

**Józef Dwojak, Marek Rzepiela, Ireneusz Struzik**  
**PGE Elektrownia OPOLE S.A., Opole**

## **WYKORZYSTANIE WIBROMETRU LASEROWEGO DO DIAGNOSTYKI EKSPLOATACYJNEJ SILNIKÓW ELEKTRYCZNYCH NA PODSTAWIE WŁASNYCH DOŚWIADCZEŃ**

### **THE USE of PORTABLE LASER VIBROMETERS TO THE EXPLOATIONAL DIAGNOSTICS OF ELECTRIC MOTORS BASED ON THE AUTHORS OWN EXPERIMENTS**

**Abstract:** The paper aims at showing the possibilities for effective application of laser diagnostics vibrometers operational drives of electrical machines. To measure vibrations Laser Vibrometer VH-1000 is one of the few such facilities in Poland and brings a new quality and performance in vibration measurements and diagnostics of machines. Vibrometer laser provides a measurement of non-contact vibration, thus eliminating interference caused by ground sensors and high temperature measuring point. In addition, the measurement can be performed from a distance. As a vibration sensor can operate with any vibration analyzer for direct entry into the recording and analysis of the measured signal. There are a wide frequency band, allowing for vibration analysis of frequencies near zero, which gives the possibility of diagnosis for low rotor speed. Non-contact vibration measurement allows a direct measurement of shaft vibration machines, which brings new quality into the possibilities of their diagnosis. The authors describe the use of laser vibrometer in the diagnosis of low speed engines. We apply laser vibrometer diagnostics engines using vibration shaft, face the stator windings. The authors show the possibility of using laser measurement and vibration analysis of high voltage transformer and the resonant frequencies of electrical equipment. based on the examples of laser vibrometers diagnostics of machines you can say that is a new and significantly expanding opportunities for diagnostic tool technical evaluation of electrical equipment.

#### **1. Wstęp**

Referat ma na celu pokazanie możliwości efektywnego zastosowania wibrometru laserowego do diagnostyki eksploatacyjnej napędów maszyn elektrycznych. Służący do pomiaru drgań wibrometr laserowy VH-1000 jest jednym z nielicznych tego typu urządzeń w Polsce i wnosi nową jakość i możliwości w pomiarach drgań i diagnostyce maszyn.

Zasada działania wibrometru laserowego opiera się na porównaniu wiązki lasera odbitej od badanego obiektu i docierającej do fotodetektora ze znanym sygnałem referencyjnym. Porównanie to jest możliwe dzięki zastosowaniu zjawiska Dopplera, które polega na zmianie częstotliwości fali wywołanej ruchem źródła fali lub odbiornika. Inaczej mówiąc częstotliwość fali rośnie (barwa światła przesuwana się w kierunku fioletu) przy wzajemnym zbliżaniu się źródła i odbiornika, a maleje (barwa światła przesuwana się w kierunku czerwieni) podczas oddalania się źródła fali i odbiornika. Sygnał wyjściowy z przetwornika laserowego jest proporcjonalny do prędkości drgań badanego obiektu. Wibrometr laserowy zapewnia pomiar bezdotykowy drgań, dzięki czemu eliminuje się zakłócenia

spowodowane masą czujników pomiarowych, a także niską lub wysoką temperaturą punktu pomiarowego.



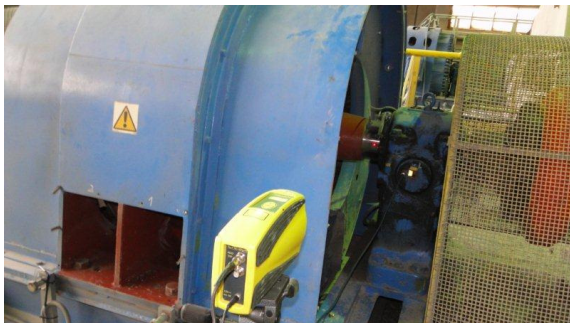
*Rys. 1. Widok wibrometru laserowego*

Poza tym pomiar może być realizowany z dużej odległości. Jako przetwornik drgań może współpracować z dowolnym analizatorem drgań o wejściu bezpośrednim w celu rejestracji i analizy mierzonego sygnału. Wyróżnia się szerokim pasmem częstotliwościowym, pozwalającym na analizę drgań od częstotliwości bli-

