

*sterowanie adaptacyjne, sterowanie rozmyte,
kompensacja tarcia, nieliniowa charakterystyka sprzęgła*

Karol WRÓBEL*

ADAPTACYJNE STEROWANIE ROZMYTE ZE ZBIORAMI TYPU II ZŁOŻONEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO PRACUJĄCEGO W ZAKRESIE PRĘDKOŚCI NISKIEJ

W pracy zaprezentowano zagadnienie adaptacyjnego sterowania rozmytego bazującego na zbiorach typu drugiego. Badania przeprowadzono dla zakresu prędkości niskich. W części mechanicznej napędu uwzględniono model układu dwumasowego, nieliniowe charakterystyki tarcia i sprzęgła.

1. WPROWADZENIE

W ogólnym przypadku zaprojektowanie sterownika wymaga znajomości modelu procesu, który podlegać będzie sterowaniu. Jednak w wielu przypadkach znalezienie odpowiedniego modelu jest zadaniem czasochłonnym i trudnym, często wymuszającym przyjęcie szeregu założeń upraszczających. W przypadku stosowania zbiorów rozmytych nie jest wymagana szczegółowa znajomość modelu procesu. Wykorzystuje się doświadczenie i wiedzę ekspercką na temat działania procesu. Rozwiązania wykorzystujące ten typ logiki rekomendowane są do obiektów źle opisanych, charakteryzujących się dużą niepewnością dotyczącą rzędu i parametrów czy z różnymi typami nieliniowości.

Historia logiki rozmytej sięga roku 1965, kiedy to profesor Lofti Zadeh z Uniwersytetu w Kalifornii opublikował artykuł „Fuzzy Sets” [11] przedstawiających ideę i podstawowe działania na zbiorach rozmytych. Od końca lat 80. XX w. nastąpił gwałtowny rozwój sterowania rozmytego we wszystkich rozwiniętych państwach świata. Główną zaletą tego typu sterowania jest fakt, iż bazując na logice rozmytej umożliwiają one heurystyczne (oparte na lingwistycznym ujęciu) pojmowanie zjawisk. Zarówno wejścia systemu, jak i jego wyjścia mogą mieć postać lingwistyczną a postać numeryczną można przedstawić w postaci rozmytej.

* Politechnika Wroclawska, Katedra Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, e-mail: karol.wrobel@pwr.edu.pl

Podczas pracy układu przy niskich prędkościach należy uwzględnić wpływ nieliniowego momentu tarcia. Jego pominięcie, bądź przyjęcie niewłaściwego modelu, może doprowadzić do powstania w obiekcie oscylacji momentu i prędkości w chwilach przejścia przez zero. W systemach dwumasowych z kolei obciążenie (maszyna robocza) połączone jest z silnikiem napędowym za pośrednictwem wału o skończonej sztywności. W takim podejściu w stanach przejściowych, występują różnice prędkości pomiędzy kolejnymi stopniami. Skutkiem powyższych różnic są oscylacje zmiennych stanu napędu. W wielu przypadkach element łączący masy układu posiada charakterystykę nieliniową.

2. ZBIORY ROZMYTE

Przedstawiając otaczający świat, człowiek bez większego problemu potrafi opisać go potocznymi słowami, np. „wysoka jakość”, „bardzo ciepło”, „duża prędkość”. Problemem w tym przypadku jest określenie wartości liczbowych odpowiadających tym opisom. Podane opisy są niejednoznaczne i względne. Dla jednej osoby „wysoka jakość” jest czymś innym niż dla innej. Operator procesu często nie może w sposób formalny określić motywów swoich decyzji, gdyż korzysta z nieprecyzyjnych sformułowań. W logice rozmytej, przy założeniu, że zakres zmienności sygnałów (wejściowych, wyjściowych) określony jest przez zbiór X , można wyróżnić podzbiory A_1, \dots, A_n , które grupują elementy o określonych właściwościach. Dopuszcza się przy tym, że poszczególne elementy x zbioru X należą do zbioru A_i tylko w określonym stopniu, opisanym przez funkcję przynależności.

