

Diagnozowanie i weryfikacja termowizyjna silników indukcyjnych z asymetrią elektromagnetyczną

Janusz Petryna, Zbigniew Ławrowski, Maciej Sułowicz, Krzysztof Guzic

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 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. 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.

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 niskobrotowego dużej mocy, emitującego specyficzny hałas, którego intensywność wzrastała w miarę zwiększania obciążenia. Wyniki badań wskazywały na defekt klatki z możliwym jednoczesnym zwarcie blach pakietu wirnika. Z kolei na stacji prób poddano badaniom dwa jednakowe silniki 6 kV, których praca sugerowała także symptomy wewnętrznej asymetrii elektromagnetycznej poprzez specyficzny dźwięk. Specyficzne zmiany sygnałów diagnostycznych mogą wskazywać na poważniejsze problemy w wirnikach, np. degradację pakietu spowodowaną zvarciami o szerokim zasięgu. Następnie w 3 części pracy przed-

stawiono wykorzystanie oryginalnej metody diagnostyki termograficznej wirnika dużej mocy i bardzo dużych gabarytów, opartej na nagrzewaniu wirnika przez wymuszony przepływ prądu przez wał, w celu weryfikacji wcześniejszej diagnozy stanu wirnika postawionej w oparciu o pomiar i analizę prądów fazowych silnika i strumienia poosiowego. Kamera termowizyjna rejestruje lokalne wzrosty temperatury w określonych miejscach wirnika i tym sposobem potwierdza zagrożone miejsca w klatce, a także w blachach i konstrukcji mechanicznej wirnika. Osobnym wyzwaniem jest tu zapewnienie wymuszenia prądu o natężeniu kilku kiloamperów, aby tym sposobem nagrzać wirnik.

Słowa kluczowe: asymetria elektromagnetyczna, silnik indukcyjny, analiza widmowa, metoda termograficzna, wzrost temperatury, rdzeń, nagrzewanie wału

🇬🇧 DIAGNOSING AND THERMAL VERIFICATION OF INDUCTION MOTORS WITH ELECTROMAGNETIC ASYMMETRY

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. The test results indicated a defect in the rotor cage with a possible simultaneous short circuit inside the rotor sheet package. 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. Specific diagnostic signal changes may indicate more serious rotor problems, such as packet degradation caused by wide range short circuits. The 3rd part of the paper presents the

use of the original thermographic method of diagnostics of high power and very large dimensions rotor, based on heating the rotor by forcing the current flow through the shaft, to verify the prior diagnosis based on the measurement and analysis of phase currents of the motor and its axial flux. The infrared camera records the local temperature increases in specific areas of the rotor and thus confirms the presence of exact endangered points of the cage, inside the core and the mechanical structure of the rotor as well. An extra challenge is to provide a forcing of several thousands of amps of the current intensity to thereby heat the rotor.

Keywords: electromagnetic asymmetry, induction motor, spectral analysis, thermographic method, temperature increase, core, shaft heating

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 głośną 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 napięcia proporcjonalnego do pochodnej 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 napięć proporcjonalnych do pochodnych strumienia poosiowego dla badanych silników

Silnik	Obciążenie mocą [%]	Wartość skuteczna napięcia od pochodnej strumienia [V]
C	90	0,266
C	100	0,317
B	90	0,082

Wartości skuteczne strumienia rosną w miarę obciążania maszyny, co jest oczywiste. Jednak tu widać ponad 3-krotną różnicę między napięciem od pochodnej strumienia 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 napięć od pochodnych strumienia poosiowego wskutek uszkodzeń uzwojeń stojanów i wirników silników prądu przemiennego. Ten prosty pomiar wzbudził podejrzenie o jakimś uszkodzeniu wirnika silnika C.

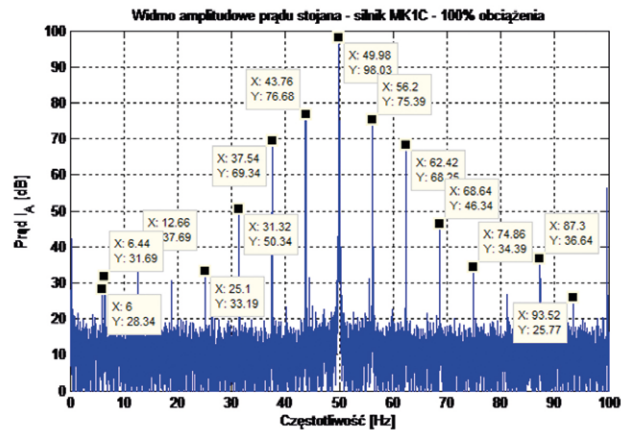
Badanie widm prądu, strumienia, drgań i hałasu

W oparciu o widmo napięcia proporcjonalnego do pochodnej 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 pochodnej strumienia, oba dla 100% obciążenia i w zakresie od 0 do 100 Hz. Wszystkie zaznaczone harmoniczne obu widm (oprócz zasilania 50 Hz) są wielokrotnościami częstotliwości obrotowej wirnika.

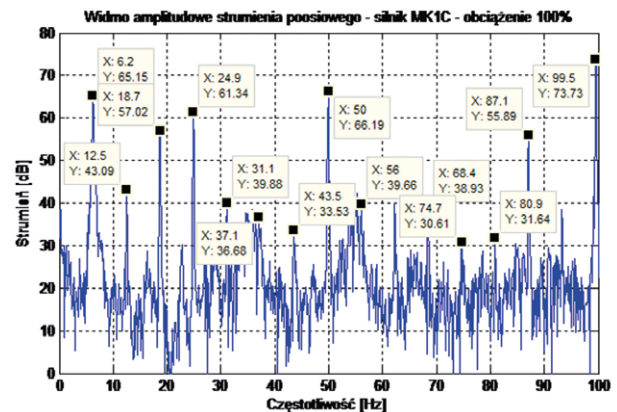
Na rys. 3 i rys. 4 zamieszczono widma drgań silnika C w osiach X i Y, zaś na rys. 5 widmo hałasu.