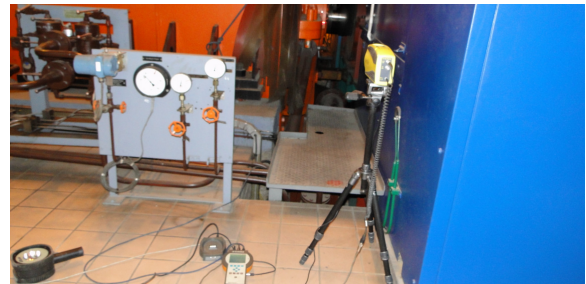
skich zera, co daje możliwość diagnozowania maszyn o niskiej prędkości obrotowej wirnika. Bezdotkowy pomiar drgań umożliwia bezpośredni pomiar drgań wałów maszyn, co wnosi nową jakość w możliwościach diagnozowania maszyn wirnikowych. Autorzy przedstawiają wykorzystanie wibrometru laserowego w diagnostyce silników niskoobrotowych. Pokazano również zastosowanie wibrometru laserowego do diagnostyki silników przy wykorzystaniu bezpośrednich pomiarów drgań wału i np. czoła uzwojeń stojana. Autorzy pokazują możliwość zastosowania lasera do pomiarów i analizy drgań transformatorów linii wysokiego napięcia i częstotliwości rezonansowych elementów urządzeń elektrycznych.

## 2. Diagnostyka napędów maszyn przy wykorzystaniu bezpośrednich pomiarów drgań wału

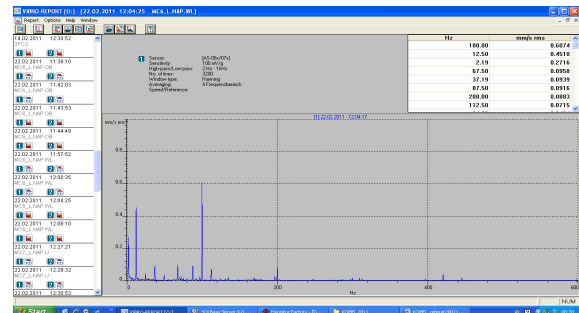
W diagnostyce eksploatacyjnej często spotykamy zespoły maszyn z łożyskami ślizgowymi. Ponieważ głównym źródłem drgań maszyny wirnikowej są siły dynamiczne związane z ruchem obrotowym wirnika, to powinny być przede wszystkim mierzone drgania samego wirnika. W przypadku łożysk ślizgowych warstwa oleju tłumi w znaczny sposób sygnał drganiowy wirnika i jego drgania i ich zmiany mogą być kilkakrotnie większe od drgań obudów łożysk. Wał w łożyskach ślizgowych przemieszcza się w obrębie luzu promieniowego w panewce. Dlatego dla skutecznego monitorowania napędów z łożyskami ślizgowymi konieczne jest uzupełnienie badań o pomiar drgań wałów. Jeżeli napęd jest wyposażony w łożyska toczne, a maszyna napędzana w łożyska ślizgowe, to nie można jakościowo porównywać poziomu drgań obudów łożysk tych maszyn ze względu na tłumienie drgań w łożyskach ślizgowych.



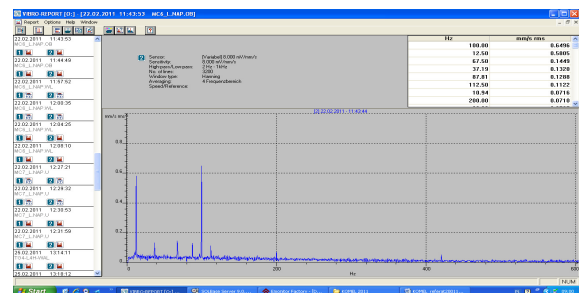
Rys. 2. Bezdotkowy pomiar drgań wału napędu młyna (SYUe-148r/01, 1000kW)



