

Stanisław Rawicki, Jacek Koczorowski, Marcin Nowak
Politechnika Poznańska, Poznań
Radosław Mirski, Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu, Poznań

BADANIE SPEKTRUM DRGAŃ TRÓJFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY USZKODZENIACH UZWOJENIA STOJANA

INVESTIGATION OF VIBRATION SPECTRUM OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR AT STATOR WINDING DAMAGES

Abstract: The paper deals with the diagnostics of windings damages in three-phase induction motors basing on the machine vibration analysis. By means of the computer program, the vibration spectrum has been analysed and the essential diagnostic harmonics of vibration of the three-phase slip-ring induction motor were chosen. The following damages: the internal short-circuit of the winding to the frame, the internal shorting between two phases and the shorting of the stator coil have been investigated. Within the comparative diagnostics, the data of the symmetrical three-phase induction motor are the basis for a state valuation of the machine. It was shown that the change of vibration spectrum can correspond with the technical state of the motor. The extended strategy of vibration research is connected with measurements for frequencies of a wide range. In this paper, the acceleration amplitude has been taken into account for the assessment criterion and thanks to this choice vibrations of great frequencies were more visible. Measurements have been done for the motor placed on the work-stand.

1. Wstęp

Diagnostyka typu on-line trójfazowych silników indukcyjnych ma ważne znaczenie praktyczne [3, 6, 7]. Umożliwia ona szybkie wykrycie awarii i wyłączenie silnika jeszcze zanim nastąpi jego zniszczenie. W przypadku dopiero rozwijających się uszkodzeń (początkowa faza awarii) możliwe jest odpowiednie zaplanowanie czasu remontu oraz śledzenie rozwoju stopnia defektu maszyny elektrycznej. W ramach ogólnej teorii diagnostycznej [2], praca silnika powoduje generowanie energii (o małej mocy w porównaniu ze znamionową mocą głównej maszyny), która jest rozpraszana w otaczającym środowisku. Cechy tej pojawiającej się w otoczeniu energii są zależne od rodzaju uszkodzenia; badanie spektrum drgań silnika indukcyjnego [4, 5] może umożliwić realizację jego diagnostyki na stanowisku pracy.

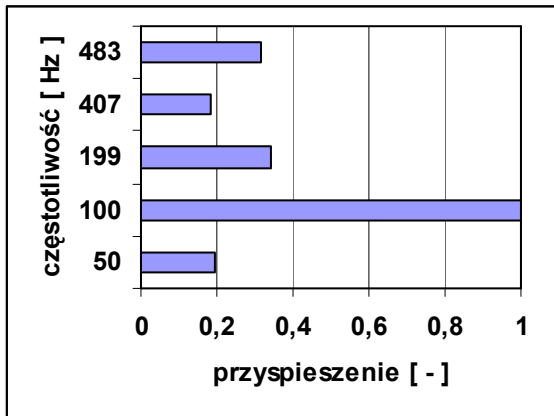
W niniejszym artykule przedstawiono część wyników badań dotyczących spektrum drgań trójfazowego silnika indukcyjnego przy następujących uszkodzeniach: wewnętrzne zwarcie uzwojenia z obudową silnika, zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika, zwarcie cewki. Spektrum drgań porównywano z przypadkiem maszyny nieuszkodzonej.

