

Urządzenie do monitorowania komutatora i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych

Agnieszka Jakubowska-Ciszek, Piotr Wąs

1. Wstęp

Niezawodność i długi okres eksploatacji dużych maszyn elektrycznych wiąże się z ich przeglądami, skuteczną diagnostyką i usuwaniem usterek mogących prowadzić do ciężkich awarii, a co za tym idzie – zapobieganiem wynikającym z nich stratom finansowym, oraz zagrożeniu bezpieczeństwa ludzi i mienia. Skuteczne prowadzenie nadzoru i monitorowanie stanu wrażliwych elementów maszyn elektrycznych, jakimi są komutator albo pierścienie ślizgowe, prowadzi do szybkiej reakcji i unikania poważnych awarii. Cennym atutem metod diagnostycznych jest, gdy pozwalają one na pomiary bezdotykowo i w ruchu.

Korzystając z tej metody, można przewidzieć i zapobiec skutkom długotrwałych awarii, do których zalicza się postoje, ważnych dla całego procesu technologicznego maszyn wirujących. Podnosi się również poziom bezpieczeństwa i niezawodności. Ma to niebagatelne znaczenie dla obiektów takich, jak maszyny wyciągowe, główne odwadnianie i wentylacja w podziemnych zakładach górniczych, czyli kopalniach. Również w hutach i rafineriach znajduje zastosowanie proponowana metoda.

Celem prac autorów jest uzyskanie użytecznych danych pomiarowych, świadczących o bieżącym stanie maszyny elektrycznej z komutatorem albo pierścieniami ślizgowymi. Zakres zastosowań dotyczy pomiarów maszyn będących w ruchu, w stanach normalnej pracy, tzn. przy pełnym zakresie prędkości obrotowej i prądów obciążenia. Związane jest to z coraz bardziej rosnącymi wymaganiami klientów odnośnie do obniżania kosztów pomiarów, czasu ich trwania i wymogów odnośnie do dokładności. Dlatego żądają oni coraz częściej aby pomiary zostały przeprowadzone przez automatyczne systemy pomiarowe, a nie ludzi. Pomiary przeprowadzane przez ludzi trwają wiele godzin, a nawet dni, muszą być wykonywane tylko na postoju, a często również przy częściowym lub całkowitym demontażu maszyny. Jedną z głowic zastosowaną do pomiaru odległości spełnia powyższe wymagania, ponieważ posiada najwyższą powtarzalność w swojej klasie 0,005 mm, najwyższą dokładność w swojej klasie $\pm 0,02\%$, najszybszą w świecie wśród dostępnych obecnie głowic częstotliwość próbkowania 392 kHz.

2. Metoda pomiarowa

Doświadczenie wyniesione z wieloletniej eksploatacji maszyn elektrycznych wykazuje potrzebę opracowania takiej metody pomiarowej, która pozwala na przeprowadzanie pomiarów w czasie występowania znamionowej siły odśrodkowej i drgań przy działaniu dynamicznym prądu oraz pod wpływem temperatury wywołanej jego przepływem. Pomiary przeprowadzone w ruchu pozwalają na wielopunktowy pomiar w bardzo krótkim

Streszczenie: Nieodłącznym elementem elektrycznych silników dużej mocy są komutatory i pierścienie. W przypadku wirujących maszyn elektrycznych siła odśrodkowa wirującej masy wirnika po pewnym czasie doprowadza do uszkodzenia komutatora lub pierścieni. Takie uszkodzenia należą do największych zagrożeń, powodujących długotrwały przestój. Dotychczasowe działania diagnostyczne są często nieskuteczne i nie zapobiegają nagłym i niespodziewanym awariom. Dobór właściwej metody diagnostycznej umożliwia zapobieżenie poważnej awarii. Prezentowana metoda diagnostyczna pozwala na wykrycie uszkodzeń już na początkowym etapie rozwoju. Dzięki temu można zapobiec nagłym poważnym awariom i długim przestojom na remont. Opracowanie dokładnej głowicy pomiarowej do prac w ruchu pozwoliło na określenie temperatury i geometrii komutatora lub pierścienia. Dotychczasowe metody pomiarów wykonywanych na postoju nie pozwalają stwierdzić, czy geometria i temperatura komutatora pod wpływem siły odśrodkowej nie ulegnie niebezpiecznej zmianie. Wady tej pozbawiona jest proponowana metoda diagnostyczna.

Słowa kluczowe: maszyny elektryczne, bezdotykowe badania diagnostyczne, komutator, pierścienie ślizgowe

COMMUTATOR AND ELECTRICAL MACHINERY SLIP RINGS MONITORING DEVICE

Abstract: Commutators and rings are inseparable elements of high-power electric motors. In case of rotating electric machines, the centrifugal force of the rotor rotating mass causes damage to the commutator or rings after some time. Such damage is one of the biggest threats that causes long-term outage. Ineffective diagnostic activities are among the sudden and unexpected causes of their failure. Selecting an appropriate diagnostic method is a way to prevent a serious accident. The paper presents a diagnostic method, which detects the progressive damage right at the initial stage of its development. Consequently, it is possible to prevent serious failures and long outage for repairs. The development of an accurate measuring head for work in motion has allowed to determine the temperature and geometry of the commutator or ring. The measurement methods performed at a outage do not allow to determine whether the commutator geometry and temperature under the influence of centrifugal force will change dangerously or not. The proposed diagnostic method avoids this problem.