Rys. 3. Bezdotkowy pomiar drgań wału generatora GTHW-360

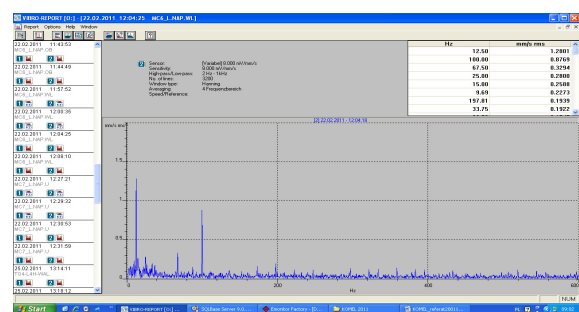


Rys. 4. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych obudowy kozła łożyskowego napędu młyna (przetwornik piezoelektryczny)



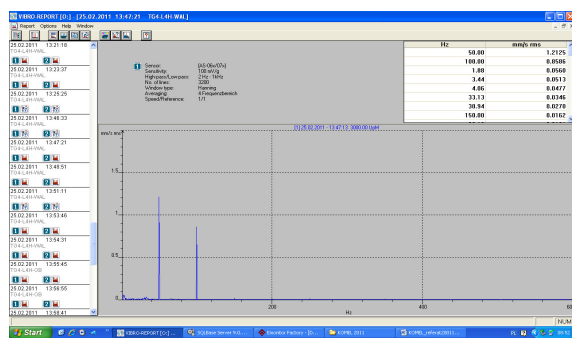
Rys. 5. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych obudowy kozła łożyskowego napędu młyna (wibrometr laserowy)

W widmie częstotliwości drgań uzyskanym przy pomocy wibrometru laserowego nie ma niepożądanych składowych niskoczęstotliwościowych wynikających z nieliniowej charakterystyki w tym przedziale częstotliwości i całkowania przez układ pomiarowy.

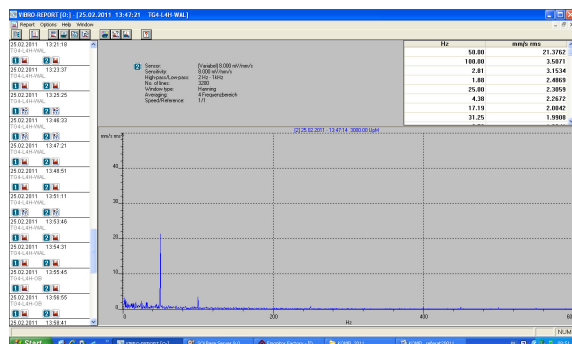


Rys. 6. Widmo częstotliwości drgań wału napędu młyna (wibrometr laserowy)

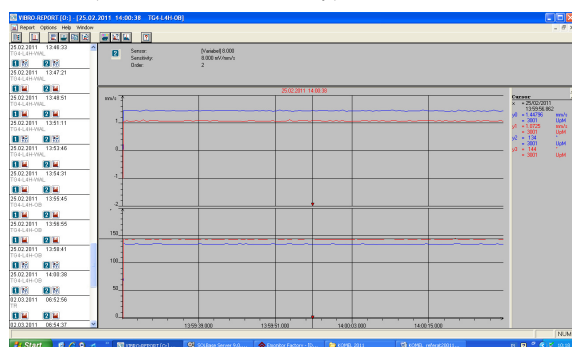
Ponieważ zasada działania wibrometru laserowego opiera się na porównaniu wiązki lasera odbitej od badanego obiektu i docierającej do fotodetektora i opiera się na zjawisku Dopplera, powierzchnia wału (ścieżka pomiarowa) powinna być dostatecznie przygotowana. Należy usunąć z powierzchni pomiarowej wału chropowatość, wklęsłości i wypukłości. Ponadto powierzchnia wału powinna odbijać promień laserowy, a nie rozpraszać go. Jest to zdecydowana wada tej techniki pomiarowej, ale innej techniki nie wymagającej przygotowania ścieżki pomiarowej na wale niestety jak do tej pory nie ma.



