

*DFOC, napęd elektryczny,
sterowanie wektorowe, silnik indukcyjny,
sieci neuronowe, uszkodzenia wirnika, detektor*

Mateusz DYBKOWSKI*

WYKORZYSTANIE SZTUCZNYCH SIECI NEUROOWYCH DO DIAGNOSTYKI WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO W UKŁADZIE STEROWANIA POŁOWO-ZORIENTOWANEGO

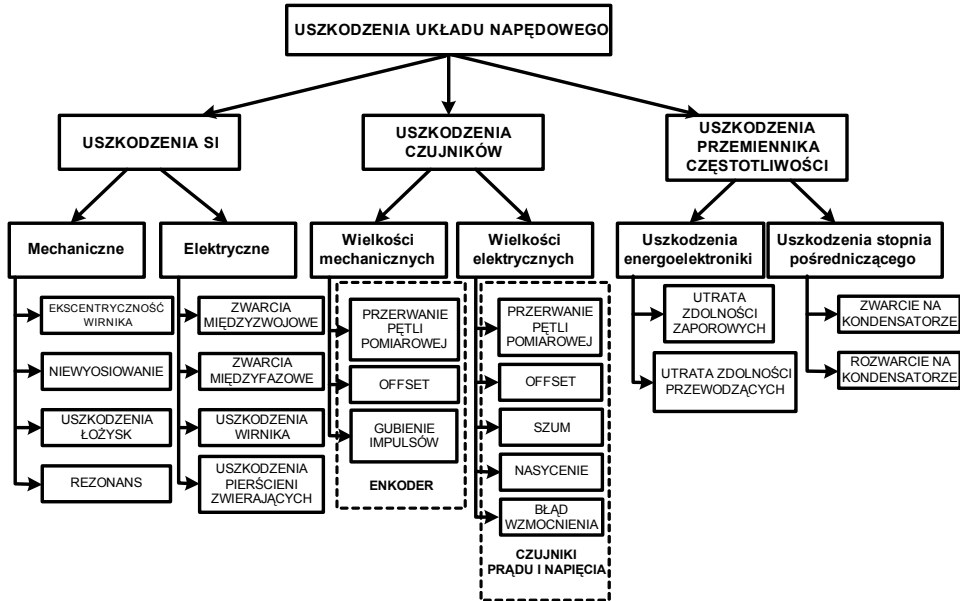
W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego w strukturze sterowania połowo-zorientowanego DFOC. Sprawdzono i opisano wpływ uszkodzenia prętów klatki wirnika na przebiegi wybranych zmiennych stanu napędu, wyznaczono charakterystykę zmienności częstotliwości uszkodzeniowej w funkcji prędkości i momentu silnika. Wykonano detektor bazujący na teorii sztucznych sieci neuronowych i sprawdzono go w różnych warunkach pracy.

1. WPROWADZENIE

Kompletny układ napędowy, składający się z silnika indukcyjnego, układu zasilania i energoelektroniki, części mechanicznej, wykonawczej oraz układów sprzęgających jest narażony na wystąpienie awarii, które mogą mieć różne skutki dla użytkownika [1], [2], [6]. W czasie normalnej pracy w silniku jest zachowana równowaga między działającymi siłami, znikająca w chwili pojawienia się uszkodzenia. Aby zapewnić ciągłość pracy każdego napędu elektrycznego z minimalnymi kosztami związanymi z przestojami linii produkcyjnych, konieczne jest ciągle monitorowanie stanu technicznego napędu z możliwie wczesnym wykrywaniem wszelkich uszkodzeń [1].

Na rysunku 1 przedstawiono przyczyny powstawania uszkodzeń układu napędowego. Wyróżniono trzy podstawowe uszkodzenia: silnika indukcyjnego, czujników pomiarowych i układu przemiennika częstotliwości [1], [2].