Keywords: electrical machines, non-contact diagnostic tests, commutator, slip ring

czasie, kilkakrotnie na całym obwodzie. Pomiar przeprowadzone na postoju maszyny nie pozwalają na taki zakres diagnostyki, jak pomiary uzyskane na wirującej maszynie. Ustalenie rzeczywistej przyczyny w nieprawidłowo działającej maszynie trwa na ogół krócej, gdy badania przeprowadza się dynamicznie, a nie statycznie, lecz z odpowiednio wysoką dokładnością. Obecnie oferowane technologie pozwalają coraz częściej sprostać tym wysokim wymaganiom. Proponowana metoda została praktycznie zrealizowana i wdrożona przez OPA SA w Zabrze. Pierwszy egzemplarz został zbudowany i pomyślnie przetestowany, a zdobywane doświadczenie pozwoli w przyszłości na dalsze jego ulepszenie.

3. Technika pomiarowa

Wspomniana metoda diagnostyczna polega na przeprowadzeniu rejestracji zmian geometrii i temperatury komutatora albo pierścieni ślizgowych w czasie ruchu maszyny. Jest ona zasadniczo prosta i opiera się na klasycznych zasadach fizyki, lecz jej realizacja wymaga zastosowania zaawansowanych nowoczesnych technik i technologii pomiarowych. Czas na przeprowadzenie jednego pomiaru jest tym krótszy, im większa jest prędkość liniowa przemieszczającej się płaszczyzny komutatora albo pierścienia. Założenie to nie zawsze jest do spełnienia, szczególnie w przypadku pomiaru temperatury.

Zastosowana technika pozwala uzyskać optymalny zakres i rozdzielczość mierzonych zmian geometrii i temperatury w wąskim polu pomiarowym. Dzięki technice bezdotykowej zachowane jest również pełne bezpieczeństwo maszyny i ludzi oraz nie uszkadza się badanej powierzchni, a tak często się dzieje, gdy stosuje się mikrometr czy czujnik z końcówką szafirową (rys. 1).

Problem powtarzających się lub nieprzewidzianych postojów spowodowanych awariami zostanie ograniczony. Wczesne wykrywanie przyczyn zapobiega groźnym skutkom. Postępująca nieuchronnie destrukcja nie wymknie się szybko spod kontroli.

Zdanie sobie sprawy z powagi problemu, zrozumienie, na czym polega innowacyjność rozwiązania i jakie płyną korzyści z jego wykorzystania, wynika z określonego prawa fizyki. Siła odśrodkowa, która jest nieodłącznym elementem każdej wirującej maszyny elektrycznej, jest tym większa, im większa jest masa wirująca, jej średnica i kwadrat prędkości obrotowej.

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot r \quad (1)$$

gdzie:

F – siła odśrodkowa;

m – masa;

ω – prędkość wirowania;

r – promień.

Problem jest tym większy, im większe są masy wirujące, prędkość obrotowa oraz średnica części wirującej.

4. Budowa układu pomiarowego

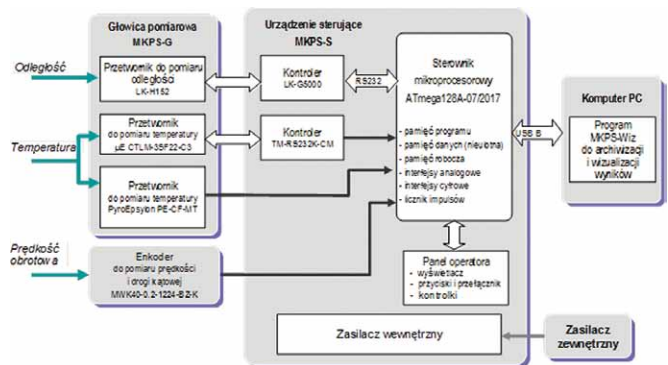
Do obsługi głowicy laserowej i sensorów pirometrycznych zaprojektowano i wykonano układ mikroprocesorowy.



