

*silnik indukcyjny, uszkodzenia uzwojenia stojana,
przesunięcie kątowe, diagnostyka, detektor neuronowy*

Marcin WOLKIEWICZ*
Czesław T. KOWALSKI*

ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH DO WYKRYWANIA I LOKALIZACJI ZWARĆ ZWOJOWYCH SILNIKA INDUKCYJNEGO ZASILANEGO Z PRZEKSZTAŁNIKA CZĘSTOTLIWOŚCI

W artykule przedstawiono możliwości zastosowania sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego zasilanego z przemiennika częstotliwości na podstawie analizy przesunięcia kąowego pomiędzy prądami stojana w poszczególnych fazach silnika oraz obliczonych na jej podstawie wskaźników uszkodzenia uzwojenia. Omówiono realizację w LabVIEW wirtualnego przyrządu pomiarowo-diagnostycznego do wykrywania i lokalizacji zwarców zwojowych silnika indukcyjnego, bazującego na zaproponowanych wskaźnikach uszkodzenia. Sprawdzono również możliwości wykrywania uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego za pomocą neuronowego detektora, w możliwie wczesnej fazie powstania uszkodzenia.

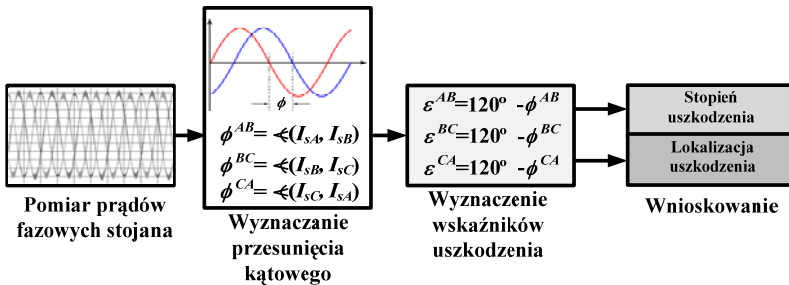
1. WSTĘP

W badaniach przedstawionych w [1] oraz w [2] wykazano, że zwarcia zwojowe oprócz niewielkich zmian amplitudy prądów fazowych silnika indukcyjnego, powodują również zmiany w wartościach przesunięć fazowych pomiędzy prądem i napięciem stojana. Możliwe jest również wykorzystanie do monitorowania stanu uzwojeń stojana przesunięć kątowych pomiędzy prądami fazowymi w poszczególnych fazach [4], [5]. Badania przedstawione w [2] wykazały również możliwość wykorzystania analizy przesunięć kątowych do lokalizacji zwarcia zwojowego (określenie, w której fazie silnika nastąpiło zwarcie). Do realizacji diagnostyki uzwojeń stojana na podstawie analizy przesunięć kątowych niezbędne jest wprowadzenie odpowiednich wskaźników uszkodzenia uzwojenia stojana, które ułatwiają ocenę stanu uzwojeń.

* Politechnika Wroclawska, Wydział Elektryczny, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, marcin.wolkiewicz@pwr.wroc.pl, czeslaw.t.kowalski@pwr.wroc.pl

W artykule została omówiona metoda wykrywania i lokalizacji zwarć zwojowych na podstawie przesunięć kątowych między prądami fazowymi.

Na rysunku 1 przedstawiono etapy przetwarzania informacji diagnostycznej przy wykorzystaniu metody opartej na analizie przesunięcia kąтового, do monitorowania stanu uzwojeń stojana. Pierwszy etap to pomiar prądów fazowych stojana, oraz ich wstępne przetwarzanie. Kolejnym etapem jest wyznaczenie przesunięć kątowych pomiędzy prądami fazowymi. W tym celu wykorzystano dostępne w środowisku LabVIEW bloki funkcyjne (Extract_Single_Tone_Information.vi). Kolejny etap to wyznaczenie dla obliczonych przesunięć kątowych odpowiednio zdefiniowanych wskaźników uszkodzenia uzwojenia stojana ε^{AB} , ε^{BC} , ε^{CB} . Ostatnim etapem jest wnioskowanie o stanie uzwojenia stojana, a w przypadku wykrycia uszkodzenia ocena jego stopnia oraz lokalizacji.



