

IDENTYFIKACJA ZŁOŻONEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO JAKO SYSTEMU WIENERA**

STRESZCZENIE

Artykuł dotyczy identyfikacji części mechanicznej napędu dwumasowego z silnikiem indukcyjnym. W procesie identyfikacji uwzględniono występowanie w układzie trudno modelowanych zjawisk nieliniowych, takich jak luzy i tarcie suche, co spowodowało, że realizowano identyfikację nieliniowego obiektu dynamicznego. W niniejszej pracy zaproponowano identyfikację według koncepcji systemów blokowo zorientowanych, przy zastosowaniu systemu Wienera. Liniowy podsystem dynamiczny układu napędowego identyfikowano parametrycznie, za pomocą metody zmiennych instrumentalnych, natomiast trudno modelowalne nieliniowości identyfikowano nieparametrycznie, przy zastosowaniu estymatora regresji jądrowej. W procesie identyfikacji zastosowano metodę odsprzęgania podsystemu liniowego i nieliniowego, wykorzystującą właściwości pobudzenia typu PRBS.

Słowa kluczowe: układ dwumasowy, identyfikacja parametryczna, identyfikacja nieparametryczna, system Wienera, metoda zmiennych instrumentalnych, estymator regresji jądrowej

IDENTIFICATION OF THE COMPLEX DRIVE SYSTEM AS A WIENER SYSTEM

The paper deals with the identification of the mechanical part of a two-mass drive system. The system nonlinearities were taken into account and thus the dynamical nonlinear system was identified. The identification approach took advantage of the block oriented systems theory. A block oriented Wiener system was used, which consists of the dynamic linear subsystem and the static nonlinear subsystem, connected in series. Both parametric and nonparametric identification algorithms were applied to solve the problem of Wiener system identification. The static nonlinearity was identified nonparametrically by means of the kernel regression estimate, while the dynamic linear subsystem was identified parametrically by means of the instrumental variables estimate.

The method for decoupling the systems nonlinearities using the PRBS input was also applied to the identification procedure. Good results have been obtained.

Keywords: two-mass system, parametric identification, nonparametric identification, Wiener system, instrumental variables estimate, kernel regression estimate

1. WSTĘP

W nowoczesnych aplikacjach napędowych istotna jest dokładna znajomość obiektu sterowania. W większości przypadków, gdy część mechaniczna układów mechatronicznych modelowana jest jako dynamiczny układ liniowy, dwu- lub wielomasowy, występujące w tym układzie zjawiska nieliniowe są pomijane. Zadanie identyfikacji obiektu sprowadza się wówczas do dobrze znanego zagadnienia identyfikacji parametrów liniowego modelu dynamicznego.

Gdy układ pracuje w zakresie małych prędkości, przy zmianach kierunku ruchu wirnika silnika, wpływ występujących w układzie zjawisk nieliniowych, takich jak tarcie suche i strefa martwa, staje się zauważalny. Jeśli wymagana jest duża precyzja sterowania układem pracującym w takich warunkach, jak na przykład w przypadku sterowania ramieniem robota czy napędami obrabiarkowymi, zjawiska nieliniowe powinny być uwzględnione. Jednak ich uwzględnienie w znacznym stopniu komplikuje zadanie identyfikacji, ponieważ należy wówczas zidentyfikować dynamiczny obiekt nieliniowy. Tradycyjnym podejściem do identyfikacji nieliniowych obiektów dynamicznych było

reprezentowanie estymowanych charakterystyk jako szeregu funkcjonałów nieliniowych Voltery lub Wienera [3, 6], ale ze względu na dużą złożoność obliczeniową metody te nie doczekały się wielu zastosowań w praktyce i zostały wyparte przez metody identyfikacji oparte na koncepcji tzw. „systemów zorientowanych blokowo”. Podejście to zaproponowano w [4].

Zgodnie z tą koncepcją zakłada się, że nieliniowy system dynamiczny może być przedstawiony jako zbiór połączonych ze sobą stosunkowo prostych elementów, tj. liniowych podsystemów dynamicznych i nieliniowych podsystemów statycznych. Stosowane są najczęściej takie systemy, jak system Hammersteina, system Wienera oraz addytywny system NARMAX.

