

Tomasz GAŚSIOROWSKI <sup>1)</sup>

## DIAGNOSTYKA KLATKI WIRNIKA W TRAKCIE CYKLU PRODUKCYJNEGO SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono wyniki badań diagnostycznych uzwojeń wirników silników indukcyjnych na różnych etapach produkcji silników. W badaniach wykorzystano wirniki testowe z celowo wprowadzonymi uszkodzeniami ściśle określonych prętów. Badania przeprowadzono na tych samych wirnikach testowych badanych kolejno jako „surowych” - nieobrobionych - wirnikach po obróbkę mechaniczną, wirnikach zabudowanych w silniku nieobciążonym i obciążonym. Przy każdym rodzaju badania omówiono metodę diagnostyki oraz skomentowano uzyskane wyniki.

## DIAGNOSTIC OF SQUIRREL-CAGE ROTOR DURING PRODUCTION CYCLE OF INDUCTION MOTORS

**Summary.** Diagnostic test results of induction motor rotor windings at different stages of motor production have been presented in the paper. Defective rotors with intentionally introduced failures in chosen rotor bars have been used in the tests. Tests on the unmachined rotors, machined rotors, rotors placed in unloaded motor and rotors fitted in a motor loaded with rated power have been performed. For each type of test diagnostic the methods and test results have been discussed.

**Key words:** induction motor, squirrel-cage rotor, rotor fault, rotor diagnostic

### 1. WPROWADZENIE

Wirniki silników indukcyjnych klatkowych z uzwojeniami odlewany z aluminium odznaczają się dużą niezawodnością i trwałością, jednak w trakcie cyklu produkcyjnego występuje niewielka ilość wirników posiadających defekty powstałe na skutek wad produkcyjnych. Do głównych przyczyn wadliwości wirników z klatkami odlewany należą: niewłaściwy skład chemiczny aluminium, niewłaściwy skos żłobków, zapowietrzenie i zagazowanie prętów, niedolania i pęknięcia prętów. Praktyka wykazuje, że wśród wymienionych wad produkcyjnych wirników przeważającą wadą są niedolania prętów. Należy tu stwierdzić, że w przypadku wykonań podstawowych silników, tj. silniki 3-fazowe o długościach pakietów „A” i „B” i biegunowościach  $2p=2,4$ , wadliwość wirników jest znikoma. Wadliwość wirników zwiększa się w przypadku wykonań nietypowych silników, tj. silniki progresywne, wielobiegunowe, wielobiegunowe, jednofazowe, energooszczędnej[4], gdzie wymagana jest specjalna konstrukcja wirnika (wydłużenie pakietu blach, zmniejszenie przekroju żłobka, zwiększenie skosu żłobków, zamknięcie żłobków).

### 2. OPIS WIRNIKÓW TESTOWYCH

W celu umożliwienia dokładnej analizy różnych konfiguracji uszkodzeń prętów wirnika wykonano zestaw 8 wirników testowych. Jako bazowe wybrano wirniki silnika indukcyjnego 3-fazowego typu Sg80-2A 0,75kW 2770obr/min o 17 prętach wirnika[6].

Wprowadzone niedolania prętów obrazują następujące procentowe uszkodzenia uzwojenia wirnika:

- 1) wirnik Nr 1: typowy wirnik produkcyjny (0% uszk. prętów: wszystkie żłobki prawidłowo zalane)
- 2) wirnik Nr 2: jeden pręt przerwany (ok. 6% uszk. prętów: 3 żłobek)
- 3) wirnik Nr 3: dwa pręty przerwane (ok. 12% uszk. prętów: 3,4 żłobek)

1) Mgr inż., Fabryka Silników Elektrycznych „BESEL” S.A., ul. Elektryczna 8, 49-300 Brzeg, tel. +(48-77) 4162861 ww. 114, fax: +(48-77)4166868, e-mail: technika@besel.pl

