

Paweł Ewert, Czesław T. Kowalski
Instytut Maszyn Napędów i Pomiarów Elektrycznych

NEURONOWY DETEKTOR USZKODZEŃ ŁOŻYSK TOCZNYCH

NEURAL DETECTOR OF ROLLING BEARING FAULTS

Abstract: Early detection of rolling bearing faults in induction motors is very important task in the exploitation of electrical motors due to the consequences of the their damage. In the article the possibility of the neural networks application for the detection of bearing faults (such as: balls, outer and inner races) in induction motors is presented. The training and test of the neural network used data obtained from the experiments carried out on a set of specially made bearing damage. To the test used amplitudes of the characteristics frequency obtained from the spectral analysis of the mechanical vibrations and the envelope analysis.

1. Wprowadzenie

Obecnie w wielu gałęziach przemysłu na świecie ponad 90% wszystkich silników zainstalowanych w przemyśle stanowią silniki indukcyjne. Nowoczesne układy napędowe z silnikami indukcyjnymi charakteryzują się dużym stopniem złożoności. Mimo stosowania elementów o dużej niezawodności układy te ulegają awariom. W czasie eksploatacji silników indukcyjnych w częściach elektrycznych obwodów (uzwojeń) stojana i wirnika oraz w układzie mechanicznym silnika i współpracującej maszynie roboczej wraz z elementami sprzęgającymi powstają liczne uszkodzenia. Przyczyny tych uszkodzeń w dużej mierze zależą od samej konstrukcji maszyny jak również, od jakości produkcji, montażu i instalacji na stanowisku pracy, środowiska, w którym pracuje silnik, charakteru obciążenia oraz konserwacji. W normalnych warunkach pracy konstrukcja maszyny zapewnia stabilne współdziałanie sił elektromagnetycznych i mechanicznych ograniczając poziom drgań oraz zakłóceń. Pojawienie się uszkodzenia zakłóca równowagę między tymi siłami przyspieszając rozwój uszkodzenia. Najważniejszym problemem eksploatacji układów napędowych z silnikami indukcyjnymi jest możliwie wczesne wykrycie rozwijających się uszkodzeń obwodów elektrycznych, magnetycznych oraz części mechanicznych. Aby to było możliwe, niezbędne jest ciągle monitorowanie wielkości charakteryzujących stan techniczny maszyny.

Obecnie, w monitorowaniu i diagnostyce uszkodzeń układów napędowych z silnikami indukcyjnymi dominujące znaczenie ma podejście oparte na analizie sygnałów bezpośrednio mierzonych na obiekcie, tj. drgań mechanicznych [3]–[5], [7], [10] i prądu stojana [2]–[5], [9]. Jak dotąd diagnostyka oparta na metodach

analizy sygnałów łatwomierzalnych wykorzystuje wiedzę i doświadczenie eksperta (człowieka). Ekspert–diagnosta dokonuje na bieżąco interpretacji aktualnych danych uzyskiwanych z pomiarów i analizy realizowanej przez systemy pomiarowe. Niestety podejście to ma słaby punkt, którym jest człowiek–ekspert, który może się mylić i którego doświadczenie jest trudne do zautomatyzowania. Dlatego oprócz doskonalenia metod analizy sygnałów diagnostycznych poszukuje się sposobów na zobjektywizowanie procesu wykrywania i oceny stopnia uszkodzeń. Można to uzyskać poprzez zastosowanie w diagnostyce układów napędowych z silnikami indukcyjnymi metod i technik sztucznej inteligencji [1], [5], [6], [11].

W niniejszym artykule zostanie przedstawiony sposób zastosowania sztucznych sieci neuronowych do detekcji uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych. Trenowanie i testowanie sieci neuronowej zostało wykonane w oparciu o dane uzyskane z badań laboratoryjnych zrealizowanych na zestawie specjalnie przygotowanych łożysk z zamodelowanymi uszkodzeniami. W badaniach wykorzystano amplitudy charakterystycznych częstotliwości uzyskanych z analizy widmowej drgań mechanicznych oraz z analizy obwiedni.