* Politechnika Wroclawska, Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, ul Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, e-mail: mateusz.dybkowski@pwr.edu.pl



Rys. 1. Podział uszkodzeń układu napędowego z przeksztalnikowym układem napędowym z silnikiem indukcyjnym [2], [6]

Wszystkie te uszkodzenia wywołują zjawiska elektryczne, magnetyczne, wibroakustyczne oraz ciepłe [6]. Mają one znaczenie w pracy kompletnego układu napędowego, a niekiedy powodują, że praca napędu jest niemożliwa. Skutki uszkodzenia czujników pomiarowych mogą być różne i zależą od rodzaju awarii i układu, który został uszkodzony.

Ważną zaletą silników indukcyjnych, której w dużej mierze zawdzięczają dużą popularność, jest możliwość ich dalszej pracy mimo niewielkiego uszkodzenia klatki wirnika [3]. Nie oznacza to jednak, że uszkodzenie chociażby jednego pręta nie powoduje powstania niekorzystnych zjawisk w maszynie elektrycznej i całym układzie napędowym [4]. Uszkodzenie pręta klatki wirnika wydłuża czas rozruchu silnika, zmniejsza moment obrotowy, zwiększa wartość prądu stojana i wirnika oraz powoduje powstanie naciągu magnetycznego. Długi czas rozruchu oznacza wzrost temperatury wirnika i może prowadzić do dalszej degradacji jego uzwojenia, zwłaszcza w silnikach dużej mocy. Możliwość generowania przez układ mniejszego momentu elektromagnetycznego pod tym samym obciążeniem powoduje wzrost poślizgu maszyny. Prąd silnika zostaje zmodulowany podwojoną częstotliwością prądów wirnika. Pojawiające się zjawiska są widoczne w widmie częstotliwościowym i przebiegu modułu wektora przestrzennego prądu.

Można zauważyć, że w silniku z uszkodzonym prętem klatki wirnika zmienia się rozkład prądów w wirniku, powodując znaczny wzrost wartości prądów w prętach

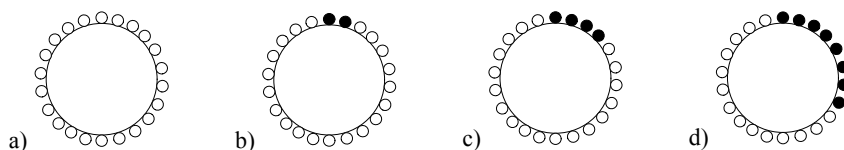
sąsiadujących z prętym uszkodzonym. Efektem jest bardzo duże obciążenie termiczne prętów i dalsza degradacja wirnika [3].

Uszkodzenie pojedynczych prętów nie daje zauważalnych symptomów na zewnątrz maszyny i jest bardzo trudne do wykrycia przez obsługę. Dlatego układy sterowania i estymacji niedostępnych zmiennych stanu powinny być jak najbardziej odporne na uszkodzenia wirnika. Istotne jest także, aby nowoczesne napędy były wyposażane w systemy diagnostyczne wykrywające pojawienie się takiej awarii [3], [4], [5].

W niniejszym artykule skupiono się na analizie pracy układu napędowego sterowanego metodą wektorową DFOC podczas wystąpienia uszkodzenia prętów klatki wirnika oraz sprawdzono możliwości wykrywania takich awarii przy wykorzystaniu sztucznych sieci neuronowych. Dokonano analizy zmiennych stanu w układzie z pomiarem wszystkich sygnałów.

