

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

DIAGNOSTYKA EKSCENTRYCZNOŚCI SILNIKA INDUKCYJNEGO W OPARCIU O POMIAR STRUMIENIA POOSIOWEGO

DIAGNOSING OF INDUCTION MOTOR ECCENTRICITY BASED ON THE MEASUREMENT OF AXIAL FLUX

Streszczenie: W diagnostyce maszyn indukcyjnych metoda analizy widma prądu silnika (MCSA) jest chętnie i z dobrym skutkiem stosowana, jeśli tylko istnieje możliwość rejestracji prądów w obwodzie pierwotnym lub wtórnym. Doświadczenia autorów wskazują, że do diagnostyki uzwojeń wirnika silników indukcyjnych można również wykorzystać łatwo mierzalny strumień poosiowy, istnieje bowiem dobra korelacja widm prądowych z widmami uzyskanymi z rejestracji napięcia, odwzorowującego strumień poosiowy silnika.

W sposób naturalny pojawia się pytanie, czy analiza widma strumienia może posłużyć także do oceny ekscentryczności wirnika. Analiza porównawcza widm prądu i strumienia pokazuje, że w obu widmach występują wszystkie charakterystyczne dla ekscentryczności częstotliwości, składowe im odpowiadające różnią się jednak amplitudami wyrażonymi w decybelach. Artykuł odpowie na pytanie, czy próba przeprowadzenia diagnozy ekscentryczności silnika w oparciu o pomiar strumienia poosiowego jest skuteczna. Będzie ona poddana konfrontacji z diagnozą przeprowadzoną w oparciu o pomiar prądu, uzyskany jednocześnie z pomiarem strumienia.

Abstract: The motor current spectrum analysis (MCSA) method is willingly and successfully used in condition monitoring of induction motors if it is possible to collect the currents in the primary or secondary circuits. The experience of the authors suggests that an easily measurable axial flux can also be used to the diagnosing of the rotor windings of induction motors, since there is a good correlation of current spectra to the spectra obtained from the collection of the voltage signal reproducing the axial flux of the motor.

A natural question arises whether the axial flux spectrum analysis can be used also to evaluate the eccentricity of the rotor. Comparative analysis of current and flux spectra shows that all the frequency components characteristic for eccentricity occur in both spectra however the corresponding amplitudes expressed in decibels, differ. The article will answer the question whether an attempt to perform a motor eccentricity diagnose based on the measurement of the axial flux is effective. It will be compared to the diagnosis carried out on the basis of simultaneously obtained current measurement.

1. Wstęp

W diagnostyce maszyn indukcyjnych oprócz rozpowszechnionej metody analizy widma prądu silnika (MCSA) konkurencyjną metodą jest metoda analizy łatwo mierzalnego i dostępnego strumienia poosiowego [3]. Zastosowanie takiego sygnału jest wielorakie. Doświadczenia autorów ze strumieniem obejmują diagnozowanie zwarć zwojowych, uszkodzeń klatki, pomiaru momentu dynamicznego i prędkości silników [4]. Celem tej pracy jest wykazanie, że przeprowadzenie diagnozy ekscentryczności silnika w oparciu o strumień daje dobre wyniki, które mogą być zweryfikowane poprzez diagnozę opartą na pomiarze prądu ze względu na dobrą korelację obu widm [8].

2. Obiekty badań i metoda analizy

2.1. Badania silnika 4 kW zasilanego z sieci

Pierwszym obiektem badań laboratoryjnych był silnik *Sg112M-4* o danych: $P_N = 4$ kW, $U_N = 380$ V (Δ), $I_N = 8.6$ A, $n_N = 1430$ obr/min, $p = 2$ i liczbie zębów stojana $N_s = 36$ i wirnika $N_r = 28$. Silnik był zasilony przy połączeniu uzwojenia stojana w gwiazdę i miał wymieniane wirniki, w tym: symetryczny, z przerwą pręta klatki oraz z mimośrodowym osadzeniem wału, odpowiadającym 40% ekscentryczności dynamicznej.

W diagnostyce wirnika, opartej na analizie **widma prądu** stojana, istotną jest znajomość podstawowej harmonicznej zębówkowej, która ma znaczącą amplitudę niezależnie od rodzaju asymetrii klatki i szczeliny powietrznej oraz występuje również dla nieuszkodzonego silnika [1], [2]. Dla badanego silnika o podanych wyżej danych harmoniczna ta ma częstotliwość f_s :

$$f_s = N_r f_r - f_0 \quad (1)$$

gdzie:

f_0 - częstotliwość podstawowej harmonicznnej w Hz;

$f_r = n / 60$ - częstotliwość wirnika w Hz;

n - obroty wirnika obr/min.