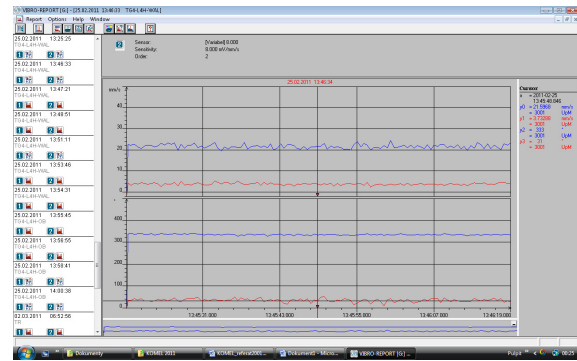
Rys. 7. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych tarczy łożyskowej generatora (przetwornik piezoelektryczny)



Rys. 8. Widmo częstotliwości drgań wału generatora (wibrometr laserowy)



Rys. 9. Kąt fazowy 1-szej i 2-giej harmonicznej tarczy łożyskowej generatora (wibrometr laserowy)



Rys. 10. Kąt fazowy 1-szej i 2-giej harmonicznej wału generatora (wibrometr laserowy)

Technika laserowa do pomiaru drgań umożliwia wyznaczenie przesunięcia fazowego między wektorem drgań wału, a tarczą łożyskową lub kołem łożyskowym

### 3. Diagnostyka drganiowa stanu dynamicznego niskoobrotowych silników

W tradycyjnych technikach pomiaru drgań maszyn wykorzystywane są przetworniki piezoelektryczne (akcelerometry). Zastosowanie tego rodzaju przetworników wymaga ich bezpośredniego mocowania do badanych elementów maszyny. W wielu przypadkach nie jest to możliwe ze względu na warunki pracy badanych struktur lub z uwagi na ograniczenia techniczno-konstrukcyjne i eksploatacyjne. Innym powodem są niskoczęstotliwościowe drgania często spotykane w niskoobrotowych silnikach. Ich pomiar za pomocą standardowych akcelerometrów, ze względu na niskie pasmo częstotliwości jest trudny, a często wręcz niemożliwy. Stwarza to konieczność wykorzystania innych narzędzi pomiarowych opartych o bezdotykowe metody realizacji pomiaru. W takich przypadkach laserowe techniki pomiarowe, jako bezdotykowe spełniają swoje zadanie.

Wady tradycyjnych przetworników piezoelektrycznych:

- duża wartość impedancji wyjściowej,
- konieczność stosowania specjalnych przedwzmacniaczy dopasowujących,
- w przypadku pomiarów prędkości i przemieszczenia drgań konieczne jest stosowanie układów całkujących, co zniekształca widmo częstotliwości szczególnie w zakresie niskich częstotliwości,
- dolna granica zakresu dynamiki przetwornika ograniczona jest do poziomu szumów

własnych współpracującego z nim wzmacniacza,

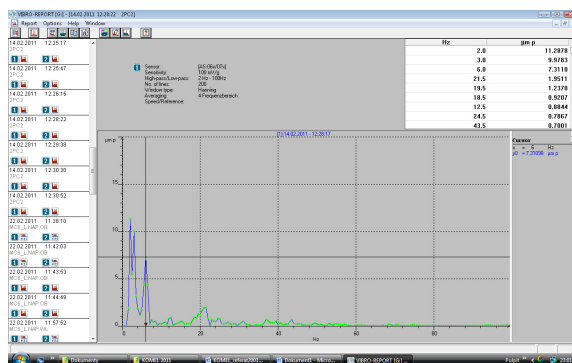
- pasmo przenoszenia przetwornika zależy między innymi od sposobu jego zamocowania.

Wibrometr laserowy Ometron VH-1000-D zapewnia bezstykowy pomiar drgań w zakresie częstotliwości od 0, 5 Hz do 22 kHz.

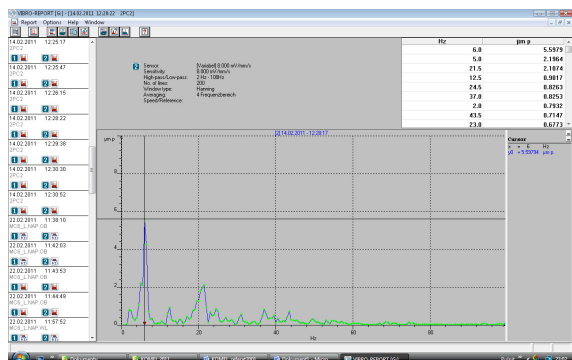
Dla porównania wykonano pomiary drgań na napędach pomp wody chłodzącej o prędkości obrotowej 3650obr/min, gdzie były problemy z rejestracją wiarygodnego widma częstotliwości drgań w czasie eksploatacji zespołu.