Można zatem, zdefiniować zbiór rozmyty A , w przestrzeni numerycznej X , charakteryzowany zbiorem par:

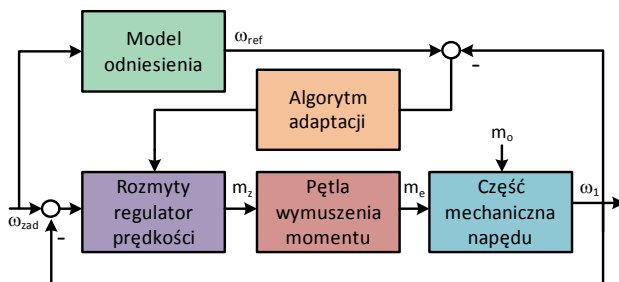
$$A = \{(\mu_A(x), x)\}, \quad \forall x \in X \quad (1)$$

gdzie: μ_A jest funkcją przynależności zbioru rozmytego A , która każdemu elementowi $x \in X$ przypisuje stopień przynależności $\mu_A(x) \in [0, 1]$ do zbioru rozmytego A .

W zbiorze rozmytym typu II, będącym rozwinięciem zbioru rozmytego typu I [3], [5], [6], [7], stopień przynależności do zbioru A_{II} określony jest za pomocą miary rozmytej, będącej również pewnym zbiorem rozmytym. Pozwala to na wprowadzenie dodatkowej niepewności parametryzacji funkcji przynależności.

3. OBIEKT BADAŃ

Układ sterowania składa się z rozmytego regulatora prędkości, algorytmu adaptacji, pętli wymuszenia prędkości oraz części mechanicznej napędu. Schemat ideowy układu przedstawiono na rysunku 2. Podczas badań przyjęto reprezentację równań w jednostkach względnych.



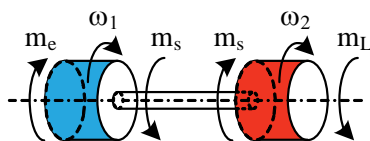
Rys. 2. Schemat ideowy układu badań

Pętla wymuszenia momentu składa się z regulatora momentu, bloku przekształtnika, części elektromagnetycznej napędu oraz układu pomiaru lub estymacji momentu. Podczas badań przyjęto, że pętla wymuszenia momentu jest zoptymalizowana i opisana członem inercyjnym pierwszego rzędu (2) o stałej czasowej $T = 0,001$.

$$G_m(s) = \frac{1}{0,001s + 1} \quad (2)$$

W części mechanicznej napędu uwzględniono model układu dwumasowego, nieliniową charakterystykę tarcia i nieliniową charakterystykę sprzęgła.

Układ dwumasowy opisano wykorzystując model z bezinercyjnym połączeniem sprężystym. Używany jest w układach, w których moment bezwładności elementu sprężystego jest wielokrotnie mniejszy od momentów bezwładności silnika napędowego i maszyny roboczej [9]. Moment bezwładności elementu podatnego dodaje się po połowie do wartości momentów bezwładności mas położonych na jego końcach, uzyskując w ten sposób zastępcze momenty bezwładności silnika napędowego i obciążenia. Schemat układu dwumasowego przedstawiono na rysunku 3, natomiast równania opisujące zależności w nim występujące przedstawiono wzorami (3)–(5).



