

dr hab. inż. ZYGFRYD GŁOWACZ  
mgr inż. JAROSŁAW KOZIK  
Katedra Maszyn Elektrycznych  
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki  
Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie

# Diagnostyka silnika synchronicznego oparta na rozpoznawaniu prądów stojana z zastosowaniem FFT i logiki rozmytej

*W artykule przedstawiono metodę rozpoznawania zwarć w zezwojach stojana silnika synchronicznego na podstawie analizy widmowej prądów zasilających, która wykorzystuje szybką transformację Fouriera (FFT) i logikę rozmytą. Rozpoznawanie uszkodzeń stojana wykonano dla silnika synchronicznego podczas pracy bez uszkodzeń i ze stopniowanym zwarciem grupy zezwojów w jednej fazie stojana. Zastosowano różne wartości rezystancji obwodu zwierającego, co miało na celu określenie wpływu intensywności zwarcia na widmo prądów stojana, a przez to zbadanie możliwości wykrycia zwarć w ich wczesnym stadium, zanim dojdzie do uszkodzenia maszyny. Wyniki badań potwierdzają dużą skuteczność rozpoznawania zwarć w zezwojach stojana na podstawie prądów fazowych zasilających silnik. Zastosowanie logiki rozmytej umożliwia dokonanie automatycznej oceny stanu silnika na podstawie przesłanek zawartych w widmie prądów stojana.*

## 1. WSTĘP

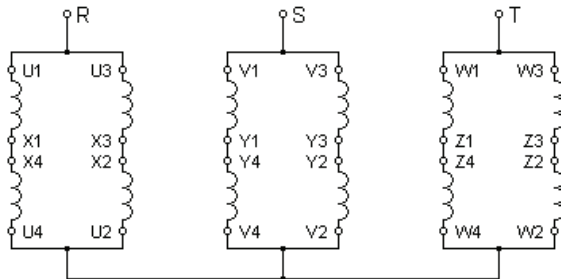
---

Napędy z silnikami synchronicznymi znajdują szerokie zastosowanie w wielu procesach technologicznych, szczególnie tam, gdzie wymagana jest stała prędkość obrotowa. Z uwagi na fakt, że są to zwykle napędy o dużej mocy, ich awaria może prowadzić do bardzo poważnych konsekwencji, włącznie z zatrzymaniem całego procesu, którego uszkodzony napęd jest częścią. Dlatego też w ostatnich dekadach bardzo rozwinęła się dziedzina nauki zajmująca się diagnostyką maszyn elektrycznych i napędów. Diagnostyka poawaryjna jest najczęściej prowadzona w sposób inwazyjny i polega na wizualnej ocenie stanu maszyny. Z uwagi na wysoki koszt diagnostyki inwazyjnej poszukuje się obecnie metod, które umożliwiłyby ocenę stanu maszyny bez konieczności jej demontażu, a nawet bez przerywania jej pracy. Coraz częściej możliwe staje się również wykrywanie uszkodzeń we wczesnym ich stadium, co pozwala na przedsięwzięcie odpowiednich kroków w celu usunięcia ich przyczyn oraz

pozwała zaplanować harmonogram remontów w sposób, który ograniczy kosztowne przestoje. Spośród stosowanych obecnie metod rozpoznawania uszkodzeń silników elektrycznych [1], [2], [9], [10] większość oparta jest na analizie harmonicznej lub falkowej sygnałów diagnostycznych [1], [6], [9], [10], którymi najczęściej są prądy, strumień osiowy, drgania, hałas (dźwięk), a wnioskowanie dokonywane jest przez eksperta lub w sposób automatyczny. Coraz powszechniej wśród automatycznych metod klasyfikacji stosowane są metody sztucznej inteligencji [1], [3], [4], [10]. Niniejszy artykuł poświęcony jest wykrywaniu uszkodzeń silnika synchronicznego, bazującym na analizie spektralnej prądów stojana z zastosowaniem rozmytego klasyfikatora stanu silnika.

