

doi:10.15199/48.2022.12.16

Monitorowanie wybranych parametrów komutatorów i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych bez wyłączenia ich z ruchu

Streszczenie. W artykule przedstawiono metodę diagnostyki komutatorów i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych polegającą głównie na pomiarze wymiarów geometrycznych wzdłuż obwodu. Metoda ta nie wymaga wyłączenia badanej maszyny z normalnej eksploatacji. Omówiono budowę wyspecjalizowanego systemu pomiarowego, w tym zastosowane metody pomiarów i przetworniki pomiarowe. Przedstawiono również przykładowe wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium oraz dla maszyn pracujących w instalacjach przemysłowych.

Abstract. The paper presents a method of diagnostics of commutators and slip rings of electrical machines, which mainly consists in measuring geometrical dimensions and temperature along their circumference. Essential for this method is, that taking the tested machine out of normal operation is not required. The construction of a specialized measurement system is described, including the measurement methods and transducers used. Examples of results of tests carried out in the laboratory and for machines operating in industrial installations are also presented. (**Monitoring of selected parameters of commutators and slip rings of electrical machines without shutting them down.**)

Słowa kluczowe: diagnostyka, komutator, maszyny elektryczne, system pomiarowy.

Keywords: technical diagnostics, commutator, electrical machines, measuring system.

Wstęp

Zapewnienie niezawodności i bezawaryjnej pracy maszyn elektrycznych stosowanych w instalacjach przemysłowych wymaga diagnostyki ich wszystkich istotnych elementów. Powszechnie stosowaną (i zwykle zalecaną przez producentów, np. [1..3], lub przez normy) metodą jest okresowe przeprowadzanie kompleksowych przeglądów technicznych. Takie badanie wymaga jednak wyłączenia badanej maszyny z normalnej eksploatacji, często na długie okresy, co skutkuje przerwaniem ciągłości procesu i stratami o różnorodnym charakterze. Rozwijane są nowoczesne metody diagnostyki maszyn elektrycznych, w których wykorzystuje się różne metody pomiarowe i metody analizy danych, np. [4...13]. Ze względu na złożoność i inne cechy metody te nie zawsze są dogodne do stosowania w warunkach przemysłowych, a szczególnie do ciągłego monitorowania lub bieżącej diagnostyki maszyn.

Niektóre elementy maszyn elektrycznych, takie jak łożyska, komutatory lub pierścienie ślizgowe, ze względu na specyfikę ich pracy, podlegają szczególnym narażeniom. W przypadku tych elementów wskazana jest znacznie częstsza kontrola, najlepiej bez wyłączenia maszyn z normalnej eksploatacji. Skuteczne metody diagnostyki łożysk przy wykorzystaniu pomiarów i analizy drgań są dobrze znane, a niezbędna aparatura jest powszechnie dostępna i stosowana. Inaczej jest w przypadku pierścieni ślizgowych lub tym bardziej komutatorów, które są znacznie mniej odporne na uszkodzenia ze względu na swoją złożoną konstrukcję. Wśród różnorodnych metod diagnostyki tych elementów [11...15] istotne miejsce zajmuje kontrola wymiarów geometrycznych [15,16] i temperatury wzdłuż obwodu. Pomiaru takie są szczególnie trudne w przypadku komutatorów, które są elementami o złożonej konstrukcji (znaczna liczba wycinków), o ile badania mają być prowadzone w czasie normalnej pracy maszyny, przy wysokiej prędkości obrotowej.

W artykule przedstawiono metodę diagnostyki komutatorów i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych nie wymagającą wyłączenia ich z normalnej eksploatacji. Omówiono budowę systemu pomiarowego opracowanego do prowadzenia takiej diagnostyki, przedstawiono uzyskane parametry metrologiczne oraz uwagi na temat metod analizy wyników. Przedstawiono też przykładowe wyniki badań przeprowadzonych w laboratorium oraz dla maszyn pracujących w instalacjach przemysłowych. Omawiany system opracowano we współpracy z firmą Ośrodek

Pomiarów i Automatyki SA w Zabrze w ramach projektu finansowanego przez NCBiR.