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

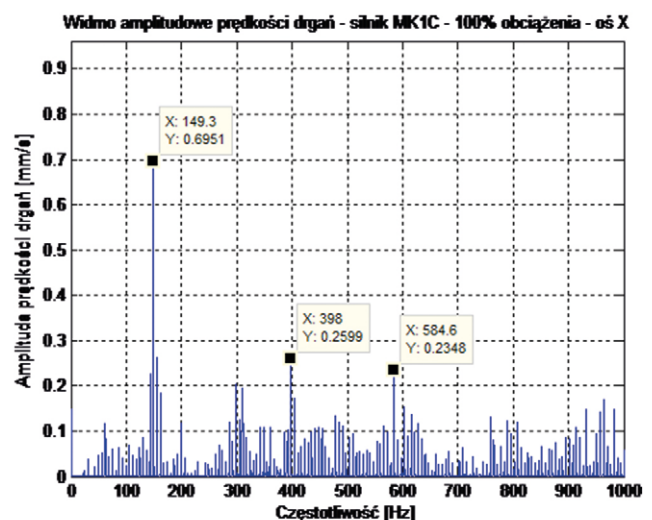
Na rys. 8 przedstawiono widmo prądu z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi, świadczącymi o pewnym defekcie klatki.



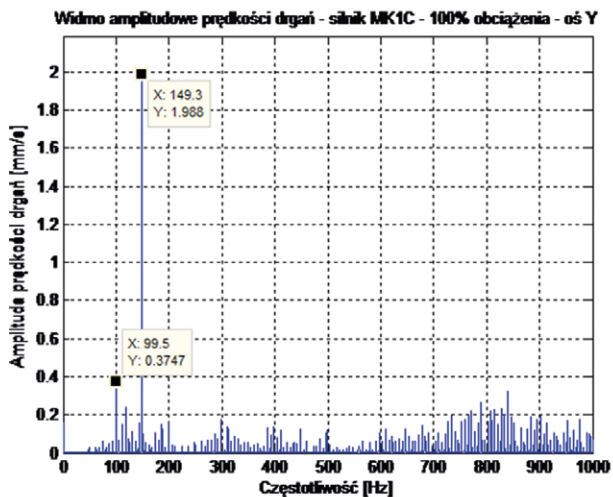
Rys. 1. Widmo prądu stojana w zakresie 0–100 Hz z zaznaczonymi harmonicznymi od wpływu obciążenia przy obciążeniu 100%



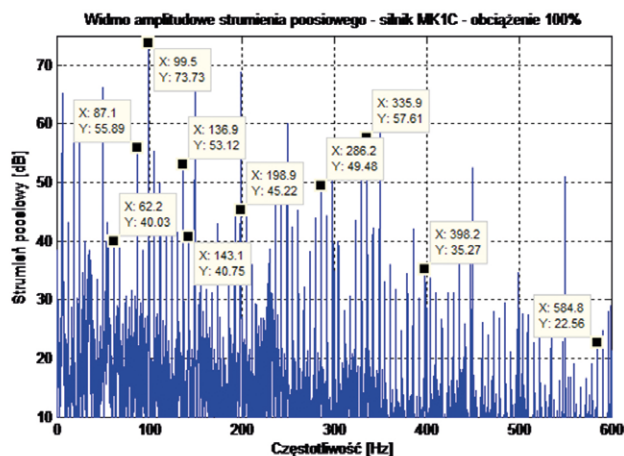
Rys. 2. Widmo napięcia od pochodnej strumienia poosiowego dla silnika C z zaznaczonymi częstotliwościami będącymi wielokrotnościami częstotliwości obrotowej, zakres do 100 Hz, obciążenie 100%



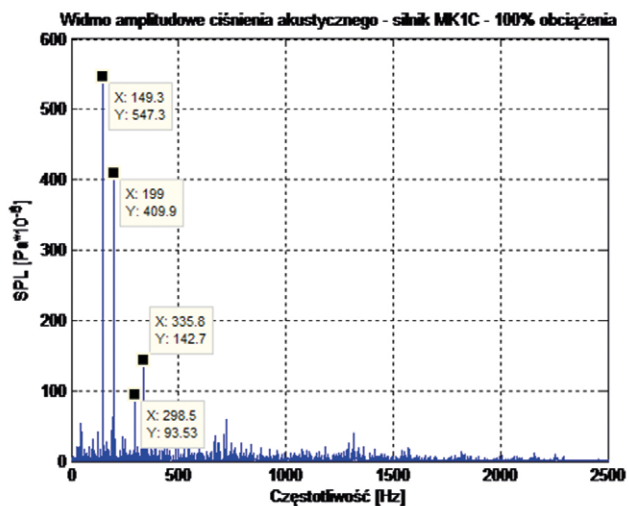
Rys. 3. Widmo amplitudowe prędkości drgań w osi X dla silnika C – 100% obciążenia



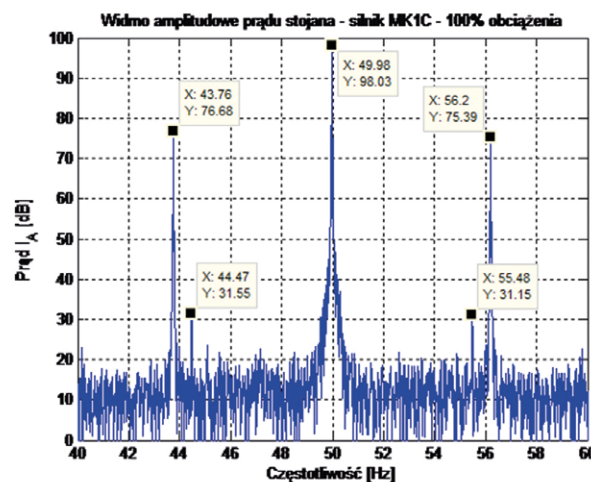
Rys. 4. Widmo amplitudowe prędkości drgań w osi Y dla silnika C - 100% obciążenia