W zastosowaniu do identyfikacji układów napędowych koncepcja systemów blokowo zorientowanych nie doczekała się jeszcze szerszego zastosowania. Dotychczas system takiego typu (system Hammersteina) zastosowano w pracach [1, 7]. Jako metodę identyfikacji autorzy [1] wykorzystywali sieci neuronowe i prosty algorytm gradientowy, natomiast autorzy [7] stosowali algorytm rekurencyjny najmniejszych kwadratów.

* Politechnika Wrocławska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych

** Artykuł uzyskał pozytywne recenzje i był prezentowany podczas Międzynarodowego Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME 2006 w Krakowie

W niniejszym artykule zaproponowano identyfikację dynamicznego obiektu nieliniowego, jakim jest część mechaniczna układu napędowego z silnikiem indukcyjnym przy wykorzystaniu blokowo zorientowanego systemu Wienera. Zaprezentowano wyniki parametrycznej identyfikacji części liniowej systemu Wienera oraz identyfikacji nieparametrycznej statycznych nieliniowości. Identyfikację parametryczną przeprowadzono za pomocą metody zmiennych instrumentalnych, a identyfikację nieparametryczną za pomocą estymatora regresji jądrowej. W procesie identyfikacji wykorzystano metodę odsprężania podsystemów nieliniowych systemu Wienera opracowaną na podstawie [2].

2. OPIS IDENTYFIKOWANEGO UKŁADU NAPĘDOWEGO

Przedmiotem identyfikacji jest część mechaniczna układu napędowego z silnikiem indukcyjnym, modelowana jako układ dwumasowy, opisana następującymi równaniami:

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} = m_e - m_s - B_m \omega_m \quad (1)$$

$$J_L \frac{d\omega_L}{dt} = m_s - B_L \omega_L - m_L - m_f(\omega_L) \quad (2)$$

$$m_s = k_s N(\Theta_m - \Theta_L) + B_s(\omega_m - \omega_L) \quad (3)$$

$$\frac{d\Theta_m}{dt} = \omega_m \quad (4)$$

$$\frac{d\Theta_L}{dt} = \omega_L \quad (5)$$

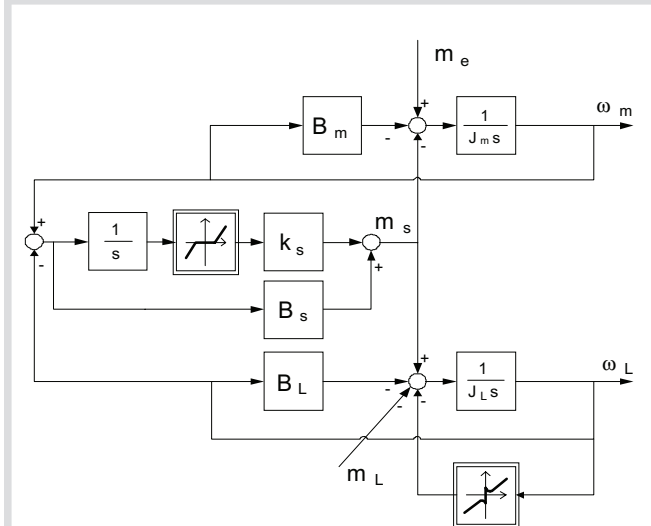
w których:

- J_M – moment bezwładności silnika,
- J_L – moment bezwładności maszyny obciążającej,
- m_e, m_s, m_L, m_f – odpowiednio moment elektromagnetyczny, skrętny, obciążenia i tarcia,
- ω_m – prędkość silnika,
- ω_L – prędkość obciążenia,
- Θ_m – kąt obrotu silnika,
- Θ_L – kąt obrotu obciążenia,
- B_m, B_L – współczynniki tarcia wiskotycznego odpowiednio silnika i obciążenia,
- B_s – współczynnik tłumienia wału,
- k_s – elastyczność wału,
- N – funkcja liniowa.

Schemat modelu identyfikowanego obiektu przedstawiono na rysunku 1. W modelu uwzględniono występowanie zjawisk nieliniowych jak luz i tarcie suche.

Zjawisko luzu występujące w układach mechatycznych związane jest z występowaniem elementów takich, jak sprzęgła, przekładnie zębate, w których stopniowo, w trakcie eksploatacji powstają luzy. Podczas zmiany kierunku

obrotów, w wyniku występującego luzu zmienia się powierzchnia styku przenosząca moment napędowy. Zjawisko to powoduje powstanie strefy martwej. W trakcie eksploatacji urządzenia napędowe zużywają się, co powoduje nasilenie się tego zjawiska.



