

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

## ANALIZA AKUSTYCZNEGO WIDMA TRÓJFAZOWEGO SILNIKA INDUKCYJNEGO PRZY USZKODZENIACH UZWOJENIA STOJANA

### ANALYSIS OF ACOUSTIC SPECTRUM OF THREE-PHASE INDUCTION MOTOR AT STATOR WINDING DAMAGES

**Abstract:** The paper concerns the diagnostics of windings defects in three-phase induction motors basing on the electric machine noise analysis. With the help of the computer software, the acoustic spectrum was analysed and the dominant diagnostic harmonics of noise of the three-phase slip-ring induction motor have been determined. The failures of the following type: the internal shorting between two phases and the short-circuit of the stator coil have been investigated. The problem of the increase of the damage degree was also analysed. Within the framework of the comparative diagnostic methodics, the properties and parameters of the symmetrical three-phase induction motor are the basis for a state valuation of the electrical machine. It was illustrated that the change of the acoustic spectrum can give information about the technical state of the motor. The interesting methodology of noise research consists in investigations for frequencies of a wide range. All presented in this paper measurements have been done for the three-phase induction slip-ring motor placed on the work-stand.

#### 1. Wstęp

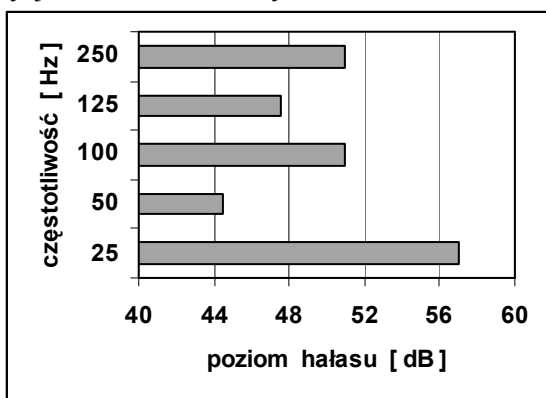
W licznych praktycznych zastosowaniach trójfazowych silników indukcyjnych istotną rolę odgrywa diagnostyka techniczna typu on-line [2, 4, 8]. Dzięki takiej diagnostyce staje się możliwe stosunkowo wczesne rozpoznanie uszkodzenia i wyłączenie maszyny elektrycznej zanim pojawią się warunki, przy których nastąpi jej zniszczenie. Interesujące są przypadki stopniowo rozwijających się awarii, dla których nowoczesna diagnostyka on-line umożliwia właściwe opracowanie planu remontu oraz obserwowanie dalszego rozwoju stopnia uszkodzenia badanej maszyny elektrycznej. Na podstawie zasadniczych założeń ogólnej teorii diagnostycznej [1], praca silnika indukcyjnego wywołuje generowanie dodatkowej energii (o niewielkiej mocy, jeżeli dokonuje się porównań ze znamionową mocą badanej maszyny). W otaczającym środowisku następuje rozpraszanie się tej energii dodatkowej. Jest bardzo interesujące, że właściwości pojawiającej się w otoczeniu energii mogą być często zależne od typu awarii. W ramach takiego podejścia metodycznego, również badanie akustycznego widma trójfazowego silnika indukcyjnego może być podstawą do przeprowadzenia badań diagnostycznych typu on-line bezpośrednio na stanowisku pracy. Sformułowanie zależności między rodzajem i stopniem uszkodzenia, a właściwo-

ściami sygnału diagnostycznego jest złożonym zagadnieniem, którego rozwiązanie wymaga opracowania możliwie dokładnych modeli matematycznych oraz wnikliwej analizy wyników doświadczalnych. W opracowanym artykule zamieszczono wybrane wyniki pomiarów dotyczących akustycznego widma trójfazowego silnika pierścieniowego, które były związane z następującymi rodzajami uszkodzeń w obwodzie stojana: zwarcie cewki oraz wewnętrzne zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika, przy czym wykonano badania dla różnych wartości rezystancji pomiędzy dwoma zwierzanymi punktami, co umożliwiło obserwację zachowania się maszyny przy różnym stopniu uszkodzenia. Akustyczne widmo porównywano ze spektrum hałasu wyznaczonym dla indukcyjnej maszyny nieuszkodzonej.