Rys. 3. Schemat układu dwumasowego

$$\frac{d\omega_1}{dt} = \frac{1}{T_1} (m_e - m_s) \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_2}{dt} = \frac{1}{T_2} (m_s - m_L) \quad (4)$$

$$\frac{dm_s}{dt} = \frac{1}{T_c}(\omega_1 - \omega_2) \quad (5)$$

gdzie: $T_1 = J_1 \Omega_{0N} / M_{eN}$, $T_2 = J_2 \Omega_{0N} / M_{eN}$ – mechaniczna stała czasowa silnika napędzającego i maszyny roboczej, $T_c = M_{eN} / K_c \Omega_{0N}$ – stała czasowa wału łączącego masy, $\omega_{1,2}$ – prędkość silnika i maszyny roboczej, J_1, J_2 – moment bezwładności odpowiednio silnika napędowego oraz maszyny roboczej, m_e, m_s, m_L – momenty: elektromagnetyczny, skrętny i obciążenia, K_c – współczynnik sprężystości elementu łączącego, Ω_{0N} – prędkość znamionowa, M_{eN} – moment znamionowy.

Dostępny jest szereg prac opisujących zjawisko tarcia i proponujących różne jego modele [1], [2], [8], [10]. Modele statyczne zawierają zazwyczaj tarcie Coulomba (stałe, niezależne od prędkości) i tarcie wiskotyczne (proporcjonalne do prędkości). Bardziej zaawansowane modele uwzględniają także tarcie statyczne o charakterystyce nieliniowej zmniejszającej się wraz z prędkością, jak również tarcie wentylatorowe (proporcjonalne do kwadratu prędkości). Charakterystyczny dla zaawansowanych modeli jest tzw. efekt Stribeck’a polegający na zmniejszaniu się wartości tarcia wraz ze wzrostem prędkości (dla prędkości niskich). W praktyce często stosuje się aproksymację wypadkowej charakterystyki tarcia opisaną zależnością (6) lub uproszczoną wersję charakterystyki opisaną zależnością (7). Obie charakterystyki przedstawiono na rysunku 4. W prezentowanej pracy założono, że w przypadku obecnie stosowanych silników nie ma potrzeby uwzględniania nieliniowej charakterystyki tarcia, charakterystykę taką należy jednak uwzględnić po stronie maszyny roboczej.

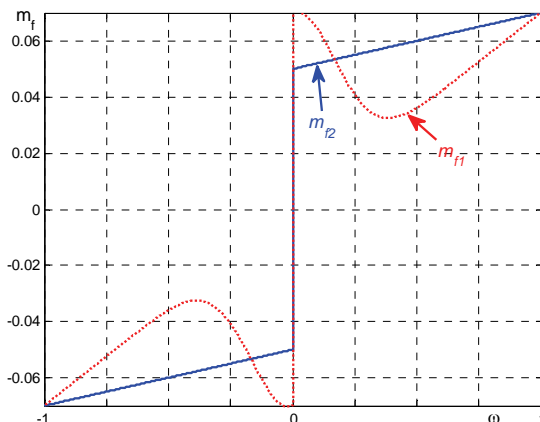
$$m_{f1}(\omega) = \text{sign}(\omega)b(|\omega| + e^{-a|\omega|+c})^2 \quad (6)$$

$$m_{f2}(\omega) = \text{sign}(\omega)(a|\omega| + b) \quad (7)$$

Zazwyczaj nieliniową charakterystykę elementu łączącego masy układu dwumasowego aproksymuje się krzywą trzeciego stopnia. Przy uwzględnieniu własności tłumiących elementu łączącego, układ dwumasowy można traktować jako układ lepko sprężysty. W takim przypadku charakterystyka sprzęgła tworzy pętlę histerezy. Układy z większym tłumieniem wykazują się większą szerokością pętli. Charakterystykę takiego elementu opisuje równanie [4]:

$$m = d\Delta\varphi + h\Delta\varphi^3 + \tau(d + 3h\Delta\varphi^2) \frac{d\Delta\varphi}{dt} \quad (8)$$

gdzie: d, h – współczynniki określające udział liniowego i nieliniowego członu w charakterystyce elementu łączącego masy, τ – stała czasowa narastania kąta skręcenia po skokowym przyłożeniu momentu skręcającego, $\Delta\varphi = \varphi_1 - \varphi_2$ – kąt skręcenia elementu łączącego.



