

## SYSTEM DIAGNOSTYKI MAŁYCH SILNIKÓW PRĄDU STAŁEGO Z WYKORZYSTANIEM METODY IDENTYFIKACJI

Michał HANZEL, Wojciech MOCZULSKI

Politechnika Śląska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn  
Konarskiego 18A, 44-100 Gliwice, e-mail: [wmoczulski@polsl.pl](mailto:wmoczulski@polsl.pl)

### Streszczenie

W referacie opisano system diagnostyki małych silników prądu stałego, stosowanych w samochodach osobowych. Zaprojektowanie, skonstruowanie stanowiska pomiarowego, opracowanie metody i oprogramowania, a także weryfikacja takiego systemu były przedmiotem pracy dyplomowej magisterskiej pierwszego z autorów. Zastosowane podejście bazuje na modelu analitycznym silnika, opisującym część elektryczną i mechaniczną. Do detekcji i lokalizacji uszkodzeń wykorzystuje się dwie stałe: elektromechaniczną stałą czasową oraz elektromagnetyczną stałą czasową obwodu twornika. Estymacja wartości tych stałych następuje na podstawie zmierzonych wielkości: prędkości obrotowej i parametrów elektrycznych. Uzyskane wyniki porównywane są z wartościami wzorcowymi otrzymanymi z modelu. Otrzymane residua są klasyfikowane z wykorzystaniem prostego algorytmu progowego, a także przez rozmytą sieć neuronową. Wstępne badania weryfikacyjne, przeprowadzone dla kilku obiektów tego samego typu, potwierdziły poprawne działanie systemu.

Słowa kluczowe: diagnostyka z wykorzystaniem modelu, diagnostyka przez identyfikację, silnik elektryczny małej mocy, detekcja uszkodzeń, klasyfikacja residuów, logika rozmyta.

### SYSTEM OF DIAGNOSTICS OF SMALL DC MOTORS WITH THE USAGE OF IDENTIFICATION METHOD

#### Summary

The paper deals with a system of diagnostics of small DC motors that are applied in personal cars. Design and development of a measuring stand, development of a method and respective software, and verification of this system were the subject of MSc thesis of the first author. The approach to the problem is based on analytical model of the motor, which describes both the electrical and mechanical parts of the object. Two time constants are applied in order to detect and isolate faults: electro-mechanical one and electro-magnetic time constant of the rotor circuit. These constants are estimated basing on such measured quantities as rotating speed and electric parameters. The obtained results are compared with pattern values calculated from the model. Received residuals are classified by using simple threshold algorithm, and by fuzzy neural network. The initial verification carried out for several motors of the same type confirmed correct operation of the diagnostic system.

Keywords: model-based diagnostics, diagnostics through identification, small-power DC motor, fault detection, classification of residuals, fuzzy logic.

#### WSTĘP

Silniki elektryczne prądu stałego małej mocy są wytwarzane masowo, znajdując zastosowanie w wielu gałęziach przemysłu, np. w motoryzacji. Wzrost niezawodności działania podzespołów samochodu, a także odpowiednia jakość oczekiwana przez klientów, powodują rozwój technik diagnostyki kontrolnej takich silników. Spośród różnych podejść na szczególną uwagę zasługuje diagnostyka wsparta modelowo.

Metody i techniki diagnozowania silników elektrycznych były przedmiotem wielu prac badawczych. Drugi z autorów uczestniczył w projekcie badawczym realizowanym w latach 1986-1987 pod kierunkiem D. Barschdorffa na Uniwersytecie Paderborn (RFN), w którym stosowano podejście bazujące na modelu [2], [9]. Prace dotyczące diagnostyki silników małej mocy

były również realizowane w zespole D. Filberta (Uniwersytet Techniczny w Berlinie) [4].

Autorzy podjęli próbę wykorzystania wspartych modelowo metod diagnostyki technicznej w celu zbudowania stanowiska badawczego pozwalającego na detekcję wybranych uszkodzeń silników elektrycznych małej mocy w sposób bezdemontażowy. Przebieg i wyniki tego projektu, będącego jednocześnie pracą magisterską pierwszego z autorów, omówione zostały w niniejszym artykule.

#### 1. DETEKCCJA I LOKALIZACJA USZKODZEŃ Z WYKORZYSTANIEM MODELI

W diagnostyce technicznej modele wykorzystywane są zarówno do detekcji jak i lokalizacji uszkodzeń.

Detekcja uszkodzeń polega na określeniu czy badany obiekt jest niesprawny/niezdający. Modele stosowane w tej grupie opisują zależności pomiędzy sygnałami wejściowymi i wyjściowymi obiektu  $U \Rightarrow Y$  oraz umożliwiają wykrycie zmian, których występowanie spowodowane jest tymi uszkodzeniami [6].

Celem lokalizacji uszkodzeń jest wyznaczenie rodzaju, miejsca i czasu wystąpienia uszkodzenia oraz jego identyfikacja, która dotyczy określenia rozmiaru uszkodzenia i charakteru jego zmienności w czasie, a nawet przyczyny uszkodzenia [10].