Rys. 1. Głowica dotykowa z końcówką szafirową



Rys. 2. Przykład komutatora w czasie pracy

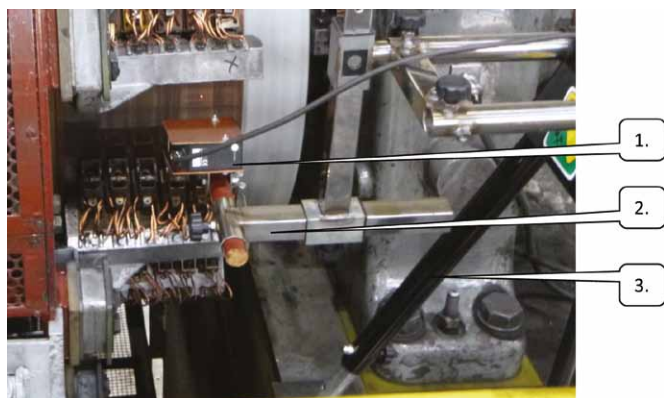


Rys. 3. Schemat blokowy kompletnego układu pomiarowego

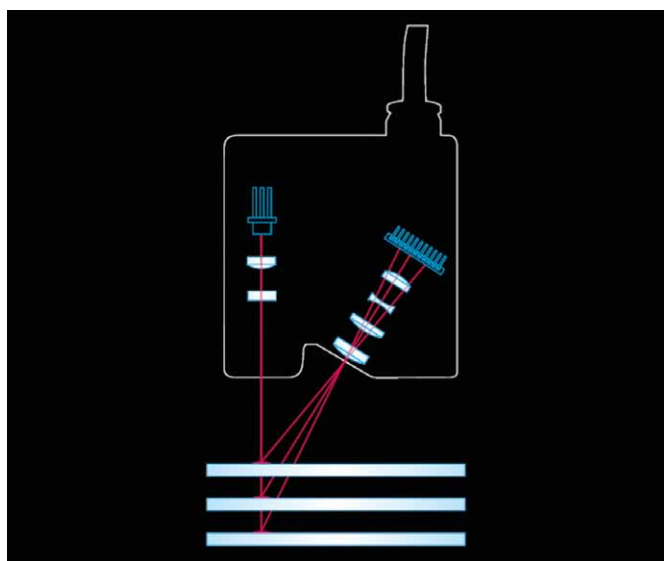
Zastosowano mikrokontroler ATMEGA128, przedstawiony na rys. 3. Stanowisko pomiarowe MKPS (skrót od Monitorowanie Komutatora [albo] Pierścieni Ś(s)lizgowych) wykorzystuje jedną wybraną – z trzech do wyboru – głowic pomiarowych: głowicę do pomiaru odległości lub jedną z dwóch głowic pirometrycznych do pomiaru temperatury. Zastosowanie głowicy do pomiaru odległości w czasie pomiarów na prądnicy pokazano na rys. 4, gdzie głowicę (1) zamocowano w uchwycie (2), przymocowanym do statywu (3) z zastosowaniem osprzętu do pozycjonowania głowicy w osi prostopadłej do osi wirowania maszyny, przewodów, kontrolerów i komputera przenośnego (laptop).

Proponowana technika pomiarów zmusza do zastosowania ultraszybkich i wysoko wydajnych laserowych sensorów drogi. Zastosowano głowicę pomiarową serii LK-G500 japońskiej firmy Keyence [3], jak na rys. 5.

Głowica pomiarowa LK-G500 pozwala na śledzenie obiektów o szorstkiej powierzchni, małych gabarytach, o powierzchniach przezroczystych lub lustrzanych. Funkcjonuje niezawodnie i szybko w każdej sytuacji. Zastosowano głowicę LK-H152,



Rys. 4. Zdjęcie poglądowe fragmentu stanowiska pomiarowego
1 – głowica laserowa LK-H152; 2 – uchwyt; 3 – statyw mocujący (jego część)



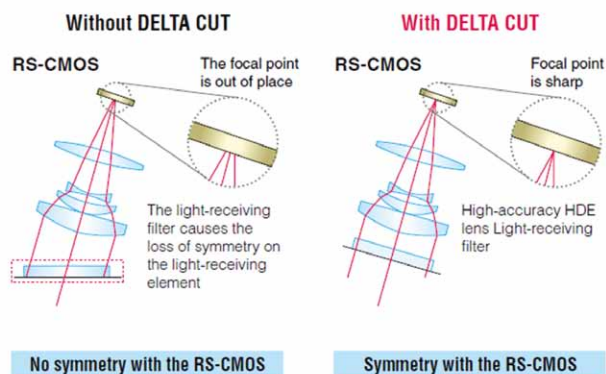
Rys. 5. Zasada triangulacji wykorzystana w głowicy LK-G500 [3]

której zakres pomiarów jest w odległości 150 mm od badanego obiektu i rozciąga się w zakresie ± 40 mm, dokładności powtarzalnej 0,25 mm, o średnicy plamki pomiarowej $\varnothing 120$ mm (rys. 6).

Wybrana głowica wykonana jest zgodnie z najnowszą technologią. Dzięki ultraszybkim częstotliwości próbkowania umożliwia rejestrację bardzo szybko poruszających się obiektów, przy ekstremalnie wysokiej precyzji i stabilności pomiarów. Takie, dotąd nieosiągalne, własności pomiarowe uzyskano dzięki matrycy RS-CMOS (R – wysoka rozdzielczość; S – wysoka prędkość). Podwojenie zakresu pikseli struktury CMOS umożliwia wysoką precyzję. Optyka została przerobiona nie tylko w celu powiększenia szerokości punktu świetlnego, lecz również po to, aby zarejestrować najmniejsze wyniesienie mierzonego elementu. Geometria punktu laserowego w kombinacji z udoskonaloną matrycą CMOS umożliwia uzyskanie dotąd nieosiągalnych dokładności. Do nastawiania intensywności światła, rozdzielczości i czasu trwania światła zastosowano system ABLEII [3]. Specjalnie do tego celu zaprojektowano obiektyw



Rys. 6. Zakres pomiaru głowicy LK-H152 [3]

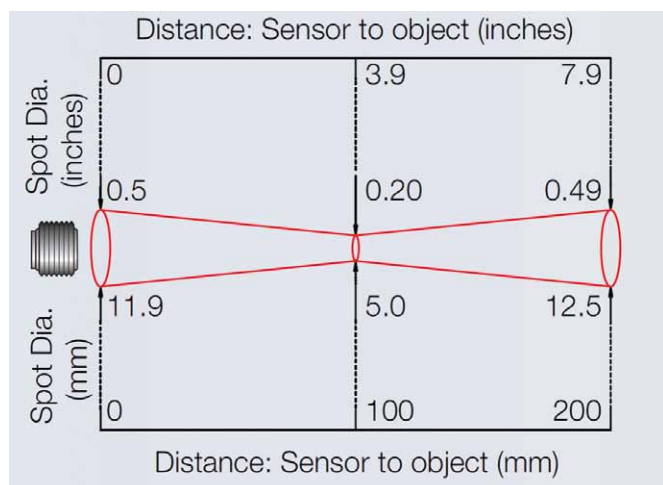


Rys. 7. Minimalizowanie efektu wykrzywienia metodą Delta-Cut [3]

z linearną soczewką kolimatora. Punkt lasera jest celowo ogniskowany i dzięki temu unika się nieregularności. Równomierna wielkość punktu świetlnego jest decydującą zaletą przy pomiarach małych obiektów. Bardzo równomierny owalny promień światła formuje soczewka cylindryczna, co ma wielkie znaczenie dla pomiarów obiektów o szorstkiej powierzchni. Ponadto zadbano o równomierną szerokość promienia światła w całym zakresie. Efekty wykrzywienia zostały zminimalizowane technologią Delta-Cut [3] poprzez symetryczne przyporządkowanie elementów CMOS, obiektywu i filtra (rys. 7).

