

Maciej Sułowicz, Janusz Petryna, Konrad Weinreb, Arkadiusz Duda, Jarosław Tulicki
Politechnika Krakowska, Kraków

OCENA WIARYGODNOŚCI I PRZYDATNOŚCI SYGNAŁÓW DIAGNOSTYCZNYCH DO BEZINWAZYJNEJ OCENY STANU MASZYN ELEKTRYCZNYCH

EVALUATION OF THE RELIABILITY AND USEFULNESS OF DIAGNOSTIC SIGNALS FOR NONINVASIVE ASSESSMENT OF ELECTRICAL MACHINES STATES

Streszczenie: W artykule przedstawiono analizy sygnałów diagnostycznych prądów i strumienia poosiowego, które rejestrowano w różnych możliwych dostępnych punktach pomiarowych. Na przykładach wykonanych pomiarów na stacji prób i w laboratorium badawczym przeprowadzono szczegółowe analizy diagnostyczne. Dla sygnałów prądowych przeprowadzono analizę sygnałów rejestrowanych w obwodach wtórnych przekładników prądowych przy pomocy przetworników hallotronowych oraz prądów rejestrowanych w obwodach pierwotnych maszyn wysokonapięciowych przy użyciu cewek Rogowskiego. Dla strumienia poosiowego pokazano, jakie istotne symptomy diagnostyczne są możliwe do zarejestrowania przy pomocy tej metody pomiarowej. Przedstawiono szczegółowe wnioski autorów co do wiarygodności stosowanych pomiarów prądów w obwodach pierwotnych i obwodach wtórnych przekładników oraz przydatności metody pomiaru strumienia poosiowego do szybkiej wstępnej oceny stanu maszyny. W podsumowaniu przedstawiono zalecenia i wytyczne co do użycia konkretnych metod pomiarowych w zależności od możliwości pomiarowych i dokładności oraz szczegółowości diagnozy, którą chcemy uzyskać co do stanu maszyny.

Abstract: The paper presents analyses of diagnostic signals of currents and axial flux, which were recorded in various possible available measuring points. Some detailed diagnostic analyses based on examples of the measurements made in industry and at the testing station were carried out. For current signals, there was performed an analysis of signals recorded in the secondary circuits of current transformers using Hall effect sensors and an analysis of currents recorded in the primary circuits of high voltage machines with use of Rogowski coils as well. For an axial flux it appeared which important diagnostic symptoms are possible to record using this method of measurement. Some detailed conclusions of the authors about the reliability of applied technique of measurements of currents in the primary main circuits and secondary circuits of current transformers and the usefulness of axial flux measurement method for quick initial evaluation of the machine condition are also included. In the summary submitted are recommendations and guidelines on the use of specific methods of measurement depending on the measuring capability, accuracy and particularity of the diagnosis we want to get about the condition of the machine.

Słowa kluczowe: cęgi prądowe, cewka Rogowskiego, wiarygodność pomiaru

Keywords: clamp current probe, Rogowski coil, credibility of measurement

1. Wstęp

W ostatnich latach można zaobserwować wzrost zainteresowania bezinwazyjną diagnostyką stanu maszyn elektrycznych pracujących w układach napędowych oraz w złożonych systemach wytwarzania energii [2], [3], [4], [5], [8], [9], [11-20]. Zawdzięczamy to znacznemu postępowi w rozwoju dedykowanych przenośnych lub stacjonarnych systemów monitoringu i diagnostyki maszyn [3], [16], [17], [19]. Diagnostyka stanu maszyn jest coraz bardziej powszechna i nietrudno wskazać ekonomiczną opłacalność okresowo czy ciągle prowadzonych działań diagnostycznych [16-19].

Głównym zadaniem diagnostyki eksploatacyjnej maszyn elektrycznych jest określanie ich stanu technicznego za pomocą obiektywnych metod i środków [1]. Metody te powinny pomóc określić z maksymalnie dużym prawdopodobieństwem, jak długo badana maszyna może pracować bez większego ryzyka wystąpienia uszkodzenia czy awarii [1], [16-19]. W celu zapewnienia wiarygodnej oceny z wykorzystaniem metody diagnostycznej, którą stosujemy do określenia stanu maszyny, musimy być pewni co do poprawności zbierania

i przetwarzania sygnałów diagnostycznych podczas całego procesu oceny diagnostycznej.

W diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych do oceny: ekscentryczności, stanu klatki, stanu uzwojeń czy łożysk można zastosować metodę pomiaru i analizy prądu stojana [2], [3], [8], [9], [14], [17], [18], [19]. Takie podejście jest chętnie i często stosowane, gdyż w sygnale prądu są zawarte symptomy prawie wszystkich uszkodzeń, które mogą wystąpić w tych maszynach. Utrudnieniem analizy jest w tym przypadku umiejętnie wydobyć określonego symptomu diagnostycznego z sygnału podstawowego.

Pomiar prądu możemy wykonać przy pomocy przetworników hallotronowych cęgowych lub zabudowanych na stałe modułów przetworników LEM [10]. Przetworniki te należy zamontować bezpośrednio na przewodach zasilających lub w obwodach wtórnych przekładników prądowych [3], [4], [14], [18].

Do pomiarów diagnostycznych można również użyć cewek Rogowskiego, które są coraz chętniej stosowane w diagnostyce maszyn i układów energoelektronicznych [4], [5], [19]. Zastosowanie dedykowanych cewek Rogowskiego i sprzętu pomiarowego, umożliwiającego próbkowanie sygnału z częstotliwością około 1MHz, pozwala w prosty i bezinwazyjny sposób dokonać pomiaru wyładowań niezupełnych i oceny on-line stanu izolacji maszyn.

W diagnostyce stanu maszyn elektrycznych istotnym i cennym sygnałem diagnostycznym jest sygnał strumienia poosiowego. W sygnale tym są zawarte wszystkie te same symptomy, jak w sygnale prądowym, ale też dodatkowe informacje, pozwalające oszacować prędkość czy moment na wale. Przy użyciu prostej cewki pomiarowej i układu rejestrującego można w łatwy i szybki sposób przeprowadzić ocenę stanu maszyny [15], [20].

Wiarygodna ocena stanu diagnozowanych maszyn elektrycznych zależy od użytych przetworników i urządzeń pomiarowych oraz stosowanych metod przetwarzania i analizy sygnałów diagnostycznych.

W dalszej części artykułu zostaną przedstawione wyniki przeprowadzonych przez autorów eksperymentów, pokazujące pomiar i analizę sygnałów diagnostycznych w różnych dostępnych punktach pomiarowych na stanowisku prób i badań maszyn elektrycznych w przemyśle. Przeprowadzone badania i analizy mają na celu zwrócenie uwagi na problemy

występujące podczas wykonywania pomiarów diagnostycznych maszyn w laboratorium, stacji prób czy miejscu pracy maszyny.

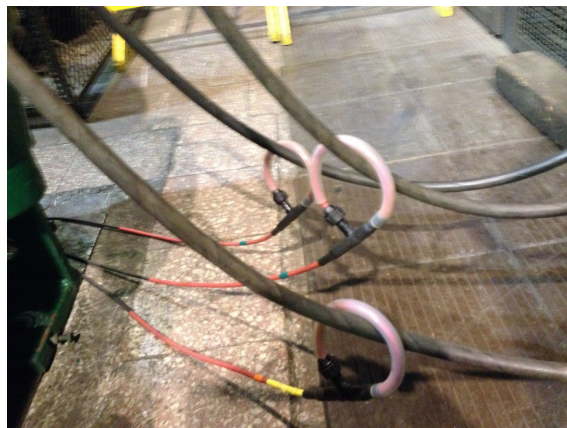
2. Pomiary diagnostyczne w różnych dostępnych punktach pomiarowych

2.1. Sposób zamontowania elementów pomiarowych i rejestracji sygnałów diagnostycznych

Na stacji prób przeprowadzono eksperymenty, mające na celu rozstrzygnięcie wątpliwości co do możliwości wykonania pomiarów diagnostycznych w różnych dostępnych punktach pomiarowych.



