

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

PROBLEMY EKSPLOATACJI SILNIKÓW INDUKCYJNYCH Z ASYMETRIĄ ELEKTROMAGNETYCZNĄ – WYBRANE PRZYPADKI

PROBLEMS OF OPERATION OF INDUCTION MOTORS WITH ELECTROMAGNETIC ASYMMETRY - SELECTED CASES

Streszczenie: W pracy przeanalizowano kilka przypadków negatywnych zjawisk towarzyszących eksploatacji silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną. Zjawiska te, rozmaitego pochodzenia, nieraz nakładają się na siebie, utrudniając diagnozę. Rozpatrzono pracę silnika niskoobrotowego dużej mocy, emitującego specyficzny hałas, którego intensywność wzrastała w miarę zwiększania obciążenia. Aby wyjaśnić przyczyny zjawiska, oprócz pomiaru prądu w stanach dynamicznym i stanie ustalonym zastosowano pomiar strumienia unipolarnego oraz drgań mechanicznych, ponieważ sam pomiar prądu nie dawał całkowicie jednoznacznej odpowiedzi co do przyczyn problemu. Wyniki badań wskazały na defekt klatki z możliwym jednoczesnym zwarcie blach pakietu wirnika. Z kolei na stacji prób poddano badaniom 2 jednakowe silniki 6kV, których praca sugerowała także symptomy wewnętrznej asymetrii elektromagnetycznej poprzez specyficzny dźwięk. Tu podobnie dokonano pomiarów prądu, strumienia i drgań. W przypadku jednego z silników analiza odfiltrowanego prądu rozruchowego w postaci charakterystycznych modulacji wskazała na początkową degradację klatki i/lub ewentualne zwarcie części blach pakietu wirnika, na co wskazywałyby efekty akustyczne. W drugim przypadku kształt odfiltrowanego prądu rozruchowego diametralnie odbiegał od znanego wzorca, typowego dla defektu klatki. Specyficzne zmiany sygnału diagnostycznego mogą wskazywać na poważniejszy problem w wirniku, np. całkowitą degradację pakietu spowodowaną zwarciami o szerokim zasięgu.

Abstract: The study analyzed several cases of adverse events associated with the operation of induction motors with electromagnetic asymmetry. These phenomena, of various origin, often overlap, making it difficult to diagnose. A high power low speed motor, emitting a specific noise which intensity increased with increasing load, was considered. To explain the reasons for the phenomenon, in addition to the current measurement in the dynamic and steady states, a unipolar flux and mechanical vibrations measurements were applied because the current measurement did not give a completely clear answer as to the cause of the problem. The test results indicated a defect in the rotor cage with a possible simultaneous short circuit inside the rotor sheet package. In turn, at the testing station two identical 6 kV motors which operation suggested symptoms of internal electromagnetic asymmetry by a specific sound, were subjected to the tests. Similarly, the measurements of current, flux, noise and vibration were carried out. In case of one of the motors the analysis of the filtered start-up current in the form of characteristic modulation pointed to the initial degradation of the cage and/or some short circuit of a portion of the rotor sheet package, what would the sound effects indicate. In the second case, the shape of the filtered start-up current radically differed from the known standard pattern, typical for the cage defect. The specific changes to the diagnostic signal may indicate a serious problem in the rotor, for example a total degradation of the package due to a wide range short circuits inside.

Słowa kluczowe: *asymetria elektromagnetyczna, silnik indukcyjny, analiza widmowa prądu, strumienia, drgań i hałasu*

Keywords: *electromagnetic asymmetry, induction motor, spectral analysis of current, flux, vibration and noise*

1. Wstęp

Jedną z najczęściej występujących przyczyn uszkodzeń maszyny elektrycznej może być brak właściwej i odpowiednio wczesnej oceny jej stanu technicznego przez obsługę techniczną.

Silniki elektryczne eksploatowane przez wiele lat na stanowisku pracy, gdzie występują trudne

warunki środowiskowe, przynajmniej kilka razy ulegają poważniejszym awariom. Najczęściej dochodzi do uszkodzeń łożysk, klatek i układów izolacyjnych. Niekiedy wirnik lub element, który uległ uszkodzeniu, przez krótki okres czasu ociera o pakiet stojana. Nie od razu wtedy maszyna ulega poważnej awarii. Początkowo

rozwój takiego uszkodzenia powodują otarcia pakietu blach, co w efekcie przyczynia się do pogłębienia asymetrii i może to prowadzić w dalszej kolejności do lokalnego zwarcia pakietów blach na stojanie lub wirnika. Z punktu widzenia diagnostyki bardzo ważne jest więc diagnozowanie stanu szczeliny powietrznej w maszynach elektrycznych [1]-[6]. Wczesne wykrycie dużej asymetrii szczeliny powietrznej może uchronić maszynę przed poważną awarią związaną z zablokowaniem wirnika maszyny. W artykule zostaną przedstawione wyniki badań, które mogą wskazywać, że w eksploatacji badanych silników mogły wystąpić wyżej opisane stany awaryjne.

