

Witold Głowacz, Zygfryd Głowacz
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków

DIAGNOSTYKA SILNIKA OBCOWZBUDNEGO PRĄDU STAŁEGO OPARTA NA ANALIZIE I ROZPOZNAWANIU SYGNAŁÓW Z ZASTOSOWANIEM FFT I KLASYFIKATORA BAYESA

DIAGNOSTICS OF SEPARATELY EXCITED DC MOTOR BASED ON ANALYSIS AND RECOGNITION OF SIGNALS USING FFT AND BAYES CLASSIFIER

Streszczenie: W pracy przedstawiono wyniki badań diagnostycznych silnika obcowzbudnego prądu stałego. Zastosowano w diagnostyce metodę analizy opartą na szybkiej transformacji Fouriera (FFT) i metodę rozpoznawania wykorzystującą klasyfikator Bayesa. W procesie uczenia wyznaczano zbiór najistotniejszych częstotliwości, dla których różnice odpowiadających sygnałów w dwóch stanach silnika są największe. W procesie identyfikacji rozpoznawano trzy kategorie sygnałów: stan bez uszkodzenia, stan przerwy zezwojów wirnika i stan zwarcia zezwojów wirnika.

Abstract: In the work results of diagnostic investigations of separately excited dc motor were presented. In diagnostics were applied a Fourier analysis method basing on fast Fourier transform (FFT) and a recognition method using Bayes classifier. In training process a set of the most important frequencies has been determined for which differences of corresponding signals in two states are the largest. Three categories of signals have been recognized in identification process: faultless state, state of breaking the rotor coils and state of shorting the rotor coils.

Słowa kluczowe: silnik elektryczny prądu stałego, badania diagnostyczne, FFT, klasyfikator Bayesa

Keywords: dc motor, diagnostic investigations, FFT, Bayes classifier

1. Wstęp

Badania diagnostyczne pozwalają wykryć możliwe uszkodzenia w obwodach elektrycznych

i mechanicznych silników prądu stałego i prądu przemiennego [1, 5, 8, 9, 11, 17, 18]. W tym celu stosowane są odpowiednie metody analizy i rozpoznawania sygnałów pomiarowo dostępnych [2, 3, 12, 13, 14, 15, 19, 20]. Sygnałami diagnostycznymi, które zawierają informacje

o stanie silnika mogą być wielkości elektryczne, akustyczne, mechaniczne, termiczne i inne [6, 7, 10, 16]. Podstawowymi sygnałami elektrycznymi w diagnostyce są prądy i napięcia

w obwodach elektrycznych silnika. Sygnały prądowe są częściej wykorzystywane w diagnostyce z powodu mniejszej wrażliwości na zewnętrzne zakłócenia w porównaniu z sygnałami napięciowymi. W niniejszej pracy przedstawiono wyniki diagnostyki silnika obcowzbudnego prądu stałego, w której wykorzystano dwa sygnały: prąd wzbudzenia i

prąd twornika. Zastosowano w badaniach metodę analizy opartą na szybkiej transformacji Fouriera (FFT) i metodę rozpoznawania wykorzystującą klasyfikator Bayesa [4].

2. Klasyfikator Bayesa

Klasyfikator jest oparty na twierdzeniu Bayesa opisanym wzorem (1):

$$P(C_i | X) = \frac{P(C_i)P(X | C_i)}{P(C_1)P(X | C_1) + \dots + P(C_n)P(X | C_n)} \quad (1)$$

gdzie:

$P(C_i)$ - prawdopodobieństwo zdarzenia (kategorii) C_i ,

$P(C_i | X)$ - prawdopodobieństwo zdarzenia (kategorii) C_i pod warunkiem zajścia zdarzenia (sygnału) X ,

$P(X | C_i)$ - prawdopodobieństwo zdarzenia (sygnału) X pod warunkiem zajścia zdarzenia (kategorii) C_i .