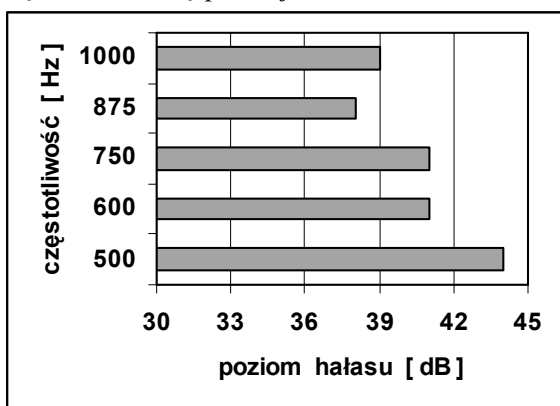
#### 2. Badania hałasu silnika indukcyjnego

Pomiary zostały wykonane dla trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego o następujących danych znamionowych: napięcie 380V, prąd 4.6A, moc 2.2kW, częstotliwość 50Hz, prędkość 1400obr/min. W celu wykonania pomiarów dla różnorodnych wewnętrznych awarii uzwojenia stojana, nawinięto nowe uzwojenie, które posiadało wiele połączeń wewnętrznych punktów uzwojenia z zaciskami

zewewnętrznej, mocno rozbudowanej tablicy zaciskowej. Akustyczne widma były wyznaczane przy pomocy przyrządu pomiarowego typu SVAN 912A. Badany silnik elektryczny był zainstalowany na stanowisku pracy, przy czym w ramach rozbudowanego systemu pomiarowego, do badań zarówno hałasu jak i drgań, osłona wentylatora była zdjęta. Ze względu na ograniczoną objętość niniejszego artykułu podano tutaj tylko wybrane wyniki wykonanych badań hałasu dla jednego punktu pomiarowego, w którym umieszczony został mikrofon. Ostateczny wybór miejsca zainstalowania mikrofonu był wynikiem wielu prób pomiarowych, w ramach których dokonano szczegółowej analizy porównawczej otrzymywanych rezultatów. Rysunki 1a, 1b pokazują wyniki pomiarów dla sprawnego silnika; zawarte tutaj dane są bazą (poprzez dokonywanie porównań) dla decyzji o stanie technicznym silnika.



Rys. 1a. Stan symetryczny (brak uszkodzeń) silnika indukcyjnego; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są poniżej 500Hz



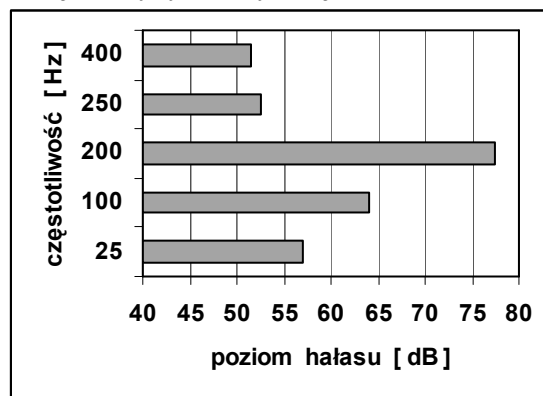
Rys. 1b. Stan symetryczny (brak uszkodzeń) silnika indukcyjnego; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są od 500Hz do 1000Hz

Na rysunkach 1-5 wyniki pomiarów dla pięciu harmonicznych o największych amplitudach poziomu hałasu oraz o częstotliwościach poniżej 500Hz są podane przy oznaczeniu danego rysunku literą „a”, natomiast dla częstotliwości zawartych w przedziale od wartości 500Hz do wartości 1000Hz wyniki, które dotyczą dominujących pięciu harmonicznych zostały przedstawione na rysunkach z literą „b”.

