

**Waldemar MORZUCH**

WYDZIAŁOWY ZAKŁAD WYTRZYMAŁOŚCI MATERIAŁÓW PRZY WYDZIALE MECHANICZNYM POLITECHNIKI WROCŁAWSKIEJ  
ul. Smoluchowskiego 25, 50-372 Wrocław

## Pomiar przemieszczeń stojanów maszyn elektrycznych przy zastosowaniu interferometrii holograficznej

Dr inż. Waldemar MORZUCH

Ukończył studia na Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej w 1976r. W roku 1980 uzyskał stopień doktora nauk technicznych na tym samym Wydziale. Obecnie jest adiunktem w Wydziałowym Zakładzie Wytrzymałości Materiałów przy Wydziale Mechanicznym Politechniki Wrocławskiej. Zainteresowania naukowe autora dotyczą zagadnień związanych z interferometrią holograficzną oraz zagadnień związanych ze statecznością dynamiczną układów mechanicznych.



e-mail: waldemar.morzuch@pwr.wroc.pl

### Streszczenie

Przedstawiono propozycję pomiaru przemieszczeń stojanów maszyn elektrycznych metodą interferometrii holograficznej. Opisany poniżej przykład dotyczył pomiaru przemieszczeń powierzchni korpusów silników elektrycznych obciążonych siłami magnetycznymi. Siły te spowodowane do tzw. sił naciągu magnetycznego powstają w wyniku niecentrycznego położenia osi wirnika względem osi stojana. W pomiarach zastosowano jedną z metod holografii optycznej zwaną metodą podwójnej ekspozycji. W wyniku interferencji fali przedmiotowej i fali odniesienia na materiale światłoczułym otrzymano obraz prążków interferencyjnych na podstawie których wyznaczono przemieszczenia poszczególnych punktów badanego obiektu.

**Słowa kluczowe:** stojan, maszyna elektryczna, holografia.

### Measurement of displacements of electric machine stators using holographic interferometry

#### Abstract

The estimation of displacements of electric machine stators with use of holographic interferometry is presented. The example described in the paper concerns measuring the displacements of the surfaces of electric motor housings while they were subjected to magnetic forces. The forces reduced to the so-called forces of magnetic tension are presents in the case of a non-central position of the runner axis relative to the stator axis. The double exposure method of optic holography was used for measurements. As a result of the interference of the reference and main wave on light sensitive material, an image of interferential striae is obtained on the basis of which the displacements of individual points of the studied object can be determined. The scheme of the test stand is shown in Fig.1. Position of the magnetic field relative to the investigated stator is shown in Fig. 2. Based on the interferometry striae shown in Figs.3 and 4, the stiffness of electric machine stator is presented. The asymmetry of deformation of the external stator surface is determined.

**Keywords:** stator, electric machine, holography.

### 1. Wstęp

Stojany maszyn elektrycznych często podlegają działaniu dość znacznych sił, które powodują ich deformację. Powstaje wówczas pytanie, jak wielkie są te deformacje i czy nie przekraczają wartości dopuszczalnych. Z punktu widzenia zastosowań inżynierskich ciekawym byłoby otrzymanie funkcji opisującej przemieszczenia powierzchni zewnętrznej stojana. W poniższej pracy przedstawiono propozycję pomiarów przemieszczeń stojanów metodą interferometrii holograficznej. Opisany poniżej przykład dotyczył pomiaru przemieszczeń powierzchni korpusów silników elektrycznych obciążonych siłami magnetycznymi. Siły te spowodowane do tzw. sił naciągu magnetycznego powstają w przypadku niecentrycznego położenia osi wirnika względem osi stojana. W pomia-

rach zastosowano jedną z metod holografii optycznej zwaną metodą podwójnej ekspozycji. Metoda ta, przedstawiona w poprzednich pracach autora [2, 3] polega na kolejnej rejestracji fal odbitych od obiektu w stanie nieobciążonym i obciążonym. W wyniku interferencji fali przedmiotowej i fali odniesienia na materiale światłoczułym otrzymuje się obraz prążków interferencyjnych, na podstawie, których można wyznaczyć przemieszczenia poszczególnych punktów badanego obiektu.