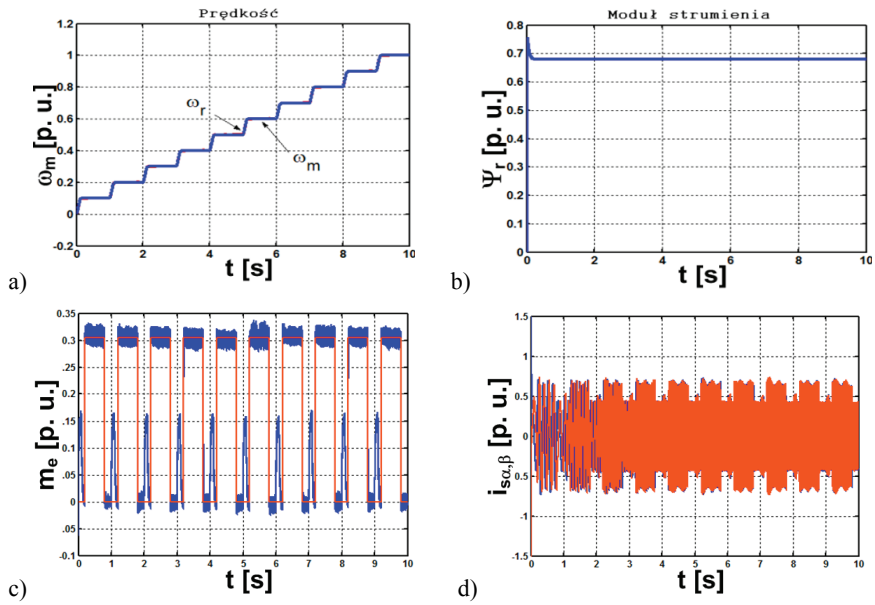
2. WPŁYW USZKODZENIA WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO NA PRACĘ NAPĘDU STEROWANEGO METODĄ WEKTOROWĄ DFOC

W trakcie badań modelowano uszkodzenia wirnika przez całkowite przerwanie pręta wirnika. Badany silnik miał 22 pręty w klatce, maksymalna liczba uszkodzonych prętów wynosiła 8. Uszkodzenia dotyczyły tylko sąsiednich prętów wirnika. Schemat sposobu lokalizacji uszkodzonych prętów przedstawiono na rys. 2. Szczegółowy model matematyczny silnika z uszkodzonym wirnikiem oraz jego analizę przedstawiono w pracach [3], [4].

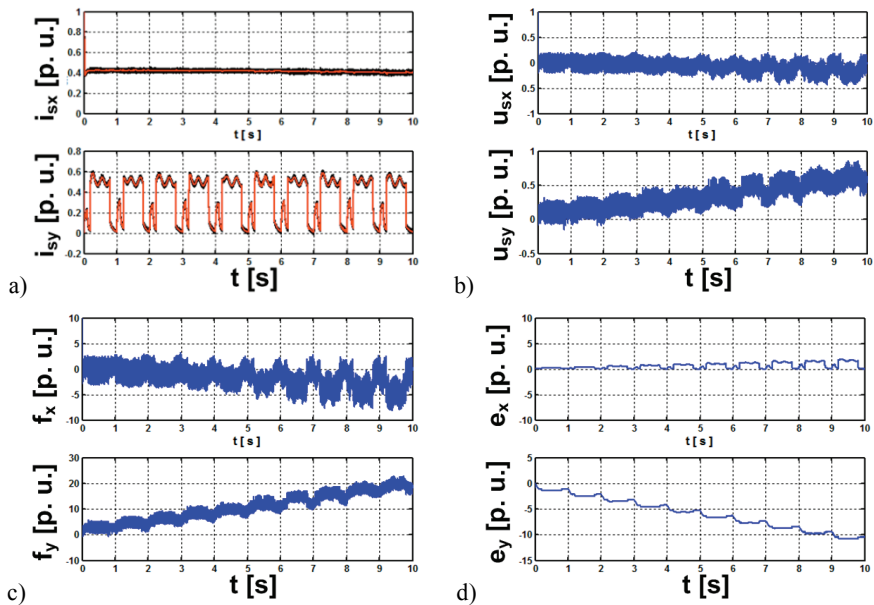


Rys. 2. Sposoby rozmieszczenia uszkodzeń poszczególnych prętów wirnika:
a) wirnik zdrowy, b) uszkodzone 2 pręty, c) uszkodzone 4 pręty, d) uszkodzonych 8 prętów

Podczas testów przedstawionych na rys. 3 i 4 wartość zadana prędkości kątowej była kształtowana w taki sposób aby możliwe było sprawdzenie zachowania się układu w różnych warunkach pracy. Przedstawiono przebiegi zmiennych stanu układu napędowego z silnikiem indukcyjnym z uszkodzonymi 8 prętami klatki wirnika (układ z pomiarem prędkości kątowej). Na rysunku 3 widoczne są oscylacje momentu elektromagnetycznego SI oraz mierzonego prądu stojana. Prędkość kątowa i moduł strumienia wirnika także ulega odkształceniom związanym z uszkodzeniem wirnika.



