

-mgr inż. ADAM GŁOWACZ
mgr inż. WITOLD GŁOWACZ
dr hab. inż. ZYGFRYD GŁOWACZ
Akademia Górniczo-Hutnicza,
Wydział Elektrotechniki, Automatyki,
Informatyki i Elektroniki, Katedra Maszyn Elektrycznych

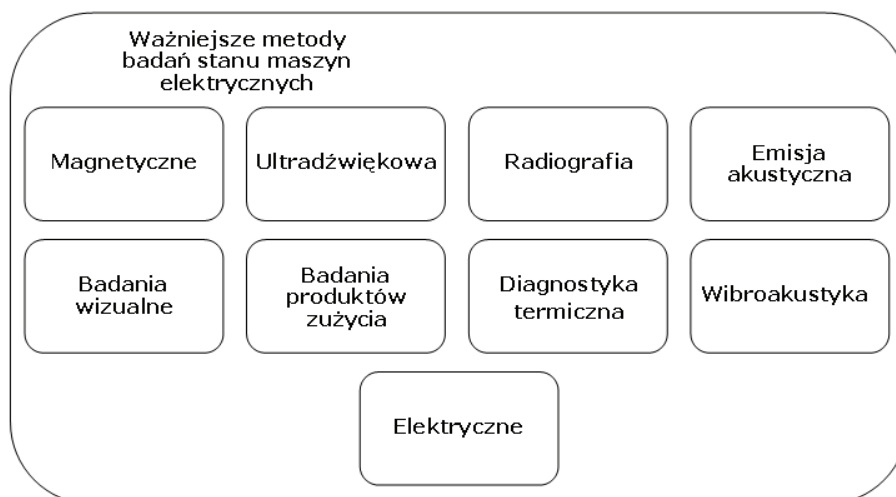
Rozpoznawanie prądu twornika silnika prądu stałego z zastosowaniem FFT i klasyfikatora rozmytego z trójkątną funkcją przynależności

Prezentowano metodę rozpoznawania prądu silnika prądu stałego. Podejście to jest oparte na FFT i klasyfikatorze rozmytym z trójkątną funkcją przynależności. Badania rozpoznawania prądu przeprowadzono dla silnika prądu stałego podczas pracy bez uszkodzeń i ze zwarciami zewzwojów w obwodzie wirnika. Wyniki badań potwierdzają dużą skuteczność rozpoznawania prądu w silniku prądu stałego.

