

O pewnym przypadku awarii silnika asynchronicznego pierścieniowego dużej mocy

Kazimierz Jagieła, Marek Gała, Jan Lakota, Dariusz Szczęsny, Dariusz Jura

1. Wstęp

Do zasilania silników asynchronicznych klatkowych z regulacją prędkości obrotowej, szczególnie niskiego napięcia, stosuje się energoelektroniczne przemienniki częstotliwości. Jednak dla pewnej grupy zespołów napędowych średniego napięcia, takich jak koparki czerpakowe [12] czy młyny cementu [4], które charakteryzują się dużym poborem mocy czynnej przy jednocześnie ciężkim rozruchu, instaluje się silniki asynchroniczne pierścieniowe wyposażone w rozruszniki płynowe. W czasie eksploatacji dużych zespołów napędowych następuje stopniowe zużycie elementów mechanicznych, a także możliwość wystąpienia uszkodzeń w uzwojeniach stojana, wirnika oraz głowicy pierścieniowej [2, 4, 5]. Pogorszenie stanu technicznego napędu z reguły doprowadza do awarii, przerwy w produkcji i dodatkowych kosztów remontu tych maszyn elektrycznych. Dlatego tak ważna jest diagnostyka eksploatacyjna maszyn, która pozwala wykryć uszkodzenie w początkowym stadium rozwoju i uniknąć kosztownej awarii poprzez odpowiednio wczesne wykonanie remontu napędu [3, 5, 6, 8, 9, 11].

Monitorowanie pracy napędu i jego diagnostyka mogą być realizowane w sposób [5, 6, 13]:

- ciągły (on-line);
- okresowy;
- inspekcyjny w określonych sytuacjach.

W praktycznej diagnostyce maszyn i urządzeń w warunkach przemysłowych występuje wiele problemów utrudniających ocenę stanu technicznego. Bardzo często awarie pojawiają się w różnych okresach eksploatacji, niejednokrotnie bez żadnych wcześniejszych symptomów sygnalizujących jakiegokolwiek rozbieżności parametrów układu izolacyjnego czy elektromagnetycznego. W prezentowanym artykule przedstawiono awarię silnika pierścieniowego dużej mocy w wyniku utraty stanu izolacji głowicy pierścieniowej.

2. Dane techniczno-ruchowe asynchronicznego silnika pierścieniowego

Najistotniejsze parametry techniczne silnika asynchronicznego pierścieniowego zestawiono w tabeli 1.

W uzupełnieniu informacji zamieszczonych w tabeli 1 na rys. 1 zilustrowano widok zespołu trzech pierścieni ślizgowych wraz z izolatorami porcelanowymi.

Pierścienie ślizgowe zostały wykonane ze stali nierdzewnej i są wzajemnie izolowane od siebie za pośrednictwem izolatorów porcelanowych. Dzięki spiralnie ukształtowanym rowkom powierzchni jezdnej (12 pierścieni na fazę), zwiększa się efekt

Streszczenie: W artykule przedstawiono problematykę wykonania remontu głowicy pierścieniowej dużego silnika asynchronicznego pierścieniowego wyposażonego w rozrusznik płynowy. Przeanalizowano przyczyny i skutki wystąpienia awarii silnika. Do analizy wykorzystano przebiegi napięciowo-prądowe w stanie normalnej pracy silnika oraz oscylogramy prądów stojana zarejestrowane w stanach awaryjnych przez zabezpieczenia. Stwierdzono, że przyczyną utraty izolacji głowicy były wylądowania łukowe na skutek elektryzacji pyłów węglowych pochodzących ze szczotek w związku z obracającą się tekstolitową płytą złożoną z dwóch półpierścieni. W czasie wykonanego remontu wykonano połączenia galwaniczne półpierścieni z uziemionym wałem silnika. Przeprowadzono odpowiednie szlifowanie pierścieni ślizgowych, mierząc ich chropowatość, w celu dopasowania ich do szczotek węglowych. W końcowej części artykułu zamieszczono podsumowanie i wnioski końcowe.