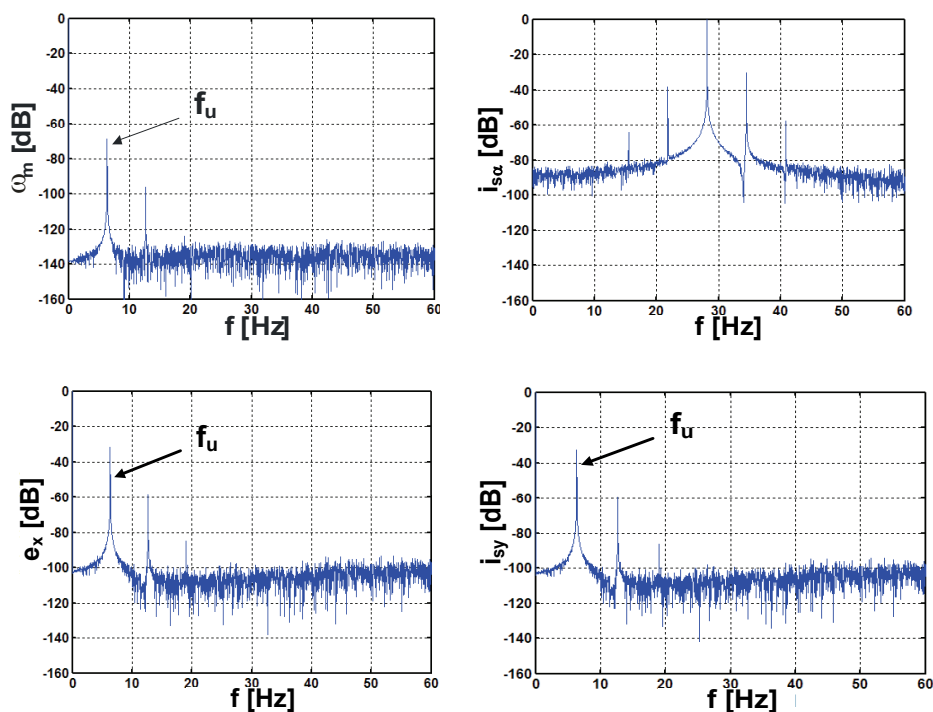
Rys. 3. Przebiegi prędkości kątowej (a), modułu strumienia wirnika (b), momentu elektromagnetycznego (c) oraz prądu stojana (d) w układzie wektorowego sterowania SI z uszkodzonymi 8 prętami, $m_o = 0,5m_N$



Rys. 4. Przebiegi składowych prądu stojana (a), napięcia stojana (b), sygnałów f_x, f_y (c) oraz sygnałów e_x i e_y (d) w układzie wektorowego sterowania SI z uszkodzonymi 8 prętami, $m_o = 0,5m_N$

Na rysunku 4 widoczne są oscylacje składowych prądu stojana (przede wszystkim składowej i_{sy}) oraz sygnałów napięcia stojana, sygnałów f_x, f_y oraz e_x i e_y . Istotną cechą widocznych oscylacji jest to, że ich częstotliwość nie zależy od zadawanej prędkości kątowej. Decyduje o niej stopień uszkodzenia wirnika i aktualny moment obciążenia SI [4].

Na rysunku 5 przedstawiono analizę FFT wybranych przebiegów z układu wektorowego sterowania.