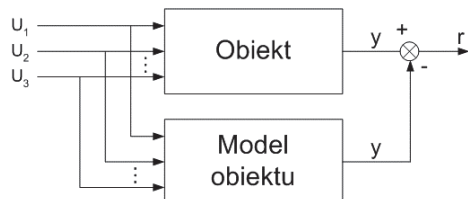
W przypadku detekcji uszkodzeń modele na ogół opisują działanie obiektu w stanie zdadności (brak uszkodzeń). Zwykle są to modele analityczne, neuronowe oraz rozmyte. Dzięki tym modelom wyznacza się residua, a więc różnice między sygnałami wyjściowymi obiektu (zmierzonymi), a sygnałami otrzymanymi na podstawie modelu. Jeżeli wartość residuum odbiega znacząco od zera, jest to symptomem uszkodzenia.

Wartości residuów są podstawą w detekcji uszkodzeń badanego obiektu, natomiast w celu lokalizacji uszkodzeń stosuje się zwykle binarną lub wielowartościową ocenę tych residuów (kwantyzacja) i dopiero na podstawie tak przetworzonych sygnałów diagnostycznych prowadzone jest wnioskowanie o uszkodzeniach [7]. Możliwe jest to dzięki zastosowaniu klasyfikatora, przekształcającego otrzymane residuum na jakościowy sygnał diagnostyczny.

Do detekcji uszkodzeń w diagnostyce najczęściej wykorzystuje się modele analityczne, które pozwalają uzyskać tzw. redundancję analityczną toru pomiarowego. Osiągnięte jest to poprzez wprowadzenie do systemu diagnostycznego modelu matematycznego badanego obiektu, a następnie porównanie wartości zmierzonego sygnału rzeczywistego z wartością tego sygnału wyliczoną na podstawie modelu (residuum).

W grupie modeli matematycznych stosowanych do detekcji uszkodzeń wyróżnić można [7]:

- modele fizyczne (równania ruchu, bilansowe, itp.),
- modele liniowe typu wejście – wyjście (transmitancje ciągłe lub dyskretne),
- liniowe równania stanu,
- obserwatory stanu i filtry Kalmana.



Rys. 1. Schemat generacji residuów z wykorzystaniem redundancji analitycznej [8]

Poza równaniami matematycznymi modele tworzy się również jako neuronowe czy rozmyte.

W tym przypadku mówi się o redundancji informacyjnej, której szczególnym przypadkiem jest redundancja analityczna [7].

## 2. SILNIK ELEKTRYCZNY DC MAŁEJ MOCY JAKO OBIEKT DIAGNOZOWANIA

Ponieważ celem badań było opracowanie systemu detekcji uszkodzeń, który łatwo można byłoby zweryfikować, a następnie mogłyby znaleźć zastosowanie praktyczne, postanowiono jako obiekt badań wybrać możliwie łatwo dostępny silnik wytwarzany masowo. Do silników takich zaliczyć można silniki prądu stałego małej mocy, stosowane w przemyśle samochodowym.

### 2.1. Opis obiektu diagnozowania

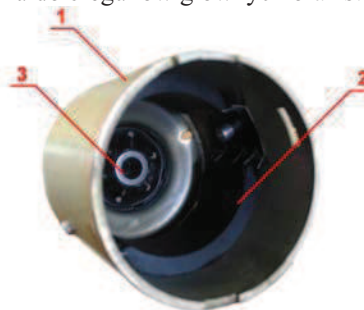
Przyjętymi w pracy obiektami badań są silniki elektryczne prądu stałego małej mocy ze wzbudzeniem od magnesów trwałych, wykorzystywane jako dodatkowy osprzęt (napęd mechanizmu wycieraczek) w samochodzie osobowym Fiat 126p (rys. 2).



Rys. 2. Badany silnik

Jak każda wirująca maszyna elektryczna badany silnik składa się ze stojana i wirnika.

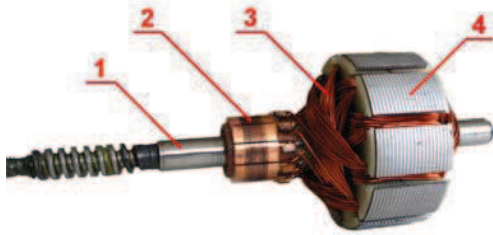
Stojan pokazany jest na rys. 3. Do jarzma stojana przymocowana jest para biegunów głównych w postaci magnesów trwałych wytwarzających pole magnetyczne. Wewnątrz korpusu znajduje się również tarcza łożyskowa, w której obraca się wał wirnika i która zapewnia jego centryczne ustawienie w stosunku do biegunów głównych oraz stojana.