Słowa kluczowe: silnik indukcyjny pierścieniowy, awaria, remont, głowica pierścieniowa

ABOUT A CERTAIN CASE OF FAILURE OF A HIGH POWER ASYNCHRONOUS SLIP-RING MOTO

Abstract: The paper presents the issue of repairing the ring head for a large asynchronous slip-ring motor equipped with a fluid starter. The causes and effects of engine failure were analyzed. Voltage-current waveforms during normal engine operation and oscillograms of stator currents recorded by protection devices in emergency states were used for the analysis. It was found that the cause of the head insulation loss was arc discharges due to the electrification of coal dust coming from the brushes in connection with the rotating textolite plate composed of two half-rings. During the renovation, galvanic connections were made between the half rings and the grounded engine shaft. Appropriate grinding of the slip rings was carried out, measuring their roughness, in order to match them to the carbon brushes. The summary and conclusions are included at the end of the paper.

Keywords: induction slip-ring motor, failure, renovation, ring head

chłodzenia podczas obrotów wału silnika. Maksymalna wartość napięcia AC o częstotliwości $f_2 = 50$ -s między pierścieniami wynosi 1700 V.

Z uwagi na analizowaną awarię w obszarze wirnika silnika, na rys. 2 przedstawiono oscylogramy prądów fazowych wirnika w trakcie jego rozruchu.

Tabela 1. Parametry techniczne silnika

Oznaczenie/Typ	Parametry techniczne
Silnik Typ DSRAJ 8036-6WF	$P = 4200 \text{ kW}$; $\cos\phi = 0,88$; $U_s = 3 \times 6 \text{ kV Y}$; $I_{SN} = 474 \text{ A}$; $E_{20} = 3 \times 1700 \text{ V Y}$; $I_{rN} = 1500 \text{ A}$; $n = 995 \text{ obr./min}$; $\eta = 97\%$; Stała silnika: $K \approx \frac{E_{20}}{\sqrt{3} I_{rN}} = 0,654$
Rozrusznik płynowy Typ DAFAP51/1600 A	Obliczeniowa oporność fazowa rozrusznika (f - współczynnik ciężkości rozruchu = 1,4): Prąd rozruchu: $140\% I_{rN}$; $R_{fmax}/R_{fmin} = 50$
Głowica z pierścieniami ślizgowymi (rys. 1.)	$R_{r60} = 22,86 \text{ G}\Omega$ ($UM = 1 \text{ kV}$); Typ szczotki: C80X (9 na pierścieni); Komora pierścieni ślizgowych wentylowana; Podgrzewacz postojowy komory pierścieni ślizgowych
Parametry izolacyjne i stopień ochrony	Klasa izolacji - F; Zakres temperatury pracy silnika: $-10/+45^\circ\text{C}$; Stopień ochrony silnika/ skrzynek przyłączeniowych: IP55/IP55