Rys. 5. Widmo FFT wybranych sygnałów ze struktury DFOC z uszkodzonymi 2 prętami, $m_o = m_N$

Analiza widmowa umożliwiła jednoznaczne wskazanie tych sygnałów, które mogą być wykorzystane w procesie wyznaczania stopnia uszkodzenia wirnika. Ich szczegółową analizę przedstawiono w pracy [6]. Wielkościami, w których najwyraźniej widoczna jest częstotliwość uszkodzeniowa (f_u) są: prędkość kątowa ω_m , moduł strumienia wirnika Ψ_r , składowe e_x, e_y , składowe prądu stojana i_{sx}, i_{sy} oraz napięcia sterujące u_{sx} i u_{sy} [6]. Wszystkie te sygnały zawierają informację o stopniu uszkodzenia wirnika, jednak nie we wszystkich da się w łatwy sposób uzyskać o nich informację

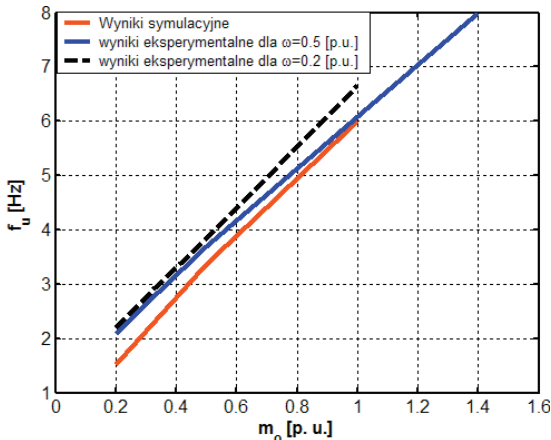
bez użycia transformaty Fouriera. Sygnałami, które pozwalają jednoznacznie ocenić stan maszyny on-line z wykorzystaniem np. sztucznych sieci neuronowych lub prostych metod numerycznych, są: składowe e_x , e_y , składowe prądu stojana i_{sx} , i_{sy} oraz moduł strumienia wirnika i mierzona (lub estymowana) prędkość kątowna. Tak duża liczba wielkości zawierających dane o stopniu uszkodzenia daje pewność, że algorytm umożliwi szybkie wykrycie uszkodzenia wirnika we wczesnym stadium jego wystąpienia.

W tabeli 1 przedstawiono zależność częstotliwości uszkodzeniowej od aktualnego momentu obciążenia [5], [6]. Można zaobserwować, że częstotliwość uszkodzeniowa f_u maleje wraz ze zmniejszaniem momentu obciążenia. Nie zależy ona od aktualnej wartości prędkości kątowej, co może mieć bardzo duże znaczenie w napędach bezczujnikowych.

Tabela 1. Charakterystyka częstotliwości uszkodzeniowej w funkcji momentu i stopnia uszkodzenia wirnika

Moment [%]	f_u [Hz]	Moment [%]	f_u [Hz]	Moment [%]	f_u [Hz]
2 pręty uszkodzone		4 pręty uszkodzone		8 prętów uszkodzonych	
100	6,30	100	6,00	100	5,66
70	4,54	70	4,44	70	4,40
50	3,30	50	3,37	50	3,50
20	1,43	20	1,53	20	1,80

Porównano charakterystykę częstotliwości uszkodzeniowej otrzymanej w badaniach symulacyjnych z wynikami otrzymanymi w badaniach laboratoryjnych (rys. 6) [5], [6].



Rys. 6. Charakterystyka częstotliwości f_u w funkcji momentu dla układu napędowego z silnikiem indukcyjnym o uszkodzonych 4 prętach klatki wirnika [6]

Sprawdzono zależność częstotliwości uszkodzeniowej od zmian momentu obciążenia dla prędkości 50% i 20% wartości znamionowej oraz dla 4 prętów uszkodzonych. Wyniki tych badań zamieszczono na rys. 6.