Rys. 4. Charakterystyki tarcia opisane zależnościami (6), (7)

Zadaniem algorytmu adaptacji jest dostosowanie parametrów regulatora do aktualnych warunków pracy, występujących zakłóceń i zmian parametrów układu. Jako model odniesienia zastosowano człon oscylacyjny drugiego rzędu:

$$G_m(s) = \frac{\omega_r^2}{s^2 + 2\xi_r \omega_r s + \omega_r^2} \quad (9)$$

gdzie: ξ_r – współczynnik tłumienia, ω_r – pulsacja rezonansowa modelu

Mechanizm adaptacji opiera się na zależności [10]:

$$\delta_{err} \cong k_p e_\omega + k_d \Delta e_\omega \quad (10)$$

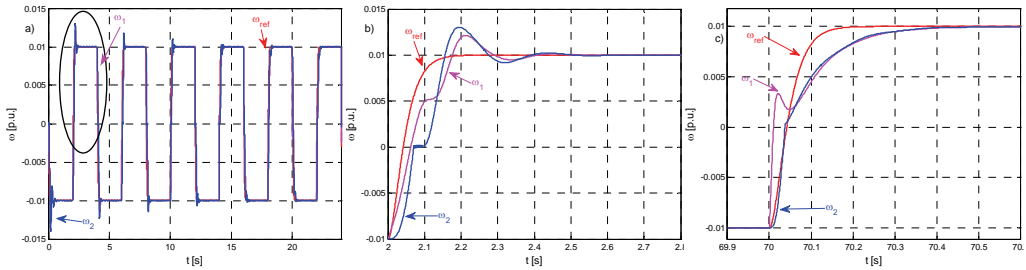
gdzie: k_p , k_d – współczynniki adaptacji, e_ω – różnica prędkości między modelem odniesienia i obiektem badań.

Wykorzystanie sygnału proporcjonalnego do zmiany błędu Δe_ω oraz rozbitcie współczynnika uczenia na dwie niezależne składowe k_p i k_d pozwala uzyskać lepsze właściwości dynamiczne obiektu.

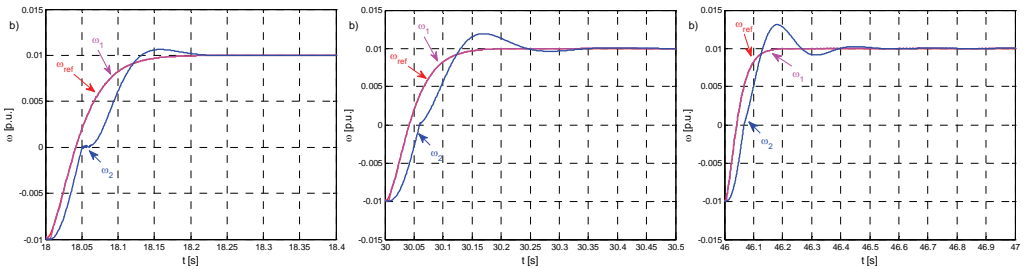
4. WYNIKI BADAŃ

W pierwszej części badań sprawdzono działanie rozmytego regulatora prędkości opartego na zbiorach typu pierwszego. W badaniach symulacyjnych w modelu odniesienia postaci (9) przyjęto następujące wartości parametrów: współczynnik tłumienia $\xi_r = 1$, pulsacja rezonansowa modelu $\omega_r = 40$. Krok obliczeń wynosił 500 μ s. Dla

prędkości zadanej 0,01 w wyniku optymalizacji uzyskano następujące parametry: dla układów ze zbiorami typu I: $k_p = 514,2617$, $k_d = 10$, $k_{rp} = 83,25$, $k_{rd} = 0,2188$ dla układów ze zbiorami typu II z nieliniową charakterystyką sprzęgła ($d = 1$, $h = 0,2$, $\tau = 0,03$): $k_p = 34188$, $k_d = 34,3516$, $k_{rp} = 2,2217$, $k_{rd} = 1,2388$.