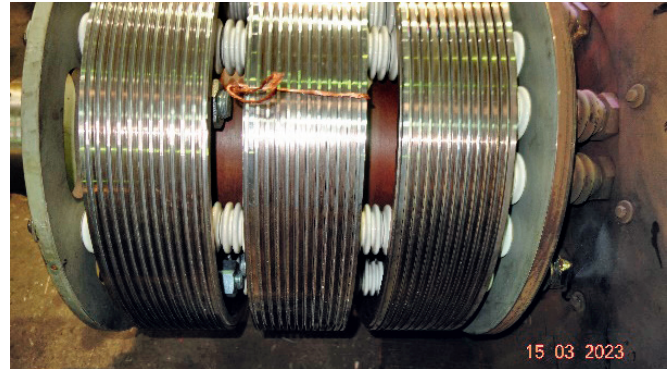
W ostatniej fazie rozruchu dla $t \in (160, 180) \text{ s}$, tj. dla stanu ustalonego, częstotliwość prądu wirnika wynosi $f_2 = 0,25 \text{ Hz}$. Oznacza to, iż w czasie okresu T wynoszącego 4 s, przy jednoczesnym uwzględnieniu wartości prędkości obrotowej wynoszącej 995 obr./min = 16,583 obr./s, w ciągu półokresu ($T/2 = 2 \text{ s}$), bowiem tyle będzie wynosić zmiana polaryzacji prądów fazowych wirnika w kontakcie szczotek z pierścieniami ślizgowymi, wirnik wykona ponad 33 obroty. Stwierdzenie to jest istotne z punktu widzenia podobieństwa odniesionego podczas analizy procesów fizykochemicznych, jakie zachodzą w pierścieniach ślizgowych i szczotkach grafitowych generatorów synchronicznych. Z dokładnym opisem tego zagadnienia można zapoznać się w publikacji [10].

3. Analiza i skutki awarii

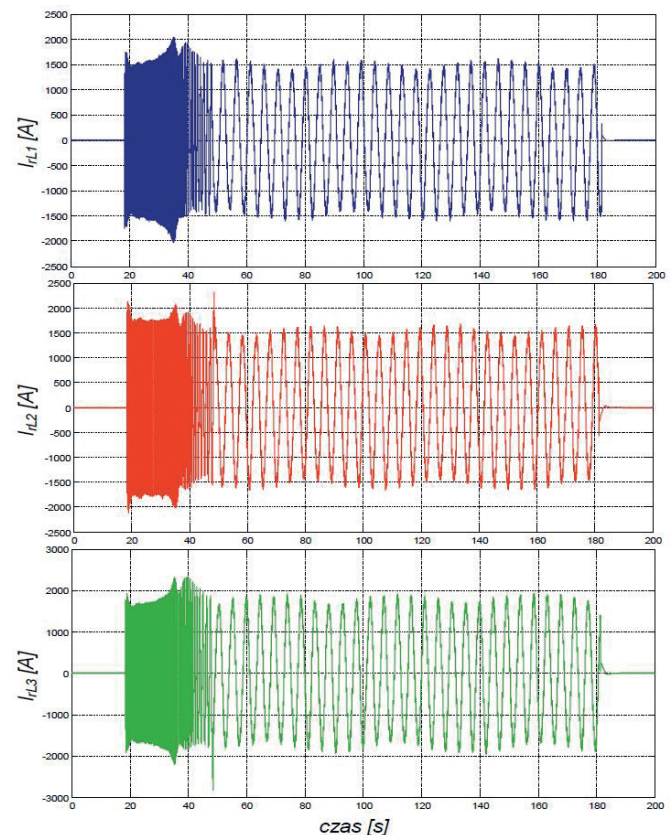
Analizę pracy silnika typu DSRAJ 8036-6WF przeprowadzono na podstawie raportów pozyskanych z systemu zabezpieczeń elektroenergetycznych dedykowanych silnikom średniego napięcia typu SEPAM seria 40 Schneider Electric. Z uwagi na ograniczone możliwości edycyjne, zamieszczono dwa wykresy ilustrujące przebiegi prądów fazowych stojana: I_1 , I_2 i I_3 , napięcie fazowe V_1 oraz/lub składową zerową prądu I_0 . Oscylogramy te dotyczą stanu pracy obciążeniowej silnika tuż przed wystąpieniem awarii oraz w chwili awarii (rys. 3), a także ponownego rozruchu wraz ze stanem awaryjnego wyłączenia przez zabezpieczenia nadprądowe określone jako $I > 51$ (rys. 4).

W przypadku określonego stopnia obciążenia silnika, prądy stojana w przedziale mniejszym niż 100 ms są prawie 10-krotnie większe, natomiast wartości prądów w wirniku wynoszą ponad 8 kA. Dokładne wartości prądów przedstawiono w tabeli 2.