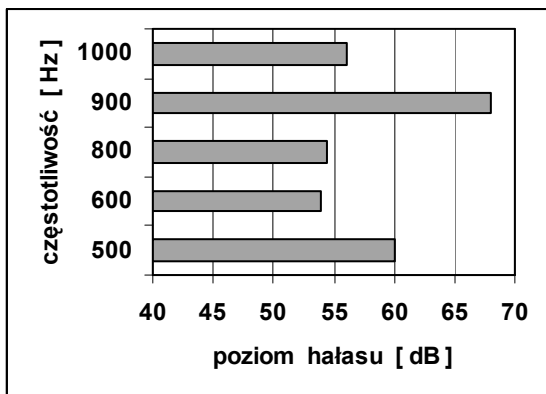
Dla badań, w ramach których uzwojenie stojana skojarzone było w gwiazdę bez przewodu neutralnego, bardzo ciekawe okazały się te uszkodzenia, przy których miejsce awarii znajdowało się dość blisko punktu neutralnego gwiazdy; w takich przypadkach wzrost wartości prądów pobieranych z trójfazowej sieci zasilającej był niewielki i zabezpieczenia zainstalowane na zewnątrz silnika mogą być nieskuteczne.

Rysunki 2a, 2b ilustrują rezultaty pomiarów, które zostały przeprowadzone dla wariantu zwarcia jednej cewki silnika.

Dla przypadku nieobciążonego trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego wartości prądów przewodowych pobieranych z trójfazowego źródła zasilającego wynosiły: 2.4A, 3.4A oraz 2.4A (a zatem były wyraźnie mniejsze niż prąd znamionowy równy 4.6A). Wewnątrz zwartego obwodu uszkodzonej cewki płynął prąd 7.4A, który znacznie przekroczył wartość znamionową; zwarcie jednej cewki może nie być wykrywane przez typowe zabezpieczenia umieszczone w zewnętrznym obwodzie trójfazowej maszyny elektrycznej.



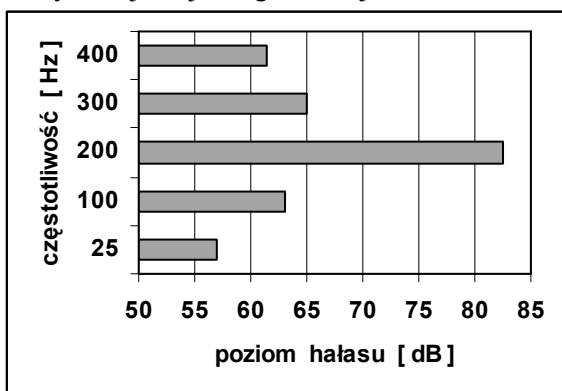
Rys. 2a. Zwarcie jednej cewki uzwojenia silnika; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są poniżej 500Hz



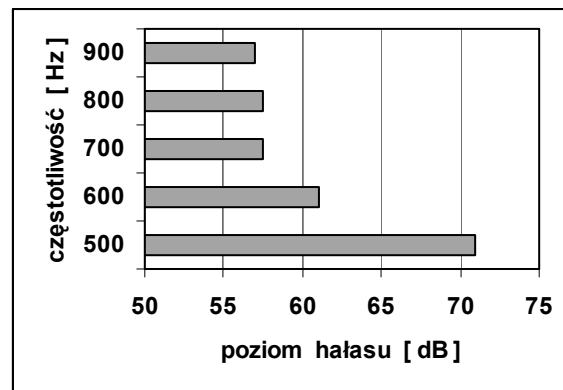
Rys. 2b. Zwarcie jednej cewki uzwojenia silnika; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są od 500Hz do 1000Hz

Na rysunku 2a trzy dominujące składowe posiadają następujące wartości poziomu hałasu: 57dB, 64dB, 77.5dB przy częstotliwościach odpowiednio równych: 25Hz, 100Hz i 200Hz. Dla wartości częstotliwości pomiędzy 500Hz oraz 1000Hz (rys. 2b) najważniejsze są składowe o częstotliwościach: 500Hz, 900Hz i 1000Hz oraz poziomie hałasu: 60dB, 68dB, 56dB. Porównanie tych wartości z rysunkami 1a, 1b pozwala zauważyć znaczny wzrost poziomu hałasu silnika po wystąpieniu zwarcia jednej cewki uzwojenia stojana.