Analiza zagadnienia i przyjęte założenia

Elementy stykowe maszyn elektrycznych często ulegają uszkodzeniom, ponieważ są silnie narażone na wiele różnorodnych szkodliwych oddziaływań, jak na przykład: znaczne i zmienne obciążenia mechaniczne i elektryczne, działanie znacznych sił odśrodkowych, sił tarcia i wibracji, nagrzewanie, iskrzenie, osadzanie materiałów obcych. Powoduje to ich różnorodne uszkodzenia o charakterze mechanicznym, elektrycznym i cieplnym, a w tym:

- lokalne zmiany wymiarów (deformacja powierzchni lub nadmierne wysunięcie poszczególnych lametek) lub też dotyczące całego elementu (powstanie nadmiernej owalności lub podobne deformacje) [15, 16]

- zmiany właściwości elektrycznych styku wynikające ze zmian mechanicznych, a prowadzące do różnorodnych skutków [12...14],

- lokalne zwiększenie temperatury uszkodzonych wycinków komutatora [12, 13].

Należy zauważyć, że istnieje wzajemna zależność (swego rodzaju sprzężenie zwrotne) pomiędzy tymi efektami, co prowadzi do przyspieszenia wystąpienia poważnej awarii.

Dogodną i efektywną metodą diagnostyki komutatorów jak również pierścieni ślizgowych jest prowadzenie kontroli ich parametrów mechanicznych, w szczególności wymiarów geometrycznych (kształtu) powierzchni. Dla komutatorów zadanie jest trudniejsze ponieważ dotyczy to wszystkich wycinków (lametek). Ich prawidłowy kształt jest jednym z najistotniejszych czynników warunkujących poprawność procesu komutacji, a nadmierne deformacje są wyraźnym wskaźnikiem uszkodzenia.

Pomiar kształtu powierzchni komutatora lub pierścienia ślizgowego nie jest jednak zadaniem banalnym zważywszy założenie jego wykonania w trakcie normalnej pracy maszyny, zwykle przy znacznych prędkościach obrotowych, przy jednocześnie wymaganej wysokiej precyzji pomiaru (ok. 0,01 mm). Poniższe rozważania ilustrują to zagadnienie.

Przyjmując następujące założenia odpowiadające warunkom pracy przykładowej maszyny elektrycznej o dużej mocy:

- typowa szerokość wycinka komutatora ok. 10 mm,
- minimalna liczba punktów pomiaru wzdłuż powierzchni lamelki (po obwodzie) 10,

- maksymalna prędkość obwodowa komutatora ok. 40000 mm/s (co wynika z założenia średnicy komutatora 1000 mm i prędkości obrotowej 750 obr/min), uzyskujemy czas „przelotu” dla pojedynczego wycinka równy ok. 0,25 ms, a zatem pomiar wymiaru w kolejnych punktach wzdłuż powierzchni powinien być dokonany co ok. 25 μ s.

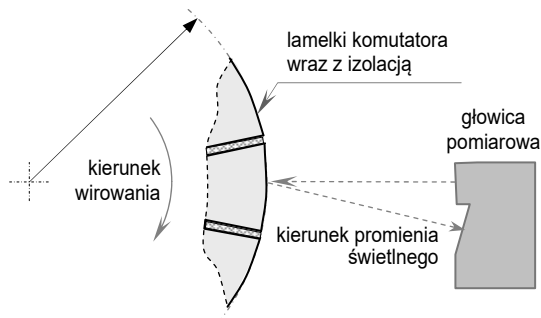
Drugim ze skutków uszkodzenia komutatora jest zwiększenie temperatury uszkodzonych wycinków, a ze względu na sprzężenie cieplne także i wycinków sąsiednich. Pomiar temperatury wzdłuż obwodu komutatora może być zatem uzupełniającą metodą diagnostyki. Przyjmując podane wyżej założenia i zakładając, że obszar pomiaru to pojedynczy wycinek (lub co najwyżej kilka sąsiednich), można oszacować odstęp czasu pomiędzy kolejnymi pomiarami na ok. (0,25 ... 1) ms.