Olbrzymie wartości prądów stojana i wirnika silnika pierścieniowego były wynikiem utraty izolacji w obszarze trzech pierścieni ślizgowych głowicy wirnika.



Rys. 1. Widok głowicy z pierścieniami ślizgowymi z izolatorami porcelanowymi



Rys. 2. Przebiegi chwilowe zmian prądów fazowych wirnika I_{L1} , I_{L2} i I_{L3} podczas rozruchu

Użytkownik silnika, ze względu na ograniczenie migracji cząstek węgla pochodzącego ze szczotek oraz innych zanieczyszczeń, zastosował dodatkową tarczę złożoną z dwóch półpierścieni wykonanych z tekstolitu. Na rys. 6 przedstawiono sposób zamocowania półpierścieni do tarczy o mniejszej średnicy, wykonanej przez producenta silnika.

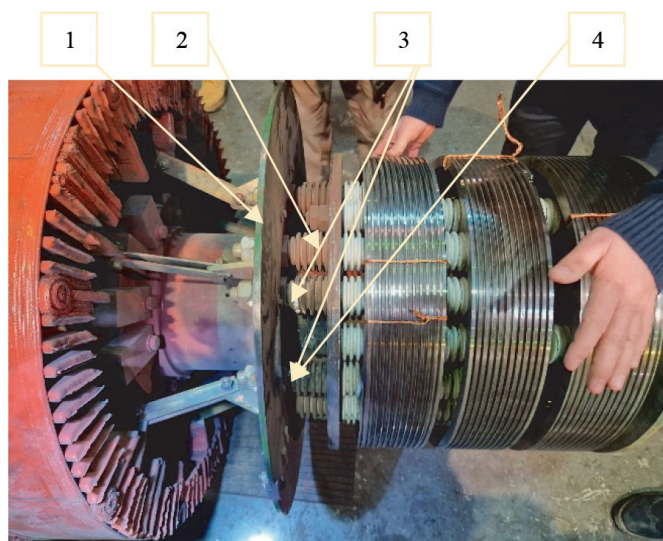
Podczas wirowania tarczy tekstolitej złożonej z dwóch półpierścieni, na skutek tarcia wiskotycznego generują się ładunki elektrostatyczne o bardzo wysokim napięciu. Ta wirująca tarcza przypomina konstrukcję generatora van de Graaffa. Zjawisko to przypomina efekt elektryzacji statycznej [7] dla układu wirująca tarcza tekstolitowa – olej transformatorowy. W wielu miejscach widać zasadniczą różnicę w zabrudzeniu przestrzeni między tarczą tekstolitową a pierwszą (wewnętrzną) płytą metalową głowicy pierścieni ślizgowych.

Zanieczyszczenie to stanowi efekt przyciągania pyłów ze szczotek grafitowych oraz pyłów pochodzących z zewnętrznego środowiska silnika. Dodatkowo na te zabrudzenia nałożyły się osmolenia wynikające z działania łuku elektrycznego (rys. 7).

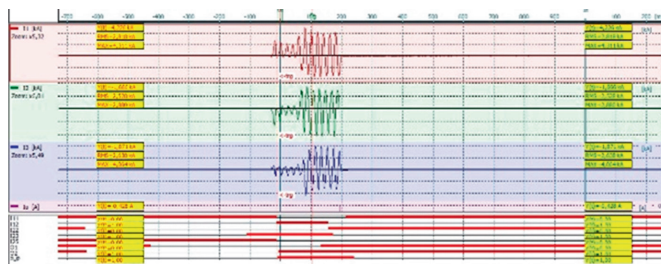
Pomiary stanu izolacji wykazały, że niskie wartości rezystancji izolacji występują między pierścieniami a nie w relacji pierścien – masa. Inicjacja wyładowania łukowego z reguły rozpoczyna się w układzie elektroda – ostrze, co również zostało udokumentowane. Jednym z czynników pogarszających właściwości izolacyjne układu składającego się z dielektryków jest pole elektryczne. Energia pola elektrycznego tracona w wyniku ruchu jonów lub spolaryzowanych molekuł prowadzi w dielektrykach stałych do nieodwracalnych zmian struktury, zwłaszcza wtedy, gdy równocześnie działają inne narażenia. Oprócz pola elektrycznego, na układ izolacyjny działa zespół innych narażeń zmieniających jego strukturę fizyczną i chemiczną, co zazwyczaj prowadzi do zmniejszenia wytrzymałości elektrycznej i mechanicznej tego układu.