Na rysunkach 3a i 3b zilustrowano wyniki pomiarów dla przypadku zwarcia między uzwojeniami dwóch różnych faz stojana. Dla każdego uzwojenia fazowego odległość punktu zwarcia od punktu neutralnego skojarzenia w gwiazdę była identyczna oraz wynosiła 1/6 całkowitej liczby zwojów jednego uzwojenia



Rys. 3a. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są poniżej 500Hz



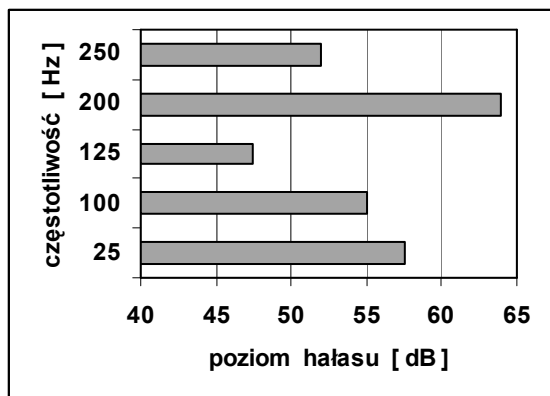
Rys. 3b. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika; wartości poziomu hałasu dla najważniejszych harmonicznych, których częstotliwości są od 500Hz do 1000Hz

fazowego. Przy takich danych wartości natężenia prądów przewodowych badanego silnika na biegu jałowym wynosiły: 5.1A, 4.7A oraz 2.5A. Można zauważyć, że tylko w dwóch fazach prąd był trochę większy od znamionowego. Dodatkowo należy tutaj podać, że prądy w tych dwóch częściach uszkodzonych (zwieranych) uzwojeń fazowych, które znajdują się między punktem zwarcia i punktem neutralnym połączenia w gwiazdę, miały wartości: 9A i 10A, co wyraźnie przekracza znamionowe natężenie prądu. Naraża to uzwojenie maszyny elektrycznej na pogłębianie się szkodliwych (np. nadmierny wzrost temperatury) skutków awarii, aż do całkowitego zniszczenia silnika indukcyjnego.

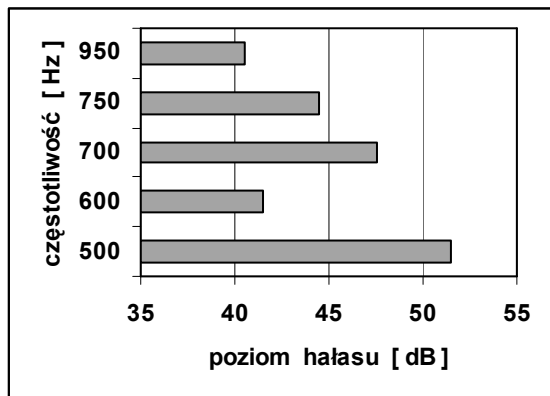
Również podczas zwarcia między uzwojeniami fazowymi trójfazowego pierścieniowego silnika indukcyjnego wyraźnie zwiększa się poziom hałasu analizowanej maszyny elektrycznej. Do takiego wniosku prowadzi porównanie wyników na rysunkach 1 oraz 3. Na rysunku 3a trzy najważniejsze składowe mają następujące wartości poziomu hałasu: 63dB, 82.5dB, 65dB przy częstotliwościach odpowiednio równych: 100Hz, 200Hz i 300Hz. Przy częstotliwościach zawartych między 500Hz oraz 1000Hz (rys. 3b) dominują składowe o częstotliwościach: 500Hz, 600Hz i 800Hz oraz poziomie hałasu: 71dB, 61dB, 57.5dB.

