

Czesław T. Kowalski, Paweł Ewert  
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

## ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH DO MONITOROWANIA NIEOSIOWOŚCI NAPĘDÓW ELEKTRYCZNYCH Z SILNIKAMI INDUKCYJNYMI

### APPLICATION OF NEURAL NETWORK TO THE MISALIGNMENT MONITORING OF INDUCTION MOTOR DRIVES

**Abstract:** The paper deals with the basic problems of misalignment monitoring for induction motor drive. Methods of misalignment symptom detection based on the frequency analysis of the stator current and mechanical vibration signals are described. Examples of stator current and vibration spectra are demonstrated for alignment drive system as well as in the case of parallel displacement of 0.77 mm. Results of tests have shown that frequency analysis is proper tool for misalignment detection of the drive system. However the high resolution of measurement and diagnostic equipment is required as well as suitable experience of the expert. So recently other solution are searched for, which can minimize the participation of human expert in the drive diagnostics and can make the diagnostic process fully automatic. Methods based on neural network theory are capable to solve this task. In this paper the intelligent detector based on neural networks is developed for misalignment monitoring and detection for induction motor drive. The multilayer perceptron network (MLP) is trained and tested using magnitudes of specific harmonics of stator current and vibration spectra. It is shown that proposed neural detector is very effective in misalignment monitoring for induction motor drives.

#### 1. Wstęp

Z diagnozowaniem uszkodzeń mamy do czynienia od wielu lat. Początkowo by zapewnić bezpieczną i niezawodną pracę producenci i użytkownicy maszyn elektrycznych zwrócili uwagę na prostą ochronę związaną z przetężeniami, przepięciami, zwarciami doziemnymi itp. W czasie eksploatacji silników indukcyjnych w częściach elektrycznych obwodów stojana i wirnika oraz w układzie mechanicznym silnika i współpracującej maszynie roboczej wraz z elementami sprzęgającymi powstają liczne uszkodzenia. Każda awaria wprowadza zakłócenia w procesie technologicznym, a w najgorszym przypadku prowadzi do zatrzymania całego układu, co w konsekwencji prowadzi do znacznego wzrostu kosztów produkcji. Dlatego aby uniknąć przerw w produkcji, zmniejszyć koszty remontu oraz obniżyć nakłady na bieżącą eksploatację powinno się szukać sposobów wczesnego wykrywania uszkodzeń i informowania obsługi o fakcie ich wystąpienia.

W eksploatacji napędów elektrycznych dominują obecnie metody monitorowania i badania oparte na analizie sygnałów diagnostycznych w dziedzinie czasu i częstotliwości [2]. W przypadku napędów z silnikami indukcyjnymi podstawowymi sygnałami diagnostycznymi są prąd

fazowy stojana oraz drgania, w których widoczne są symptomy uszkodzeń elektrycznych i mechanicznych. W referacie przedstawiono podstawowe problemy wykrywania niewspółosiowości silnika i maszyny roboczej, przy wykorzystaniu widma prądu stojana oraz drgań mechanicznych oraz zastosowania charakterystycznych częstotliwości do budowy neuronowych detektorów do wykrywania nieosiowości.

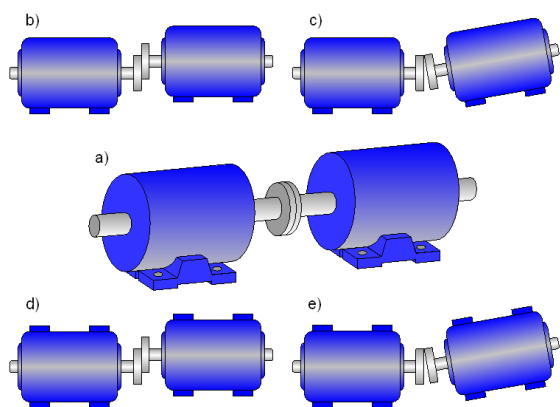
#### 2. Niewspółosiowość jako źródło uszkodzeń silników indukcyjnych

Ponad 50% przedwczesnych uszkodzeń maszyn znajduje swoją przyczynę w nieprawidłowym wyosiowaniu [1]. Długoletnie doświadczenia pokazują, że nawet drobne odchylenia, które pojawiają się w układach pracujących całodobowo mogą stwarzać poważne problemy. W dużym stopniu prawidłowe wyosiowanie podyktowane jest ochroną elementów wspierających wał, czyli łożysk.