2. Wykrywanie uszkodzeń łożysk tocznych

Najczęściej uszkodzanym elementem wszystkich maszyn wirujących są łożyska [3], [7]. Ich głównym zadaniem jest przenoszenie obciążeń roboczych z elementu wirującego na korpus maszyny przy jak najmniejszych oporach ruchu. Jak wynika z zasady działania, łożyska są również głównym generatorem drgań w silnikach. Na podstawie badań statystycznych przeprowadzonych przez różne ośrodki, aż 76% wszyst-

kich uszkodzeń mechanicznych maszyn elektrycznych jest spowodowanych przez zniszczone łożysko [5]. Koszty wymiany łożysk są niewielkie w porównaniu do kosztów remontu silnika. Dlatego tak ważna jest diagnostyka stanu technicznego węzła łożyskowego.

Na skutek eksploatacji lub nieprawidłowego doboru łożyska ulegają przedwczesnemu zużyciu a w konsekwencji uszkodzeniu.

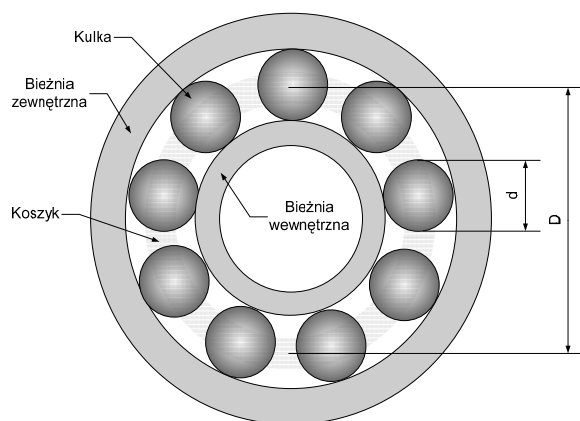
Zbyt późne wykrycie początkowej fazy uszkodzenia łożysk może doprowadzić do uszkodzeń wtórnych takich jak:

- uszkodzenie gniazda łożyska,
- deformacja lub pęknięcie wału,
- rozerwanie sprzęgła powodujące uszkodzenie uzwojenia silnika,
- uszkodzenie obudowy maszyny,
- zapłon czynnika smarującego i w konsekwencji pożar.

Uszkodzenia łożysk mogą wywoływać następujące efekty [3], [5], [10]:

- Dodatkowe siły i momenty,
- Drgania mechaniczne i zwiększony hałas,
- Zmiany widma drganiowego i akustycznego,
- Zmiany widma prądu,
- Wzrost temperatury,
- Wzrost oporów ruchu,
- Zanieczyszczenie smaru, oleju.

Łożysko kulkowe o geometrii przedstawionej na rys. 1 składa się z bieżni zewnętrznej oraz wewnętrznej, elementów tocznych oraz koszyka, który zapewnia równomierne ich rozłożenie.



Rys. 1. Łożysko toczne kulkowe zwykłe: d – średnica elementu tocznego, D – średnica podziałowa łożyska

Uszkodzenia łożysk można podzielić na uszkodzenia rozproszone i lokalne [2]. Uszkodzenia rozproszone dotyczą całego regionu łożyska i trudno je scharakteryzować konkretną wartością charakterystycznej częstotliwości. Uszko-

dzenia lokalne dotyczą zwykle jednopunktowych uszkodzeń i mogą być podzielone ze względu na uszkodzony element:

- uszkodzenie koszyka (uszkodzenie to nie będzie dalej rozpatrywane),
- uszkodzenie elementu tocznego,
- uszkodzenie bieżni zewnętrznej,
- uszkodzenie bieżni wewnętrznej.