Rys. 11. Bezdotkowy pomiar drgań silników pomp wody chłodzącej (SBJVe-1716r, 2000 kW)



Rys. 12. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych tarczy łożyskowej silnika pompy wody chłodzącej (przetwornik piezoelektryczny)



Rys. 13. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych tarczy łożyskowej silnika pompy wody chłodzącej (wibrometr laserowy)

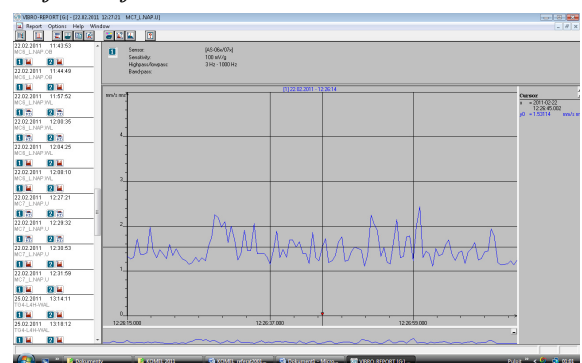
Porównując widma zarejestrowane kolejno z przetwornika piezoelektrycznego i wibrometru laserowego wyraźnie widzimy niskoczęstotliwościowe składowe wynikające z szumów własnych wzmacniacza i błędów wynikających z całkowania.

#### 4. Pomiary i analiza drgań czoła uzwojeń stojana silnika

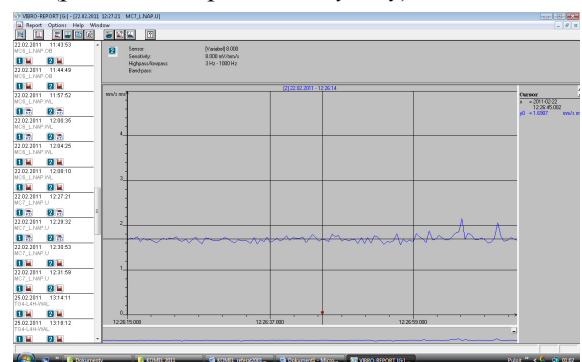
Laserowa technika pomiarów drgań umożliwia pomiar i analizę drgań uzwojeń i rdzenia stojanów silników. W tym przypadku konieczny jest otwór w korpusie stojan umożliwiający przelot wiązki do zadanego punktu pomiarowego.



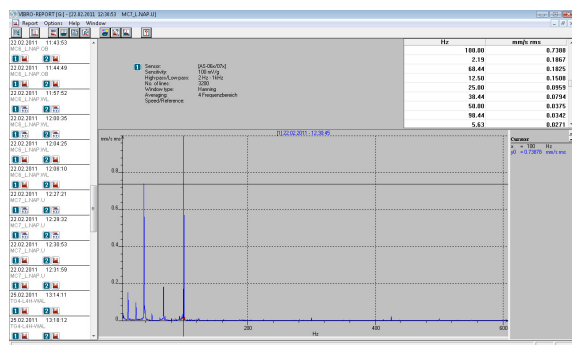
Rys. 14. Bezdotkowy pomiar drgań czoła uzwojeń stojana SYUe-148r/01, 1000kW



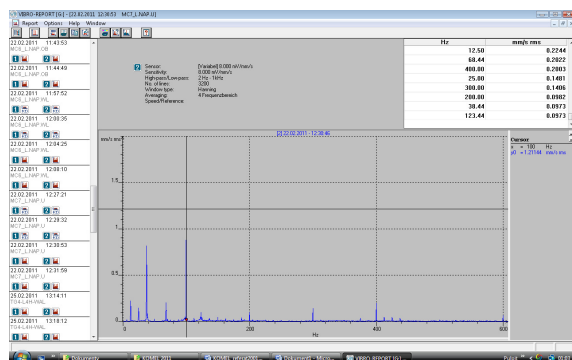
Rys. 15. Poziom drgań korpusu stojana w czasie (przetwornik piezoelektryczny)



