

## Rozmyty regulator stanu układu dwumasowego

**Streszczenie.** Sterowanie napędem elektrycznym oparte o wektor zmiennych stanu umożliwia precyzyjne odtwarzanie sygnału zadanego. Jednak zakłócenia parametryczne lub pomiarowe zdecydowanie utrudniają zachowanie poprawności działania struktury sterowania. W związku z tym, w niniejszej publikacji, zaproponowano rozszerzenie regulatora o część bazującą na logice rozmytej. Zastosowany element wpływa, w zależności od uchybu prędkości, na wartości wzmocnień w sprzężeniach zwrotnych, w efekcie odpowiednio kształtowane są zmienne stanu oraz dynamika napędu. W procesie projektowania zastosowany został optymalizacyjny algorytm metaheurystyczny - Symbiotic Organisms Search (SOS). Obiektem sterowanym jest układ napędowy z elastycznym sprzęgłem, które zostało wprowadzone do części mechanicznej. Wyniki badań symulacyjnych potwierdzają poprawność analizowanej koncepcji. Przeprowadzone zostały również testy eksperymentalne (algorytm został zaimplementowany w karcie dSPACE1103, napęd zawierał dwa silniki prądu stałego o mocy 0,5kW).

**Abstract.** Application of control methods based on state vector leads to precise tracking of reference signal. However, the parametric or measurement disturbance definitely make it difficult to maintain the correct operation of the system. Therefore, in this paper, implementation of an additional fuzzy element is proposed. It can recalculate, using information about the speed error, the coefficients in the feedback paths. Then, shape of the state variables and the dynamics of the system are forced properly. In the design process, the metaheuristic algorithm - Symbiotic Organisms Search (SOS) - was used. The electrical drive contains elastic shaft. The results of the simulations confirm the correctness of the analyzed method. Moreover, the experimental tests were performed (with the dSPACE 1103 card, the system contains two DC motor with 0.5kW). (**Fuzzy state controller applied for two-mass system**).

**Słowa kluczowe:** logika rozmyta, regulator stanu, sterowanie adaptacyjne, układ dwumasowy  
**Keywords:** fuzzy logic, state controller, adaptive control, two-mass system

### Wprowadzenie

Wiele publikacji, prezentowanych przez ośrodki naukowe z całego świata, dotyczy struktur sterowania układami napędowymi, których podstawą jest regulator typu PI. Wspomniany fakt jest związany z efektywnością algorytmów, uproszczoną syntezą oraz łatwą implementacją w układach programowalnych [1]-[3]. W przypadku bardziej złożonego obiektu skuteczniejsze wydaje się kształtowanie sygnału sterującego z uwzględnieniem dodatkowych wewnętrznych sygnałów. Do wymienionego zadania można zastosować regulator stanu [4]-[6]. Wartości wzmocnień mogą być dobrane znanymi metodami, które są również używane dla regulatorów proporcjonalno-całkujących. Obliczenia są wykonywane za pomocą klasycznych procedur (np. rozmieszczenie biegunów równania charakterystycznego) lub algorytmów optymalizacyjnych, które działają na podstawie obserwacji działań stadnych organizmów (algorytmy metaheurystyczne) [7].

Wymienione cechy stosowanych struktur sterowania prowadzą do wielu implementacji przemysłowych oraz analiz naukowo-inżynierskich [8]-[10]. Jednak, w przypadku regulatora stanu, pojawiają się trudności związane z koniecznością uzyskiwania informacji o dodatkowych zmiennych stanu. Ewentualny montaż kolejnych czujników pomiarowych powoduje wzrost kosztów oraz ryzyka wystąpienia uszkodzeń. Zgodnie z aktualnymi kierunkami rozwoju badań w dziedzinie napędu elektrycznego, w celu rozwiązania powyższego problemu, stosowane są odpowiednie modele umożliwiające wyznaczenie zmiennych stanu [11], [12].

Oddzielny zakres zagadnień prezentowanych w publikacjach dotyczy analizy działania napędów elektrycznych, w których wprowadzane są zakłócenia parametryczne (np. zmiany stałych czasowych obiektu) [13]-[15]. Klasyczne struktury sterowania działają poprawnie dla sprecyzowanych oraz stałych parametrów obiektu. W przeciwnej sytuacji, w przebiegach kontrolowanej zmiennej stanu mogą pojawiać się przeregulowania lub oscylacje.

W niniejszym rozwiązaniu, w pętli sterowania prędkością napędu elektrycznego, zastosowano regulator stanu. Aktualizacja nastaw jest realizowana poprzez model rozmyty, którego zadaniem jest wyznaczenie optymalnych wartości współczynnika tłumienia oraz pulsacji. Następnie stosowane są bezpośrednie zależności matematyczne opisujące wzmocnienia poszczególnych pętli sprzężeń zwrotnych regulatora, które wyznaczono za pomocą metody rozmieszczenia biegunów równania charakterystycznego [16]. Poszukiwanie odpowiedniego punktu pracy zakłada zwiększanie dynamiki układu dla dużych wartości uchybu prędkości (w celu szybkiej reakcji). Natomiast w stanach ustalonych, w których najczęściej błąd regulacji jest niewielki, wprowadzana jest zredukowana pulsacja oraz większy poziom współczynnika tłumienia. Dodatkową zaletą opisanych założeń jest zmniejszenie wpływu zakłóceń pomiarowych, które mogą być wzmacniane poprzez znaczne wartości parametrów układu regulacji [12].