Rys. 1. Schemat blokowy identyfikowanego układu

Fig. 1. The block diagram of the identified system

Natomiast zjawisko tarcia suchego utrudnia przejście ze stanu spoczynku do stanu ruchu.

Trudno zaproponować uniwersalny model zjawisk nieliniowych występujących w rozważanym układzie, a parametry możliwych modeli są trudne do wyznaczenia. Dlatego w niniejszej pracy prezentowany jest algorytm nieparametryczny do identyfikacji tych zjawisk. Do modelu odniesienia dla procesu identyfikacji wprowadzono te zjawiska, korzystając z następujących modeli matematycznych [8]:

- model charakterystyki tarcia

$$F(\omega_L) = \text{sign}(\omega_L) * 0,25 * \left(|\omega_L| + e^{-(a*|\omega_L|+0,1)^2} \right) \quad (6)$$

- zjawisko luzu:

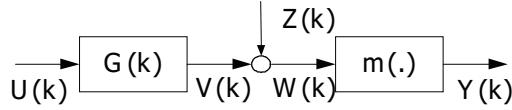
$$N(x) = \begin{cases} x - \varepsilon & \text{dla } x > \varepsilon \\ 0 & \text{dla } |x| < \varepsilon \\ x + \varepsilon & \text{dla } x < -\varepsilon \end{cases} \quad (7a)$$

$$\text{gdzie } x = \Theta_m - \Theta_L \quad (7b)$$

3. OPIS BLOKOWO ZORIENTOWANEGO SYSTEMU WIENERA

W koncepcji systemów zorientowanych blokowo zakłada się, że nieliniowy system dynamiczny może być przedstawiony jako połączenie stosunkowo prostych elementów, tj. liniowych podsystemów dynamicznych i nieliniowych pod-

systemów statycznych. W systemie Wienera przyjmuje się szeregowe połączenie liniowego podsystemu dynamicznego i nieliniowego podsystemu statycznego. Schemat blokowy tego systemu został przedstawiony na rysunku 2.



Rys. 2. System Wienera
 Fig. 2. The Wiener system

Podsystem dynamiczny systemu Wienera opisany jest następującym równaniem

$$G(k) = \sum_{i=1}^{\infty} \theta_i u(k-i) \quad (8)$$

zaś nieliniowy podsystem statyczny opisany jest równaniem

$$y(k) = m((V(k) + Z(k)), \eta_i) \quad (9)$$

gdzie $Z(k)$ zakłócenia (niezależne liczby losowe, o tym samym rozkładzie).

Zakłada się, że sygnały $V(k)$ i $W(k)$ łączące oba podsystemy są niedostępne pomiarowo. Zadanie sprowadza się więc do identyfikacji liniowego podsystemu dynamicznego i nieliniowego podsystemu statycznego, na podstawie sygnału wejściowego $U(k)$ i sygnału wyjściowego $Y(k)$.

4. PROCEDURA IDENTYFIKACJI

Procedura identyfikacji obejmuje metodę odsprężania podsystemów liniowego i nieliniowego oraz identyfikację parametryczną liniowego podsystemu dynamicznego i identyfikację nieparametryczną nieliniowego podsystemu statycznego. Metoda odsprężania nieliniowości wykorzystuje właściwości pobudzenia typu PRBS (*Pseudo Random Binary Sequence*). Pobudzenie PRBS przyjmuje tylko dwa stany i nie było zalecane do identyfikacji systemów nieliniowych ze względu na to, że nie pobudza nieliniowości występujących w układzie. Autor pracy [2] spostrzegł, że ze względu na tę właściwość, pobudzenie to może być wykorzystane w pierwszym etapie identyfikacji takiego systemu w celu zniwelowania wpływu podsystemu nieliniowego. Wykazano, że przy tym pobudzeniu system jest nieczuły na wpływ nieliniowości [2], można zatem zidentyfikować podsystem dynamiczny liniowy, niezależnie od podsystemu nieliniowego.

W kolejnych etapach identyfikacji stosuje się pobudzenie wzmacniające wpływ nieliniowości. Przy tym pobudzeniu można rozwiązać zadanie identyfikacji nieparametrycznej nieliniowego podsystemu statycznego.