2. Wybrane przypadki

Wszystkie trzy z opisanych tu przypadków łączy hałaśliwa praca maszyn. Dźwięki, jakie wydają opisywane silniki, odbiegają od uznawanych jako typowe charakterem i intensywnością i podobnie, jak w przypadku każdego silnika zachowującego się nietypowo, wzbudzają podejrzenie, że coś im dolega.

2.1. Przypadek silnika kompresora

Silnik klatkowy 10 kV/3.7 MW, 372 obr/min. napędu kompresora tłokowego, oznaczony tu jako silnik C, już przy obciążeniu mocą powyżej 50% wyróżniał się spośród sąsiednich maszyn głośnie pracą. Przy 90% mocy poziom dźwięku wynosił ponad 107 dB. Przy 100% obciążeniu hałas, jaki wydawał, był słyszany w zamkniętym pomieszczeniu rozdzielni oddalonej o ponad 100 metrów. Dokonano badań, mających na celu ocenę jego stanu i przyczyny hałaśliwej pracy.

Badanie strumienia poosiowego

Jedną z prostych, ale zarazem skutecznych metod analizy strumienia poosiowego jest porównanie wartości skutecznej strumienia danego silnika z innym. Wyniki pomiarów strumieni poosiowych dla 2 identycznych maszyn: C oraz B zestawiono w Tabeli 1.

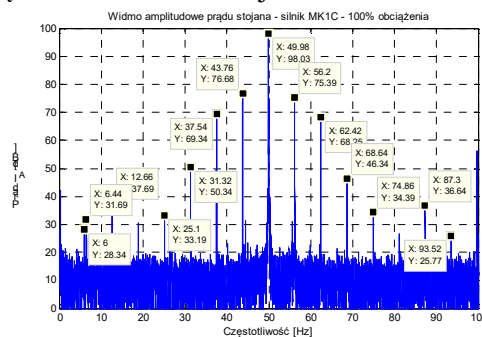
Tabela.1. Zestawienie wartości skutecznych strumienia poosiowego dla badanych silników

Silnik	Obciążenie mocą [%]	Wartość skuteczna strumienia w [V]
Silnik C	0	0.141
Silnik C	50	0.182
Silnik C	90	0.266
Silnik C	100	0.317
Silnik B	90	0.082

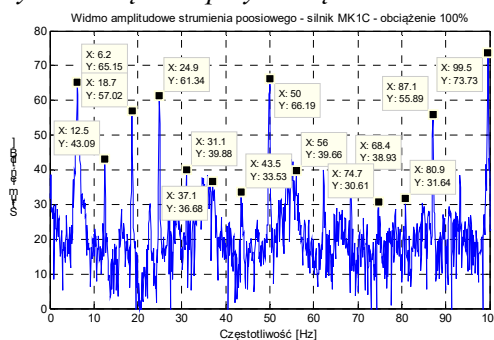
Wartości skuteczne strumienia rosną w miarę obciążania maszyny, co jest oczywiste. Jednak tu widać ponad 3-krotną różnicę między strumieniem silnika C (0.266 V), a silnika B (0.082 V) przy 90% obciążeniu. Zakładając, że silnik B jest zdrowy (symptomów uszkodzeń nie wykazywał), należy powiązać stwierdzony fakt tak znacznej różnicy z defektem silnika C. Autorzy wykonali szereg badań wskazujących na znaczny wzrost amplitud i wartości skutecznych strumienia poosiowego wskutek uszkodzeń uzwojeń stojanów i wirników silników prądu przemiennego. Ten prosty pomiar wzbudził podejrzenie o jakimś uszkodzeniu wirnika silnika C.

Badanie widm prądu, strumienia, drgań i hałasu

W oparciu o widmo strumienia wyznaczono częstotliwość prądu wirnika, poślizg i prędkość: 372 obr/min. Częstotliwość obrotowa wirnika to 6.2 Hz. Rys.1 przedstawia widmo prądu stojana, a Rys.2 widmo strumienia, oba dla 100% obciążenia i w zakresie od 0÷100 Hz. Wszystkie zaznaczone harmoniczne obu widm (oprócz zasilania 50 Hz) są wielokrotnościami częstotliwości obrotowej wirnika.

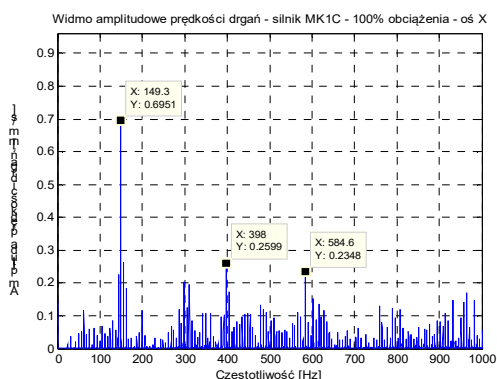


Rys. 1. Widmo prądu stojana w zakresie 0÷100Hz z zaznaczonymi harmonicznymi od wpływu obciążenia przy obciążeniu 100%

