

Piotr Zientek, Roman Niestrój
Politechnika Śląska, Gliwice

WPLYW USZKODZEŃ KLATKI WIRNIKA I NASYCENIA RDZENIA NA WARTOŚĆ NAPIĘĆ WAŁOWYCH W SILNIKACH INDUKCYJNYCH

INFLUENCE OF SQUIRREL CAGE FAULTS AND CORE SATURATION ON SHAFT VOLTAGE VALUES IN INDUCTION MOTORS

Abstract: The paper presents initial results of laboratory investigations. These results emphasize the intensification of the phenomena connected with bearing currents flow at different rotor cage damages. In the section 2 on the figure 5 are presented results of investigations connected with inducing of the third harmonic of the motor EMF. In the section 3 is presented the influence of rotor cage damages on the shaft voltage value. The subject of these studies was a low power induction motor (fig. 6), taking into consideration easiness and low costs of necessary modernization of it. On the figure 7 is presented the diagram of the shaft voltage and current measurement system. The measurements results are presented on the figure 8. Conclusions drawn from laboratory researches are presented in chapter 4.

1. Wstęp

Problem pasożytniczych napięć wałowych i prądów łożyskowych jest tematem powszechnie znanym, sięgającym początków istnienia silników indukcyjnych. Problem ten dotyczy głównie maszyn indukcyjnych dużej mocy. Z dostępnej literatury wynika, że przyczyn powstawania napięcia wałowego należy szukać w budowie samego silnika [2, 4, 5]. Powszechnie przyjmuje się, że są to głównie asymetrie powstające w procesie wytwarzania silnika, takie jak: nierównomierna szczelina powietrzna, ekscentryczność wirnika, asymetrie w obwodzie magnetycznym maszyny i jego anizotropie. W literaturze krajowej i zagranicznej brakuje publikacji wyjaśniających i potwierdzających, na podstawie badań laboratoryjnych, główne przyczyny powstawania napięć wałowych i prądów łożyskowych. Pasożytnicze prądy łożyskowe przyczyniają się do uszkodzeń węzłów łożyskowych nie tylko silników indukcyjnych, ale także maszyn sprzęgniętych z tymi silnikami. Źródłem prądów łożyskowych jest SEM indukowana wzdłuż wału maszyny, zwana napięciem wałowym. Powstaje ona wtedy, gdy istnieje zmienny strumień magnetyczny, zamykający się w obwodzie wzdłuż jarzma rdzenia stojana i wirnika, obejmujący wał maszyny indukcyjnej. Strumień ten powstaje wtedy, gdy występują jakiegokolwiek asymetrie w obwodzie elektromagnetycznym silnika spowodowane na przykład pęknięciem prętów lub pierścieni zwierających klatki

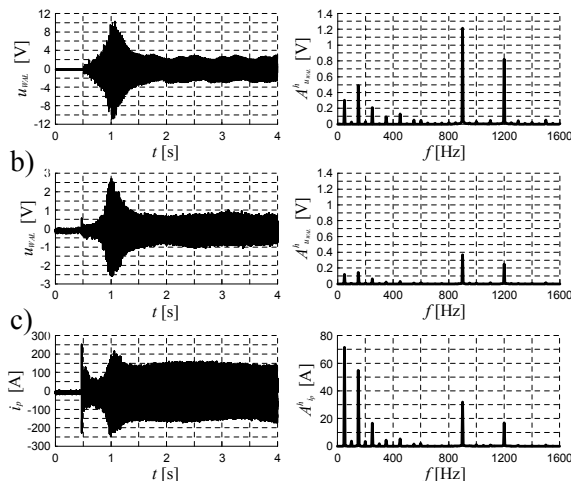
wirnika. W pewnych przypadkach silniki indukcyjne mogą długotrwale pracować z uszkodzeniami klatki wirnika, co może, w sposób pośredni, negatywnie wpływać na trwałość węzłów łożyskowych. W niniejszym artykule przedstawiono metodę i wyniki wstępnych badań laboratoryjnych silnika z uszkodzoną klatką wirnika. Uzyskane wyniki wskazują na nasilenie zjawisk związanych z przepływem prądów łożyskowych przy różnych uszkodzeniach klatki wirnika. Obiektem badań był silnik indukcyjny małej mocy, ze względu na łatwość i niskie koszty wykonania niezbędnych modernizacji silnika. Można przyjąć, z dużym prawdopodobieństwem, że zjawiska zaobserwowane w czasie przeprowadzonych badań wystąpią również w silnikach dużej mocy, w odpowiednio większej skali.