Opracowując metodę pomiaru i dobierając przetworniki pomiarowe, oprócz czynników rozważanych we wstępie należy również wziąć pod uwagę to, iż w warunkach normalnej pracy na badanym elemencie występują napięcia robocze, a zatem pomiar zarówno wymiarów geometrycznych jak i temperatury musi być bezdotykowy. Przy znacznych prędkościach obrotowych występują ponadto różne narażenia mechaniczne, a zatem odległość bazowa przetworników pomiarowych od komutatora powinna być możliwie duża.

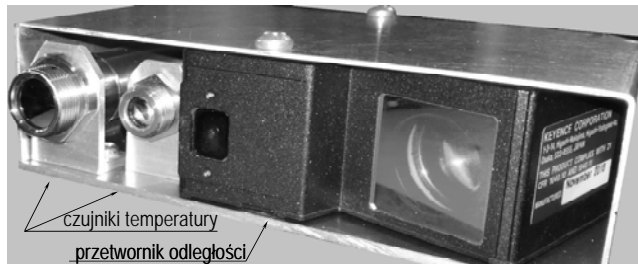
Przedstawione wyżej rozważania były podstawą do doboru przetworników pomiarowych oraz innych elementów opracowanego systemu pomiarowego, który szczegółowo opisano w następnym rozdziale.

Opis zrealizowanego systemu pomiarowego

Uwarunkowania i ograniczenia wymienione wyżej powodują, że jedynie wykorzystanie metod optycznych pozwoli poprawnie przeprowadzić pomiary. Na rysunku 1 zilustrowano zastosowany w omawianym urządzeniu sposób pomiaru profilu wycinków komutatora wzdłuż jego obwodu poprzez prowadzenie pomiarów odległości od nieruchomej głowicy. Do pomiarów temperatury wykorzystano przetworniki piroelektryczne z odpowiednimi układami optycznymi.



Rys. 1. Ilustracja optycznej metody pomiaru profilu komutatora



Rys. 2. Głowica pomiarowa.

Przetworniki pomiarowe umieszczono w skonstruowanej głowicy pomiarowej (rys. 2), która jest najistotniejszą częścią opracowanego systemu.

Wynikające z przedstawionej wyżej analizy wymagania odnośnie pomiaru wymiarów geometrycznych powierzchni działek komutatora zostały spełnione dzięki zastosowaniu laserowych przetworników pomiarowych działających według metody triangulacyjnej. W omawianym systemie zastosowano przetworniki laserowe firmy Keyence typu LK-H152. Uzyskano następujące parametry w torze pomiaru wymiarów działek komutatora: dwa kanały pomiarowe, odległość bazowa 150 mm, zakres pomiaru ± 40 mm, rozdzielczość 1 μ m, błąd nieliniowości $< 16 \mu$ m (0,02% zakresu), wpływ temperatury 0,01%/1°C, minimalny czas próbkowania 2,5 μ s.

