

Arkadiusz Duda, Janusz Petryna, Maciej Sułowicz, Politechnika Krakowska, Kraków
Krzysztof Guziec, SENCO Sp. z o.o., Kraków

METODA WSTĘPNEJ OCENY STANU WIRNIKA SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY POMOCY DEDYKOWANEGO PRZYRZĄDU OPARTEGO NA POMIARZE STRUMIENIA POOSIOWEGO

METHOD OF PRELIMINARY ASSESSMENT OF AN INDUCTION MOTOR ROTOR USING A DEDICATED INSTRUMENT BASED ON THE MEASUREMENT OF AXIAL FLUX

Streszczenie: Doświadczenia autorów w oparciu o pomiary laboratoryjne i przemysłowe wskazują, że poprzez pomiar strumienia poosiowego maszyny indukcyjnej można dokonywać oceny stanu wirnika podczas pracy. Pomiar ten jest łatwy do przeprowadzenia i wg autorów metoda diagnozowania oparta na takim pomiarze jest konkurencyjna w stosunku do metody MCSA, opartej na analizie widma prądu.

Przez porównanie amplitud przebiegu czasowego strumienia można ocenić, czy w wirniku zaszły jakieś zmiany w postaci degradacji klatki. Odfiltrowanie sygnału we właściwym paśmie pokazuje wyraźną zależność poziomu sygnału dla danej maszyny od zakresu degradacji, w tym od liczby uszkodzonych prętów.

Dla potrzeb szybkiej wstępnej oceny porównawczej stanu klatki zaprojektowano i wykonano przyrząd, oparty na pomiarze amplitudy strumienia poosiowego. Sygnał wyjściowy przyrządu może być także rejestrowany przez kartę pomiarową i posłużyć do szczegółowej analizy widmowej, umożliwiającej przeprowadzenie zaawansowanej diagnostyki.

Abstract: Experience of the authors based on the laboratory and industrial measurements indicate that by measuring the axial flux of an induction machine it is possible to evaluate the condition of the rotor during operation. This measurement is easy to carry and, according to the authors, the method of diagnosis based on such a measurements is competitive with respect to MCSA method based on the analysis of current spectrum. By comparing the amplitudes of the time course of the flux, one can determine whether the rotor suffered any changes in the form of degradation of the cage. Filtering the signal in the proper band shows a clear dependence of signal level for the machinery from the range of degradation, including the number of bars damaged. For the purpose of quick preliminary comparative evaluation of the rotor cage condition, an instrument based on the measurement of the amplitude of the axial flux, has been designed and manufactured. The output signal of the instrument can also be recorded by the data acquisition card and used for detailed analysis of the spectrum that allows the further advanced diagnostics.

Słowa kluczowe: *strumień poosiowy, przyrząd pomiarowy, diagnostyka uszkodzeń, silnik indukcyjny*
Keywords: *axial flux, measuring device, faults diagnostic, induction motor*

1. Wstęp

Sygnał strumienia poosiowego jest dobrym sygnałem diagnostycznym do określenia stanu maszyn prądu przemiennego [1]-[6].

Na podstawie doświadczeń z licznych badań diagnostycznych silników indukcyjnych przeprowadzonych w laboratorium, przemyśle i energetyce autorzy uważają, że poprzez pomiar strumienia poosiowego maszyny indukcyjnej można dokonywać oceny stanu wirnika podczas pracy [5], [6]. Rys.1 ilustruje sposób przeprowadzenia pomiaru strumienia poosiowego.

Poziom sygnału przebiegu czasowego mierzony wartością skuteczną rośnie wraz z zakresem

degradacji klatki. Wykonując od czasu do czasu taki pomiar można obserwować ewentualne zmiany w stanie klatki. Dla potrzeb szybkiej wstępnej oceny porównawczej stanu klatki zaprojektowano i wykonano przyrząd, oparty na pomiarze amplitudy strumienia poosiowego. Składa się on z cewki pomiarowej, aktywnego filtra dolnoprzepustowego oraz opartego na mikrokontrolerze układu z wyświetlaczem (Rys. 2). Umożliwia pomiar i zapamiętanie wartości skutecznych sygnałów z cewki pomiarowej: bezpośredniego oraz odfiltrowanego (poprzez włączenie filtra). Można także użyć sygnału wyjściowego do dokładnej analizy sta-

nów dynamicznych silnika (np. rozruchu) oraz stanu ustalonego, przy zastosowaniu karty pomiarowej i komputera.