Dynamiczny podsystem liniowy przybliżony był za pomocą modelu ARX

$$\mathbf{A}(q^{-1})\mathbf{Y}(k) = \mathbf{B}(q^{-1})\mathbf{U}(k) + \mathbf{V}(k) \quad (10)$$

Podsystem ten identyfikowany był parametrycznie za pomocą estymatora zmiennych instrumentalnych

$$\mathbf{p}^{iV} = (\Psi_N^T \Phi_N)^{-1} \Psi_N^T \mathbf{Y}_N^T \quad (11)$$

gdzie:

Φ_N – wektor N pomiarów wejściowych obiektu

$$\Phi_N = (\phi_1, \phi_2, \dots, \phi_N)^T \quad (12)$$

\mathbf{Y}_N – wektor N pomiarów wyjściowych obiektu, zebranych przy pobudzeniu typu PRBS, tzn. niwelującym wpływ nieliniowości w systemie

$$\mathbf{Y}_N = (Y_1, Y_2, \dots, Y_N)^T \quad (13)$$

Ψ_N – macierz tak zwanych zmiennych instrumentalnych

$$\Psi_N = (\psi_1, \psi_2, \dots, \psi_N)^T \quad (14)$$

Nieliniowy podsystem statyczny identyfikowany był nieparametrycznie. W procesie identyfikacji nie zakładano postaci modelu tego podsystemu. Do identyfikacji zadania identyfikacji nieparametrycznej zastosowano estymator regresji jądrowej [5]

$$\hat{c}_m(v) = \frac{\sum_{i=1}^M W_{i+1} K\left(\frac{y-Y_i}{h(m)}\right)}{\sum_{i=1}^M K\left(\frac{y-Y_i}{h(m)}\right)} \quad (15)$$

gdzie:

\mathbf{Y}_M – wektor M pomiarów wyjściowych całego obiektu zebranych przy pobudzeniu wzmacniającym wpływ nieliniowości

$$\mathbf{Y}_M = (Y_1, Y_2, \dots, Y_M)^T \quad (16)$$

\mathbf{W}_M – wektor M pomiarów wejściowych dla nieliniowego podsystemu statycznego $m(\cdot)$, wyznaczony na podstawie identyfikacji liniowego podsystemu dynamicznego $G(k)$ (rys. 2)

$$\mathbf{W}_M = (W_1, W_2, \dots, W_M)^T \quad (17)$$

$K(v)$ – funkcja jądrowa, spełniająca założenie

$$\int_{v=-\infty}^{\infty} K(v) dv = 1 \quad (18)$$

$h(n)$ – ciąg liczb dodatnich taki, że:

$$\lim_{m \rightarrow \infty} h(m) = 0 \quad (19a)$$

$$\lim_{m \rightarrow \infty} mh(m) = \infty \quad (19b)$$

Poszukiwana charakterystyka była wyznaczana lokalnie, punkt po punkcie. Zgodnie z (15), wyznaczono wartość kolejnych $c_m(v)$ należących do poszukiwanej charakterystyki, przy wstępnym założeniu dla jakich wartości v odtwarzana była charakterystyka.

Przyjęto następującą postać ciągu $h(m)$

$$h(m) = m^{-\frac{1}{5}} \quad (20)$$

oraz następującą postać funkcji jądrowej

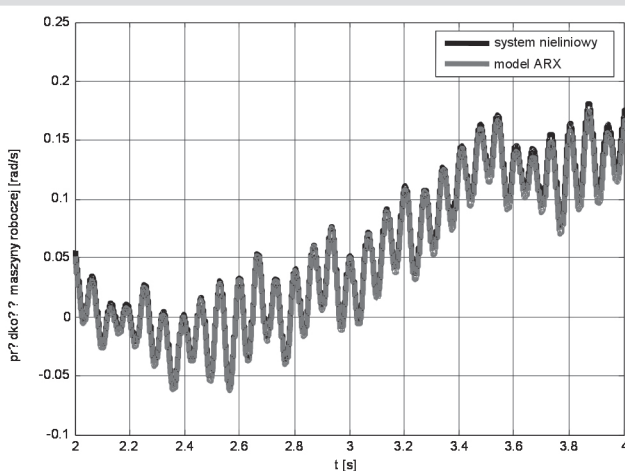
$$K(v) = e^{-v^2} \quad (21)$$

Proponowany algorytm, po przyjęciu powyższych założeń jest zbieżny według prawdopodobieństwa, gdy $m \rightarrow \infty$ [7].

5. WYNIKI BADAŃ SYMULACYJNYCH

Badania przeprowadzono w środowisku Matlab Simulink. W procesie identyfikacji symulowano zakłócanie układu białym szumem.