Ponadto, w niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań związanych z indukowaniem się trzeciej harmonicznej SEM silnika. Genezą tych badań była zaobserwowana w dużej grupie górniczych silników indukcyjnych, silna trzecia harmoniczna napięć wałowych, która może powodować przepływ trzeciej harmonicznej prądów łożyskowych o znacznej wartości.

2. Wpływ napięcia zasilania na wartość trzeciej harmonicznej SEM silnika

Analiza przebiegów napięć i prądów wałowych w górniczych silnikach indukcyjnych o mocach od 200kW do 650kW, którą przeprowadzono

w oparciu o obliczone transformaty Fouriera, wykazała obecność w tych przebiegach trzeciej harmonicznej o częstotliwości 150Hz. Na rysunku 1 przedstawiono wyniki pomiarów, wykonanych dla silnika indukcyjnego o mocy 500kW i napięciu znamionowym 3300V, podczas bezpośredniego rozruchu i w stanie ustalonym. W czasie pomiarów wykorzystano metodę pomiarową opisaną w [1], pozwalającą na przybliżone oszacowanie wartości prądów wałowych, które mogą wystąpić w danym silniku. W przypadku, gdy prąd wałowy nie płynie (rys. 1a) napięcie wałowe osiąga znaczne wartości. Przy przepływie prądu wałowego (rys. 1c) następuje wyraźnie zmniejszenie napięcia wałowego (rys. 1b). W obu przypadkach, w jego transformatach Fouriera (rys. 1a i 1b) dominują harmoniczne żłobkowe o częstotliwościach 900Hz i 1200Hz. Natomiast w widmie częstotliwościowym prądu wałowego, poza harmoniczną podstawową o częstotliwości 50Hz, występuje bardzo silna składowa o częstotliwości 150Hz. Składowe o częstotliwościach wyższych mają mniejsze wartości, co jest spowodowane dużą impedancją drogi przepływu prądu łożyskowego dla tych składowych. Z tego względu istnienie trzeciej harmonicznej SEM silnika, która „przenosi się” do napięcia wałowego, może być istotnym czynnikiem skracającym żywotność węzłów łożyskowych.

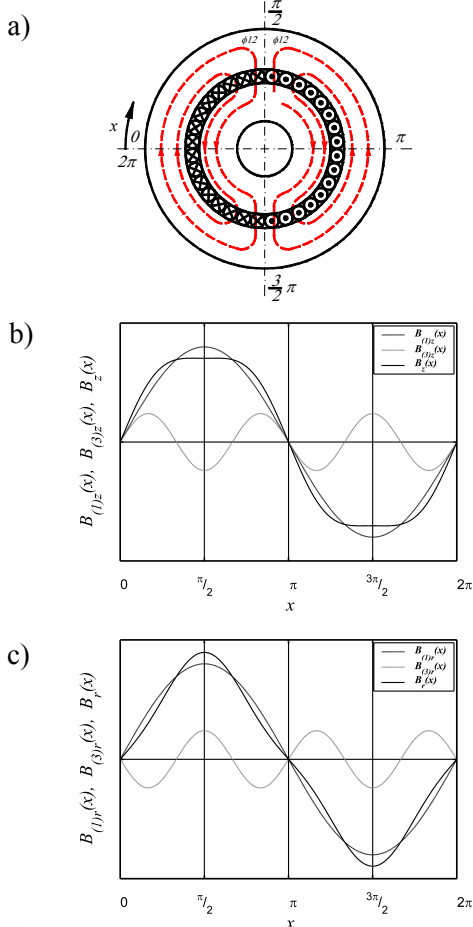


Rys. 1. Zarejestrowane przebiegi prądu i napięcia wałowych oraz ich transformaty Fouriera w stanie ustalonym dla silnika indukcyjnego dużej mocy (opis w tekście)