W wyniku zaistniałej awarii spowodowanej uszkodzeniem izolacji elementów głowicy, remont wymagał wymiany następujących podzespołów:

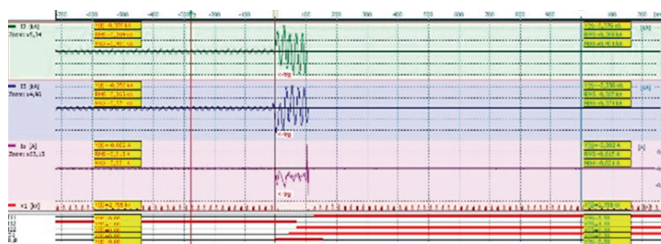
- izolatorów z podwójnym żebrzem;
- izolatorów z potrójnym żebrzem;
- podkładek dystansowych pomiędzy izolatorami a podkładkami stalowymi;
- nowych blach mosiężnych zabezpieczających nakrętki wyprowadzeń głowicy;
- podkładek miedzianych do szpilek nośnych pierścieni ślizgowych;
- wykonanie i wymianę nakrętek mosiężnych M32;
- wykonanie odprowadzenia ładunków elektrostatycznych z półpierścieni do uziemienia wirnika i silnika, co przedstawiono na rys. 8.



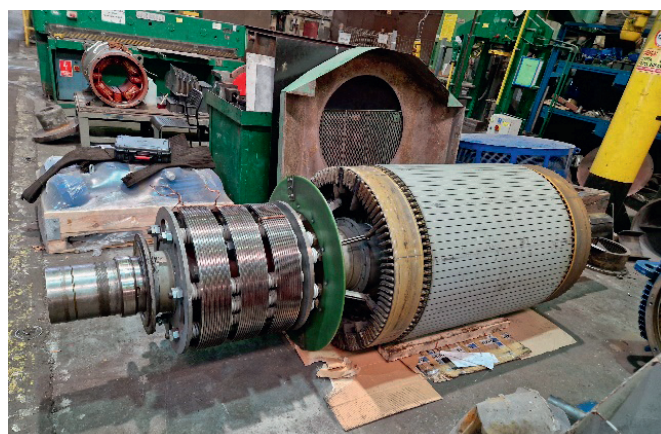
Rys. 5. Widok czół uzwojeń wirnika wraz z połączeniami do szpilek pierścieni, pierwsza tarcza, druga tarcza złożona z półpierścieni (1), widoczny pierwszy rząd izolatorów porcelanowych osmolonych i zanieczyszczonych (2), uszkodzonych na skutek działania łuku elektrycznego (3), naciek spawu na skutek działania łuku elektrycznego (4), tarcza metalowa, w głębi w miarę czyste izolatory choć izolacyjnie uszkodzone, trzy pierścienie ślizgowe przygotowane do pomiaru stanu izolacji [opr. wł.]



Rys. 3. Wykresy prądów fazowych stojana silnika pierścieniowego w dniu 10.03.2022 godz. 12:36:20 354000 μ s (praca obciążeniowa $t = -276,118$ ms i awaryjna $t_1 = 46,892$ ms - $t_2 = 93,496$ ms)



Rys. 4. Wykresy (8) prądów fazowych stojana silnika pierścieniowego w dniu 10.03.2022 godz. 12:54:48 511000 μ s (załączenie - II stan awaryjny $t_1 = 26,640$ ms - $t_2 = 100,908$ ms)



Rys. 6. Widok z dwóch stron na tarczę złożoną z dwóch półpierścieni zamontowanych na wale wirnika silnika DSR AJ 8036-6WF [opr. wł.]