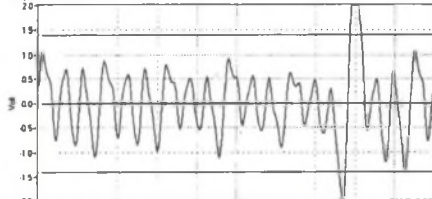
- 4) wirnik Nr 4: trzy pręty przerwane - rozrzucone (ok. 18% uszk. prętów: 3,8,14 żłobek)  
 5) wirnik Nr 5: trzy pręty przerwane - obok siebie (ok. 18% uszk. prętów: 12,13,14 żłobek)  
 6) wirnik Nr 6: pięć prętów przerwanych (ok. 30% uszk. prętów: 3,4,8,13,14 żłobek)  
 7) wirnik Nr 7: dziewięć prętów przerwanych (ok. 55% uszk. prętów: 3,4,6,7,9,10,11,13,14 żłobek)  
 8) wirnik Nr 8: dwanaście prętów przerwanych (ok. 70% uszk. prętów: 2,4,5,6,7,8,10,11,12,14,15,16)

Na tak przygotowanych i oznaczonych wirnikach testowych przeprowadzono badania kolejno na poszczególnych etapach produkcji silników indukcyjnych, wykorzystując niektóre z możliwych metod diagnostycznych zamieszczonych w literaturze [2,3].

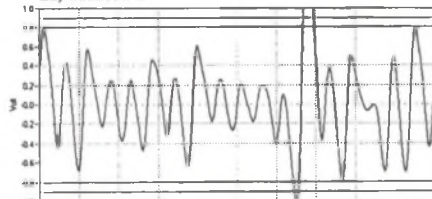
### 3. BADANIA WIRNIKÓW

W badaniach wirników najpierw „surowych” a następnie obrobionych wykorzystano tester wirników 03/BPR-C firmy RISATTI Włochy oparty na metodzie indukcyjnej[1]. W metodzie tej badanie przeprowadza się na wyjętym wirniku, który wprowadza się w wolny ruch obrotowy w polu magnetycznym magnesów trwałych. Pole magnetyczne wzbudza się za pomocą specjalnej głowicy przyłożonej do wirnika. W obwodzie magnetycznym głowicy znajduje się magnes trwały i uzwojenie pomiarowe spełniające funkcję detektora. Głowica pełni podwójną rolę: generatora stałego strumienia magnetycznego wytwarzanego przez magnesy trwałe i indukcyjnego czujnika pomiarowego. W wirujących prętach wirnika indukuje się napięcie, które w dobrych prętach wymusza przepływ prądu. Prąd ten wzbudza własne pole magnetyczne, które zamyka się przez zęby, jarzmo i głowicę. Pole to jest polem zmiennym, indukuje zatem w uzwojeniu pomiarowym głowicy napięcie zależne od wartości prądów w poszczególnych prętach, a tym samym od ich rezystancji. Pręty, które są przerwane lub niedolane i wskutek tego mają dużą rezystancję, dają mniejszy sygnał niż pręty dobre. Wyniki badań uzyskane na testerze wirników przedstawia rys. 1.