Ocena stanu elementów konstrukcyjnych łożysk dokonywana na podstawie widm drgań lub wyspecjalizowanych analiz opiera się na założeniu, że punktowe uszkodzenia powierzchni elementu łożyska generują drgania o charakterystycznych częstotliwościach. Częstotliwości te można wyznaczyć na podstawie znajomości parametrów konstrukcyjnych łożyska według zależności podanych poniżej [2]-[11]:

$$f_{lk} = \frac{1}{2} f_r \left(1 - \frac{d \cdot \cos(\vartheta)}{D} \right) \quad (1)$$

$$f_{bz} = \frac{N_k}{2} f_r \left(1 - \frac{d \cdot \cos(\vartheta)}{D} \right) \quad (2)$$

$$f_{bw} = \frac{N_k}{2} f_r \left(1 + \frac{d \cdot \cos(\vartheta)}{D} \right) \quad (3)$$

$$f_k = \frac{D}{2 \cdot d} f_r \left(1 - \left(\frac{d \cdot \cos(\vartheta)}{D} \right)^2 \right) \quad (4)$$

gdzie:

$$f_r = \frac{n}{60} \text{ [Hz]} - \text{częstotliwość obrotowa, } n - \text{prędkość obrotowa [obr/min], } d - \text{średnica elementu tocznego, } D - \text{średnica podziałowa łożyska, } \vartheta - \text{kąt pracy łożyska (} 0^\circ \text{ dla łożyska kulkowego zwykłego), } N_k - \text{liczba elementów tocznych łożyska, } f_{lk} - \text{częstotliwość związana z uszkodzeniem i luzami koszyka, } f_{bz} - \text{częstotliwość związana z uszkodzeniem bieżni zewnętrznej, } f_{bw} - \text{częstotliwość związana z uszkodzeniem bieżni wewnętrznej, } f_k - \text{częstotliwość związana z uszkodzeniem elementu tocznego.}$$

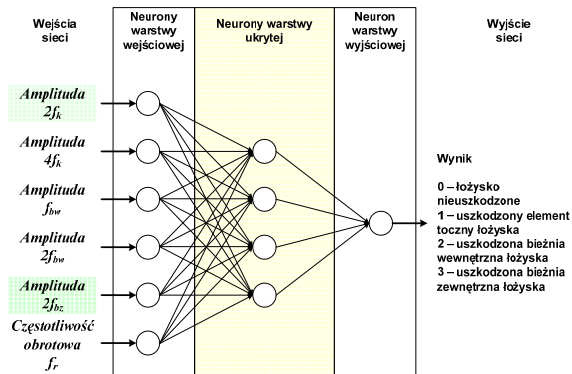
W widmach przyspieszenia drgań oraz obwiedni pojawiają się nie tylko częstotliwości opisane zależnościami (1)-(4), ale również ich kolejne wielokrotności oraz składowe przesunięte o aktualną wartość częstotliwości obrotowej $\pm f_r$.

W widmach przyspieszenia drgań oraz obwiedni pojawiają się nie tylko częstotliwości opisane zależnościami (1)-(4), ale również ich kolejne wielokrotności oraz składowe przesunięte o aktualną wartość częstotliwości obrotowej $\pm f_r$.

3. Detektor neuronowy

Najczęściej wykorzystywaną w zastosowaniach praktycznych architekturą neuronową są jednokierunkowe, wielowarstwowe sieci neuronowe, w literaturze określane również, jako perceptr-

ny wielowarstwowe (*Multi Layer Perceptron*). O odwzorowaniu każdego elementu wektora wejściowego decyduje w tym przypadku jednocześnie wiele neuronów. Struktura sieci MLP (rys. 2) zawiera połączone ze sobą neurony, ułożone w warstwy (wejściową oraz wyjściową, a także warstwy ukryte, które nie posiadają bezpośredniego połączenia z sygnałami zewnętrznymi). Ponadto nie występują połączenia pomiędzy neuronami tej samej warstwy [8].



Rys. 2. Struktura zastosowanej sieci neuronowej MLP

Funkcje aktywacji neuronów wejściowych oraz wyjściowych są liniowe, natomiast w warstwach ukrytych zastosowano tangens hiperboliczny. Sygnał wyjściowy poszczególnego neuronu wyrażony jest poniższym równaniem:

$$y_j = f\left(\sum_{i=1}^N w_{ij}x_i(t) + w_{0j}\right) \quad (5)$$

$$f(u) = \operatorname{tgh}(\beta u) \quad (6)$$

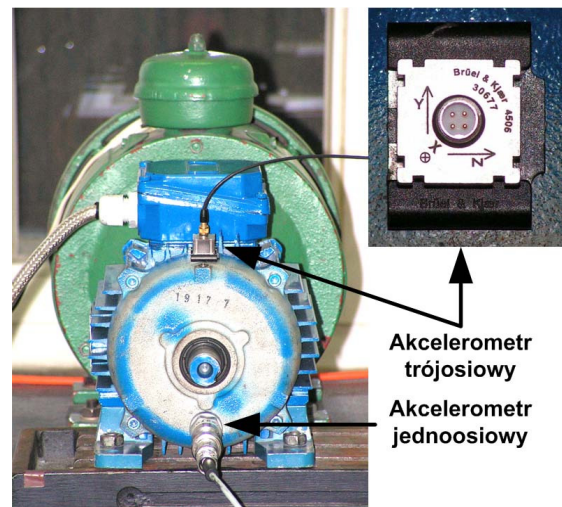
gdzie: f – przykładowa funkcja aktywacji, w_{ij} – współczynniki wagowe, x_i – sygnały wejściowe, β – współczynnik korygujący kształt funkcji aktywacji, u – argument funkcji aktywacji, w_{0j} – wartość biasu.

Wartości współczynników połączeń wagowych dobierano za pomocą algorytmu Levenberga-Marquardta [8].

4. Badania eksperymentalne

Badania eksperymentalne przeprowadzono na silniku SSh-90L-4 firmy INDUKTA zasilanym z sieci, w którym montowane były łożyska kulkowe typ 6205 2Z z sztucznie modelowanymi uszkodzeniami kulki (punktowe uszkodzenie jednej kulki), bieżni wewnętrznej (przecięcie bieżni wewnętrznej oraz uszkodzenie powierzchniowe bieżni na długości 2cm) i zewnętrznej (przecięcie bieżni zewnętrznej oraz

uszkodzenie powierzchniowe bieżni na długości 2cm). W tabeli 1 przedstawiono wartości częstotliwości uszkodzeniowych badanego łożyska dla częstotliwości obrotowej $f_r=24,9\text{Hz}$ (1494 obr/min) oraz $f_r=23,8\text{Hz}$ (1428 obr/min) obliczone według zależności (1) – (4). Badania zrealizowano przy wykorzystaniu komputera przemysłowego NI PXI 8186 wyposażonego w kartę pomiarową NI USB 9234. Akwizycję sygnałów diagnostycznych oraz analizę danych pomiarowych dokonano przy wykorzystaniu przyrządów i analizatorów wirtualnych zrealizowanych w środowisku LabView 8.5. Do pomiaru drgań wykorzystano akcelerometr jednoosiowy typ M622B01 firmy IMI SENSORS oraz trójosiowy typ 4506 firmy Bruel & Kjaer instalowane na pokrywie łożyska silnika (rys. 3). Zastosowanie dwóch akcelerometrów wynikało z chęci sprawdzenia wykrywalności uszkodzeń dla pomiarów realizowanych w dwóch miejscach i kierunkach (promieniomym i osiowym). Sygnały były mierzone z próbkowaniem 12,8kS/s w czasie 10s, co umożliwiło uzyskanie widma z rozdzielczością 0,1Hz.



Rys. 3. Sposób rozmieszczenia akcelerometrów na pokrywie łożyskowej badanego silnika

Tabela 1. Wartości częstotliwości uszkodzeniowych łożyska typ 6205 2Z obliczone z zależności (1) – (4) dla dwóch prędkości obrotowych silnika

Częstotliwość uszkodzeniowa	$f_r=24,9\text{Hz}$	$f_r=23,8\text{Hz}$
f_{lk}	9,9Hz	9,5Hz
f_k	59,1Hz	56,5Hz
f_{bz}	89,8Hz	85,8Hz
f_{bw}	133,9Hz	127,9Hz