Przedmiotem rozważań jest maszyna synchroniczna o specjalnym wykonaniu, pozwalającym badać stany awaryjne uzwojeń. Stojan maszyny posiada uzwojenia dwuwarstwowe umieszczone w 48 żłobkach. Każda z faz stojana posiada po dwie gałęzie równoległe, z których każda składa się z dwóch grup zezwojów. Końce każdej z grup są wyprowadzone na

zewnątrz maszyny, przez co możliwe są różne konfiguracje ich połączeń. Wiriak maszyny jest jawnobiegunowy o 4 biegunach i 145 zwojach na biegun. Schemat połączeń uzwojeń stojana dla stanu bezawaryjnego przedstawiono na rysunku 1.



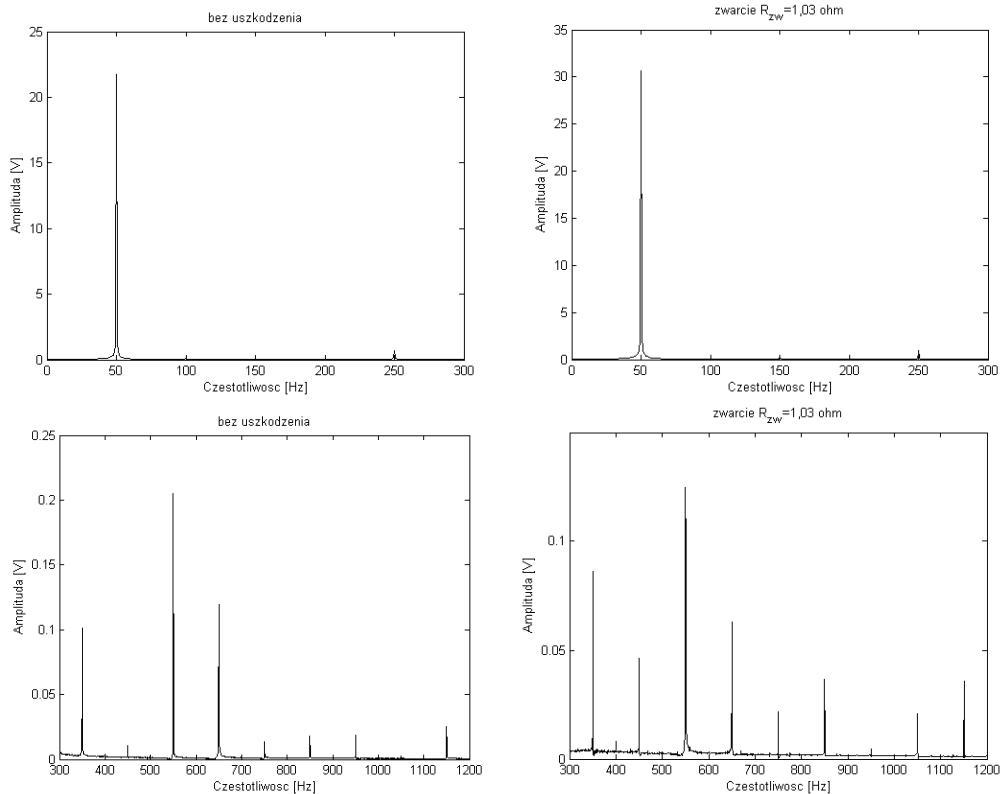
Rys. 1. Schemat połączeń uzwojeń stojana maszyny dla stanu bezawaryjnego