Pozycja obiektu pomiarowego zostaje ustalona (zmierzona) przy wykorzystaniu metody triangulacji (rys. 5). Odbity promień światła trafia na matrycę RS-CMOS. Piksele, na które padł promień odbitego światła, pozwalają ustalić pozycję obiektu pomiarowego. Głowica LK-H152 współpracuje z kontrolerem LK-G5001P [3]. Przyłącze rozszerzające kontrolera pozwala na podłączenie do 10 głowic pomiarowych, za pomocą których można prowadzić jednocześnie rejestrację. Posiada interfejsy RS232C o prędkościach 9600 do 115200 bps, USB 2.0 dla wysokich prędkości i Ethernet 100 Base-TX/10 Base. Zasilanie zapewnia zasilacz 24 V DC $\pm 10\%$ 3,5 A, również przy wykorzystaniu maksymalnej liczby głowic i rozszerzeń. Wyprowadzenie alarmowe, komparatorowe, binarne typu PNP otwarty kolektor.

Układ pracuje bardzo efektywnie i wydajnie. Ograniczeniem są w tym przypadku drgania całego obiektu, które jednak mogą się w pewnym niewielkim stopniu przenosić na głowicę pomiarową. Zbyt duże drgania podłoża przeniesione na głowicę uniemożliwiają pomiar z dużą precyzją. Podkładki antywibracyjne pod stopami statywu, do którego zamocowana jest głowica, ograniczają do minimum ich wpływ. Analizując wyniki rejestracji, należy to uwzględnić i jeżeli jest możliwe to eliminować. Układ pomiarowy pracuje bezdotykowo względem



Rys. 8. Pole pomiaru pirometrycznego przetwornika temperatury PyroEpsilon [4]

badanej maszyny, co oznacza, że rejestracja może być prowadzona nawet przez długi czas, w wybranych momentach.

Do bezdotykowego pomiaru temperatury wybrano dwa przetworniki pomiarowe. Powodem jest podział zakresu temperatur na przedziały poniżej i powyżej 50°C. Typowy komutator pracuje dobrze w temperaturze do 70°C. Ograniczenia zastosowania metody pirometrycznej biorą się z braku informacji o rzeczywistym współczynniku emisyjności badanego materiału. Jednak nie ma to większego znaczenia dla pomiarów porównawczych. Jeżeli temperatura sąsiednich działek komutatora będzie się znacząco różnić, to również jest to informacja o stanie odbiegającym od normalnego. Ponawiając pomiary temperatury co pewien okres czasu, można stwierdzić, czy stan tego obwodu podłączonego do tej konkretnej działki komutatora ulega zmianie, czy jest stabilny. Wydaje się, że szybkie wykrycie uszkodzonej działki komutatora możliwe jest przy rejestracji temperatury maszyny od wychłodzonej do nagrzanej. Temperatura uszkodzonej działki podniesie się znacznie szybciej niż nieuszkodzonych. Informacja zawarta w promieniowaniu podczerwonym jest bardzo cenna, ponieważ wydzielona energia cieplna zależy od kwadratu natężenia prądu obserwowanego obwodu. Przerwa lub zwarcie międzyzwojowe (tzw. skrót uzwojenia) zmieni jego wartość i przez to zmieni się temperatura. Również pęknięcie lub obłuzowanie się w obwodzie uzwojenia jednej działki pod wpływem siły odśrodkowej, drgań ujawni się już w początkowej fazie uszkodzenia w czasie ruchu maszyny. Przy zatrzymanej maszynie stan taki jest do wykrycia dopiero przy postępującym większym uszkodzeniu. Niemniej wynika to tylko z pewnych rozważań, a potwierdzić to może jedynie praktyka, czemu ma służyć proponowana metoda oraz technika pomiarowa.

Pierwszy pirometryczny przetwornik temperatury to PyroEpsilon PE-CF-MT, którego parametry zamieszczono w tabeli 1, a pole pomiaru przedstawiono na rys. 8.