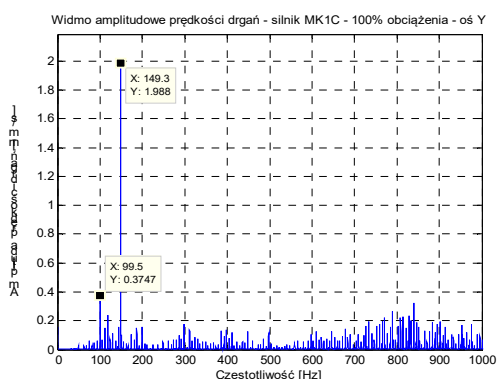


Rys. 2. Widmo strumienia poosiowego dla silnika C z zaznaczonymi częstotliwościami będącymi wielokrotnościami częstotliwości obrotowej, zakres do 100Hz, obciążenie 100%

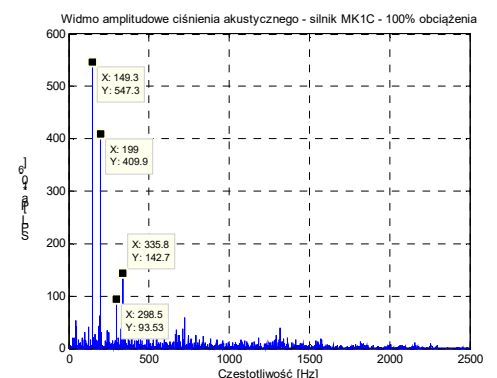
Na Rys.3 i Rys.4 zamieszczono widma drgań silnika C w osiach X i Y, zaś na Rys.5 widmo hałasu.



Rys. 3. Widmo amplitudowe prędkości drgań w osi X dla silnika C – 100% obciążenia



Rys. 4. Widmo amplitudowe prędkości drgań w osi Y dla silnika C – 100% obciążenia



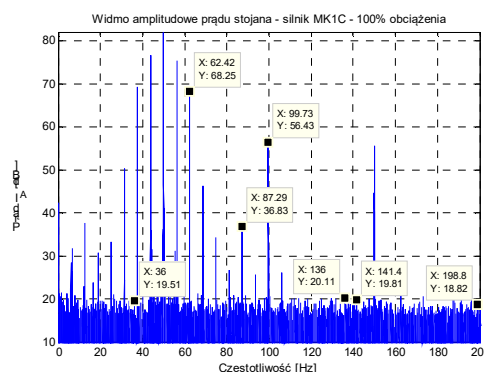
Rys. 5. Widmo amplitudowe ciśnienia akustycznego silnika C – 100% obciążenia

Okazuje się, że wszystkie harmoniczne ujawniające się w widmach drgań i hałasu obecne są także w widmach prądu i strumienia silnika (Rys.6 i Rys. 7). W Tabeli 2 zebrano niektóre z nich.

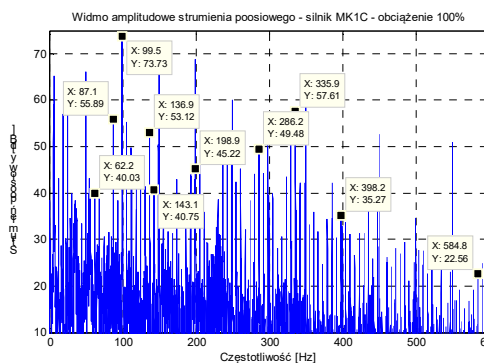
Na Rys.8 przedstawiono widmo prądu z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi, świadczącymi o pewnym defekcie klatki.

Tabela 2. Harmoniczne widm drgań, hałasu, prądu i strumienia jako n-wielokrotności częstotliwości obrotowej

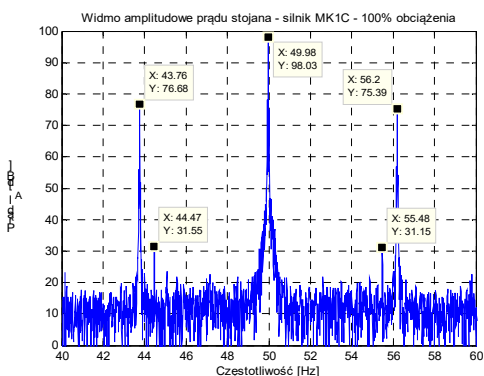
n	f (Hz)	n	f(Hz)
10	62.38	46	285.58
14	87.18	48	297.98
16	99.58	54	335.18
22	136.78	64	397.18
23	142.98	94	583.18
24	149.18	175	1085.38
32	198.78	191	1184.58



Rys. 6. Harmoniczne w widmie prądu silnika (zakres 0÷200Hz)



Rys. 7. Widmo strumienia poosiowego dla silnika C z zaznaczonymi częstotliwościami korespondującymi z drganiami, przedział do 600Hz, obciążenie 100%



Rys. 8. Widmo 43-57Hz z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi 44.7Hz i 55.48Hz

Na Rys.9 i Rys.10 wyeksponowane są częstotliwości poślizgowe nr 7 według znanego wzoru:

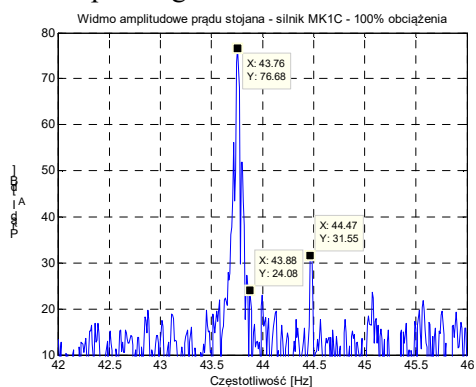
$$f = f_0(1 \pm 2ks) \quad (1)$$

gdzie: f_0 - częstotliwość napięcia zasilania,
 k - numer kolejnej częstotliwości poślizgowej,
 s - poślizg.