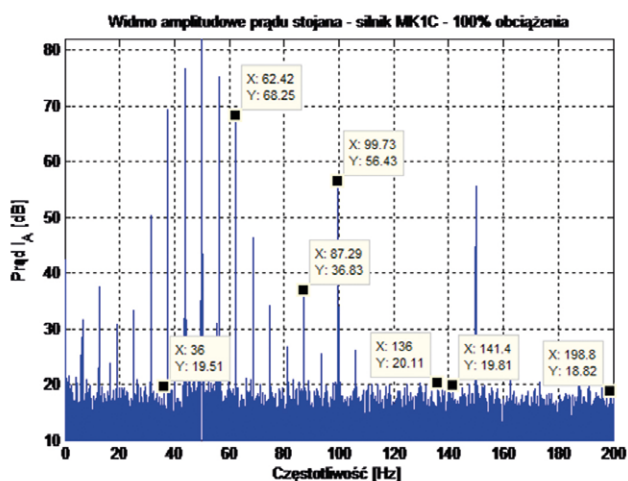
Rys. 7. Widmo pochodnej strumienia poosiowego dla silnika C z zaznaczonymi częstotliwościami korespondującymi z drganiami, obciążenie 100%



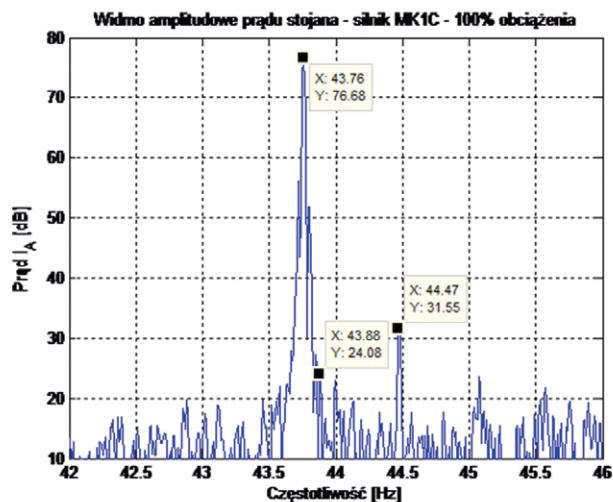
Rys. 5. Widmo amplitudowe ciśnienia akustycznego silnika C - 100% obciążenia



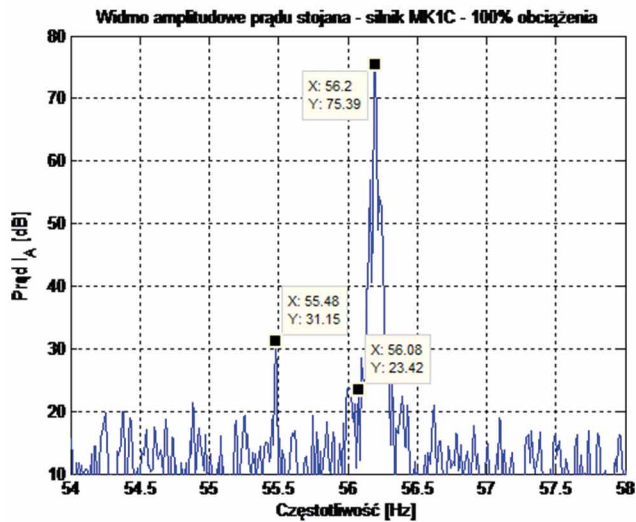
Rys. 8. Widmo prądu 43-57 Hz z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi 44,7 Hz i 55,48 Hz



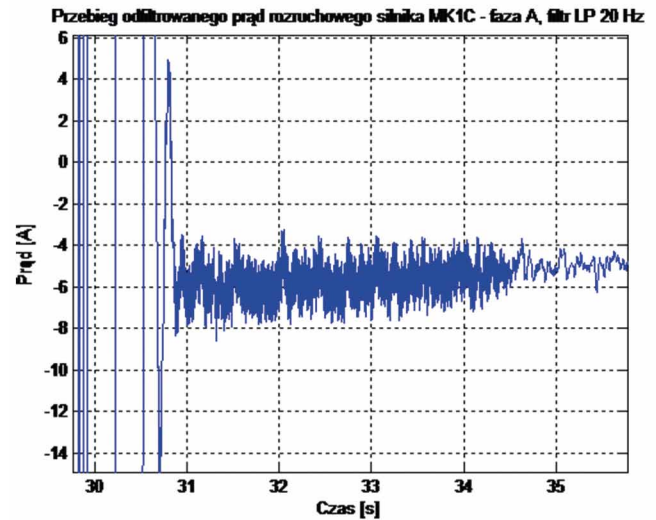
Rys. 6. Harmoniczne w widmie prądu silnika (zakres 0-200 Hz)