Rys. 1. Pomiar prądów fazowych w obwodach pierwotnych z wykorzystaniem elastycznych cewek Rogowskiego

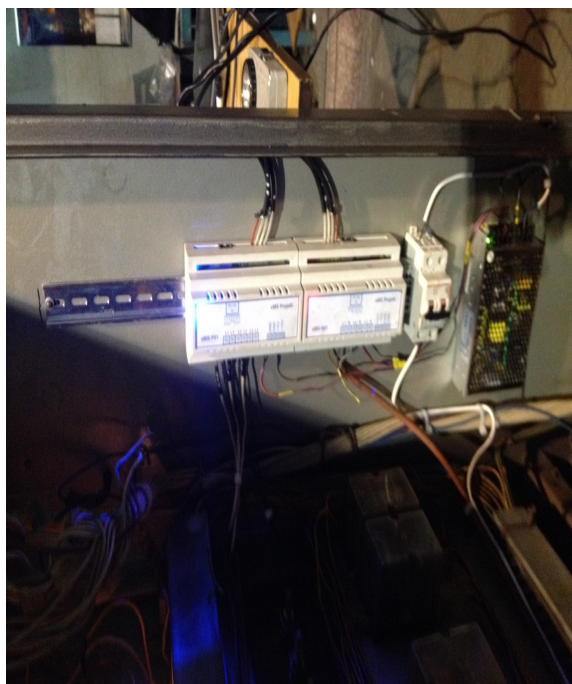


Rys. 2. Widok cewek Rogowskiego zapiętych na przewodach zasilających badany silnik

Na Rys.1 i Rys.2 przedstawiono cewki Rogowskiego związane na przewodach zasilających badany silnik. Ten sposób pomiaru wydaje się być jednym z najbardziej wiarygodnych sposobów wykonania pomiarów na potrzeby oceny stanu badanych maszyn.



Rys. 3. Pomiar prądu w obwodach wtórnych przekładników prądowych przy pomocy hallotronowych sond pomiarowych



Rys. 4. Pomiar prądów fazowych w obwodach wtórnych przekładników przy pomocy modułów pomiarowych z przetwornikami LEM

Na Rys.3 przedstawiono sposób zapięcia hallotronowych cęgów do pomiaru prądu w obwodach wtórnych przekładników prądowych. Do pomiaru użyto cęgi A622 firmy Tektronix. Na Rys.4 przedstawiono zamontowane, również w obwodach wtórnych przekładników prądowych, moduły pomiarowe eMS-P01 z przetwornikami prądowymi HY-5 oraz moduły pomiarowe z przetwornikami napięciowymi LV-25.

Na Rys.5 przedstawiono miejsce umieszczenia cewki do pomiaru strumienia poosiowego. Jest to cewka z dodatkowym uchwytem, przez co łatwo można ją przytrzymać przy wale badanej maszyny od strony wentylatora albo ustawić na stałe w jednym miejscu z wykorzystaniem dodatkowych elementów niemagnetycznych, które nie zakłócą rozkładu strumienia poosiowego wokół wału badanej maszyny.



Rys. 5. Pomiar strumienia poosiowego dla silnika wysokonapięciowego dużej mocy

Na Rys.6 przedstawiono układ pomiarowy z kartą pomiarową NI USB 6259, komputerem przenośnym oraz przewodami doprowadzającymi sygnały diagnostyczne do karty pomiarowej: z cęgów pomiarowych, modułów przetworników LEM, cewek Rogowskiego oraz sygnału z cewki pomiarowej proporcjonalnego do strumienia poosiowego. Łącznie do karty pomiarowej podpięto 10 sygnałów. Sygnały z wszystkich przetworników pomiarowych rejestrowano równocześnie z częstotliwością próbkowania dla każdego kanału równą 100 kHz.

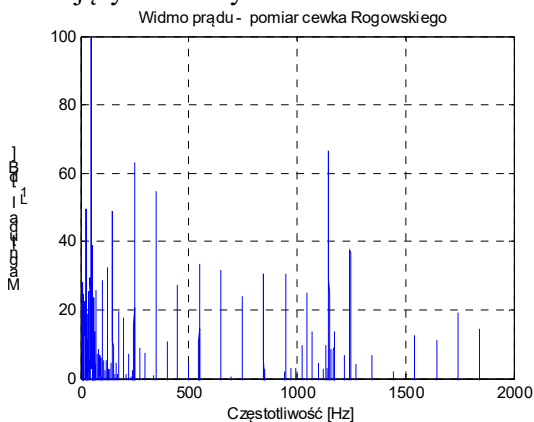


Rys. 6. Zestawiony układ pomiarowy dla równoczesnego pomiaru sygnałów w obwodach wtórnych i pierwotnych przekładników

Zarejestrowano wszystkie sygnały dla 20 dziesięciosekundowych okresów zbierania danych. W dalszej części przedstawiono wyniki analizy widmowej dla uśrednionych wartości sygnałów z dwustu-sekundowego przedziału rejestracji. Pomiary wykonano na stacji prób dla silnika SZJr-148/18s/04 o danych znamionowych: $P_N=700\text{kW}$, $U_N=6000\text{V}$, $I_N=90\text{A}$, $n_N=740$ obr/min. Silnik był zasilony z zespołu elektromaszynowego z generatorem synchronicznym, umożliwiającym płynną regulację napięcia podczas badań.