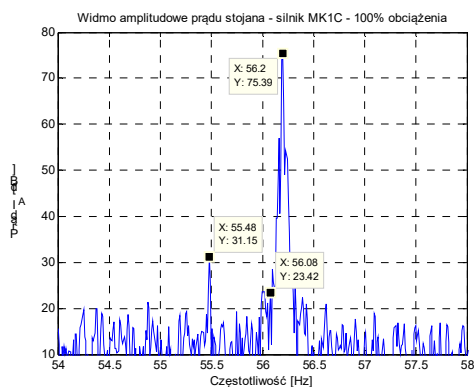
Zgodnie ze wzorem częstotliwości te są równe: 44.47 i 55.48 Hz. W tym przedziale (43÷57 Hz) wskaźnik uszkodzenia klatki RFI (ang. Rotor Fault Index) [5] wynosi **2.69**. Wskaźnik jest obliczany w następujący sposób:

$$RFI = \frac{\max(A_{s1}, A_{s2})}{A_0} \cdot p \quad (2)$$

gdzie: A_{s1} , A_{s2} - oznaczają amplitudy składowych poślizgowych $f_0(1 \pm 2s)$,
 A_0 - amplituda podstawowej harmonicznej f_0 ,
 p - liczba par biegunów.



Rys. 9. Powiększenie w okolicach 44Hz



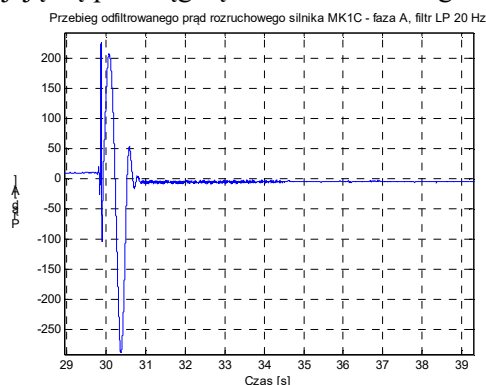
Rys. 10. Powiększenie w okolicach 56Hz

Jest to potwierdzenie defektu klatki. Klatka ma 168 prętów, ale zakres uszkodzenia może ograniczyć się do kilku, co nie ma widocznego wpływu na moc i moment silnika, o czym świadczy utrzymanie prędkości znamionowej maszyny przy pełnym obciążeniu, za to może wskutek zakłócenia symetrii magnetycznej

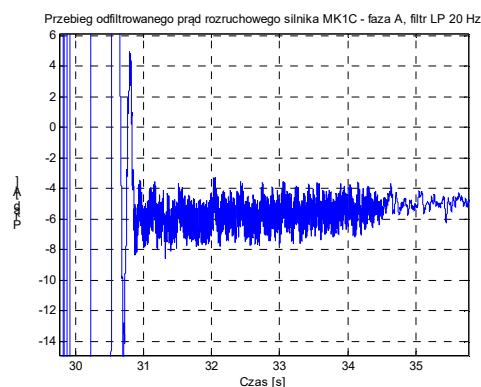
wirnika nakładać się, czy nawet wzmacniać inne zjawiska, na przykład od uszkodzenia blach.

Badanie prądu rozruchowego

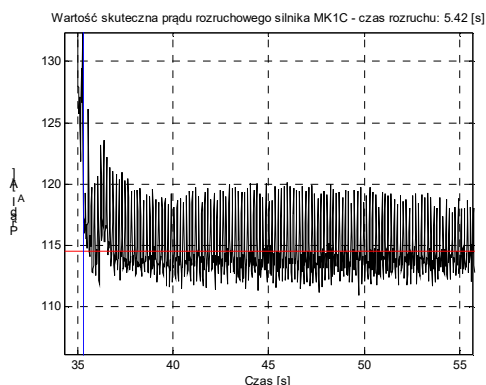
Na Rys.11 i Rys.12 przedstawiono odfiltrowany prąd stojana podczas rozruchu. Widoczne są niespecyficzne oscylacje, które wyraźnie uspokajają się po osiągnięciu stanu ustalonego.