Przyczyną powstawania trzeciej harmonicznej SEM indukowanej w uzwojeniach silnika jest zjawisko nasycenia pakietu blach [7]. Zjawisko to można wyjaśnić dla dwubiegunowego silnika

przedstawionego na rysunku 2a, rozpatrując oddzielnie nasycenie zębów i nasycenie rdzenia silnika oraz pomijając wyższe harmoniczne rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. Obszary nasycenia zębów wystąpią w tych miejscach na obwodzie silnika, w których następuje zagęszczenie linii pola magnetycznego, przechodzących przez zęby i szczelinę powietrzną (czyli tam, gdzie strumień magnetyczny w szczelinie powietrznej jest maksymalny). Obszary te występują dla $x=\pi/2$ i $x=3\pi/2$. Nasycenie powoduje „wypychanie” strumienia magnetycznego na zewnątrz tych obszarów (przez ich zwiększoną reluktancję), co skutkuje „spłaszczeniem” rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej w szczelinie powietrznej. Taki rozkład zawiera trzecią harmoniczną przedstawioną na rysunku 2b. W analogiczny sposób powstają obszary nasycenia rdzenia występujące dla $x=0$ i $x=\pi$ (czyli tam, gdzie strumień magnetyczny w rdzeniu jest maksymalny). Jednak w tym przypadku zjawisko „wypychania” strumienia magnetycznego z obszarów nasycenia powoduje dodatkowe „wybrzuszenie” rozkładu przestrzennego indukcji. Taki rozkład zawiera trzecią harmoniczną przedstawioną na rysunku 2c, która jest w przeciwfazie do tej, która występuje przy nasyceniu zębów. Zarówno podstawowa jak i trzecia harmoniczna rozkładu przestrzennego indukcji wirują z tą samą prędkością i w tym samym kierunku. Istnienie trzeciej harmonicznej indukcji i w konsekwencji trzeciej harmonicznej SEM indukowanej w uzwojeniach rzeczywistego silnika, jest wypadkową zjawisk nasycenia rozpatrywanych osobno dla zębów i rdzenia. Teoretycznie, jak wynika z przedstawionego wyjaśnienia, trzecia harmoniczna SEM może nie występować, jeżeli dwa opisane zjawiska nasycenia zrównoważą się. W praktyce zwykle przeważa nasycenie zębów i w efekcie powstaje trzecia harmoniczna SEM indukowanej w uzwojeniach silnika, która w określonych warunkach, może spowodować przepływ trzeciej harmonicznej prądów fazowych silnika. W celu określenia wpływu napięcia zasilania silnika na wartość trzeciej harmonicznej SEM indukowanej w uzwojeniach stojana, wykonano szereg pomiarów według metody opisanej w literaturze [7]. Do badań wykorzystano silnik indukcyjny klatkowy (rys. 3) o mocy 18,5kW i napięciu znamionowym 400V(Δ). Silnik ten ma 48 żłobków w stojanie i 40 żłobków w wirniku. Podczas

badania uzwojenie stojana połączone było w gwiazdę, zatem konieczne było zwiększenie napięcia zasilania do wartości około 680V.

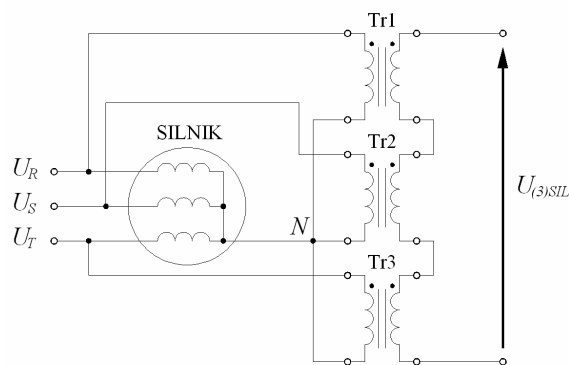


Rys. 2. Powstawanie trzeciej harmonicznej rozkładu przestrzennego indukcji magnetycznej w szczeliny powietrznej w silniku indukcyjnym

