

WNIOSEK O PORTFOLIO: Automatyczna bezinwazyjna diagnostyka symetrii wirnika maszyn indukcyjnych.

Autorzy: dr inż. Michał Rad

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel.: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl

Wstęp

Niniejszy opis dotyczy procedury diagnostyki symetrii wirnika maszyn indukcyjnych. Diagnostyka klatki sprowadza się do oceny, czy uzwojenia wirnika (którymi są w maszynie klatkowej pręty) nie są uszkodzone. Można powiedzieć także inaczej, że jest to sprawdzenie symetrii elektrycznej wirnika. Opisywana tu procedura ma pewne istotne zalety w stosunku do innych znanych sposobów diagnostyki klatki. Tymi zaletami są:

1. możliwość pełnej automatyzacji,
2. wynikiem jest pojedyncza liczba, którą można uznać za miarę asymetrii; daje to łatwość porównania z wcześniejszymi pomiarami i możliwość śledzenia trendu zmian
3. bezinwazyjność metody,
4. możliwość stosowania dla maszyn różnych mocy,
5. mało skomplikowany pomiar,
6. możliwość implementacji niemal w dowolnym języku programowania i na dowolnym systemie, dość mała złożoność obliczeniowa.

Uszkodzenia wirników

Maszyny indukcyjne należą do najbardziej popularnych maszyn elektrycznych. Najczęściej wykorzystywane są jako silniki, chociaż coraz częściej słyszy się o wykorzystaniu tych maszyn również jako generatorów. Ich główne zalety to prosta konstrukcja i dość duża niezawodność. Do najczęstszych przyczyn awarii należą defekty elektryczne stojana oraz uszkodzenia mechaniczne (głównie łożysk), do uszkodzeń wirników dochodzi relatywnie rzadko, nie mniej jednak w pewnych obszarach zastosowań silników, uszkodzenia wirnika również nie należą do rzadkości. Do grupy silników najbardziej narażonych na uszkodzenia wirnika należą: silniki pracujące w ciężkich warunkach, silniki z ciężkim bądź długim rozruchem, silniki od których wymaga się częstych rozruchów. Można wykazać, że w czasie rozruchu energia strat wydzielonych w wirniku praktycznie w całości zużyta jest na wzrost temperatury wirnika, a najbardziej jego uzwojeń (czyli klatki dla silników klatkowych). Niewielki relatywnie czas rozruchu i intensywność zjawisk (duże prądy w wirniku) powodują, że w rozważaniach można pominąć praktycznie oddawanie ciepła przez wirnik. Oczywiście dotyczy to najbardziej silników chłodzonych w sposób konwencjonalny, czyli powietrzem.

Uszkodzenie pojedynczego pręta wirnika na ogół nie jest widoczne na zewnątrz – maszyna działa, co poniekąd jest zaletą maszyn indukcyjnych. Typowe zabezpieczenia nie są w stanie zareagować na taką sytuację. Nie mniej jednak,

najczęściej uszkodzenie postępuje dalej – kolejne pręty zaczynają być bardziej obciążone – aż do sytuacji w której maszyna odmawia posłuszeństwa. Tak więc w pewnej grupie maszyn celowe jest badanie stanu symetrii elektrycznej wirnika, a jeszcze lepszym i pewniejszym rozwiązaniem było by monitorowanie jego stanu w sposób systematyczny.

Z ekonomicznego punktu widzenia, często ochrona maszyny nie jest najważniejsza, znacznie większe znaczenie ma bowiem zapewnienie ciągłości pracy i ograniczenie nieplanowanych zatrzymań. Nie mniej jednak uszkodzenie wirnika wykryte wcześniej, może ochronić stojan przed nieodwracalnym uszkodzeniem. Na rysunku 1 widać uszkodzony wirnik maszyny, w którym doszło do wytopienia aluminiowych prętów. Najprawdopodobniej wytopione aluminium zostało wtarte w stojan co prowadzi do jego zniszczenia. W ten sposób cała maszyna nadaje się jedynie do złomowania.