Skutecznym narzędziem w procesie projektowania mogą być algorytmy metaheurystyczne [17]. Obliczenia wymagają zdefiniowania funkcji celu oraz szeregu parametrów zależnych od danego zadania. Warunki przetwarzania danych, takie jak liczba iteracji czy ilość osobników, często wyznaczane są doświadczalnie. Jednak autorzy poszczególnych metod przedstawiają wartości domyślne, dla których proces optymalizacji powinien osiągnąć zadowalające wyniki. Poza tym istnieje pewna grupa algorytmów, które posiadają znikomą liczbę dodatkowych parametrów definiowanych *a priori*. Brak złożonych obliczeń oraz prostota implementacji programowej umożliwiła wiele aplikacji inżynierskich, w tym związanych z napędami elektrycznymi (*Grey Wolf Optimizer* (GWO) [18], *Symbiotic Organisms Search* (SOS) [19], *Artificial Bee Colony* (ABC) [20], *Cuckoo Search Algorithm* (CSA) [21], itd.).

Niniejszy artykuł przedstawia aplikację rozmytego regulatora stanu dla napędu elektrycznego z elastycznym sprzęgłem. Optymalizacja modelu rozmytego została zrealizowana za pomocą algorytmu SOS. Treść publikacji

została podzielona na siedem głównych części. Po wprowadzeniu opisano obiekt oraz zaproponowany adaptacyjny regulator stanu. W kolejnej sekcji przedstawione zostały szczegóły obliczeń algorytmu *Symbiotic Organisms Search*. Następnie zaprezentowano wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych. Pracę zamyka krótkie podsumowanie.

### Opis struktury sterowania

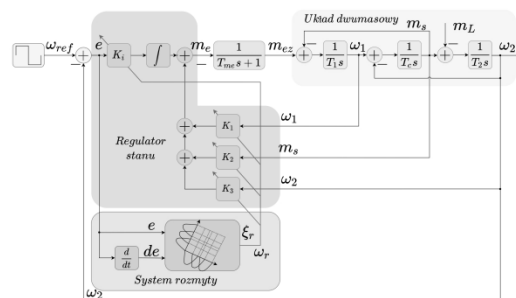
Analizowany układ regulacji napędu elektrycznego z połączeniem sprzężystym bazuje na kaskadowej strukturze sterowania (rys. 1). W zewnętrznej części, dotyczącej prędkości, wprowadzono regulator stanu. Nastawy są przestrajane poprzez model rozmyty. Szczegóły dotyczące rozmytego regulatora stanu zostały opisane w kolejnych sekcjach publikacji.

Podrzędna pętla jest związana z kształtowaniem momentu elektromagnetycznego. Wyprowadzono zastępczą transmitancję, która została zastosowana podczas analizy matematycznej:

$$(1) \quad G_{me}(s) = \frac{1}{T_{me}s + 1},$$

gdzie:  $T_{me}$  jest stałą czasową,  $s$  jest operatorem Laplace'a.

Obiekt jest reprezentowany poprzez układ dwumasowy [8]-[10], [13]. Kolejne równania (2) opisują część mechaniczną napędu. Wektor stanu  $x$  zawiera: prędkość silnika  $\omega_1$ , prędkość obciążenia  $\omega_2$  oraz moment skrętny  $m_s$ . Na wektor wejściowy  $u$  składają się sygnały momentu elektromagnetycznego  $m_e$ , a także zakłócenie – moment obciążenia  $m_L$ . W macierzy stanu ( $A$ ) oraz macierzy wejść ( $B$ ) uwzględniono mechaniczne stałe czasowe układu napędowego: silnika  $T_1$  oraz maszyny roboczej  $T_2$ , a także stałą czasową elastycznego sprzęgła  $T_c$ . Przyjęte zostały następujące wartości parametrów, które odpowiadają rzeczywistemu układowi laboratoryjnemu:  $T_1 = T_2 = 0,203$  s oraz  $T_c = 0,0012$  s.