Rys. 11. Przebieg odfiltrowanego prądu rozruchowego fazy A



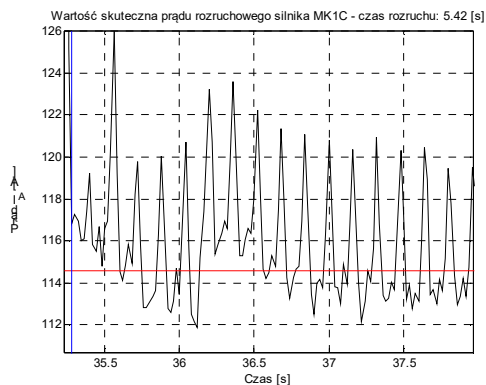
Rys. 12. Przebieg czasowy odfiltrowanego prądu rozruchowego fazy A – powiększenie



Rys. 13. Przebieg czasowy wartości skutecznej prądu rozruchowego – powiększenie dla przedziału ze stanu ustalonego

Na Rys.13 i Rys.14 widoczne są oscylacyjne zmiany wartości skutecznej prądu o stosunko-

wo znacznej amplitudzie i częstotliwości bliskiej częstotliwości obrotowej wirnika. Świadczy to o znacznej asymetrii elektromagnetycznej maszyny [7].



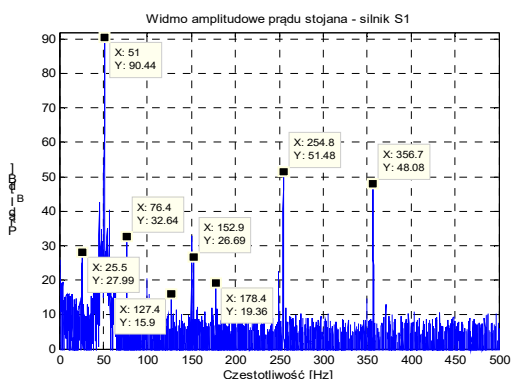
Rys. 14. Przebieg czasowy wartości skutecznej prądu rozruchowego - powiększenie dla przedziału ze stanu ustalonego dla przedziału czasowego około 3 sekund

2.2. Badanie silnika S1

Na stację prób przyjęto 2 silniki 6 kV/320 kW, 1490 obr/min z powodu podejrzenia o defekt wskutek głośnej pracy i specyficznego dźwięku. Zostały one poddane podobnym badaniom, jakie opisano w rozdziale 2.1. Zasilono je z generatora i pracowały nieobciążone. W przypadku silnika S1 częstotliwość wynosiła 51 Hz. Prędkość wynosiła 1524 obr/min, stąd częstotliwość obrotowa wirnika 25.4 Hz.

Badanie widm prądu, strumienia, drgań i hałasu

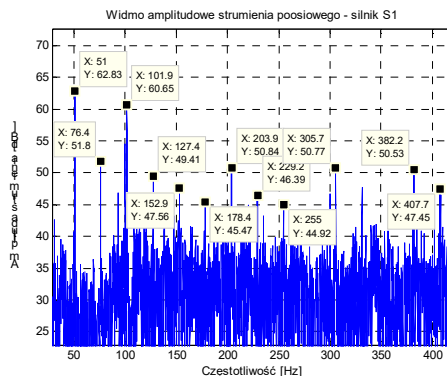
Rys.15 ilustruje widmo prądu stojana, a Rys.16 widmo strumienia w zakresie do 450 Hz.



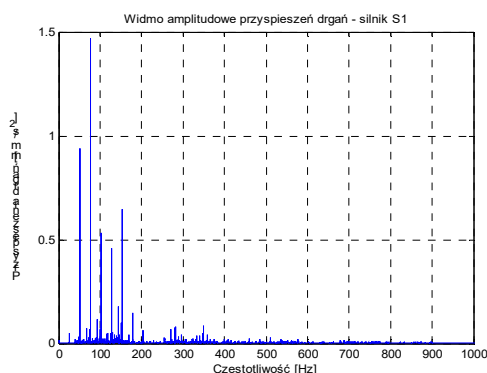
Rys. 15. Widmo prądu stojana silnika S1

Wszystkie zaznaczone harmoniczne obu widm (oprócz zasilania 50 Hz) są wielokrotnościami częstotliwości obrotowej wirnika 25.4 Hz. Na

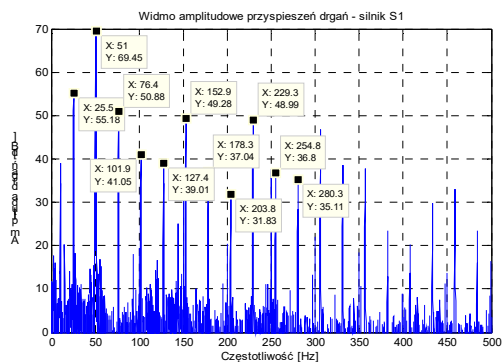
Rys.17 i Rys.18 zamieszczono widma drgań silnika S1, zaś na Rys.19 widmo hałasu.