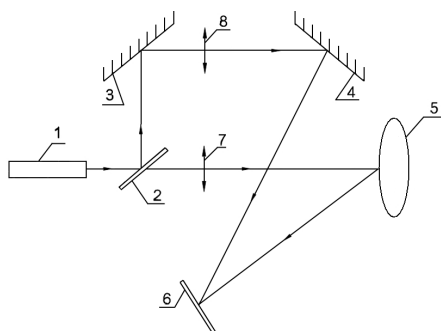
### 2. Opis przeprowadzonych badań

Pomiary przemieszczeń stojanów dotyczyły dwóch typowych rozwiązań klatkowych silników indukcyjnych. Pierwszy silnik typu SZJa 42a miał złożoną, ożebrowaną powierzchnię zewnętrzną dla zintensyfikowania wymiany ciepła z otoczeniem. Drugi z silników typu SGO14 był silnikiem głębinowym (przeznaczonym do napędu pompy głębinowej) o gładkiej powierzchni zewnętrznej. Badania ograniczono do maszyn o jednej parze biegunów, a uwagę skoncentrowano na przemieszczeniach powierzchni korpusu stojana przy kilku wybranych orientacjach osi pola magnetycznego i różnych wartościach prądów stojana. Wybrano takie wartości natężeń prądów w poszczególnych fazach stojana, które zapewniają otrzymanie charakterystycznych położenia wektora pola magnetycznego. Przez zastosowanie zasilania prądem stałym odtworzono jedynie przemieszczenia statyczne. Za najbardziej przydatny do badań uznano silnik asynchroniczny klatkowy, z tego powodu, że posiada on cylindryczny wirnik (symetrię magnetyczną), zaś trójfazowy układ zasilania stojana pozwala na wytworzenie rozkładu pola magnetycznego stacjonarnego, odpowiadającego wybranej chwili czasu, tj. wybranej chwilowej orientacji pola. Dla próby wykazania, że metoda holografii jest przydatna nawet przy złożonej powierzchni zewnętrznej stojana wybrano silnik ożebrowany na zewnątrz. Ze względu na to, że przedmiotem badań miał być silnik małej mocy, dla uzyskania lepszej obserwacji przemieszczeń powierzchni zewnętrznej zdecydowano się przyjąć silnik dwubiegunowy (jedna para biegunów,  $p = 1$ ). Wybrano do badań silnik asynchroniczny, klatkowy, dwubiegunowy na uchwytach typu SZJa 42a posiadał następujące parametry: moc 5,5 kW, napięcie zasilania 220/380 V, znamionowa wartość natężenia prądu 19/11 A,  $\cos\phi = 0,87$ . Drugi z silników to silnik głębinowy SGO14 o mocy 7,5 kW produkowany w zakładzie Karelma. Posiadał on również jedną parę biegunów, znamionowe napięcie zasilania 380 V, znamionowe natężenie prądu 12,1 A,  $\cos\phi = 0,86$ . Silnik ten posiadał powierzchnię zewnętrzną gładką. Badania eksperymentalne przeprowadzono w pracowni holograficznej Instytutu Materiałoznawstwa i Mechaniki Technicznej Politechniki Wrocławskiej na stanowisku badawczym, którego schemat przedstawiono na rys. 1.

Stanowisko to składa się z czterech podstawowych elementów:

- lasera,
- płyty żeliwnej,
- układu optycznego,
- obiektu.

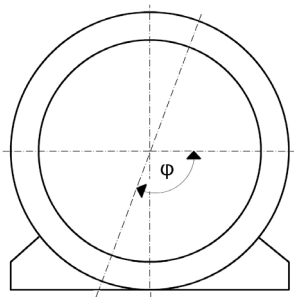
Podstawowym elementem stanowiska badawczego jest laser argonowy ILA 120. Praca tego lasera polega na wywoływaniu emisji pomiędzy odwróconymi poziomami jonów. Do zainicjowania akcji laserowej potrzebne są silne, jednoczesne wyładowania, które odbywają się w grafitowym kanale za pomocą wysoko wydajnych elektrod. Wyładowania te są skoncentrowane za pomocą pola magnetycznego w odpowiednim kanale osiowym. Wzbudzone jony mogą zgodnie ze swoimi schematami poziomów energetycznych emitować promieniowanie o różnych długościach fali:  $\lambda_1 = 0,5145 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_2 = 0,488 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_3 = 0,4762 \mu\text{m}$ ,  $\lambda_4 = 0,4579 \mu\text{m}$ .