Dla praktycznych zastosowań diagnostyki w układach przemysłowych ważna jest możliwość obserwowania rozwoju stopnia uszkodzenia trójfazowego silnika indukcyjnego. Amplituda sygnału diagnostycznego może informować o tym, czy dane urządzenie z częściowym

uszkodzeniem może jeszcze przez pewien okres pracować. W początkowym stadium rozwoju



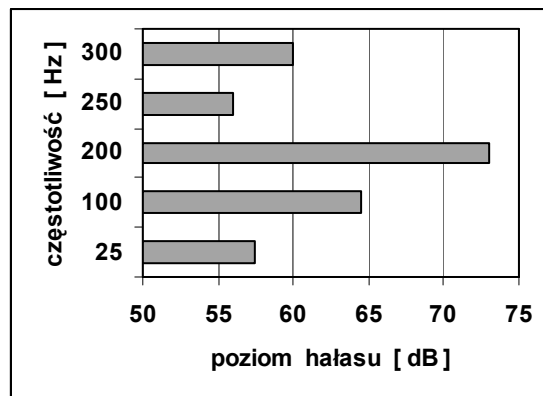
Rys. 4a. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika poprzez rezystancję  $r=0.81$ ; wartości poziomu hałasu dla głównych harmonicznych o częstotliwościach poniżej 500Hz



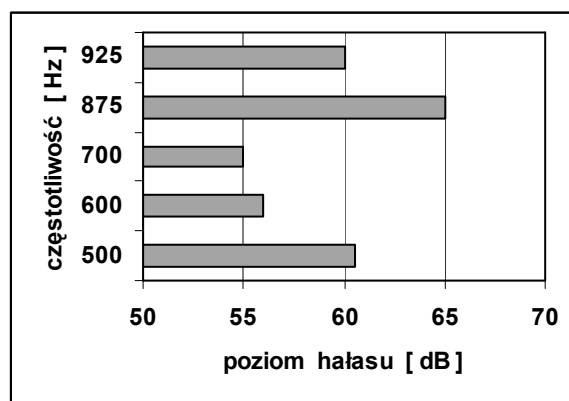
Rys. 4b. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika poprzez rezystancję  $r=0.81$ ; wartości poziomu hałasu dla głównych harmonicznych, których częstotliwości są od 500Hz do 1000Hz

defekt maszyny elektrycznej nie musi być równoznaczny z koniecznością nagłego wyłączenia uszkodzonego urządzenia. W praktyce spotyka się ważne procesy technologiczne, dla których nagle przerwanie może wiązać się z wielkimi stratami; w takich przypadkach odpowiednie zaplanowanie remontów silników dopiero podczas przerw produkcyjnych okazuje się najbardziej korzystne.

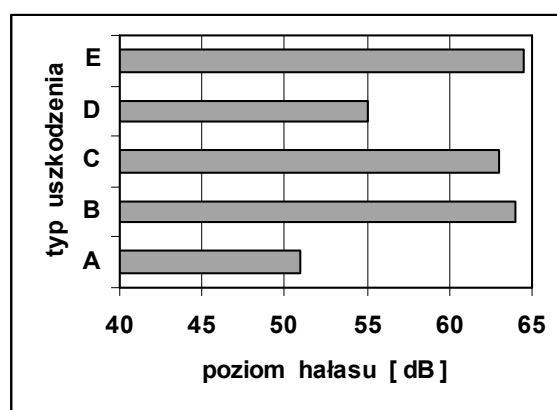
W celu zilustrowania wpływu stopnia uszkodzenia, na rysunkach 4a,b oraz 5a,b podano wyniki pomiarów dla przypadku zwarcia między uzwojeniami dwóch różnych faz stojana, przy czym rezystancja  $r$  obwodu zwierającego – odniesiona do impedancji znamionowej silnika indukcyjnego – była równa  $r = 0.81$  na rys. 4 i  $r = 0.112$  na rys. 5.