Dla wykrycia i oceny wymienionych rodzajów uszkodzenia wirnika należy zwrócić szczególną uwagę na zmiany amplitud następujących harmonicznnych:

- w otoczeniu podstawowej harmonicznnej, o częstotliwościach [1], [2]:

$$|f_0 - 2pf_r| \text{ i } |3f_0 - 2pf_r| \quad (2)$$

rozpoznawanych również jako:

$$f_0(1 \pm 2s) \quad (2a)$$

gdzie s – poślizg;

- w otoczeniu podstawowej żłobkowej harmonicznnej, o częstotliwościach dla tego silnika [1], [2]:

$$|f_0 + (gN_r - 2p)f_r| \text{ i } |3f_0 - (gN_r + 2p)f_r| \quad (3)$$

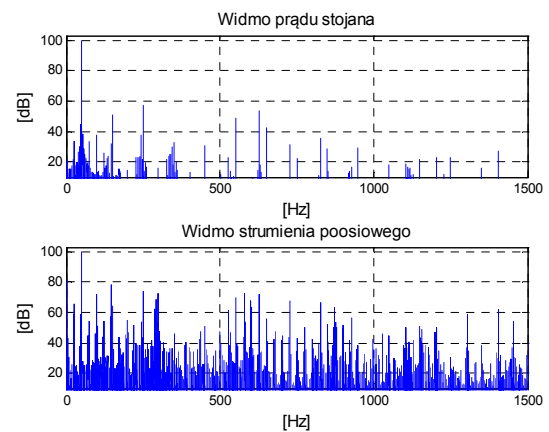
Dodatkowe informacje, potwierdzające uszkodzenie klatki wnosi znajomość zmian widma w pobliżu 5 i 7 harmonicznnej prądu stojana. Dodatkowe informacje, potwierdzające ekscentryczność wirnika wnosi znajomość zmian harmonicznnych widma prądu o częstotliwościach [1]:

$$N_s f_r \pm f_0 \quad (4)$$

W artykule te same kryteria oceny uszkodzenia wirnika, jakich użyto do analizy widm prądu, zastosowano do analizy widm strumienia.

2.1.1. Wyniki pomiarów i ich analiza

Na rys.1 przedstawiono widma prądu i strumienia dla symetrycznego wirnika. Widmo uzyskano z analizy sygnału uzyskanego z bezpośredniego pomiaru prądu w jednej fazie stojana przy użyciu hallotronowej sondy prądowej, zaś widmo strumienia w oparciu o pomiar strumienia cewką pomiarową zamontowaną wokół wału i zawierającą informacje pochodzące jednocześnie od wszystkich 3 faz stojana oraz wirnika. Jak widać na poniższym rysunku, widmo strumienia jest znacznie bogatsze, niż widmo prądu.



Rys. 1. Widma prądu fazowego i strumienia poosiowego silnika w analizowanym zakresie częstotliwości - symetria wirnika

2.1.2. Obliczanie prędkości obrotowej

Na przykładzie widm prądu i strumienia dla przypadku ekscentryczności w zakresie 0-55 Hz dokonano wyliczeń obrotów silnika (rys.4). Widmo strumienia zawiera zawsze wyróżniającą się częstotliwość prądu wirnika f_2 [3], [7]. W widmie prądu ta składowa także istnieje, choć nie zawsze się przebiega ponad tło.

Obroty zostały wyznaczone z harmonicznnych:

- widma strumienia poosiowego

$f_2 = sf_0 = 1.71$ Hz - częstotliwość prądu wirnika,

$f_s = f_0 = 49.98$ Hz - częstotliwość sieci,

$n = 60 \cdot f_0 \cdot (1 - f_2 / f_0) / p = 60 \cdot (f_0 - f_2) / p = 1448.1$

obr/min, zatem częstotliwość obrotowa wirnika

$f_r = n / 60 = 24.135$ Hz;

- harmonicznnej żłobkowej odczytanej z widma prądu (formuła (1)):

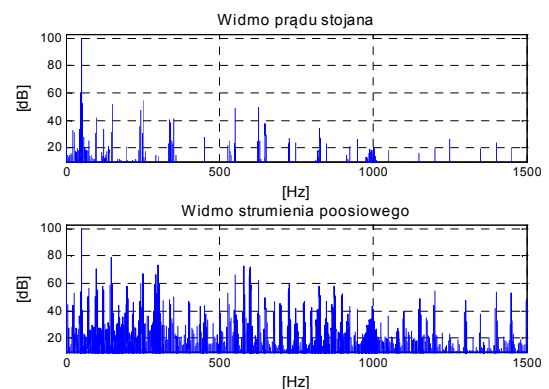
$f_s = 28f_r - f_0 = 625.81$ Hz, stąd $f_r = 24.135$ Hz,

zatem $n = 60f_r = 1448.1$ obr/min;

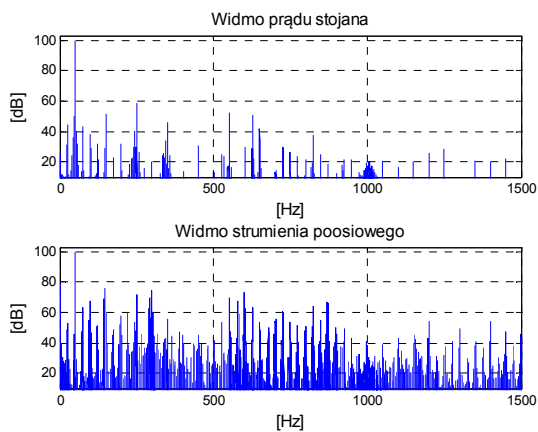
- harmonicznnej o częstotliwości $f_0(1 - 2s)$