Drugi pirometryczny przetwornik temperatury to microEpsilon CTM-3SF22-C3, którego parametry zamieszczono

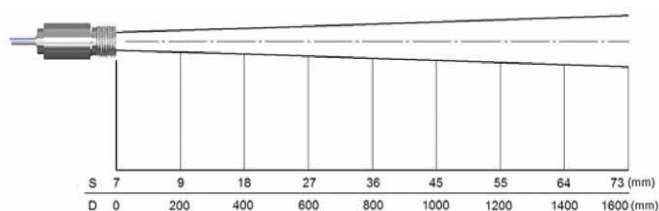
Tabela 1. Dane katalogowe pirometrycznego przetwornika temperatury PyroEpsilon PE-CF-MT [4]

Bezdotykowy sensor na podczerwień PyroEpsilon PE-CF-MT	
zakres podczerwieni	8 do 14 μm
mierzona temperatura	od 0 do 50°C
średnica pola obrazu (rys. 8)	5 mm
niepewność pomiaru	$\pm 1\%$ wartości mierzonej lub $\pm 1^\circ\text{C}$
dokładność powtarzalna	$\pm 0,5^\circ\text{C}$ wartości mierzonej
współczynnik emisyjności	0,2 do 1,0
czas reakcji	240 ms
interfejs 4 do 20 mA	jedno wejście
	jedno wyjście analogowe
napięcie zasilania	24 V DC
stopień ochrony	IP65
temperatura otoczenia sensora	0 do 70°C

Tabela 2. Dane katalogowe microEpsilon CTM-3SF22-C3

Bezdotykowy sensor na podczerwień microEpsilon CTM-3SF22-C3	
zakres podczerwieni	2,3 μm
mierzona temperatura	50 do 1800°C
znosi przeciążenia	do 3G
znosi udary	do 55G
temperatura baz schładzania sensora	85°C
najmniejsza plamka optyczna (ostry punkt)	6,5 mm
rozdzielczość optyczna	22:1
czas rejestracji jednego pomiaru	1 ms
stopień emisyjności	od 0,100 do 1,100
dokładność	$\pm(0,3\% T_{\text{mes}} + 2^\circ\text{C})$
powtarzalność	$\pm(0,1\% T_{\text{mes}} + 1^\circ\text{C})$
interfejs 4 do 20 mA	jedno wejście (współczynnik emisyjności)
	jedno wyjście
napięcie zasilania	24 V DC
średnica sensora	18 mm
długość sensora	103 mm
ciężar	95 g
stopień ochrony	IP65

w tabeli 2, a pole pomiaru przedstawiono na rys. 9. Jest to przetwornik temperatury do bezdotykowego pomiaru temperatury o większej precyzji od pierwszego przetwornika temperatury (PyroEpsilon PE-CF-MT), przeznaczony do pomiarów temperatury metali i materiałów kompozytowych. Przetwornik



Rys. 9. Pole pomiaru pirometrycznego przetwornika temperatury microEpsilon [4]

microEpsilon posiada zminiaturyzowany sensor, mniejszą głowicę niż PyroEpsilon.

Posiada on rozszerzoną kompensację błędów pomiarowych. Sensor posiada wysoką odporność na wpływy pola elektromagnetycznego, co ma znaczenie przy pomiarach w sąsiedztwie komutatora i oddziaływaniu dużych prądów. Wymagane jest jednopunktowe skalowanie temperatury.

5. Procedura pomiaru owalności

Dla przykładu rozpatrzony został komutator wyciągowego silnika prądu stałego produkcji DolMel Wrocław, typu PW-104, o mocy 2000 kW, prędkości znamionowej $n = 51$ obr./min.

Ze względu na potrzebę zeskanowania całego obwodu komutatora przyjęto czas pomiaru jednego punktu $t_p = 100 \mu s$, czyli odstęp pomiędzy próbkami $526,2 \mu m$.

$$V = 7,854 \left[\frac{m}{obr.} \right] \cdot 0,67 \left[\frac{obr.}{s} \right] = 5,262 \left[\frac{m}{s} \right] = 5,262 \left[\frac{m}{s} \right] = 5262 \left[\frac{m}{ms} \right] = 526,2 \left[\frac{m}{100\mu s} \right]$$

Liczba próbek (gęstość próbek) przypadająca na jedną działkę wynosi:

$$5,1 \left[\frac{mm}{działkę} \right] / 0,53 \left[\frac{mm}{próbkę} \right] \approx 9,6 \left[\frac{próbkę}{działkę} \right]$$

Maksymalnie można zarejestrować do 20 000 próbek (pomiarów),

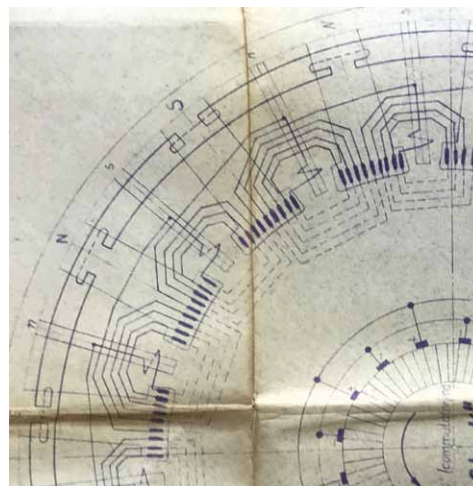
$$t_{rejestracji} = 20000 \left[\frac{próbkę}{rejestrację} \right] \cdot 100 \cdot 10^{-6} \left[\frac{s}{próbkę} \right] = 2 \left[\frac{s}{rejestrację} \right]$$

co daje:

$$20000 \left[\frac{próbkę}{rejestrację} \right] \cdot 526,2 \cdot 10^{-6} \frac{\left[\frac{s}{próbkę} \right]}{7,854 \left[\frac{m}{obrót} \right]} = 1,34 \left[\frac{obrót}{rejestrację} \right]$$

W celu rejestracji z największą dostępną gęstością (rozdzielczością) pomiaru czas pomiaru można skrócić nawet 20-krotnie, czyli proporcjonalnie otrzymuje się:

$$\frac{100 \left[\frac{\mu s}{próbkę} \right]}{20} = 5 \left[\frac{\mu s}{próbkę} \right]$$