Rys. 16. Poziom drgań czoła uzwojeń stojana w czasie (wibrometr laserowy)



Rys. 17. Widmo częstotliwości drgań bezwzględnych korpusu stojana w kierunku posiowym (przetwornik piezoelektryczny)



Rys. 18. Widmo częstotliwości drgań czoła uzwojeń stojana (wibrometr laserowy)

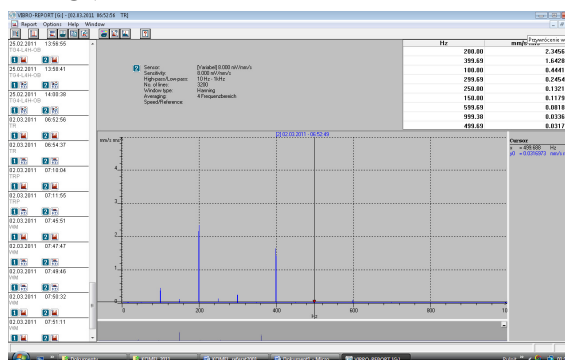
Drgania maszyn elektrycznych mają nie tylko podłoże mechaniczne, ale także są wynikiem przyczyn natury elektromagnetycznej. Wszystkie przyczyny drgań natury elektromagnetycznej można wyeliminować po wyłączeniu zasilania. W przypadku wysokiej temperatury lub zwarcia w stojanie uzwojenie stojana drga w płaszczyźnie promieniowej lub osiowej i w widmie drgań występuje składowa o częstotliwości  $2xf$  sieci. Poziom drgań zwiększa się wraz z nagrzewaniem silnika. Wiele informacji istotnych o stanie uzwojenia i rdzenia stojana można uzyskać realizując pomiary drgań czoła uzwojeń stojana i rdzenia silnika w czasie jego rozruchu.

## 5. Pomiary i analiza drgań transformatora dużej mocy

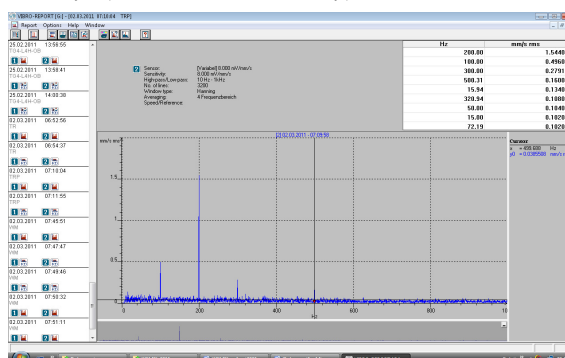
Diagnostyka drganiowa transformatorów dużej mocy jest utrudniona ze względu na ograniczenia wynikające z bezpieczeństwem obsługi. Teren jest ogrodzony i wejście wymaga szeregu formalnych zabiegów. Wibrometr laserowy pozwala szybko i w sposób bezpieczny wykonać badania.



Rys. 19. Widok transformatora dużej mocy (blokowego)



Rys. 20. Widmo częstotliwości drgań rdzenia transformatora blokowego, kierunek pomiaru boczny (wibrometr laserowy)



Rys. 21. Widmo częstotliwości drgań rdzenia transformatora blokowego, kierunek z przodu (wibrometr laserowy)

Stosując technikę wibrometrii laserowej można przede wszystkim ocenić stan techniczny rdzenia transformatora. Składowe drgań do 500 Hz są traktowane jako składowe pochodzące i charakteryzujące drgania magnetostrykcyjne rdzenia. Składowe w przedziale od 500 Hz do 1500 Hz charakteryzują pracę urządzeń chłodzących, natomiast składowe w pasmie powyżej 1500 Hz są generowane i charakteryzują pracę rdzenia badanego transformatora.

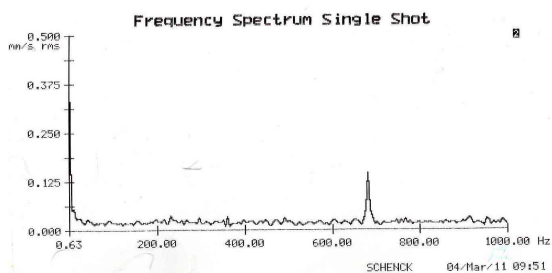
## 6. Pomiary drgań częstotliwości rezonansowych elementów maszyn

Technika wibrometrii laserowej może mieć szczególne zastosowanie w wyznaczaniu częstotliwości drgań własnych elementów maszyn. Bezdotykowy pomiar nie wnosi dodatkowej masy do badanego obiektu i nie zakłóca samego pomiaru.