Wyróżnia się trzy rodzaje nieosiowości: przesunięcie poprzeczne (promieniowe lub równoległe), kątowe oraz połączenia obu tych odchylenia (kątowo-równoległe bądź mieszane) [1], [4]. Na rysunku 1 przedstawiono cztery przypadki niewspółosiowości. Z przesunięciem poprzecznym (promieniowym) ma się do czynienia

nia wtedy, gdy osie wałów napędzającego i napędzanego są równoległe, ale przesunięte względem siebie. Najczęstszym sposobem do usunięcia tego typu odchyłki jest zastosowanie sprzęgła z dwiema piastami ruchomymi, czyli z dwoma punktami zginania, lub też układu dwóch sprzęgieł z jedną piastą ruchomą. Typowymi sprzęgłami z dwiema piastami ruchomymi są sprzęgła zębate, sprężyste dwutarczowe i membranowe.

Z przesunięciem kątowym ma się do czynienia wówczas, gdy osie wału napędzającego i napędzanego przecinają się. W tym przypadku radzą sobie sprzęgła z jedną piastą ruchomą (półsprzęgła) gdyż charakteryzują się jedną płaszczyzną zginania (podobnie sprzęgła jednotarczowe i membranowe).



Rys. 1. Rodzaje niewspółosiowości: a) silnik wyosiowany, b) pionowe przesunięcie równoległe, c) pionowe przesunięcie kątowe, d) poziome przesunięcie równoległe, e) poziome przesunięcie kątowe

Przesunięcie osiowe oraz ruchy poosiowe spowodowane są często przez efekty cieplne. Wysoka temperatura jaka powstaje podczas pracy maszyny prowadzi do niekontrolowanego wydłużenia wału oraz luzów wirnika. Przesunięcie osiowe powodowane jest także przez przemieszczanie się wirnika w polu magnetycznym. Aby skompensować powstałe w ten sposób przesunięcia osiowe stosuje się różnego typu sprzęgła. Niedokładne wyosiowanie prowadzi do przeciążenia maszyny i wprowadza drgania napędu. Nadmierne obciążenie źle wyosiowanej maszyny powoduje zwiększenie obciążenia łożysk, uszczelnień i wałów, co w konsekwencji zmniejsza ich żywotność [4]. Ponadto powoduje nieprawidłową pracę sprzęgieł i ich szybsze zużycie oraz zwiększa niesymetrię szczeliny powietrznej silnika (ekscentryczność) [1], [3].

Jak wynika z badań [5], dodatkowym atutem dokładnego wyosiowania jest fakt, że zmniejsza się zużycie energii, która rośnie wraz z rozcentryowaniem maszyn.

Obecnie rozróżnia się trzy sposoby osiowania:

- przy użyciu liniału (dokładność 0,1 mm),
- przy użyciu czujników zegarowych (dokładność 0,01 mm),
- laserowo optyczne systemy osiowania (dokładność 0,001 mm).

Niewspółosiowość jest trudna do wykrycia podczas pracy układu. Na dzień dzisiejszy nie są dostępne układy pomiarowe do bezpośredniego on-line wykrywania nieosiowości napędu np. poprzez pomiar sił działających na łożyska, wały oraz sprzęgła. Jedynym sposobem wykrycia niewspółosiowości jest pomiar wtórnych efektów tych sił, które mogą objawić się następującymi symptomami:

- przedwczesne uszkodzenie części mechanicznych, m.in.: łożysk, mocowań, wałów i sprzęgieł,
- nadmierne drgania promieniowe i osiowe,
- niesymetryczna szczelina powietrzna,
- niesymetria napięć i prądów,
- tętniący (pulsacyjny) wzrost momentu obrotowego,
- zmniejszenie średniego momentu obrotowego,
- wzrost strat, zmniejszanie wydajności,
- wysoka temperatura obudowy przy łożyskach lub w ich pobliżu lub wysoka temperatura oleju,
- nadmierne wycieki oleju na uszczelkach łożysk,
- poluzowane śruby mocujące do fundamentu,
- wzrost temperatury sprzęgieł sprężystych,
- duża liczba awarii sprzęgła lub jego szybkie zużycie,
- nadmierne ilości smaru w osłonie sprzęgła.