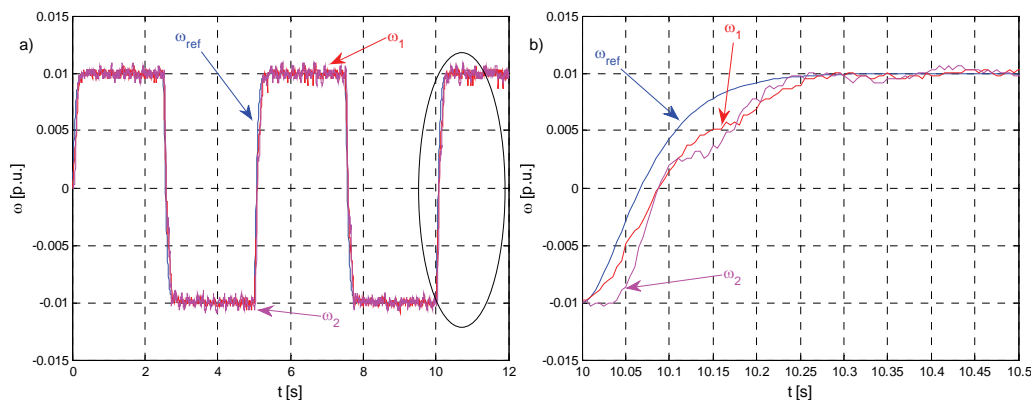
Rys. 5. Przebiegi prędkości w układzie adaptacyjnego sterowania rozmytego ze zbiorami typu I



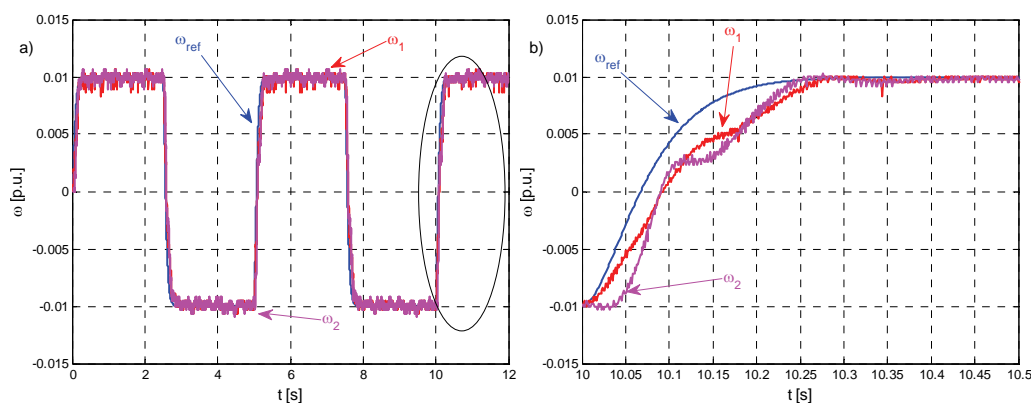
Rys. 6. Przebiegi prędkości w układzie adaptacyjnego sterowania rozmytego ze zbiorami typu II z nieliniową charakterystyką sprzęgła dla mechanicznej stałej czasowej $T_2 = T_{2n}$, $T_2 = 2T_{2n}$, $T_2 = 4T_{2n}$

W badaniach eksperymentalnych stanowisko badawcze składało się z dwóch silników prądu stałego (typ PZBb22b, $P_n = 500$ W, $n_n = 1450$ obr/min, $U_n = 220$ V, $I_n = 3,15$ A), połączonych wałem o długości 600mm. Silnik napędowy zasilany jest z przekształtnika o konfiguracji mostka H. Prędkość silników mierzona była przez enkodery inkrementalne Kubler o rozdzielczości 36000 impulsów na obrót. Prąd mierzony był za pomocą przetworników firmy LEM. Algorytm sterowania implementowany był poprzez komputer wyposażony w kartę DS1103 z procesorem sygnałowym.