5. Wyniki badań detektorów neuronowych

Wstępna analiza uzyskanych widm pozwoliła wyznaczyć charakterystyczne częstotliwości uszkodzeniowe. Symulacje oraz obliczenia związane z detektorami neuronowymi zostały przeprowadzone w środowisku Matlab–Simulink. Jako sygnały wejściowe wybrano amplitudy następujących częstotliwości: $2f_k$, $4f_k$, f_{bw} , $2f_{bw}$ oraz $2f_{bz}$. Dodatkowo wektor wejściowy rozszerzono o częstotliwość obrotową f_r , co pozwoli uwzględnić zmienne obciążenie. Zadaniem detektora neuronowego jest wykrywanie rodzaju uszkodzonego elementu konstrukcyjnego łożyska. Warstwa wyjściowa składała się tylko z jednego neuronu wyjściowego. Na wyjściu sieci pojawia się informacja 0 dla łożyska nieuszkodzonego, 1 dla uszkodzonej kulki, 2 dla uszkodzonej bieżni wewnętrznej oraz 3 dla uszkodzonej bieżni zewnętrznej łożyska. Przykładową strukturę zastosowanej sieci neuronowej przedstawiono na rys. 2.

Do uczenia sieci neuronowych wybrano dane z dwóch różnych serii pomiarowych, natomiast testowano trzecią serią pomiarową. Każda seria składała się z 10 pomiarów dla łożyska: nieuszkodzonego, z uszkodzoną jedną kulką, bieżnią wewnętrzną (dwa różne przypadki uszkodzenia) i zewnętrzną (dwa różne przypadki uszkodzenia). Wektor wejściowy do uczenia sieci neuronowej składał się ze 120 elementów, natomiast wektor testujący z 60 elementów. Badania zrealizowano dla danych uzyskanych z analiz FFT oraz obwiedni przyspieszenia drgań zmierzonego akcelerometrem jednoosiowym i trójosiowym. W celu uśrednienia wyników skuteczności wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych przebadanych struktur detektorów neuronowych wykonano 11 serii uczenia oraz testowania. Uzyskane wyniki zostały zaprezentowane w tabelach 2 i 3 dla analizy FFT przyspieszenia drgań oraz w tabelach 4 i 5 dla analizy obwiedni przyspieszenia drgań.

Z przeprowadzonych 11 serii uczenia oraz testowania różnych struktur sieci neuronowych wynika, że już przy stosunkowo małej strukturze (6-3-1) średnia skuteczność poprawnego określenia typu uszkodzenia łożyska tocznego jest większa od 90%. W każdej z przebadanych struktur największa skuteczność wynosiła 100%, natomiast najmniejszą skuteczność (ok. 76%) uzyskano dla sieci (6-4-1) uczonej danymi uzyskanymi z obwiedni przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy). Jedynie w przypadku detektora neuronowego (6-5-1)

uczonego i testowanego danymi uzyskanymi z analizy FFT przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy) średnia skuteczność wyniosła 100%. Jest to wynik uzyskany z 11 serii pomiarowych oraz dla ograniczonej liczby typów uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych.

Tabela 2. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy FFT przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	93,7	97,1	100,0
Najmniejsza	86,7	86,7	100
Największa	100	100	100

Tabela 3. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy FFT przyspieszenia drgań (akcelerometr trójosiowy – oś X)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	95,9	98,9	98,9
Najmniejsza	80	96,7	96,7
Największa	100	100	100

Tabela 4. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy obwiedni przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	94,4	93,6	94,5
Najmniejsza	85	76,7	85
Największa	100	100	100

Tabela 5. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy obwiedni przyspieszenia drgań (akcelerometr trójosiowy – oś X)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	97,0	96,7	97,0
Najmniejsza	90	90	93,3
Największa	100	100	100

Przeprowadzono również próbę uczenia oraz testowania danymi uzyskanymi jednocześnie z analizy FFT lub obwiedni przyspieszenia drgań dla różnych czujników. W tym celu wektor uczący składał się z dwóch serii pomiarowych uzyskanych z analizy FFT przyspieszenia drgań dla akcelerometru jednoosiowego (120 próbek) oraz z dwóch serii pomiarowych z analizy FFT przyspieszenia drgań dla akcelerometru trójosiowego (oś X) (120 próbek) – łącznie 240 próbek. Wektor testujący składał się z danych z trzeciej serii pomiarowej i zawierał 120 próbek. Analogicznie wyglądało uczenie oraz testowanie danymi z obwiedni przyspieszenia drgań. Wyniki również z 11 serii uczenia oraz testowania dla różnych struktur detektorów neuronowych przedstawiono w tabelach 6 i 7.