Poniżej przedstawiono problemy wykrywania niewspółosiowości poprzez pomiar i analizę widmową prądu stojana oraz przyspieszenia drgań mechanicznych.

### 3. Zestawienie charakterystycznych częstotliwości w widmach prądu oraz drgań

Diagnostyka uszkodzeń typu mechanicznego w silnikach indukcyjnych oparta jest na analizie częstotliwościowej drgań mechanicznych oraz prądu stojana. W prądzie stojana odzwierciedlone są wszystkie podstawowe uszkodzenia. Łatwość realizacji pomiarów sprawia, że analiza widmowa

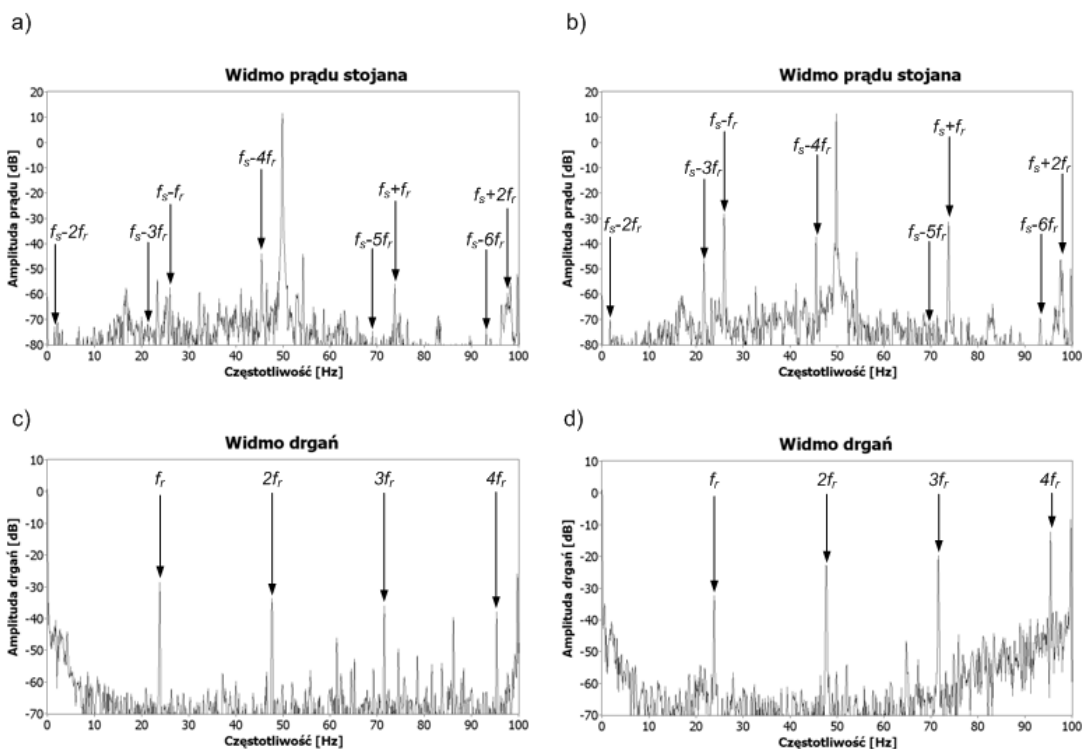
prądu stojana może być wykorzystywana do wykrywania uszkodzeń typu mechanicznego.

Diagnozowanie oparte na widmie prądu stojana jak i drgań polega na ocenie wartości amplitud harmonicznnych o częstotliwościach charakterystycznych dla danego typu uszkodzeń widocznych w analizowanym widmie. W tabeli 1 zestawiono charakterystyczne częstotliwości świadczące o nieosiowości i występujące w widmach prądu stojana oraz drgań mechanicznych [2].

Na rysunku 2 przedstawiono przykładowe widma prądu stojana i drgań mechanicznych dla układu wyosiowanego oraz z poziomym przesunięciem równoległym równym 0,77 mm. Na rysunkach 2a i 2b, częstotliwości formalnie ujemne (np.  $f_s - 4f_r$ ) należy rozumieć jako wartości bezwzględne.