Rys. 1. Etapy przetwarzania informacji diagnostycznej z wykorzystaniem analizy przesunięcia kąowego pomiędzy prądami fazowymi do monitorowania stanu uzwojeń stojana

Fig. 1. Steps of information processing using phase shift between the stator phase current analysis of diagnostic analysis for stator windings monitoring

2. MONITOROWANIE STANU UZWOJEŃ STOJANA PRZEZ OBSERWACJĘ PRZESUNIĘCIA KĄTOWEGO POMIĘDZY PRĄDAMI STOJANA

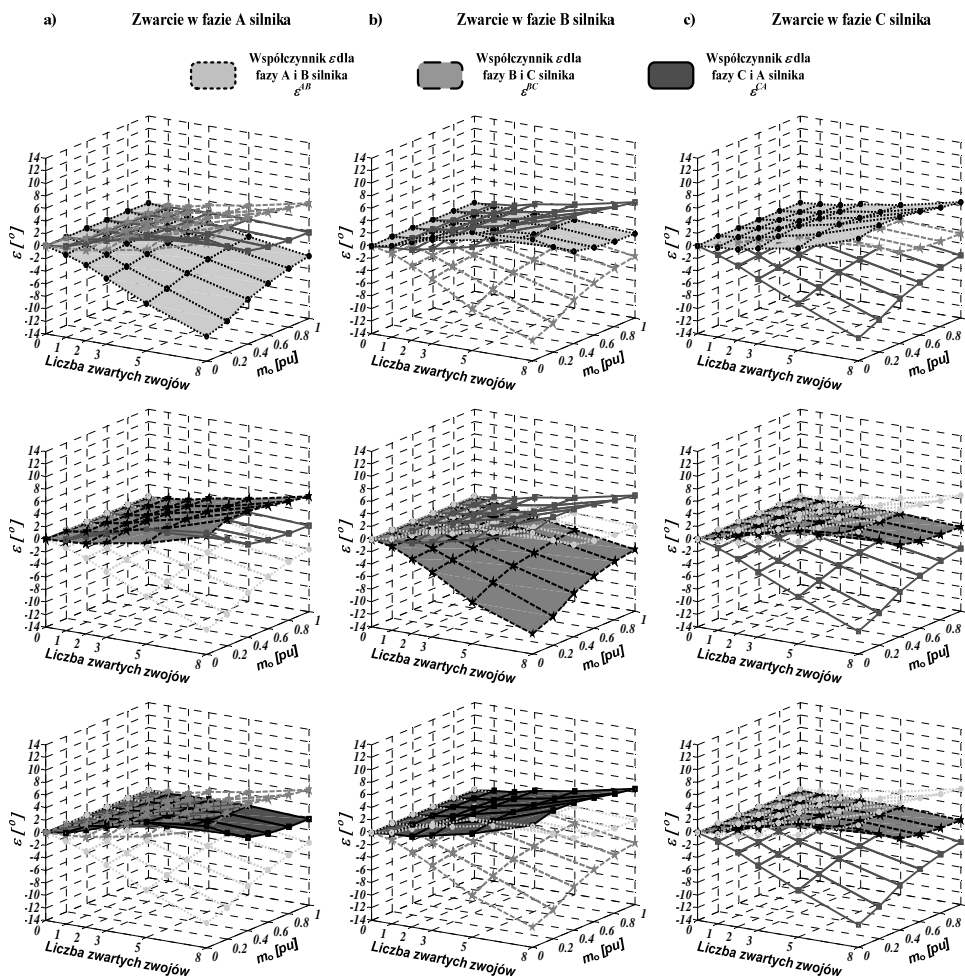
W przypadku pomiarów prądów fazowych stojana możliwe jest wyznaczenie przesunięć kątowych pomiędzy prądami w poszczególnych fazach.