W metodach statystycznych przedstawionych w 1973 roku przez Richarda o. Dudę oraz Petera E. Harta, podejmując decyzję o przypisaniu nieznanego sygnału do klasy, bierzemy pod uwagę prawdopodobieństwa związane z przynależnością obiektów do klas oraz koszty błędnych klasyfikacji. Klasyfikator Bayesa przypisuje sygnałowi klasę, dla której prawdopodobieństwo *a posteriori* jest największe. Zatem \mathbf{X} zostanie przypisany do klasy ω^L , jeśli zachodzi zależność (2):

$$P(\omega^L | X_l) > P(\omega^j | X_l) \quad (2)$$

dla każdego $j \in \{1, 2, \dots, C\}$.

W przypadku, gdy chcemy rozpoznawać sygnały w n -wymiarowej przestrzeni cech, tzn. $\mathbf{X} = \{X_1, X_2, \dots, X_n\}$, możemy wykorzystać prosty klasyfikator Bayesa.

W klasyfikatorze tym przyjmuje się założenie o wzajemnej niezależności cech. Wówczas gęstość rozkładu prawdopodobieństwa definiujemy dla n -wymiarowego wektora cech wzorem (3):

$$p(\mathbf{X} | \omega^j) = \prod_{i=1}^n p(X_i | \omega^j) \quad (3)$$

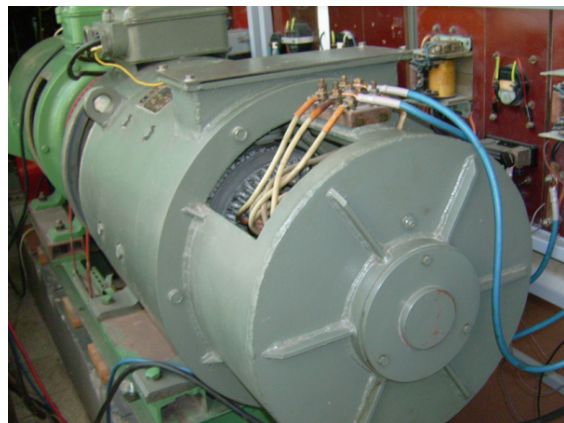
Kolejne uogólnienie klasyfikatora Bayesa polega na uwzględnieniu faktu, że nie wszystkie błędne decyzje w rozpoznawaniu obiektu są tak samo „kosztowne” (czyli mają takie same negatywne konsekwencje). W celu wzięcia pod uwagę tego faktu, wprowadza się funkcję kosztów (pomyłek), na podstawie której oraz na podstawie prawdopodobieństwa *a posteriori* definiuje się funkcję ryzyka klasyfikatora. Zadaniem takiego klasyfikatora jest minimalizacja funkcji ryzyka.

3. Pomiary sygnałów diagnostycznych

Obiektem badań był silnik obcowzbudny prądu stałego wykonany przez BOBRME KOMEL w Katowicach (rys. 1), w którym była możliwa realizacja przerwy zezwojów wirnika i zwarcie trzech oraz sześciu zezwojów wirnika. Silnik miał następujące dane: $P_N = 13$ kW, $U_N = 75$ V, $I_N = 200$ A, $U_{fN} = 220$ V, $n_N = 700$ obr/min, $p = 2$, $N_r = 42$, $K = 126$.

Silnik posiadał uzwojenie pętlicowe proste w wirniku i był zasilany z generatora napięcia stałego. Obciążeniem silnika był generator napięcia stałego pracujący na zewnętrzną rezy-stancję. Pomiary wykonano w warunkach laboratoryjnych kartą pomiarową z częstotliwością próbkowania 20 kHz i czasem rejestracji 10 s.