Tabela 2. Wartości prądów stojana i wirnika

Nr rys.	Stan pracy, określenie czasów zadziałań	Wartości skuteczne prądów stojana	Wartości skuteczne prądów wirnika
3	Silnik obciążony „symptom doziemienia” 12:36:20 354000 μs t ₁ = t ₂ = -276,118 ms; dt = 000 ms	I _{2 rms} (t ₁ , t ₂) = 269 A I _{3 rms} (t ₁ , t ₂) = 265 A I _{0 rms} (t ₁ , t ₂) = 15 A	I _{2 r rms} (t ₁ , t ₂) = 851 A I _{3 r rms} (t ₁ , t ₂) = 860 A
	Stan awaryjny obserwacja 100 ms 12:36:20 354000 μs t ₁ = 046,892 ms t ₂ = 093,496 ms dt = t ₂ - t ₁ = 046,634 ms	I _{1 rms} (t ₁) = 2642 A I _{2 rms} (t ₁) = 2641 A I _{3 rms} (t ₁) = 2760 A I _{1 rms} (t ₂) = 1978 A I _{2 rms} (t ₂) = 1951 A I _{3 rms} (t ₂) = 2149 A	I _{1 r rms} (t ₁) = 8360 A I _{2 r rms} (t ₁) = 8357 A I _{3 r rms} (t ₁) = 8734 A I _{1 r rms} (t ₂) = 6259 A I _{2 r rms} (t ₂) = 6174 A I _{3 r rms} (t ₂) = 6800 A
4	Ponowne załączenie silnika - II stan awaryjny 12:54:48 511000 μs t ₁ = 026,640 ms t ₂ = 026,640 ms dt = 000 ms	I _{1 rms} (t ₁ , t ₂) = 1024 A I _{2 rms} (t ₁ , t ₂) = 466 A I _{3 rms} (t ₁ , t ₂) = 469 A	I _{1 r rms} (t ₁ , t ₂) = 3240 A I _{2 r rms} (t ₁ , t ₂) = 1474 A I _{3 r rms} (t ₁ , t ₂) = 1484 A
	Ponowne załączenie silnika - II stan awaryjny 12:54:48 511000 μs t ₁ = 100,908 ms t ₂ = 100,908 ms dt = 000 ms	I _{1 rms} (t ₁ , t ₂) = 2818 A I _{2 rms} (t ₁ , t ₂) = 2528 A I _{3 rms} (t ₁ , t ₂) = 2638 A	I _{1 r rms} (t ₁ , t ₂) = 8917 A I _{2 r rms} (t ₁ , t ₂) = 8000 A I _{3 r rms} (t ₁ , t ₂) = 8348 A

4. Podsumowanie

Remont indukcyjnego silnika pierścieniowego obejmował:

- wymianę układu izolacyjnego głowicy pierścieniowej poprzez zastosowanie nowych izolatorów porcelanowych, nowych części mocujących i łączeniowych opisanych w punkcie 3.; wyremontowaną głowicę wraz z połączeniami uzwojeń ilustruje rys. 9.
- Wykonano nowe połączenie galwaniczne między półpierścieniami tekstolitowymi a wałem silnika w celu odprowadzenia ładunków indukowanych na tarczach z tworzywa sztucznego.
- Wykonano szlifowanie powierzchni spiralnych pierścieni głowicy silnika gwarantujące dobre dopasowanie do szczotek. Wartości chropowatości powierzchni dla poszczególnych pierścieni zestawiono w tabeli 3.