2. Badania drgań silnika indukcyjnego

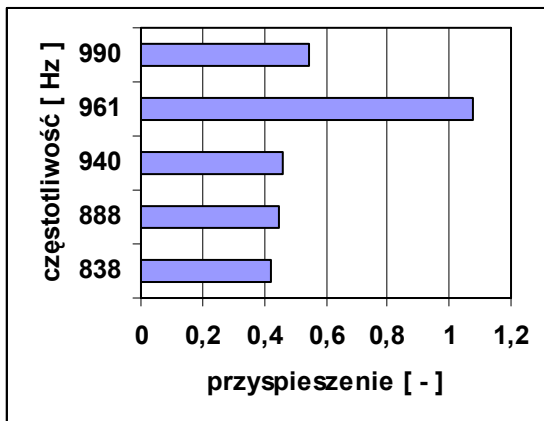
Badania przeprowadzono dla trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego o 4 biegunach, napięciu znamionowym 380V i znamionowym prądzie 4.6A. Aby umożliwić modelowanie różnych, wewnętrznych uszkodzeń uzwojenia stojana, wykonano nowe uzwojenie z wieloma wyprowadzeniami do zewnętrznej tablicy zaciskowej. Drgania były mierzone za pomocą miernika typu SVAN 912A. Do analizy wybrano pomiary amplitud przyspieszeń drgań, dzięki czemu drgania o dużych częstotliwościach były lepiej uwidocznione, przy czym silnik elektryczny był umieszczony na stanowisku pracy. W artykule podano tylko część wyników wykonanych pomiarów drgań w kierunku promieniowym.

Rysunki: 1a, 1b pokazują wyniki pomiarów dla sprawnego silnika; dane zawarte na tych rysunkach są podstawą (w ramach metody porównań) do oceny stanu technicznego silnika. Wszędzie przyspieszenia są podane w jednostkach względnych w odniesieniu do składowej harmonicznnej przyspieszenia o częstotliwości 100Hz, zmierzonej dla sprawnej maszyny elektrycznej (na rysunku 1a względna wartość przyspieszenia dla tej częstotliwości jest równa 1). W artykule wyniki pomiarów dla 5 harmonicznnych o największych amplitudach przyspieszeń

drgań oraz o częstotliwościach do 500Hz są podane na rysunkach oznaczonych literą „a”, natomiast dla częstotliwości większych niż 500Hz wyniki dotyczące dominujących pięciu harmonicznych zostały przedstawione na rysunkach z literą „b”.

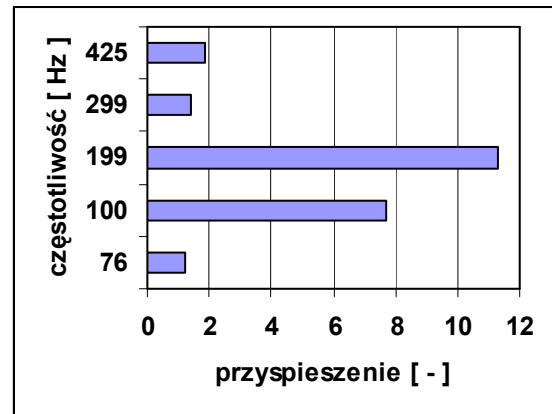


Rys. 1a. Stan symetryczny silnika indukcyjnego; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach do 500Hz

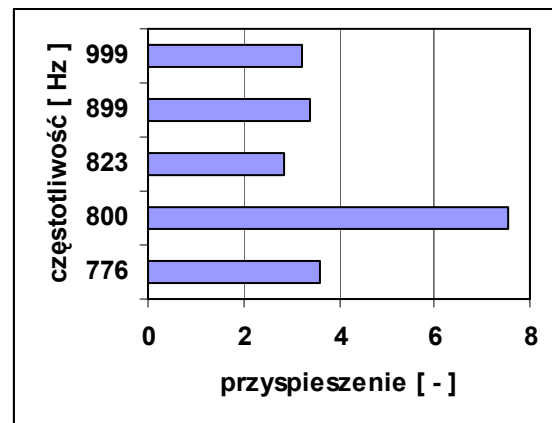


Rys. 1b. Stan symetryczny silnika indukcyjnego; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach większych niż 500Hz

Dla stojana połączonego w gwiazdę bez przewodu zerowego szczególnie interesujące były takie awarie, przy których miejsce uszkodzenia było stosunkowo blisko punktu neutralnego gwiazdy, gdyż wzrost natężenia prądów przewodowych był w takim przypadku nieduży i zabezpieczenia umieszczone w obwodzie zewnętrznym silnika mogą być nieskuteczne.