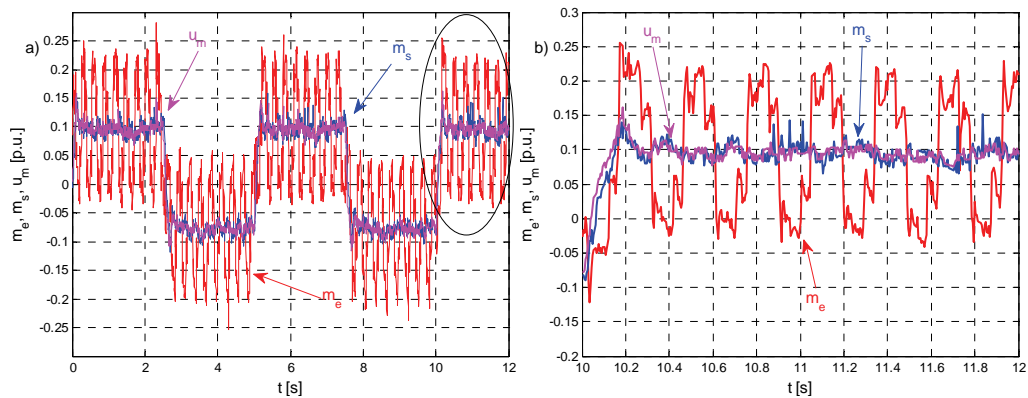
Układ przebadano dla prędkości od 0,01 do 0,1 i dwóch częstotliwości sygnału zadanego prędkości (0,15 Hz i 0,2 Hz). Parametry regulatora i algorytmu adaptacji dobrano empirycznie i wynosiły odpowiednio: $k_p = 100$, $k_d = 10$, $k_{rp} = 0,96$, $k_{rd} = 0,002$. Wybrane wyniki badań przedstawiono na kolejnych rysunkach.



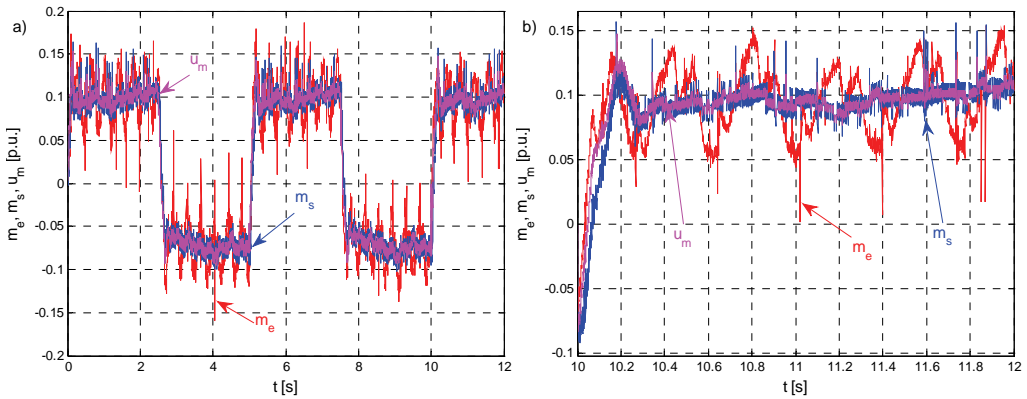
Rys. 7. Przebiegi prędkości w układzie adaptacyjnego sterowania rozmytego ze zbiorami typu I



Rys. 8. Przebiegi prędkości w układzie adaptacyjnego sterowania rozmytego ze zbiorami typu II



Rys. 9. Przebiegi momentu elektromagnetycznego i skrętnego oraz sygnału zadanego (zbiory typu I)



Rys. 10. Przebiegi momentu elektromagnetycznego i skrętnego oraz sygnału zadanego (zbiory typu II)

5. PODSUMOWANIE

W badaniach symulacyjnych układy ze zbiorami typu drugiego w zasadzie przy starcie wykazują lepsze właściwości regulacyjne. Poziom przeregulowania przy rozruchu i pierwszym nawrocie jest zdecydowanie niższy niż w przypadku układów ze zbiorami typu pierwszego. Występują oscylacje, które w procesie adaptacji są szybko niwelowane. Czas narostu w przypadku regulatora opartego na zbiorach typu drugiego jest nieznacznie dłuższy, wynika z tego także wyższy poziom błędów śledzenia prędkości referencyjnej, szczególnie w przypadku prędkości obciążenia, jednak czas ustalenia prędkości jest niższy.