Tabela 1. Zestawienie częstotliwości charakterystycznych dla nieosiowości występujących w widmach prądu stojana i drganiach mechanicznych

| Rodzaj uszkodzenia  | Charakterystyczna częstotliwość w widmie prądu stojana | Charakterystyczna częstotliwość w widmie drgań       | Uwagi  |
|---|--|--|--|
| Nieosiowość<br>a) równoległa lub kątowa<br>b) luzy łożyska                            | $f_s \pm kf_r$   | głównie: $1f_r$ i $2f_r$<br>czasami: $3f_r$ i $4f_r$ | Maksymalne drgania w kierunku osiowym<br>Czasami wszystkie harmoniczne $f_r$ |
| $f_s$ – częstotliwość napięcia zasilającego<br>$f_r$ – częstotliwość obrotowa silnika |  |  |  |



Rys. 2. Przykładowe widma prądu stojana i przyspieszenia drgań mechanicznych: a) układ wyosiowany (widmo prądu), b) poziome przesunięcie równoległe o 0,77 mm (widmo prądu), c) układ wyosiowany (widmo drgań), d) poziome przesunięcie równoległe o 0,77 mm (widmo drgań)

Analizując widma prądu stojana układu wyosiowanego (rys. 2a) oraz z poziomym przesunięciem równoległym równym 0,77 mm (rys. 2b) można zauważyć wyraźny wzrost składowych  $f_s - 3f_r$ ,  $f_s - f_r$ ,  $f_s + f_r$  i  $f_s + 2f_r$ . W przypadku widma przyspieszenia drgań mechanicznych (rys. 2c i 2d) obserwuje się wzrost harmonicznnych o częstotliwościach  $2f_r$ ,  $3f_r$  oraz  $4f_r$ .

Wyniki analizy widmowej prądu stojana oraz drgań mechanicznych wykazują, że analiza częstotliwościowa jest dobrym narzędziem

wspomagającym wykrywanie nieosiowości napędu. Jednakże wymagana jest dobra jakość aparatury pomiarowej i diagnostycznej oraz duże doświadczenie diagnosty. Najłabszym elementem systemu diagnostycznego jest człowiek-ekspert. Dlatego coraz częściej poszukuje się rozwiązań, które zminimalizowałyby udział człowieka w ocenie stanu technicznego obiektu i zautomatyzowały proces. Duże możliwości w tej materii dają nowe metody oparte o tzw.

sztuczną inteligencję, a przede wszystkim sztuczne sieci neuronowe.

Systemy diagnostyczne zakładają, że analiza jest dokonywana w stanie ustalonym i przy stałej prędkości obrotowej. Dodatkowo przyjmuje się jeszcze, że sygnały diagnostyczne są stacjonarne. W rzeczywistości nawet przy stałym obciążeniu prędkość obrotowa oscyluje wokół wartości średniej. Oscylacje te, wnosząc swoje charakterystyczne częstotliwości zawierające również informację diagnostyczną. Aby diagnoza była poprawna, należy oddzielić w widnie zjawiska wewnętrzne, które pochodzą od uszkodzeń, od zjawisk zewnętrznych, które obrazują zakłócenia. W związku z tym, analiza powinna być prowadzona w odpowiednio szerokim paśmie częstotliwości.

#### 4. Metodyka badań laboratoryjnych

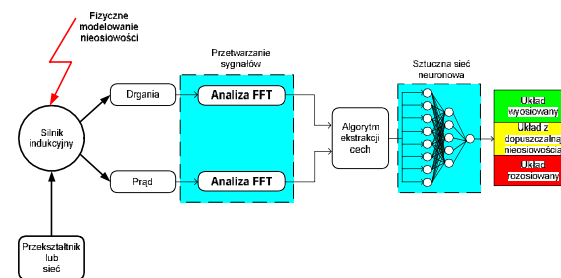
Badania laboratoryjne przeprowadzono na silniku indukcyjnym małej mocy typu SSh-90L-4 (1,5 kW) firmy INDUKTA zasilanym z sieci poprzez przetworniki pomiarowe LEM, sprzęgniętym z prądnicą prądu stałego PZB b446 ( $P_n \approx 1,5$  kW). Silnik i prądnica umieszczone były na stanowisku z możliwością regulacji położenia we wszystkich osiach (co było przydatne podczas ustawiania nieosiowości obu maszyn). Do pomiarów i analizy częstotliwościowej sygnałów wykorzystano komputer przemysłowy NI PXI 8186 z kartą pomiarową NI PXI – 4472. Dokładnej oceny amplitud charakterystycznych częstotliwości dokonano za pomocą opracowanego w środowisku LabView 8.2 przyrządu wirtualnego.