Właściwości optyczne badanej powierzchni mają wpływ na dokładność wyniku. Dokonano zatem sprawdzenia poprawności wskazań mierząc odległość do powierzchni o właściwościach zbliżonych do typowej powierzchni działek komutatora – miedź wypolerowana. Wzorcowanie z oczywistych powodów było przeprowadzone w warunkach statycznych, a jako przetwornik wzorcowy wykorzystano mikromierz elektroniczny SYLVAC z przetwornikiem PROBE 25 o następujących parametrach: zakres pomiarowy (25+1) mm, rozdzielczość odczytu przesunięcia 0,1 μ m, niedokładność podstawowa wskazań $\pm 1,5 \mu$ m. Uzyskana wartość maksymalna błędni nieliniowości (16 μ m) jest większa od zakładanej w poprzednim rozdziale precyzji uzyskiwanych wyników (i jednocześnie od wartości podawanych przez producenta) - wynika to z niekorzystnych właściwości powierzchni elementu badanego. Wartość tego błędni odnosi się jednak do całego zakresu pomiarowego (80 mm), natomiast w praktyce zmiany mierzonych odległości są zwykle znacznie mniejsze i nawet dla dużych silników stosowanych w maszynach wyciągowych nie przekraczają kilku milimetrów. W takim zakresie dokładność pomiarów jest wystarczająca - na poziomie pojedynczych mikrometrów. Wyniki uzyskane wzdłuż obwodu komutatora mają wówczas charakter porównawczy - celem nie jest jednak precyzyjny pomiar odległości bezwzględnej, gdyż ta i tak zależy od ustawienia głowicy pomiarowej względem komutatora, co trudno jest wykonać z precyzją mikrometrową. Uzyskane wyniki obrazują natomiast bardzo precyzyjnie deformacje komutatora – patrz wyniki przykładowe pokazane poniżej oraz szereg innych szeroko omawianych w pracy [16].

Bezdotykowe pomiary temperatury poprzez wykorzystanie przetworników z czujnikami piroelektrycznymi są dobrze znane. W omawianym przypadku problemem jest wymagana szybkość akwizycji wyników (na poziomie 1 ms) oraz bardzo silna zależność wskazywanej wartości od współczynnika emisyjności powierzchni. Spośród pirometrycznych przetworników pomiarowych dostępnych komercyjnie nie udało się dobrać takiego, który spełniałby wszystkie wymagania (szybkość pomiaru, zakres pomiarowy, przedział emisyjności, odległość bazowa i odpowiednio mały obszar pomiaru), toteż zastosowano dwa niezależne kanały pomiarowe, z różnymi przetwornikami:

Kanał 1 - przetwornik firmy MICRO-EPSILON o zakresie nominalnym 50-400°C, minimalnym czasie próbkowania 1 ms, z możliwością dostrojenia do emisyjności obiektu badanego w przedziale 0,1 – 1.

Kanał 2 - przetwornik PyroEpsilon o zakresie 0-250°C, minimalnym czasie próbkowania 100 ms i dostrajaniem do emisyjności obiektu badanego w przedziale 0,2 – 1.

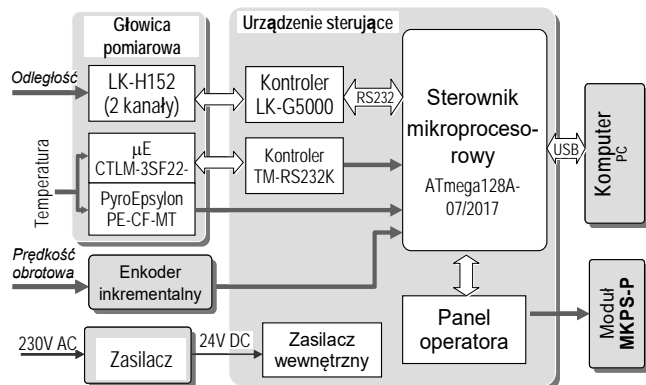
Przetwornik w kanale 1, spełnia założenia odnośnie czasu próbkowania, umożliwia zatem pomiary w czasie normalnej eksploatacji maszyn w większości zastosowań, jednakże nie jest możliwy pomiar stosunkowo niskich temperatur. Z kolei zakres pomiarowy przetwornika w kanale drugim jest optymalny, ale pomiary można

przewodzą jedynie przy bardzo niskich prędkościach obrotowych lub mierzyć jedynie średnią temperaturę komutatora. Taki wynik w pewnych sytuacjach też może być użyteczny w ocenianiu stanu tego elementu.