Rys. 2a. Zwarcie między uzwojeniem a obudową silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach do 500Hz

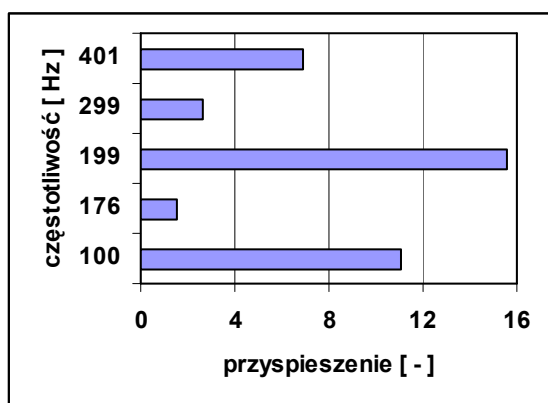


Rys. 2b. Zwarcie między uzwojeniem a obudową silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach większych niż 500Hz

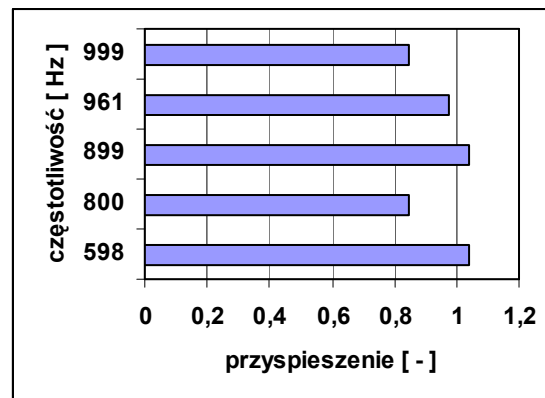
Na rysunkach 2a, 2b podano wyniki pomiarów dla przypadku zwarcia wewnętrznego między uzwojeniem fazowym i obudową silnika. Odległość punktu zwarcia od punktu neutralnego gwiazdy była niewielka (mierzona względną liczbą zwojów wynosiła 1/6 całkowitej liczby zwojów uzwojenia jednej fazy); przy takim uszkodzeniu na biegu jałowym silnika prądy pobierane z sieci wynosiły: 4A, 2.1A oraz 1.5A i były mniejsze od prądu znamionowego silnika 4.6A. Analiza widma drgań maszyny elektrycznej może w podobnych przypadkach lepiej informować o pojawieniu się uszkodzenia trójfazowego uzwojenia. Stan awaryjny powoduje znaczny wzrost amplitud drgań silnika indukcyjnego. Porównując wyniki na rysunkach 1a oraz 2a, największe przyspieszenia drgań występują dla tych samych częstotliwości 100Hz i 199Hz,

przy czym dla sprawnej maszyny w jednostkach względnych wynoszą one odpowiednio: 1 i 0.34, a przy zwarceniu do obudowy: 7.7, 11.3. W przypadku drgań o częstotliwościach większych niż 500Hz (rys. 1b i 2b), dwie dominujące przy uszkodzeniu silnika składowe mają amplitudy: 3.6, 7.5 przy częstotliwościach 776Hz i 800Hz, a więc znacznie przekraczają dwie największe wartości dla sprawnego silnika: 1.1, 0.54 dla częstotliwości: 961Hz, 990Hz.