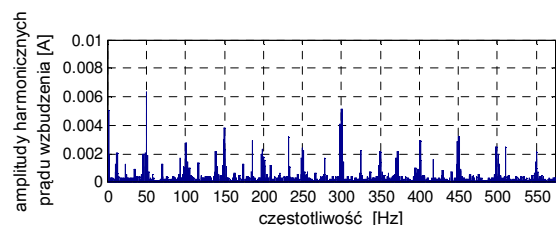
Rejestrowano następujące wielkości: prędkość wirnika, napięcie twornika, prąd twornika, napięcie wzbudzenia, prąd wzbudzenia, prąd w zwartych zezwojach wirnika. Wykonano wielowariantowe rejestracje obciążonego silnika w stanach: bez uszkodzenia, przerwy zezwojów wirnika, zwarcia 3 zezwojów wirnika, zwarcia 6 zezwojów wirnika, przerwy zezwojów wirnika i zwarcia 3 zezwojów wirnika, przerwy zezwojów wirnika i zwarcia 6 zezwojów wirnika, dla prędkości wirnika: 700 obr/min, 600 obr/min, 500 obr/min, 400 obr/min, dla procesu uczenia i procesu identyfikacji. Spośród zarejestrowanych wielkości jako sygnały diagnostyczne wybrano prąd wzbudzenia i prąd twornika.



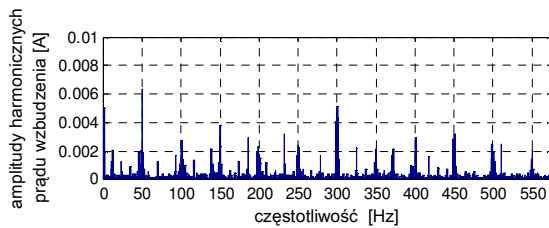
Rys. 1. Silnik obcowzbudny prądu stałego

4. Analiza i rozpoznawanie sygnałów diagnostycznych

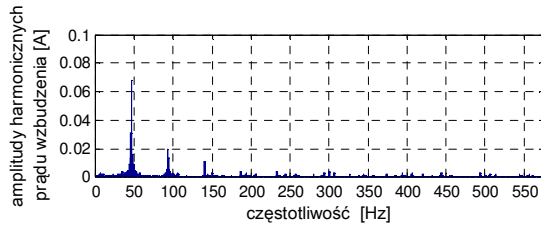
Zarejestrowane sygnały podzielono na próbki o długości: 0,2 s, 0,4 s, 0,6 s, 0,8 s, 1 s, 1,2 s, 1,4 s, 1,6 s, 1,8 s, 2 s. Wykonano analizę FFT sygnałów. Wyniki analizy FFT prądu wzbudzenia i prądu twornika dla prędkości wirnika 700 obr/min przedstawiono na rys. 2-7.



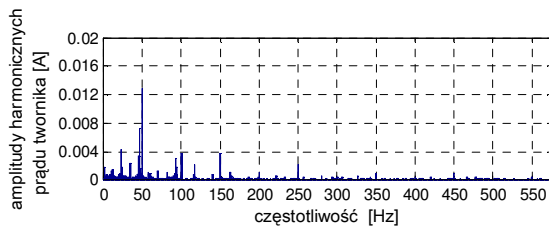
Rys. 2. Widmo częstotliwości prądu wzbudzenia w stanie bez uszkodzenia



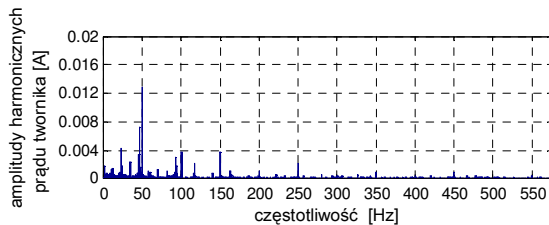
Rys. 3. Widmo częstotliwości prądu wzbudzenia w stanie przerwy zezwojów wirnika



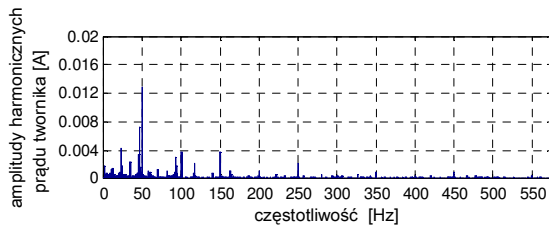
Rys. 4. Widmo częstotliwości prądu wzbudzenia w stanie zwarcia 3 zezwojów wirnika