Rys. 1. Struktura sterowania z rozmytym regulatorem stanu

$$(2) \quad \underbrace{\begin{bmatrix} \dot{\omega}_1(t) \\ \dot{\omega}_2(t) \\ \dot{m}_s(t) \end{bmatrix}}_{\dot{x}(t)} = \underbrace{\begin{bmatrix} 0 & 0 & -\frac{1}{T_1} \\ 0 & 0 & \frac{1}{T_2} \\ \frac{1}{T_c} & -\frac{1}{T_c} & 0 \end{bmatrix}}_A \underbrace{\begin{bmatrix} \omega_1(t) \\ \omega_2(t) \\ m_s(t) \end{bmatrix}}_{x(t)} + \underbrace{\begin{bmatrix} \frac{1}{T_1} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_2} \\ 0 & 0 \end{bmatrix}}_B \underbrace{\begin{bmatrix} m_e(t) \\ m_L(t) \end{bmatrix}}_{u(t)}$$

$$(3) \quad G_{\omega_2}^m(s) = \frac{\omega_2}{\omega_{ref}} = \frac{K_I}{s^4 T_1 T_2 T_c + s^3 k_1 T_2 T_c + s^2 (T_1 + T_2 (k_2 + 1)) + s (k_1 + k_3) + K_I}$$

$$(4) \quad G_{\omega_2}^d(s) = \frac{\omega_2}{m_L} = \frac{-s^3 T_1 T_3 - s^1 k_1 T_c - s (k_2 + 1)}{s^4 T_1 T_2 T_c + s^3 k_1 T_2 T_c + s^2 (T_1 + T_2 (k_2 + 1)) + s (k_1 + k_3) + K_I}$$

$$(5) \quad H(s) = (s^2 + 2s\omega_r\xi_r + \omega_r^2)^2$$

### Adaptacyjny regulator stanu

Podstawę adaptacyjnego regulatora prędkości układu napędowego stanowi zestaw sprzężeń zwrotnych od zmiennych stanu obiektu. W celu wyeliminowania uchybu ustalonego klasyczna postać regulatora została rozszerzona o element całkujący. Dla poszczególnych zmiennych układu regulacji, które są zastosowane w obliczeniach sygnału sterującego, wprowadzono współczynniki skalujące. Etap projektowania zakłada wyznaczenie wzorów opisujących wartości wzmocnień, które umożliwią uzyskanie zakładanych właściwości dynamicznych oraz stabilnej pracy struktury sterowania. W tym celu wyznaczono transmitancje: przewodnią (3) oraz zakłóceniovą (4). Następnie wielomian charakterystyczny został zestawiony z wielomianem odniesienia (5). Rozwiązanie uzyskanego układu równań stanowi opis

matematyczny (6)-(9) wartości współczynników regulatora stanu [7]:

$$(6) \quad K_I = T_1 T_2 T_c \omega_r^4,$$

$$(7) \quad k_1 = 4T_1 \xi_r \omega_r,$$

$$(8) \quad k_2 = T_1 T_c \left( 2\omega_r^2 (2\xi_r^2 + 1) - \frac{T_1 - T_2}{T_1 T_2 T_c} \right),$$

$$(9) \quad k_3 = 4T_1 T_2 T_c \xi_r \omega_r^3 - k_1,$$

gdzie:  $\xi_r$  jest współczynnikiem tłumienia,  $\omega_r$  jest zadawaną pulsacją systemu.

W klasycznym ujęciu dobór wyżej wymienionych współczynników jest realizowany na etapie projektowania regulatora. Parametry w równaniach (6)-(9) wpływają na właściwości dynamiczne układu regulacji [7]. Najczęściej

wartości dobierane są doświadczalnie, z założeniem uzyskania najmniejszego przeregulowania oraz wysokiej dynamiki kontrolowanej zmiennej (z ograniczeniami wynikającymi z właściwości obiektu). W przypadku układu z połączeniem sprężystym celem jest również redukcja oscylacji zmiennych stanu.

W proponowanym rozwiązaniu, w celu ciągłej modyfikacji współczynników  $\xi_r$  oraz  $\omega_r$ , wprowadzono model logiki rozmytej. Układ został opracowany z założeniem zwiększania pulsacji rezonansowej w stanach dynamicznych, przy zmniejszaniu współczynnika tłumienia. Takie rozwiązanie zapewnia zwiększoną dynamikę sygnału wyjściowego (rysunek 2 przedstawia odpowiedzi obiektu dla różnych wartości  $\xi_r$  oraz  $\omega_r$ ) oraz wpływa na zwiększenie odporności na zmianę parametrów (dostrajanie parametrów na podstawie informacji o uchybie).

System rozmyty przetwarza dane na podstawie dwóch sygnałów, wprowadzany jest błąd ( $e$ ) definiowany następująco:

$$(10) \quad e(t) = \omega_{ref}(t) - \omega_2(t),$$

a także zmiana błędu  $de$  w czasie (zastosowano moduły wartości wymienionych sygnałów). W kolejnym etapie sygnały podlegają fuzyfikacji, obliczana jest wartość zgodnie z następującym równaniem:

$$(11) \quad \mu_{ij} = e^{-\frac{(x-\gamma)^2}{\sigma^2}},$$

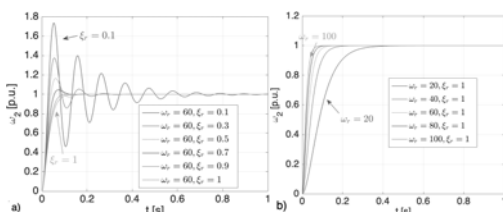
gdzie:  $\mu$  jest poziomem aktywacji,  $x$  jest sygnałem wejściowym,  $\gamma$  oraz  $\sigma$  są parametrami funkcji Gaussa,  $i$  numer wejścia,  $j$  numer funkcji przynależności.