Chropowatość mierzono przy pomocy miernika Surface Roughness Tester RTD-200. Parametry chropowatości określone są poniższymi zależnościami [1]:

$$R_a = \frac{1}{l} \int_0^l |Z(x)| dx \approx \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n |z_i| \quad (1)$$

R_a – średnia arytmetyczna rzędnych profilu Z(x).

Wartość średnia wysokości profilu chropowatości

R_z stanowi średnią arytmetyczną pojedynczych wysokości profilu chropowatości R_{zi} z kolejnych odcinków elementarnych (DIN 4768:1990).

$$R_z = \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n R_{zi} \quad (2)$$

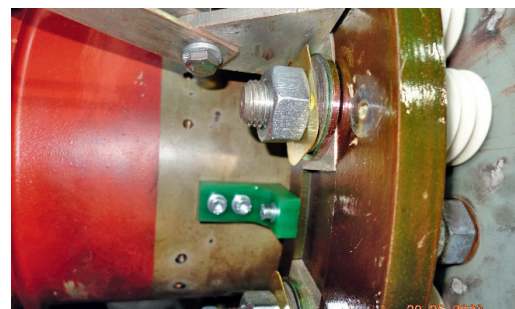
Pomiędzy parametrem R_a i R_z istnieje zależność, którą można wyrazić wzorem R_z ≈ 4R_a.

Przyjmuje się, że chropowatość jest zadowalająca, jeśli R_z = (5÷8) μm.

- Przeprowadzono pomiary rezystancji uzwojeń stojana i wirnika oraz stanu izolacji. Uzyskane wartości zestawiono w tabeli 4.



Rys. 7. Widok części głowicy silnika pierścieniowego objętej działaniem łuku elektrycznego, w wyniku czego uszkodzeniu uległy izolatory porcelanowe oraz tarcza złożona z dwóch półpierścieni [opr. wł.]



Rys. 8. Widok połączenia tarczy tekstolitowej z wałem silnika w celu odprowadzenia ładunków elektrostatycznych [opr. wł.]



Rys. 9. Widok na wyremontowaną głowicę silnika pierścieniowego z widocznymi nowymi elementami łączeniowymi z uzwojeniem wirnika [opr. wł.]

Tabela 3. Wartości chropowatości powierzchni pierścieni

Nr	I dla fazy zewnętrznej		II dla fazy środkowej		III dla fazy wewnętrznej	
	R_a	R_z	R_a	R_z	R_a	R_z
	μm		μm		μm	
1	1,457	8,543	1,270	7,433	1,779	9,690
2	2,258	13,736	1,595	9,917	1,594	8,519
3	1,625	9,889	1,651	9,546	1,583	9,246
4	1,773	10,389	1,643	11,946	1,629	12,102
5	1,675	9,869	1,576	10,676	1,705	11,200
6	1,783	10,972	1,518	8,252	1,443	9,075
7	1,950	13,632	1,613	9,614	2,180	13,057
8	1,397	8,639	1,504	8,220	1,620	8,164
9	1,410	7,948	1,925	11,811	1,632	9,742
10	1,490	11,723	1,419	8,464	1,590	12,888
11	1,479	9,714	1,542	11,946	1,626	10,033
12	1,793	10,135	1,753	12,493	1,590	8,957

Tabela 4. Zmierzone wartości parametrów wyremontowanego silnika pierścieniowego

Wyszczególnienie parametrów	Jednostka	Wartości	
Rezystancja izolacji U/V/W-korpus	M Ω	$r_{60} = 5264$ $r_{15} = 1915$	$R_{60}/R_{15} = 2,75$ dla $U_{pDC} = 5,0$ kV
Rezystancja izolacji K/L/M-korpus	M Ω	$R_{60} = 10346$ $R_{15} = 3186$	$R_{60}/R_{15} = 3,25$ dla $U_{pDC} = 1,8$ kV
Procentowe odchyłki rezystancji uzwojeń stojana	%	$r_{U-V\%} = r_{V-W\%} = r_{W-U\%} = 0$	
Procentowe odchyłki rezystancji uzwojeń wirnika	%	$r_{K-L\%} = -0,43$; $r_{L-M\%} = 0,34$; $r_{M-K\%} = 0,09$	