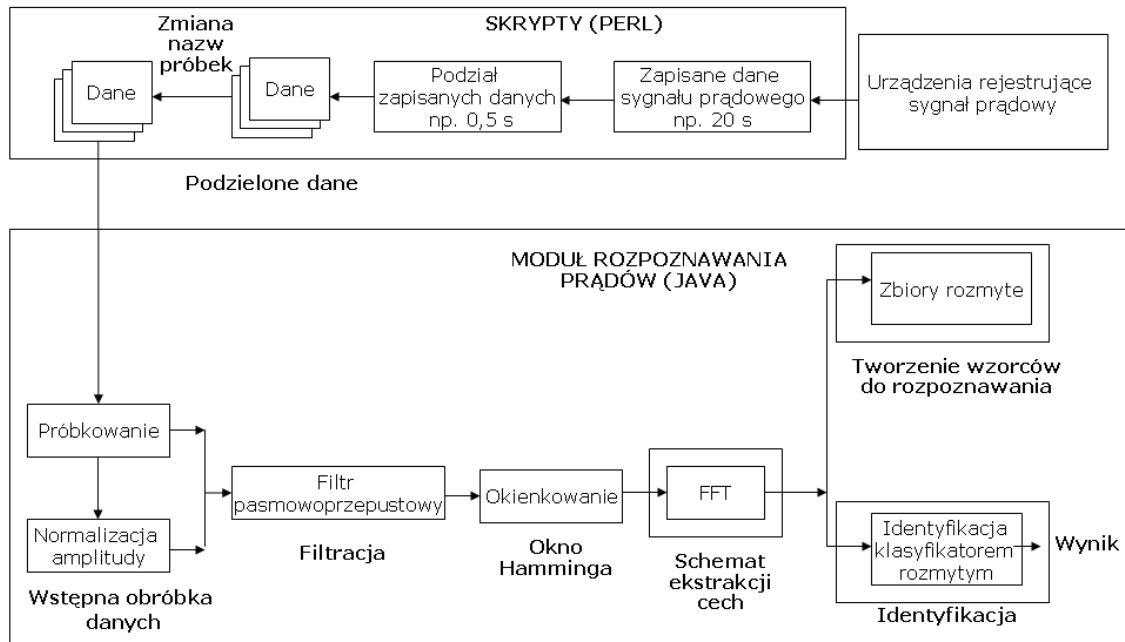
1. WSTĘP

Prowadzone w pracy rozważania odnoszą się do systemu badającego stan maszyn elektrycznych. W przyjętym rozumowaniu powstanie stanu przedawaryjnego interpretowane jest jako zagrożenie zniszczenia maszyny. W konstrukcji, wytwarzaniu i eks-

ploatacji maszyn oraz urządzeń czynnikiem bezpośrednio pobudzającym rozwój diagnostyki jest odpowiedzialność za realizowaną funkcję. Odpowiedzialność ta może być definiowana w trudno wymiernych kategoriach bezpieczeństwa ludzi lub też w kategoriach ekonomicznych wydajności i efektywności produkcji. Do rozpoznawania uszkodzeń maszyn stosuje się wiele metod (rys. 1).



Rys. 1. Ważniejsze metody badań maszyn elektrycznych



Rys. 2. Przepływ danych w procesie rozpoznawania prądu

W badaniach skupiono się głównie na zagadnieniu zmian prądu twornika silnika prądu stałego. Obecnie znanych jest wiele metod opartych na rozpoznawaniu prądu. Większość z nich jest oparta na przetwarzaniu danych [1-3]. Celem artykułu jest analiza systemu umożliwiającego rozpoznawanie prądu w silniku prądu stałego. Pomiarzy zostały przeprowadzone przy zastosowaniu filtra antyaliasingowego, karty pomiarowej i oprogramowania komputerowego. Częstotliwość próbkowania wynosiła 40 kHz. Ze względu na istniejące zagrożenie zniszczenia maszyny wykonano pomiary przy ograniczeniu prądów w obwodach maszyny poprzez wprowadzenie rezystancji do tych obwodów, szczególnie do obwodów zwarciovych. Wykonanie pomiarów z napięciową reprezentacją mierzonych wielkości oraz dopasowanie zakresu zmian sygnałów dla karty pomiarowej uzyskano przez zastosowanie przetworników typu LEM.

Do przetwarzania sygnału elektrycznego stosowano wstępną obróbkę danych, schemat ekstrakcji cech i algorytm klasyfikacji. W artykule przedstawiono budowę systemu rozpoznawania prądu dla silnika prądu stałego. Przedstawiono wyniki rozpoznawania prądu w silniku prądu stałego.

2. PROCES ROZPOZNAWANIA PRĄDU TWORNIKA

Proces rozpoznawania prądu twornika składa się z procesu tworzenia wzorców do rozpoznawania

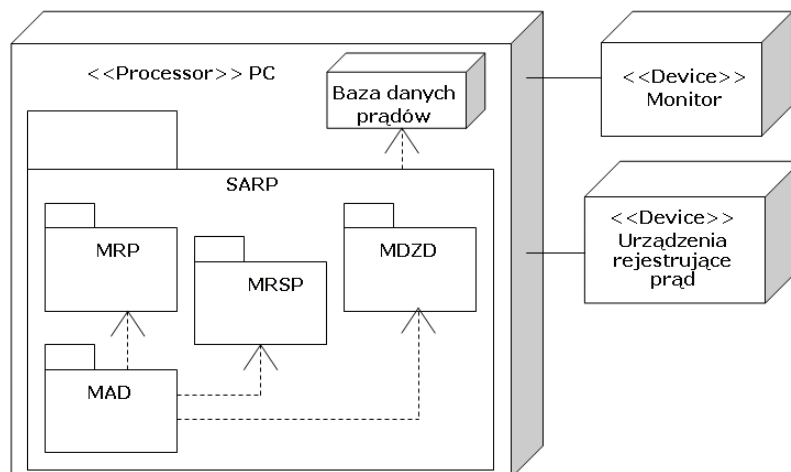
i procesu identyfikacji. Na początku procesu tworzenia wzorców do rozpoznawania przeprowadza się kolejno próbkowanie, kwantyzację, normalizację amplitudy i filtrację. Następnie wykonywane jest okienkowanie z zastosowaniem okna Hamminga. W kolejnym kroku dane są zamieniane przez algorytm FFT i otrzymywane jest widmo częstotliwości danego prądu twornika dla każdej kategorii. Kolejno z tak otrzymanego widma częstotliwości tworzy się wzorcowe zbiory rozmyte.

