

**Wojciech Pietrowski**  
Politechnika Poznańska

## **ZASTOSOWANIE RADIALNEJ SIECI NEURONOWEJ W DIAGNOSTYCE USZKODZEŃ UZWOJENIA STOJANA MASZYNY INDUKCYJNEJ KLATKOWEJ**

### **APPLICATION OF RADIAL NEURAL NETWORK FOR DETECTION OF FAULTS IN INDUCTION MOTOR STATOR WINDING**

**Abstract:** The paper presents application of the radial neural network for detection of faults in induction motor stator winding. The decision of stator winding condition has been taken using the artificial neural network with radial basis function based on axial flux. The axial flux has been measured for different configuration of stator winding. It can be concluded that the axial flux can be used in detection of faults in induction motor stator winding.

#### **1. Wprowadzenie**

Za względu na szerokie zastosowanie maszyn indukcyjnych w przemyśle poszukuje się takich bezinwazyjnych metod diagnostycznych, które pozwolą określić stan maszyny w czasie jej pracy przy jak najmniejszej liczbie mierzonych wielkości. Monitorowaniu podlegają takie parametry jak stan uzwojenia stojana oraz klatki wirnika, niesymetria parametrów obwodu elektrycznego i magnetycznego stojana oraz wirnika, niecentryczność wirnika względem stojana, stan łożysk. Wnioskowanie o stanie maszyny dokonuje się najczęściej na podstawie spektrum prądu stojana [3]. Wykorzystuje się również analizę mocy chwilowej, drgań mechanicznych korpusu oraz strumienia osiowego [1].

Diagnostyka maszyn indukcyjnych ma na celu określenie stanu technicznego silnika na podstawie niesymetrii w obwodach elektrycznym i magnetycznym. W ogólnym przypadku można stwierdzić, że z pracą niesymetryczną mamy do czynienia wówczas, gdy co najmniej jedna z faz układu wielofazowego ma warunki pracy inne od pozostałych faz. W obwodzie elektrycznym niesymetria może być spowodowana przez uszkodzenia np. zwarcia międzyzwojowe, przerwanie jednej z faz, zwarcie fazy z inną fazą lub do kadłuba. Niesymetria obwodu magnetycznego to przede wszystkim nierównomierność szczeliny powietrznej, anizotropia materiału, niedokładność procesu technologicznego. Objawy niesymetrii można zaobserwować prądzie stojana, pulsacji momentu, zmianach w momencie średnim,

zwiększeniu strat oraz większym nagrzewaniu się maszyny. Stosując analizę składowych zgodnych, przeciwnych i zerowych można stwierdzić, że występowanie niesymetrii powoduje niekorzystne zjawiska: zmiana mocy pobieranej przez silnik z sieci, wzrost prądów fazowych stojana, zmniejszenie momentu całkowitego przez moment składowej przeciwnej, zmniejszenie mocy na wale spowodowanej prądem składowej przeciwnej. W artykule przedstawiono zastosowanie strumienia osiowego w diagnostyce uszkodzeń uzwojenia stojana maszyny indukcyjnej klatkowej. Wnioskowanie o stopniu uszkodzenia zrealizowano wykorzystując sztuczną sieć neuronową o radialnej funkcji bazowej.

#### **2. Pomiar strumienia osiowego**

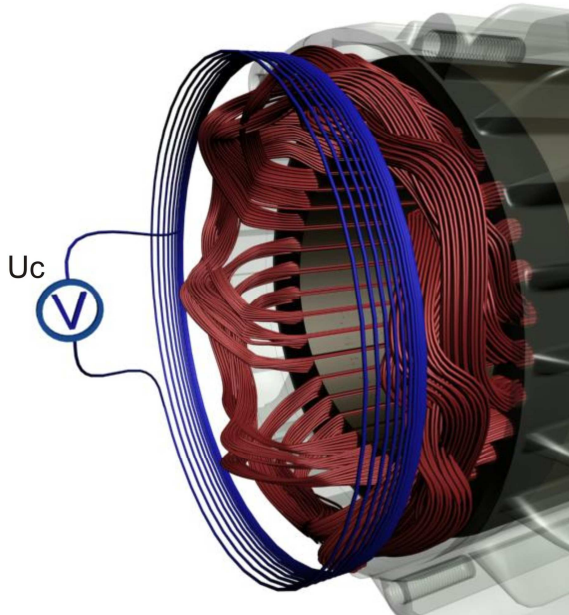
W idealnej trójfazowej maszynie indukcyjnej zasilanej z symetrycznego trójfazowego źródła w czasie pracy ustalonej strumień osiowy nie występuje. Jednak w silnikach rzeczywistych pomimo zasilania symetrycznego występuje strumień osiowy. Jest on efektem niesymetrii silnika wynikającym z niedoskonałości procesu produkcyjnego oraz niejednorodności materiału. Ponadto zapewnienie symetrii zasilania też nie jest zadaniem trywialnym. Dlatego strumień osiowy może stać się dobrym wskaźnikiem przydatnym do oceny uszkodzeń wewnątrz maszyny. Pojawienie się strumienia osiowego ma negatywne skutki tj. zaliczyć występowanie strat wiropądowych w elementach znajdujących się w pobliżu

połączeń czołowych (pokrywy łożyskowe) oraz indukowanie prądów w łożyskach.