Dla silnika symetrycznego i nieuszkodzonego przesunięcie kątowe pomiędzy prądami fazowymi stojana jest równe 120° . Do celów diagnostyki zwarć zwojowych, zdefiniowano wielkości określające stopień uszkodzenia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego, oznaczone w następujący sposób:

$$\begin{aligned} \varepsilon_k^{AB} &= 120^\circ - \varphi_k^{AB}, \\ \varepsilon_k^{BC} &= 120^\circ - \varphi_k^{BC}, \\ \varepsilon_k^{CA} &= 120^\circ - \varphi_k^{CA}, \end{aligned} \quad (1)$$

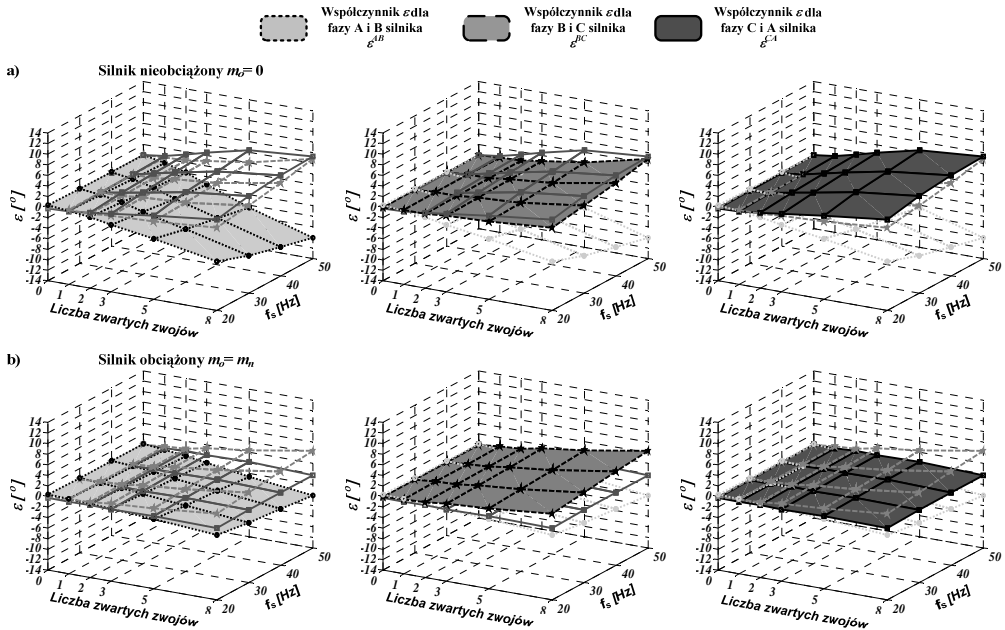
gdzie:

- $k = 0, 1, 2, 3, 5, 8$ – liczba zwojów zwartych,
 $\varepsilon^{AB}, \varepsilon^{BC}, \varepsilon^{CA}$ – wskaźnik zmian przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi wyrażony w $[\circ]$,
 $\varphi^{AB}, \varphi^{BC}, \varphi^{CA}$ – przesunięcie kąowe pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi wyrażone w $[\circ]$.



Rys. 2. Zmiany przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi fazami prądu stojana w zależności od liczby zwojów zwartych w uzwojeniu fazowym stojana oraz zmian momentu obciążenia, przy zasilaniu z prądu przemiennego częstotliwości $f_s = 50\text{Hz}$, dla: a) zwarcia w fazie A, b) zwarcia w fazie B, c) zwarcia w fazie C

Fig. 2. Change of phase shift between the stator phase current depending on the number of shorted turns in A motor phase and different load level for stator faults in: a) phase A, b) phase B, c) phase C