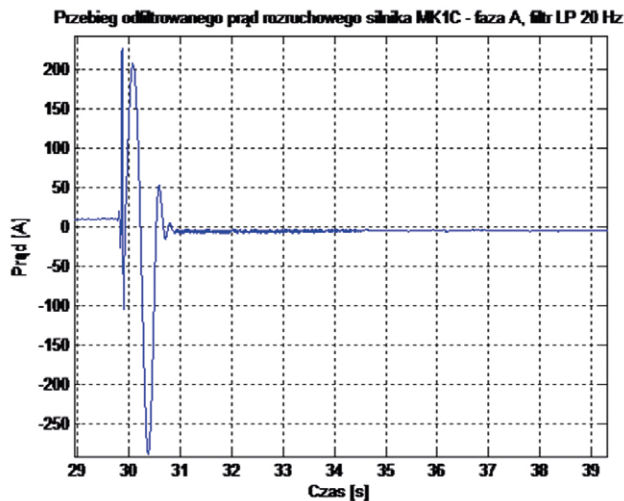
Rys. 9. Powiększenie w okolicach 44 Hz



Rys. 10. Powiększenie w okolicach 56 Hz



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



Rys. 11. Przebieg odfiltrowanego prądu rozruchowego fazy A

Na rys. 9 i 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*) [9] wynosi 2,69. Wskaźnik jest obliczany w następujący sposób:

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

Tabela 2. Harmoniczne widm drgań, hałasu, prądu i napięcia od pochodnej 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

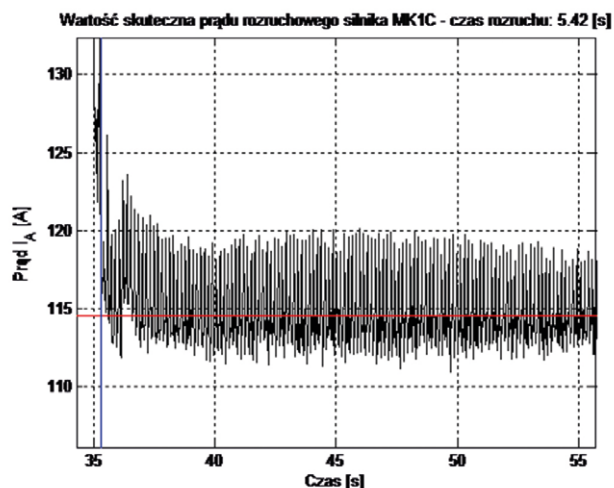
gdzie:

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

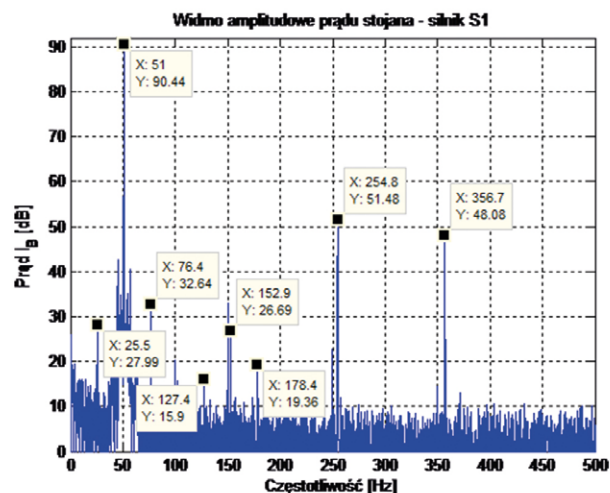
Jest to potwierdzenie defektu klatki. Klatka ma 174 pręty, ale zakres uszkodzenia może ograniczyć się do kilku, co nie ma widocznego wpływu na moc i moment silnika, o czym świadczą utrzymanie prędkości znamionowej maszyny przy pełnym obciążeniu, za to może wskutek zakłócenia symetrii magnetycznej wirnika nakładać się, czy nawet wzmacniać inne zjawiska, na przykład od uszkodzenia blach.

Badanie prądu rozruchowego

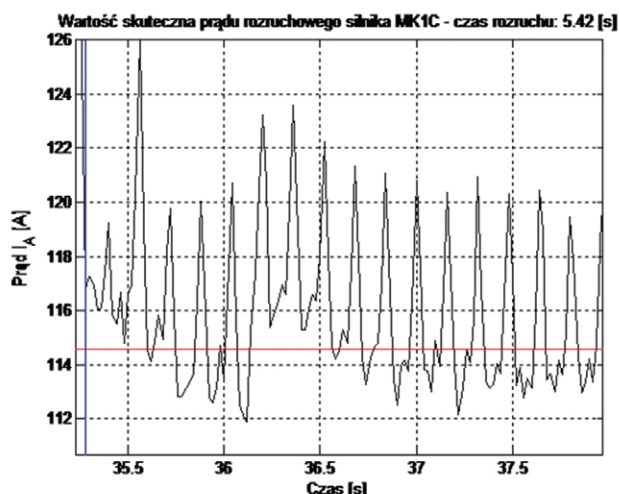
Na rys. 11 i 12 przedstawiono odfiltrowany prąd stojana podczas rozruchu. Widoczne są niespecyficzne oscylacje, które wyraźnie uspokajają się po osiągnięciu stanu ustalonego.



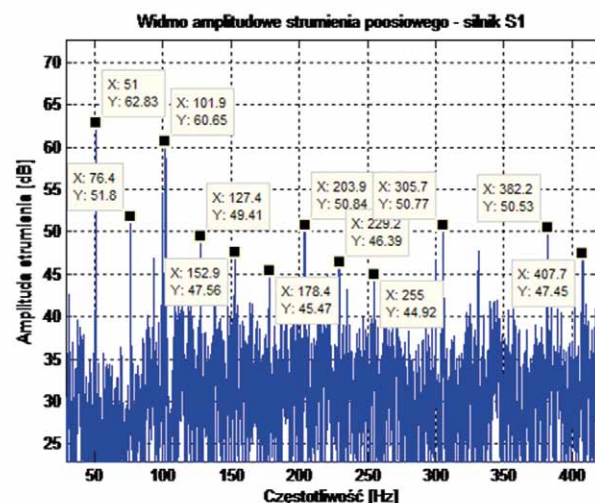
Rys. 13. Przebieg czasowy wartości skutecznej prądu rozruchowego – powiększenie dla przedziału ze stanu ustalonego



Rys. 15. Widmo prądu stojana silnika S1



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



Rys. 16. Widmo pochodnej strumienia silnika S1

Na rys. 13 i 14 widoczne są oscylacyjne zmiany wartości skutecznej prądu o stosunkowo znacznej amplitudzie i częstotliwości 6,2 Hz – równej częstotliwości obrotowej wirnika. Świadczy to o znacznej asymetrii elektromagnetycznej maszyny [11].

