

Piotr Kowalski

**Wyniki badań
drgań mechanicznych
w środowisku pracy
przy wykorzystaniu
kamery szybkoeklatkowej**



Materiały informacyjne CIOP-PIB

Wyniki badań drgań mechanicznych w środowisku pracy przy wykorzystaniu kamery szybkoobrotowej

Opracowano na podstawie wyników IV etapu programu wieloletniego „Poprawa bezpieczeństwa i warunków pracy”, sfinansowanego w latach 2017-2019 w zakresie zadań służb państwowych przez Ministerstwo Rodziny, Pracy i Polityki Społecznej.

Koordinator programu: Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy

Projekt III.N.02: Wielopunktowa identyfikacja narażenia pracownika na drgania działające w sposób ogólny i przez kończyny górne na podstawie analizy ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/narzędzi

Autor:

dr inż. Piotr Kowalski – Centralny Instytut Ochrony Pracy – Państwowy Instytut Badawczy, Zakład Zagrożeń Wibroakustycznych

Zdjęcie na okładce: źródło autorskie

© Copyright by
Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy
Warszawa 2019

CIOP  **PIB**

Centralny Instytut Ochrony Pracy
– Państwowy Instytut Badawczy
ul. Czerniakowska 16, 00-701 Warszawa
tel. (48-22) 623 36 98, www.ciop.pl

Wprowadzenie

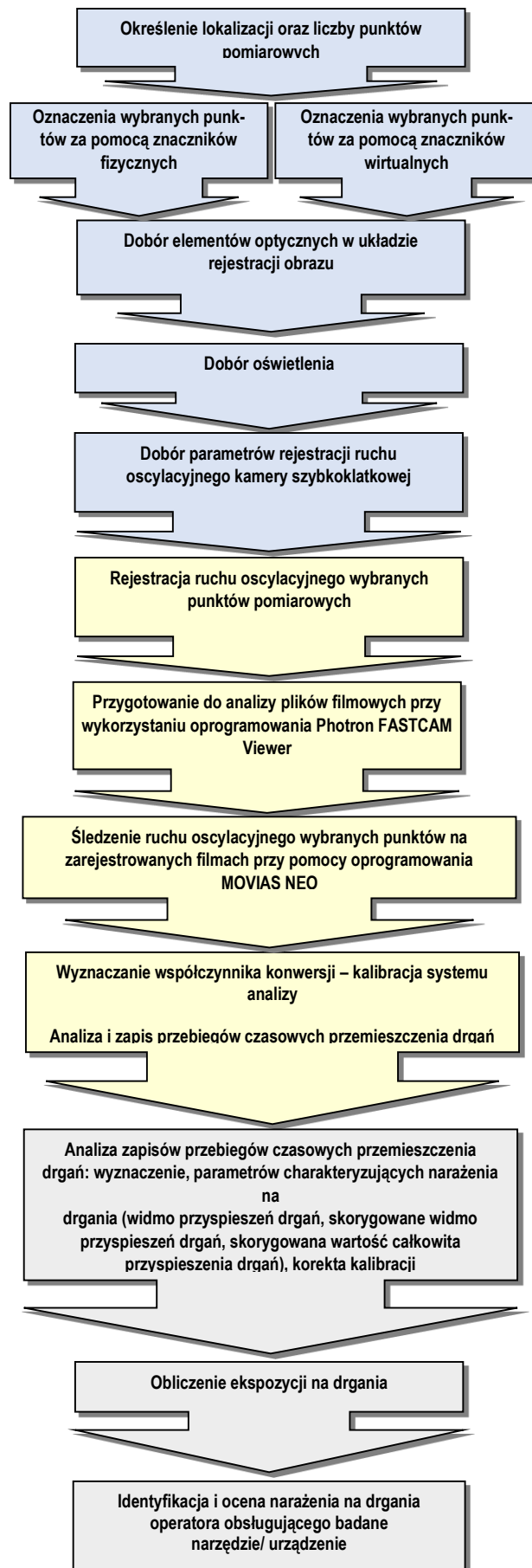
W zapobieganiu negatywnym skutkom oddziaływania drgań na organizm pracownika bardzo dużą rolę odgrywa prawidłowa identyfikacja i ocena narażenia. Na wielu stanowiskach pracy, na których występuje narażenie na drgania mechaniczne, zastosowanie standardowych metod pomiaru opartych na wykorzystaniu przetworników drgań jest często utrudnione lub niemożliwe. W niektórych sytuacjach zamocowanie przetworników drgań wymusza zmianę sposobu obsługi urządzenia. Warunki pracy zarówno operatora, jak i samego urządzenia odbiegają wtedy od rzeczywistych. Może to znacznie zniekształcać wynik pomiaru oraz przeprowadzoną na tej podstawie ocenę narażenia. Ocena drgań mechanicznych przeprowadzona w oparciu o rejestrację obrazu ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/urządzeń bez wykorzystania klasycznych przetworników drgań może być skutecznym rozwiązaniem wymienionych problemów. Zastosowanie szybkiej kamery (kamery szybkoeklatkowej; fot. 1.), w różnych dziedzinach nauki, pokazuje potencjalne możliwości jej wykorzystania także w dziedzinie ochrony człowieka przed drganiami w środowisku pracy.