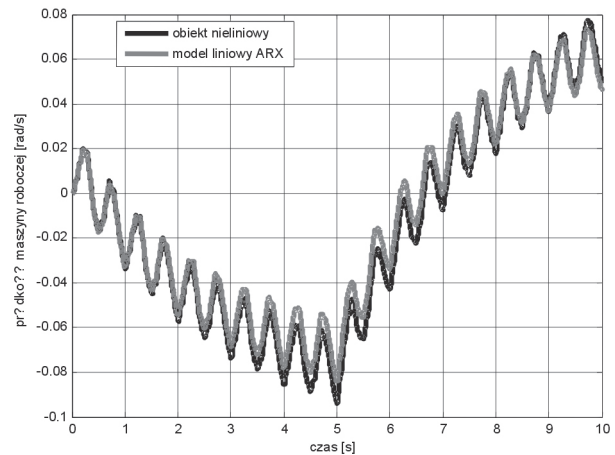
Na rysunku 3 przedstawiono porównanie odpowiedzi modelu liniowego ARX (10), którego parametry zostały wyznaczone za pomocą estymatora zmiennych instrumentalnych oraz odpowiedzi identyfikowanego obiektu (1)–(7) przy pobudzeniu typu PRBS. Widać, że przy takim pobudzeniu odpowiedź zidentyfikowanego modelu liniowego pokrywa się z odpowiedzią identyfikowanego nieliniowego obiektu. Można zaobserwować, że przy pobudzeniu nieliniowego układu napędowego sygnałem PRBS wpływ nieliniowości został praktycznie zniwelowany.



Rys. 3. Odpowiedź układu dwumasowego i modelu ARX przy pobudzeniu PRBS

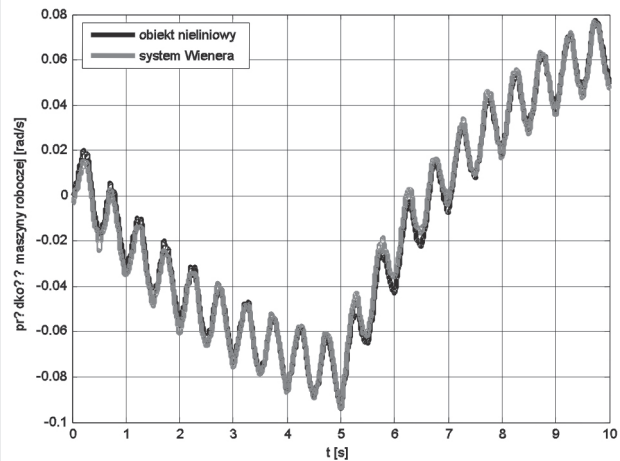
Fig. 3. Two-mass system and ARX model response under PRBS input

Na rysunku 4 przedstawiono odpowiedź tego samego modelu ARX i odpowiedź identyfikowanego obiektu przy pobudzeniu wzmacniającym wpływ nieliniowości. W przebiegu tych odpowiedzi można zaobserwować znaczne różnice. Natomiast na rysunku 5 przedstawiono odpowiedź kompletnego systemu Wienera. Nieliniowy podsystem statyczny tego systemu został zidentyfikowany nieparametrycznie za pomocą estymatora regresji jądrowej przy pobudzeniu wzmacniającym wpływ nieliniowości. Wyniki identyfikacji nieparametrycznej zostały dodane do modelu Wienera w postaci look-up tabeli.



Rys. 4. Odpowiedź układu dwumasowego i modelu ARX przy pobudzeniu wzmacniającym wpływ nieliniowości

Fig. 4. Two-mass system and ARX model response under the input exciting the system's nonlinearities



Rys. 5. Odpowiedź układu dwumasowego i zidentyfikowanego systemu Wienera przy pobudzeniu wzmacniającym wpływ nieliniowości

Fig. 5. Two-mass system and Wiener system response under the input exciting the system's nonlinearity

Przy wykorzystaniu dwuetapowej procedury identyfikacji i podejścia opartego na koncepcji systemów blokowo zorientowanych udało się uzyskać dobre wyniki identyfikacji części mechanicznej dwumasowego układu napędowego, przy uwzględnieniu występujących nieliniowości typu tarcie suche i luz, a tym samym rozwiązać trudne zadanie identyfikacji nieliniowego układu dynamicznego.