Rys 1. Wirnik uszkodzony w wyniku wytopienia prętów klatki

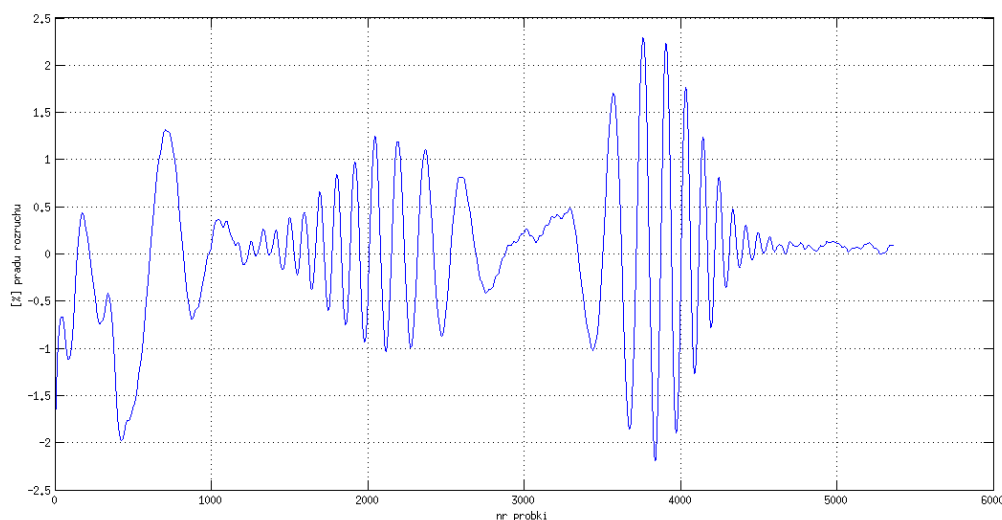
Sposób wykrywania asymetrii

Zasada działania proponowanego systemu opiera się na analizie prądu rozruchu. W prądzie maszyny z uszkodzonym wirnikiem pojawia się składowa o częstotliwości:

$$F = (1-2s)f_0 \quad (1)$$

(gdzie „s” to poślizg, a „ f_0 ” to częstotliwość zasilania).

Amplituda tej składowej (dalej nazywanej składową diagnostyczną) nie jest wielka i dla uszkodzonej maszyny może wynosić zaledwie 1% amplitudy podstawowej częstotliwości prądu rozruchu. Wykrycie składowej diagnostycznej nie jest więc problemem banalnym. Na szczęście, ponieważ poślizg („s” we wzorze 1) zmienia się podczas rozruchu od wartości 1 dla silnika zatrzymanego do wartości bliskiej zera dla silnika pracującego, dlatego składowa diagnostyczna nie jest sygnałem stacjonarnym. Częstotliwość składowej diagnostycznej zmienia się więc malejąc w pierwszej połowie rozruchu, a następnie rosnąc. To daje pewne możliwości skutecznego jej wykrywania.



Rys 2. Przebieg prądu rozruchu po filtracji dolnoprzepustowej dla uszkodzonego silnika

W literaturze już od lat można spotkać opisy różnych algorytmów lub urządzeń bazujących na powyższym zjawisku. Wszystkie jednak sposoby wymagają interpretacji wyników przez osoby przeszkolone w tym celu. Opisana tutaj procedura w wyniku analizy daje liczbę, którą można przyjąć za miarę asymetrii, może ona również działać w pełni automatycznie. Sposób wykrywania i oceny amplitudy składowej diagnostycznej oparty jest (nieco upraszczając) na analizie falkowej i szczegółowo został opisany w [1].

Generalnie polega on na tym, że tworzy się specjalną „falkę” dopasowaną do długości badanego rozruchu, a następnie dokonuje się splotu tej specjalnej falki z zarejestrowanym prądem rozruchu. Wynik splotu jest miarą podobieństwa obu sygnałów, tak więc jeżeli w badanym prądzie istnieje sygnał podobny (czyli sygnał diagnostyczny) to wynik splotu jest większy, jeśli sygnału diagnostycznego tam nie ma to wynik jest mniejszy. To oczywiście bardzo uproszczone wytłumaczenie, szersze można znaleźć w [1]. Nazywanie „falką” opracowanej przez autora specjalnej funkcji jest także pewnym uproszczeniem ponieważ nie rozważano czy w świetle obowiązujących definicji jest to rzeczywiście falka.