$f_s = f_0 \cdot (1 - 2s) = 46.56$ Hz, stąd $s = 0.0342$,

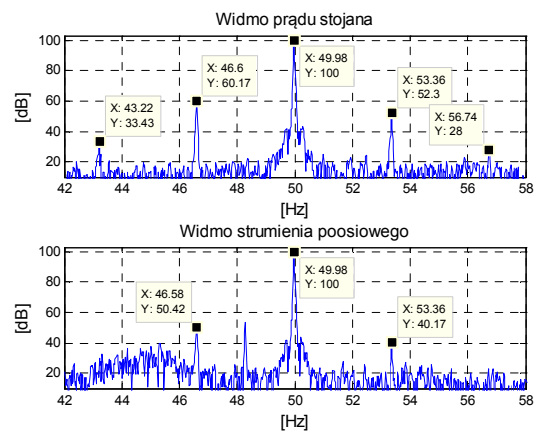
zatem $n = 60 \cdot f_0 \cdot (1 - s) / p = 1448.1$ obr/min.



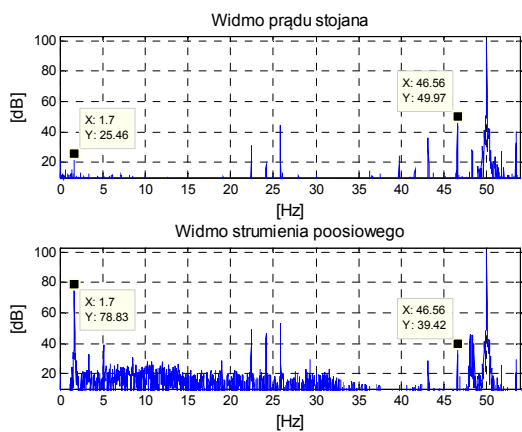
Rys. 2. Widma prądu fazowego i strumienia poosiowego silnika w analizowanym zakresie częstotliwości - przerwa 1 pręta wirnika



Rys. 3. Widma prądu fazowego i strumienia poosiowego silnika w analizowanym zakresie częstotliwości - ekscentryczność



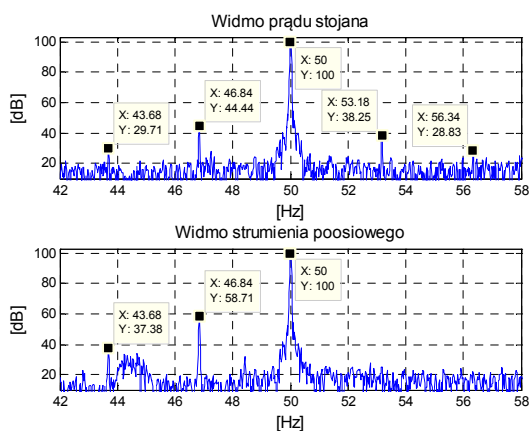
Rys. 6. Widma wokół częstotliwości zasilania - wirnik z przerwą 1 pręta



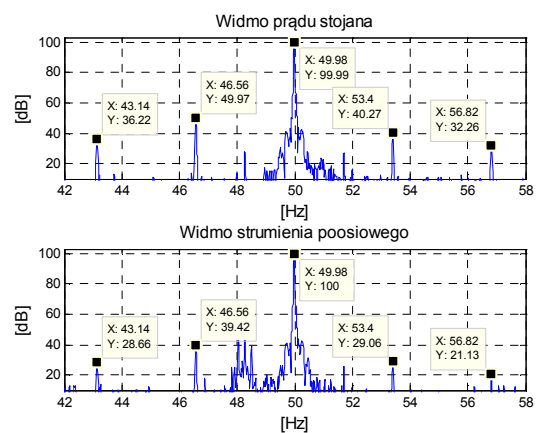
Rys. 4. Zaznaczone składowe widm, w oparciu o które obliczono obroty silnika

2.1.3. Porównanie harmonicznych w pobliżu podstawowej częstotliwości zasilania

Rysunki 5, 6 i 7 obrazują widma prądu stojana i strumienia w zakresie 42-58 Hz.