Fot. 1. Szybkoeklatkowa kamera FASTCAM SA1.1. firmy Photron [źródło własne]

Metoda badawcza

Na podstawie przeprowadzonych testów kamery szybkoeklatkowej, elementów optycznych (obiektywów, telekonwerterów, pierścieni pośrednich), źródeł światła ciągłego oraz badań wstępnych w CIOP-PIB została opracowana metoda identyfikacji narażenia pracownika na drgania działające w środowisku pracy na podstawie analizy ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/narzędzi. Algorytm metody jest przedstawiony na poniższym schemacie (rys. 1.).



Rys. 1. Algorytm metody identyfikacji narażenia pracownika na drgania działające w środowisku pracy na podstawie analizy ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/narzędzi

Algorytm realizowany jest w 3 kolejnych fazach:

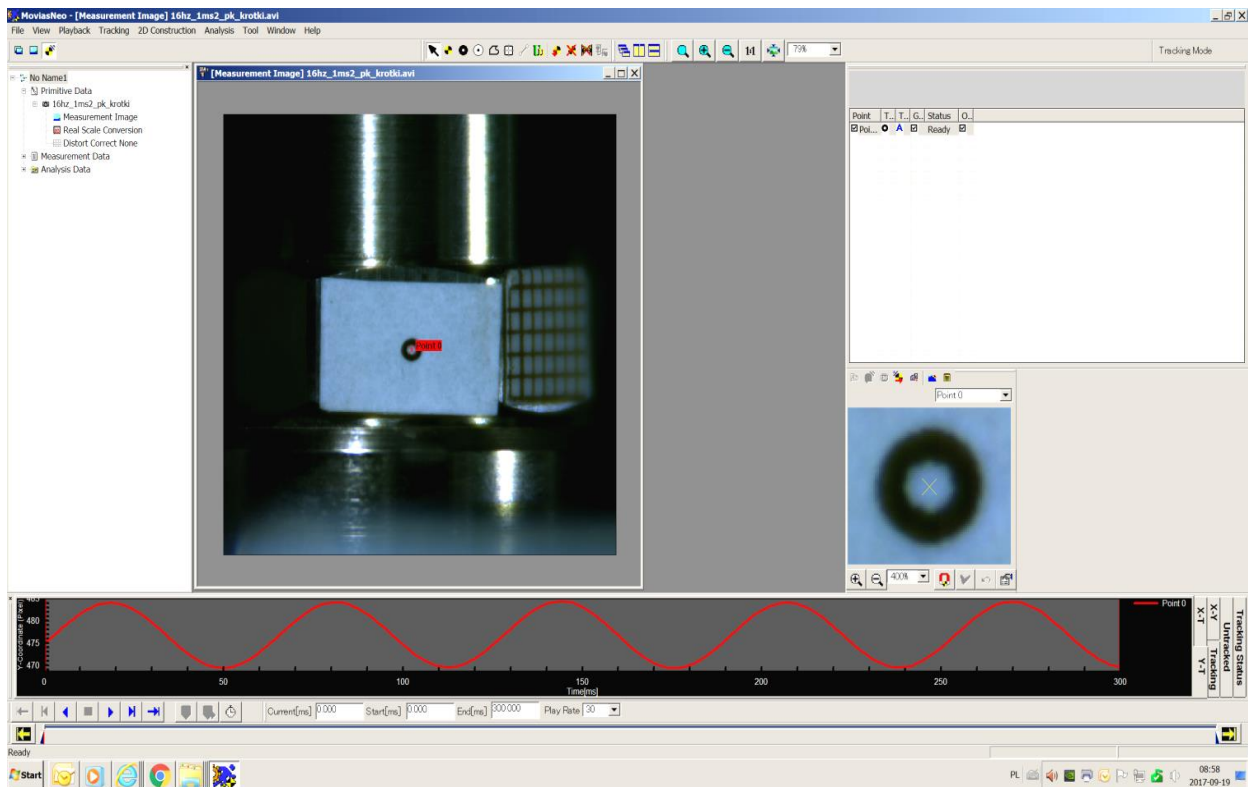
- Pierwsza faza (bloki w kolorze niebieskim na schemacie algorytmu) obejmuje określenie warunków badań takich jak lokalizacja, liczba punktów pomiarowych i wybór rodzaju znacznika (fizycznego lub wirtualnego; fot. 2.). Ze względu na dokładność pomiarów lepsze wyniki przy późniejszym śledzeniu punktów ruchu pomiarowych otrzymywane są wtedy, gdy wybrany jest znacznik fizyczny.