Proces identyfikacji zawiera następujące kroki: rejestracja prądu twornika, podział zapisanego sygnału prądu na fragmenty (np. 0,5 sekundy), próbkowanie, kwantyzacja, normalizacja amplitudy, filtracja, okienkowanie, FFT, identyfikacja klasyfikatorem rozmytym z trójkątną funkcją przynależności (rys. 2). Normalizacja amplitudy jest stosowana opcjonalnie w procesie rozpoznawania prądu twornika.

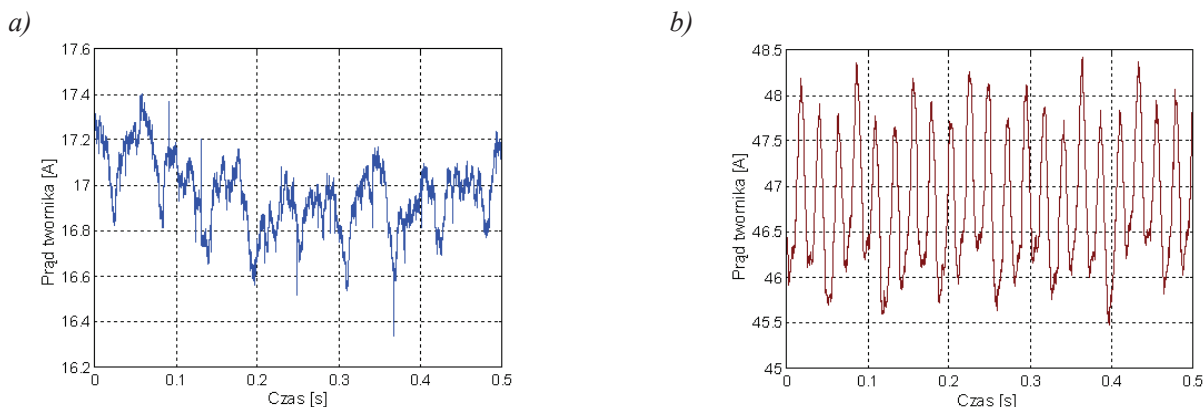
Diagram wdrożenia pokazuje fizyczną architekturę systemu automatycznego rozpoznawania prądu (rys. 3). Dla systemu rozpoznawania prądu interfejsami są monitor i urządzenie rejestrujące sygnał prądowy.

System automatycznego rozpoznawania prądu (SARP) zawiera: moduł rozpoznawania prądu (MRP), moduł automatycznego działania (MAD), moduł dzielenia zapisanych danych (MDZD), moduł rejestracji sygnału prądowego (MRSP). SARP korzysta z bazy danych prądów wzorcowych.

Zbudowano bazę danych prądów stanów przedawaryjnych silnika prądu stałego. Baza danych prądów zawierała dwie kategorie: prąd twornika bez uszkodzeń i prąd twornika ze zwarciami zezwojów wirnika (rys. 4a, 4b).