Do wykrywania nieosiowości badanego układu z silnikiem indukcyjnym zastosowano metodę analizy częstotliwościowej sygnałów diagnostycznych – prądu stojana i drgań mechanicznych. Pomiaru drgań dokonano miniaturowym jednoosiowym akcelerometrem piezoelektrycznym z wbudowanym przedwzmacniaczem *DeltaTron typ 4397* oraz trójosiowym *DeltaTron typ 4506*. Niewspółosiowość regulowano w osi poziomej x (poziome przesunięcie równoległe). Pomiaru parametrów niewyosiowania dokonano przyrządem OPTALIGN typu ALI 12.200 firmy PRÜFTECHNIK [5].

#### 5. Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do wykrywania nieosiowości

Do wykrywania nieosiowości wykorzystano sieci neuronowe typu perceptron wielowarstwowy [2]. Poglądowy schemat systemu diagnostycznego do detekcji nieosiowości z wyko-

rzysaniem sieci neuronowych został przedstawiony na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat ideowy systemu diagnostycznego do wykrywania nieosiowości z wykorzystaniem neuronowego detektora

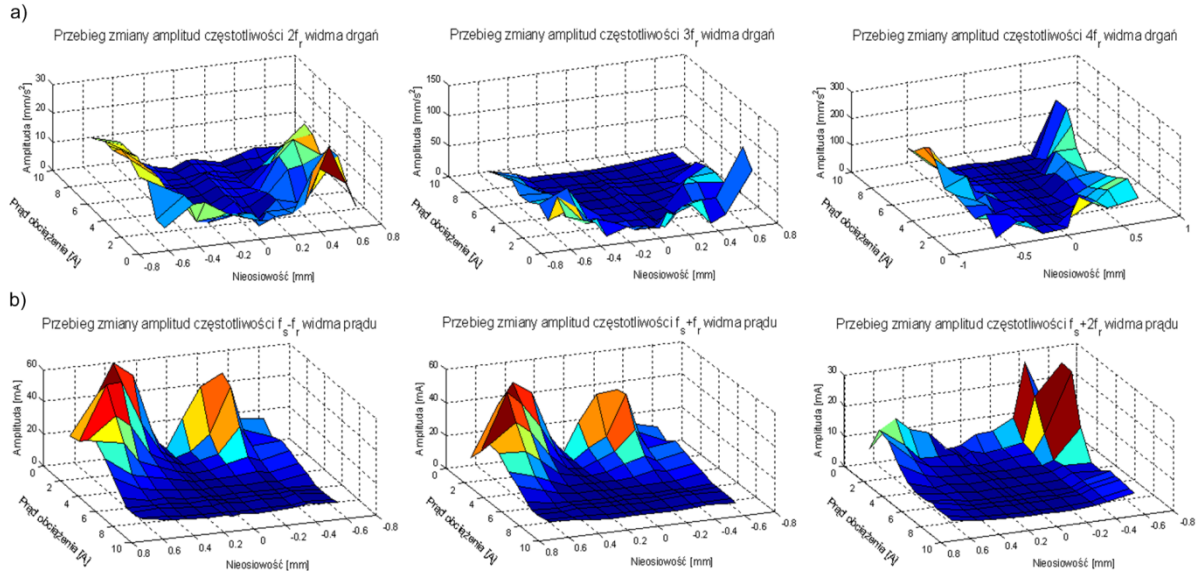
Badany silnik zasilany był bezpośrednio z sieci. Zmierzone przyspieszenie drgań i prąd stojana poddane były analizie FFT. Do budowy sieci neuronowej wykorzystano charakterystyczne składowe widm prądu i drgań, które przy zmianie nieosiowości oraz obciążenia będą miały w przybliżeniu liniową zależność (ekstrakcja cech). Amplitudy wybranych składowych oraz wartość obciążenia i prędkość podano na wejścia sieci neuronowej. Na wyjściu sieci oczekiwano informacji o wielkości nieosiowości badanego układu (0 – układ wyosiowany, 1 – układ z dopuszczalnym niewyosiowaniem, 2 – układ rozosiowany).

Na rysunku 4 przedstawiono wybrane składowe widma drgań mechanicznych oraz prądu stojana w funkcji obciążenia i poziomego przesunięcia równoległego, które zostały podane na wejścia detektora neuronowego.

