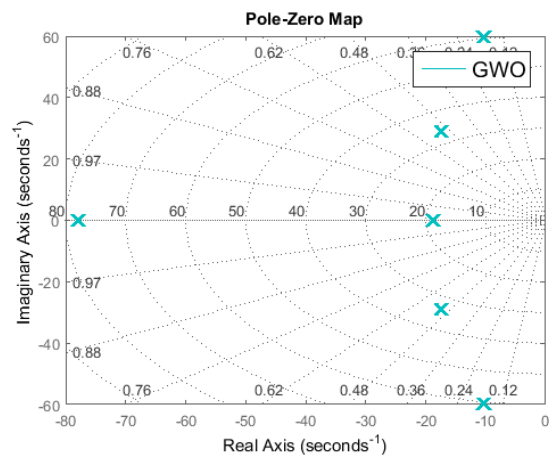
a)



b)



c)



Rys. 14. Rozmieszczenie biegunów transmitancji dla różnych wartości parametrów regulatora stanu

Zadawane parametry (pulsacja oraz współczynnik tłumienia) wpływają na wartości współczynników wzmocnień regulatora stanu, a w efekcie determinują właściwości układu regulacji. Zgodnie z teorią sterowania, większa wartość pulsacji układu odpowiada zwiększonej dynamice odpowiedzi, w takim przypadku położenie biegunów jest przemieszczane w lewą stronę układu (rysunek 14a oraz rysunek 14b). Warto również

zwrócić uwagę na rozmieszczenie biegunów przy obu sposobach strojenia regulatora. Zastosowanie klasycznej metody wprowadza sześć biegunów, w tym 3 podwójne, rozmieszczone na prostej. Możliwe jest uzyskanie alternatywnego położenia biegunów, jednak wtedy należy zmodyfikować wielomian odniesienia (14). Rozmieszczenie niezależne zostało uzyskane po optymalizacji parametrów za pomocą algorytmu *GWO*.

Na podstawie analizy analogicznej do wyżej przedstawionej, przy założeniu stałości parametrów regulatora w trakcie testów, możliwe jest zdefiniowanie ograniczeń dla wyników uzyskiwanych za pomocą *GWO*. Z drugiej strony, rozmieszczenie biegunów układu zamkniętego, z uwzględnieniem zoptymalizowanych parametrów, pozwala na stwierdzenie stabilności zaprojektowanego układu regulacji (rysunek 14c).

## 7. Podsumowanie

Celem opisanych badań była implementacja algorytmu *Grey Wolf Optimizer* w celu wyznaczenia nastaw regulatora stanu zastosowanego dla układu trójmasowego. Zaprojektowana (w oparciu o *GWO*) struktura sterowania wykazuje odporność na zmianę parametrów obiektu, a także charakteryzuje się dobrymi właściwościami tłumienia oscylacji zmiennych stanu, szczególnie pojawiających się podczas dokonywania nawrotów oraz przełączania momentu obciążenia. Wykorzystanie algorytmu optymalizacyjnego do wyznaczania współczynników regulatora stanu, umożliwia zredukowanie złożonych obliczeń związanych z projektowaniem układu regulacji.

## Literatura

- [1] Astrom K. J., Murray R. M., Feedback Systems. An Introduction for Scientists and Engineers, (2012), Princeton University Press
- [2] Song Y., Huang X., Wen C., Robust Adaptive Fault-Tolerant PID Control of MIMO Nonlinear Systems With Unknown Control Direction, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 64 (2017), No. 6, 4876-4884
- [3] Agrawal S., Shrivastava V., Particle Swarm Optimization of BLDC Motor With Fuzzy Logic Controller for Speed Improvement, International Conference on Computing, Communication and Networking Technologies, (2017), 1-5
- [4] Cheng L., Liu W., Yang C., Huang T., Hou Z.-G., Tan M., A Neural-Network-Based Controller for Piezoelectric-Actuated Stick-Slip Devices, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 65 (2018), No. 3, 2598-2607
- [5] Kakosimos P., Abu-Rub H., Predictive Speed Control With Short Prediction Horizon for Permanent Magnet Synchronous Motor Drives, IEEE Transactions on Power Electronics, 33 (2018), No. 3, 2740-2750
- [6] Yu Y., Yang Z., Han C., Liu H., Fuzzy Adaptive Back-stepping Sliding Mode Controller for High-precision



<http://ijes.pwr.wroc.pl>

Deflection Control of Magnetically Suspended Momentum Wheel, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 65 (2017), No. 99, 3530-3538

- [7] Choil J.-S., Ko J.-S., Park K.-T., Park B.-S., Chung D.-H., High Performance Control of Induction Motor using GA, *International Conference on Control, Automation and Systems*, (2007), 1613-1616
- [8] Chen G. Y., Perng J.-W., PI Speed Controller Design based on GA with Time Delay for BLDC Motor using DSP, *IEEE International Conference on, Mechatronics and Automation (ICMA)*, (2017), 1174-1179
- [9] Jha B., Panda M. K., Pandey P. K., Pant L., PSO-based Online Vector Controlled Induction Motor Drives, *International Conference on Electrical, Electronics, and Optimization Techniques (ICEEOT)*, (2016), 2234-2239
- [10] Tsampouris E. M., Kakosimos P. E., Kladas A. G., Coupled Computation of Electric Motor Design and Control Parameters Based on Ant Colonies Speed Trajectory Optimization, *IEEE Transactions on Magnetics*, 49 (2003), No. 5, 2177-2180
- [11] Yang X.-S., A New Metaheuristic Bat-Inspired Algorithm, in: *Nature Inspired Cooperative Strategies for Optimization (NISCO 2010)* (Eds. J. R. Gonzalez et al.), *Studies in Computational Intelligence*, 284 (2010), 65-74
- [12] Premkumar K., Manikandan B. V., Speed Control of Brushless DC Motor Using Bat Algorithm Optimized Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System, *Applied Soft Computing*, 32 (2015), 403-419
- [13] Kamiński M., Zastosowanie Algorytmu BAT w Optymalizacji Obliczeń Adaptacyjnego Regulatora Stanu Układu Dwumasowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 93 (2017), 300-304
- [14] Premkumar K., Manikandan B. V., Bat Algorithm Optimized Fuzzy PD Based Speed Controller for Brushless Direct Current Motor, *Engineering Science and Technology, an International Journal*, 19 (2016), 818-840
- [15] Chen G.-Y., Perng J.-W., Ma L.-S, DSP Based BLDC Motor Controller Design with Auto Tuning PSO-PID Algorithm, *IEEE/SICE International Symposium on System Integration (SII)*, (2015), 766-770
- [16] Wai R.-J., Lee J.-D., Chuang K.-L., Real-Time PID Control Strategy for Maglev Transportation System via Particle Swarm Optimization, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 58 (2011), No. 2, 629-646
- [17] Salvini M., Carpita M., Formentini A., Marchesoni M., PSO-Based Self-Commissioning of Electrical Motor Drives, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 62 (2015), No. 2, 768 - 776
- [18] Mirjalili S., Mirjalili S. M., Lewis A., Grey Wolf Optimizer, *Advances in Engineering Software*, 69 (2014), 46-61
- [19] Villwock S., Pacas M., Application of the Welch-Method for the Identification of Two- and Three-Mass-Systems, *IEEE Transaction on Industrial Electronics*, 55 (2008), No. 1, 457-466
- [20] Wróbel K., Control of the tree-mass system using state controller, *Scientific Papers of The Institute of Electrical Machines, Drives and Measurements of the Wrocław University of Science and Technology Series: Studies and Research*, 69 (2013), No. 33, 367-375.