## 2. EKSTRAKCYJA CECH CHARAKTERYSTYCZNYCH USZKODZEŃ

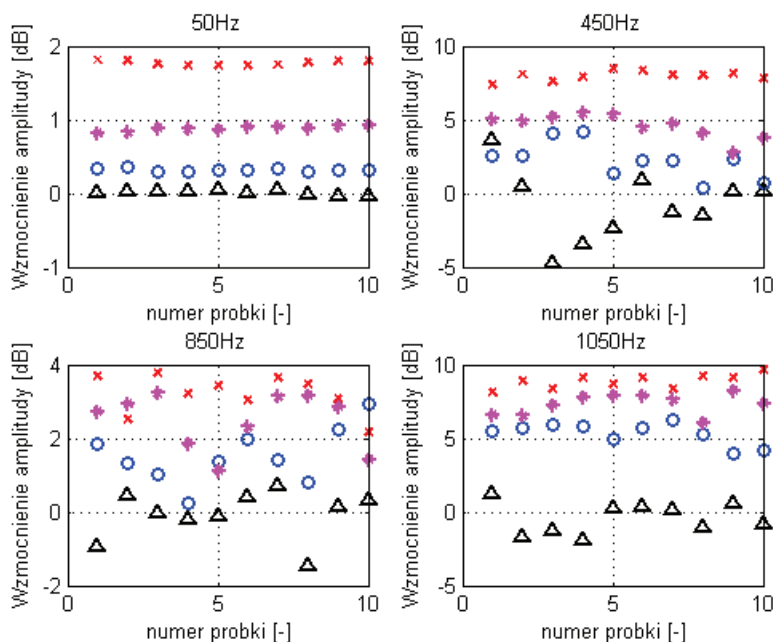
W procesie tworzenia wzorców wykorzystano z zarejestrowanych sygnałów prądów stojana silnika synchronicznego podczas pracy bez uszkodzeń i ze stop-

niowanym zwarcie grupy zezwojów w jednej fazie stojana. Zwarcia dokonywane były poprzez opornicę o regulowanej rezystancji. Zarejestrowano sygnały prądowe dla następujących wartości rezystancji zwiernącej: (po 10 rejestracji dla każdej z wartości rezystancji): 6,88  $\Omega$ , 6,48  $\Omega$ , 5,58  $\Omega$ , 4,81  $\Omega$ , 4,18  $\Omega$ , 3,45  $\Omega$ , 2,47  $\Omega$ , 2,11  $\Omega$ , 1,70  $\Omega$ , 1,03  $\Omega$ . Rezystancja grupy zezwojów wynosiła 0,06  $\Omega$ .

Zarejestrowane przebiegi czasowe prądów zostały następnie transformowane do dziedziny częstotliwości za pomocą szybkiej transformacji Fouriera (FFT) [6]. Przykładowe widma prądów stojana dla stanów bezawaryjnego oraz zwarcia grupy zezwojów rezystancją zwiernąją o wartości 1,03  $\Omega$  przedstawiono na rysunku 2. Analiza widm prądów wykazała, że największe wartości osiągają amplitudy odpowiadające częstotliwościom będącymi całkowitymi wielokrotnościami 25 Hz. Są one związane z prędkością obrotową silnika, która wynosiła 1500 obr/min. Spośród częstotliwości należało wybrać te, które ulegają największym zmianom na skutek awarii i zachodzą dla wszystkich próbek z danego przypadku. Porównanie widm dla poszczególnych przypadków zwarcia oraz stanu bezawaryjnego wykazało, że częstotliwości 50 Hz, 450 Hz, 850 Hz i 1050 Hz są najbardziej odpowiednie do oceny stanu silnika.



Rys. 2. Widmo częstotliwości prądu stojana silnika synchronicznego w stanie nieuszkodzonym oraz ze zwartą jedną grupą zezwojów stojana przez rezystancję o wartości 1,03  $\Omega$



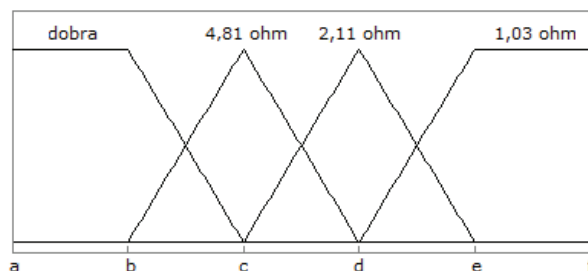
Rys. 3. Wzmocnienia amplitud odpowiadające częstotliwościom 50 Hz, 450 Hz, 850 Hz i 1050 Hz dla czterech różnych stanów: bezawaryjnego (trójkąt) oraz zwarcie w jednej grupie zewojów stojana poprzez rezystancje 4,81 Ω (okrąg), 2,11 Ω (gwiazdka), 1,03 Ω (krzyżyk)