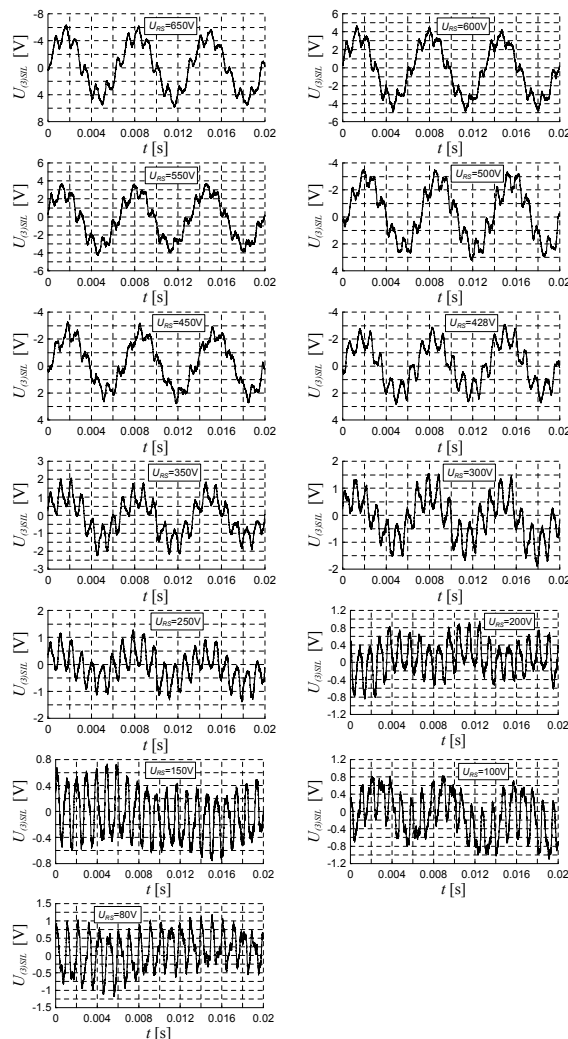


Rys. 3. Silnik wykorzystany w badaniach

Do badań wykorzystano układ pomiarowy przedstawiony na rysunku 4, składający się z trzech transformatorów pomiarowych o napięciach znamionowych tak dobranych, aby podczas pomiarów nie występowało w nich zjawisko nasycenia.



Rys. 4. Schemat układu pomiarowego do wyznaczenia trzeciej harmonicznej SEM silnika



Rys. 5. Wyniki badań obrazujące wpływ napięcia zasilania na wartość trzeciej harmonicznej SEM w uzwojeniu stojana silnika

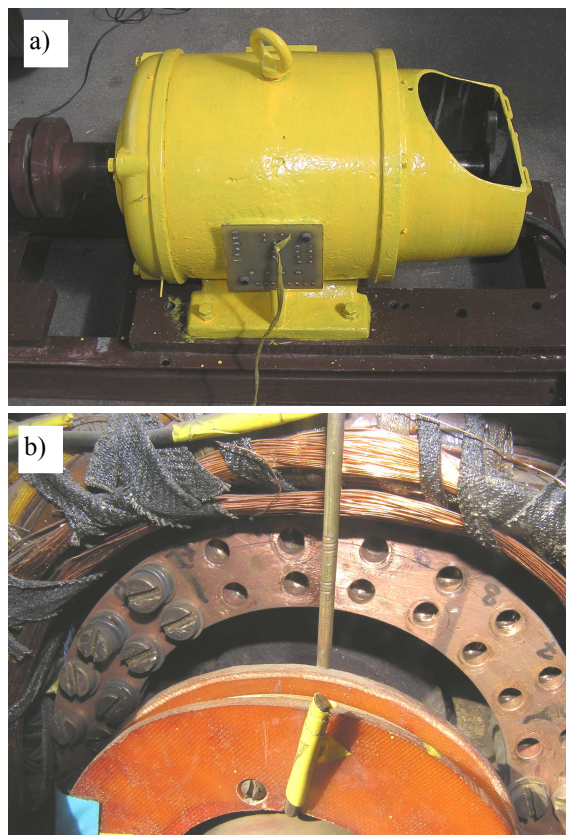
Na wyjściu tego układu pomiarowego otrzymuje się przebieg będący w przybliżeniu sumą trzecich harmonicznych SEM indukowanych w uzwojeniach fazowych stojana, które tworzą układ fazowy kolejności zgodnej. Pomiar