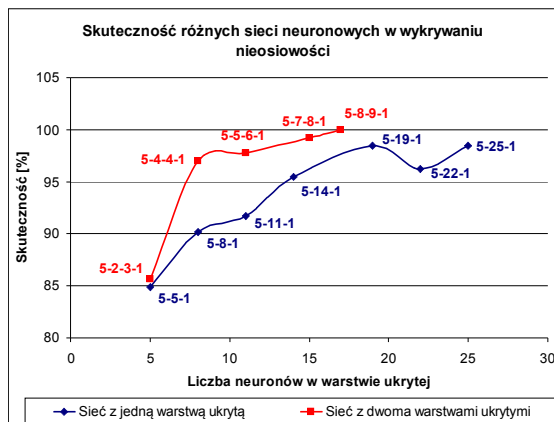
Do trenowania wybrano różne sieci neuronowe typu perceptronu wielowarstwowego. Jako wektor uczący przyjęto amplitudy charakterystycznych częstotliwości z trzech serii pomiarowych, natomiast wektorem testującym była wartość średnia amplitud z trzech serii pomiarowych. Dodatkowo wektor uczący i testujący rozszerzono o wartość prędkości i obciążenia (wektor uczący – 396 wartości na każde wejście, wektor testujący – 132 wartości na każde wejście). Dokonano również dodatkowego sprawdzenia przyjętego sposobu trenowania. W tym przypadku wektorem uczącym były wartości amplitud charakterystycznych częstotliwości z dwóch serii pomiarowych, natomiast wektorem testującym były wartości z trzeciej serii pomiarowej (wektor uczący – 264 wartości na każde wejście, wektor testujący – 132 wartości na każde wejście). W porównaniu do sieci testowanej wartością średnią z trzech pomiarów

skuteczność detektora neuronowego zmniejszyła się tylko o ok. 1%. Sieć neuronowa była uczona przez 2000 epok. Jej minimalny błąd ustawiono na wartości  $10^{-5}$ . Przetestowano sieci neuronowe z jedną warstwą ukrytą oraz z dwo-

ma warstwami ukrytymi, na wejścia których podano albo tylko wybrane częstotliwości z sygnału drganiowego lub prądowego, albo z obu sygnałów jednocześnie. Uzyskane wyniki przedstawiono na rysunkach 5-7.



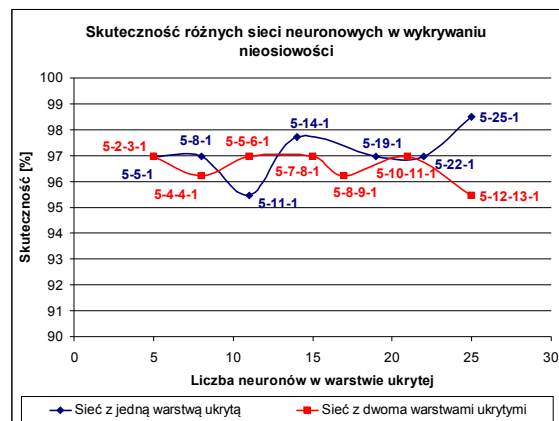
Rys. 4. Zależność charakterystycznych częstotliwości w funkcji obciążenia i poziomego przesunięcia równoległego: a) widma drgań mechanicznych, b) widma prądu stojana



Rys. 5. Porównanie skuteczności neuronowych detektorów niewyosiowania dla różnych struktur sieci (uczenie i testowanie tylko sygnałem drganiowym)

Na rysunku 5 przedstawiono skuteczność wykrywania nieprawidłowego wyosiowania napędu różnymi sieciami neuronowymi (z jedną lub z dwoma warstwami ukrytymi), na wejścia których podano tylko wybrane częstotliwości z sygnału drganiowego. Z rysunku wynika, że zwiększanie liczby neuronów w warstwie ukrytej objawia się wzrostem skuteczności testowanej sieci. Ponadto dla tej samej liczby neuronów w warstwie ukrytej większą skuteczność uzyskano dla sieci z dwoma warstwami ukrytymi.

Dodatkowo sieć 5-8-9-1 podczas testowania nie popełniła żadnego błędu. Na rysunku 6 przedstawiono porównanie skuteczności różnych sieci neuronowych, na wejścia których podano częstotliwości charakterystyczne z sygnału prądowego.