Istotne utrudnienia w pomiarach temperatury wynikają z niskiej wartości (nawet poniżej 0,1) i niepowtarzalności współczynnika emisyjności typowych działek komutatora. Stwarza to dwojakiego rodzaju ograniczenia. Po pierwsze dolna granica zakresów pomiarowych obu zastosowanych przetworników wzrasta przy niskiej emisyjności, co wynika z danych producenta i zostało potwierdzone w czasie kalibracji torów pomiaru temperatury. Po drugie poprawna kalibracja nie jest w praktyce możliwa w sytuacji pomiaru dla różnych badanych maszyn. Pomiary temperatury przy wykorzystaniu omawianego systemu mają zatem jedynie wartość porównawczą, to znaczy można obrazować zmiany rozkładu temperatury wzdłuż obwodu komutatora – pomimo tego, że bezwzględna wartość temperatury działek nie jest wskazywana poprawnie. Takie wyniki mogą również być użyteczne w ocenie stanu technicznego komutatora.

Zestaw przetworników pomiarowych uzupełniono o enkoder inkrementalny typu MWK40-0.2-1224 z kółkiem pomiarowym, przeznaczony do pomiaru prędkości obrotowej komutatora lub drogi kątowej przebytej w czasie rejestracji wyników pomiaru wymiarów i temperatury.

Uproszczony schemat blokowy omawianego systemu pomiarowego przedstawiono na rysunku 2. System składa się z kilku konstrukcyjnie wyodrębnionych elementów, jak to pokazano na schemacie. Elementem składowym jest komputer z dedykowanym programem.



Rys.3. Schemat blokowy systemu do monitorowania komutatorów

Opracowany system umożliwia prowadzenie diagnostyki komutatorów w kilku trybach:

1. Tryb „on-line”, w którym urządzenie sterujące pełni rolę rejestratora wyników. Wymagane jest podłączenia zewnętrznego komputera i udział operatora.
2. Tryb „off-line”, przy udziale operatora jednakże bez połączenia z komputerem zewnętrznym, w którym:
 - po inicjacji przez użytkownika w zadanym przedziale czasowym 0.2 ÷ 200 sek. rejestrowane są wyniki pomiaru,
 - po wykonaniu pomiaru rekord wyników zapisywany jest pamięci nieulotnej, co pozwala na późniejszą analizę,
 - możliwa jest wstępna analiza zarejestrowanych wyników według wbudowanego algorytmu.
3. Tryb „autonomiczny”, bez połączenia z komputerem zewnętrznym i bez obsługi przez operatora, w którym:
 - cyklicznie (z zadanym krokiem czasowym 1 ÷ 1440 min.) powtarzane są pomiary w zadanym przedziale czasu (0,2 ...200 s) do momentu wystąpienia przekroczenia zadeklarowanych parametrów granicznych (temperatura lub odległość), co traktowane jest jako wystąpienie uszkodzenia i sygnalizowane jest na wyświetlaczu oraz dwustanowym wyjściu stykowym (moduł MKPS-P),

- w pamięci nieulotnej zapamiętywany jest zestaw rekordów wyników pomiaru uzyskanych w cyklach przed, w momencie jak i po wystąpieniu awarii (łącznie 8 cykli).