6. PODSUMOWANIE

W artykule zaprezentowano procedurę identyfikacji dynamicznego obiektu nieliniowego, na przykładzie części mechanicznej dwumasowego układu napędowego, wykorzystując koncepcję systemów blokowo zorientowanych. Zastosowano system Wienera, którego liniowy podsystem dynamiczny identyfikowano parametrycznie za pomocą

metody zmiennych instrumentalnych. Natomiast nieliniowy podsystem statyczny identyfikowany był nieparametrycznie za pomocą estymatora regresji jądrowej. W procedurze identyfikacji zastosowano metodę odsprężania nieliniowości systemu wykorzystującą właściwości pobudzenia typu PRBS. Uzyskano dobre wyniki identyfikacji.

Literatura

- [1] Angerer B.T., Hintz Ch., Schröder D.: *On-line identification of a nonlinear mechatronic system*. Control Eng. Practice, vol. 12, 2004, 1465–1478
- [2] Bai Er-Wei: *Decoupling the linear and nonlinear parts in Hammerstein model identification*. Automatica, vol. 40, 2004, 671–676
- [3] Billings S.A., Fakhouri S.Y.: *Theory of separable processes with application to the identification of nonlinear systems*. IEEE Proceedings, vol. 125, No. 9, 1978, 1051–1058
- [4] Billings S.A., Fakhouri S.Y.: *Identification of systems containing linear dynamic and static nonlinear elements*. Automatica, vol. 18, No.1, 1982, 15–26
- [5] Greblicki W., Krzyżak A., Pawlak M.: *Distribution-free pointwise consistency of kernel regression estimate*. Annals of Statistics, vol. 12, No. 4, 1984, 1570–1575
- [6] Haber R.: *Structural identification of block oriented models on the estimated Volterra kernels*. International Journal of System Science, vol. 20, 1989, 1355–1380
- [7] Kara T., Eker Ý.: *Nonlinear modeling and identification of a DC motor for bidirectional operation with real time experiments*. Energy Conversion and Management, vol. 45, 2004, 1087–1106
- [8] Nordin M., Gutman P.: *Controlling mechanical systems with backlash – a survey*. Automatica, vol. 38, 2002, 1633–1649

Wpłynęło: 26.09.2006

Joanna M. LIS



Joanna M. Lis uzyskała stopień magistra inżyniera w roku 2003 na Wydziale Elektroniki Politechniki Wrocławskiej, w specjalności automatyka przemysłowa. Obecnie jest doktorantką na Wydziale Elektrycznym, w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych. Jest współautorką trzech artykułów

(w tym jednego z listy filadelfijskiej) i pięciu referatów na konferencjach krajowych i międzynarodowych. Jej zainteresowania badawcze związane są z parametrycznymi i nieparametrycznymi metodami identyfikacji złożonych układów napędowych, z teorią i zastosowaniami algorytmów ewolucyjnych

e-mail: joanna.lis@pwr.wroc.pl



Teresa ORŁOWSKA-KOWALSKA

Teresa Orłowska-Kowalska, uzyskała stopnie naukowe: dr (1976), dr hab. (1990) oraz tytuł profesora (2004) na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej. Od roku 1993 pracuje na stanowisku profesora nadzwyczajnego w Instytucie Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, jest kierownikiem Zakładu Napędów Elektrycznych, a od roku 2002 dyrektorem tego Instytutu. Jest autorką i współautorką ponad 220 artykułów i referatów krajowych i zagranicznych, 1 książki (Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi), rozdziałów w czterech monografiach krajowych i jednej zagranicznej oraz dwóch skryptów. Jej zainteresowania badawcze związane są z mikroprocesorowym sterowaniem przekształtnikowych układów napędowych, zastosowaniem współczesnych metod teorii sterowania w napędzie elektrycznym, estymacji zmiennych stanu silników prądu przemiennego przy zastosowaniu obserwatorów stanu i filtrów Kalmana oraz sieci neuronowych. W ostatnich latach jej prace badawcze dotyczą głównie zastosowań metod sztucznej inteligencji do sterowania napędów elektrycznych z połączeniami sztywnymi i elastycznymi. Od 1996 roku jest członkiem Komitetu Elektrotechniki Polskiej Akademii Nauk, od 1993 – członkiem IEEE (Senior Member od 2005), oraz członkiem komitetów naukowych kilku renomowanych konferencji krajowych i zagranicznych.

e-mail: teresa.orlowska-kowalska@pwr.wroc.pl