W celu pomiaru strumienia osiowego nawinięto cewkę pomiarową wokół połączeń czołowych (rys.1). Płaszczyzna, w której umieszczona jest cewka jest prostopadła do osi wału silnika. Zatem można przyjąć, że pomierzony strumień będzie strumieniem osiowym a jego wartość zależy od prądów płynących w uzwojeniu stojana oraz w klatce wirnika. Ponieważ strumień wzniecany jest przez prądy stojana oraz wirnika zatem w widmie napięcia wyindukowanego w cewce będą zawarte częstotliwości prądów stojana oraz wirnika. Wpływ niesymetrii wirnika będzie widoczny w widmie częstotliwościowym przez występowanie następujących częstotliwości  $f_{mw}$  [4]

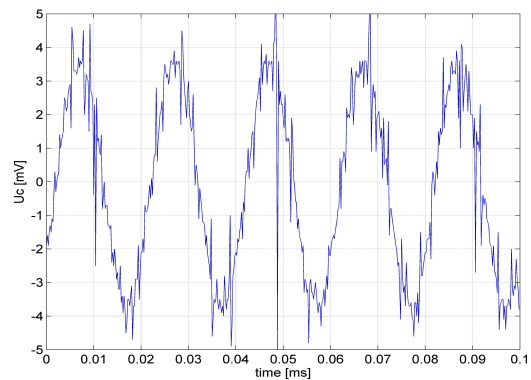
$$f_{mw} = (1 \pm 2s)f_s \quad (1)$$

gdzie:  $s$  – poślizg,  $f_s$  – częstotliwość napięcia zasilania.

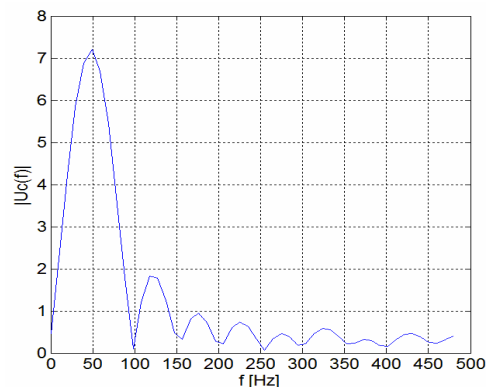


Rys.1. Cewka pomiarowa wokół połączeń czołowych

Przebieg czasowy napięcia  $U_c(t)$  pomierzonego na zaciskach cewki przy zasilaniu symetrycznym przedstawiono na rysunku 2. Badania przeprowadzono przy zasilaniu uzwojenia stojana, natomiast wirnik został usunięty z maszyny. Celem tych pomiarów było określenie strumienia osiowego bez wpływu prądów w klatce wirnika. Analizę widmową napięcia  $U_c$  na cewce przedstawiono na rysunku 3. Widać dominującą częstotliwość 50 Hz, czyli częstotliwość napięcia zasilania.



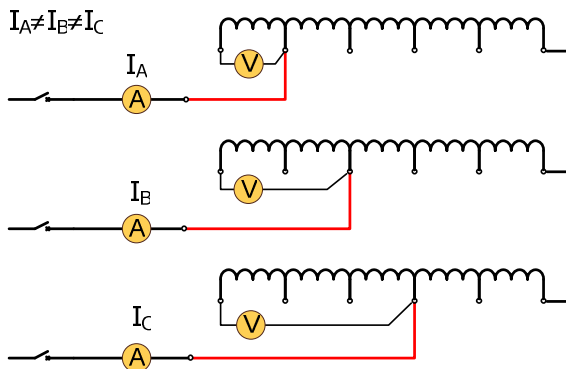
Rys.2. Czasowy przebieg napięcia wyindukowanego w cewce pomiarowej