Dane są wprowadzane do bazy reguł warunkowych typu JEŻELI-TO, które zapisywane są w postaci [12]:

$$(12) R_1 : \text{JEŻELI } e \text{ JEST } \mu_{ij} \text{ I } de \text{ JEST } \mu_{ij} \text{ TO } y = a_n.$$

Kolejno następuje obliczenie stopnia spełnienia przesłanek na podstawie sygnałów z odpowiednich wejść. W końcowym kroku następuje defuzyfikacja metodą singletonów, gdzie obliczne jest wyjście systemu.

Opisane przetwarzanie modelu rozmytego zastosowano dla obu parametrów regulatora stanu ( $\xi_r$  oraz  $\omega_r$  – dwa niezależne wyjścia z systemu), które po zaktualizowaniu służą do obliczeń wartości wzmocnień w poszczególnych pętlach sprzężeń regulatora stanu (zgodnie z równaniami (6)-(9)).



Rys. 2. Wpływ wartości  $\xi_r$  (a) oraz  $\omega_r$  (b) na przebiegi prędkości

### Algorytm Symbiotic Organisms Search

System rozmyty, który stanowi rozszerzenie klasycznego regulatora stanu, zawiera parametry wyznaczone w procesie syntezy układu sterowania. Optymalizacja została przeprowadzona za pomocą algorytmu SOS [19]. Precyzując, celem był dobór parametrów funkcji przynależności –  $\gamma$  oraz  $\sigma$ .

Główna pętla algorytmu SOS składa się z trzech faz, każda z nich stara się odwzorować inne zachowanie symbiotyczne występujące w naturze (rys. 3):

- mutualizm – zachowanie, w którym oba gatunki czerpią obopólną korzyść;
- komensalizm – zachowanie, w którym co najmniej jeden gatunek czerpie korzyści (bez szkody dla pozostałych);
- pasożytnictwo – zachowanie, w którym jeden organizm czerpie korzyści, natomiast drugi ponosi szkodę.

W pierwszej części algorytmu definiowane są podstawowe parametry (liczba osobników w populacji, rozłożenie osobników w przestrzeni, liczba iteracji, itp.). Inicjalizacja osobników polega na losowym rozłożeniu wszystkich przetwarzanych wartości w przestrzeni zgodnie z wprowadzonymi ograniczeniami. W kolejnym etapie obliczana jest funkcja celu, następuje ocena jednostek (poszukiwane jest najlepsze rozwiązanie wstępnych obliczeń) w populacji, zgodnie z równaniem:

$$(13) \quad fit_{fen} = \frac{\sum_{k=1}^N \omega_{ref}(k) - \omega_2(k)}{N},$$

w którym:  $k$  jest numerem próbki w symulacji, a  $N$  jest liczbą wszystkich próbek.

Następnie rozpoczyna się faza mutualizmu, w której wybierane są dwa losowe obiekty ( $X_i, X_j$ ), z założeniem:

$$(14) \quad X_j \neq X_i,$$

dla których wykonywane są kolejne obliczenia. Do tego celu należy wyznaczyć współczynnik  $MV$  zgodnie z równaniem (15) oraz współczynnik  $BF$  na podstawie zależności (16).

$$(15) \quad MV = \frac{X_i + X_j}{2},$$

$$(16) \quad BF \in \{1, 2\}.$$

Współczynnik  $BF$  przyjmuje losową wartość 1 lub 2 dla każdego z osobników. W kolejnym kroku  $X_i$  oraz  $X_j$  są modyfikowane zgodnie z następującymi zależnościami:

$$(17) \quad X_i^{new} = X_i + rand(0,1) \cdot (X_{best} - MV \cdot BF_1),$$

$$(18) \quad X_j^{new} = X_j + rand(0,1) \cdot (X_{best} - MV \cdot BF_2),$$

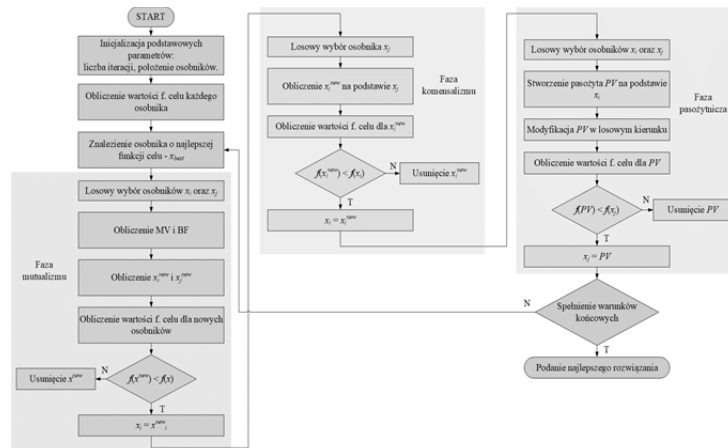
gdzie:  $X_i^{new}$  oraz  $X_j^{new}$  są zmodyfikowanymi wartościami,  $X_{best}$  jest najlepszym indywiduum.