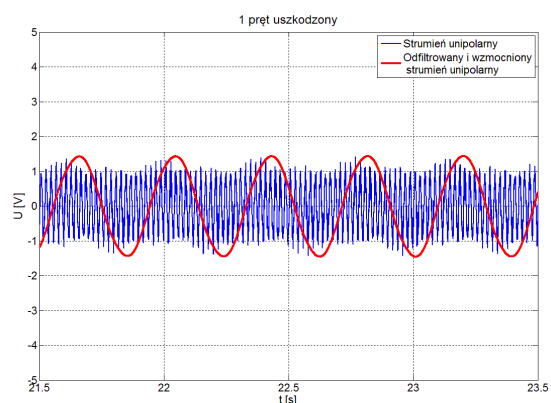
Rys. 1. Sposób pomiaru



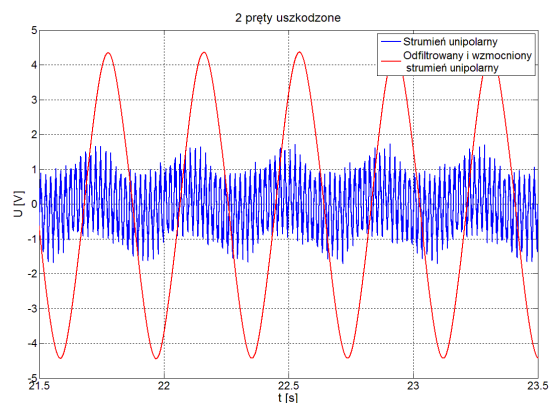
Rys. 2. Prototyp przyrządu do oceny stanu klatki wirnika

2. Pomiary

W celu wstępnego przetestowania przyrządu poddano w laboratorium badaniu silnik klatkowy typu Sg112M-4 o danych znamionowych: $P_N = 4 \text{ kW}$, $U_N = 380 \text{ V}$, $I_N = 8.6 \text{ A}$, $n_N = 1445 \text{ obr/min}$, z 3 wymiennymi wirnikami: symetrycznym (z nieuszkodzoną klatką), z jednym pękniętym prętem oraz z dwoma pękniętymi prętami. Za każdym razem silnik był jednakowo obciążony. Prąd obciążenia wynosił 4 A. Sygnały pomiarowe bezpośrednie (w kolorze niebieskim) oraz odfiltrowane (w kolorze czerwonym) ilustrują Rys. 3 i 4.



Rys. 3. Ilustracja przebiegu strumienia dla 1 uszkodzonego pręta



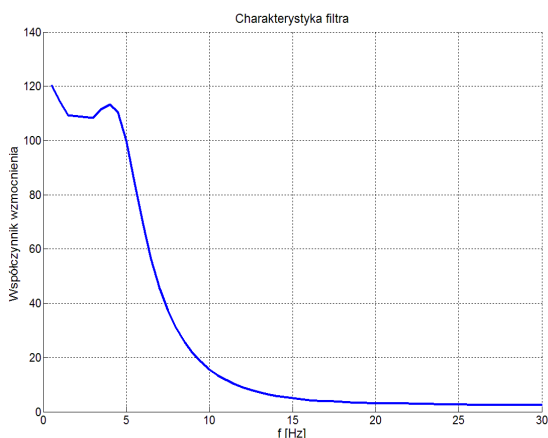
Rys. 4. Ilustracja przebiegu strumienia dla 2 uszkodzonych prętów

Tabela 1 przedstawia wartości skuteczne napięć, uzyskanych za pomocą przyrządu.

Tabela 1. Wartości skuteczne napięć sygnału diagnostycznego

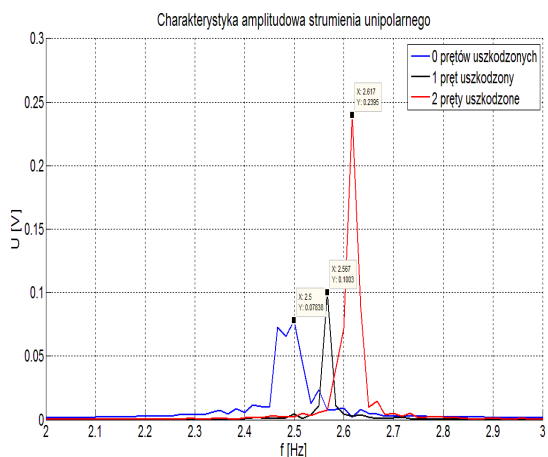
Uszkodzone pręty	U_Ψ [V]	$U_{\Psi F}$ [V]
0	0,63	0,95
1	0,64	1,50
2	0,68	2,75