Rys. 3. Diagram wdrożenia systemu automatycznego rozpoznawania prądu



Rys. 4. Prąd twornika dla próbek półsekundowych silnika prądu stałego:
a) bez uszkodzeń, b) ze zwartymi zewojami wirnika

Moduł automatycznego działania składa się z komponentów, które automatycznie uruchamiają cały system (skrypty uruchamiające, skrypty przetwarzające dane). Moduł dzielenia zapisanych danych składa się z pojedynczego komponentu odpowiedzialnego za podział danych sygnału prądowego na fragmenty oraz przypisanie każdej nowej próbce czasu pojawienia się. Moduł rejestracji sygnału prądowego składa się z komponentu do rejestracji sygnału prądowego. Moduł rozpoznawania prądu jest odpowiedzialny za przetwarzanie, analizę i klasyfikację sygnału prądowego. System taki można zastosować w innych problemach [4-11].

3. SZYBKA TRANSFORMACJA FOURIERA

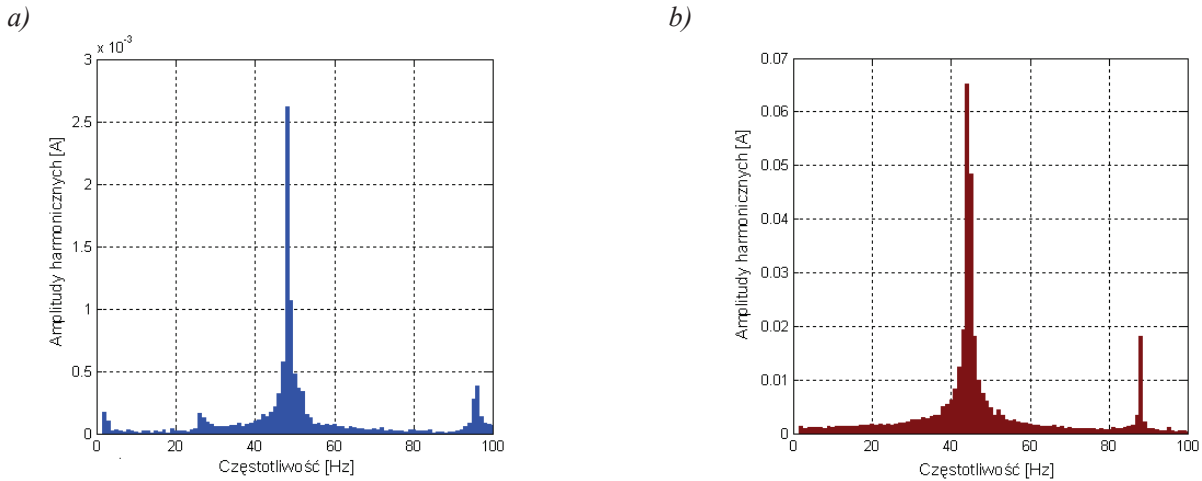
Szybka transformacja Fouriera ma za zadanie przekształcić wartości w dziedzinie czasu na wartości w dziedzinie częstotliwości [12]. Szybka transformacja Fouriera jest bardzo efektywną operacją, jednak

wektor próbek wejściowych musi mieć długość $N = 2^k$, gdzie k jest liczbą naturalną (rys. 5a, 5b).

4. KLASYFIKATOR ROZMYTY Z TRÓJKĄTNĄ FUNKCJĄ PRZYNALEŻNOŚCI

Klasyfikacja logiczna bazuje na dwóch wartościach reprezentowanych najczęściej przez: 0 i 1 lub prawda i fałsz. Granica między nimi jest jednoznacznie określona i niezmienna. Logika rozmyta stanowi rozszerzenie klasycznego rozumowania na rozumowanie bliższe ludzkiemu [13, 14]. Wprowadza ona wartości pomiędzy standardowe 0 i 1; „rozmywa” granice pomiędzy nimi, dając możliwość zaistnienia wartościom z przedziału $[0, 1]$.