2.2. Badanie silnika S1

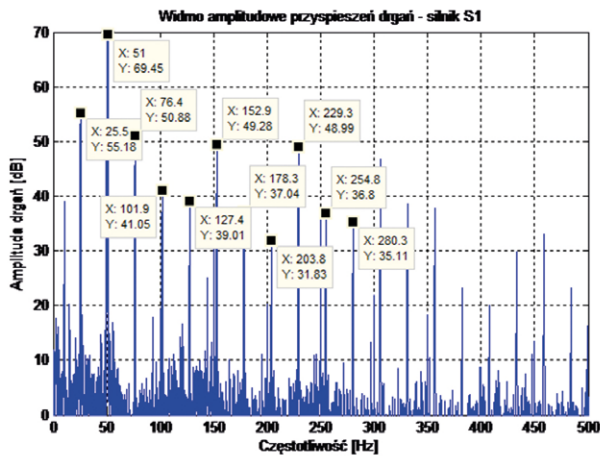
Na stację prób przyjęto 2 silniki 6 kV / 320 kW, 1490 obr./min z powodu podejrzenia o defekt wskutek głośnej pracy i specyficznego dźwięku. Zostały one poddane podobnym badaniom, jakie opisano w rozdziale 2.1. Zasilono je z generatora i pracowały nieobciążone. W przypadku silnika S1 częstotliwość zasilania wynosiła 51 Hz, prędkość 1524 obr./min, stąd częstotliwość obrotowa wirnika 25,4 Hz.

Badanie widm prądu, pochodnej strumienia, drgań i hałasu

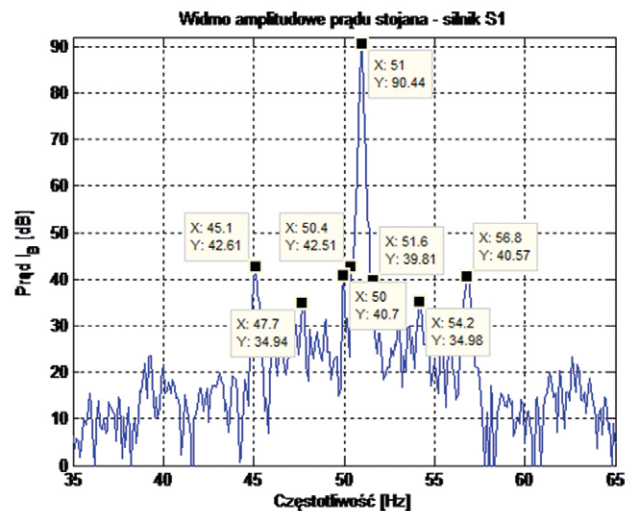
Rys. 15 ilustruje widmo prądu stojana, a rys. 16 widmo pochodnej strumienia w zakresie do 450 Hz. Wszystkie zaznaczone harmoniczne obu widm (oprócz 51 Hz) są wielokrotnościami częstotliwości obrotowej wirnika 25,4 Hz.

Na rys. 18 zamieszczono widma amplitud drgań silnika S1, zaś na rys. 19 widmo hałasu. Wszystkie zaznaczone częstotliwości w tych widmach są również wielokrotnością częstotliwości obrotowej wirnika.

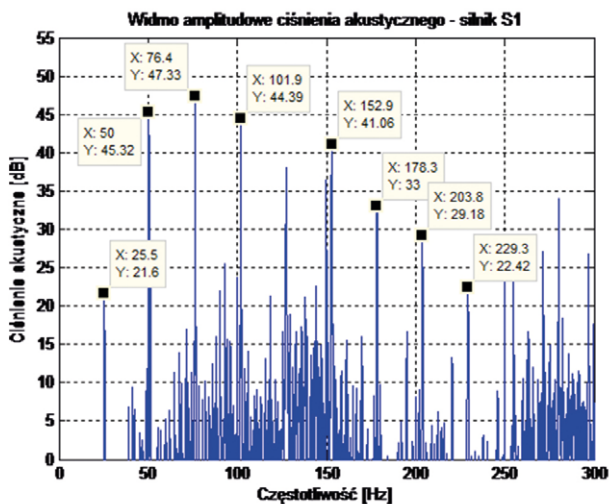
Na rys. 20 i 21 przedstawiono widma prądu i pochodnej strumienia z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi, świadczącymi o defekcie klatki. Wskaźnik uszkodzenia klatki na



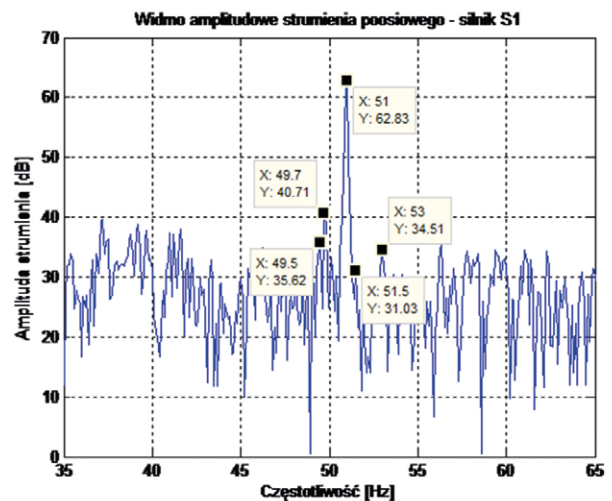
Rys. 18. Widmo amplitud przyspieszeń drgań silnika S1