Rys. 5. Widma wokół częstotliwości zasilania - wirnik zewnętrznie symetryczny

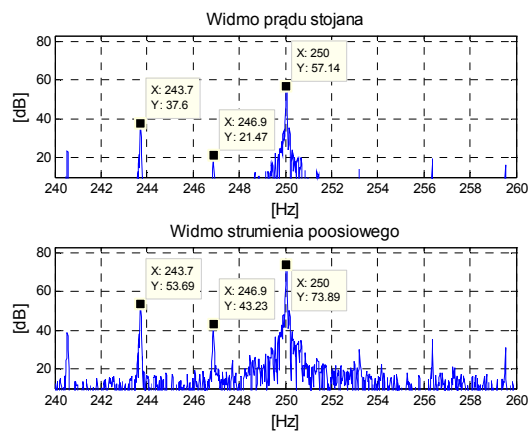


Rys. 7. Widma wokół częstotliwości zasilania - wirnik ekscentryczny

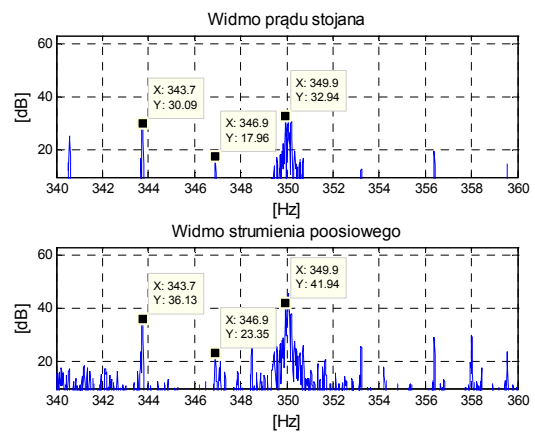
Składowe o takich samych częstotliwościach poślizgowych typu $f_0(1 \pm k2s)$ występują w widmie prądu i strumienia dla przypadków: symetrii, jednego uszkodzonego pręta oraz ekscentryczności. Mają one znaczenie dla oceny stanu klatki oraz ekscentryczności.

2.1.4. Porównanie harmonicznych w pobliżu 5 i 7 harmonicznej zasilania

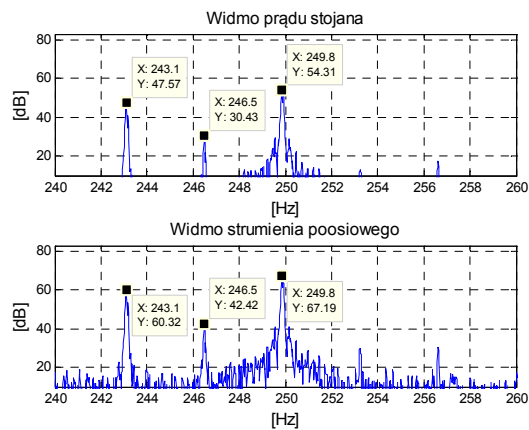
Ze względu na fakt, że jedną ze składowych właściwych dla ekscentryczności dynamicznej może także być ta o częstotliwości $f_0(1 - 2s)$, a więc taka sama jak dla defektu klatki, jako potwierdzenie uszkodzenia klatki uznaje się obecność wyraźnych składowych w pobliżu 5 i 7 harmonicznej zasilania, oddalonych od nich na lewo o $2sf_0$ i $4sf_0$ - rys.8, 9 i 10 oraz rys.11, 12 i 13.



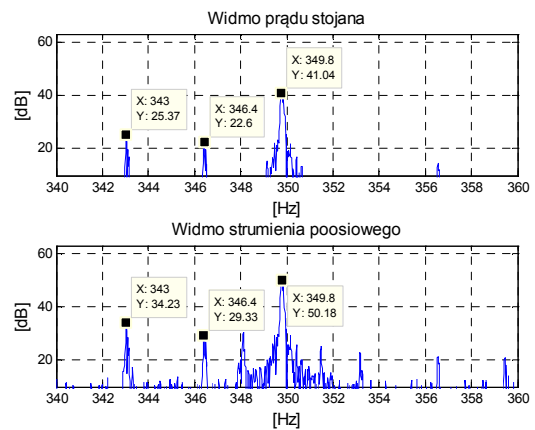
Rys. 8. Widma wokół 5 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik zewnętrznie symetryczny



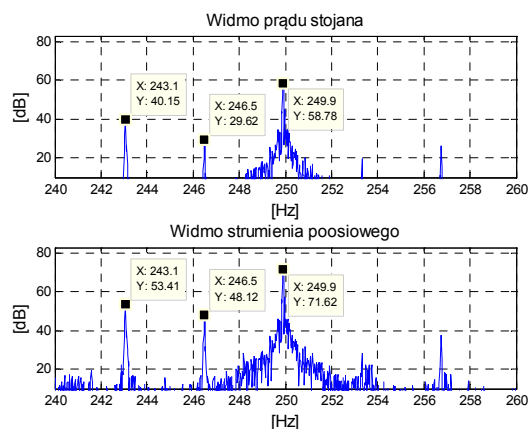
Rys. 11. Widma wokół 7 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik zewnętrznie symetryczny



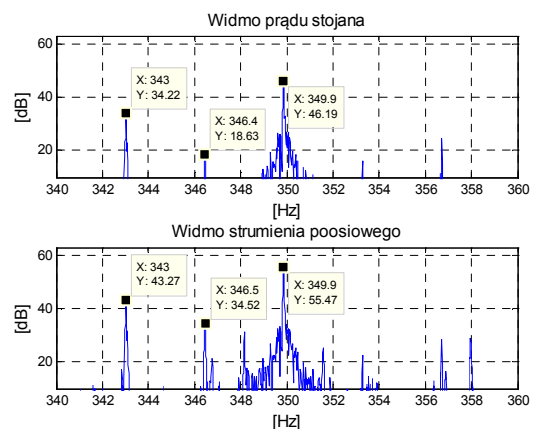
Rys. 9. Widma wokół 5 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik z przerwą 1 pręta



Rys. 12. Widma wokół 7 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik z przerwą 1 pręta



Rys. 10. Widma wokół 5 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik ekscentryczny



Rys. 13. Widma wokół 7 harmonicznej częstotliwości zasilania - wirnik ekscentryczny

2.1.5. Dodatkowe potwierdzenie ekscentryczności wirnika

W wyniku rozwoju ekscentryczności wzrastają amplitudy harmonicznych, których częstotliwości związane są z liczbą żłobków stojana N_s . Liczba ta jest dostępna na ogół tylko w KUS

(karcie uzwojenia silnika) i oszacowanie jej przy braku dokumentacji może być utrudnione.