Na rysunku 3 przedstawiono wzmocnienia amplitud odpowiadające częstotliwościom 50 Hz, 450 Hz, 850 Hz i 1050 Hz dla czterech przypadków: stanu bezawaryjnego oraz zwarcie poprzez rezystancję zwierną o następujących wartościach: 4,81 Ω, 2,11 Ω, 1,03 Ω. Jak widać wzmocnienie amplitudy dla częstotliwości 50 Hz zwiększa się znacząco w miarę postępowania uszkodzenia i odpowiednie grupy punktów na rysunku 3 odpowiadające różnym stanom silnika dla tej częstotliwości są dość łatwo separowalne. Jednak wzrost amplitudy dla częstotliwości 50 Hz może być wywołany także innymi czynnikami (np. wzrost obciążenia) i wzmocnienie dla tej częstotliwości nie może być samodzielnie traktowane jako wskaźnik stanu silnika. Należy zatem wziąć pod uwagę informacje zawarte w pozostałych trzech częstotliwościach. Wzmocnienia amplitud dla czterech wybranych wartości częstotliwości (50 Hz, 450 Hz, 850 Hz i 1050 Hz) zostały wykorzystane do utworzenia wektora cech.

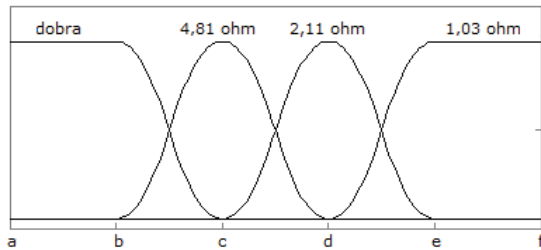
### 3. ROZMYTY KLASYFIKATOR STANU SILNIKA

Wyznaczone wektory cech zostały użyte do wykonania rozmytego klasyfikatora stanu silnika. Zastosowanie logiki rozmytej pozwala na przeprowadzenie wnioskowania przy niepełnej informacji o badanym systemie [3], [5], [7], [8]. Zastosowano klasyfikator o czterech wejściach odpowiadających

poszczególnym współrzędnym wektora cech (poszczególnym częstotliwościom – 50 Hz, 450 Hz, 850 Hz i 1050 Hz). Każdy z elementów wektora cech był przydzielany do jednej z czterech grup odpowiadających stanowi bezawaryjnemu oraz zwarciom poprzez rezystancje: 4,81 Ω, 2,11 Ω i 1,03 Ω. Spośród wszystkich dziesięciu próbek dla każdego z czterech przypadków (rysunek 3) określono wartości średnie (b, c, d, e na rysunkach 4 i 5). W tych punktach znajdowały się jądra poszczególnych zbiorów rozmytych (funkcje przynależności do poszczególnych zbiorów rozmytych osiągały w tych punktach wartość 1). Wykonano dwa modele o różnych typach funkcji przynależności. W pierwszym modelu funkcje przynależności miały kształty trójkątne/trapezowe (rysunek 4), natomiast w drugim przypadku były to krzywe typu pi-shaped (rysunek 5). Funkcje przynależności w obu przypadkach sumowały się do wartości 1.

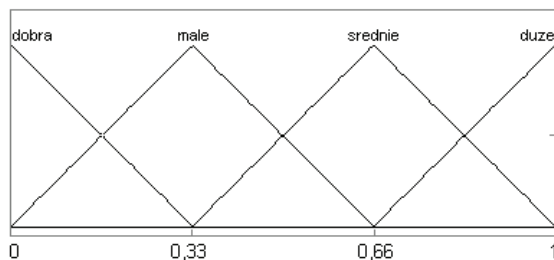


Rys. 4. Kształty funkcji przynależności wejść dla pierwszego modelu klasyfikatora



Rys. 5. Kształty funkcji przynależności wejść dla drugiego modelu klasyfikatora

Każdy z klasyfikatorów posiadał jedno wyjście o czterech trójkątnych funkcjach przynależności, które klasyfikowały stan maszyny do czterech zbiorów rozmytych. Jądra zbiorów były jednoelementowe i wynosiły 0 – brak uszkodzenia, 0,33 – zwarcie małe, 0,66 – zwarcie średnie, 1 – zwarcie duże (rysunek 6).