5. Dodatkowo przeprowadzono badania drgań łożysk tocznych po stronie napędowej i przeciwnapędowej. W widmach częstotliwościowych dominują prądkę o $f_r = 16,09$ Hz, co odpowiada uzyskanej prędkości obrotowej silnika na stacji prób. Nie stwierdzono żadnych niekorzystnych zjawisk w zakresie oceny stanu łożysk. Uważa się, że silnik nadaje się do dalszej eksploatacji w układzie napędowym.

Literatura

- [1] Chropowatość powierzchni – definicje, tabele, kryteria akceptacji. <https://bnt-sigma.pl/pomiar-chropowatosci-powierzchni> [28.04.2023].
- [2] B. Drak, T. Glinka, J. Kapinos, R. Miksiewicz, P. Zientak: Awaryjność maszyn elektrycznych i transformatorów w energetyce. KOMEL, Katowice 2013. ISBN 978-83-931909-4-2.
- [3] P. Dybowski, W. Rams, J. Rusek: *Problemy praktycznej diagnostyki maszyn indukcyjnych w przemyśle*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” Nr 76/2007, s. 109 – 113.
- [4] Gała M., Jagiela K., Rak J., Kępiński M.: *Diagnostyka silników asynchronicznych pierścieniowych napędu młyna cementu*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” Nr 101 1/2014, s. 167 – 174.
- [5] G. Gawor, S. Szymaniec: *Przemysłowe badania diagnostyczne napędów elektrycznych*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne” Nr 86/2010, s. 29 – 34.
- [6] T. Glinka: *Badania diagnostyczne maszyn elektrycznych w przemyśle*. BOBRME Komel, Katowice 2002.
- [7] M. Jaroszewski, P. Kurnyta: *Pomiary prądów elektryzacji estrów naturalnych w układzie z wirującą tarczą*. „Przegląd Elektrotechniczny”, R. 92, Nr 10/2016, s. 88 – 91, doi:10.15199/48.2016.10.21.
- [8] M. Pawlak, Z. Żarczyński: *Przenośny system pomiarowy do diagnostyki silników indukcyjnych*. Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej. Nr 62. Studia i Materiały Nr 28/2008, s. 528 – 535.
- [9] A. Sołbut: *Możliwości automatycznej oceny stanu układu napędowego z maszyną indukcyjną*. Diagnostyka’35, s. 13 – 16; vol. 35, 2005.
- [10] J. Przybysz: *Urządzenia szczotkowe generatorów synchronicznych*. Zagadnienia eksploatacyjne. Instytut Energetyki Instytut Badawczy. Warszawa, 2016.
- [11] S. Szymaniec: *Diagnostyka stanu izolacji silników indukcyjnych wysokonapięciowych off-line w przemyśle*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny elektryczne” Nr 71/2005, s. 77 – 82.
- [12] J. Westerowski: *Problemy eksploatacji silników pierścieniowych 1120 kW*. „Zeszyty Problemowe – Maszyny elektryczne” Nr 74/2006, s. 63 – 67.
- [13] P. Zientek, W. Łukasiewicz-Szmytka, G. Czempik: *Wykorzystanie napięcia stałego do badań izolacji głównej maszyn elektrycznych dużej mocy*. „Napędy i Sterowanie”, Nr 10/2019, s. 74 – 82.

 dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, em. prof.,
e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com;
dr inż. Marek Gała, e-mail: marek.gala@pcz.pl;
mgr inż. Jan Lakota;
mgr inż. Dariusz Szczesny,
e-mail: dariusz.szczesny@grupapartner.pl;
mgr inż. Dariusz Jura,
e-mail: dariusz.jura@grupapartner.pl.