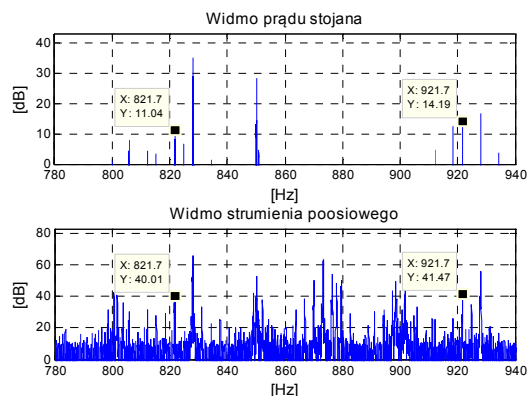
Częstotliwości tych harmonicznnych to:

$f_d = N_s f_r \pm f_0$, stąd dla częstotliwości wirnika $f_r = 24.135$ Hz otrzymujemy:

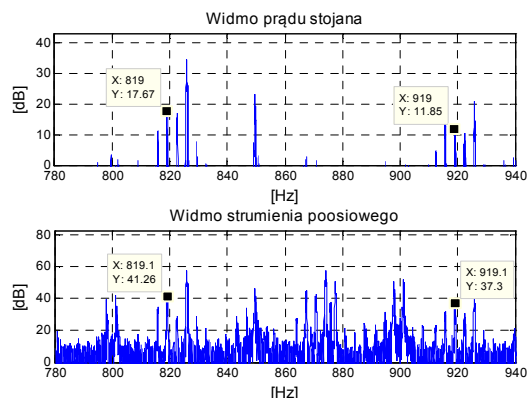
$$f_{d1} = 36 \cdot 24.135 - 49.98 = 818.9 \text{ Hz}$$

$$f_{d2} = 36 \cdot 24.135 + 49.98 = 918.9 \text{ Hz}$$

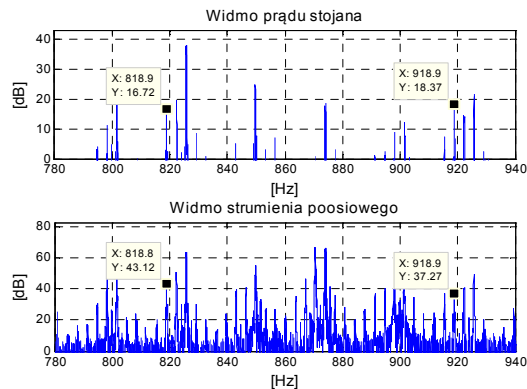
Rysunki 14, 15 i 16 ilustrują obecność tych składowych w widmach.



Rys. 14. Harmoniczne, których zmiany potwierdzają ekscentryczność wirnika - wirnik symetryczny



Rys. 15. Harmoniczne, których zmiany potwierdzają ekscentryczność wirnika - 1 pęknięty pręt

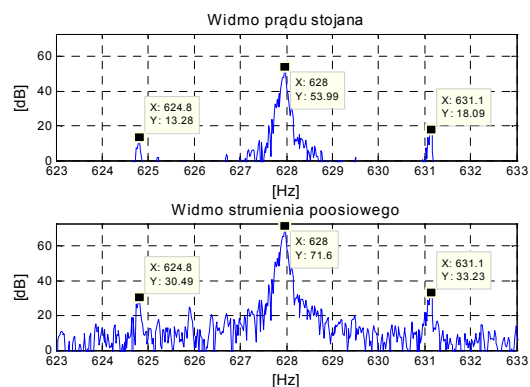


Rys. 16. Harmoniczne, których zmiany potwierdzają ekscentryczność wirnika - wirnik z dynamiczną ekscentrycznością

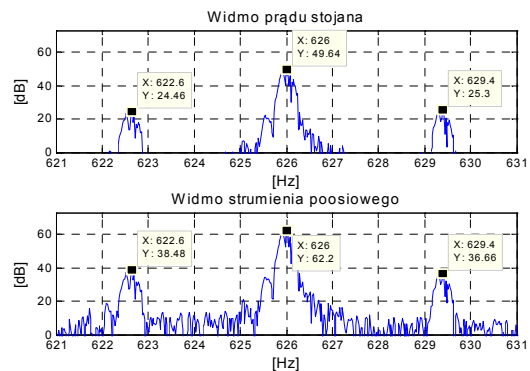
Należy zauważyć, że i tu w obu widmach występują podobne zmiany amplitud wymienionych harmonicznnych. Przeważnie harmoniczne widma strumienia mają większe amplitudy, przy ekscentryczności dodatkowo powiększonej w stosunku do przypadku wirnika osadzonego centrycznie.