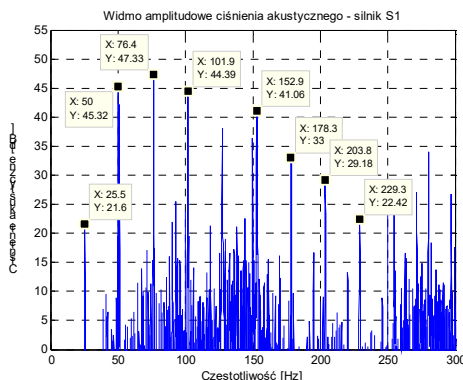
Rys. 16. Widmo strumienia silnika S1



Rys. 17. Widmo przyspieszeń drgań silnika S1



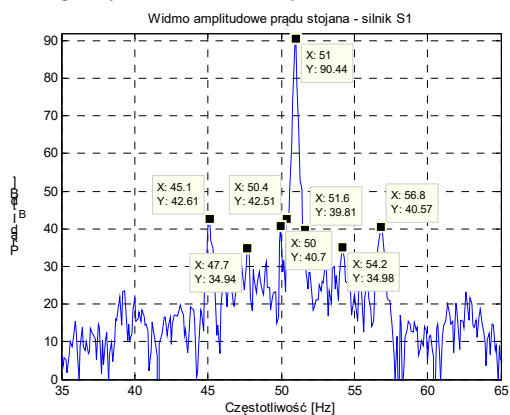
Rys. 18. Widmo amplitud przyspieszeń drgań silnika S1



Rys. 19. Widmo hałasu silnika S1

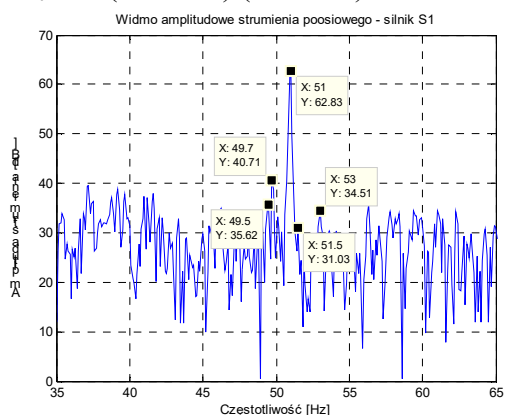
Wszystkie zaznaczone częstotliwości w tych widmach są również wielokrotnością częstotliwości obrotowej wirnika.

Na Rys.20 i Rys. 21 przedstawiono widma prądu i strumienia z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi, świadczącymi o defekcie klatki.



Rys. 20. Widmo prądu z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi

Wskaźnik uszkodzenia klatki przy przyjęciu 20 dB jako poziomu tła sygnału wynosi $RFI_{20} = 2 * (42.81 - 20) / (90.44 - 20) = 0.648$.

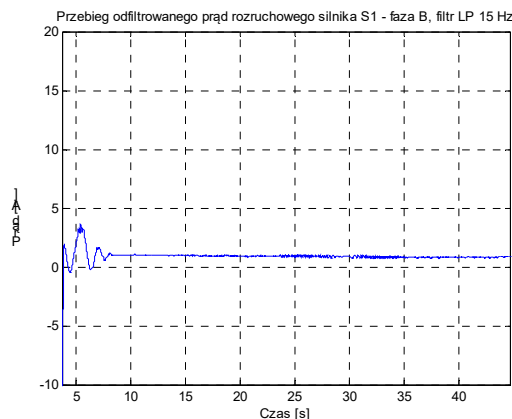


Rys. 21. Widmo strumienia z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi

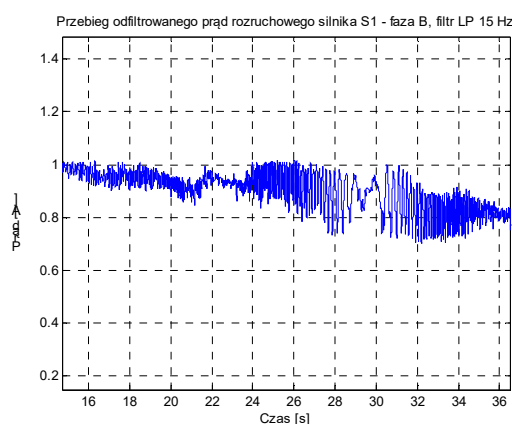
Wskaźnik uszkodzenia klatki przy przyjęciu 30 dB jako poziomu tła sygnału wynosi $RFI_{30} = 2 * (40.71 - 30) / (62.83 - 30) = 0.652$. Są to jak widać, bardzo zbliżone wartości. Oznaczają one degradację części spawów klatki.

Badanie prądu rozruchowego

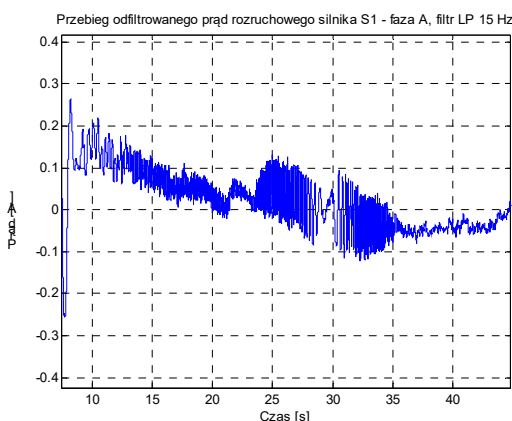
Na Rys.22 i Rys.23 przedstawiono odfiltrowany przebieg czasowy prądu fazy B stojana podczas rozruchu, na Rys.24 prąd fazy A. Charakter tych przebiegów niezbitnie potwierdza wcześniejszą diagnozę postawioną w oparciu o widma, jest jednak coś wspólnego z analogicznym przebiegiem silnika C: wysoka częstotliwość oscylacji.