Rys. 3. Stojan (magneśnica) silnika: 1 – jarzmo, 2 – magnesy trwałe, 3 – tarcza łożyskowa

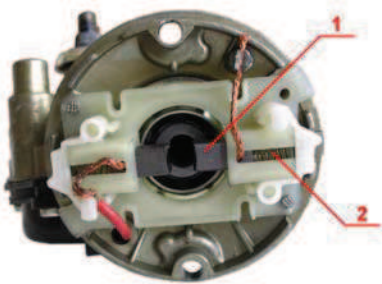
Rys. 4 przedstawia wirnik (twornik) badanego silnika. Można w nim wyróżnić pakiet blach wraz z izolacją (4), uzwojenie (3) oraz walcowy komutator (2). Ponadto wał wirnika (1) zakończony jest ślimakiem, dzięki czemu poprzez przekładnię

ślimakową moment obrotowy przekazywany jest do wałka wyjściowego reduktora.



Rys. 4. Wirnik (twornik) silnika

Aparat szczotkowy pokazany na rys. 5 dzięki sprężynom (2) i odpowiedniemu zamocowaniu szczotek (1) zapewnia ich prawidłowy docisk do powierzchni komutatora. Jednocześnie gwarantuje on izolację węzła szczotkowego względem korpusu silnika. W pokrywie znajduje się również niewielkie łożysko ślizgowe, które zapewnia odpowiednie ustawienie wirnika względem stojana i przyrządu szczotkowego.



Rys. 5. Aparat szczotkowy

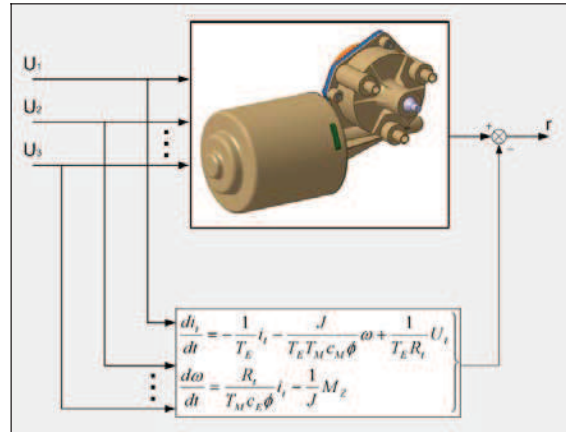
**2.2. Budowa modelu analitycznego silnika**

Podstawowym założeniem przyjętym w pracy była możliwość oceny stanu technicznego badanych obiektów w sposób bezdemontażowy. Umożliwiają to szeroko rozwijające się metody diagnostyczne wsparte na modelach, które ponadto pozwalają na wczesne rozpoznanie nieprawidłowego zachowania maszyny, a także na automatyzację procesu detekcji uszkodzeń i dlatego ten właśnie sposób został wykorzystany w realizowanym projekcie.

W pracy do detekcji uszkodzeń silników wykorzystana została tzw. redundancja analityczna toru pomiarowego (rys. 6), uzyskana dzięki wprowadzeniu do systemu diagnostycznego modelu badanego obiektu w postaci równań fizycznych.

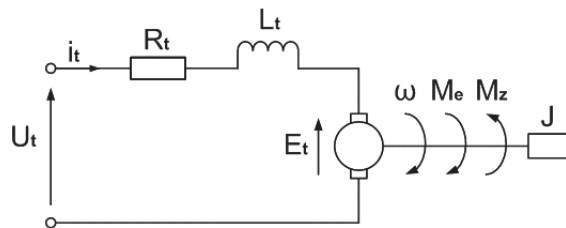
Poprzez porównanie wartości zmierzonego sygnału rzeczywistego z wartością tego sygnału wyliczoną na podstawie modelu otrzymuje się residuum, którego odpowiednie przekształcenie pozwala na określenie stanu technicznego badanego silnika.

Wykorzystanie równań fizycznych do budowy modelu pozwala na najpełniejsze opisanie związków zachodzących między zmiennymi w obiekcie jednak nie zawsze jest możliwość ich wyznaczenia.



Rys. 6. Wyznaczanie residuum

Pracę badanego silnika (przedstawionego w postaci schematu na rys. 7) można opisać na podstawie dwóch równań, równania opisującego część mechaniczną oraz równania opisującego część elektryczną silnika.



Rys. 7. Schemat ideowy silnika prądu stałego

Równanie elektryczne silnika prądu stałego można wyznaczyć na podstawie II prawa Kirchoffa, zwanego również bilansem napięć w oczku. Prawo to mówi, że w każdym zamkniętym obwodzie elektrycznym, zwanym oczkiem, suma algebraiczna napięć źródłowych równa się sumie algebraicznej napięć odbiornikowych, tj. spadków napięć na rezystancjach [11]:

$$\sum_i u_i = \sum_k e_k \tag{1}$$

Na podstawie (1) otrzymujemy dla silnika prądu stałego zależność (2).

$$U_t = U_{R_t} + U_{L_t} + U_{E_t} \tag{2}$$

Napięcie elementu rezystancyjnego zgodnie z prawem Ohma jest przedstawione za pomocą równania (3) [1].

$$U_{R_t} = i_t R_t \tag{3}$$

gdzie  $i_t$  jest prądem twornika.

Zależność (4) określa napięcie cewki (elementu indukcyjnego), które jest proporcjonalne do zmian prądu przepływającego przez uzwojenie [1].

$$U_{L_t} = L_t \frac{d}{dt} i_t \tag{4}$$

gdzie:

$L_t$  oznacza indukcyjność obwodu twornika.