2.1.6. Kryterium harmonicznnych obocznych względem podstawowej harmonicznej żłobkowej

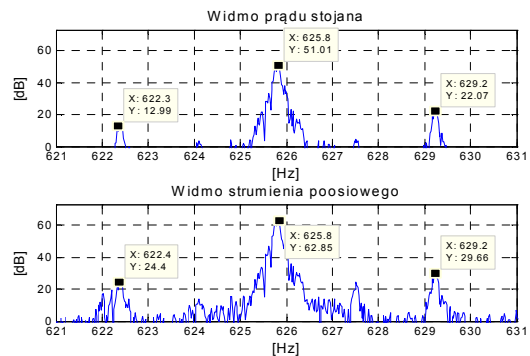
Jest to dodatkowe kryterium porównawcze, potwierdzające asymetrię klatki i szczeliny powietrznej.



Rys. 17. Okno wokół podstawowej harmonicznej żłobkowej – symetria



Rys. 18. Okno wokół podstawowej harmonicznej żłobkowej - 1 pęknięty pręt klatki



Rys. 19. Okno wokół podstawowej harmonicznej żłobkowej - ekscentryczność wirnika

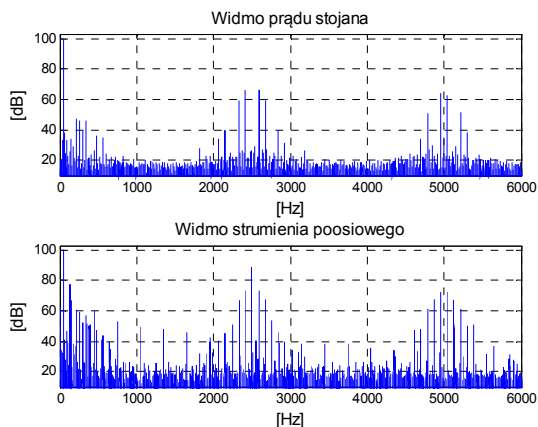
Harmoniczne oboczne względem podstawowej żłobkowej w wyniku defektu klatki mają zbliżone amplitudy, podczas gdy ekscentryczność dynamiczna je wyraźnie różnicuje. Właściwości te są ujawniane zarówno przy pomiarze prądu, jak i strumienia.

2.2. Badania silnika 785 kW zasilanego z falownika napięcia

Drugim obiektem badań był silnik napędu pompy w elektrociepłowni o danych: $P_N = 785$ kW, $U_N = 690$ V (Δ), $n_N = 1492$ obr/min, $I_N = 775$ A. Silnik był zasilany z falownika napięcia, przy połączeniu uzwojenia stojana w trójkąt. Częstotliwość impulsowania falownika (*switching frequency*) wynosiła 2 kHz. Stan wirnika i ekscentryczności nie były znane przed pomiarem.

2.2.1. Wyniki pomiarów i ich analiza

Na rys. 20 przedstawiono widma prądu i strumienia badanego silnika. Widmo prądu powstało w oparciu o pomiar prądu w jednej fazie **bezpośrednio w obwodzie pierwotnym na kablu zasilającym silnik** przy użyciu przekładnika cęgowego, zaś widmo strumienia w oparciu o pomiar strumienia cewką pomiarową wokół wału od strony wentylatora i zawiera informacje pochodzące jednocześnie od wszystkich 3 faz stojana oraz wirnika. Jak widać na poniższym rysunku, również i tu widmo strumienia jest bogatsze niż widmo prądu.

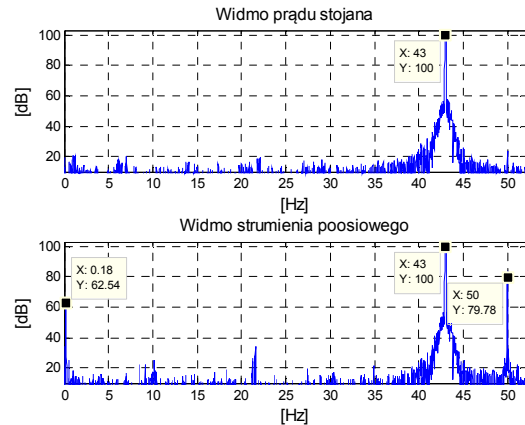


Rys. 20. Widma prądu fazowego i strumienia poosiowego silnika dla częstotliwości do 6 kHz

2.2.2. Obliczanie prędkości obrotowej

Na przykładzie widm prądu i strumienia dla przypadku ekscentryczności w zakresie 0-52 Hz dokonano wyliczeń obrotów silnika (rys. 21). Podczas badania częstotliwość podstawowej harmonicznej napięcia falownika wynosiła 43 Hz. Widmo strumienia zawiera częstotliwość

prądu wirnika f_2 . W widmie prądu składowej tej nie widać. Amplitudy harmonicznych widma zostały odniesione do przyjętej za 100dB amplitudy podstawowej harmonicznej o częstotliwości f_0 .

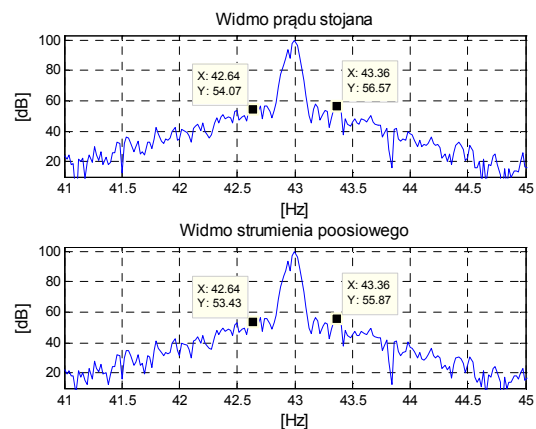


Rys. 21. Zaznaczona składowa widma strumienia, w oparciu o którą obliczono obroty silnika

Na podstawie odczytanych częstotliwości $f_2 = 0.18$ Hz i $f_0 = 43$ Hz wyliczone obroty $n = 60 \cdot f_0/p \cdot (1 - f_2/f_0) = 60/p \cdot (f_0 - f_2) = 1284.6$ obr/min, stąd: $f_r = 21.41$ Hz.