Funkcja celu jest ponownie obliczana dla otrzymanego zbioru danych (w celu porównania ich wartości z poprzednimi). Na podstawie uzyskanych wartości błędu, zbiór potencjalnych rozwiązań jest odpowiednio aktualizowany.

Kolejna faza algorytmu stara się przedstawić zachowania osobników, które żyją zgodnie z regułą komensalizmu. W porównaniu do poprzedniej części algorytmu SOS, zmianie ulega tylko jeden parametr, który może uzyskać korzyść. Położenie w grupie modyfikowane jest zgodnie z następującym równaniem:

$$(19) \quad X_i^{new} = X_i + rand(-1,1) \cdot (X_{best} - X_j).$$

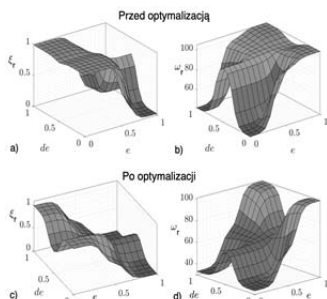
Nowy osobnik jest oceniany zgodnie z równaniem (13), następnie lepsze rozwiązanie jest zachowywane w populacji.



Rys. 3. Schemat blokowy przedstawiający obliczenia algorytmu *Symbiotic Organisms Search*

Ostatnia część głównej pętli obliczeń, opisuje zachowanie pasożytnicze. W tym celu losowane są dwa punkty. Jeden oznaczony jest jako *PV*, jego współrzędne określające położenie są zmieniane w sposób losowy (zgodnie ze zdefiniowanymi ograniczeniami). Przykładowo, jeśli *PV* jest opisany za pomocą macierzy: [15, 42, 83], po modyfikacji wartości mogą być następujące: [15, 67, 83]. Następnie obliczana jest funkcja celu dla potencjalnego osobnika populacji. Na tej podstawie następuje ocena oraz ewentualne zastąpienie drugiego z wylosowanych elementów zbioru rozwiązań.

klasycznym oraz zmodyfikowanym regulatorem, jest niewielka, widoczna głównie podczas przełączania obciążenia. Jednak, w trakcie przełączeń zakłócenia zewnętrznego, widoczna jest szybsza reakcja napędu z rozmytym regulatorem stanu.



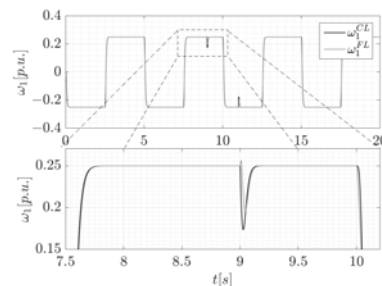
Rys. 4. Płaszczyzny opisujące działanie modelu rozmytego: przed zastosowaniem algorytmu SOS (a,b) oraz po optymalizacji (c,d)

Otrzymane płaszczyzny, które opisują zmiany współczynników  $\xi_r$  oraz  $\omega_r$  (przed optymalizacją – rys. 4a oraz rys. 4b) wygenerowane zostały na podstawie stworzonej bazy reguł oraz wstępnie zdefiniowanych (na podstawie wiedzy na temat pracy obiektu) funkcji przynależności. Zadaniem algorytmu SOS było dostrojenie parametrów funkcji przynależności (rys. 4c oraz rys. 4d). Dla współczynnika tłumienia oraz pulsacji zdefiniowano ograniczenia rozwiązań ( $\xi_r \in (0,1>$  oraz  $\omega_r \in (0,100>$ ).

### Badania symulacyjne

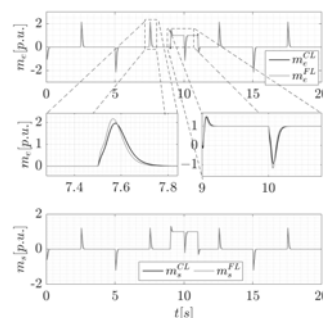
Przebiegi uzyskane dla znamionowych parametrów układu napędowego przedstawiono na rysunkach 5 – 7. Zadany sygnał prędkości zmieniany jest z częstotliwością 0,2 Hz przy amplitudzie równej 25 % prędkości znamionowej. Moment obciążenia jest załączany w  $t = 9$  s, następnie, po dwóch sekundach, jest odłączany. Napęd działa zgodnie z oczekiwaniem, odtwarzanie trajektorii zadanej jest realizowane z wysoką dokładnością.