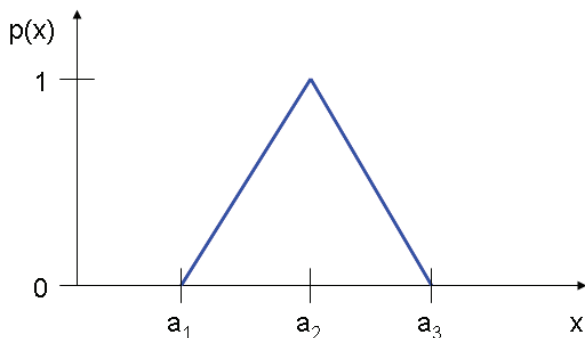
Klasyfikator rozmyty jest to klasyfikator używający logiki rozmytej lub zbiorów rozmytych w swoich operacjach. Klasyfikator rozmyty z trójkątną funkcją przynależności podejmuje decyzje dotyczące zakwalifikowania badanego sygnału prądowego. Porów-



Rys. 5. Widmo częstotliwości próbki prądu o długości 0,5 sekundy przy zastosowaniu algorytmu FFT dla prądu twornika silnika prądu stałego:

a) bez uszkodzeń, b) ze zwartymi zewojami wirnika

nywane są różne wartości zbiorów rozmytych. W aplikacji zostało zastosowanych 260 trójkątnych funkcji przynależności (rys. 6). Podstawa trójkąta jest parametrem tej funkcji, zależnym od zastosowanego filtra. W procesie identyfikacji porównywane są ze sobą zbiory rozmyte. W procesie identyfikacji porównywane będą ze sobą zbiory rozmyte (grupa nowych zbiorów rozmytych z grupą wzorcowych zbiorów rozmytych). Większa liczba wspólnych zbiorów rozmytych określać będzie właściwą kategorię.



Rys. 6. Funkcja przynależności

Funkcja przynależności $p(x)$ jest określona następującym wzorem:

$$p(x) = \begin{cases} 0 & x < a_1 \\ \frac{x - a_1}{a_2 - a_1} & a_1 \leq x < a_2 \\ \frac{a_3 - x}{a_3 - a_2} & a_2 \leq x < a_3 \\ 0 & x \geq a_3 \end{cases} \quad (1)$$

5. WYNIKI ROZPOZNAWANIA PRĄDU TWORNIKA

Maszyna prądu stałego pracowała jako silnik. Silnik prądu stałego, który pozwalał realizować zwarcia i przerwy zewojów wirnika, wytwarzał następujące sygnały prądowe: prąd twornika silnika prądu stałego bez uszkodzeń, prąd twornika silnika prądu stałego ze zwarcie w obwodzie wirnika. Silnik prądu stałego pracował w stanie wzbudzonym.

Silnik prądu stałego miał następujące parametry: $P_N = 13$ kW, $U_N = 75$ V, $I_N = 200$ A, $U_{fN} = 220$ V, $I_{fN} = 4$ A, $n_N = 700$ obr/min, gdzie: P_N – moc czynna na wale, U_N – napięcie znamionowe twornika, I_N – prąd znamionowy twornika, U_{fN} – napięcie znamionowe wzbudzenia, I_{fN} – prąd znamionowy wzbudzenia, n_N – znamionowa prędkość wirnika.

Skuteczność rozpoznawania prądu określona została następująco:

$$P = K_1 / K \quad (2)$$

gdzie

P – skuteczność rozpoznawania prądu,

K_1 – liczba poprawnie zidentyfikowanych próbek danej kategorii,

K – liczba wszystkich próbek danej kategorii biorących udział w identyfikacji.

W badaniach stosowano szybką transformację Fouriera z rozmiarem okna 8192. Badania zostały przeprowadzone dla cyfrowych filtrów pasmowoprzepustowych, normalizacji amplitudy, szybkiej transformacji Fouriera i klasyfikatora rozmytego z trójkątną

funkcją przynależności. Najlepsze wyniki otrzymano, gdy stosowano normalizację bez filtracji.

Dla prądu silnika bez uszkodzeń skuteczność rozpoznawania prądu wynosiła 80%. Dla prądu silnika ze zwarcie w obwodzie wirnika skuteczność rozpoznawania prądu wynosiła 100%.

Dwie próbki półsekundowe zostały użyte w procesie tworzenia wzorców do rozpoznawania dla każdej kategorii. Nowe, nieznane systemowi próbki były stosowane w procesie identyfikacji. Dla procesu identyfikacji używano próbek sygnału prądu silnika bez uszkodzeń i ze zwarcie zewojów wirnika. Długość próbek wynosiła pół sekundy dla każdej kategorii.