przeprowadzono w stanie ustalonym, przy zmianach napięcia zasilającego w szerokim zakresie. Wyniki uzyskane podczas pomiarów przedstawiono na rysunku 5. Wraz ze zmniejszaniem się napięcia zasilania, maleje też stopień nasycenia elementów rdzenia silnika. Dlatego widoczna jest silna zależność pomiędzy napięciem zasilania silnika a wartością napięcia na wyjściu układu pomiarowego.

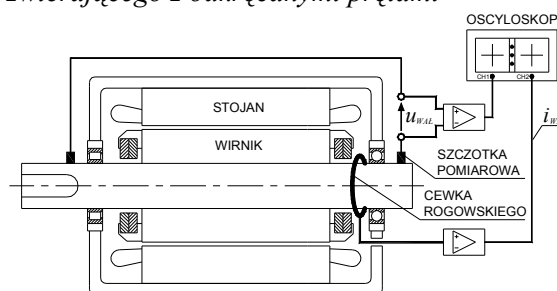
3. Wpływ uszkodzeń klatki wirnika na wartość napięcia wałowego

Jedną z głównych przyczyn powstawania napięcia wałowego jest asymetria obwodu elektromagnetycznego silnika indukcyjnego. Asymetria ta bardzo często występuje w stanach awaryjnych silników indukcyjnych dużej mocy, które pracują w bardzo ciężkich warunkach. Jest spowodowana uszkodzeniami klatki wirnika, powstałymi w wyniku pęknięcia prętów lub pierścieni zwierających. Pęknięcie kilku prętów w wirniku mającym co najmniej 30 żłobków, nie wpływa w zasadniczy sposób na stan pracy silnika i na jego właściwości ruchowe. Powoduje jednak powstanie zmiennego strumienia magnetycznego zamykającego się w obwodzie wzdłuż jarzma rdzenia stojana i wirnika. Strumień ten obejmuje wał maszyny indukcyjnej, powodując powstanie napięcia wałowego. Obiektem badań był zmodernizowany silnik indukcyjny pierścieniowy o mocy znamionowej 3kW i napięciu znamionowym 380V (rys. 6). Silnik ten ma 24 żłobki w wirniku. Modernizacja silnika polegała na wymontowaniu uzwojenia wirnika i zastąpieniu go przez uzwojenie klatkowe o specjalnej konstrukcji. Uzwojenie klatkowe wykonano z mosiądzu. Od strony napędowej pręty wirnika przymocowano na stałe do pierścienia zwierającego. Od strony przeciwnapędowej każdy pręt klatki wirnika przymocowano do pierścienia zwierającego za pomocą dwóch śrub (rys. 6b), które w łatwy sposób można usunąć. Taka konstrukcja klatki umożliwia wykonanie przerw w poszczególnych prętach wirnika, poprzez odkręcenie śrub mocujących. W ten sposób można określić wpływ uszkodzeń prętów klatki wirnika na wartość napięcia wałowego i prądów łożyskowych. Schemat wykorzystanego układu pomiarowego przedstawiono na rysunku 7. Pomiary napięcia i prądu wałowego wykonano podczas bezpośredniego rozruchu silnika i w stanie ustalonym przy sprawnej klatce wirnika i dla różnej ilości uszkodzonych prętów. Do pomiaru

prądu łożyskowego wykorzystano cewkę Rogowskiego firmy Fluke typu: AC i2000 flex [8].