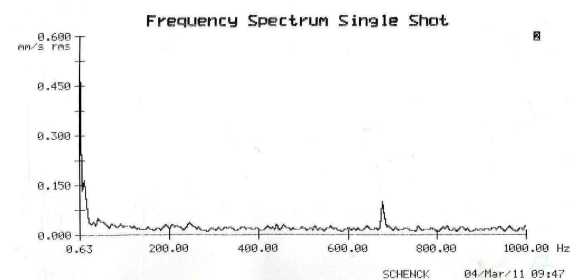
Dzięki bezdotykowej metodzie pomiarowej można rejestrować częstotliwości rezonansowe różnego rodzaju przetworników.



Rys. 22. Pobudzenie do drgań silnika w warunkach laboratoryjnych i rejestracja odpowiedzi układu przy pomocy wibrometru laserowego



Rys. 23. Odpowiedź układu na pobudzenie młotkiem silnika (683,2 Hz)



Rys. 24. Odpowiedź układu na pobudzenie młotkiem silnika z zamontowanym przez wkręcenie przetwornika (679,42 Hz)

Porównując obydwie odpowiedzi układu wyraźnie widać wpływ masy przetwornika na zmianę częstotliwości własnej układu silnikostolik.

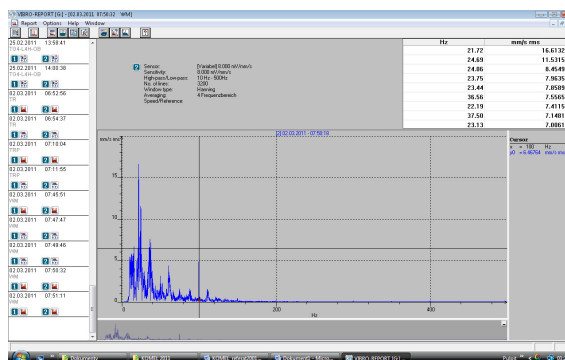
## 7. Inne możliwości zastosowań wibrometrii laserowej

a) Pomiary i analiza drgań szyn wyprowadzenia mocy bloku energetycznego

Szyny wyprowadzenia mocy bloku energetycznego podobnie jak transformatory są ze względów bezpieczeństwa odizolowane od otoczenia (22 kV). Szyny te są osłonięte aluminiowymi rurami i odizolowane od osłony izolatorami.



Rys. 25. Widok szyny wyprowadzenia mocy osłoniętej aluminiową rurą



Rys. 26. Widmo częstotliwości drgań osłony szyny wyprowadzenia mocy bloku (wibrometr laserowy)

Autorzy z przyczyn technicznych zarejestrowali tylko widmo częstotliwości drgań osłony szyny. Do pomiaru samej szyny wystarczy wykonać mały otwór w osłonie umożliwiającą przelot i odbicie wiązki laserowej.

b) Diagnostyka izolatorów linii wysokiego napięcia

Linia napowietrzna wykonana jest tak, że przewody gołe umocowane są na słupach lub specjalnych konstrukcjach. Mocowanie przewodów odbywa się za pomocą izolatorów, których zadaniem jest izolowanie przewodów od słupa. Drgania przewodów linii napowietrznych o niskiej częstotliwości i dużej amplitudzie są wibracjami wywołanymi przez wiatr. Występują zarówno na pojedynczych przewodach jak

i na wiązkach przewodów, w postaci jednej lub kilku pętli fal stojących na rozpiętości złącza. Częstotliwość drgań obejmuje zakres od 0,1 Hz do 1 Hz. Zastosowanie wibrometru laserowego do kontroli tych drgań jest jak najbardziej celowe.



Rys. 27. Widok linii wysokiego napięcia

#### c) Diagnostyka wału maszyn

Należy się zastanowić nad możliwością wykorzystania dwóch wibrometrów laserowych do wykrywania drgań giętnych czy skrętnych wału i bezpośredniego wykrywania jego ugięcia.