Na rysunkach 3a, 3b zamieszczono rezultaty pomiarów drgań dla zwarcia jednej cewki silnika. Przy nieobciążonym trójfazowym silniku indukcyjnym pierścieniowym natężenia prądów pobieranych z sieci wynosiły: 2.4A, 3.4A oraz 2.4A (mniej od prądu znamionowego 4.6A). W zwartym obwodzie uszkodzonej cewki zmierzony prąd wynosił 7.4A, a więc wyraźnie przekroczył wartość znamionową, co może nie być wykrywane przez klasyczne zabezpieczenia zainstalowane w zewnętrznym obwodzie silnika. Na rysunku 3a trzy największe składowe posiadają amplitudy: 11.1, 15.6, 6.9 przy częstotliwościach odpowiednio: 100Hz, 199Hz i 401Hz. Dla wartości większych od 500Hz (rys. 3b) dominują składowe o częstotliwościach: 598Hz, 899Hz i 961Hz oraz amplitudach: 1.04, 1.04, 0.97. Porównanie tych wartości szczególnie z rysunkiem 1a nasuwa wniosek o znacznym wzroście drgań silnika po wystąpieniu zwarcia wewnętrznego cewki stojana.

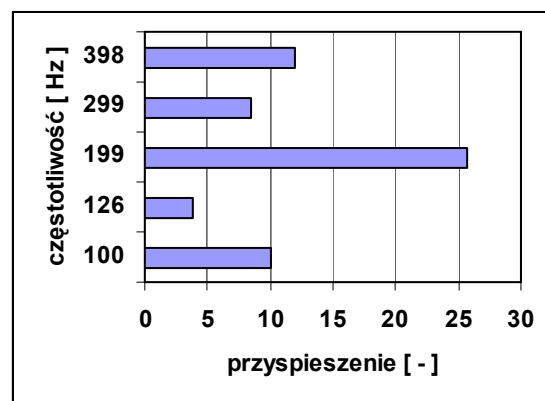


Rys. 3a. Zwarcie jednej cewki uzwojenia silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach do 500Hz

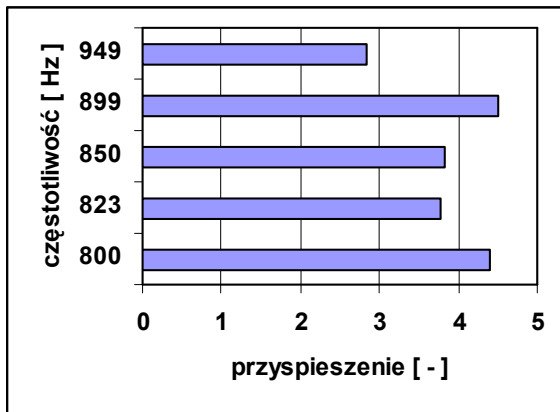


Rys. 3b. Zwarcie jednej cewki uzwojenia silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotl. większych niż 500Hz

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono wyniki pomiarów dla przypadku zwarcia między uzwojeniami fazowymi stojana. Dla każdej fazy odległość punktu zwarcia od punktu neutralnego połączenia w gwiazdę była jednakowa i wynosiła 1/6 całkowitej liczby zwojów jednego uzwojenia fazowego. Dla takich warunków wartości natężenia prądów przewodowych badanego silnika na biegu jałowym wynosiły: 5.1A, 4.7A oraz 2.5A, a więc tylko w dwóch fazach prąd był trochę większy od znamionowego. Równocześnie prądy w tych dwóch częściach uszkodzonych (zwieranych) uzwojeń fazowych, które leżą między punktem zwarcia i punktem neutralnym skojarzenia w gwiazdę, miały wartości: 9A i 10A, co wyraźnie przekracza znamionowe natężenie prądu i naraża uzwojenie silnika na dalsze pogłębianie się niekorzystnych skutków uszkodzenia, aż do jego totalnego zniszczenia.