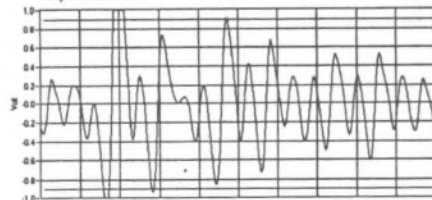
1a) wirnik Nr 1



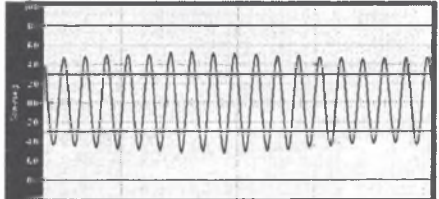
2a) wirnik Nr 2



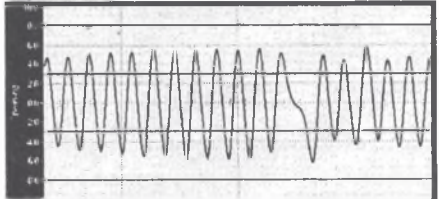
3a) wirnik Nr 3



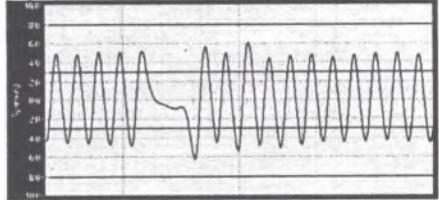
1b) wirnik Nr 1

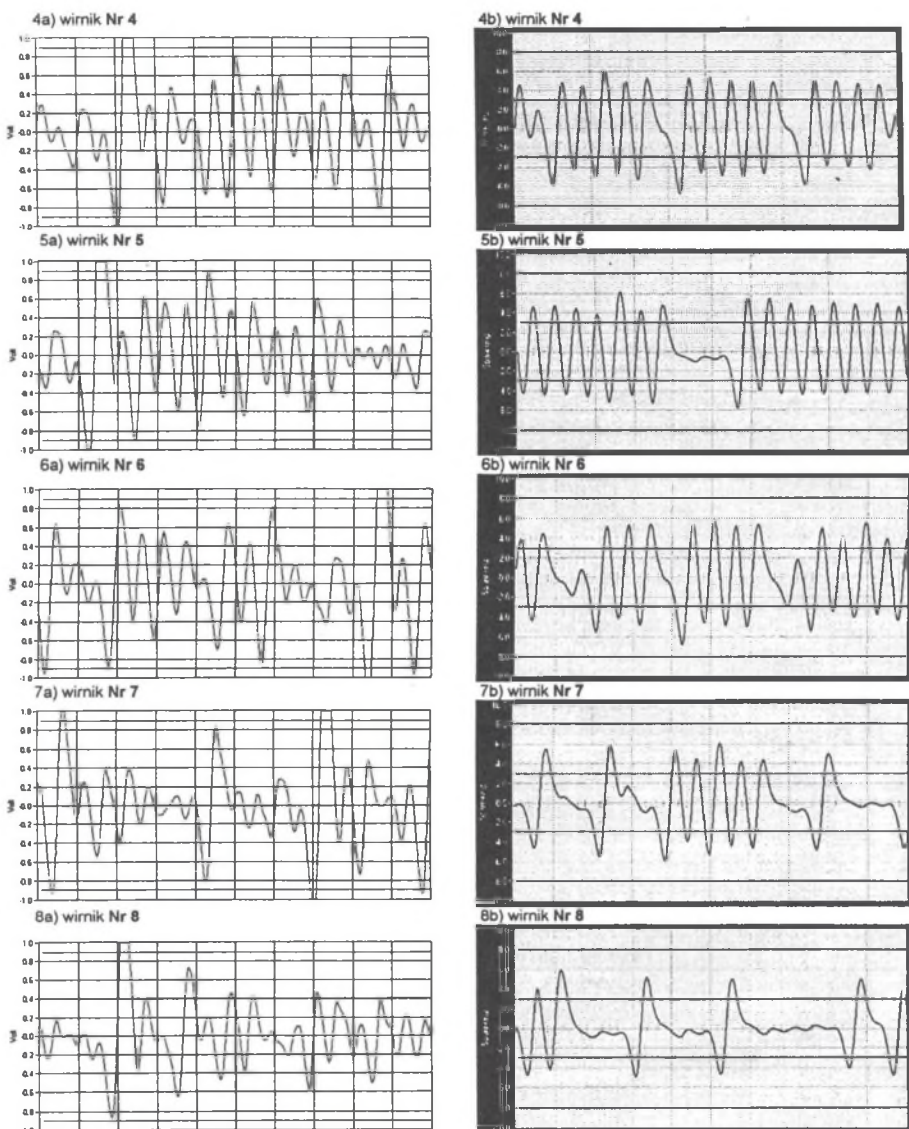


2b) wirnik Nr 2



3b) wirnik Nr 3





Rys. 1. Wyniki badań wirników testowych przy wykorzystaniu metody indukcyjnej. Oznaczenie „a” dotyczy wirników „surowych”, oznaczenie „b” wirników po obróbce mechanicznej

Fig. 1. Test results of rotors; induction method was used. Symbol „a” refers to rotors before machining and symbol „b” refers to machine-made rotors