Przeprowadzone badania

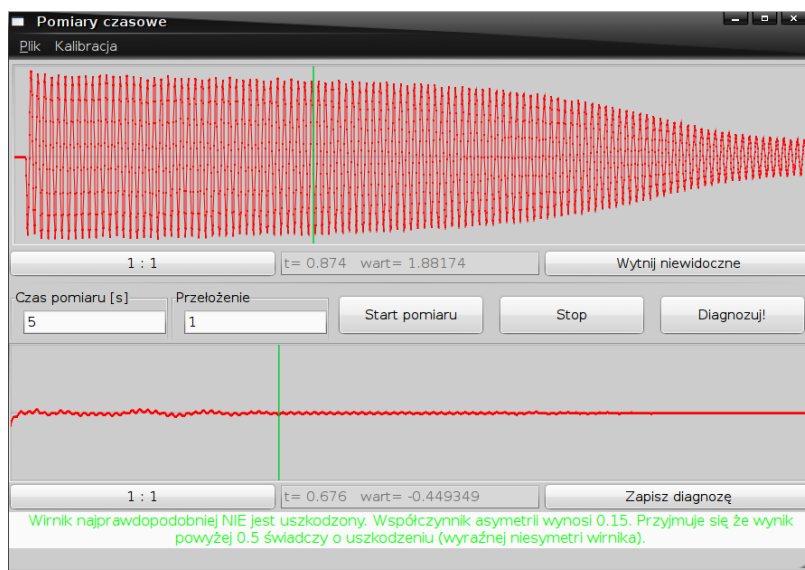
W celu potwierdzenia prawidłowego działania procedury wykonano szereg badań. Najpierw były to badania symulacyjne, potem badania na prawdziwych przebiegach pochodzących z różnych maszyn uszkodzonych i nieuszkodzonych pracujących w laboratorium i przemyśle. W pierwszej części prób doprowadzono procedurę do poprawnego działania udoskonalając ją w środowisku Matlab. Następnie gotową procedurę zaimplementowano za pomocą języka C++ w specjalnie do tego celu utworzonym programie, służącym do diagnostyki maszyn i całość przetestowano w warunkach przemysłowych. Jeżeli nie dysponuje się silnikiem z uszkodzonym wirnikiem to działanie procedury można także pokazać na sprawnym silniku pierścieniowym, symulując asymetrię jego wirnika poprzez niesymetrycznie rezystancyjne zwarcie faz uzwojeń wirnika.

Proponowane rozwiązania

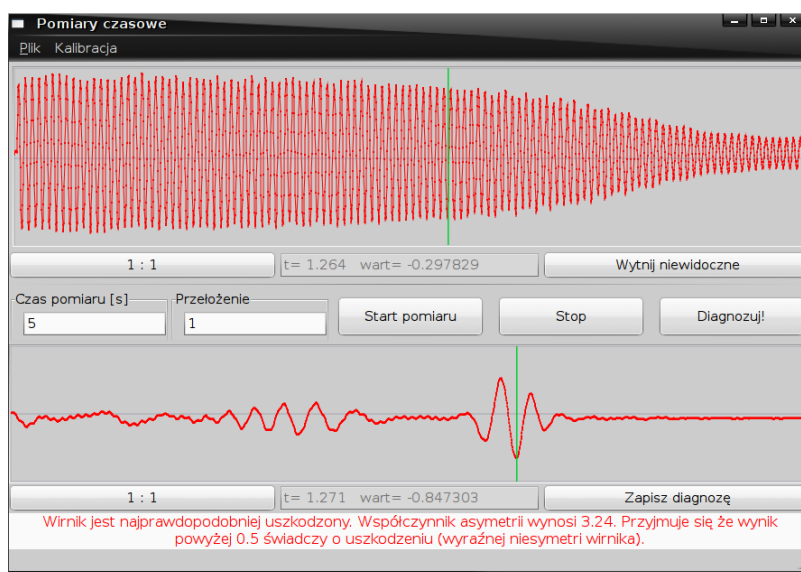
Proponowane rozwiązanie nadaje się zarówno do badań silników za pomocą przenośnego i łatwego w obsłudze urządzenia, jak również do implementacji w systemach zabezpieczeń w taki sposób aby diagnostyka wykonywała się w pełni automatycznie i bez udziału człowieka.

Rysunki 3 i 4 przedstawiają okno programu, w którym zaimplementowano algorytm automatycznej procedury diagnostycznej wirnika. Widać na nich badany przebieg, oraz wynik działania procedury wraz z odpowiednim komentarzem. Program został napisany od podstaw przez autora i może stanowić bazę dla dalszych programów tworzonych na konkretne zamówienia kontrahentów przemysłowych, uwzględniając potrzeby i wymagania zainteresowanych.

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel.: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Rys 3. Okno programu z zarejestrowanym przebiegiem rozruchu, przebiegiem wynikowym procedury i wyliczonym współczynnikiem asymetrii dla przypadku silnika sprawnego