Rys. 22. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S1 fazy B



Rys. 23. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S1 fazy B – powiększenie



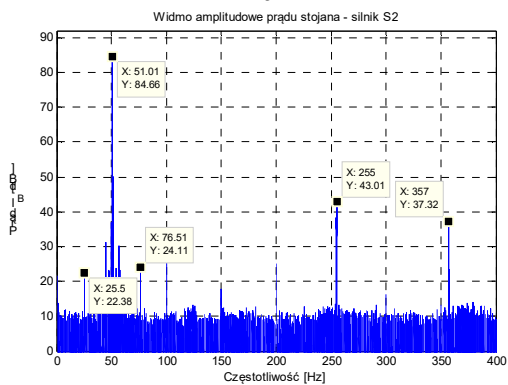
Rys. 24. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S1 fazy A – powiększenie

2.3.Badanie silnika S2

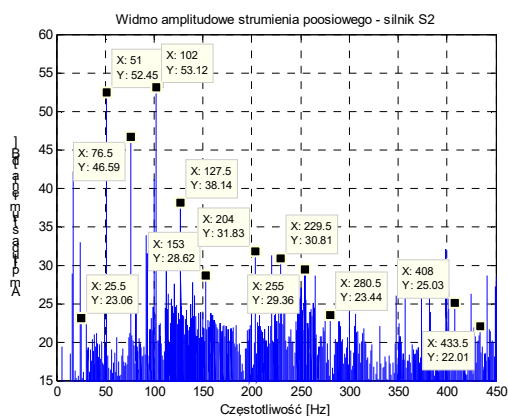
W przypadku silnika S2 częstotliwość wynosiła 51.01 Hz. Prędkość wynosiła 1527.5 obr/min, stąd częstotliwość obrotowa wirnika 25.45 Hz.

Badanie widm prądu, strumienia, drgań i hałasu

Rys.25 ilustruje widmo prądu stojana, a Rys.26 widmo strumienia w zakresie do 450 Hz. Wszystkie wyróżnione częstotliwości obu widm (oprócz zasilania 50 Hz) są wielokrotnościami częstotliwości obrotowej wirnika 25.45 Hz.

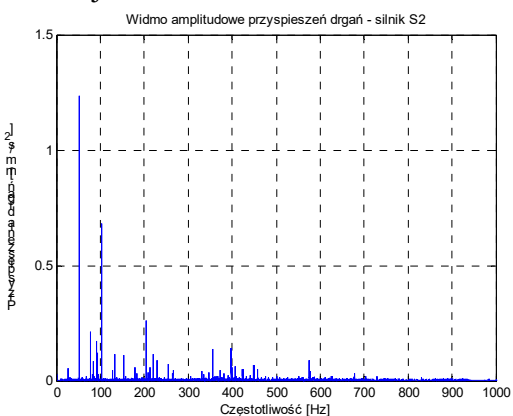


Rys. 25. Widmo prądu stojana silnika S2

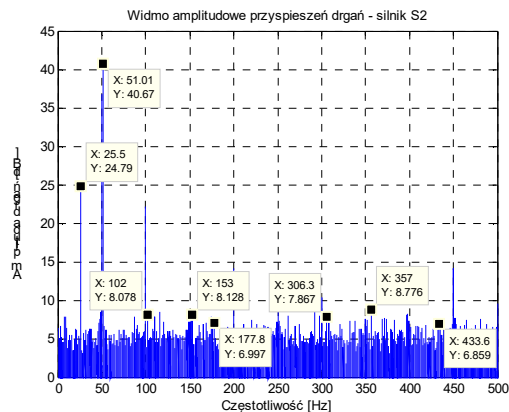


Rys. 26. Widmo strumienia silnika S2

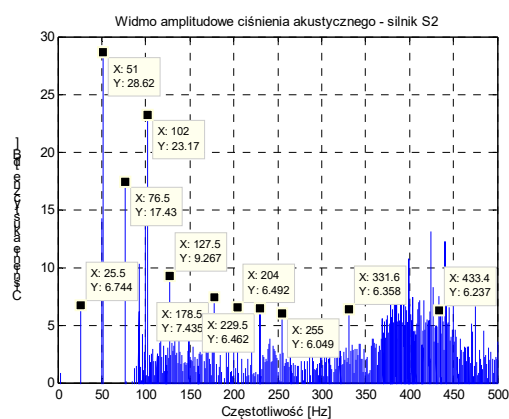
Na Rys.27 i Rys.28 zamieszczono widma drgań silnika S2, zaś na Rys.29 widmo hałasu. Wszystkie zaznaczone częstotliwości w tych widmach są również wielokrotnością częstotliwości obrotowej wirnika.