Badania przeprowadzone na testerze wirników opartym na metodzie indukcyjnej wykazały nieprzydatność tej metody w testowaniu wirników „surowych” (przed obróbką mechaniczną), co obrazują rysunki z indeksem „a”. Przyczyną tak małej skuteczności metody indukcyjnej w testowaniu wirników „surowych” jest duża nierównomierność powierzchni tych wirników,

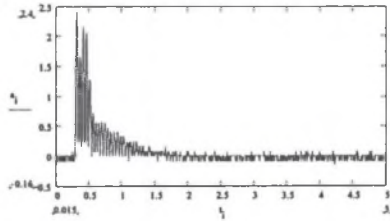
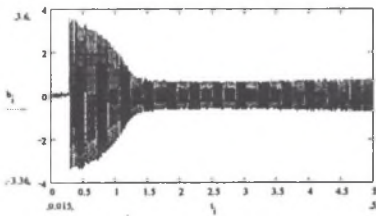
zwiększająca sygnał diagnostyczny do postaci uniemożliwiającej skuteczną analizę miejsc i rodzaju uszkodzeń.

Skuteczność metody indukcyjnej znacznie wzrasta po obróbce mechanicznej wirników, co przedstawiają rysunki z indeksem „b”. Gładkość i symetria powierzchni tych wirników pozwalają na dokładne określenie ilości niedolanych prętów oraz ich wzajemnego usytuowania na obwodzie wirnika. Ten typ kontroli w toku produkcji umożliwia wyrывkowe badanie wirników konstrukcyjnie najbardziej narażonych na uszkodzenia oraz testy reklamacyjne wykrywające przyczynę nieprawidłowej pracy silnika. Nie jest to docelowy sposób kontroli większych partii silników ze względu na znaczne straty ponoszone przez fabrykę w przypadku wykrycia uszkodzeń prętów na tym etapie produkcji wirników (wirnik wciśnięty na wał silnika i obrobiony).

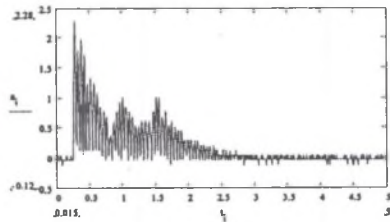
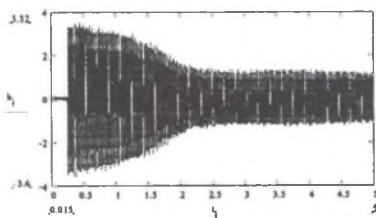
#### 4. BADANIA SILNIKA NIEOBciążONEGO

Badania wirników testowych umieszczonych w silniku nieobciążonym wykonano na urządzeniu diagnostycznym opracowanym w Instytucie Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach [5]. W urządzeniu tym wykorzystano pomiar prądu  $I_3$  o częstotliwości  $f_3 = (1-2s)f_1$  wydzielonego za pomocą filtru pasmowo-przepustowego o częstotliwości środkowej  $f_0 = 10\text{Hz}$  z prądu stojana podczas rozruchu silnika. Źródłem sygnału jest spadek napięcia na rezystorze włączonym do obwodu wtórnego przekładnika prądowego. Sygnały diagnostyczne pojawiają się dwukrotnie podczas rozruchu silnika przy poślizgu  $s = (f_1 \pm f_0)/2f_1$ , tj. przy  $n = 0,4n_1$  (sygnał  $I_3'$ ) oraz przy  $n = 0,6n_1$  (sygnał  $I_3''$ ). Rejestrację prądu stojana  $I_1$  oraz prądu  $I_3$  wykonano na oscyloskopie, a wyniki przeprowadzonych badań przedstawiono na rys.2.