Rys. 6. Kształty funkcji przynależności wyjścia klasyfikatora

W procesie inferencji do przecięcia zbiorów (iloczynu logicznego) użyto operatora MIN, natomiast do połączenia zbiorów (sumy logicznej) operatora MAX. Baza reguł składała się z dziesięciu reguł,

opracowanych na podstawie obserwacji wzmożeń dla częstotliwości charakterystycznych w zależności od stanu silnika (rysunek 3). Defuzyfikacja była przeprowadzona za pomocą metody środka ciężkości (*center of gravity*).

#### 4. WYNIKI KLASYFIKACJI

Zbudowany klasyfikator rozmyty został poddany ocenie skuteczności rozpoznawania. Na wejście klasyfikatora podawane były kolejne wektory cech, odpowiadające różnym wartościom rezystancji zwierającej (po 10 wektorów dla każdej z rezystancji – łącznie 100 wektorów) oraz wektory cech dla stanu bezawaryjnego (kolejne 10 wektorów). Zastosowanie w procesie testowania przypadków dla dziesięciu różnych wartości rezystancji zwierającej, podczas gdy tylko trzy spośród nich zostały użyte podczas tworzenia modelu rozmytego jest dość dobrym sprawdzianem skuteczności jego działania. Wyniki rozpoznawania dla obu modeli klasyfikatorów przedstawiono w tabelach 1 i 2.

Skuteczność rozpoznawania prądów określona została następująco:

$$E = N_I / N \quad (1)$$

gdzie:

$E$  – skuteczność rozpoznawania stanu silnika,

$N_I$  – liczba poprawnie zidentyfikowanych próbek danej kategorii,

$N$  – liczba wszystkich próbek danej kategorii biorących udział w identyfikacji.

Tabela 1

**Odpowiedź pierwszego modelu rozmytego klasyfikatora stanu silnika na wektory cech wyodrębnione z widm prądów stojana dla stanu bezawaryjnego oraz stopniowanego zwarcia jednej grupy zezwojów stojana**

nr próbki	Odpowiedź klasyfikatora									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dobra	0,132	0,119	0,108	0,110	0,109	0,169	0,169	0,108	0,112	0,113
Rz=6,88 Ω	0,269	0,330	0,158	0,152	0,154	0,333	0,328	0,334	0,333	0,244
Rz=6,48 Ω	0,333	0,333	0,320	0,226	0,286	0,333	0,163	0,258	0,151	0,150
Rz=5,58 Ω	0,333	0,333	0,666	0,500	0,368	0,332	0,500	0,665	0,333	0,334
Rz=4,81 Ω	0,358	0,363	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
Rz=4,18 Ω	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,335
Rz=3,45 Ω	0,500	0,411	0,372	0,500	0,666	0,333	0,426	0,407	0,415	0,333
Rz=2,47 Ω	0,666	0,666	0,610	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,665
Rz=2,11 Ω	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,666	0,667	0,666	0,666	0,667
Rz=1,70 Ω	0,667	0,723	0,675	0,667	0,675	0,668	0,679	0,682	0,673	0,683
Rz=1,03 Ω	0,873	0,892	0,862	0,892	0,891	0,886	0,881	0,892	0,888	0,883

Tabela 2

Odpowiedź drugiego modelu rozmytego klasyfikatora stanu silnika na wektory cech wyodrębnione z widm prądów stojana dla stanu bezawaryjnego oraz stopniowanego zwarcia jednej grupy zezwojów stojana