Wartość napięcia indukowanego w tworniku jest opisana równaniem (5).

$$U_{Et} = c_E \phi \omega \quad (5)$$

gdzie:

$c_E$  – współczynnik stały dla danego silnika, zależny od jego parametrów konstrukcyjnych,

$\phi$  – strumień magnetyczny,

$\omega$  – prędkość kątowna twornika.

Podstawiając (3)-(5) do (2) otrzymujemy równanie różniczkowe opisujące część elektryczną silnika prądu stałego (6) [12].

$$U_t = R_t i_t + L_t \frac{d}{dt} i_t + c_E \phi \omega \quad (6)$$

Twornik badanego silnika porusza się ruchem obrotowym, możemy więc w oparciu o zasadę d'Alemberta zapisać równanie mechaniczne silnika (7) [12].

$$J \frac{d\omega}{dt} = M_e - M_z \quad (7)$$

gdzie:

$J$  – moment bezwładności wirnika,

$\omega$  – prędkość kątowna wirnika,

$M_e$  – moment elektromagnetyczny,

$M_z$  – zewnętrzny moment obrotowy działający na wał silnika.

Moment elektromagnetyczny  $M_e$  wytwarzany jest w wyniku wzajemnego oddziaływania strumienia magnetycznego  $\phi$  oraz prądu  $i_t$  płynącego w uzwojeniu twornika, a jego wartość opisuje zależność (8) [5].

$$M_e = c_M \phi i_t \quad (8)$$

$c_M$  – współczynnik stały dla danego silnika, zależny od jego parametrów konstrukcyjnych

Stałe  $c_E \phi$  i  $c_M \phi$  występujące w powyższych równaniach są sobie równe, a więc możemy zapisać [12]:

$$c_E \phi = c_M \phi = c \phi \quad (9)$$

Współczynnik  $c \phi$  można określić biorąc pod uwagę fakt, że prędkość kątowna silnika jest wprost proporcjonalna do różnicy napięcia zasilającego i spadków na obwodzie twornika oraz odwrotnie proporcjonalna do strumienia magnetycznego, co opisane jest równaniem (10) [3].

$$\omega = \frac{U_t - R_t i_t}{c \phi} \quad (10)$$

stąd po przekształceniu otrzymujemy wzór na współczynnik  $c \phi$  (11).

$$c \phi = \frac{U_t - R_t i_t}{\omega} \quad (11)$$

Uwzględniając powyższe wzory można wyprowadzić układ równań opisujący dynamikę silnika prądu stałego, który przedstawiony jest za pomocą zależności (12) [12].

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_t}{dt} &= -\frac{R_t}{L_t} i_t - \frac{c_E \phi}{L_t} \omega + \frac{U_t}{L_t} \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{c_M \phi}{J} i_t - \frac{1}{J} M_z \end{aligned} \right\} \quad (12)$$

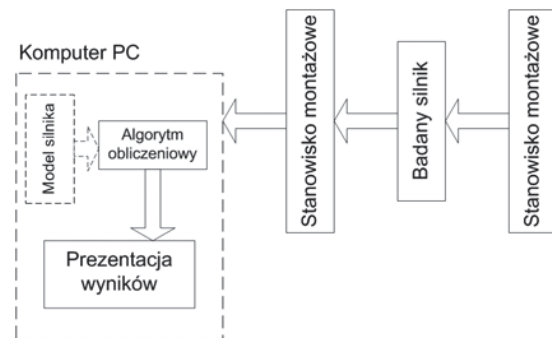
W rozważaniach dotyczących silników prądu stałego dogodnie jest posługiwać się elektromechaniczną stałą czasową  $T_M$  oraz elektromagnetyczną stałą czasową  $T_E$  obwodu twornika.

Po uwzględnieniu zależności na stałe czasowe  $T_M$  oraz  $T_E$  układ równań opisujący dynamikę silnika przedstawiają równania (13) [12].

$$\left. \begin{aligned} \frac{di_t}{dt} &= -\frac{1}{T_E} i_t - \frac{J}{T_E T_M c_M \phi} \omega + \frac{1}{T_E R_t} U_t \\ \frac{d\omega}{dt} &= \frac{R_t}{T_M c_E \phi} i_t - \frac{1}{J} M_z \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

### 2.3. Koncepcja systemu detekcji uszkodzeń

System detekcji uszkodzeń, zbudowany w ramach omawianej pracy przedstawiony został w postaci schematu blokowego na rys. 8.



Rys. 8. System detekcji uszkodzeń silników elektrycznych

Pierwszym elementem systemu jest stanowisko montażowe, na którym mocowany jest badany silnik. Następnie przy wykorzystaniu układu pomiarowego oraz określonych przyrządów określone są wartości podstawowych parametrów silnika.

Otrzymane dane wprowadzane są do komputera wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie. Algorytm programu porównuje zmierzone wartości z wartościami otrzymanymi z modelu badanego silnika i na tej podstawie generuje residua. Ocena wartości residuów pozwala na określenie aktualnego stanu technicznego badanego silnika. W przypadku wystąpienia uszkodzenia program określa jego rodzaj i prezentuje wyniki na ekranie monitora.