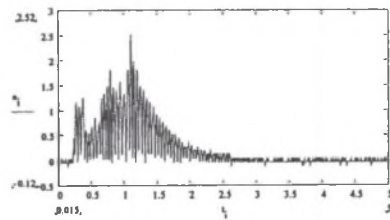
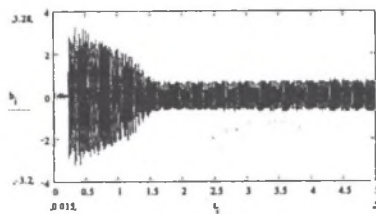
1) wirnik Nr 1 ( $U_{zab} = 100\text{V}$   $I_{0-zab} = 0,35\text{A}$ )



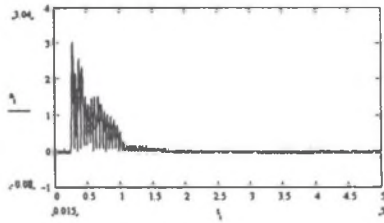
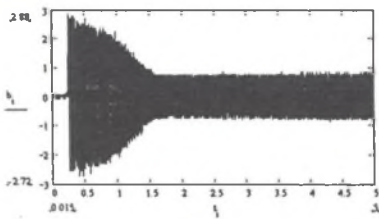
2) wirnik Nr 2 ( $U_{zab} = 100\text{V}$   $I_{0-zab} = 0,50\text{A}$ )



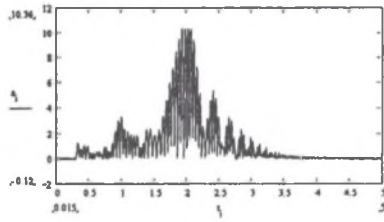
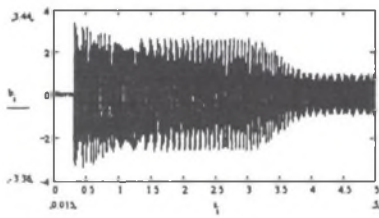
3) wirnik Nr 3 ( $U_{zab} = 100\text{V}$   $I_{0-zab} = 0,32\text{A}$ )



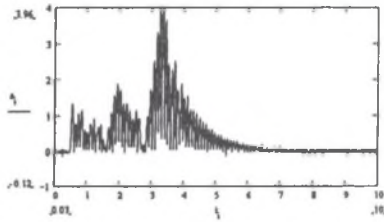
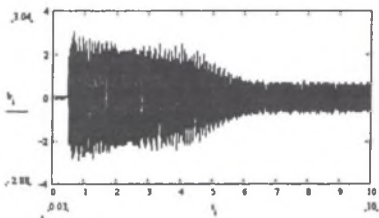
4) wirnik Nr 4 ( $U_{zmi}=100V$   $I_{o-uzm}=0,40A$ )



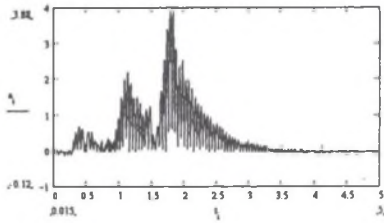
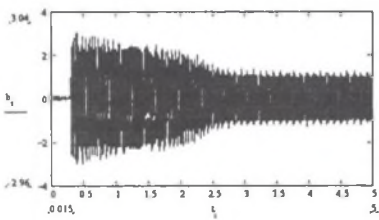
5) wirnik nr 5 ( $U_{zmi}=100V$   $I_{o-uzm}=0,48A$ )



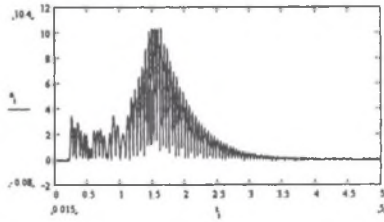
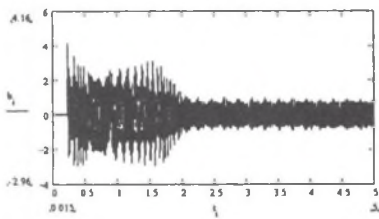
6) wirnik nr 6 ( $U_{zmi}=100V$   $I_{o-uzm}=0,27A$ )



7) wirnik Nr 7 ( $U_{zmi}=130V$   $I_{o-uzm}=0,42A$ )



8) wirnik Nr 8 ( $U_{zmi}=165V$   $I_{o-uzm}=0,25A$ )