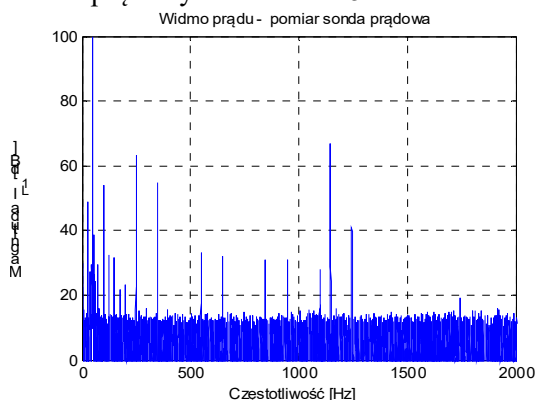
2.2. Analiza sygnałów diagnostycznych zarejestrowanych w różnych punktach pomiarowych

Zarejestrowane dane poddano analizie. Na Rys.7 przedstawiono widmo prądu stojana, uzyskane z sygnału zarejestrowanego z cewki Rogowskiego, opiętej wokół jednego z przewodów zasilających badany silnik.

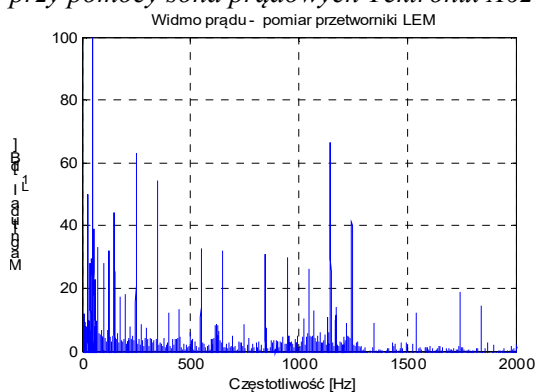


Rys. 7. Widmo prądu stojana rejestrowane przy pomocy cewki Rogowskiego

Na Rys.8 przedstawiono widmo prądu stojana silnika zarejestrowanego w obwodzie wtórnym pomiarowego przekładnika prądowego klasy 0,2. Na Rys.9 przedstawiono widmo prądu stojana zarejestrowanego przy pomocy przetworników prądowych LEM HY-5.

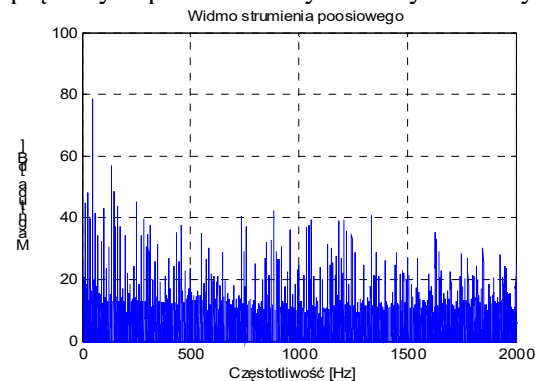


Rys. 8. Widmo prądu stojana zarejestrowanego przy pomocy sond prądowych Tektronix A622



Rys. 9. Widmo prądu stojana zarejestrowanego przy pomocy przetworników LEM HY-5

Na Rys.10 przedstawiono widmo sygnału napięciowego, proporcjonalnego do pochodnej strumienia poosiowego. Widoczne jest znaczne podobieństwo tego sygnału do sygnałów prądowych przedstawionych na Rys.7 do Rys.9.



Rys. 10. Widmo pochodnej strumienia poosiowego rejestrowanego przy pomocy dedykowanej cewki pomiarowej umieszczonej od strony wentylatora

Na podstawie przedstawionych na Rys.7 do Rys.9 widm można wnioskować, że zasadniczo nie ma większych różnic w amplitudach istotnych częstotliwości uwzględnianych w ocenie stanu badanego silnika. Nie widać wyraźnego zniekształcenia i tłumienia sygnału w obwodzie wtórnym przekładnika. W widmie pochodnej strumienia poosiowego jakościowo podobnego do widma prądu zawarte są jeszcze dodatkowe częstotliwości, które mogą być wykorzystane do oceny diagnostycznej badanej maszyny.