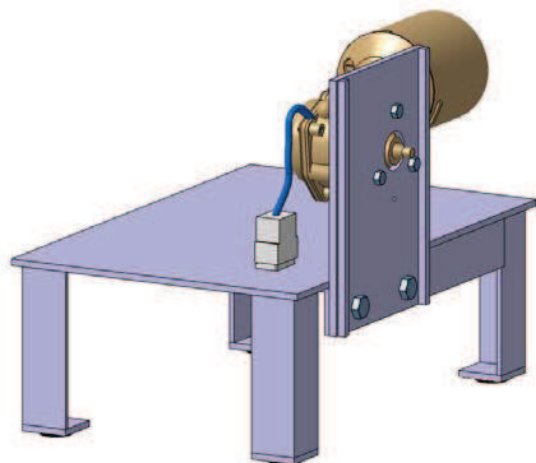


### 3. IMPLEMENTACJA SYSTEMU DIAGNOSTYKI SILNIKÓW

Weryfikacja systemu i opracowanych algorytmów wymagała budowy odpowiedniego stanowiska pomiarowego oraz oprogramowania nadzorującego pomiar, przetwarzanie wielkości mierzonych, wyliczanie residuów i wnioskowanie diagnostyczne.

#### 3.1. Stanowisko montażowe

Stanowisko montażowe zostało wykonane w sposób umożliwiający zamocowanie silnika analogicznie do tego jak montowany jest on w samochodzie (rys. 9), dzięki czemu silnik pracuje swobodnie i zachowuje się tak samo jak w trakcie normalnej eksploatacji. Ponadto taki sposób montażu umożliwia pomiar sygnałów pochodzących od procesów towarzyszących jego działaniu, jak na przykład pomiar drgań.



Rys. 9. Stanowisko montażowe wraz z zamocowanym badanym silnikiem

#### 3.2. Pomiar prędkości obrotowej i wielkości elektrycznych

Wyznaczenie wielkości elektrycznych badanego silnika oraz pomiar jego prędkości obrotowej przeprowadzany jest przy wykorzystaniu układu pomiarowego będącego częścią zbudowanego systemu, które przedstawione jest na rys. 10.

W obudowie wykonanego podzespołu umieszczony jest układ elektroniczny do pomiaru prędkości obrotowej oparty na mikrokontrolerze oraz odpowiednio połączone obwody elektryczne pozwalające na wyznaczenie parametrów elektrycznych silnika.

Przedni panel obudowy służy do podłączenia badanego silnika, zasilania oraz enkodera optycznego służącego do pomiaru prędkości obrotowej.

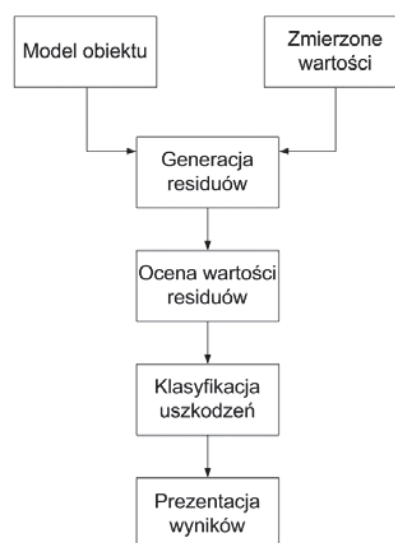


Rys. 10. Urządzenie do pomiaru prędkości obrotowej oraz wielkości elektrycznych

#### 3.3. Oprogramowanie

Po dokonaniu pomiarów natężenia prądu, napięcia, rezystancji oraz prędkości obrotowej badanego silnika otrzymane wartości wprowadzane zostają do komputera PC wyposażonego w odpowiednie oprogramowanie.

Program będący częścią budowanego stanowiska został napisany w środowisku Matlab ver 6.5, przy czym kompatybilny jest również z wersjami nowszymi. Zasadę działania programu obrazuje algorytm na rys. 11.



Rys. 11. Zasada działania programu do detekcji uszkodzeń

Na podstawie wprowadzonych przez użytkownika wartości zmierzonych sygnałów

wyznaczane są stałe czasowe silnika (elektromechaniczna i elektromagnetyczna). Algorytm programu porównuje następnie uzyskane wyniki z wartościami wzorcowymi otrzymanymi z modelu i na tej podstawie wyznacza residua. Ocena wartości residuów pozwala na przypisanie ich do ustalonych przedziałów, dzięki czemu w kolejnym kroku na podstawie odpowiednich reguł wnioskowania określone są uszkodzenia silnika oraz jego stan.

#### 4. WERYFIKACJA MODELU I SYSTEMU DETEKCJI USZKODZEŃ

Wykrywanie uszkodzeń na wykonanym stanowisku opiera się na bezpośrednim wykorzystaniu równań fizycznych do generacji residuów, co daje najbardziej odporną na zakłócenia pewną metodę detekcji.