Rys. 20. Widmo prądu z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi



Rys. 19. Widmo hałasu silnika S1



Rys. 21. Widmo pochodnej strumienia z zaznaczonymi składowymi poślizgowymi

podstawie widma prądu (rys. 20) przy przyjęciu 10 dB jako poziomu tła sygnału wynosi:

$$RFI_{10} = 2 \times (42,61 - 10) / (90,44 - 10) = 0,8108$$

Na podstawie widma pochodnej strumienia (rys. 21) wskaźnik uszkodzenia klatki:

$$RFI_{25} = 2 \times (40,71 - 25) / (62,83 - 25) = 0,8306$$

Są to, jak widać, bardzo zbliżone wartości. Oznaczają one wysokorezystancyjne połączenia w klatce lub nawet pęknięty pręt.

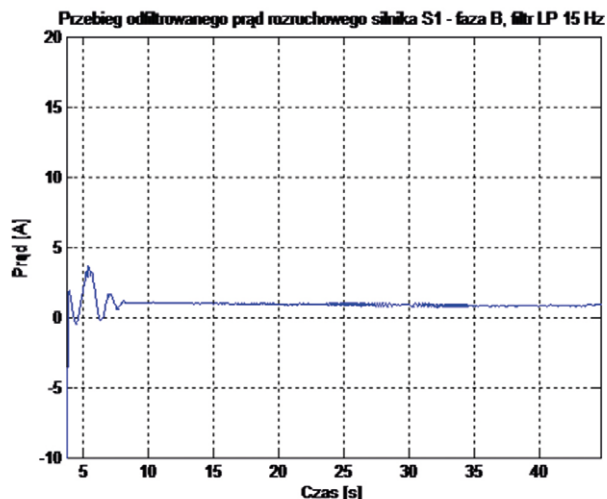
Badanie prądu rozruchowego

Na rys. 22 i 23 przedstawiono odfiltrowany przebieg czasowy prądu fazy B stojana podczas rozruchu, na rys. 24 prąd fazy A.

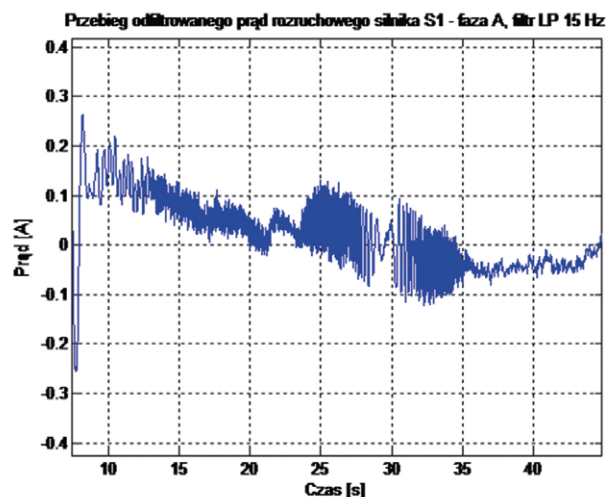
Charakter tych przebiegów niezbitnie potwierdza wcześniejszą diagnozę postawioną w oparciu o widma, jest jednak coś wspólnego z analogicznym przebiegiem silnika C: wysoka częstotliwość oscylacji.

2.3. Badanie silnika S3

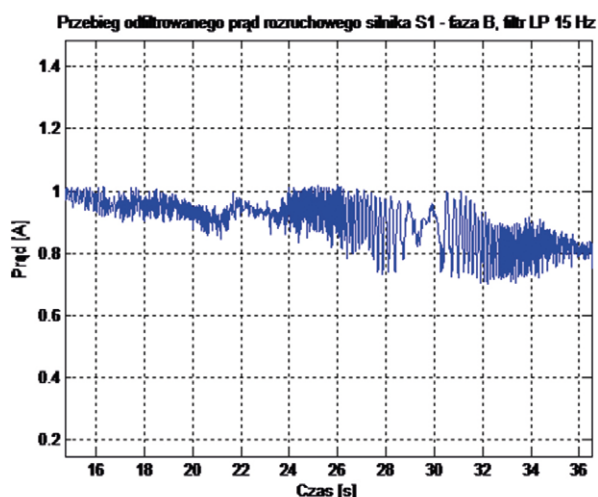
W przypadku silnika S3 badania nie ujawniły problemów z klatką wirnika, natomiast hałas oraz prąd biegu jałowego sugerowały defekt pakietu. Badanie prądu rozruchowego



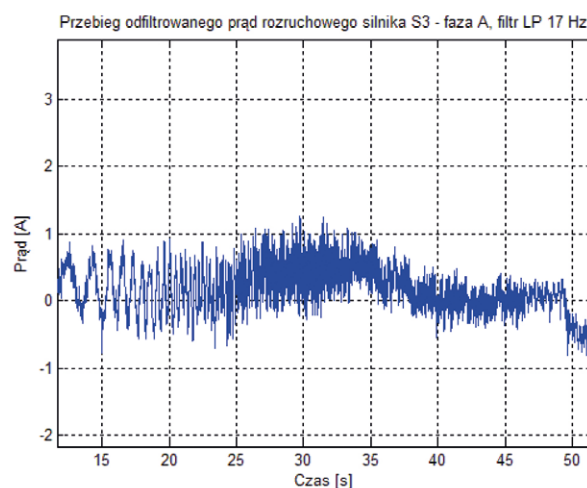
Rys. 22. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S1 fazy B



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



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



Rys. 25. Odfiltrowany prąd rozruchowy silnika S3 fazy A – powiększenie

wykazało podobny jego przebieg po odfiltrowaniu, jak w przypadku silnika C.