2.3. Badanie przenoszenia przez przekładnik sygnałów o wyższych częstotliwościach

W celu zbadania, czy użyte w pomiarach przekładniki prądowe przenoszą wyższe częstotliwości sygnałów bez ich znacznego tłumienia i zniekształcenia, przeprowadzono następujący eksperyment. Zasilono na stacji prób stojan silnika 200 kW z przetwornicy częstotliwości, na wyjściu której możliwe było uzyskanie napięcia sinusoidalnego o częstotliwości 2,4 kHz. Zestawiono układ pomiarowy i zmierzono prąd cęgami prądowymi A622 bezpośrednio w przewodzie zasilającym stojan silnika oraz w obwodzie wtórnym przekładnika prądowego MSB ASK 41.1 o przekładni 50/5 i kl. 1. Zestawiony układ pomiarowy przedstawiono na Rys.11.

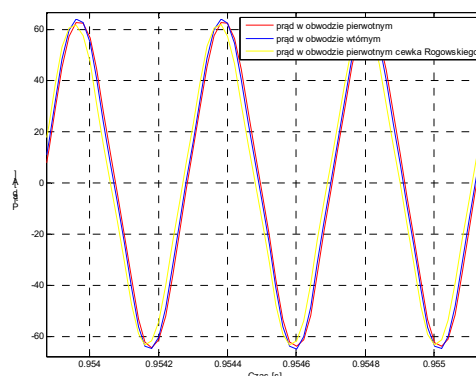


Rys. 11. Zestawiony układ pomiarowy do badania przekładnika na stacji prób

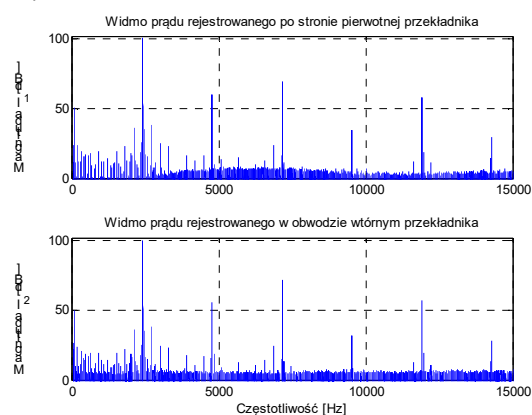
Dodatkowo na przewodzie zasilającym stojan silnika zapięto elastyczną cewkę Rogowskiego CWT15. Sygnały rejestrowano przy pomocy karty pomiarowej NI USB 6259. Na Rys. 12 przedstawiono przebiegi czasowe prądów.

Przy skalowaniu sygnałów, prąd w obwodzie wtórnym przemnożono przez przekładnię prądową przekładnika. Na Rys.13 przedstawiono

porównanie widm prądów rejestrowanych bezpośrednio w przewodzie zasilającym stojan oraz w obwodzie wtórnym przekładnika.



Rys. 12. Przebiegi czasowe prądów mierzonych w obwodzie stojana przy zasilaniu z przetwornicy częstotliwości 2,4 kHz



Rys. 13. Porównanie widm prądów mierzonych w obwodzie stojana przy zasilaniu z przetwornicy częstotliwości 2,4 kHz

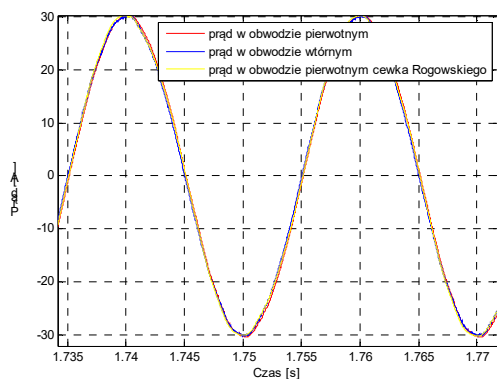
Z przedstawionego na Rys.13 porównania widm sygnałów rejestrowanych po stronie pierwotnej i wtórnej przekładnika prądowego jednoznacznie wynika, że przekładnik prądowy nawet klasy 1, przenosi bez zniekształceń częstotliwości około 2,5 kHz. Oba widma przedstawione w skali logarymicznej są bardzo podobne. Nawet w zakresie częstotliwości około 15 kHz nie widać zniekształcenia i znacznego tłumienia charakterystycznych częstotliwości występujących w widmie sygnału. Eksperyment ten potwierdza wiarygodność stosowania w ocenie diagnostycznej sygnałów uzyskanych z obwodów wtórnych przekładników prądowych.