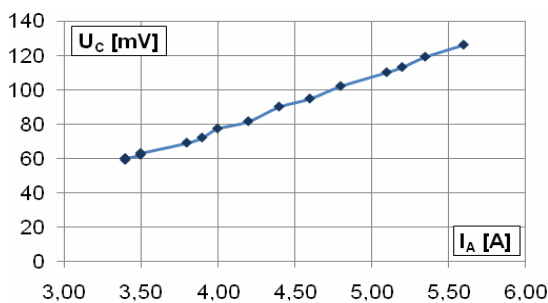
Rys.3. Analiza widmowa napięcia wyindukowanego w cewce pomiarowej

### 3. Modelowanie uszkodzeń uzwojenia stojana

W celu modelowania uszkodzeń uzwojenia stojana wyprowadzono zaczepty z uzwojenia stojana na tabliczkę zaciskową. Do niewykorzystanej części uzwojenia był podłączony woltmierz (rys.4). Wykres napięcia pomierzonego przez woltmierz w funkcji prądu fazowego przedstawiono na rysunku 5. Ze względu na dużą wartość rezystancji woltmierz można przyjąć, że prąd płynący w tych zwojach miał niewielki wpływ na rozkład strumienia magnetycznego w maszynie. Pozostałą część uzwojenia zasilano napięciem 3-fazowym symetrycznym. Ze względu na różną liczbę zwojów w każdej z faz różna była rezystancja uzwojenia. Zatem prąd fazowy każdej z faz miał inną wartość. W ten sposób uzyskano niesymetrię obwodu elektrycznego uzwojenia stojana.



Rys.4. Schemat wyprowadzeń zaczepek uzwojenia stojana



Rys.5. Napięcie wyindukowane w cewce w zależności od prądu fazowego

#### 4. Sztuczna sieć neuronowa

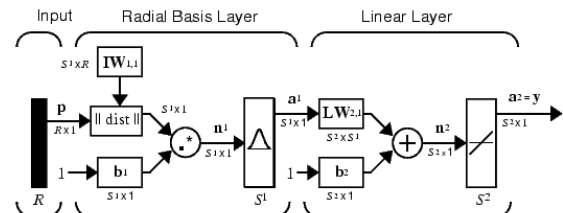
Stosowanie numerycznych metod analizy sygnału a następnie wysnuwanie wniosków sygnału zawsze stanowiło poważne wyzwanie dla naukowców. Jedną z metod wnioskowania jest zastosowanie sztucznej sieci neuronowej (SSN). Aby SSN poprawnie działała najpierw musi zostać wytrenowana, czyli nauczona. Trenowanie SSN polega na podaniu sygnału wejściowego oraz oczekiwanej odpowiedzi. W procesie trenowania SSN następuje optymalizacja wag w neuronie, aby wyjście odpowiadało oczekiwanej odpowiedzi. Proces uczenia sieci neuronowych RBF jest opisany w [2]. Celem stosowania SSN jest automatyzacja procesu diagnozowania stanu uszkodzenia maszyny.

W przedstawionych w tym artykule badaniach do oceny stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana zastosowano sztuczną sieć neuronową o radialnej funkcji bazowej. Struktura sieci oparta jest o dwie warstwy. W pierwszej ukrytej warstwie znajdują się neurony o radialnej funkcji aktywacji następującej postaci

$$\text{radbas}(n) = e^{-n^2} \quad (2)$$

Drużga warstwa zawiera neurony o liniowej funkcji aktywacji. Strukturę sztucznej sieci neuronowej wykorzystującą radialną funkcję bazową przedstawiono na Rys.6 [5].

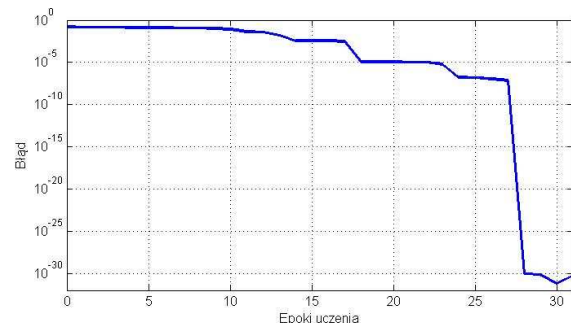
Zastosowanie radialnej sieci neuronowej w diagnostyce maszyn indukcyjnych o uszkodzonym wirniku przedstawiono w [2].



Rys.6. Struktura radialnej sieci neuronowej

#### 5. Wybrane wyniki badań

Do badań wybrano trójfazowy silnik indukcyjny klatkowy o następujących danych znamionowych:  $P_N=2,2$  kW,  $n_N=1420$  obr/min. Obciążeniem silnika był hamulec wiroprądowy. Pomiar prędkości obrotowej oraz momentu został zrealizowany za pomocą wałka skrętnego. Na podstawie pomiarów zgromadzono 47 próbek, które następnie utworzyły wektor wejściowy SSN wykorzystany do uczenia i testowania skuteczności sieci. Wektor wejściowy składał się z następujących danych: (a) wartości skutecznych prądów fazowych wszystkich faz oraz (b) wartości skutecznej napięcia wyindukowanego w cewce pomiarowej. Można stwierdzić, że SSN posiadała cztery wejścia, tzn. trzy prądy fazowe oraz napięcie na cewce. Natomiast wektor wyjściowy SSN składał się z rezystancji fazowych, zatem SSN miała trzy wyjścia.