3. Badanie termowizyjne silnika C

Wirnik silnika C ważyący 15 ton poddano badaniu termowizyjnemu na stacji prób firmy Energotest-Diagnostyka w Brzeziu k. Opola.

Ogłędziny zewnętrzne tego wirnika wykazały istnienie widocznych uszkodzeń pakietu. Ilustrują to rys. 27 i 28.

Aby móc zastosować metodę termograficzną do lokalizacji miejsc uszkodzeń elementów wirnika, należy wymusić przepływ prądów w elementach konstrukcyjnych wirnika. Wszelkie zmiany rezystancji w połączeniach prętów klatki bądź zwarcia w blachach żelaza czynnego skutkują zwiększonym nagrzewaniem się tych miejsc, co wykrywa kamera termowizyjna.

Z uwagi na masę i gabaryty wirnika podjęto decyzję o sposobie nagrzania pakietu i elementów konstrukcyjnych wirnika (rys. 29). Polegało to na wymuszeniu przez wał wirnika prądu rzędu kilku tysięcy amperów (rys. 30).

Metoda termograficzna zastosowana do analizy stanu obwodów elektrycznych wirnika zrealizowana została w oparciu o rejestrację rozkładu temperatur (termogramów) kamerą termowizyjną o wysokiej rozdzielczości temperaturowej oraz obrazowej. Ocena wizualna została wykonana poprzez opracowanie wcześniej zarejestrowanych termogramów przy pomocy programów narzędziowych umożliwiających wyodrębnienie subtelnych różnic temperatur w różnych jego częściach, które są efektem uszkodzeń. Następnie nałóżono na fotografie elementów wirnika odpowiednie części termogramów w celu ich dokładnego udokumentowania.



Rys. 26. Widok badanego wirnika



Rys. 29. Widok badanego wirnika z przewodami układu wymuszenia prądu w wale



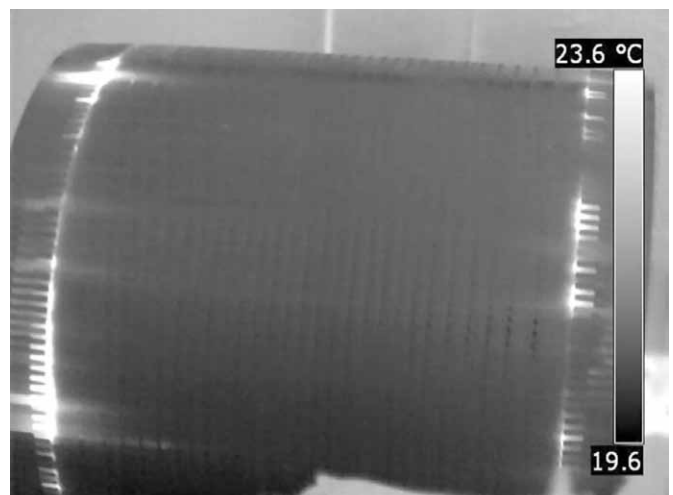
Rys. 27. Widoczne uszkodzenia pakietu przy prętach i klinach - miejsce nr 1



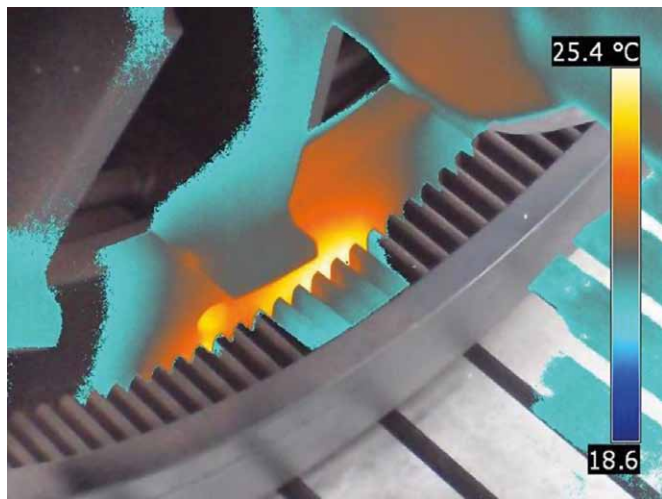
Rys. 30. Termogram przedstawiający nagrzane fragmenty klatki, wału i połączenia przewodów zasilających z wałem



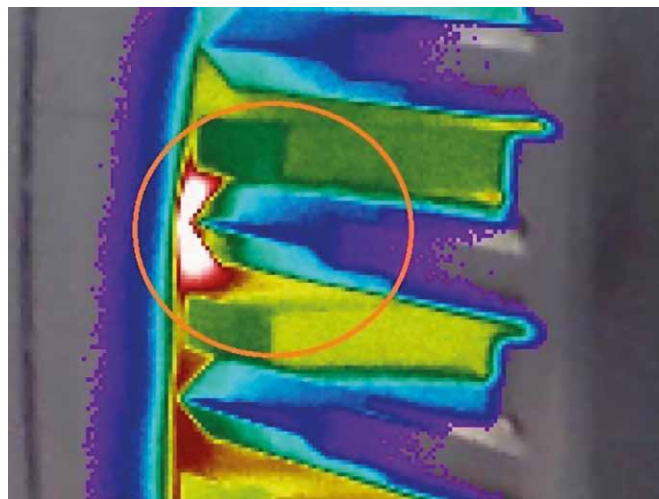
Rys. 28. Widoczne uszkodzenia pakietu przy prętach i klinach - miejsce nr 2



Rys. 31. Widoczne zwarcia prętów klatki przez blachy na krańcach żelaza czynnego



Rys. 32. Termogram nałożony na zdjęcie, zwarcia blach żelaza z prętami klatki



Rys. 34. Powiększony fragment termogramu z rys. 33 nałożony na zdjęcie – widać zwarcia wokół pręta (zaznaczone okręgiem)



Rys. 33. Termogram nałożony na zdjęcie, widoczne zwarcia wokół prętów

Analiza przedstawionych na rys. 31 i 32 termogramów wskazuje na wyraźne zwarcia blach żelaza czynnego z prętami klatki. Fotografie z rys. 33 i 44 przedstawiają widoczne zwarcia wokół prętów. Nie jest także wykluczone, że część miejsc zwarcia żelaza z prętami jest usytuowana wewnątrz wirnika i dlatego jest niewidoczna z zewnątrz.