Rys. 27. Widmo przyspieszeń drgań silnika S2

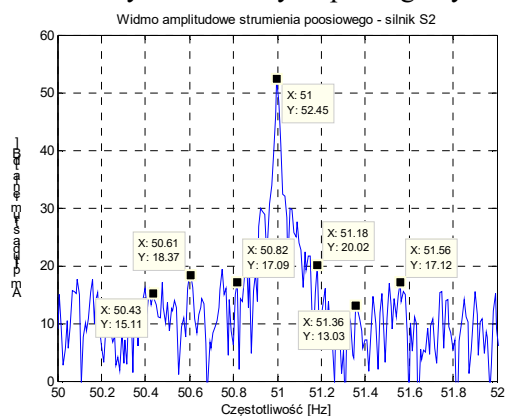


Rys. 28. Widmo amplitud przyspieszeń drgań silnika S2



Rys. 29. Widmo hałasu silnika S2

Na Rys.30 przedstawiono widmo strumienia z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi.



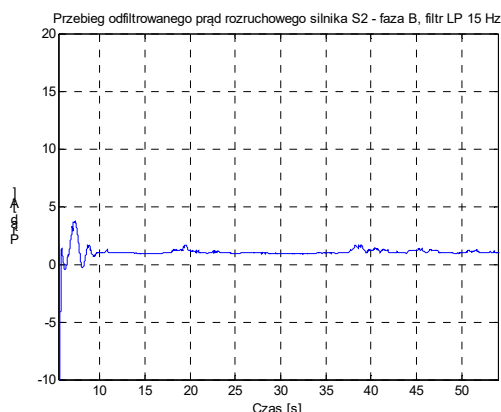
Rys. 30. Widmo strumienia w zakresie częstotliwości poślizgowych

Wskaźnik uszkodzenia klatki
 $RFI_{15} = 2 * (18.37 - 15) / (48.28 - 15) = 0.2025$
 Klatka zdrowa.

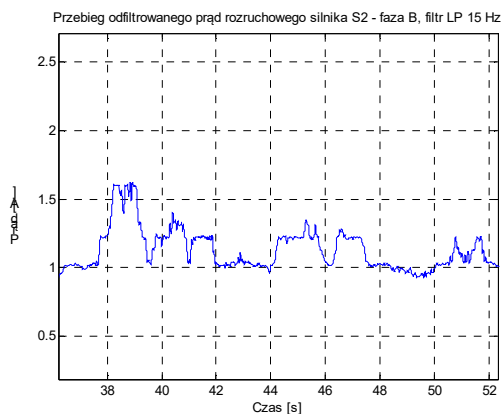
Badanie prądu rozruchowego

Na Rys.31 i Rys.32 przedstawiono odfiltrowany przebieg czasowy prądu fazy B stojana podczas rozruchu. Kształt tego przebiegu jest jednak

całkiem odmienny od analogicznych dla silników C i S1.



Rys. 31. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S2



Rys. 32. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S2 – powiększenie

3. Podsumowanie

Cechami wspólnymi 3 analizowanych maszyn były: hałas, jaki emitowały podczas pracy oraz fakt zawierania przez widma prądu, strumienia, drgań i hałasu częstotliwości, będących krotnością częstotliwości obrotowej wirnika. W przypadku silników C i S1 prąd rozruchowy zawierał charakterystyczne oscylacje o wysokiej częstotliwości (czyżby równej częstotliwości prądów wirowych i skośnych w zwartych blachach?), ale i jego kształt także w znany sposób potwierdzał diagnozę wynikającą z analizy widm. Jeśli przyjąć, że charakterystyczny dźwięk świadczy o zwarciach pakietu, to być może w przypadku silnika S2 doszło już do przepalenia laminatu większości blach i tym samym ich zwarcia, zaś prąd płynący wzdłuż osi wału (prąd zwarcia całkowitego blach, prąd skośny) ma częstotliwość zbliżoną do częstotliwości prądu wirnika, na co wskazywałaby zmienność przebiegu z Rys.32.

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]. Weinreb K., Sułowicz M.: *Skuteczne wykrywanie ekscentryczności dynamicznej w silniku asynchronicznym*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 83, 2009, wyd. KOMEL, s. 207-212.
- [3]. 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.
- [4]. Szymaniec S.: *Badania, eksploatacja i diagnostyka zespołów maszynowych z silnikami indukcyjnymi klatkowymi*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2013.
- [5]. Petryna J., Sułowicz M., Duda A., Guzic K.: *Diagnozowanie silników indukcyjnych w oparciu o pomiar strumienia osiowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 101, 2014, wyd. KOMEL, s. 185-191.
- [6]. Weinreb K., Duda A., Petryna J., Sułowicz M.: *Diagnostyka ekscentryczności silnika indukcyjnego w oparciu o pomiar strumienia poosiowego*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 106, 2015, wyd. KOMEL, s. 13-20.
- [7]. Pragłowska-Ryłko N., Sułowicz M.: *Zastosowanie ruchomej wartości skutecznej prądu do diagnostyki silników indukcyjnych klatkowych*. Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe nr 106, 2015, wyd. KOMEL, s. 141-146.

Autorzy

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

Informacje dodatkowe

Praca została wykonana w ramach współpracy Politechniki Krakowskiej z firmami: SENCO Sp. z o.o. i Eko-Energia Sp. z o.o.