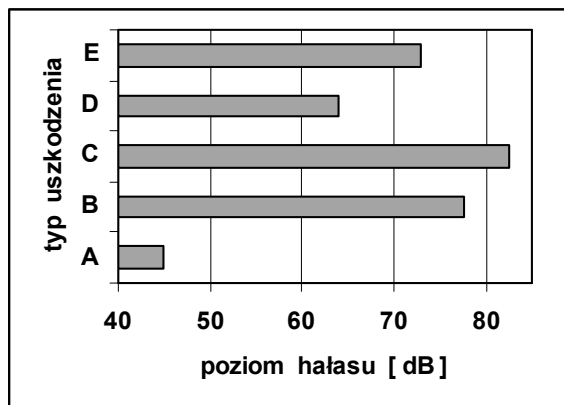
Rys. 5a. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika poprzez rezystancję  $r=0.112$ ; wartości poziomu hałasu dla głównych harmonicznych o częstotliwościach poniżej 500Hz



Rys. 5b. Zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika poprzez rezystancję  $r=0.112$ ; wartości poziomu hałasu dla głównych harmonicznych, których częstotliwości są od 500Hz do 1000Hz



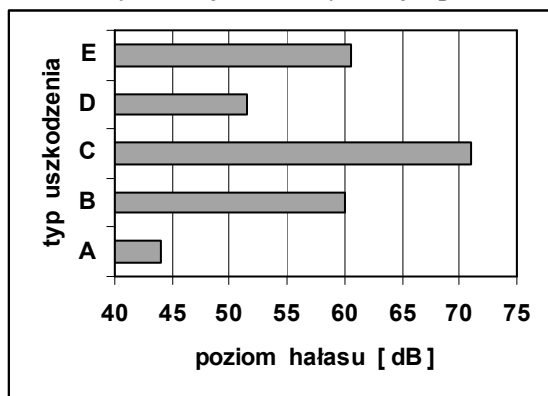
Rys. 6a. Porównanie amplitud składowej widma akustycznego o częstotliwości 100Hz dla silnika zdarnego (wariant A) oraz dla różnych typów uszkodzeń (warianty B, C, D, E)



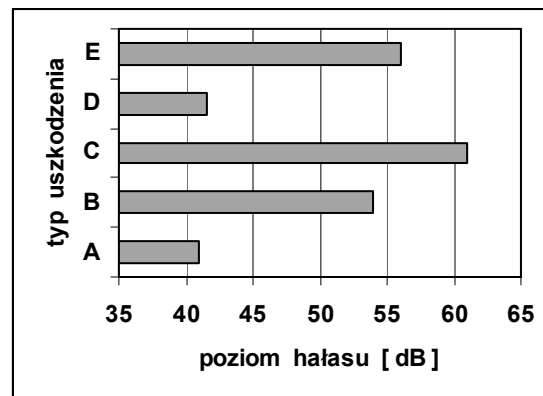
Rys. 6b. Porównanie amplitud składowej widma akustycznego o częstotliwości 200Hz dla silnika zdarnego (wariant A) oraz dla różnych typów uszkodzeń (warianty B, C, D, E)

Na rys. 3 połączenie zwarciove miało impedancję równą zero. Wzrost wartości rezystancji gałęzi zwierającej powoduje zmniejszenie poziomu hałasu. Na rysunkach 6a-6d dokonano porównania amplitud składowej widma akustycznego dla częstotliwości 100Hz i 200Hz (z przedziału poniżej 500Hz) oraz dla częstotliwości 500Hz i 600Hz (dla zakresu od 500Hz do 1000Hz). Wprowadzono następujące oznaczenia dla wariantu maszyny zdarnego oraz różnych wariantów uszkodzonego trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego:

- A – silnik zdarny,
- B – zwarta jedna cewka uzwojenia stojana,
- C – zwarcie wewnętrzne między uzwojeniami fazowymi stojana; impedancja połączenia zwarciovego równa zero,
- D – zwarcie wewnętrzne między uzwojeniami fazowymi stojana; rezystancja połączenia



Rys. 6c. Porównanie amplitud składowej widma akustycznego o częstotliwości 500Hz dla silnika zdarnego (wariant A) oraz dla różnych typów uszkodzeń (warianty B, C, D, E)



Rys. 6d. Porównanie amplitud składowej widma akustycznego o częstotliwości 600Hz dla silnika zdarnego (wariant A) oraz dla różnych typów uszkodzeń (warianty B, C, D, E)

zwarciovego równa 0.81,

- E – zwarcie wewnętrzne między uzwojeniami fazowymi stojana; rezystancja połączenia zwarciovego równa 0.112.