Po odpowiednim przekształceniu układu równań opisującego pracę badanego silnika w stanie zdatności i bez obciążenia dodatkowym momentem zewnętrznym otrzymujemy zależności (14) oraz (15).

$$T_E = \frac{L \cdot i}{L \cdot i - U + c\phi \cdot \omega} \quad (14)$$

$$T_M = \frac{R \cdot i}{\omega \cdot c\phi} \quad (15)$$

Na podstawie (14) i (15) można wyznaczyć następujące residua:

$$r_E = T_E - \frac{L \cdot i}{L \cdot i - U + c\phi \cdot \omega} \quad (16)$$

$$r_M = T_M - \frac{R \cdot i}{\omega \cdot c\phi} \quad (17)$$

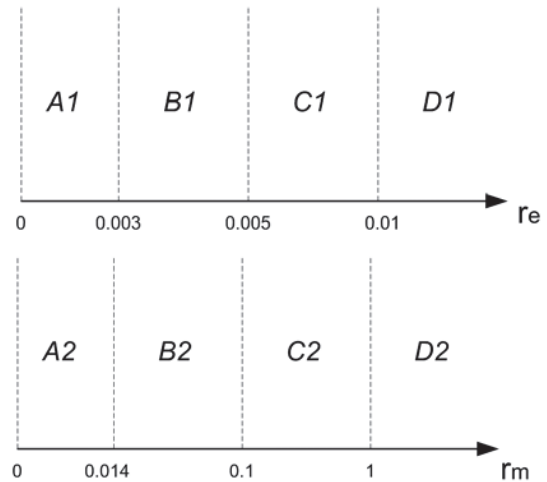
Residua wyznaczone jako różnice między wartościami wzorcowymi, a wartościami zmierzonymi są w kolejnym etapie oceniane. W wyniku tej oceny następuje ich przypisanie do odpowiednio określonych przedziałów.

W trakcie realizacji pracy do oceny residuów zostały wykorzystane dwie metody.

Pierwsza polega na ocenie ich wartości w sposób progowy. Na podstawie przeprowadzonych badań dla otrzymanych residuów określone zostały granice przedziałów (rys. 12), reguły wnioskowania oraz odpowiadająca im macierz diagnostyczna.

Przeprowadzone testy wykazały jednak, że system oparty na progowej ocenie otrzymanych wyników jest wrażliwy nie tylko na uszkodzenia, ale również na zakłócenia pomiarowe. Ponieważ w praktyce określenie stopnia wpływu tych zakłóceń na sygnały wyjściowe często jest niemożliwe do osiągnięcia, zachodzi prawdopodobieństwo wystąpienia fałszywych alarmów generowanych przez takie systemy. W celu zmniejszenia ryzyka powstania tego typu sytuacji stosowane są specjalne

metody przekształcania otrzymanych residuów w sygnały jakościowe określające stan obiektu, jak np. logika rozmyta.



Rys. 12. Granice przedziałów dla progowej oceny residuów

W realizowanym systemie parametry zbiorów rozmytych dobrane zostały na podstawie danych uczących dzięki zastosowaniu neuronowo-rozmytych adaptacyjnych technik wnioskowania (ANFIS – ang. Adaptive Neuro-Fuzzy Inference Systems). Wykorzystanie zgromadzonych danych pomiarowych pozwoliło w metodzie ANFIS na wygenerowanie wielu reguł typu IF-THEN, oraz na wyznaczenie funkcji przynależności do określonych zbiorów rozmytych dla wprowadzonych danych wejściowych oraz obliczenie wartości wyjściowych systemu.

Rys. 13 przedstawia strukturę otrzymanej sieci neuronowo – rozmytej.

Poszczególne warstwy sieci odpowiadają kolejnym operacjom jakie są wykonywane w celu zamiany wartości wejściowych w wyjście.

W pierwszym kroku wprowadzane zostają do systemu wartości otrzymanych residuów. Wartości te są następnie rozmywane, a więc następuje tzw. fuzyfikacja wejść, czyli określenie stopnia przynależności danej wartości do odpowiednich zbiorów rozmytych.

Wyniki testowania utworzonej sieci neuronowo-rozmytej pokazały, że najmniejszy błąd występuje przy zastosowaniu dla każdego z wejść 4 zbiorów rozmytych o gaussowskich funkcjach przynależności.

Kolejny etap wnioskowania polega na określeniu stopnia z jakim spełnione są przesłanki każdej z reguł. W przypadku przesłanek złożonych, mających charakter koniunkcyjny, do wyznaczenia stopnia zapłonu danej reguły stosowane są operatory *t-normy*. W pracy wykorzystany został operator *prod* będący iloczynem współczynników spełnienia wszystkich przesłanek prostych występujących w regule. Wynikiem są wartości określające stopień spełnienia danej reguły.

Uzyskane wyniki są następnie poddane agregacji, która polega na połączeniu otrzymanych wartości w jeden zbiór.