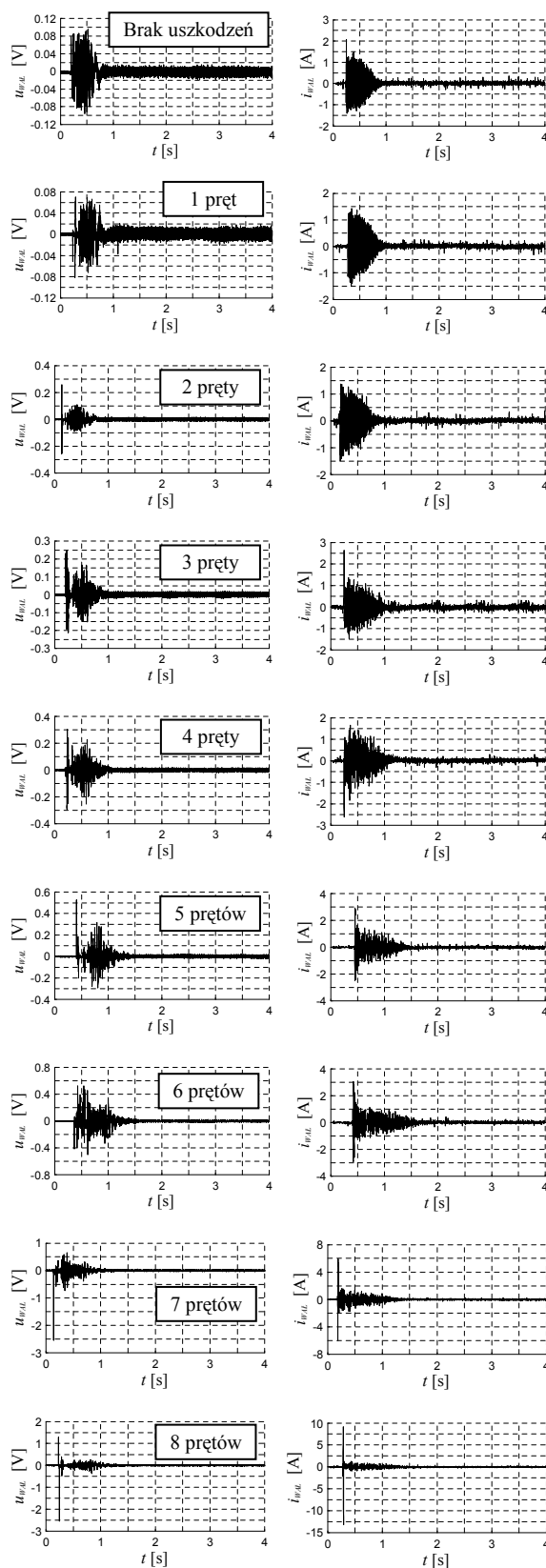


Rys. 6. Widok stanowiska pomiarowego: a) widok ogólny silnika, b) widok pierścienia zwierającego z odkręcanymi prętami



Rys. 7. Schemat układu do pomiaru napięcia i prądu wałowego

Cewka ta zamocowana była w miejscu wybudowania pierścieni ślizgowych silnika w ten sposób, że obejmowała wał silnika przed samym węzłem łożyskowym i przymocowana była do pokrywy silnika w dużej odległości od czoła uzwojenia stojana. Takie zamocowanie cewki zapewnia eliminację zakłóceń pochodzących od obcych pól magnetycznych.



Rys. 8. Wpływ ilości uszkodzonych prętów klatki wirnika na wartość napięcia i prądu wałowego

Do pomiaru napięcia wałowego wykorzystano wzmacniacz napięciowy z wejściem różnico-

wym. Do wejścia wzmacniacza doprowadzono sygnały ze szczotek pomiarowych zamocowanych na końcach wału silnika. Szczotki zamocowano w taki sposób, aby zminimalizować siłę boczną działającą poprzez szczotki na wał, która mogłaby powodować dodatkowe zmniejszenie impedancji łożysk. Wyniki pomiarów napięcia i prądu wałowego przy sprawnej klatce wirnika oraz dla różnej ilości uszkodzonych prętów przedstawiono na rysunku 8. Z zarejestrowanych przebiegów wynika znaczna zależność pomiędzy ilością uszkodzonych prętów klatki wirnika, a wartościami międzyszczytowymi napięcia i prądu wałowego. Wartości te są największe podczas rozruchu silnika. Wydłużenie czasu rozruchu przy dużej ilości uszkodzonych prętów skutkuje dłuższym narażaniem łożysk silnika na przepływ znacznych prądów łożyskowych. Podczas badań zaobserwowano impulsy prądu łożyskowego o bardzo dużej wartości, które pojawiają się w pierwszej chwili rozruchu, tuż po załączeniu napięcia zasilającego, kiedy wirnik silnika jest jeszcze zatrzymany. Impulsy te mogą być spowodowane działaniem na wirnik siły poprzecznej, która może się pojawić przy tak dużej asymetrii magnetycznej. Siła ta dociska punktowo elementy toczne łożysk do bieżni, co prawdopodobnie skutkuje zmniejszeniem impedancji łożyska i chwilowym przepływem prądu łożyskowego o dużej wartości.