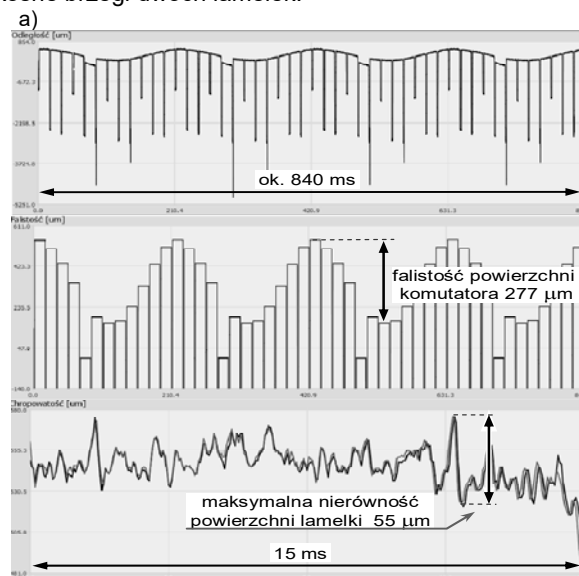
Metody analizy wyników pomiarów

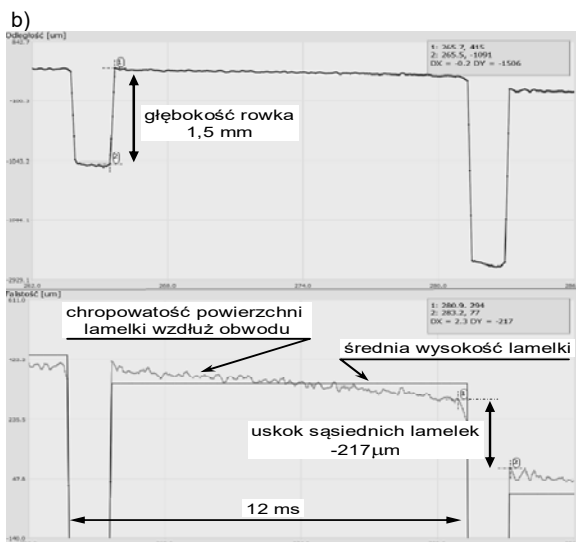
Skuteczna diagnostyka stanu komutatora lub pierścienia ślizgowego badanej maszyny wymaga odpowiedniego przetwarzania zgromadzonych wyników pomiaru. Analiza wyników zarejestrowanych w trybie pracy „on-line” może być przeprowadzona przez użytkownika przy wykorzystaniu dedykowanego programu pracującego na komputerze zewnętrznym. Szczegóły dotyczące wykorzystanych metod nie będą tu omówione, a staną się przedmiotem osobnej publikacji. Struktura danych zapisywanych w pamięci trwałe jest taka, że użytkownik może wykorzystać dowolny stworzony przez siebie algorytm analizy i wizualizacji.

W przypadku pracy w dwóch pozostałych trybach ocena stanu badanego elementu możliwa jest w przy wykorzystaniu stałego algorytmu wbudowanego w wewnętrzny program urządzenia sterującego. Działanie algorytmu jest proste w odniesieniu do pomiaru temperatury czy też pomiaru wymiarów pierścienia ślizgowego – polega na wyznaczeniu wartości średniej, maksymalnej i minimalnej ze wszystkich wyników i ocenie czy wartości skrajne nie przekraczają dopuszczalnych granic. Zagadnienie komplikuje się w przypadku analizy wymiarów poszczególnych lametek komutatora, ze względu na występujące pomiędzy nimi przekładki izolacyjne. W miejscach przekładek występują wgłębienia, a wyniki uzyskane w wzdłuż obwodu w miejscach wgłębien znacznie odbiegają od tych odpowiadających powierzchni lametek – należy je wyodrębnić i pominąć w analizie. W programie wewnętrznym urządzenia sterującego (rys. 3) wbudowano algorytm realizujący to zadanie.