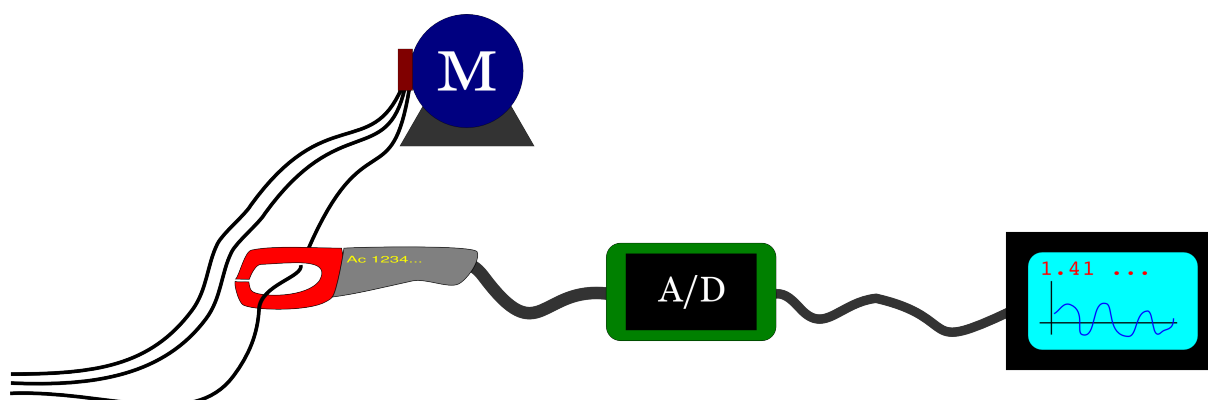


Rys 4. Okno programu z zarejestrowanym przebiegiem rozruchu, przebiegiem wynikowym procedury i wyliczonym współczynnikiem asymetrii dla przypadku silnika uszkodzonego

Możliwości wykorzystania

Opisywany tutaj algorytm może być wykorzystany w dwojaki sposób. Może być użyty w przenośnym urządzeniu do diagnostyki wirników lub może być zaimplementowany jako procedura w systemach zabezpieczeń wirników. Procedura do swojego działania potrzebuje zarejestrowanego przebiegu prądu rozruchu, tak więc do budowy autonomicznego urządzenia diagnostycznego potrzebne są następujące elementy (rys 5):

1. przetwornik pomiarowy prądu (typu LEM lub np. cęgi pomiarowe, z wyjściem będącym wprost sygnałem wartości chwilowej prądu)
2. przetwornik analogowo – cyfrowy (do przetworzenia przebiegu analogowego na dyskretny sygnał cyfrowy)
3. jednostki liczącej, zapewniającej rejestrację, obliczenie i wyświetlanie, oraz drukowanie bądź przesyłanie wyniku.



Rys 5. Układ przenośny do diagnostyki wirnika: cęgi pomiarowe, przetwornik analogowo-cyfrowy, jednostka licząca

Dobór tych elementów jest dość dowolny i może być dokonany po konsultacji z zainteresowanym podmiotem, uwzględniając preferencje odbiorcy, zakres mocy badanych silników, sposób obrazowania wyników.

Drugim sposobem wykorzystania procedury jest jej implementacja w istniejących zabezpieczeniach. Podjęto próby napisania kompletnej, automatycznej i autonomicznej procedury dającej się zaimplementować bezpośrednio w urządzeniach zabezpieczających. Do prawidłowego i samodzielnego działania, oprócz właściwych obliczeń procedura powinna umieć sama rozpoznać kiedy zaczyna się rozruch oraz kiedy rozruch się kończy, bazując na tym musi cały prąd rozruchu zarejestrować, następnie wyliczyć jego czas i dalej już obliczyć wartość

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel.: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



wskaźnika asymetrii jak w innych przypadkach. Napisana procedura działała poprawnie w laboratorium na prawdziwych przebiegach pochodzących z dostępnych maszyn (zarówno sprawnych jak i z uszkodzonymi wirnikami).

Jak to opisano powyżej, procedura musi umieć wykryć początek i koniec rozruchu. Zabezpieczenia silnikowe również dla swoich celów muszą poprawnie wykrywać takie zdarzenia, tak więc najlepszym rozwiązaniem było by po prostu zintegrowanie wszystkich funkcji w jednym urządzeniu. Przewiduje się, że w większości przypadków nie trzeba będzie w ogóle zmieniać konfiguracji sprzętowej zabezpieczenia, o ile tylko system ma możliwość rejestracji przebiegu prądu rozruchowego z częstotliwością około 1000 Hz.

Centrum Inteligentnych Systemów Informatycznych Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków
budynek C-2 pokój 426 tel.: 12 617 44 53 www.isi.agh.edu.pl isi@agh.edu.pl



Literatura

- [1] M. Rad, „Diagnostyka wirnika maszyn indukcyjnych z wykorzystaniem analizy falkowej i układów uczących się”, Rozprawa doktorska, AGH Kraków (2009).
- [2] B. Drak, P. Zientek, „Analiza uszkodzeń silników wysokonapięciowych prądu przemiennego w elektrowniach zawodowych”, Maszyny elektryczne – Zeszyty problemowe nr 98 1/2013 Katowice marzec 2013.
- [3] M. Rad, „Diagnostyka wirnika maszyn indukcyjnych z wykorzystaniem analizy falkowej i układów uczących się” Przegląd Elektrotechniczny, ISSN 0033-2097, R. 86 NR 5/2010