Rys. 3. Zmiany przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi fazami prądu stojana w zależności od liczby zwojów zwartych w uzwojeniu fazowym A stojana oraz zmian częstotliwości napięcia zasilania dla momentu obciążenia: a) $m_o = 0$, b) $m_o = m_n$
 Fig. 3. Change of phase shift between the stator phase current depending on the number of shorted turns in A motor phase and different supply frequency for: a) $m_o = 0$, b) $m_o = m_n$

Przy zasilaniu silnika z przemiennika częstotliwości dla $f_s = 50$ Hz zapewniona jest symetria napięcia zasilania w każdej z faz silnika. Początkowa wartość wskaźnika zmian przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi ε jest równa zero (rys. 2). Wraz ze zwiększaniem liczby zwojów zwartych zmienia się przesunięcie kąowe między odpowiednimi fazami. Charakter zmian wskaźnika zmian przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi ε umożliwia, oprócz badania stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana również dokładne określenie jego lokalizacji. Największa zmiana wskaźnika ε przy zwarceniu w fazie A widoczna jest pomiędzy fazami A i B ε^{AB} (rys. 2a), przy zwarceniu w fazie B widoczna jest pomiędzy fazami B i C ε^{BC} (rys. 2b), przy zwarceniu w fazie C widoczna jest pomiędzy fazami C i A ε^{CA} (rys. 2c). W pozostałych przypadkach zakres zmian przesunięcia kąowego pomiędzy poszczególnymi prądami fazowymi jest dużo mniejszy. Ponadto wraz ze wzrostem obciążenia silnika intensywność zmian ε pod wpływem zwarc zwojowych bardzo maleje.

Na rysunku 3 przedstawiono zmiany wskaźnika ε w zależności od liczby zwartych zwojów w fazie A silnika dla różnych wartości częstotliwości zasilania dla silnika nieobciążonego, $m_o = 0$ (rys. 3a) oraz silnika obciążonego momentem znamionowym

$m_o = m_n$ (rys. 3b). Podobnie jak w przypadku wpływu momentu obciążenia widoczny jest duży wpływ wartości częstotliwości napięcia zasilania f_s na intensywność zmian wskaźnika ε w poszczególnych fazach silnika. Im mniejsza wartość częstotliwości napięcia zasilania tym zakres zmian ε spowodowanych zwarciami zwojowymi w każdej z faz jest mniejszy. Jednak jak wykazały badania przy zasilaniu silnika z przemiennika częstotliwości możliwe jest wykrycie uszkodzenia uzwojenia stojana przy zwarcu 1–2 zwojów (poniżej 1% całego uzwojenia).

3. ZASTOSOWANIE SIECI NEURONOWYCH W DIAGNOSTYCE UZWOJEŃ STOJANA

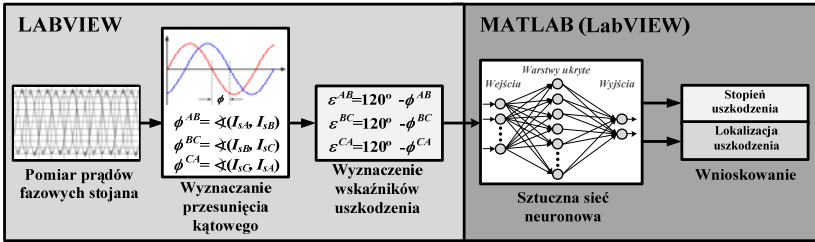
Wstępne badania detektorów uszkodzeń dotyczyły testów symulacyjnych (offline), przy wykorzystaniu oprogramowania *Neural Network Toolbox* stanowiącego integralną część pakietu MATLAB. Badania dotyczyły jednokierunkowych sieci neuronowych celem wybrania sieci o możliwie małej strukturze (liczbie neuronów w warstwie ukrytej) oraz najwyższej skuteczności diagnozowania. Wektory uczący i testujący zostały sporządzone na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań eksperymentalnych silnika rzeczywistego z uszkodzonym uzwojeniem stojana. Zawierają one charakterystyczne symptomy uszkodzenia odpowiadające różnym wariantom uszkodzenia uzwojenia stojana.