Rys.2. Oscylogramy prądu fazowego stojana i składowej  $I_3$  nieobciążonego silnika Sg80-2A z zabudowanymi wirnikami testowymi w funkcji czasu rozruchu silnika

Fig.2. Oscillograms of stator phase current and  $I_3$  component vs. start-up time of motor; unloaded Sg80-2A motor with built-in test rotors was tested

Badania przeprowadzone na silniku Sg80-2A z zamontowanymi wirnikami o celowo wprowadzonych uszkodzeniach ujawniły trudności w badaniu silników małej mocy tą metodą. Trudności w pomiarze wynikały z małej bezwładności wirników, co wymagało znacznego obniżenia napięcia zasilającego, w celu wydłużenia czasu rozruchu silników, natomiast w dalszym badaniu podwyższenia tego napięcia, gdyż silniki mocno uszkodzone nie posiadały dostatecznego momentu rozruchowego. Dodatkowo z tego samego powodu sygnał diagnostyczny  $I_3'$  dla  $n=0,4n_1$ , w niektórych przypadkach nachodził na startowy sygnał prądowy występujący na wykresie prądu  $I_3$ .

Z otrzymanych wyników badań widać wyraźnie sukcesywny wzrost sygnałów diagnostycznych  $I_3$  z decydującą przewagą amplitudy sygnału  $I_3'$  dla prędkości  $n=0,6n_1$ , który to właśnie sygnał jest podstawą do oceny stanu uzwojeń wirnika. Zaletą wymienionej metody badania silnika jest możliwość wykrycia wad klatki wirnika na biegu jałowym silnika w czasie kontroli ostatecznej bez konieczności obciążania silnika mocą znamionową.

## 5. BADANIA SILNIKA OBCIĄŻONEGO

Powszechnie wiadomo, że kolejne uszkodzenia uzwojenia wirnika wpływają niekorzystnie na parametry silnika. Ważne jest natomiast, aby wiedzieć, przy których uszkodzeniach prętów wirnika silnik mimo wad nie przekracza tolerancji parametrów określonych polską normą [7], a od którego momentu nie nadaje się do dalszego wykorzystania. Badanie to jest faktycznie weryfikacją wcześniej przedstawionych metod diagnostycznych. Badania silnika obciążonego mocą znamionową przeprowadzono w Laboratorium Elektrycznym FSE BESEL SA na hamownicy-tandemie typu 2WB43+EC+2PB43 firmy VIBRO METER S.A. Ciekawsze parametry obrazujące wpływ kolejnych uszkodzeń wirnika na pracę silnika zamieszczono w tabeli 1.

Tabela 1

Wyniki badań obciążonego silnika Sg80-2A z zabudowanymi wirnikami testowymi (napięcie zasilania 400V 50Hz)

Ozn. [jedn.]	Wartość wg		Oznaczenie wirnika							
		Graniczna	Nr 1	Nr 2	Nr 3	Nr 4	Nr 5	Nr 6	Nr 7	Nr 8
$P_2$ [W]	750	-	750	750	750	750	750	750	750	550
$I$ [A]	1,9	max. 2,07	1,82	1,80	1,85	1,84	1,97	2,10	2,45	1,77
$\eta$ [%]	70	min. 65,5	71,2	70,1	69,6	69,1	62,5	63,45	53,6	65,22
$\cos\varphi$ [-]	0,86	min. 0,84	0,85	0,86	0,84	0,85	0,88	0,83	0,82	0,74
$n$ [ $\text{min}^{-1}$ ]	2770	2701-	2757	2744	2720	2718	2669	2609	2308	2588
$M_k$	5,2	min. 4,4	6,3	5,8	5,6	5,7	5,8	5,4	4,6	3,7
$I_k$ [A]	8,55	max.	7,8	7,8	7,1	7,2	6,8	6,5	5,2	4,9
$\Delta T_{uz}$	-	max. 105	66,9	71,5	74,6	76,2	90,7	100,8	126,2	73,2
$P_o$ [W]	-	max. 180	169	171	165	159	161	220	198	162
$I_o$ [A]	-	max. 1,2	1,05	0,93	0,93	0,95	0,92	1,0	1,0	1,04