Rys. 10. Fragment schematu silnika typu PW-104

Tabela 3. Dane silnika przyjętego do badań

Silnik prądu stałego typu PW-104	
średnica koła pędnego	5000 mm
obwód koła pędnego	15710 mm
przyjęta maksymalna prędkość w szybie	10,5 m/s
prędkość obrotowa dla przyjętej maksymalnej prędkości w szybie	40,2 obr./min 0,67 obr./s
średnica	2500 mm
obwód komutatora	7854 mm
prędkość liniowa komutatora $V = 7,854 \text{ m/obr.} \cdot 0,67 \text{ obr./s}$	5,262 m/s 52,62 m/ms 526,2 $\mu m/100 \mu s$
całkowita liczba działek komutatora	1536 szt.
szerokość jednej działki (wraz z przerwą izolacyjną)	5,1 mm/szt.
średnica obszaru objętego plamką pomiarową	120 mm

co pozwoli dokonać pomiaru co

$$\frac{526,2 \left[\frac{\mu m}{działkę} \right]}{20} = 26,3 \left[\frac{\mu m}{działkę} \right]$$

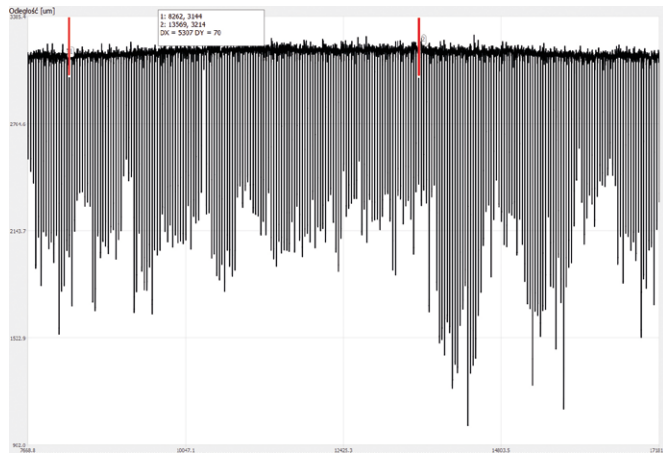
na

$$\text{na } \frac{1,34 \left[\frac{m}{obwód} \right]}{20} \cdot 100\% = 6,7\% \text{ obwodu}$$

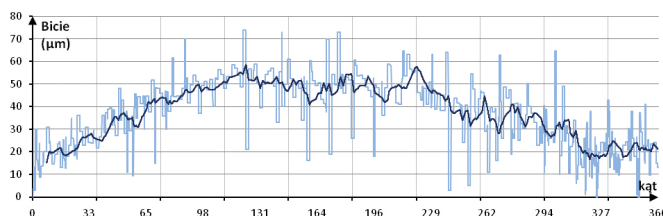
Dzięki temu można również ocenić porowatość pomierzonego fragmentu komutatora. Parametry graniczne głowicy są na tyle wysokie, że możliwe są pomiary komutatorów wirujących nawet z prędkością 750 obr./min (np. w prądnicach sterujących układu Leonarda, takie jak DolMel P-1500, $D_k = 800$ mm, 2x225 działek komutatora), napędzanych silnikiem synchronicznym. Głowica LK-H152 bardzo dobrze spełnia powyższe wymagania.

Po tych przeliczeniach (jak dla silnika wyciągowego) należy zamocować głowicę LK-G152 w odległości 150 mm od płaszczyzny komutatora (rys. 6). Zakres pomiarowy zawarty jest w przedziale ± 40 mm (rys. 6), czyli możliwe jest jej oddalenie o prawie 190 mm. Następnie można przeprowadzić rejestrację.

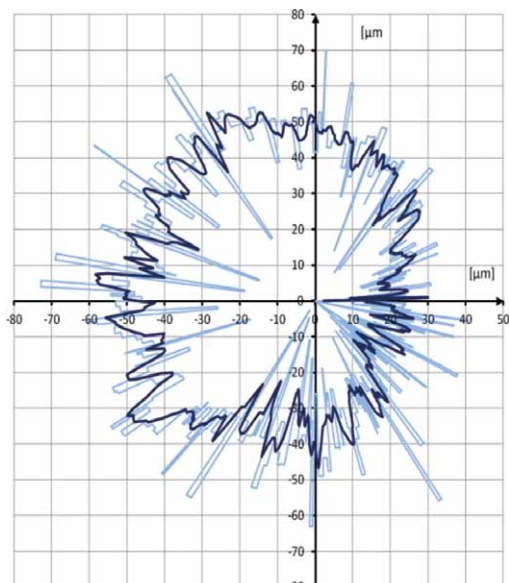
6. Przykłady przeprowadzonych rejestracji z wykorzystaniem głowicy laserowej LK-H152



Rys. 11. Przykład rejestracji prądnicy nr 1 P1500 Nr 1 P_n = 1300 kW, I_n = 4000 A, n = 750 obr./min, średnica komutatora D_k = 800 mm