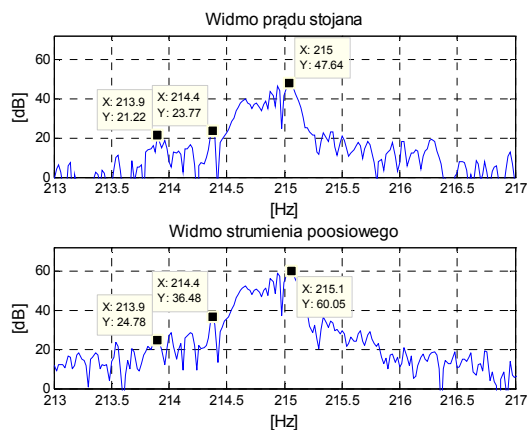
2.2.3. Porównanie harmonicznych w pobliżu podstawowej, 5 i 7 harmonicznej zasilania

Na rys. 22 przedstawiono widma prądu i strumienia wraz z zaznaczonymi harmonicznymi poślizgowymi.

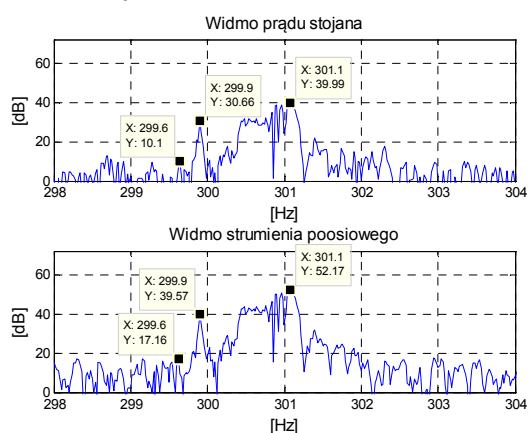


Rys. 22. Harmoniczne w pobliżu podstawowej harmonicznej zasilania

Na pierwszy rzut oka ich amplitudy nie sugerują defektu klatki, ale harmoniczne poślizgowe przy 5 i 7 harmonicznej zasilania (rys. 23, 24) wskazują na wyraźne uszkodzenie.



Rys. 23. Harmoniczne poślizgowe w pobliżu 5 harmonicznego zasilania



Rys. 24. Harmoniczne poślizgowe w pobliżu 7 harmonicznego zasilania

Tabela 1. Częstotliwości i amplitudy harmonicznym prądu stojana oraz strumienia poosiowego

Częstotliwość $f_s = kf_0 + lf_r $			Amplituda harmonicznym [dB]	
k	l	[Hz]	prądu	strumienia
1	-4	42.64	54.07	53.43
1	0	43	100	100
3	-4	43.36	56.57	55.87
1	-12	213.9	21.22	24.78
1	8	214.3	23.77	36.48
5	0	215	47.64	60.05
1	-16	299.6	10.1	17.6
1	12	299.9	30.66	39.57
7	0	301.1	39.99	52.17

W tabeli 1 przedstawiono częstotliwości i amplitudy harmonicznym prądu stojana oraz strumienia poosiowego dla częstotliwości zasilania $f_1 = f_0 = 43\text{Hz}$ i wirnika $f_r = 21.41\text{Hz}$.

Z danych tych wynika, że wartości amplitud harmonicznym widma prądu i widma strumienia, charakterystycznych dla uszkodzenia klatki

lub ekscentryczności dynamicznej, świadczą o zaawansowanej asymetrii rezystancji klatki.

2.2.4. Oszacowanie ekscentryczności wirnika

Ze względu na brak szczegółowych danych konstrukcyjnych silnika, w tym KUS, oszacowano w oparciu o analizę składowych widma najbardziej prawdopodobną liczbę zębów wirnika jako 50.

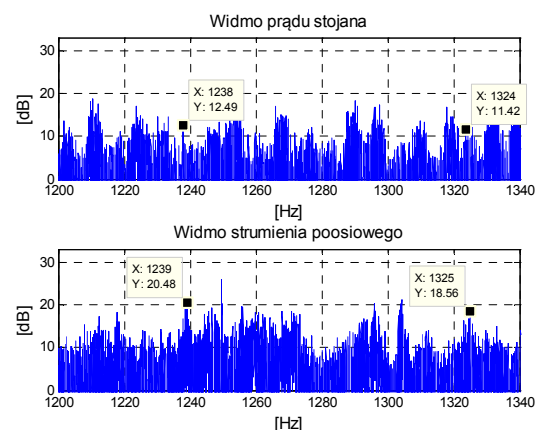
Liczbie tej oraz liczbie par biegunów $p=2$ najbardziej odpowiadają liczby zębów stojana $N_s = 60$ lub 72 . Częstotliwości harmonicznym związanych z N_s , których wzrost związany jest z rozwojem ekscentryczności, wyraża relacja:

$f_d = N_s f_r \pm f_0$, co dla $f_r = 21.37\text{Hz}$ oraz założonych $N_s = 60$ daje:

$$f_{d1} = 60 \cdot 21.37 - 43 = 1239.2 \text{ Hz}$$

$$f_{d2} = 60 \cdot 21.37 + 43 = 1325.2 \text{ Hz}$$

Harmoniczne o tych częstotliwościach są obecne w widmach zarówno prądu, jak i strumienia, lecz ich niskie poziomy amplitud świadczą o braku ekscentryczności - rys. 25.