W obu przypadkach w przebiegach strumienia nieodfiltrowanego (kolor niebieski) widać wyraźne modulacje o częstotliwości prądu wirnika, o większej amplitudzie dla 2 pękniętych prętów. Przebiegi strumienia po odfiltrowaniu i wzmocnieniu zaznaczono kolorem czerwonym. W obu przypadkach współczynnik wzmocnienia był podobny (15.9 i 13.9), różnice wynikały z nieco innych częstotliwości prądu wirnika (2.617 i 2.567 Hz) i charakterystyki filtra (Rys. 5).

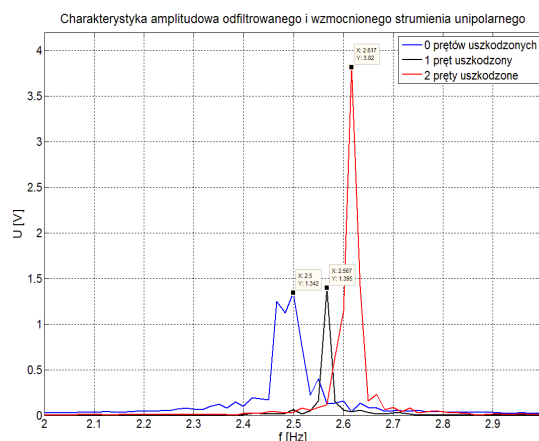


Rys. 5. Charakterystyka filtra

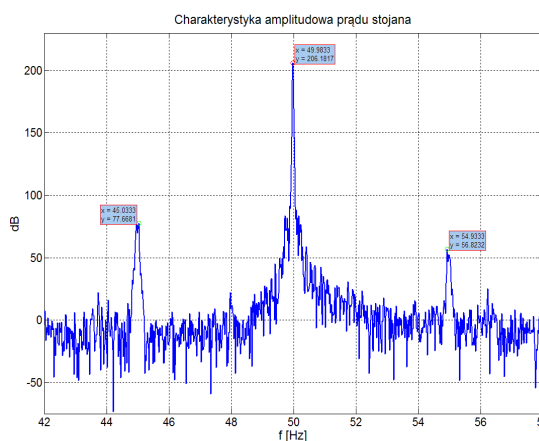
Dla dalszych porównań wykonano analizy widmowe przebiegów w przedziale częstotliwości do 3 Hz (Rys. 6 i 7). Z obu rysunków wynika również silna zależność amplitud od zakresu defektu klatki.



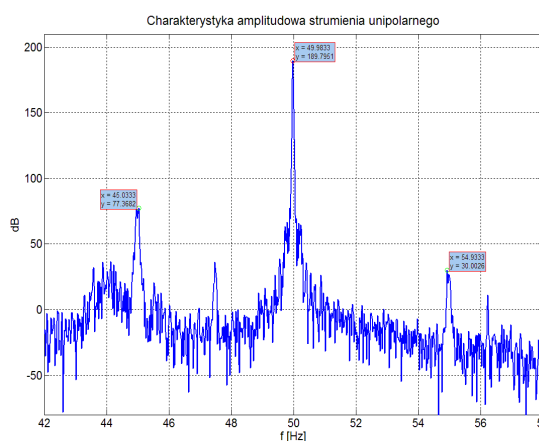
Rys. 6. Widma przebiegów strumieni w zakresie do 3 Hz



Rys. 7. Widma przebiegów strumieni w zakresie do 3 Hz po wzmocnieniu



Rys. 8. Widmo prądu dla klatki bez widocznego na zewnątrz uszkodzenia



Rys. 9. Widmo strumienia dla klatki bez widocznego na zewnątrz uszkodzenia

Dla uwiarygodnienia proponowanej metody wstępnego diagnozowania klatki z wykorzystaniem strumienia dokonano porównania widm prądu i strumienia w przedziale 42 - 58 Hz. Rys.8 i 9 dotyczą widm dla silnika bez wido-

cznego uszkodzenia klatki (choć jako klatka odlewana, wydaje się, sądząc po obu widmach, posiadać jakieś defekty wewnętrzne typu wżery lub bąble powietrzne), Rys.10 i 11 - z uszkodzeniem 1 pręta, zaś Rys.12 i 13 - z uszkodzeniem 2 prętów. Widać bardzo dobrą odpowiedniość widm prądu i strumienia. W oparciu o wymienione widma dokonano wyliczenia wskaźników defektu klatki RFI (Rotor Fault Index), wg formuły:

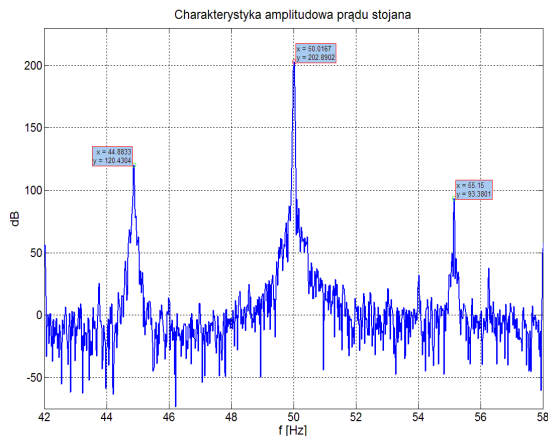
$$RFI = p \cdot \frac{A_1}{A_0} \quad (1)$$

gdzie:

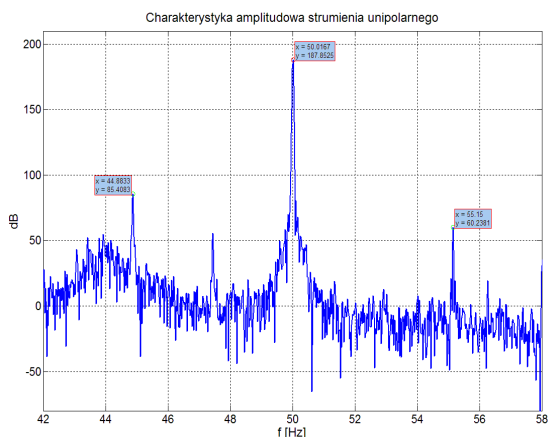
p – liczba par biegunów

A_1 -amplituda składowej poślizgowej $f_0 (1 - 2s)$,

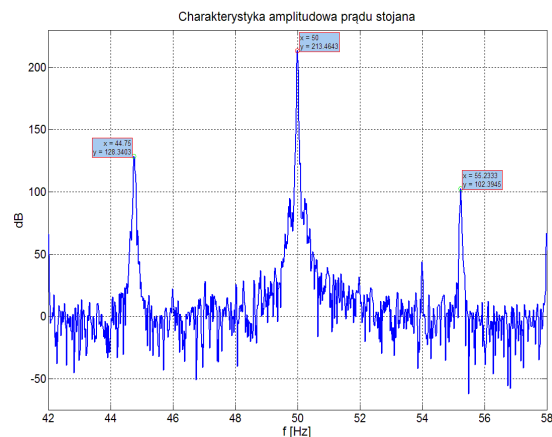
A_0 - amplituda podstawowej harmonicznej zasilania f_0