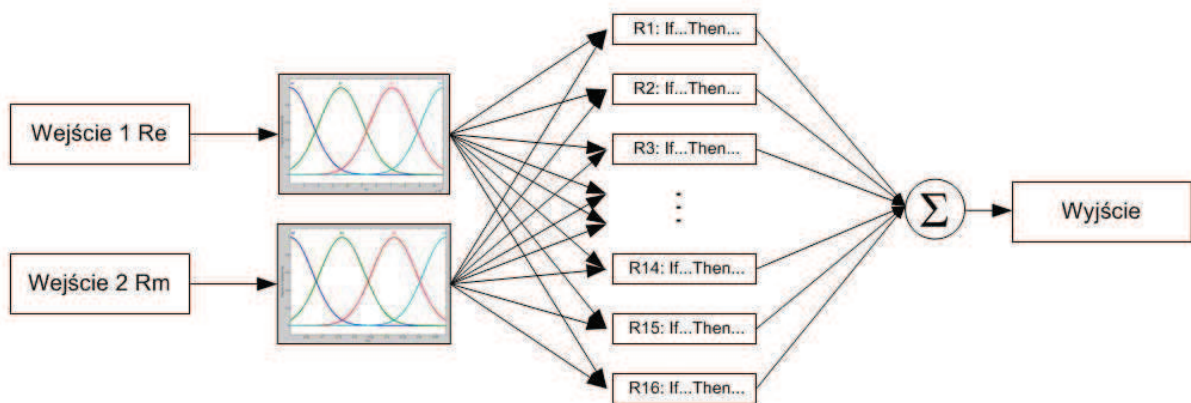
Ostatnim krokiem jest wyznaczenie ostrej wartości wyjścia na podstawie zbioru otrzymanego po agregacji. W opracowanym systemie do tego celu zastosowana została metoda Sugeno, w której ostrą wartość wyjścia wyznacza się w oparciu o wyliczenie średniej ważonej otrzymanych po agregacji wyników (rys. 14).

**5. PODSUMOWANIE**

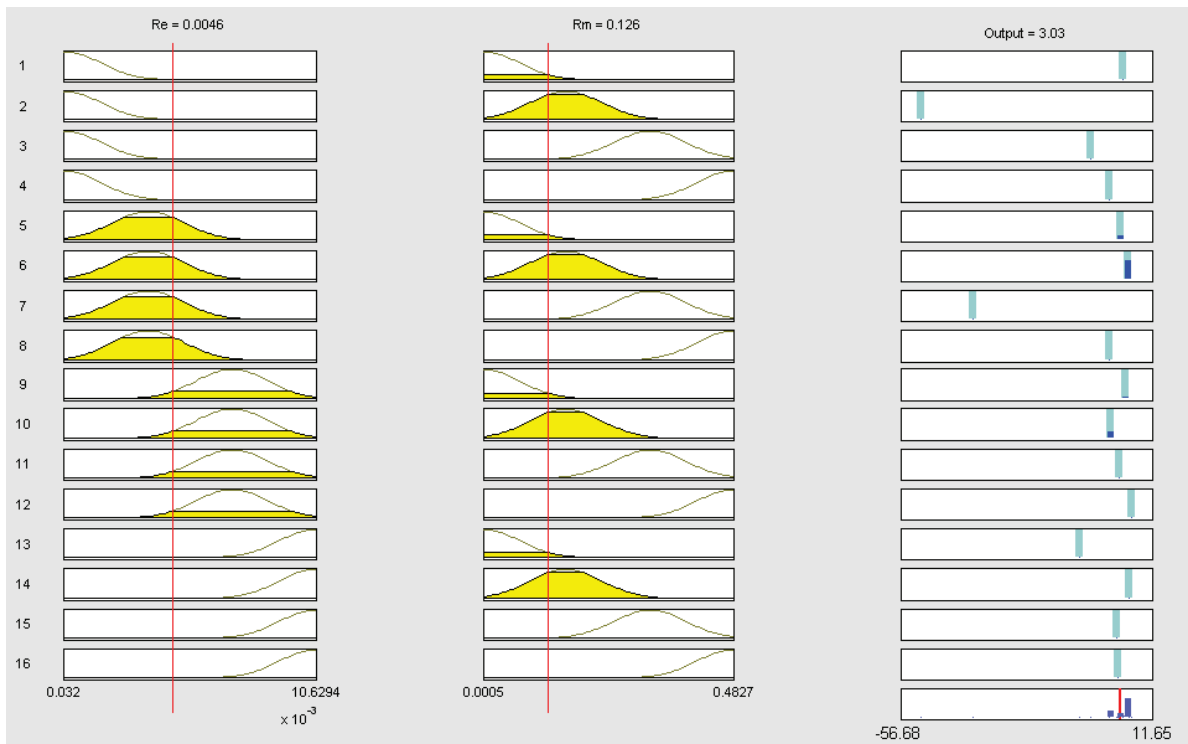
Tematyka przedstawiona w pracy dotyczy nowoczesnego podejścia do diagnostyki technicznej

maszyn pozwalającego na detekcję uszkodzeń badanych obiektów na podstawie matematycznego opisu ich działania.