Rys. 6. Porównanie skuteczności neuronowych detektorów niewyosiowania dla różnych struktur sieci (uczenie i testowanie tylko sygnałem prądowym)

Z rysunku wynika, że zwiększanie neuronów w warstwie ukrytej nie objawia się wyraźnym wzrostem skuteczności testowanej sieci. Ponadto dla tej samej liczby neuronów w warstwie ukrytej skuteczność sieci z jedną jak i z dwoma



warstwami ukrytymi jest do siebie zbliżona (różnica wynosi ok. 1-2%). Największa różnica w skuteczności obu rodzajów sieci ma miejsce przy 25 neuronach w warstwie ukrytej i wynosi ok. 3%. Średnia skuteczność wszystkich sieci wyniosła ok. 97%.



Rys. 7. Porównanie skuteczności neuronowych detektorów niewyosiowania dla różnych struktur sieci (uczenie i testowanie sygnałem drganiowym i prądowym)

Skuteczność różnych sieci neuronowych, na wejścia których podano zarówno informacje z sygnału drganiowego jak i prądowego została przedstawiona na rysunku 7. Zwiększanie neuronów w warstwie ukrytej nieznacznie wpływa na zmianę skuteczności, która oscyluje między 97,7% a 100%. Ponadto dla tej samej liczby neuronów w warstwie ukrytej skuteczność sieci z jedną jak i z dwoma warstwami ukrytymi jest do siebie zbliżona (różnica wynosi ok. 0-1%). Dodatkowo aż cztery sieci uzyskały skuteczność 100%. Średnia efektywność wszystkich sieci wyniosła ok. 99%.

## 5. Uwagi końcowe

Na podstawie powyższych rozważań i przytoczonych przykładów można sformułować następujące uwagi i wnioski:

- klasyczna analiza widmowa jest dobrym sposobem do wykrywania nieosiowości napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi zasilanymi z sieci, przy zapewnieniu odpowiednio wysokiej dokładności i rozdzielczości aparatury pomiarowo-przetwarzającej;
- jednoczesna analiza widma prądu stojana i drgań mechanicznych pozytywnie wpływa na skuteczność wykrywania nieosiowości;
- nieinwazyjność oraz łatwość pomiaru prądu stojana oraz drgań mechanicznych uzasadnia celowość zastosowania tych sygnałów do

monitorowania nieosiowości napędów elektrycznych z silnikami indukcyjnymi;

- dodanie drugiej warstwy ukrytej poprawia skuteczność wykrywania nieosiowości w przypadku uczenia tylko informacją z sygnału drganiowego;
- zwiększanie neuronów w warstwie ukrytej zwiększa skuteczność tylko podczas uczenia sygnałem drganiowym, w pozostałych przypadkach obserwuje się nieznaczne zmiany efektywności;
- największą dokładność działania sieci neuronowej obserwuje się podczas uczenia informacjami zarówno z sygnału drganiowego jak i prądowego;
- badania potwierdziły skuteczność wykrywania nieosiowości przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych.

Praca finansowana ze środków na naukę w latach 2007-2010 jako projekt badawczy rozwojowy Nr R01 014 03

## 6. Literatura

- [1] Dzierżanowski A., Szymaniec S.: *Osiowanie układów maszynowych z silnikami elektrycznymi*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 58/1999, KOMEL maj 1999, ss. 131-134
- [2] Kowalski Cz. T.: *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2005
- [3] Kowalski Cz. T., Ewert P.: *Zastosowanie analizy widmowej prądu stojana do monitorowania ekscentryczności silników indukcyjnych*. Zagadnienia maszyn, napędów i pomiarów elektrycznych, Wrocław, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2007, ss. 260-270
- [4] Remack K.: *Kilka słów o osiowaniu sprzęgieł*, Inżynieria i utrzymanie ruchu zakładów przemysłowych, wrzesień 2006
- [5] Materiały informacyjne firmy PRÜFTECHNIK

## Autorzy

Dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWr,  
e-mail: [czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl](mailto:czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl)  
Mgr inż. Paweł Ewert,  
e-mail: [pawel.ewert@pwr.wroc.pl](mailto:pawel.ewert@pwr.wroc.pl)  
Politechnika Wrocławska,  
Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych,  
ul. Smoluchowskiego 19, 50-370 Wrocław