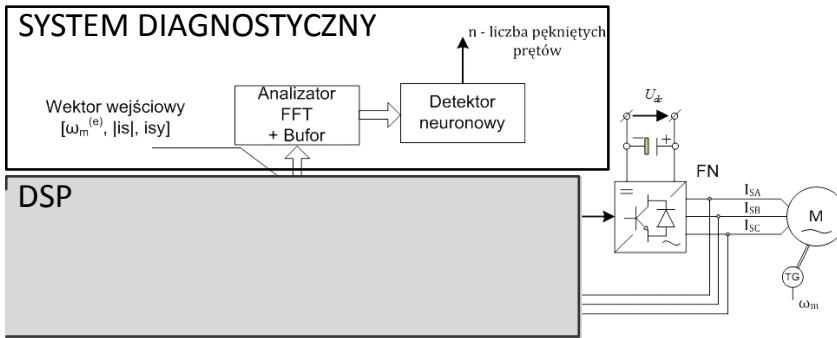
Wykazano, że w strukturze wektorowego sterowania DFOC możliwe jest dokładne określenie stopnia uszkodzenia wirnika przez wykorzystanie sygnałów dostępnych w wewnętrznej strukturze wektorowego sterowania i estymacji momentu elektromagnetycznego SI. Diagnostyka silnika może odbywać się z wykorzystaniem transformaty FFT [3] lub z wykorzystaniem tylko sieci neuronowych, na wejście których będą podawane sygnały zawierające częstotliwość uszkodzeniową oraz estymowaną wartość momentu elektromagnetycznego [6]. Dla momentu obciążenia większego od 60% m_N częstotliwość f_u się zmniejsza wraz ze wzrostem stopnia uszkodzenia wirnika, natomiast dla mniejszych momentów częstotliwość ta jest większa dla przypadków związanych z większym uszkodzeniem wirnika. Z widm częstotliwości prądu stojana wynika, że uszkodzone pręty wirnika dają wzrost pasma bocznych prążków widma wokół częstotliwości sieciowej f_s w harmonicznym $f_i = f_s(1 \pm 2ks)$, $k = 1, 2, 3, \dots$ [3], [6].

3. NEURONOWY DETEKTOR USZKODZENIA WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO W UKŁADZIE STEROWANIA POŁOWO-ZORIENTOWANEGO

W niniejszym rozdziale zaprezentowano możliwości wykorzystania sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzenia silnika indukcyjnego [8], pracującego w zamkniętej pętli regulacji prędkości kątowej (rys. 7, 8).



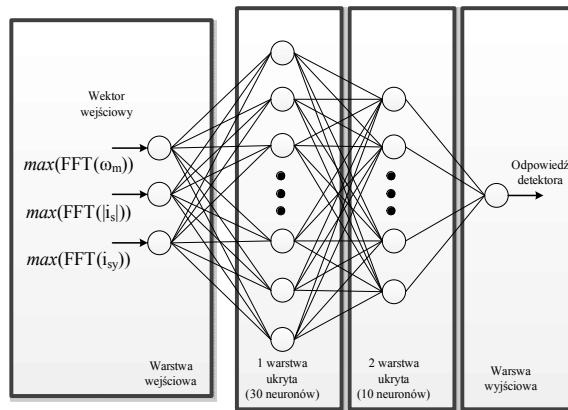
Rys. 7. Koncepcja działania systemu diagnostycznego z detektorem neuronowym



Rys. 8. Struktura neuronowego detektora uszkodzenia wirnika SI pracującego w układzie wektorowego sterowania DFOC

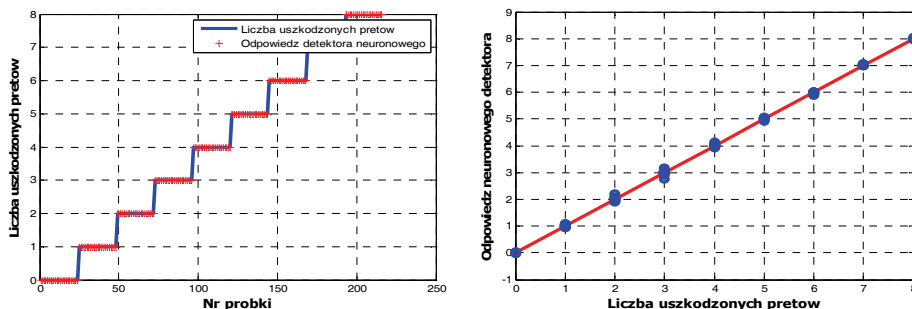
Wyniki przedstawionych badań pokazują, że możliwe jest wykorzystanie wewnętrznych sygnałów ze struktur wektorowego sterowania do wykrywania uszkodzenia wirnika silnika indukcyjnego.