W badaniach eksperymentalnych sprawdzono działanie układów opartych na zbiorach typu I i II. Parametry regulatora dobrano empirycznie. W przebiegach prędkości widać, modelowane podczas badań symulacyjnych, działanie momentu tarcia. Na rysunkach widoczne jest charakterystyczne utknięcie prędkości obciążenia w okolicach zera. Układ poprawnie stabilizuje prędkości silnika i maszyny roboczej na wartości zadanej, w przebiegach prędkości nie występują znaczące przeregulowania i oscylacje. Dynamika ustalania prędkości jest w obu przypadkach w zasadzie taka sama, przy czym sam przebieg prędkości ma inny charakter. W przypadku zbiorów typu drugiego sygnał prędkości ma wyraźną składową wysokoczęstotliwościową. W układach opartych na zbiorach typu drugiego częstotliwość zmian momentu elektromagnetycznego jest większa, ale zmiany te mają mniejsze amplitudy. Czas utknięcia w okolicy prędkości równej zero jest krótszy.

LITERATURA

- [1] AL-BENDER F., LAMPAERT V., SWEVERS J., *The generalized maxwell-slip friction model: a novel model for friction simulation and compensation*, IEEE Trans. on Automatic Control, 2005, 50, 11, 1883–1887.

- [2] CILIZ M.K., TOMIZUKA M., *Friction modeling and compensation for motion control using hybrid neural network models*, Engineering Application of Artificial Intelligence, 2007, 20, 898–911.
- [3] KARNIK N.N., MENDEL J.M., LIANG Q., *Type-2 Fuzzy Logic Systems*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 1999, 7, 6, 643–658.
- [4] KAROLEWSKI B., *Modelowanie więzów łączących elementy układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2001, 02, 39–43.
- [5] KNYCHAS S., *Zastosowanie regulatorów rozmytych w adaptacyjnej strukturze sterowania napędu elektrycznego*, rozprawa doktorska, Wydział Elektryczny, Politechnika Wrocławska, Wrocław 2015.
- [6] KNYCHAS S., SZABAT K., *Zastosowanie adaptacyjnego regulatora opartego na zbiorach rozmytych typu II do sterowania prędkością układu napędowego*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, 4, 160–163.
- [7] LIANG Q., MENDEL J.M., *Interval Type-2 Fuzzy Logic Systems: Theory and Design*, IEEE Trans. on Fuzzy Systems, 2000, 8, 5, 535–550.
- [8] OLSSON H., ÅSTRÖM K.J., CANUDAS de WIT C., GÄFVERT M., LISCHINSKY P., *Friction Models and Friction Compensation*, European Journal of Control, 1998, 4, 3, 176–195.
- [9] SZABAT K., *Struktury sterowania elektrycznych układów napędowych z połączeniem sprężystym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Monografie, 2008.
- [10] SZABAT K., WRÓBEL K., *Zastosowanie rozmytego sterowania adaptacyjnego w układzie napędowym z tarcie mechanicznym*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 70, Seria Studia i Materiały Nr 34, 2014, 260–270.
- [11] ZADEH L.A., *Fuzzy sets*, Information and Control, 1965, 8, 338–3533.

ADAPTIVE FUZZY CONTROL BASED ON SETS OF THE SECOND TYPE OF THE COMPLEX DRIVE SYSTEM OPERATING AT LOW SPEED

The paper presents the problem of adaptive fuzzy control based on sets of the second type. The study was conducted for the low speed range. In the mechanical drive system model includes dual mass and nonlinear characteristics of friction and coupling.