Rys. 5. Widmo częstotliwości prądu twornika w stanie bez uszkodzenia



Rys. 6. Widmo częstotliwości prądu twornika w stanie przerwy zezwojów wirnika



Rys. 7. Widmo częstotliwości prądu twornika w stanie zwarcia 3 zezwojów wirnika

Dla każdej długości próbki sygnału określono zbiór najistotniejszych częstotliwości, dla których różnice odpowiadających sygnałów w dwóch stanach silnika są największe.

W procesie uczenia i identyfikacji zastosowano klasyfikator Bayesa.

W procesach uczenia i identyfikacji utworzono wektory cech sygnałów diagnostycznych dla częstotliwości należących do zbioru najistotniejszych częstotliwości.

Składowymi wektorów cech były amplitudy harmonicznych prądu wzbudzenia i prądu twornika dla trzech stanów: stanu bez uszkodzenia, stanu przerwy zezwojów wirnika i stanu zwarcia trzech zezwojów wirnika.

Skuteczność rozpoznawania sygnału silnika została zdefiniowana wzorem (4):

$$E_{ns} = \frac{N_{np}}{N_{nw}} \cdot 100\% \quad (4)$$

gdzie: E_{ns} – skuteczność rozpoznawania sygnału silnika dla n -sekundowych próbek sygnału, N_{np} , N_{nw} – liczba pomyślnych rozpoznań i wszystkich rozpoznań sygnału dla n -sekundowych próbek sygnału silnika w stanach: bez uszkodzenia, przerwy zezwojów wirnika i zwarcia trzech zezwojów wirnika.

Skuteczność rozpoznawania stanu silnika zdefiniowano wzorem (5):

$$E_n = \frac{E_{nb} + E_{np} + E_{nz}}{3} \quad (5)$$

gdzie: E_n – skuteczność rozpoznawania stanu silnika dla n -sekundowych próbek sygnału, E_{nb} , E_{np} , E_{nz} – skuteczności rozpoznawania sygnału silnika dla n -sekundowych próbek sygnału odpowiednio w stanach: bez uszkodzenia, przerwy zezwojów wirnika i zwarcia trzech zezwojów wirnika.

Skuteczności rozpoznawania sygnałów silnika dla przyjętych długości próbek sygnałów były następujące:

- 1) w stanie bez uszkodzenia:
 - a) prądu wzbudzenia - 100%,
 - b) prądu twornika - 100%,
- 2) w stanie przerwy zezwojów wirnika:
 - a) prądu wzbudzenia - 100%,
 - b) prądu twornika - 100%,
- 3) w stanie zwarcia trzech zezwojów wirnika:
 - a) prądu wzbudzenia - 100%,
 - b) prądu twornika - 100%.

Skuteczności rozpoznawania stanu silnika w oparciu o sygnały prądu wzbudzenia i prądu twornika były 100%.

5. Podsumowanie

Zastosowane metody analizy i rozpoznawania pozwalają określić stan silnika obcowzbudnego prądu stałego, tj. stan bez uszkodzenia, stan przerwy zezwojów wirnika i stan zwarcia trzech zezwojów wirnika, na podstawie próbek sygnałów diagnostycznych prądu wzbudzenia i prądu twornika. W badanych przypadkach skuteczności rozpoznawania stanu silnika obcowzbudnego prądu stałego w oparciu o prąd wzbudzenia i prąd twornika wynosiły 100%.