System diagnostyczny, w którym wykorzystano sieć neuronową o strukturze 3-30-10-1 (rys. 9) [8], dokonuje identyfikacji liczby uszkodzonych prętów klatki wirnika na podstawie wcześniej obliczonych amplitud harmonicznych poślizgowych sygnałów prędkości mierzonej lub estymowanej, modułu wektora prądu stojana i składowej prądu stojana i_{sy} [6], [8].



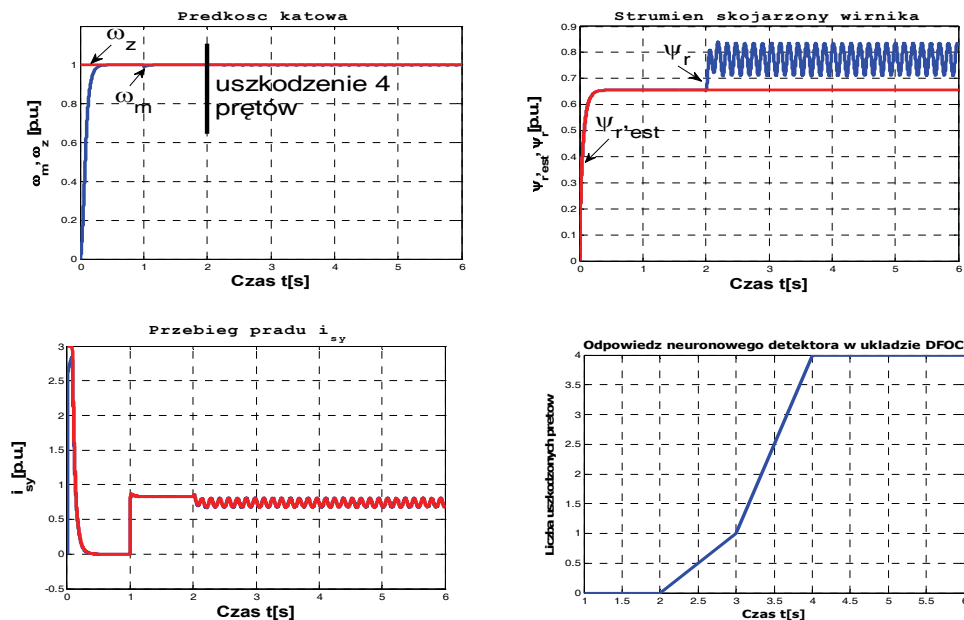
Rys. 9. Wektor wejściowy oraz struktura detektora neuronowego w układzie sterowania DFOC

Uzyskane odpowiedzi systemu diagnostycznego na ciąg danych testowych, przedstawiono na rys. 10 [6], [8]. Uzyskany błąd średniokwadratowy nie przekracza 10^{-3} .



Rys. 10. Wyniki działania detektora neuronowego w strukturze DFOC

Zastosowanie bloku analizatora widmowego przed układem detektora neuronowego zapewnia bezbłędną identyfikację liczby uszkodzonych prętów w klatce wirnika SI. Niestety podejście takie wymaga zastosowania dodatkowych buforów wejściowych oraz zwiększonego zapotrzebowania na moc obliczeniową potrzebną do równoczesnej analizy FFT kilku sygnałów czasowych. Niewątpliwie jest to ogromna wada proponowanego detektora neuronowego. Zaproponowane podejście gwarantuje jednak niemal 100% wykrywalność uszkodzenia wirnika (rys. 10).



Rys. 11. Wyniki działania detektora neuronowego w strukturze DFOC w trybie on-line (4 uszkodzone pręty)

Na rysunku 11 przedstawiono odpowiedź systemu diagnostycznego pracującego w strukturze DFOC w trybie on-line [6], [8].