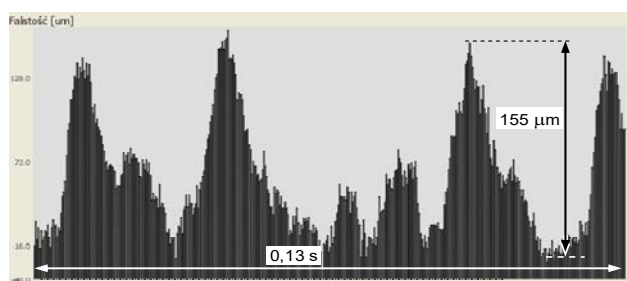
Przykładowe wyniki pomiarów

Stosując opracowane urządzenie przeprowadzono liczne pomiary zarówno w warunkach laboratoryjnych (dla komutatorów maszyn o małej mocy) jak i w warunkach przemysłowych. Na kolejnych rysunkach prezentowane są przykładowe wykresy ilustrujące wyniki pomiaru wymiarów komutatora. Na rysunku 4 zobrazowano wyniki uzyskane dla modelu komutatora o 12 działkach przygotowanego do testowania omawianego systemu. Wprowadzono w nim celowo określone deformacje: niejednakową średnicę wzdłuż obwodu (falistość powierzchni), przesunięcie jednej z lametek, niejednakową głębokość rowków na izolację, ukośne brzozy dwóch lametek.

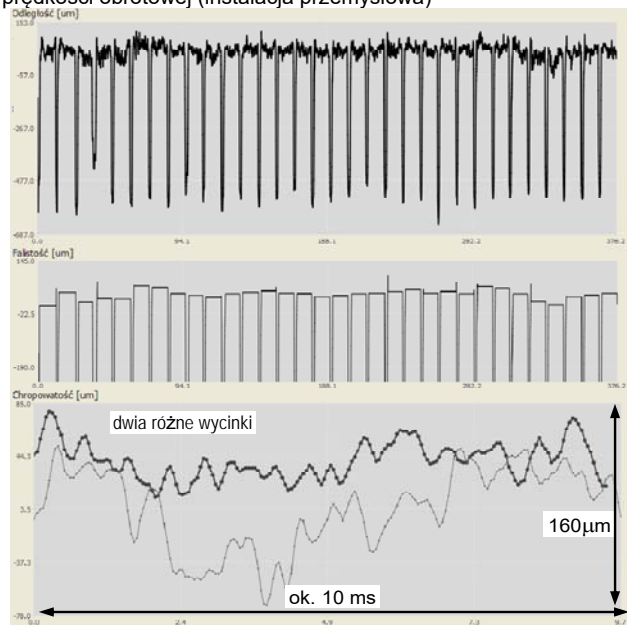




Rys.4. (a) Profil komutatora testowego – na górze pełny zestaw wyników (20000 punktów), w środku wykres średnich wysokości lamelki, na dole porównanie kształtów powierzchni pojedynczej lamelki w dwóch kolejnych obrotach komutatora, (b) obraz dla pojedynczej lamelki.



Rys.5. Wyniki (20000 punktów) uzyskane dla prądnicy o wysokiej prędkości obrotowej (instalacja przemysłowa)



Rys. 6. Wyniki uzyskane dla silnika małej mocy (laboratorium)

Na kolejnych rysunkach 5 i 6 prezentowane są przykładowe wyniki uzyskane dla maszyn pracujących w instalacji przemysłowej oraz w warunkach laboratoryjnych.

Analizując wyniki pomiarów uzyskane w warunkach przemysłowych można zauważyć istotny wpływ ewentualnych drgań głowicy pomiarowej, prowadzący do fałszywych wniosków odnośnie chropowości powierzchni

badanych elementów. Prowadząc pomiary użytkownik powinien zadbać o takie umiejscowienie głowicy, aby w jak największym stopniu wyeliminować jej drgania.