Przy braku uszkodzenia, polegającego na zwarciu wewnętrznym między uzwojeniami fazowymi stojana, można w modelu symulacyjnym dotyczącym uszkodzeń interpretować, że dla stanu zdarności rezystancja połączenia zwarciovego jest bardzo wielka, a natężenie prądu w gałęzi zwierającej jest bardzo małe. Dokonując symulacji różnego stopnia uszkodzenia, zmniejsza się stopniowo wartość rezystancji połączenia zwarciovego, która dla największego stopnia awarii przyjmuje wartość równą zero.

Dla częstotliwości 200Hz zaobserwowano największe wzrosty wartości poziomu hałasu po wystąpieniu różnego typu uszkodzeniach uzwojenia stojana. Przy składowej widma akustycznego o częstotliwości 200Hz wartość poziomu hałasu wynosi 45dB dla zdarnego badanej maszyny elektrycznej, natomiast ze wzrostem stopnia awarii (tutaj dla wartości rezystancji połączenia zwarciovego równych w ramach systemu jednostek względnych kolejno: 0.81, 0.112 oraz 0) zmierzony poziom hałasu wynosił odpowiednio: 64dB, 73dB i 82.5dB. W przypadku składowej o wyższej częstotliwości (tutaj wybrano 500Hz) dla trójfazowego silnika indukcyjnego pierścieniowego bez żadnych uszkodzeń wartość poziomu hałasu wynosi 44dB, a przy rozwijającym się stopniu awarii (takie same kolejne wartości rezystancji gałęzi zwarciovego) coraz to większe poziomy hałasu wynoszą: 51.5dB, 60.5dB oraz 71dB.

### 3. Wnioski

W niniejszym opracowaniu omówione zostały niektóre wyniki badań związanych z widmem akustycznym trójfazowego pierścieniowego silnika indukcyjnego przy takich uszkodzeniach jak: zwarcie cewki, zwarcie między uzwojeniami fazowymi silnika. Spektrum hałasu badanej maszyny elektrycznej było porównywane z widmem akustycznym maszyny zdanej.

Dla pewnych niesprawności uzwojenia stojana trójfazowego silnika indukcyjnego wzrost wartości natężenia prądów pobieranych z sieci zasilającej może być nieznaczny. W takich przypadkach zabezpieczenia, które zostały zainstalowane w zewnętrznym obwodzie maszyny elektrycznej mogą okazać się niewystarczające dla ochrony przed niekorzystnymi skutkami wewnętrznych stanów awaryjnych. Pomiar i analiza widma hałasu trójfazowego silnika indukcyjnego mogą w takich sytuacjach dawać wartościowe informacje o występowaniu defektu uzwojenia, gdyż uszkodzenie ma swoje odzwierciedlenie w postaci wyraźnego wzrostu amplitud różnorodnych składowych w ramach spektrum hałasu badanego silnika. Szerokie widmo składowych harmonicznym umożliwia pogłębioną analizę hałasu silnika indukcyjnego, a dla celów diagnostyki stwarza możliwość formułowania interesujących właściwości sygnałów diagnostycznych związanych z rodzajem i stopniem uszkodzenia maszyny elektrycznej.

Analiza hałasu bezpośrednio w miejscu pracy trójfazowego silnika indukcyjnego może być jedną z form diagnostyki w systemie on-line, a taka diagnostyka posiada duże znaczenie dla praktyki przemysłowej.

### 4. Literatura

- [1]. Cempel C., Tomaszewski F.: *Diagnostyka maszyn*. WCNEMT, Warszawa, 1992
- [2]. Glinka T.: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. BOBRME KOMEL, Katowice, 1998
- [3]. 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
- [4]. 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
- [5]. Kwaśnicki S.: *Hałas magnetyczny silników indukcyjnych trójfazowych klatkowych*. BOBRME

KOMEL, Katowice, 1998

[6]. Łączkowski R.: *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*. WNT, Warszawa, 1983

[7]. 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

[8]. 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

[9]. Yang S. J.: *Low-noise electrical motors*. CLARENDON PRESS, Oxford, 1981

### 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