Zbadano sieci o różnych topologiach, zmieniając kolejno liczbę neuronów w warstwie ukrytej (5÷25). Każda struktura sieci była testowana 10 razy. Jako wskaźnik oceny działania sieci przyjęto skuteczność obliczoną jako procentowa poprawność odpowiedzi sieci na sygnał wejściowy. Dodatkowo założono, że maksymalna różnica pomiędzy spodziewaną, a faktyczną odpowiedzią sieci nie może być większa niż 2 zwarte zwoje.

W dalszej części badania detektorów uszkodzeń podjęto próbę realizacji technicznej neuronowego detektora uszkodzeń uzwojeń stojana silnika indukcyjnego pracującego w czasie rzeczywistym. Neuronowy detektor zwarc zwojów został zrealizowany w środowisku LabVIEW jako uzupełnienie wirtualnych przyrządów pomiarowo-diagnostycznych. Jego zadaniem było wnioskowanie na temat stanu uzwojeń stojana: określenie stopnia uszkodzenia stojana (podanie szacunkowej liczby zwartych zwojów) oraz dodatkowo wskazanie fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenie.

Do realizacji detektora zwarc zwojowych wykorzystano dane otrzymane z analizy przesunięcia kąтового pomiędzy prądami fazowymi, tzn. wskaźników uszkodzenia uzwojenia stojana ε^{AB} , ε^{BC} , ε^{CA} oraz wartości częstotliwości napięcia zasilania i wartości skutecznej prądu w fazie A silnika. Dane te stanowiły zbiór do uczenia i testowania sieci. Na wyjściu sieci zastosowano 2 neurony, na wyjściu których oczekiwano odpowiedzi w postaci stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana (liczby zwartych zwojów w jednej fazie silnika) oraz lokalizacji uszkodzenia (fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenie).

Na rysunku 4 przedstawiono strukturę blokową neuronowego detektora zwarców zwojowych.



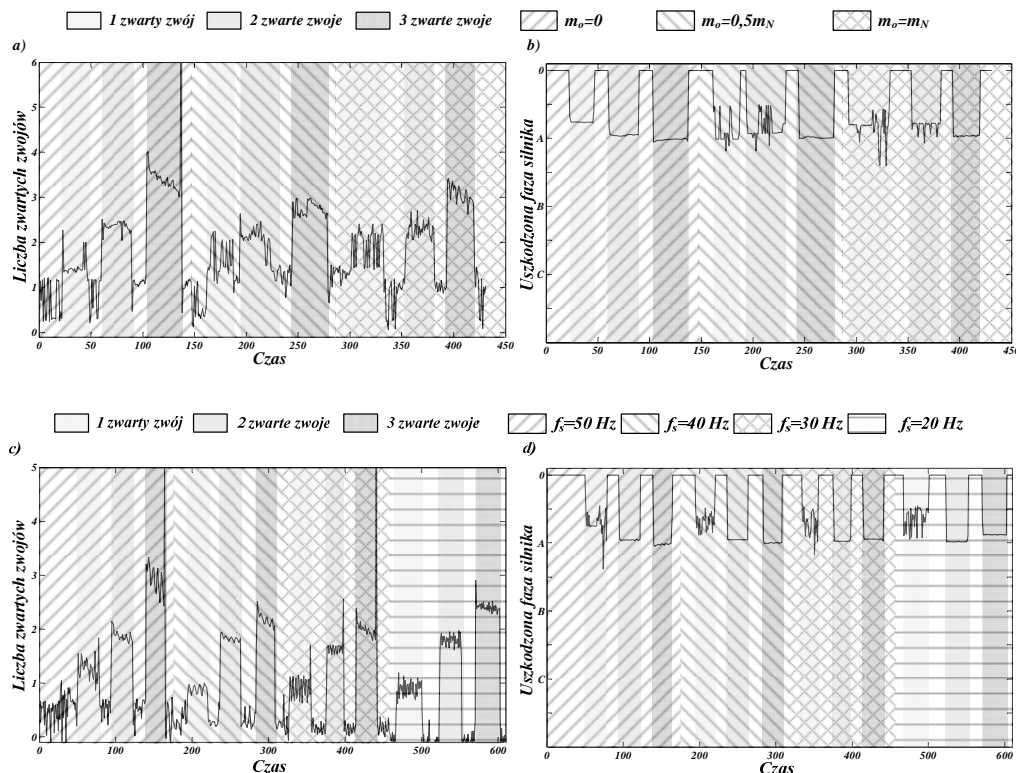
Rys. 4. Neuronowy detektor zwarców zwojowych wykorzystujący metodę analizy przesunięcia kąowego pomiędzy prądami fazowymi stojana
 Fig. 4. Stator windings fault neural detector based on the phase shift analysis between the stator phase currents