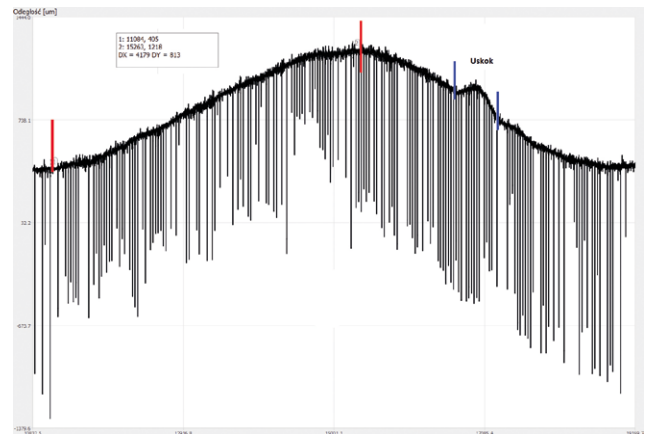


Rys. 12. Przykład „bicia promieniowego” w funkcji kąta 0-360° prądnicy z rys. 11

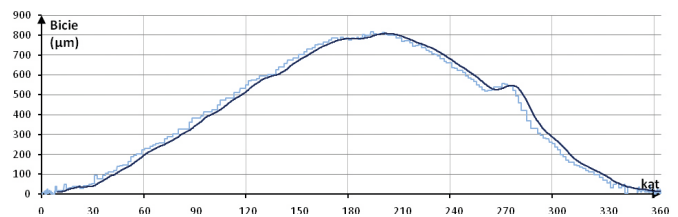


Rys. 13. Wykres kołowy „bicia promieniowego” komutatora prądnicy z rys. 11

Wniosek: prądnica nr 1 z rys. 11 może być eksploatowana.

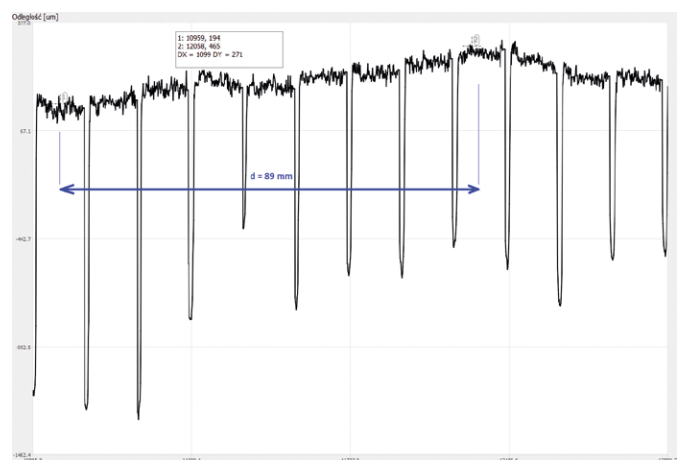


Rys. 14. Przykład rejestracji. Prądnica nr 2. P1500 Nr 2 P_n = 1300 kW, I_n = 4000 A, n = 750 obr./min, średnica komutatora D_k = 800 mm

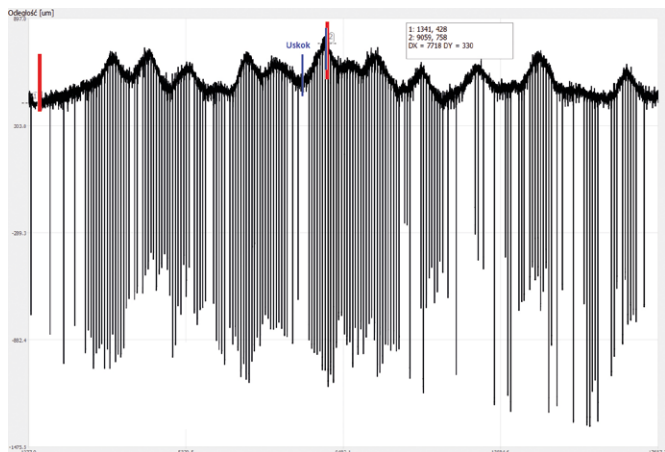


Rys. 15. Przykład „bicia promieniowego” w funkcji kąta 0-360° prądnicy nr 2 z rys. 14

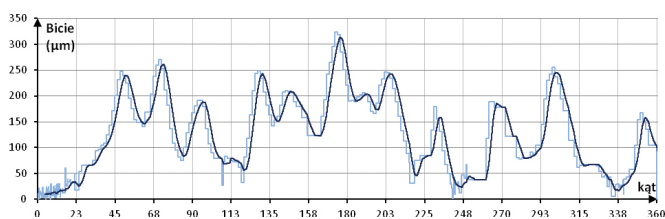
Przekroczona wartość 8 razy, dopuszczalna wartość 100 μm przy prędkości 750 obr./min.



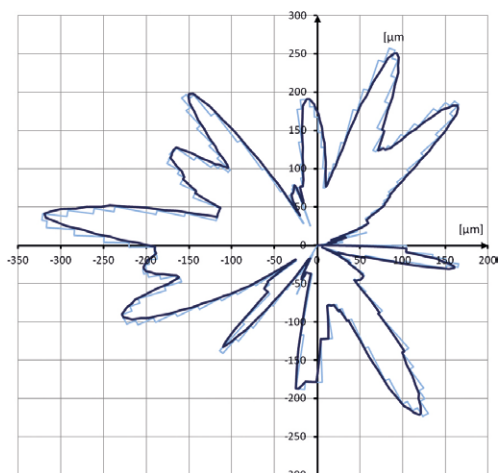
Rys. 16. Fałd na długości 8 działek, h = 271 μm komutatora prądnicy nr 2 z rys. 14



Rys. 17. Przykład rejestracji. Prądnicą nr 3. P1500 Nr 1 $P_n = 1300$ kW, $I_n = 4000$ A, $n = 750$ obr./min, średnica komutatora $D_k = 800$ mm



Rys. 18. Przykład „bicia promieniowego” w funkcji kąta 0–360° komutatora prądnicą nr 3 z rys. 17