Podobny eksperyment z przenoszeniem sygnałów prądowych o częstotliwości 50 Hz przeprowadzono w laboratorium badawczym. Zestawiony układ pomiarowy z tym samym prze-

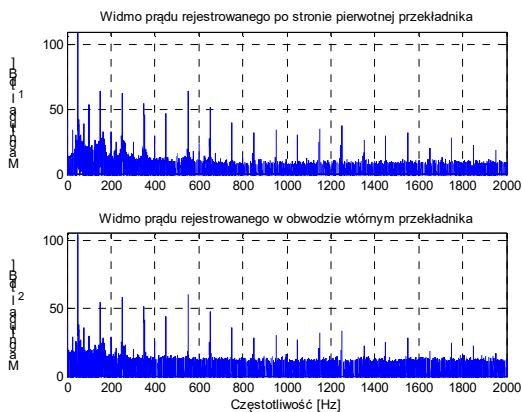
kładnikiem i opornicą suwakową wpiętą w obwodzie pierwotnym przekładnika przedstawiono na Rys.14. Podobnie, jak na stacji prób, rejestrowano sygnały przy pomocy cewki Rogowskiego i cęgów prądowych wpiętych w obwód pierwotny i wtórny przekładnika. Przebiegi prądów i widma przedstawiono odpowiednio na Rys.15 i Rys.16.



Rys. 14. Zestawiony układ pomiarowy do badania przekładnika w laboratorium



Rys. 15. Przebiegi czasowe prądów mierzonych w obwodzie z rezystancją przy zasilaniu z sieci



Rys. 16. Widmo prądu mierzonego w obwodzie z rezystancją przy zasilaniu z sieci 50 Hz

W tym przypadku również widma sygnałów są podobne. W zakresie częstotliwości powyżej 50 Hz widać dobrą jakościową zgodność sygnałów.

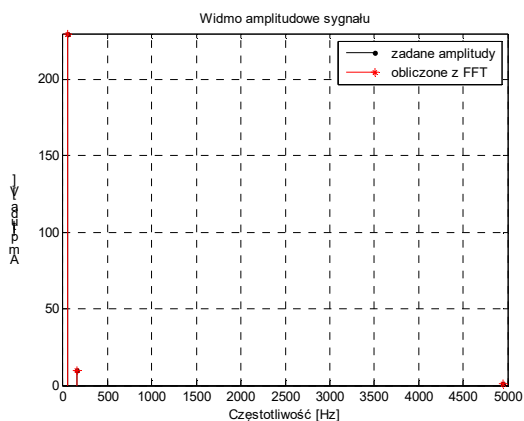
W literaturze i normach dotyczących przekładników trudno znaleźć wytyczne odnośnie sposobu badania przenoszenia wyższych częstotliwości przez przekładniki. Obowiązująca norma IEC 60044-1 [21] definiuje szereg wymagań odnośnie dopuszczalnych parametrów przekładnika, ale nie określa wymagań co do pasma przenoszenia wyższych częstotliwości przez przekładniki. Z punktu widzenia wiarygodności oceny stanu maszyn, podczas badań diagnostycznych z użyciem sygnału z obwodów wtórnych, wskazane byłoby posiadanie charakterystyk przenoszenia sygnałów przez przekładniki. Z porównania widm zamieszczonych na Rys.13 i Rys.16 można śmiało wnioskować, że przekładniki pomiarowe bez większych zniekształceń i znacznego tłumienia sygnałów przenoszą sygnały o częstotliwościach nawet do 15 kHz. W większości przypadków są to wystarczające przedziały częstotliwości, w których można znaleźć wszystkie ważne symptomy diagnostyczne.