Spośród wielu przebadanych struktur najlepszą okazała się sieć o strukturze {5-19-2}, która uzyskała średnią skuteczność z 10 powtórzeń na poziomie 83,0%.

Maksymalna skuteczność zaproponowanej sieci neuronowej podczas testów symulacyjnych stopnia uszkodzenia stojana oceniono na 89,8%, przy czym maksymalny błąd wynosił 1 zwarty zwoj, natomiast przy określaniu lokalizacji uszkodzenia oceniono na około 97,2%. Zaproponowana struktura sieci bezbłędnie rozpoznaje przypadki silnika uszkodzonego i nieuszkodzonego. Pojedyncze błędne wskazania (o maksymalnie 1 zwarty zwoj) widoczne są dopiero przy większym uszkodzeniu stojana i z praktycznego punktu widzenia nie mają większego znaczenia.

Sprawdzony w testach symulacyjnych neuronowy detektor uszkodzeń o strukturze {5-19-2} został zaimplementowany do pracy on-line na obiekcie rzeczywistym. Część MATLAB, na rysunku 4, zastąpiono przez programową realizację sieci neuronowej w środowisku LabVIEW.

Rysunek 5 przedstawia wpływ obciążenia silnika (rys. 5a, b) oraz częstotliwości napięcia zasilania (rys. 5c, d) na wykrywalność uszkodzenia uzwojenia stojana modelowanego fizycznie w fazie A silnika. Wzrost momentu obciążenia silnika ($m_o = 0 \div m_n$) ma niewielki wpływ na wykrywalność zwarców zwojowych (rys. 5a, b). Powoduje zwiększenie oscylacje odpowiedzi detektora, przy określaniu stopnia uszkodzenia uzwojenia stojana. Możliwe jest wykrycie 1 zwartego zwoju przy pełnym obciążeniu silnika oraz bezbłędne wskazanie fazy silnika (rys. 5a), w której wystąpiło uszkodzenie (rys. 5b). Zmiana f_s w przedziale od 50 Hz do 20 Hz ma niewielki wpływ na wykrywalność liczby zwojów zwartych (rys. 5c, d). Wpływ ten jest zauważalny szczególnie przy niskich wartościach częstotliwości napięcia zasilania, gdzie powstają niewielkie oscylacje w odpowiedzi detektora. Jednak możliwe jest wykrycie nawet 1 zwoju zwartego w każdej z faz silnika (rys. 5c) oraz bezbłędne wskazanie lokalizacji uszkodzenia (rys. 5d).