4. Uwagi i wnioski końcowe

W trakcie badań stwierdzono, że w widmach częstotliwościowych prądów łożyskowych w silnikach indukcyjnych dużej mocy, występuje trzecia harmoniczna o znacznej wartości. Powstawanie tej składowej jest związane z nasyceniem elementów rdzenia silnika. Ponadto stwierdzono silną zależność pomiędzy wartością napięć i prądów wałowych a ilością uszkodzonych prętów klatki wirnika i związaną z tym asymetrią magnetyczną silnika.

Badania przedstawione w niniejszym artykule zostały wykonane w ramach przygotowania programu analogicznych badań dla silników indukcyjnych dużej mocy. Wstępne wyniki uzyskane w ramach badań silników małej mocy potwierdzają słuszność podjęcia dalszych prac w tym kierunku. Prace te wymagają przygotowania silnika dużej mocy, w którym będzie możliwe uszkodzenie prętów i pierścieni zwierających klatki wirnika. Należy spodziewać się, że zaobserwowane zjawiska wystąpią

w silnikach dużej mocy w odpowiednio większej skali.

Wcześniejsze badania prowadzone przez autorów dla dużej grupy górniczych silników indukcyjnych wskazują na powszechność awarii łożysk, spowodowanych między innymi przez przepływ prądów łożyskowych. W związku z tym celowe wydaje się podjęcie badań, mających na celu szczegółowe poznanie zjawisk pasożytniczych, których efektem jest przepływ prądu łożyskowego.

Literatura

- [1]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: Uszkodzenia łożysk w silnikach indukcyjnych użytych w organach urabiających kombajnów górniczych. *Zeszyty Problemowe-Maszyny Elektryczne*, nr. 75/2006, ss. 137-146.
- [2]. Donner G., Oakes B.K., Evon S.T.: *Motor Primer – Part III*. IEEE Trans On Ind. Appl., Vol. 39, No. 5, September/October 2003, pp. 1467-1474.
- [3]. Drak B., Zientek P., Niestrój R., Kwak J.: Napięcia i prądy wałowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy użytych w organach urabiających kombajnów górniczych. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne* Nr. 76/2007, ss.55-62.
- [4]. Gambica/Rema Technical Guide: *Motor Shaft Voltages and Bearing Currents under PWM Inverter Operation*. Technical Report No. 2 First Edition, 2002.
- [5]. Kerszenbaum I.: *Shaft currents in electric machines fed by solid-state drives*. IEEE Conference Record of the Industrial and Commercial Power Systems Technical Conference, 1992. Conference

Record, Papers Presented at the 1992 Annual Meeting, 4-7 May 1992, pp. 71-79.

- [6]. Miedziński B., Szkółka S., Wiśniewski G., Lisowiec A.: *Cewki Rogowskiego jako elementy nowoczesnych układów automatyki i pomiarów*. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*, nr. 2/2007, ss.23-30.
- [7]. Vas P.: *Sensorless vector and direct torque control*. Oxford University Press 1998.
- [8]. Zientek P., Niestrój R., Białoń T.: *Napięcia wałowe i prądy łożyskowe w silnikach indukcyjnych dużej mocy - badania laboratoryjne*. *Prace Naukowe Politechniki Śląskiej "Elektryka" Z.3 (203)*, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007, ss.99-112.

Autorzy

mgr inż. Piotr Zientek
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372652
e-mail: Piotr.Zientek@polsl.pl

mgr inż. Roman Niestrój
Katedra Maszyn i Urządzeń Elektrycznych
Politechniki Śląskiej
ul. Akademicka 10a, 44-100 Gliwice
tel: 032-2372526
e-mail: Roman.Niestroj@polsl.pl