Tabela 6. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy FFT przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy oraz trójosiowy – oś X)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	86,4	98,8	97,3
Najmniejsza	55,8	95,8	85,8
Największa	100	100	100

Tabela 7. Skuteczność wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy obwiedni przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy oraz trójosiowy – oś X)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	95,0	97,0	96,6
Najmniejsza	80,8	91,7	89,2
Największa	99,2	99,2	98,3

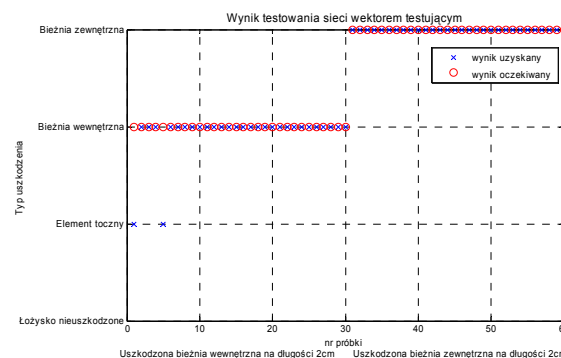
Również w tym przypadku średnia skuteczność jest bardzo wysoka (ponad 90%). Jedyne dla struktury (6-3-1) uczonej danymi uzyskanymi z analizy FFT przyspieszenia drgań średnia skuteczność wynosi ok. 86%.

W celu zweryfikowania jak będzie zachowywał się detektor neuronowy w przypadku testowania uszkodzeniem niewykorzystanym w procesie uczenia detektora, opracowano inny wektor uczący i testujący. W tym przypadku dane uczące składały się z amplitud wcześniej wybranych charakterystycznych częstotliwości dla

trzech serii pomiarowych łożyska nieuszkodzonego, łożyska z przeciętą bieżnią wewnętrzną, z przeciętą bieżnią zewnętrzną oraz z uszkodzoną jedną kulką. Łącznie wektor uczący składał się ze 120 próbek. Wektor testujący składał się z danych z trzech serii pomiarowych dla łożyska z uszkodzoną powierzchnią bieżni wewnętrznej na długości 2cm oraz z uszkodzoną powierzchnią bieżni zewnętrznej na długości 2cm (łącznie 60 próbek). Dane uczące oraz testujące zostały wybrane z analizy FFT przyspieszenia drgań zmierzonego akcelerometrem jednoosiowym. Również w tym przypadku przeprowadzono 11 serii uczenia oraz testowania różnych struktur sieci neuronowych. Szczegółowe wyniki zostały przedstawione w tabeli 8.

Tabela 8. Skuteczność wykrywania wybranych uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych w oparciu o dane z analizy FFT przyspieszenia drgań (akcelerometr jednoosiowy)

Skuteczność z 11 kolejnych serii uczenia i testowania %	Struktura sieci neuronowej		
	(6-3-1)	(6-4-1)	(6-5-1)
Średnia	69,9	77,6	89,1
Najmniejsza	50	51,7	66,7
Największa	98,3	100	100



Rys. 4. Przykładowy wynik testowania sieci o strukturze (6-3-1) testowanej uszkodzeniem niewykorzystanym w procesie uczenia

Z zestawienia wynika, że sieci neuronowe o stosunkowo prostej strukturze potrafią rozpoznawać nieznanne im podczas uczenia uszkodzenia. W prawie każdym badaniu testowym detektor neuronowy wskazał, że łożysko jest uszkodzone. Błędy występowały przy określaniu rodzaju uszkodzenia. Duża rozbieżność między wartością najmniejszą a największą skuteczności z 11 serii uczenia i testowania wynika ze zbyt małej liczby próbek w wektorze

uczającym, a co za tym idzie, że zbyt małej liczby przebadanych przypadków typów uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych. Na rys. 4 przedstawiono przykładowy wynik testowania detektora neuronowego o strukturze (6-3-1). W przedstawionym przykładzie uzyskana skuteczność wynosiła ok. 96,7%.