Podsumowanie

Opisany powyżej system pomiarowy jest użytecznym narzędziem do diagnostyki stanu powierzchni nie tylko komutatorów i pierścieni ślizgowych maszyn elektrycznych. System ten jest wykorzystywany do oceny stanu powierzchni wzdłuż obwodu dowolnych elementów wirujących - wnikliwe omówienie wyników uzyskanych w trakcie badań różnych maszyn w instalacjach przemysłowych zawarto w [16]. Może on być wykorzystany także do analizy drgań dowolnych elementów, zarówno wirujących jak i nieruchomych – pewne uwagi na ten temat zamieszczono także w [16]. Podstawowa zaleta systemu to uzyskane parametry metrologiczne dla bezdotykowych pomiarów wymiarów geometrycznych: zakres pomiarowy 80 mm, wysoka dokładność (błędy rzędu kilku mikrometrów przy rozdzielczości 1 μm), bardzo krótkie czasy próbkowania (od 2,5 μs), znaczna liczba rejestrowanych punktów pomiarowych (do 60000).

LITERATURA

- [1] PN-72/E-04270 „Maszyny elektryczne wirujące prądu stałego. Metody badań”.
- [2] Maszyny elektryczne wirujące. Komutatory walcowe, wymagania i badania. Norma branżowa BN-85/3010-05
- [3] Instrukcja ruchowa WX4 silnika typu PW-104, „Dolmel” (obecnie DFME) Wrocław
- [4] Głowacz Z., Głowacz A., Wykrywanie uszkodzeń w silnikach elektrycznych z zastosowaniem metody analizy harmonicznej. *Telekomunikacja i Systemy Bezpieczeństwa w Górnictwie*, Wydawca: EMAG, Katowice; Mat. konf. ATI 2007, 237-241
- [5] Janssens O., Van de Walle R., Loccuffer M., and Van Hoecke S., Deep learning for infrared thermal image based machine health monitoring, *IEEE/ASME Transactions on Mechatronics*, vol. 23, no. 1/2018., 151–159,
- [6] Wang Z. Y., et al, Fault diagnosis for rotary machinery with selective ensemble neural networks, *Mechanical Systems and Signal Processing*, vol. 113/2018, 112–130
- [7] Sebok M., Gutten M., Kucera M., Korenciak D., Diagnostyka maszyn elektrycznych z wykorzystaniem termowizji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 08/2020, 47
- [8] Głowacz Z., Zdrojewski A., Modelowanie matematyczne silnika komutatorowego prądu stałego i układu zasilania dla diagnostyki, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 3/2007, 105-109
- [9] Głowacz Z., Zdrojewski A.; Analiza spektralna sygnałów silnika komutatorowego prądu stałego zasilanego ze źródeł napięcia stałego, *Przegląd Elektrotechniczny*, 2006, nr 11/2006, 76-79
- [10] Głowacz Z., Zdrojewski A., Diagnostyka silnika komutatorowego prądu stałego z zastosowaniem metody analizy spektralnej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 01/2009, 147-150
- [11] Zieliński W., Metoda monitorowania styku szczotka-komutator przy pomocy optoelektronicznego analizatora iskrzenia w maszynach komutatorowych prądu stałego, *Pomiary Automatyka Kontrola*, nr 3/2005, 14-16
- [12] Abbas A Wahab et al, Commutator fault detection of brushed DC motor using thermal assessment, *IOP Conf. Ser.: Mater. Sci. Eng.* 469 012057, 2019
- [13] Wae-Gyeong Shin, Young-Sik Song, Young-Kyo Seo, Correlation analysis of brush temperature in brush-type DC motor for predicting motor life, *Journal of Mechanical Science and Technology* 26 (7) 2012, 2151~2154
- [14] Zieliński W., Diagnostyka komutatorów maszyn elektrycznych prądu stałego, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, Nr 82/2009, 245-248
- [15] Biernat A., „Pomiar owalizacji dynamicznej komutatora”, *Wiadomości Elektrotechniczne*, z. 3, 1993
- [16] Łaba J., Diagnostyka komutatorów maszyn elektrycznych, *Bezpieczeństwo Pracy i Ochrona Środowiska w Górnictwie*, nr 05/2020, 25-32