7. PODSUMOWANIE

Zamierzeniem autorów niniejszego artykułu jest tworzenie i rozwój narzędzi diagnostycznych z zastosowaniem sygnałów prądowych. Proponowane podejście umożliwia sprecyzowanie zadań systemu, który rozpoznaje prądy. Stanowisko identyfikuje kategorię, która zostanie wskazana przez klasyfikator rozmyty. Analiza pokazuje wrażliwość metody opartej na FFT i klasyfikatorze rozmytym z trójkątną funkcją przynależności w zależności od danych wejściowych. Badania potwierdzają, że system działa skutecznie dla różnych danych wejściowych. Na procesorze Pentium M 730 czas identyfikacji jednej półsekundowej próbki z zastosowaniem normalizacji amplitudy, FFT i klasyfikatora rozmytego z trójkątną funkcją przynależności wynosi 1,25 sekundy.

Mechanizm wczesnej detekcji uszkodzeń został zbudowany dla silnika prądu stałego w celu eliminowania zagrożeń.

Literatura

1. *Głowacz Z., Głowacz W.*: Mathematical Model of DC Motor for Analysis of Commutation Processes, Proceedings of 6th IEEE International Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, IEEE, Cracow, 2007, pp. 138–141.
2. *Głowacz Z., Zdrojewski A.*: Diagnostics of commutator DC motor using spectral analysis method, *Przegląd Elektrotechniczny*, 85 (2009) nr 1, s. 147-150.
3. *Głowacz Z., Zdrojewski A.*: Analiza spektralna sygnałów silnika komutatorowego prądu stałego zasilanego ze źródła napięcia stałego, *Przegląd Elektrotechniczny*; 82 (2006) nr 11, s. 76–79.
4. *Glinka T.*: Degradation of electrical machines windings insulation in time, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2008 nr 7, pp. 8–11.
5. *Drak B., Rut R.*: Naprężenia w luźnych głębokożłobkowych prętach kłatek silników indukcyjnych w czasie długotrwałego rozruchu. *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej ELEKTRYKA* z.177, Gliwice 2001, s. 49-56.
6. *Buczek K.*: Examination of high-speed induction motor fed by voltage inverter, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 54, nr 3, s. 361-378, 2005.

7. *Kluska J., Wiktorowicz K.*: Integral evaluations for a class of multivariable continuous fuzzy control systems. 15th IFAC World Congress, 21–26 July 2002, 1–6, Barcelona (Spain), 2002.
8. *Zakrzewski K., Tomczuk B., Waindok A.*: Nonlinear scaled models in 3D calculation of transformer magnetic circuits, *COMPEL: Int J for Computation and Maths. in Electrical and Electronic Eng.*, Volume 25, Number 1, 2006, pp. 91-101.
9. *Szabat K., Orłowska-Kowalska T.*: Adjustment of classical and fuzzy logic speed controllers for electrical drives with elastic joint, *Proceedings of XVI International Conference on Electrical Machines (ICEM 2004)*, Cracow, 2004.
10. *Antal M., Antal L., Zawilak J.*: Badania eksperymentalne silnika indukcyjnego z uszkodzoną klatką wirnika. *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*; nr 59, PW, 2006, s. 69-77.
11. *Dudzikowski I., Pawlaczek L.*: Maszyny prądu stałego o magnesach trwałych i ich sterowanie - stan aktualny i perspektywy rozwoju. *Analiza, projektowanie i sterowanie maszyn elektrycznych*. Gliwice: Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, 2001, s. 59-78.
12. *Pasko M., Walczak J.*: *Teoria Sygnałów*, 2007, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej.
13. *Kosanovic B. R., Chaparro L. F., Sclabassi R. J.*: *Signal Analysis In Fuzzy Information Space, Fuzzy Sets and Systems*, vol. 77, 1996, pp. 49-62.
14. *Kowal M., Korbicz J.*: Robust fault detection using neuro-fuzzy models, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2006, No 1, pp. 32-36.

Recenzent: prof. dr hab. inż. Kazimierz Jaracz