Dane zamieszczone w tab. 1 umożliwiają jednoznaczną ocenę wpływu niedolania lub uszkodzenia prętów wirnika na pracę silnika. Kolejne nawet nieliczne niedolane pręty wpływają widocznie na takie parametry silnika, jak: prąd stojana, sprawność, prędkość obrotowa. Uszkodzenie pojedynczych prętów nie spowodowało dużych zmian eliminujących jednoznacznie silnik z użytku. Przekroczenie tolerancji parametrów podawanych przez polską normę [7] następuje przy niezachwianych ok. 18% prętach (wirniki Nr4 i Nr5). Po wyeliminowaniu ok. 30% uszkodzonych prętów (wirnik Nr6) przyrost temperatury uzwojeń stojana osiągnął wartość bliską wartości dopuszczalnej dla klasy izolacji F. W wirniku, w którym uszkodzenia przekroczyły 50% (wirnik Nr7), próbę nagrzewania przerwano po 30 min ze względu na duże drgania i bardzo wysoki przyrost temperatury uzwojeń, natomiast przekroczenie 70% uszkodzonych prętów spowodowało konieczność obniżenia mocy obciążenia oraz stwierdzono bardzo duże drgania silnika.

Badania parametrów silnika przy pełnym obciążeniu pozwalają na jednoznaczną ocenę przydatności silnika do pracy, lecz ze względu na to, że są zarówno kosztowne, jak i czasochłonne, jest to możliwe tylko w przypadku okresowych kontroli poszczególnych typów silników lub ewentualnych dorywczych badań reklamacyjnych.

## 6. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania potwierdziły możliwość wykrywania uszkodzeń uzwojenia wirnika na różnych etapach produkcji silników indukcyjnych oraz pozwoliły na wykrycie poziomu uszkodzeń wirników. Badania wykonane na samych obrobionych wirnikach przy wykorzystaniu metody indukcyjnej pozwoliły na dokładne wskazanie uszkodzonych prętów. Badania przeprowadzone na silniku nieobciążonym oparte na pomiarze prądu  $I_3$  dały informację o stopniu uszkodzenia prętów, a badania przeprowadzone na silnikach obciążonych mocą znamionową na hamownicy pozwoliły na ocenę przydatności silników mających różną ilość uszkodzonych prętów.

Jak widać, badania jakości uzwojenia wirnika można wykonywać skutecznie na różnych etapach produkcji silników, ale ze względów ekonomicznych najistotniejsza jest możliwie szybka identyfikacja uszkodzonego uzwojenia wirnika. Badania wirników „surowych” przeprowadzone przy wykorzystaniu metody indukcyjnej mimo wymaganej szybkości badania nie dały spodziewanego rezultatu ze względu na zbyt duże zakłócenia sygnału diagnostycznego. Dalsze prace dotyczące diagnostyki uzwojenia wirnika u producenta silników będą zmierzać do opracowania nowej metody diagnostyki „surowych” wirników, szybkiej i jednoznacznej w ocenie, która pozwoli na minimalizację kosztów związanych z eliminacją wadliwych wirników.

## LITERATURA

1. Drabek M., Nykliński A., Rams W.: Metoda i urządzenie do kontroli klatek wirników. XXXII International Symposium on Electrical Machines. Kraków, czerwiec 1996.
2. Gąsiorowski T.: Metody diagnozowania klatek wirników. Materiały Międzynarodowego XI Sympozjum „Mikromaszyny i Serwonapędy” MiS'98, Malbork wrzesień 1998.
3. Gąsiorowski T., Glinka T.: Przegląd metod badań diagnostycznych klatki wirnika silnika indukcyjnego. Przegląd Elektrotechniczny. Maj 1999.
4. Gąsiorowski T., Wieczorek A.: Zagadnienia konstrukcji, technologii i diagnostyki nowych silników o podwyższonej sprawności. Materiały IX Seminarium Technicznego 25-26 maj 2000 Ustroń „Problemy eksploatacji maszyn elektrycznych i napędów elektrycznych – remonty i modernizacja maszyn elektrycznych”. Zeszyty Problemowe BOBRME Komel nr 61/2000.
5. Janik T., Różycki A.: Urządzenie diagnostyczne do wykrywania asymetrii elektrycznej klatek silników indukcyjnych. Przegląd Elektrotechniczny Nr 4/1983.
6. Karta Wyrobu KW-98/06443 silnika S(K,L)g80-2A(1,2) z dnia 8.07.1998.
7. PN-IEC 34-1 Maszyny elektryczne wirujące. Dane znamionowe i parametry.