Rys.7. Przebieg procesu uczenia

W procesie inicjującym, przed rozpoczęciem procesu uczenia, wagom zostają przypisane wartości losowe. Zatem przebieg procesu uczenia jest za każdym razem inny.

Przykładowy przebieg procesu uczenia SSN przedstawiono na rysunku 7.

Wytrenowaną SSN przetestowano zbiorem siedmiu próbek, które nie brały udziału w trenowaniu sieci. Wyniki testowania SSN przedstawiono w Tabeli 1.

Tabela. 1. Testowanie wytrenowanej SSN

Lp.	Wartość oczekiwana			Odpowiedź SSN		
	Faza U	Faza V	Faza W	Faza U	Faza V	Faza W
1.	1,35	2,70	2,65	2,65	2,70	2,65
2.	2,65	2,05	2,65	2,26	2,70	2,65
3.	2,65	1,40	2,65	2,65	2,70	2,65
4.	2,65	2,70	1,30	2,46	1,88	2,65
5.	2,35	2,70	1,30	2,65	2,70	2,65

Różnica pomiędzy wartością oczekiwaną a odpowiedzią SSN była miarą skuteczności nauczania się SSN. Błąd detekcji uszkodzeń zdefiniowano, jako różnicę pomiędzy rzeczywistą rezystancją fazową a odpowiedzią sieci. Wyniki przedstawiono w Tabeli 2. Im SSN jest lepiej wytrenowana tym te różnice są mniejsze. W idealnym przypadku, tzn. idealnie wytrenowanej sieci, różnica będzie równa zero.

Tabela. 2. Błąd odpowiedzi wytrenowanej SSN

Lp.	Błąd		
	Faza U	Faza V	Faza W
1.	-1,30	0,00	0,00
2.	0,39	-0,65	0,00
3.	0,00	-1,30	0,00
4.	0,19	0,82	-1,35
5.	-0,30	0,00	-1,35

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że opracowana SSN jest w stanie określić uszkodzenia wewnątrz maszyny tylko w nielicznych przypadkach.

## 6. Podsumowanie

W artykule przedstawiono propozycję zastosowania strumienia osiowego oraz prądu fazowego do diagnozowania uszkodzeń uzwojenia stojana maszyny indukcyjnej klatkowej. Wnioskowanie zrealizowano za pomocą sztucznej sieci neuronowej. Na podstawie otrzymanych wyników badań można stwierdzić, że wykorzystując wartość strumienia osiowego można określić stan uzwojenia stojana. Powierzenie roli detektora uszkodzeń sztucznej sieci neuronowej nie daje precyzyjnych wyników. Ponadto takie podejście ma wadę, ponieważ wymaga stworzenia bazy wiedzy o rodzajach uszkodzeń maszyny oraz ich wpływie na dany typ maszyny. Oznacza to wykonanie szeregu testów maszyny.

## Literatura

- [1] Intesar A., Manzar A., *Comparison of Stator Current, Axial leakage Flux and Instantaneous Power to Detect Broken Rotor Bar Faults in Induction Machines*. 2008 Australasian Universities Power Engineering Conference.
- [2] Kamiński M., Orłowska-Kowalska T., Kowalski Cz. T., *Zastosowanie radialnych sieci neuronowych w detekcji uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego*, Politechnika Wroclawska, Wrocław Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 84/2009.
- [3] Acosta G.G., Verucchi C.J., Gelso E.R., *A current monitoring system for diagnosing electrical failures in induction motors*, Elsevier Mechanical Systems and Signal Processing 20 (2006), pp. 953–965.
- [4] Bacha K., Henaob H., Gossa M., Capolino G.-A., *Induction machine fault detection using stray flux EMF measurement and neural network-based decision*, Elsevier Electric Power Systems Research 78 (2008), pp. 1247–1255.
- [5] Matlab, Neural Network Toolbox, ver. 2008a.

## Autor

Dr inż., Wojciech Pietrowski, Instytut Elektrotechniki i Elektroniki Przemysłowej, Politechnika Poznańska, ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań, Tel. 61 665 2396, e-mail: wojciech.pietrowski@put.poznan.pl.

## Recenzent

Prof. dr hab. inż. Czesław T. Kowalski