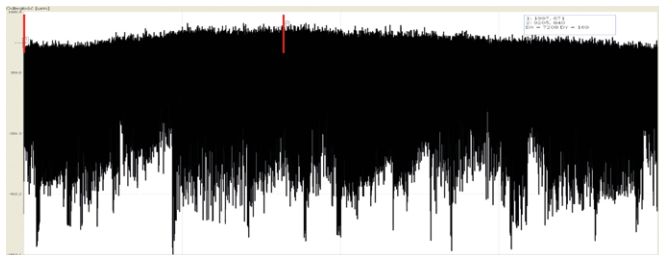


Rys. 19. Wykres kołowy „bicia promieniowego” komutatora prądnicą nr 3 z rys. 17

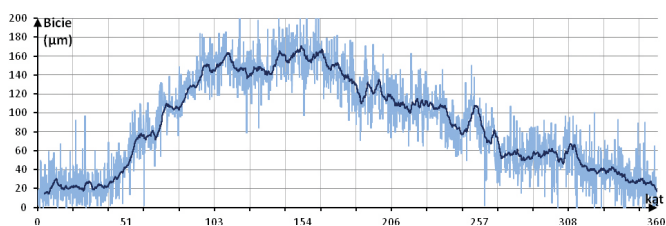


Rys. 20. Ciemne plamy rozmieszczone nieregularnie na wszystkich segmentach komutatora świadczące o iskrzeniu pomiędzy szczotkami a komutatorem

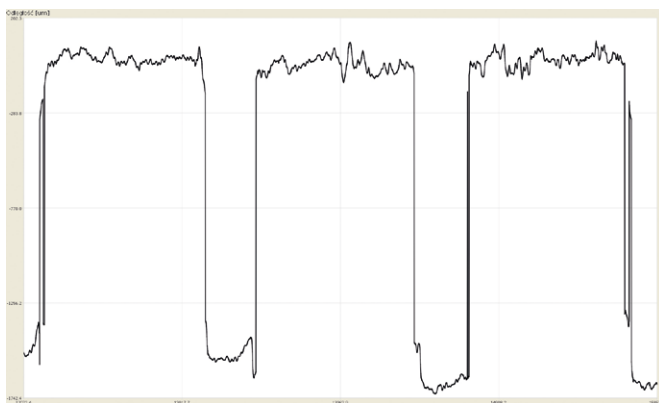
Wniosek: powyższe usterki wykluczają prądnicę nr 2 i 3 z eksploatacji!



Rys. 21. Silnik wyciągowy PW201 $P_n = 3150$ kW, $U_n = 735$ V, $I_n = 4585$ A, $n = 56$ obr./min, średnica komutatora $D_k = 2,5$ m



Rys. 22. Skan linii pomiarowej komutatora z rys. 21



Rys. 23. Linia pomiarowa komutatora z dodatkowymi punktami w strefie izolacji międzydziółkowej komutatora z rys. 21



Rys. 24. Obraz komutatora z małymi rysami i łuszczącymi się punktami

Wszystkie wyniki pochodzą z pomiarów maszyn elektrycznych przeprowadzonych w ramach badań OPA Zabrze, wykonanych przez Jerzego Łabę.

Rejestrację przeprowadzamy dla kilku reprezentatywnych ścieżek na całej szerokości komutatora.

7. Podsumowanie

Zaprezentowany zestaw aparatury pomiarowej umożliwia uzyskanie nowej jakości pomiarów wirujących maszyn elektrycznych, która była dotychczas niedostępna w metodach dotykowych. Dzięki wysokiej precyzji, szybkości, obniżania kosztów, jakie daje jej zastosowanie, doprowadzi to do jej coraz szerszego wykorzystania, głębszej analizy zgromadzonych wyników, a nawet prac badawczych z zakresu niezawodności.


8. Korzyści płynące z metody

Dzięki proponowanej metodzie pomiarowej i wykorzystaniu przedstawionej techniki uzyskuje się doświadczenie i umiejętność przewidywania skutków pracy danej maszyny elektrycznej w określonym pomiarami stanie.

Literatura

- [1] PLAMITZER A.M.: *Maszyny elektryczne*. WNT 1986.
- [2] SZKLARSKI L., ZARUDZKI J.: *Elektryczne maszyny wyciągowe*. PWN, Warszawa 1998.

- [3] Karty katalogowe firmy KeyenceModellreihe Lk-G5000 <https://www.keyence.com/products/measure/laser-1d/lk-g5000/index.jsp>.
- [4] Karty katalogowe firmy Calex Electronics Limited głowic pirometrycznych microEpsilon i pyroEpsilon, <https://www.micro-epsilon-shop.com/de/infrarot-temperatursensoren/ir-sensoren-metall-kompositmaterialien/hochleistungs-pyrometer-ctm-3sf22-c3>, <https://www.calex.co.uk/product/temperature-measurement/infrared-temperature-sensors/pyroepsilon/>.
- [5] PRACA ZBIOROWA: *Poradnik inżyniera elektryka. Tom 2*. WNT, Warszawa 1995, 1997,
- [6] Dr inż. Henryk Urzędniczek, Numer pracy w Politechnice Śląskiej 05/020/NB_16/0018 pn (NB-248/RE2/2016) – dostępna w Bibliotece Politechniki Śląskiej.

 dr inż. Agnieszka Jakubowska-Ciszek – Politechnika Śląska;
mgr inż. Piotr Wąs – Ośrodek Pomiarów i Automatyki SA

artykuł recenzowany