Rys. 10. Widmo prądu dla 1 uszkodzonego pręta

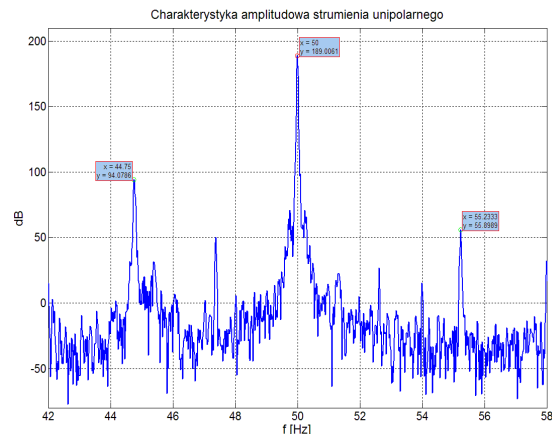


Rys. 11. Widmo strumienia dla 1 uszkodzonego pręta

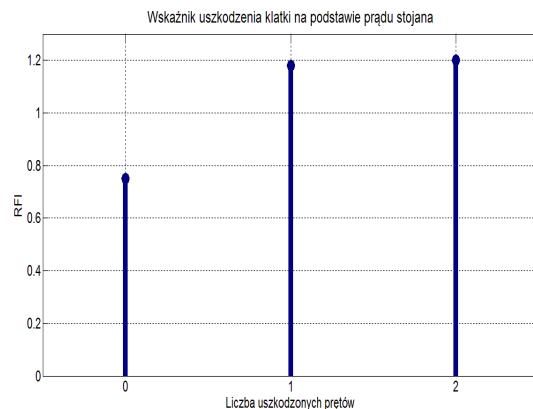


Rys. 12. Widmo prądu dla 2 uszkodzonych prętów

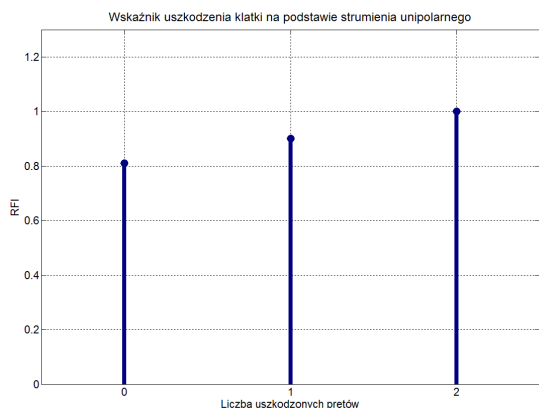
Współczynniki te są przedstawione na Rys.14 - na podstawie widma prądu oraz na Rys.15 - na podstawie widma strumienia.



Rys. 13. Widmo strumienia dla 2 uszkodzonych prętów



Rys. 14. Wskaźnik uszkodzenia klatki na podstawie prądu stojana



Rys. 15. Wskaźnik uszkodzenia klatki na podstawie strumienia unipolarnego

W Tabeli 2 zgromadzono istotne wielkości dla oceny i weryfikacji stanu klatki po wykonanych pomiarach.

Tabela 2. Wielkości istotne do oceny i weryfikacji stanu badanego silnika

Uszkodzone pręty	A_{ψ} [V]	$A_{\psi F}$ [V]	f_2 [Hz]	n [obr/min]	RFI_{Is}	RFI_{ψ}
0	0,078	1,34	2,500	1424,5	0,75	0,81
1	0,100	1,40	2,567	1423,5	1,18	0,90
2	0,249	2,60	2,617	1421,5	1,20	1,00

3. Podsumowanie

W oparciu o przyrząd, będący przedmiotem tego artykułu, można szybko wstępnie ocenić stan klatki silnika indukcyjnego, porównując bieżący wynik z poprzednim. Pomiar jest szybki, bezpieczny i nie wymaga uruchamiania procedur, zazwyczaj wymaganych przy korzystaniu z obwodów wtórnych silników wysokonapięciowych lub bezpośrednich obwodów pierwotnych silnik niskonapięciowych. Znaczący wzrost wartości skutecznej sygnału pomiarowego może być oznaką dalszej degradacji klatki i na jego podstawie można zarządzić dokładne badanie prądu lub strumienia podczas rozruchu lub widma w stanie ustalonym. Przyrząd ten jest szczególnie dedykowany energetyce zawodowej i elektrociepłowniom.

4. Literatura

[1]. Dorrell D.G., Thomson W.T., Roach S.: *Analysis of airgap flux, current, and vibration signals as a function of the combination of static and dynamic air-gap eccentricity in 3-phase induction motors*, IEEE Transactions on Industry Applications, 1997, 33(1), pp. 24-34.

[2]. Voitto Kokko: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*, Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.

[3]. Chmelík K., Foldyna J., Mišák S.: *Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití*, ElectroScope, 2007, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

[4]. Frosini L., Borin A., Girometta, L., Venchi G.: *Development of a leakage flux measurement system for condition monitoring of electrical drives*. 2011 IEEE International Symposium on SDEMPED, 5-8 Sept. 2011, pp.356 – 363.

[5]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guziec K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 99, 2013, wyd. BOBRME Komel, s. 85-90.

[6]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A.: *Wykorzystanie strumienia poosiowego do badania stanów dynamicznych maszyn indukcyjnych małej i dużej mocy*; Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 2 (102) 2014.

Autorzy

mgr inż. A. Duda, aduda@pk.edu.pl
 dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl
 dr inż. M. Sułowicz, pesulowi@cyf-kr.edu.pl
 Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii, 31-155 Kraków, ul. Warszawska 24
 mgr inż. K. Guziec, office@senco.krakow.pl
 SENCO Sp. z o.o., 30-716 Kraków
 ul. Albatrosów 10a