3. Wiarygodność pomiarów związana z cyfrowym przetwarzaniem sygnałów

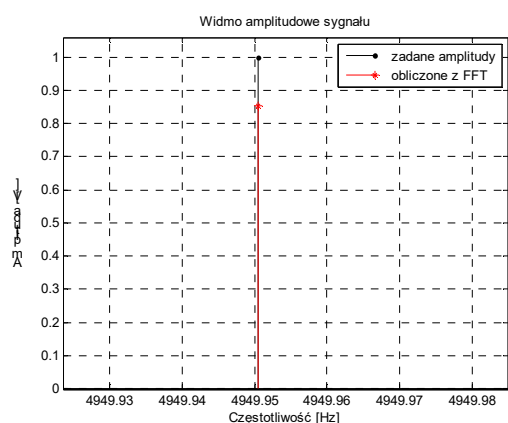
Podczas pomiarów diagnostycznych bardzo ważne jest też krytyczne spojrzenie na zastosowaną aparaturę pomiarową i odniesienie się do podstawowych zasad cyfrowego przetwarzania sygnałów oraz określenie niepewności pomiaru [6], [7]. Niepewność pomiarowa związana jest z wynikiem każdego pomiaru wielkości fizycznej i ma decydujące znaczenie dla jego wiarygodności [6]. Wynika ona z niedokładności urządzenia pomiarowego bądź innych czynników warunkujących poprawny pomiar. Jednym z ważniejszych czynników przy pomiarach diagnostycznych jest zapewnienie przez urządzenie rejestrujące właściwej częstotliwości próbkowania sygnałów. Przez zły dobór częstotliwości próbkowania możemy popełniać znaczne błędy przy ocenie amplitud harmonicznych o najwyższych częstotliwościach występujących w widmie sygnału. Dla ilustracji tego problemu zostanie przedstawiona ocena takiego błędu przetwarzania sygnału.

Na potrzebę analizy wygenerowano testowy sygnał napięciowy zawierający trzy harmoniczne o numerach 1, 3 i 99 oraz o amplitudach, odpowiednio 230V, 10V i 1V.

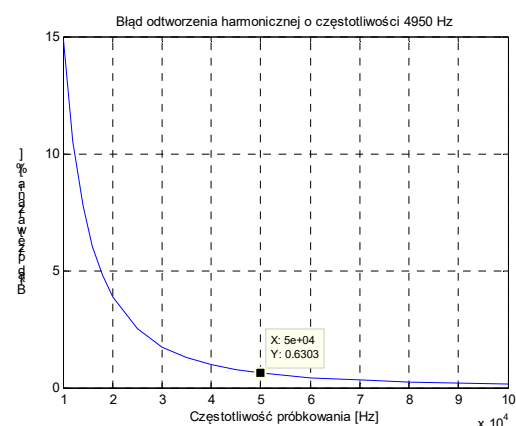
Na Rys. 17 i Rys.18 przedstawiono widma wygenerowanego sygnału. Na Rys.19 przedstawiono zależność błędu odtworzenia harmonicznej o najwyższej częstotliwości występującej w widmie sygnału, w funkcji częstotliwości próbkowania.



Rys. 17. Widmo amplitudowe sygnału testowego



Rys. 18. Widmo amplitudowe sygnału testowego - okno wokół najwyższej częstotliwości 4950 Hz



Rys. 19. Zależność błędu odtworzenia harmonicznej o najwyższej częstotliwości występującej w widmie sygnału, w funkcji częstotliwości próbkowania

Błąd przetwarzania harmonicznej o najwyższej częstotliwości występującej w widmie sygnału jest bliski 15%. Przy częstotliwości próbkowania 5 razy większej od granicznej częstotliwości Nyquista błąd ten jest na poziomie 0,6% i jest możliwy do zaakceptowania.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono najważniejsze aspekty wiarygodności stosowania różnych sygnałów diagnostycznych w bezinwazyjnej ocenie stanu maszyn elektrycznych. Przeprowadzone rozważania i analizy są próbą rozstrzygnięcia wątpliwości, czy diagnostyka stanu maszyn oparta na sygnałach z obwodów wtórnych przekładników oraz sygnału napięciowego proporcjonalnego do pochodnej strumienia poosiowego może być wiarygodną podstawą stopnia uszkodzenia maszyny. Wykazano, że sygnały z obwodów wtórnych typowych przekładników stosowanych w oprzyrządowaniu maszyn prądu przemiennego w energetyce i przemyśle są wystarczającej jakości dla przeprowadzenia rzetelnej diagnostyki. Jednocześnie zwrócono uwagę na przydatność cewek Rogowskiego do pełnej diagnostyki stanu maszyny (stan izolacji stojana, ciągłość uzwojeń wirnika pierścieniowego i klatkowego, ekscentryczności) oraz na przydatność pomiaru pochodnej strumienia poosiowego dla diagnostyki wirnika. Wykazano też, że bardzo istotny i mający wpływ na wynik analizy i tym samym na jakość diagnozy jest właściwy dobór częstotliwości próbkowania sygnału pomiarowego.