Rys. 1. Schemat stanowiska badawczego; 1 - laser, 2 - płytka dzieląca światło, 3, 4 - zwierciadła, 5 - badany obiekt, 6 - płyta holograficzna, 7, 8 - soczewki

Fig. 1. Test stand; 1-laser, 2-plate of light division, 3, 4-mirrors, 5-investigated object, 6 - holographic plate, 7, 8-lens.

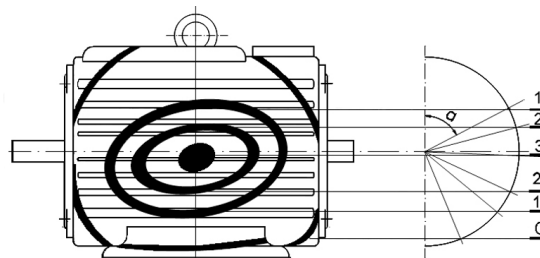
Do otrzymania akcji laserowej służy rezonator składający się ze zwierciadła lub pryzmatu i częściowo odbijającego zwierciadła wychwytyjącego. Zespół lasera ILA 120 składa się z dwóch zasadniczych elementów: właściwego lasera i zasilacza. Uruchamianie lasera jak i jego obsługa i kontrola pracy odbywa się za pomocą przycisków i wskaźników umieszczonych w zasilaczu. Zasilacz ten oznaczony symbolem NG 300- 30/1 dostarcza do lasera prądu o bardzo nieznacznym falowaniu. Laser jest chłodzony wodą o ciśnieniu  $2 \cdot 10^5$  Pa i natężeniu przepływu  $6 \text{ dm}^3/\text{min}$ . Całość jest umieszczona na ciężkiej, sztywnej płycie żeliwnej, co zapewnia odpowiednią dokładność pomiarów. Płyta ta służy do zamocowania elementów układu optycznego i badanego obiektu (np. silnika elektrycznego). Zasada pracy stanowiska badawczego jest następująca: Promień emitowany przez laser 1 jest dzielony za pomocą zwierciadła 2 na dwie wiązki: przedmiotową i odniesienia. Wiązka przedmiotowa po rozszerzeniu za pomocą soczewki 7 pada na obiekt 5 i po odbiciu od niego pada na płytę holograficzną 6. Wiązka odniesienia jest za pomocą zwierciadeł 3 i 4 oraz soczewki 8 również kierowana na płytę holograficzną. W wyniku interferencji obu wiązek na hologramie powstaje układ prążków, który jest punktem wyjścia do analizy przemieszczeń obiektu 5 (stojana silnika elektrycznego). Położenie pola magnetycznego modelowano za pomocą odpowiedniego połączenia uzwojeń elektrycznych w obwodzie stojana, w wyniku czego otrzymano żądaną orientację pola opisaną kątem  $\varphi$  (rys. 2).



Rys. 2. Położenie pola magnetycznego względem stojana  
Fig. 2. Position of the magnetic field relative to the stator

Przez dokonanie odpowiednich połączeń elektrycznych otrzymano dla silnika SZJa 42a trzy położenia pola magnetycznego obrócone względem siebie o  $120^\circ$ . W badaniach silnika SGO14 uzwojenia stojana były zasilane jedynie prądem znamionowym wynikającym z danej orientacji pola magnetycznego. Przez odpowiednie połączenia elektryczne otrzymano dla silnika SGO14 dwa położenia pola magnetycznego obrócone względem siebie o  $90^\circ$  ( $\varphi = 0^\circ$ ,  $\varphi = 90^\circ$ ). Silnik ten był badany dla dwóch położen: pracy poziomej i pionowej. Ze względu na małą deformację powierzchni zewnętrznej stojana do rejestracji przemieszczeń stosowano metodę podwójnej ekspozycji. Polega ona na wykonaniu dwóch naświetleń tej samej płyty holograficznej w dwóch różnych sta-