4. Podsumowanie

Cechami wspólnymi 3 analizowanych maszyn były: hałas, jaki emitowały podczas pracy, oraz fakt zawierania przez widma prądu pochodnej strumienia, drgań i hałasu, składowych o częstotliwościach, będących wielokrotnością częstotliwości obrotowej wirnika. W przypadku wszystkich 3 silników prąd rozruchowy zawierał charakterystyczne oscylacje o wysokiej częstotliwości (czyżby równej częstotliwości prądów wirowych i skrośnych w zwartych blachach?), ale i jego kształt także w znany sposób potwierdzał diagnozę wynikającą z analizy widm.

Z kolei oryginalna metoda nagrzewania wirnika poprzez wał jednoznacznie dowiodła, że w pakiecie wirnika silnika C doszło do zwarcia. Miejsca tych zwarcia rozłożone były niesymetrycznie po obwodzie wirnika i zjawiska, jakie powodowały (prądy skrośne płynące wzdłuż osi wału mostkujące częściowo pręty wirnika, prądy w blachach płynące pomiędzy prętami), nie kompensowały się, ale wzmacniały niesymetrię elektromagnetyczną wirnika. W rezultacie analiza widm prądów wskazała na niesymetrię prądową klatki, w istocie polegającą na istnieniu dodatkowych, niesymetrycznie zlokalizowanych obwodów prądowych w wirniku.


Zwarcia blach dają zatem w widmie prądu podobne efekty jak pęknięcia prętów i powodują wzrost amplitud składowych poślizgowych, co skutkuje odpowiednio wysokim wskaźnikiem RFI (*Rotor Fault Index*). Dlatego tak znaczny poziom hałasu silnika C był wynikiem zdużenia tych częstotliwości z bardzo bliskimi częstotliwościami od obciążenia, które wzajemnie nakładały się na siebie w wyniku nawet nieznacznej fluktuacji obrotów.

Zastosowana w opisanych tu badaniach metoda diagnostyki termowizyjnej ostatecznie weryfikuje diagnozy postawione w oparciu o pośrednie metody pomiarowe i zjawiska towarzyszące defektom.

Literatura

- [1] ŁAWROWSKI Z.: *Defekty wirników silników indukcyjnych dużych mocy, termograficzna ocena stanu technicznego*. „Zeszyty Problematyczne – Maszyny Elektryczne” 111/2016.
- [2] ŁAWROWSKI Z.: *Diagnostyka silników klatkowych wysokiego napięcia w energetyce*. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice 1999.
- [3] HICKIEWICZ J., ŁAWROWSKI Z.: *Przykłady badań diagnostycznych transformatorów i maszyn elektrycznych w energetyce*. XLI Międzynarodowe Sympozjum Maszyn Elektrycznych SME – 2005, 14–17 czerwca 2005, Jarnołtówek, tom II, s. 598–605.

- [4] ŁAWROWSKI Z., BOJAR M., HERMAN W.: *Monitorowanie rozwijającego się uszkodzenia w transformatorze blokowym przy wykorzystaniu termowizji i badań wibroakustycznych*. Polska Akademia Nauk – Podstawowe problemy metrologii, Krynica-Zdrój – czerwiec 2012.
- [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, 33(1)/1997, pp. 24–34.
- [6] KOKKO V.: *Condition monitoring of squirrel-cage motors by axial magnetic flux measurements*. Academic Dissertation, University of Oulu, 2003, Finland.
- [7] 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.
- [8] FROSINI L., BORIN A., GIROMETTA, L., VENCHI G.: *Development of a leakage flux measurement system for condition monitoring of electrical drives*. IEEE International Symposium on SDEMPED, 5–8 Sept. 2011, pp. 356–363.
- [9] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A., GUZIEC K.: *Wykorzystanie strumienia unipolarnego w diagnostyce maszyn prądu przemiennego*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 99/2013.
- [10] PETRYNA J., SUŁOWICZ M., DUDA A.: *Wykorzystanie strumienia poosiowego do badania stanów dynamicznych maszyn indukcyjnych małej i dużej mocy*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 102/2014.
- [11] PRAGŁOWSKA-RYŁKO N., SUŁOWICZ M.: *Zastosowanie ruchomej wartości skutecznej prądu do diagnostyki silników indukcyjnych klatkowych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” 106/2015.

 dr inż. Janusz Petryna, e-mail: jpetryna@pk.edu.pl;

dr inż. Zbigniew Ławrowski,

e-mail: zlawrowski@energotest-diagnostyka.pl,

Energotest-Diagnostyka Sp. z o.o.;

dr inż. Maciej Sułowicz, e-mail: msulowicz@pk.edu.pl

Politechnika Krakowska, Wydział Inżynierii Elektrycznej

i Komputerowej, Instytut Elektromechanicznych Przemian Energii;

mgr inż. Krzysztof Guziec, e-mail: office@senco.krakow.pl,

SENCO Sp. z o.o.

artykuł recenzowany