5. Literatura

- [1]. Cempel Cz.: *Diagnostyka wibroakustyczna maszyn*. PWN Warszawa, Warszawa 1989.
- [2]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M., Warzecha A., Maciołek W.: *Ocena skuteczności diagnostyki wirników silników klatkowych na podstawie widma prądów*. Materiały 13. Konferencji Energetyki „Energetyka - modernizacja i rozwój”, Kliczków, 10-12.09.2003, str. 167-176.
- [3]. Rams W., Rusek J.: *Praktyczna diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 68, 2004, wyd. BOBRME Komel, s. 1-5.
- [4]. Szymaniec S.: *Aspekty metrologiczna diagnostyki prądowej silników elektrycznych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 68, 2004, wyd. BOBRME Komel, s. 7-12.
- [5]. Szymaniec S.: *Diagnostyka maszyn indukcyjnych klatkowych z wykorzystaniem cewek Rogowskiego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 72, 2005, s. 167-172.

- [6]. Kuśnierek Z., Kalus-Jęcek B.: *Wzorce wielkości elektrycznych i ocena niepewności pomiaru*. Wydawnictwo Politechniki Łódzkiej, Łódź 2006.
- [7]. Zieliński T.J.: *Cyfrowe przetwarzanie sygnałów. Od teorii do zastosowań*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności 2007.
- [8]. Kowalski C.T., Kanior W.: *Ocena skuteczności analiz FFT, STFT i falkowej w wykrywaniu uszkodzeń wirnika silnika indukcyjnego*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej, Nr 60, Wrocław 2007.
- [9]. Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 83, 2009, s. 207-212.
- [10]. Ludwinek, K.: *Measurement of momentary currents by Hall linear sensor*. Przegląd Elektrotechniczny, Vol. 85, Issue 10, 2009, pp. 182-187.
- [11]. Głowacz A., Głowacz Z.: *Diagnostics of induction motor based on analysis of acoustic signals with application of FFT and classifier based on words*. Archives of Metallurgy and Materials, 2010 vol. 55, issue. 3, s. 707-712.
- [12]. Paduch P., Szymaniec S.: *Aparaturowe i metrologiczne aspekty diagnostyki maszyn elektrycznych w oparciu o sygnał prądowy*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 90, 2011, s. 69-74.
- [13]. Szymaniec S.: *Pomiary i analiza sygnałów dla potrzeb diagnostyki*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 94, 2012, s. 93-98.
- [14]. Sułowicz M., Petryna J., Weinreb K., Guziec K.: *Porównawcze pomiary defektów klatek rozruchowych silników indukcyjnych pod kątem wykorzystania w diagnostyce*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 99, 2013, s. 77-83.
- [15]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guziec K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 99, 2013, s. 85-90.
- [16]. Dwojak J., Szymaniec S.: *Diagnostyka eksploatacyjna zespołów maszynowych w energetyce*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.
- [17]. Kowalski C.T.: *Diagnostyka układów napędowych z silnikiem indukcyjnym z zastosowaniem metod sztucznej inteligencji*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, 2013.
- [18]. Swędrowski L.: *Pomiary w diagnostyce silników indukcyjnych klatkowych*, Wydawnictwo Politechniki Gdańskiej, Gdańsk 2013.
- [19]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.
- [20]. Biernat A., Góralski P.: *Zastosowanie pomiaru strumienia osiowego do okresowej diagnostyki silników indukcyjnych w zakładach przemysłowych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 104, 2014, s. 247-252.
- [21]. IEC 60044-1 Edition 1.2 2003-02. *Instrument transformers – Part 1: Current transformers*.

Autorzy

dr inż. M. Sułowicz, msulowicz@pk.edu.pl

dr inż. J. Petryna, jpetryna@pk.edu.pl

dr hab inż. K. Weinreb, prof. PK

kweinreb@pk.edu.pl

mgr inż. A. Duda, aduda@pk.edu.pl

mgr inż. J. Tulicki, jtulicki@pk.edu.pl

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii

31-155 Kraków, ul. Warszawska 24

Informacje dodatkowe

Praca została wykonana w ramach współpracy Politechniki Krakowskiej z firmą Eko-Energia Sp. z o.o. z Krakowa.