W przypadku znamionowych parametrów obiektu, różnica pomiędzy prędkościami (rys. 5) w układzie z



Rys. 5. Przebiegi prędkości silnika ( $\omega_r$ ) dla znamionowych parametrów układu napędowego (*FL* – analizowany regulator stanu z systemem rozmytym, *CL* – klasyczny regulator stanu)

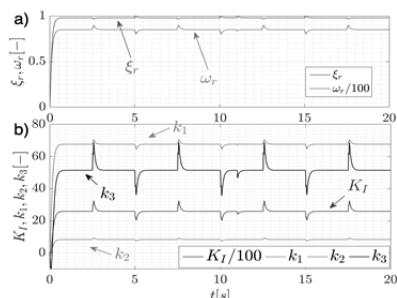
Powyższe obserwacje są zgodne z przebiegami momentów - elektromagnetycznego oraz skrętnego - w obu układach sterowania. Klasyczna struktura sterowania generuje mniejszą amplitudę wspomnianych zmiennych stanu w stanach przejściowych (rys. 6).



Rys. 6. Przebiegi momentu elektromagnetycznego ( $m_e$ ) oraz skrętnego ( $m_s$ ) dla znamionowych parametrów układu napędowego (*FL* – analizowany regulator stanu z systemem rozmytym, *CL* – klasyczny regulator stanu)

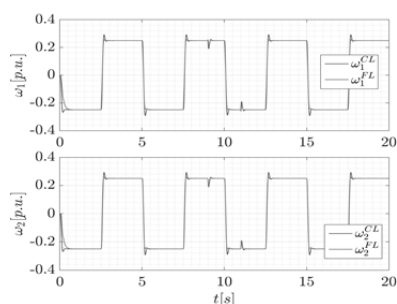
Współczynnik tłumienia oraz pulsacja układu wpływają bezpośrednio na wartości nastaw regulatora stanu (rys. 7). Po początkowym dostrojeniu struktury sterowania prędkością, poszczególne wartości są stabilizowane na

oczekiwanym poziomie, który zapewnia dynamiczne oraz precyzyjne kształtowanie zmiennych stanu. Zauważalne są zmiany poszczególnych wielkości podczas dokonywania kolejnych nawrotów (wartość pulsacji jest zwiększana, jednocześnie współczynnik tłumienia jest zmniejszany). Działanie jest zgodne z powierzchniami modelu rozmytego (rys. 4).



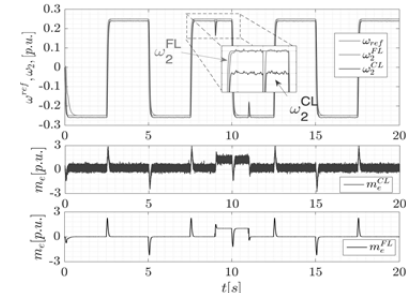
Rys. 7. Zmiany współczynnika tłumienia  $\xi_r$  oraz pulsacji układu  $\omega_r$  (a), a także adaptacja poszczególnych wzmacnień regulatora stanu (b)

Następne testy dotyczyły odporności opisanej struktury sterowania na zmianę stałej czasowej obciążenia  $T_2$  (rys. 8). Wstępnie przedstawiono porównanie przebiegów prędkości obu analizowanych struktur sterowania prędkością układu dwumasowego. Testy wykonano dla zakłóconej wartości  $T_2$ . Wzmocnienia klasycznego regulatora stanu zostały obliczone dla wartości znamionowych napędu. Struktura rozmyta zakładała dostrajanie współczynników podczas pracy układu. Wprowadzane korekty umożliwiły bardziej skuteczne tłumienie przeregulowań obserwowanych w przebiegach prędkości.



Rys. 8. Przebiegi prędkości silnika ( $\omega_1$ ) oraz prędkości obciążenia ( $\omega_2$ ) dla zwiększonej stałej czasowej maszyny roboczej  $T_2 = 2T_{2n}$

Sygnaly w układach przemysłowych (np. prąd oraz prędkość) zawierają tzw. szumy pomiarowe. W związku z powyższym, przeprowadzono również badania z zakłóceniami w pętli sprzężenia od prędkości obciążenia (rys. 9).



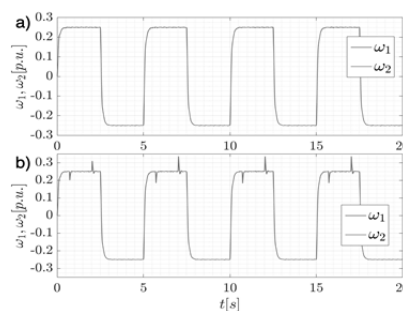
Rys. 9. Przebiegi zmiennych stanu układu napędowego z dodatkowym zakłóceniem dodanym w pętli sprzężenia od prędkości obciążenia

Do zmiennej wprowadzono dodatkowy sygnał (liczby losowe o rozkładzie normalnym, zakres wartości został przeskalowany do 4 % amplitudy wartości zadanej). Struktura sterowania z adaptacyjnym regulatorem stanu jest bardziej precyzyjna w obecności zakłóceń pomiarowych. Efekt wynika z możliwości aktualizacji (redukcji wartości) nastaw, które wzmacniają wprowadzane szumy. W klasycznym układzie moment elektromagnetyczny jest znacząco zakłócony, natomiast prędkość zawiera uchyb ustalony (rys. 9).