### 8. Zakończenie

Autorzy przedstawili możliwości zastosowania technik wibrometrii laserowej w diagnostyce eksploatacyjnej maszyn i napędów elektrycznych w warunkach przemysłowych.

Szybki rozwój techniki spowodował, że obecnie istnieją zaawansowane systemy wibrometrii laserowej, umożliwiające skanowanie obiektów i prezentację przestrzenną nie tylko elementów nieruchomych maszyn, ale także elementów ruchomych, takich jak wały, czy wirniki.

Na podstawie przedstawionych przykładów zastosowania wibrometru laserowego w diagnostyce maszyn można powiedzieć, że jest nowym i rozszerzającym znacznie możliwości diagnostyczne narzędziem do oceny technicznej urządzeń elektrycznych.

### 9. Literatura

- [1]. Dwojak J. *Pomiary profilaktyczne i diagnostyczne silników napędu potrzeb własnych w Elektrowni OPOLE*. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 2 – 1996.
- [2]. Dwojak J.: *Monitorowanie drgań względnych wałów podstawą oceny stanu dynamicznego turbozespołów i innych maszyn z łożyskami ślizgowymi*. Nadzór i diagnostyka maszyn. Nr 5 – 1995.

[3]. Dwojak J.: *Diagnostyka napędów potrzeb własnych – zagadnienia wybrane*. Zeszyty Naukowe Politechniki Opolskiej. Z. 61. Nr 326/2008.

[4]. Dwojak J., Ławrowski Z., Sikora G.: *Diagnostyka drganiowa maszyn na przykładzie zapobieżenia awarii silnika turbosprężarki*. Wiadomości Elektrotechniczne 2005 nr 4.

[5]. Dwojak J., Rzepiela M.: *Diagnostyka drganiowa generatora na podstawie własnych doświadczeń*. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 4 – 2000.

[6]. Dwojak J., Rzepiela M.: *Diagnostyka drganiowa stanu maszyn i urządzeń*. Wydanie II. Biuro Gamma. Warszawa 2005.

[7]. Dwojak J., Struzik I.; *Diagnostyka eksploatacyjna silników elektrycznych na podstawie własnych doświadczeń*. Branżowy Ośrodek Badawczo – Rozwojowy Maszyn Elektrycznych KOMEL. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 85/2010.

[8]. Kaźmierczak A., Krakowian K., Wróbel R.; *Dopplerowska wibrometria laserowa w diagnostyce silnika spalinowego*. Przegląd Elektrotechniczny, 10/2010.

[9]. Pajor M., Okulik T., Hoffmann M., Parus A.: *Pomiar drgań elementów korpusowych frezarki wspornikowej FYN 50 z wykorzystaniem lasera skanującego 3D*. Modelowanie Inżynierskie ISSN 1896-771x 33, s. 119-124, Instytut Technologii Mechanicznej, Politechnika Szczecińska Gliwice 2007.

[10]. Skubis J, Jezierski G, Dwojak J, Rzepiela M.: *Pomiary drgań transformatora dużej mocy*. Wiadomości Elektrotechniczne Nr 4 – 2000.

[11]. Szymaniec S.: „Ścieżki pomiarowe” do pomiaru drgań względnych w maszynach elektrycznych. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 81/2009, Politechnika Opolska, Opole.

[12]. Podhajecki J., Szymaniec S.; *Wyznaczenie drgań własnych stojana silnika indukcyjnego*. Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne Nr 87/2010, Politechnika Opolska, Opole.

[13]. User Manual. Portable Vibrometer VH-1000-D.

### Strony internetowe

1. <http://kmk.portal.prz.edu.pl/badania-i-analiza-konstrukcji/ciekawostki/>
2. <http://www.ist-world.org/ProjectDetails.aspx?ProjectId=cd04df56c84449b68cfdca0f7cb8b108>
3. <http://www.ometron.com/>

### Autorzy

mgr inż. Józef Dwojak i mgr inż. Marek Rzepiela są specjalistami ds. diagnostyki, mgr inż. Ireneusz Struzik jest Kierownikiem Wydziału Kontroli Jakości i Diagnostyki PGE Elektrowni OPOLE SA