Rys. 4a. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotliwościach do 500Hz



Rys. 4b. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika; względne wartości przyspieszenia drgań dla głównych harmonicznych o częstotl. większych niż 500Hz

Również podczas zwarcia między uzwojeniami fazowymi trójfazowego pierścieniowego silnika indukcyjnego wyraźnie zwiększają się drgania maszyny elektrycznej. Na rysunku 4a trzy główne składowe mają amplitudy przyspieszeń równe kolejno: 10.1, 25.6 oraz 11.9 przy częstotliwościach: 100Hz, 199Hz i 398Hz. Gdy wartość częstotliwości jest większa od 500Hz (rys. 4b), to największe znaczenie posiadają harmoniczne: 800Hz, 850Hz, 899Hz, których amplitudy wynoszą odpowiednio: 4.4, 3.8, 4.5.

3. Podsumowanie

W artykule omówiono wybrane rezultaty badań dotyczących spektrum drgań trójfazowego pierścieniowego silnika indukcyjnego przy takich uszkodzeniach jak: zwarcie uzwojenia z obudową silnika, zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika, zwarcie cewki. Spektrum drgań maszyny elektrycznej porównywano z przypadkiem maszyny nieuszkodzonej.

Przy niektórych uszkodzeniach uzwojenia silnika indukcyjnego wzrost natężenia prądów przewodowych może być nieduży, a wtedy zabezpieczenia umieszczone w obwodzie zewnętrznym silnika mogą być nieskuteczne. Analiza widma drgań maszyny elektrycznej może w takich przypadkach lepiej informować o pojawieniu się uszkodzenia uzwojenia, ponieważ stan awaryjny powoduje znaczny wzrost amplitud drgań silnika indukcyjnego.

Do analizy wybrano pomiary amplitud przyspieszeń drgań, dzięki czemu składowe drgań o dużych częstotliwościach były lepiej uwidocznione; szerokie spektrum składowych harmonicznych umożliwiło pogłębione studium wibracji silnika.

Badanie drgań na stanowisku pracy silnika umożliwi jego diagnostykę typu on-line, co ma ważne znaczenie praktyczne.

4. Literatura

- [1]. Antal M., Antal L., Zawilak J.: *Badania uszkodzeń uzwojenia stojana klatkowego silnika indukcyjnego*. Zeszyty Problemowe BOBRME KOMEL, Nr 76, 2007
- [2]. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn*. WCNEMT, 1992, Warszawa
- [3]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. BOBRME KOMEL, 1998, Katowice
- [4]. Hickiewicz J., Szymaniec S., Wach P.: *Vibration Phenomena in Induction Machines*. Proceedings of the International Conf. on Electrical Machines ICEM-84, Vol. 2: Lausanne, 1984
- [5]. Hickiewicz J., Szymaniec S., Wach P.: *Vibroacoustic diagnostics of electric circuits defects of 3-phase induction motors*. Proceedings of the International Conference on Electrical Machines ICEM-86, Part 2: München, 1986
- [6]. Rawicki S., Koczorowski J., Mirski R.: *On-line diagnostics of three-phase induction motors basing on analysis of vibration, noise, current and torque spectra*. Proceedings of International Conference on Models and Simulation MS'08: Palma de Majorca – Spain, 2008
- [7]. Sobczyk T., Węgiel T., Sułowicz M., Warzecha A., Weinreb K.: *A distributed system for diagnostics of induction motors*. Proceedings of IEEE Symposium on Diagnostics for Electric Machines, Power Electronics and Drives, SDEMPED' 2005: Viena, 2005

Autorzy

Dr hab. inż. Stanisław Rawicki,
prof. PP; inż. Jacek Koczorowski,
mgr inż. Marcin Nowak,
Politechnika Poznańska
Wydział Elektryczny
Ul. Piotrowo 3A, 60-965 Poznań
E-Mail: stanislaw.rawicki@put.poznan.pl,
jkoczorowski@wp.pl, marnow2003@wp.pl

Dr inż. Radosław Mirski
Uniwersytet Przyrodniczy w Poznaniu
Wydział Technologii Drewna
Ul. Wojska Polskiego 28, 60-637 Poznań
E-Mail: rmirski@au.poznan.pl