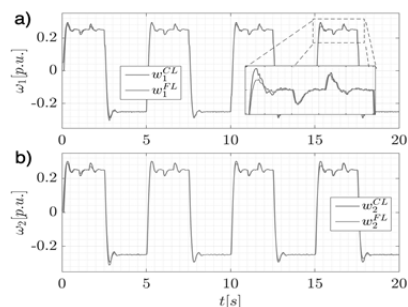
## Eksperyment

Po przeprowadzeniu badań symulacyjnych zweryfikowano działanie analizowanej struktury poprzez eksperyment. Układ napędowy składa się z dwóch silników prądu stałego o mocy 500 W. Maszyny połączone są za pomocą długiego stalowego wału. Szczegółowy opis zestawu badawczego przedstawiono w [7].

W pierwszej kolejności wykonano badania prezentujące pracę silników, które nie były obciążone (rys. 10a). Podstawowym celem było sprawdzenie możliwości zastosowania zmodyfikowanego regulatora stanu dla obiektu rzeczywistego. Algorytm sterowania działa poprawnie, prędkości silników są zgodne z przebiegiem zadany. Praca układu napędowego, podczas wystąpienia zakłócenia zewnętrznego, w postaci momentu obciążenia, jest również zgodna z oczekiwaniami (rys. 10b). Kształtowany sygnał sterujący regulatora adaptacyjnego umożliwia szybką reakcję oraz utrzymywanie prędkości na poziomie zadanym. Obserwacje są zbliżone do wyników uzyskanych na etapie symulacji.



Rys. 10. Przebiegi prędkości silnika oraz maszyny roboczej w układzie napędowym z adaptacyjnym regulatorem stanu: nawroty silników (a) oraz przełączanie obciążenia w trakcie pracy napędu (b)



Rys. 11. Przebiegi prędkości silnika  $\omega_1$  oraz maszyny roboczej  $\omega_2$  w układzie napędowym z regulatorem stanu - zwiększona stała czasowa maszyny roboczej

Kolejny test zakładał zmianę parametrów mechanicznych napędu (zwiększona stała czasowa maszyny roboczej). Układ działał z przełączanym momentem obciążenia (rys. 11). Widoczne są adaptacyjne możliwości przedstawionej struktury, przeregulowanie jest zmniejszane po każdym nawrocie. Zaprezentowane przebiegi zmiennych stanu potwierdzają wstępne założenia

związane z proponowanym układem sterowania, usprawnione zostało działanie podstawowego rozwiązania w obecności zmian w obiekcie. Porównanie obu struktur potwierdza obserwacje z części symulacyjnej badań.

#### Wnioski

W artykule przedstawiono modyfikację klasycznego regulatora stanu, który został zastosowany dla napędu elektrycznego z elastycznym sprzęgłem. Zadaniem elementu rozmytego była adaptacja parametrów (pulsacji rezonansowej oraz współczynnika tłumienia) decydujących o dynamice obiektu. Zaimplementowany model rozmyty przestraja wartości wzmocnień regulatora w oparciu o aktualną wartość błędu. W ten sposób możliwa jest szybka reakcja na występujące zakłócenia.

Strojenie nastaw regulatorów stosowanych w układach sterowania silnikami elektrycznymi, które uwzględnia wszystkie czynniki związane z działaniem oraz konstrukcją (opóźnienia części energoelektronicznej, nieliniowości, zmiany parametrów silnika w trakcie pracy, itd.), metodami klasycznymi jest trudne do zrealizowania. Aplikacja, w powyższym celu, algorytmów opartych o działania stadne organizmów, umożliwia pominięcie złożonych operacji matematycznych oraz łatwe definiowanie kryteriów optymalizacji. Istnieje również możliwość uwzględnienia wielu założeń oraz ograniczeń w przeprowadzanych obliczeniach. W artykule opisano skuteczną aplikację algorytmu SOS w projektowaniu części rozmytej regulatora stanu.

Kontrola poszczególnych zmiennych obiektu umożliwiła prawidłowe kształtowanie sygnału sterującego. Efektem jest precyzyjne działanie napędu – zgodność prędkości układu z wartością zadaną.

**Autorzy:** mgr inż. Mateusz Żychlewicz, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.zychlewicz@pwr.edu.pl; mgr inż. Radosław Stanisławski, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: radoslaw.stanislawski@pwr.edu.pl; dr inż. Jarosław Szrek, Politechnika Wrocławska, Wydział Mechaniczny, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn i Układów Mechatronicznych, ul. Łukasiewicza 7/9, 50-371 Wrocław, e-mail: jaroslaw.szrek@pwr.edu.pl; mgr inż. Mateusz Malarczyk, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.malarczyk@pwr.edu.pl; dr hab. inż. Marcin Kamiński, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: marcin.kaminski@pwr.edu.pl.