6. Podsumowanie

Na podstawie powyższych rozważań i przytoczonych przykładów struktur sieci neuronowych można sformułować następujące uwagi:

1. Amplitudy charakterystycznych częstotliwości uszkodzeniowych są dobrymi symptomami uszkodzeń i mogą być zastosowane do uczenia oraz testowania sieci neuronowych pod kątem wykrywania uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych.
2. Wykazano, że stosunkowo niewielkie struktury sieci neuronowych zapewniają dużą dokładność w wykrywaniu rodzaju uszkodzenia łożyska.
3. Detektory uszkodzeń łożysk oparte o sztuczne sieci neuronowe umożliwiają ciągle (online) monitorowanie silnika pod kątem wykrywania uszkodzeń łożysk tocznych.
4. Rozbudowanie wektora uczącego o kolejne przypadki uszkodzeń konstrukcyjnych łożysk tocznych pozytywnie wpłynie na skuteczność oraz wiarygodność zastosowanych detektorów neuronowych.

7. Literatura

- [1] Abu-Rub H., Ahmed Sk. M., Iqbal A., Rahimian M., Toliyat H.A., *Incipient Bearing Fault Diagnostics for Inverter Fed Induction Motor Drive using ANFIS*, XIX International Conference on Electrical Machines - ICEM 2010, Rome, 6-8 Sept. 2010, pp. 1-5
- [2] Blödt M., Granjon P., Raison B., Rostaing G., *Models for Bearing Damage Detection in Induction Motors Using Stator Current Monitoring*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 55, No. 4, April 2008, pp. 1813-1822
- [3] Ewert P., Kowalski Cz. T., *Ocena skuteczności wykrywania uszkodzeń elementów konstrukcyjnych łożysk tocznych w silnikach indukcyjnych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Oficyna Wydawnicza Politechniki

Wrocławskiej 2010, nr 64, seria: Studia i materiały nr 30, str. 291-302

- [4] Immovilli F., Bellini A., Rubini R., Tassoni C., *Diagnosis of Bearing Faults in Induction Machines by Vibration or Current Signals: A Critical Comparison*, IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 46, No. 4, July/August 2010, pp. 1350-1359
- [5] Kowalski Cz. T., *Monitorowanie i diagnostyka uszkodzeń silników indukcyjnych z wykorzystaniem sieci neuronowych*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej Nr 57, Seria: Monografie Nr 18, Wrocław 2005
- [6] Li B., Chow Mo-Y., Tipsuwan Y., Hung J. C., *Neural-Network-Based Motor Rolling Bearing Fault Diagnosis*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 47, No. 5, October 2000, pp. 1060-1069
- [7] Muthukumarasamy A., Ganeriwala S., *Diagnosis of Rolling Element Bearing Faults using Envelope analysis*, Tech Note, SpectraQuest Inc. (2009), pp. 1-11
- [8] Osowski S., *Sieci neuronowe do przetwarzania informacji*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2006
- [9] Swędrowski L., *Nowa metoda diagnostyki łożysk silnika indukcyjnego oparta na pomiarze i analizie widmowej prądu zasilającego*, Monografie 54, Politechnika Gdańska, 2005
- [10] Szymaniec S., *Diagnostyka stanu izolacji uzwojeń i stanu łożysk silników indukcyjnych klatkowych w warunkach przemysłowej eksploatacji*, Studia i Monografie z. 193, Opole 2006
- [11] Zarei J., Poshtan J., Poshtan M., *Bearing Fault Detection in Induction Motor Using Pattern Recognition Techniques*, 2nd IEEE International Conference on Power and Energy (PECon 08), December 1-3, 2008, Johor Baharu, Malaysia, pp. 749-753

Praca naukowa finansowana ze środków budżetowych na naukę w latach 2010 – 2012 jako projekt badawczy promotorski nr N N510 538139

Autorzy

Mgr inż. Paweł Ewert
E-mail: pawel.ewert@pwr.wroc.pl

Dr hab. inż. Czesław T. Kowalski, prof. PWr.
E-mail: czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl

Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, 50-370 Wrocław, ul. Smoluchowskiego 19

Recenzent

Prof. dr hab. inż. Bronisław Tomczuk