nr próbki	Odpowiedź klasyfikatora									
	1	2	3	4	5	6	7	8	9	10
dobra	0,137	0,114	0,108	0,108	0,108	0,129	0,130	0,107	0,109	0,109
Rz=6,88 $\Omega$	0,234	0,332	0,164	0,160	0,161	0,333	0,332	0,335	0,333	0,197
Rz=6,48 $\Omega$	0,335	0,335	0,329	0,181	0,270	0,335	0,147	0,218	0,159	0,159
Rz=5,58 $\Omega$	0,333	0,333	0,665	0,500	0,338	0,333	0,500	0,665	0,333	0,333
Rz=4,81 $\Omega$	0,335	0,337	0,333	0,336	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333
Rz=4,18 $\Omega$	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,333	0,335
Rz=3,45 $\Omega$	0,500	0,361	0,339	0,500	0,667	0,333	0,374	0,357	0,364	0,333
Rz=2,47 $\Omega$	0,666	0,666	0,653	0,666	0,666	0,663	0,631	0,666	0,665	0,666
Rz=2,11 $\Omega$	0,666	0,665	0,666	0,664	0,667	0,666	0,666	0,667	0,666	0,667
Rz=1,70 $\Omega$	0,667	0,755	0,668	0,666	0,668	0,666	0,670	0,672	0,667	0,668
Rz=1,03 $\Omega$	0,873	0,892	0,886	0,892	0,892	0,890	0,886	0,891	0,891	0,888

W ocenie skuteczności założono, że wyniki z zakresu 0 – 0,1665 oznaczają stan bez uszkodzenia, 0,1665 – 0,4995 zwarcie małe, 0,4995 – 0,8325 zwarcie średnie, 0,8325 – 1 zwarcie duże. Całkowita skuteczność rozpoznawania w zależności od tego, jak kwalifikowało się pośrednie wartości rezystancji zwierających wahała się od 82 do 100%.

## 5. PODSUMOWANIE

Celem współczesnych metod diagnostycznych jest uniknięcie awarii urządzeń. Wymagania stawiane procedurom diagnostycznym takie jak nieinwazyjność, skuteczność i niski koszt wykonania zmuszają do podejmowania badań, których celem jest opracowanie odpowiednich narzędzi oraz ich pomiarowa weryfikacja. Badania wykonano dla silnika synchronicznego w trakcie jego normalnej eksploatacji (praca pod obciążeniem w stanie ustalonym). Weryfikacja skuteczności metody będącej tematem niniejszego artykułu potwierdza, że metoda ta daje dobre wyniki i powinna być dalej rozwijana w celu zwiększania jej skuteczności.

Praca naukowa finansowana ze środków Ministerstwa Nauki i Szkolnictwa Wyższego w ramach grantu promotorskiego nr 3564/B/T02/2009/37.

## Literatura

1. *Filippetti F. et al.*: A fuzzy logic approach to on-line induction motor diagnostics based on stator current monitoring, Proceedings of the 1995 IEEE International PowerTech Conference, Stockholm, Vol. EMD, pp. 156-161.
2. *Glinka T.*: Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle, Komel, Katowice, 2000.
3. *Korbicz J., Kościelny J.M., Kowalczyk Z., Cholewa W.*: Diagnostyka procesów. Modele. Metody sztucznej inteligencji. Zastosowania, WNT, Warszawa, 2002.
4. *Lisik I., Rosołowski E.*: Zastosowanie systemu wnioskowania rozmytego do selekcji zwartych faz w liniach elektroenergetycznych, Materiały V Konferencji Naukowo-Technicznej: Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – Sieci 2004, Politechnika Wrocławska, Wrocław, 2004, s.147-154.
5. *Lachwa A.*: Rozmyty świat zbiorów, liczb, relacji, faktów, reguł i decyzji, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa, 2001.
6. *Pasko M., Walczak J.*: Teoria sygnałów, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2007.
7. *Piegat A.*: Modelowanie i sterowanie rozmyte, Akademicka Oficyna Wydawnicza EXIT, Warszawa 2003.
8. *Rutkowski L.*: Metody i techniki sztucznej inteligencji, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa, 2006.
9. *Weinreb K., Sulowicz M.*: Nieinwazyjna diagnostyka wewnętrznych niesymetrii uzwojeń maszyny synchronicznej, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Nr 77/2007, s. 59-64.
10. *Zeraouia M., Mamoune A., Mangel H., Benbouzid M.E.H.*: A Simple Fuzzy Logic Approach for Induction Motors Stator Condition Monitoring, Journal of Electrical Systems 1-1 (2005), pp. 15-25.

Recenzent: dr inż. Aleksander Fręchowicz