#### LITERATURA

- [1] Errouissi R., Al-Durra A., Muyeen S. M., Experimental validation of a novel PI speed controller for AC motor drives with improved transient performances, *IEEE Trans. Control Systems Technology*, 26 (2018), No. 4, 1414-1421
- [2] Velagić J., Obarčanin K., Kapetanović E., Huseinbegović S., Osmić N., Design of PLC-based PI controller for the permanent magnet DC motor under real constraints and disturbances, *International Symposium on Information, Communication and Automation Technologies*, (2009), Bośnia, 29-31 października
- [3] Nise N. S., Control Systems Engineering, 7th Edition, Wiley, (2014)
- [4] Rebeiro R. S., Uddin M. N., Performance comparison of a PI and an FLC based tuned PI with adaptive hysteresis controllers for IPMSM drive, *International Conference on Electrical & Computer Engineering*, (2010), 18-20 grudnia, Dhaka, Bangladesz
- [5] Barsaiyan P. Purwar S., Comparison of state feedback controller design methods for MIMO systems, *2010 International Conference on Power, Control and Embedded Systems*, (2010), 1-6, 29 listopada-1 grudnia, Allahabad, Indie, doi: 10.1109/ICPCES.2010.5698642.
- [6] Grzesiak L. M., Ufnalski B., Neural-network-based programmable state feedback controller for induction motor drive, *The 2006 IEEE International Joint Conference on Neural Network Proceedings*, (2006), 1091-1097, 16-21 lipca, Vancouver, Kanada, doi: 10.1109/IJCNN.2006.246811
- [7] Szczepanski R., Kaminski M., Tarczewski T., Auto-tuning process of state feedback speed controller applied for two-mass system, *Energies*, 13 (2020), No. 12 doi: 10.3390/en13123067
- [8] Wróbel K., Drózd K., Szabat K., Application of fuzzy unscented Kalman filter for states and parameter estimation of two mass drive, *2020 IEEE 29th International Symposium on Industrial Electronics (ISIE)*, (2020), 259-264, 17-19 czerwca, Delft, Holandia, doi: 10.1109/ISIE45063.2020.9152563.
- [9] Kamiński M., Drózd K., Szabat K., Estimation of the mechanical state variables of two-mass system using adaptive Kalman filter, *2015 IEEE 11th International Conference on Power Electronics and Drive Systems*, (2015), 1152-1155, 9-12 czerwca, Sydney, Australia, doi: 10.1109/PEDS.2015.7203543.
- [10] Drózd K., Orłowska-Kowalska T., Szabat K., Application of the modified fuzzy Kalman filter to states estimation of the two-mass system, *2015 IEEE International Conference on Industrial Technology (ICIT)*, (2015), 634-639, 17-19 marca, Sewilla, Hiszpania, doi: 10.1109/ICIT.2015.7125169.
- [11] Urbanski K., Janiszewski D., Position estimation at zero speed for PMSMs using artificial neural networks, *Energies*, 14 (2021), No. 23, doi: 10.3390/en14238134
- [12] Szabat K., Tran-Van T., Kamiński M., A modified fuzzy Luenberger observer for a two-mass drive system, *IEEE Transactions on Industrial Informatics*, 11 (2015), No. 2, 531-539, doi: 10.1109/TII.2014.2327912.
- [13] Serkies P. J., Szabat K., Application of the MPC to the position control of the two-mass drive system, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 60 (2012), No. 9, 3679-3688, doi: 10.1109/TIE.2012.2208435.
- [14] Pajchrowski T., Siwek P., Wójcik A., Application of the Reinforcement Learning method for adaptive electric drive control with variable parameters, *2021 IEEE 19th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, (2021), 687-694, 25-29 kwietnia, Gliwice, Polska, doi: 10.1109/PEMC48073.2021.9432592.
- [15] Zawisłak R., Weryfikacja wrażliwości obserwatora zredukowanego z kompensacją nieliniowości na niedokładną identyfikację parametrów silnika bezszczotkowego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 7(2020), 97-102, doi:10.15199/48.2020.07.18
- [16] Szabat K., Orłowska-Kowalska T., Vibration suppression in a two-mass drive system using PI speed controller and additional feedbacks – comparative study, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 54 (2007), No. 2, 1193-1206
- [17] Yang X.-S., Nature-inspired optimization algorithms, *Elsevier*, (2014)
- [18] Knypiński Ł., Nowak L., Application of the Grey Wolf Algorithm for optimization of PM synchronous motor, *2019 19th International Symposium on Electromagnetic Fields in Mechatronics, Electrical and Electronic Engineering (ISEF)*, (2019), 1-2, Nancy, Francja, 29-31 sierpnia, doi: 10.1109/ISEF45929.2019.9097055.
- [19] Cheng M.-Y., Prayogo D., Symbiotic Organisms Search: A new metaheuristic optimization algorithm, *Computers & Structures*, 139 (2014), 98-112, doi: 10.1016/j.compstruc.2014.03.007
- [20] Tarczewski T., Grzesiak L. M., An application of novel nature-inspired optimization algorithms to auto-tuning state feedback speed controller for pmsm, *IEEE Transactions on Industry Applications*, 54 (2018), No. 3, 2913-2925
- [21] Zawirski K., Nowopolski K., Siwek P., Application of cuckoo search algorithm for speed control optimization in two-sided electrical drive, *IEEE 18th International Power Electronics and Motion Control Conference (PEMC)*, (2018), 651-656