Rezydent: Dr hab. inż. Jan Rusek  
Profesor Akademii Górniczo Hutniczej

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 lutego 2001 r.

## Abstract

Rotors of squirrel-cage induction motors are very stable and reliable but during manufacturing process some rotors with winding faults are found. In standard make of motors such as: two and four pole, three-phase motors, of "A" and "B" stator length (short stacking), faults of rotors windings

practically do not occur. These faults can appear in special make of motors such as: progressive motors, multi-pole motors, multi-speed motors, one-phase motors, high efficiency motors [4].

Among different manufacturing rotor winding faults the most important and relatively the most often occurring fault in small motors is misrun of bars. For good analysis of different configurations of misrun bars, set of 8 test rotors was manufactured. All test rotors are described in Section 2. Rotor slots containing intentionally misrun bars are marked with arrows. Tests on the unmachined rotors, machined rotors, rotors placed in unloaded motors and rotors fitted in motors loaded with rated power have been performed.

During the tests of unmachined and machined rotors the induction method [1] was used. The test results are shown in Fig. 1. The test results are very good for machined rotors (points marked with "b"), because both damage level of eighth test rotors and position of faults in particular slots can be observed. For unmachined rotors (points marked with "a") test results are very poor because the rotor surface is irregular and the diagnostic signal was seriously deformed.

During the tests of rotors placed in unloaded Sg80-2A motors the measuring device made by Instytut Maszyn i Urządzeń Elektrycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach[5] was used. In that device the  $I_3$  component of phase current was used as a diagnostic signal. The oscillograms of the stator phase current and  $I_3$  component of unloaded Sg80-2A motor with built-in test rotors vs. motor start-up time are shown in Fig. 2. The test results are very clear. We can observe damage level of 8 test rotors as amplitude of  $I_3$  component. The presented diagnostic method is good for final control motor tests, but is rather expensive if rotor faults are found out.

The tests of rotors placed in loaded Sg80-2A motors were run in Electric Laboratory of FSE BESEL, using an electric dynamometer (type 2WB43+EC+2PB43 made by VIBRO METER company). The test results of loaded Sg80-2A motor with built-in test rotors, supply voltage 400V 50Hz are presented in Table 1. This type of test shows the operational suitability of a motor. Every type of a rotor fault is disadvantageous for a motor. However, not every fault causes motor disqualification. The test results given in Table 1 show that parameter tolerances specified by PN-IEC 34-1[7] were exceeded only for about 18% faults of rotor bars (rotors no.4 and no.5), but not for individual faults of rotor bars (rotors no.2 and no.3). If 30 or more per cent of rotor bars were faulty, then the motor exceeded the allowable temperature rise of stator windings (this allowable temperature is equal to 115°C for F-class insulation). Additionally, in case of a great many rotor faults, noise level and vibration level (rotors no.6, no.7 and no.8) were much increased. Tests of loaded motors are very useful for estimation of motor worthingness as well as for periodical tests of motors.

Quality tests of rotor windings can be run effectively at different stages of motor manufacture with good results. However, the most important factor is identification of rotor faults as soon as it is possible. There are lots of different diagnostic methods of rotor winding quoted in references [2,3] but the problem arises with unmachined rotors, which are characterized by irregular surface and are shaftless as well. Those disadvantageous factors cause deformation of diagnostic signal.

The subsequent research will be directed towards new diagnostic methods and measuring devices for fast and clear-cut control of unmachined rotors. This will be advantageous to manufacturers of squirrel-cage induction motors.