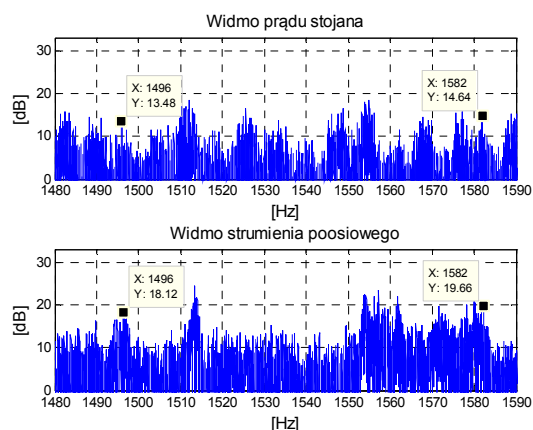
Rys. 25. Harmoniczne o częstotliwościach związanych z potencjalną ekscentrycznością, przy założonej liczbie $N_s = 60$

Podobnie, przyjęcie $N_s = 72$ prowadzi, przy $f_r = 21.37 \text{ Hz}$ do częstotliwości:

$$f_{d1} = 72 \cdot 21.37 - 43 = 1495.6 \text{ Hz}$$

$$f_{d2} = 72 \cdot 21.37 + 43 = 1581.6 \text{ Hz}$$

Harmoniczne o tych częstotliwościach także są obecne w obu widmach, lecz ich amplitudy są za małe, aby potwierdzić ekscentryczność - rys. 26.



Rys. 26. Harmoniczne o częstotliwościach związanych z potencjalną ekscentrycznością, przy założonej liczbie $N_s = 72$

Zatem silnik, u którego próbowano dopatrzeć się oznak ekscentryczności okazał się jej pozbawiony, w zamian wykazując pewien defekt klatki.

3. Wnioski

Z porównania widm prądu i strumienia oraz informacji diagnostycznych, jakie wnoszą, jasno wynika, że obie metody diagnozowania silników indukcyjnych są kompatybilne i jednakowo wartościowe [5], [7]. Widać jednak, że wyraźniej można wyróżnić harmoniczne widma strumienia, stąd ten sygnał jest bardziej przydatny do oceny, niż widmo prądu fazowego, choćby z uwagi na zawsze obecną składową o częstotliwości prądu wirnika $f_2 = sf_0$, na podstawie której natychmiast uzyskuje się obroty silnika. Taka harmoniczna nie zawsze ujawnia się w widmie prądu powyżej poziomu tła, a wyliczenie obrotów opiera się na harmonicznych właściwych dla symetrii lub ekscentryczności, co z kolei wymaga znajomości lub wyliczenia liczby żłobków wirnika.

Oprócz tego dostęp do badanego obiektu, jakim jest silnik, oraz technika pomiaru są o wiele łatwiejsze przy metodzie strumienia, niż metodzie prądowej, wymagającej wpinania się cęgami pomiarowymi wokół przewodów obwodów wtórnych lub pierwotnych, co zawsze wiąże się z procedurami, poleceniami i ograniczeniami na rozdzielniach i instalacjach. Czas poświęcony na wykonanie pomiarów też jest na korzyść metody strumieniowej. W świetle uzyskanych

w ramach tej pracy wyników można uznać, że pogląd o skutecznym diagnozowaniu stanu klatki i ekscentryczności silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego jest uzasadniony [7], [8].

Literatura

- [1]. Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*, Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 83, 2009, wyd. KOMEL, s. 207-212.
- [2]. Sobczyk T.J., Weinreb K., Węgiel T., Sułowicz M., Warzecha A.: *Effects in Stator Currents of Cage Motors Due to Saturation of Main Magnetic Circuit*, Proc. of IEEE SDEMPED'2003, Atlanta, GA, USA, pp.81-86.
- [3]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guziczek K.: *Możliwości wykorzystania strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*, Napędy i Sterowanie, R. 16, Nr 5 (181) 2014.
- [4]. 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.
- [5]. 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.
- [6]. Bowers S.V., Piety K.R.: *Machine fault detection using slot pass frequency flux measurements*, (1996) United States Patent no. 5 739 698.
- [7]. Voitto Kokko: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*, Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [8]. Chmelík K., Foldyna J., Mišák S.: *Magnetické pole v okolí asynchronního stroje, jeho zjišťování a využití*, Electroscop, 2007, č. 2. Západočeská univerzita v Plzni, Fakulta elektrotechnická.

Autorzy

dr hab. inż. K. Weinreb,
 peweinre@cyf-kr.edu.pl
 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