6. Literatura

- [1]. Drozdowski P., Duda A.: *Fault detection of induction motors due to the effects of magnetic saturation*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 100, cz. I, 2013, wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, s. 33-38
- [2]. Dudek-Dyduch E, Tadeusiewicz R, Horzyk A.: *Neural network adaptation process effectiveness dependent of constant training data availability*. Neurocomputing 2009, 72 (13-15), 3138-3149
- [3]. Dudzikowski I, Ciurys M.: *Analysis of operation of a car starter with BLDC motor*. Przegląd Elektrotechniczny 2010, 86 (4), pp. 166-169
- [4]. Flasiński M.: *Wstęp do sztucznej inteligencji*. PWN, Warszawa 2011
- [5]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. Wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, Wyd. I 1998, wyd. II 2002
- [6]. Głowacz A.: *Sound recognition of induction motor with the use of discrete Meyer wavelet transform and classifier based on words*. Przegląd Elektrotechniczny 2013, 89 (6), pp. 152-154
- [7]. Głowacz W.: *Diagnostics of induction motor based on Spectral Analysis of Stator Current with Application of Backpropagation Neural Network*. Archives of Metallurgy and Materials 2013, 58 (2), pp. 561-564
- [8]. Głowacz A., Głowacz W., Głowacz Z.: *Recognition of armature current of dc motor with application of FFT and Euclidean distance*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 84, 2009, wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, s. 179-182
- [9]. Głowacz A., Głowacz W., Głowacz Z.: *Diagnostyka silnika synchronicznego oparta na analizie sygnałów akustycznych z zastosowaniem MFCC i GSDM*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 87, 2010, wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, s. 185-190
- [10]. Głowacz A., Głowacz A., Głowacz Z.: *Diagnostics of Direct Current generator based on analysis of monochrome infrared images with the application of cross-sectional image and nearest neighbor classifier with Euclidean distance*. Przegląd Elektrotechniczny 2012, 88 (6), pp. 154-157
- [11]. 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

- [12]. Łukaniszyn M.: *Podstawy elektromagnetyzmu*. Oficyna Wydawnicza PO, Opole 2003
- [13]. MathWorks: *MATLAB and Simulink for Technical Computing*, 2014, www.mathworks.com
- [14]. Noga M., Gołębiowski L., Gołębiowski M., Mazur D.: *Sterowanie silnikiem synchronicznym z wewnętrznymi magnesami stałymi IPMS uwzględniające ograniczenia*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 82, 2009, wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, s. 55-62
- [15]. Skomorowski M.: *Wybrane zagadnienia rozpoznawania obrazów*. Wydawnictwo Uniwersytetu Jagiellońskiego, Kraków 2013
- [16]. Sobczyk T.J.: *Frequency analysis of faulty machines—possibilities and limitation*. Proceedings of SDEMPED, 2007, Cracow, pp. 121-125
- [17]. Sułowicz M., Borkowski D., Węgiel T., Weinreb K.: *Specialized diagnostic system for induction motors*. Przegląd Elektrotechniczny 2010, 86 (4), pp. 285-291
- [18]. Szymański Z.: *Application of the Magnetic Field Distribution in Diagnostic Method of Special Construction Wheel Traction Motors*. Studies in Applied Electromagnetics and Mechanics, Advanced Computer Techniques in Applied Electromagnetics 2008, 30, 449-456
- [19]. Zakrzewski K., Tomczuk B., Koterak D.: *Simulation of forces and 3D field arising during power autotransformer fault due to electric arc in HV winding*. IEEE Transactions on Magnetics, Vol. 38, No. 2, 2002, pp. 1153-1156
- [20]. Zawilak J., Zawilak T.: *Silniki synchroniczne średniej mocy wzbudzone magnesami trwałymi*. Zeszyty Problemowe - Maszyny Elektryczne, nr 100, część I, 2013, wyd. BOBRME KOMEL, Katowice, s. 5–8

Autorzy

Witold Głowacz
e-mail: wglowacz@agh.edu.pl

Zygfryd Głowacz
e-mail: glowacz@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki
i Inżynierii Biomedycznej,
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków,

Podziękowania

Praca została zrealizowana częściowo w ramach grantu dziekańskiego w 2014 r. (Witold Głowacz) i częściowo w ramach pracy statutowej nr 11.11.120.354 w 2014 r. (Zygfryd Głowacz).