Rys. 5. Odpowiedzi neuronowego detektora uszkodzeń uzwojeń stojana {5-19-2} pracującego on-line przy fizycznym modelowaniu zwarć zwojowych fazy A silnika przy: a) ,b) różnym obciążeniu maszyny dla $f_s = 50$ Hz i c) ,d) przy różnej wartości częstotliwości napięcia zasilania dla $m_o = 0$:

a) ,c) określanie stopnia uszkodzenia b) ,d) lokalizacja uszkodzenia

Fig. 5. Response of on-line stator windings fault neurodetector {5-19-2} on the shorted turns in A motor phase at: a) ,b) different values of load machine for $f_s = 50$ Hz and c) ,d) different values of supply voltage frequency for $m_o = 0$: a) the level of damage b) the location of damage

5. PODSUMOWANIE

W artykule przedstawiono skuteczną metodę detekcji i lokalizacji zwarć zwojowych w uzwojeniu stojana SI zasilanego z przemiennika częstotliwości, opartą na analizie przesunięć kątowych pomiędzy prądami stojana w odpowiednich fazach silnika. Nieskomplikowany i bardzo szybki proces obliczania przesunięć kątowych jest alternatywą dla stosowanych obecnie metod diagnostycznych wykorzystujących, np. analizę widmową prądów fazowych stojana. Analiza wartości przesunięć kątowych oraz wskaźników ε^{AB} , ε^{BC} , ε^{CA} umożliwia zarówno ocenę stanu uzwojenia stojana (wy-

krycie liczby zwartych zwojów) oraz lokalizację uszkodzenia (wskazanie fazy silnika, w której wystąpiło uszkodzenia).

Przedstawiono neuronowy system diagnostyczny realizujący pomiar, ekstrakcję symptomów uszkodzeń (z wykorzystaniem przesunięć kątowych pomiędzy prądami fazowymi stojana) oraz detekcję i lokalizację zwarć zwojowych za pomocą sieci neuronowych. Uzyskano bardzo wysoką skuteczność w wykrywaniu oraz lokalizacji zwarć zwojowych we wczesnej fazie.

Praca naukowa finansowana ze środków Narodowego Centrum Nauki w ramach projektu N N510 637340.

LITERATURA

- [1] BOUZID M.B.K., CHAMPENOIS G., BELLAJ N.M., SIGNAC L., JELASSI K., *An Effective Neural Approach for the Automatic Location of Stator Interturn Faults in Induction Motor*, IEEE Transactions On Industrial Electronics, Vol. 55, No. 12, December 2008, pp. 4277–4289.
- [2] KOWALSKI C.T., WOLKIEWICZ M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Experimental verification of the inter-turn fault symptoms modeling for the converter-fed induction motor*, 10th International Conference on Modeling and Simulation of Electric Machines, Converters and System, Electri-macs 2011, pp. 1–6.
- [3] KOWALSKI C.T., WIERZBICKI R., WOLKIEWICZ M., *Analiza wpływu uszkodzenia uzwojenia stojana silnika indukcyjnego na kąt przesunięcia fazowego pomiędzy prądem i napięciem*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Studia i Materiały, nr 29, 2009, s. 252–260.
- [4] WOLKIEWICZ M., KOWALSKI C.T., *Nieinwazyjne metody wczesnego wykrywania zwarć zwojowych w silniku indukcyjnym zasilanym z przemiennika częstotliwości*, cz. I, Maszyny Elektryczne, Zeszyty Problemowe, 2010, nr 87, s. 145–150.
- [5] XU BOQIANG, LI HEMING, SUN LILING, *Apparent impedance angle based detection of stator winding inter-turn short circuit fault in induction motors*, Industry Applications Conference, 38th IAS Annual Meeting, Vol. 2, 2003, pp. 1118–1125.

APPLICATION OF NEURAL NETWORKS FOR DETECTION AND LOCALIZATION INDUCTION MOTOR STATOR WINDING FAULTS FED BY FREQUENCY CONVERTER

In this paper problem of the early induction motors stator faults (the short-circuits) detection and localization supplied from the frequency converter is presented. The method based on the phase shift between stator phase currents is used for the monitoring of the stator winding condition. The special fault location indicator was introduced. The virtual measurement-diagnostic system has been developed implemented in LabVIEW. Possibility of early stator winding fault detection using neural detector is also checked.