W chwili $t = 0$ s wymuszono w układzie znamionową prędkość. Następnie w chwili $t = 1$ s wymuszono znamionowy moment obciążenia. Po osiągnięciu przez układ napędowy stanu ustalonego w czasie $t = 2$ s nastąpiło uszkodzenie 4 prętów klatki wirnika. Dla takiej sytuacji uzyskano poprawną identyfikację liczby uszkodzonych prętów po czasie równym $t = 2$ s, która wynika z zastosowania bufora wejściowego, po wypełnieniu którego dokonywana jest analiza FFT, a następnie generowana odpowiedź detektora. Ze względu na powolnie postępujące uszkodzenie klatki wirnika czas odpowiedzi detektora nie jest krytyczny.

W takiej sytuacji detektor zwrócił pozytywny wynik po czasie równym $t = 2$ s. Stosunkowo długi czas reakcji odpowiedzi systemu diagnostycznego jest skutkiem zastosowania bufora wejściowego, po wypełnieniu którego dokonywana jest analiza FFT, a następnie generowana odpowiedź detektora.

4. WNIOSKI

Celem pracy było opracowanie neuronowego detektora uszkodzenia prętów klatki wirnika silnika indukcyjnego pracującego w układzie sterowania połowo zorientowanego. Opracowany został system bazujący na sygnałach dostępnych w wewnętrznej strukturze sterowania. Wykorzystano analizę FFT w celu zwiększenia skuteczności działania detektora neuronowego. Wadą przedstawionego rozwiązania jest skomplikowana struktura wewnętrzna detektorów i bardzo duże wymagania sprzętowe. Napędy, które pracują w trudnych i zmiennych warunkach przemysłowych, powinny być zaopatrzone w dodatkowe systemy diagnostyczne umożliwiające wczesne wykrycie uszkodzenia wirnika.

LITERATURA

- [1] BENBOUZID M.E.H., DIALLO D., ZERAOULIA M., *Advanced fault-tolerant control of induction motor drives for EV/HEV traction applications, from conventional to modern and intelligent techniques*, IEEE Transactions on Vehicular Technology, 56, 2007, 519–528.
- [2] CAMPOS-DELGADO D.U., ESPINOZA-TREJO D.R., PALACIOS E., *Fault-tolerant control in variable speed drives, a survey*, Electric Power Applications IET, 2 (2), 2008, 121–134.
- [3] KOWALSKI C.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.
- [4] KOWALSKI C.T., DYBKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., *Rotor fault analysis in the field oriented controlled induction motor drive*, Proc. 17th Intern. Conf. EDPE 2009, on CD.
- [5] DYBKOWSKI M., ORŁOWSKA-KOWALSKA T., KOWALSKI C., *Analiza układu wektorowego sterowania silnikiem indukcyjnym z uszkodzonymi prętami klatki wirnika*, Przegląd Elektrotechniczny, 87 (4), 2011, 215–219.

- [6] DYBKOWSKI M., *Estymacja prędkości kątowej w złożonych układach napędowych – zagadnienia wybrane*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 67, Seria: Monografie, Nr 20, Wrocław 2013.
- [7] ORLOWSKA-KOWALSKA T., *Bezczujnikowe układy napędowe z silnikami indukcyjnymi*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2003.
- [8] SOJKA A., *Wykorzystanie sztucznych sieci neuronowych do wykrywania uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego w układzie wektorowego sterowania*, praca dyplomowa pod kierunkiem M. Dybkowskiego, Wrocław 2012.

INDUCTION MOTOR ROTOR FAULTS DETECTION BASED ON NEURAL NETWORKS IN DIRECT FIELD ORIENTED CONTROL STRUCTURE

In the paper the influence of broken rotor bars to the properties of vector controlled induction motor drive system was checked. Characteristic frequency was shown. The rotor fault detector based on the neural network was described and tested in simulation. Proposed algorithm was applied in the Direct Field Oriented Control Structure of Induction Motor. Control structure was tested and checked during different drive operation. Simulation results were performed in Matlab Simulink software.