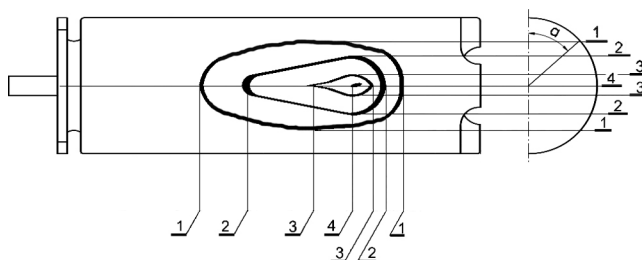
nach badanego obiektu (np. w stanie bez obciążenia i w stanie z obciążeniem). Na hologramie zarejestrowane są wtedy fale przedmiotowe, które rozchodziły się od powierzchni obiektu w czasie trwania kolejnych naświetleń. Oświetlenie tak wykonanego hologramu wiązką odtwarzającą, identyczną z wiązką odniesienia, powoduje rozchodzenie się za hologramem dwóch zarejestrowanych na nim fal. Fale te interferują ze sobą wytwarzając układ prążków zawierający informację o wzajemnej różnicy między zarejestrowanymi stanami (np. stanem bez obciążenia i stanem z obciążeniem). Obraz prążków interferencyjnych dla silnika SZJa 42a w warunkach pracy poziomej i przy kącie  $\varphi = 0^\circ$  przedstawiono na rys. 3.



Rys. 3. Obraz prążków interferencyjnych dla silnika SZJa 42a; 0, 1, 2, 3 - rzędy prążków interferencyjnych,  $\alpha$  - kąt orientacji prążka

Fig. 3. Interferential striation image for motors SZJa 42a; 0, 1, 2, 3-orders of interferential striae,  $\alpha$ -striae angle of orientation

W przypadku silnika SGO14 otrzymano prążki interferencyjne, których obraz przedstawiono na rys. 4.



Rys. 4. Obraz prążków interferencyjnych dla silnika SGO14; 1, 2, 3, 4 - rzędy prążków interferencyjnych,  $\alpha$  - kąt orientacji prążka

Fig. 4. Interferential striation image for motor SGO14; 0, 1, 2, 3, 4 - orders of interferential striae,  $\alpha$ -striae angle of orientation

Ostatnie badania były związane z położeniem pionowym silnika i były przeprowadzane przy kącie  $\varphi = 0^\circ$ .

### 3. Otrzymane wyniki i wnioski

Na podstawie otrzymanych prążków interferencyjnych wyznaczono przemieszczenia poszczególnych punktów powierzchni stojana ze wzoru [1, 4]:

$$u = \frac{n\lambda}{2 \sin \alpha} \quad (1)$$

gdzie:  $n$  - rząd prążka,  $\lambda$  - długość fali światła użytego do badań (zastosowano światło o  $\lambda = 0,5145 \mu\text{m}$ ),  $\alpha$  - kąt orientacji prążka.

Otrzymane prążki wskazują na pewną niesymetrię deformacji powierzchni zewnętrznej stojana, która wynika z niesymetrii jego budowy lub niesymetrii obciążenia. Ocena dokładności przemieszczeń stojana jest zależna od dokładności ustalenia rzędu danego prążka interferencyjnego. Jego rząd wyznaczono w sposób względny zgodnie z poniższym rozumowaniem. Można założyć, że największe przemieszczenia będą miały punkty stojana zlokalizowane w pobliżu środkowej jego części. Dlatego prążek interfe-

rencyjny znajdujący się w tej strefie będzie miał najwyższy rząd. Przesunięcia punktów stojana zlokalizowanych w jego zewnętrznej części, w pobliżu łożysk będą zbliżone do zera. W tej strefie będzie się znajdował prążek zerowy. Na podstawie obrazu prążków interferencyjnych będzie można wyciągnąć wnioski co do asymetrii deformacji powierzchni zewnętrznej stojana. Asymetria ta może wynikać z asymetrii budowy stojana lub np. z niedokładności osadzenia w nim wirnika. Udział asymetrii budowy stojana będzie duży w przypadku silnika SZJa 42a, który ma dość nieregularną powierzchnię zewnętrzną. W przypadku silnika głębinowego SGO 14 asymetria rozkładu prążków interferencyjnych będzie pochodziła prawdopodobnie z niesymetrii obciążenia polem magnetycznym. Może ona wynikać np. z niecentrycznego umieszczenia wirnika w stojanie lub z luzów łożysk. W przypadku silnika głębinowego stwierdzono niesymetrię osiową deformacji, która koncentrowała się w pobliżu łożyska górnego. Prezentowaną metodę można polecić przede wszystkim do oceny jakościowej. Można ją zastosować np. w badaniach konstrukcji prototypowych. Dokładność powyższej metody będzie związana z dokładnością oceny rzędu prążka zerowego i można ją oszacować na poziomie połowy długości fali światła użytego do badań. Z przeprowadzonych badań eksperymentalnych wyciągnięto następujące wnioski:

1. Wykonane badania potwierdziły przydatność metody holografii optycznej do określenia przemieszczeń powierzchni zewnętrznej stojanów maszyn elektrycznych wywołanych siłami naciągu magnetycznego.
2. Analiza obrazu całej powierzchni stojana pozwala na wyznaczenie miejsc o największej koncentracji przemieszczeń oraz określenie charakteru tych przemieszczeń.
3. Otrzymany obraz holograficzny powierzchni pozwala na określenie funkcji przemieszczeń niezależnie od jej ukształtowania.
4. W wybranych do badań silnikach elektrycznych stwierdzono, że amplituda przemieszczeń powierzchni stojana wyniosła ok.  $2 \mu\text{m}$  (4 prążki przy świetle laserowym o długości fali  $\lambda_1 = 0,5145 \mu\text{m}$ ).

5. Z analizy obrazu powierzchni odkształconej silnika głębinowego SGO14 wynika, że występuje niesymetria osiowa deformacji, która koncentruje się w pobliżu łożyska wyżej położonego. Można domniemywać, że przyczyną tego może być niecentryczne osadzenie wirnika lub luzy łożyska. Konstrukcję należałoby dla wyjaśnienia przyczyny takiej deformacji przebadać szczegółowo.
6. Z otrzymanych empirycznie charakterystyk przemieszczeń powierzchni można przy wyborze odpowiednich modeli matematycznych wyznaczyć charakterystyki odkształceń i naprężeń występujących w stojanie.
7. Metoda holografii optycznej jest przydatna do badań stojanów maszyn elektrycznych i powinna być wykorzystywana do badań konstrukcji prototypowych. Metodę tę można również polecić do badań deformacji powierzchni zewnętrznej korpusów obrabiarek stosowanych do obróbki metali.

#### 4. Literatura

- [1] Jagoszewski E.: Wstęp do holografii. Wydawnictwo Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 1978.
- [2] Morzuch W.: Pomiar sztywności utwierdzenia belki przy zastosowaniu interferometrii holograficznej. *Pomiary Automatyka Kontrola*. 5 (2009).
- [3] Morzuch W.: Pomiar sztywności skrętniej elementów maszyn przy zastosowaniu interferometrii holograficznej. *Pomiary Automatyka Kontrola*. 8 (2010).
- [4] Pluta M.: Holografia optyczna. PWN, Warszawa 1980.

otrzymano / received: 23.02.2011

przyjęto do druku / accepted: 03.10.2011

artykuł recenzowany

## INFORMACJE

### Nowa inicjatywa PAK

Na stronie internetowej Wydawnictwa PAK został utworzony dział: **Niepewność wyników pomiarów** w którym są zamieszczane aktualne informacje dotyczące problemów teoretycznych i praktycznych związanych z szacowaniem niepewności wyników pomiarów. W dziale znajdują się:

- aktualne informacje o publikacjach dotyczących niepewności wyników,
- informacje o przedsięwzięciach naukowo-technicznych i edukacyjnych, o tematyce związanej z niepewnością,
- dokumenty dotyczące niepewności,
- pytania do ekspertów (FAQs).

Zapraszamy:

- autorów opublikowanych prac dotyczących niepewności o nadsyłanie tekstów do zamieszczenia w tym dziale,
- organizatorów przedsięwzięć naukowo – technicznych lub edukacyjnych do nadsyłania informacji o imprezach planowanych lub odbytych,
- zainteresowanych zagadnieniami szczegółowymi do nadsyłania pytań do ekspertów.

Materiały mogą mieć formę plików lub linków do źródeł. Warunkiem zamieszczenia w tym dziale strony internetowej PAK materiałów lub linków jest przysłanie do redakcji PAK pocztą zwykłą zgody właściciela praw autorskich na takie rozpowszechnienie. Zamieszczanie i pobieranie materiałów i informacji w tym dziale strony internetowej jest bezpłatne. Redakcja PAK będzie nadzorować zawartość działu, ale za szczegółowe treści merytoryczne odpowiadają autorzy nadsyłanych materiałów.