Wykorzystanie równań fizycznych do budowy modelu jest często powiązane z trudnościami przy określeniu związków zachodzących między zmiennymi w obiekcie oraz na precyzyjne ustalenie danych wejściowych do modelu. Jeżeli utworzenie modelu matematycznego danego urządzenia (procesu) jest możliwe, to jest ono zwykle bardzo czasochłonne. Metoda ta jest jednak opłacalna ponieważ systemy diagnostyczne bazujące na wsparciu modelowym pozwalają na wykrywanie nawet niewielkich uszkodzeń.



Rys. 13. Struktura sieci neuronowo – rozmytej do oceny residuów



Rys. 14. Działanie reguł i wyznaczanie wyjścia układu

Opracowany system detekcji uszkodzeń dzięki wsparciu modelowemu pozwala na wczesne rozpoznawanie nieprawidłowej pracy badanego obiektu, co umożliwi niezwłoczne podjęcie działań naprawczych czy zabezpieczających. Wykorzystanie układów elektronicznych z określonymi czujnikami oraz odpowiedniego oprogramowania pozwala na zautomatyzowanie diagnozowania w takim systemie.

System można tak zmodyfikować, aby pełnił rolę systemu doradczego, który w przypadku wystąpienia uszkodzenia w badanym czy monitorowanym obiekcie mógłby przedstawiać użytkownikowi zalecenia dotyczące dalszego postępowania.

Ponadto wykorzystanie wiedzy ekspertów z danej dziedziny lub zgromadzonych danych statystycznych pozwala na opracowanie odpowiednich algorytmów umożliwiających poza oceną aktualnego stanu technicznego również prognozowanie tego stanu w określonym horyzoncie czasowym.

Uzyskane dotychczas wyniki pozwalają na zarysowanie kierunków dalszych badań w zakresie diagnostyki silników elektrycznych. Przedstawiona implementacja metody dotyczy zadania statycznego, typowego dla diagnostyki kontrolnej. Jednak nie ma większych przeszkód na to, aby można było zastosować opracowane rozwiązanie w diagnostyce eksploatacyjnej silników elektrycznych. Metoda ta odpowiadałaby wówczas wymaganiom identyfikacji on-line [7], [8]. Potwierdzenie tej hipotezy wymaga przeprowadzenia dalszych badań.

## 6. LITERATURA

- [1] Bajorek Z. *Maszyny elektryczne*. WNT, Warszawa 1977.
- [2] Barschdorff D., Moczulski W., Pfläging G. *Motordiagnose unter Anlaufbedingungen mit Hilfe von Mustererkennungsverfahren. Mustererkennung 1986*, 8. DAGM-Symposium, s. 149-153. Informatik-Fachberichte, Vol. 125, Springer Verlag, London 1986.
- [3] Bielawski S. *Teoria napędu elektrycznego*. WNT, Warszawa 1978.
- [4] Bradatsch T., Gühmann C., Röpke K., Schneider Ch., Filbert D. *Analytical Redundancy Methods for Diagnosing Electric Motors*. Applied Mathematics and Computer Science 3(3), 1993: s. 461-486.
- [5] Drozdowski P. *Wprowadzenie do napędów elektrycznych*. Politechnika Krakowska, Kraków 1998.
- [6] Hanzel M. *System detekcji uszkodzeń silników elektrycznych małej mocy*. Praca dyplomowa magisterska, Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn, Politechnika Śląska, Gliwice 2006.
- [7] Korbicz J., Kościelny J. M., Kowalczyk Z., Cholewa W. *Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania* WNT, Warszawa 2002.
- [8] Kościelny J. M. *Diagnostyka zautomatyzowanych procesów przemysłowych*. Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2001.
- [9] Moczulski W. *Sposób oceny stanu silników elektrycznych małej mocy obserwowanych w warunkach rozruchu*. XIII Sympozjon PKM. Pol. Szczecińska. Świnoujście 17-20.09.1987. Materiały konferencyjne (streszczenia) s. 282-283.
- [10] Moczulski W. *Diagnostyka techniczna. Metody pozyskiwania wiedzy*. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2002.
- [11] Praca zbiorowa pod redakcją B. Reymer *Poradnik mechanika*. Warszawa 1984.
- [12] Pelczewski W., Krynke M. *Metoda zmiennych stanu w analizie dynamiki układów napędowych*. WNT, Warszawa 1984.



mgr inż. **Michał HANZEL** jest absolwentem Wydziału Mechanicznego Technologicznego Politechniki Śląskiej w 2006r., gdzie studiował na kierunku „Automatyka i Robotyka” na specjalności „Projektowanie i eksploatacja maszyn”. Pracę dyplomową magisterską wykonał pod kierunkiem prof. Wojciecha Moczulskiego, uzyskując ocenę bardzo dobry z wyróżnieniem.



prof. dr hab. **Wojciech MOCZULSKI**, prof. zw. w Katedrze Podstaw Konstrukcji Maszyn Politechniki Śląskiej oraz kierownik Zakładu Diagnostyki Technicznej. Jest autorem ponad 130 publikacji. Redaguje dział „Diagnostyka” w czasopiśmie „Zagadnienia Eksploatacji Maszyn”. Jest członkiem komitetu redakcyjnego czasopisma „Engineering Applications of Artificial Intelligence”.