Fot. 2. Lokalizacja i oznaczenie punktu pomiarowego [źródło własne]

W pierwszej fazie wykonywane są także czynności przygotowawcze do rejestracji obrazu takie jak dobór parametrów rejestracji (prędkość zapisu – liczba klatek/s uzależniona od zakresu częstotliwości analizowanych drgań, rozdzielczość, czas otwarcia migawki, długość czasu rejestracji) oraz elementów optycznych współpracujących z kamerą. Dobór ogniskowej obiektywu czy decyzja o zastosowaniu telekonwerterów lub/i pierścieni pośrednich uzależnione są przede wszystkim od odległości kamery od poruszającego się obiektu. Pośrednio z zastosowanym zestawem optycznym, a także dobranymi parametrami rejestracji związany jest dobór oświetlenia, które stanowi równie ważny element podczas rejestracji obrazu. Przy zastosowaniu obiektywów z długimi ogniskowymi i zapisie z dużymi prędkościami konieczne jest zastosowanie bardzo silnych źródeł światła ciągłego.

- W drugiej fazie algorytmu są realizowane rejestracja obrazu ruchu oscylacyjnego i przygotowanie danych do analizy (bloki w kolorze żółtym na schemacie algorytmu). Obejmuje ona zapis zarejestrowanych obrazów wideo np. za pomocą oprogramowania Photron FASTCAM Viewer w formacie umożliwiającym późniejszą analizę oraz śledzenie ruchu oscylacyjnego wybranych punktów pomiarowych za pomocą oprogramowania MoviasNeo 2D v. 2.54. (fot. 3.).



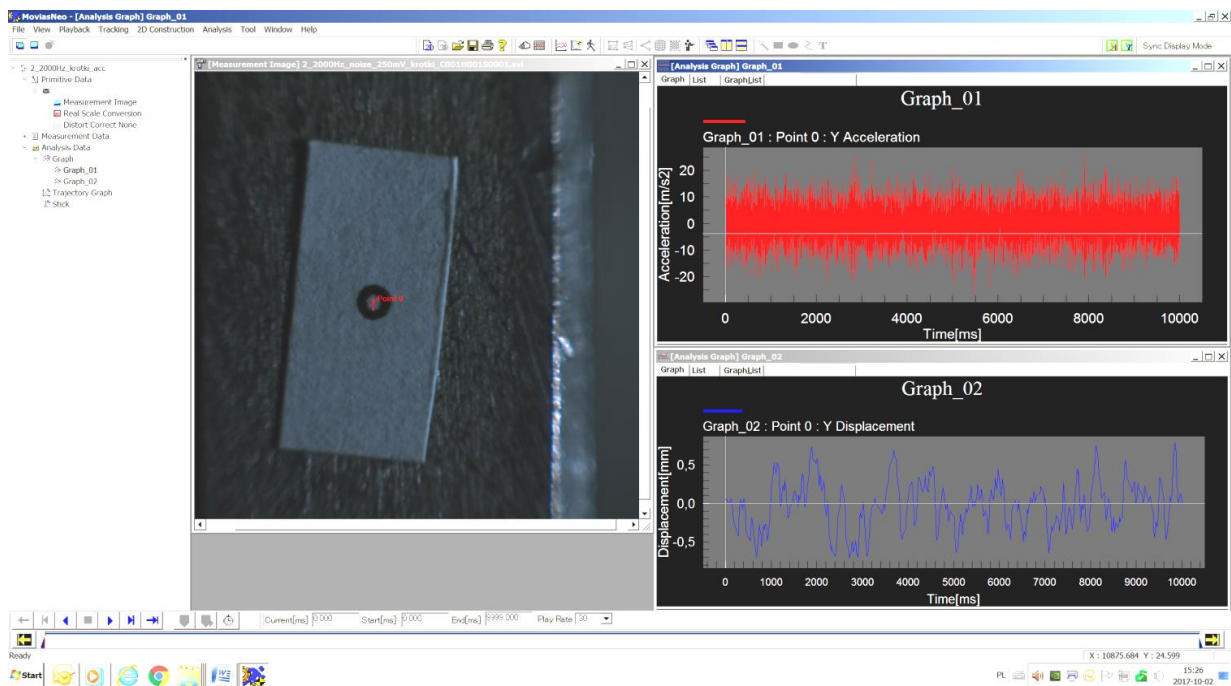
Fot. 3. Przykładowe okno oprogramowania podczas śledzenia punktu pomiarowego [źródło: fot. powstała przy wykorzystaniu oprogramowania MoviasNeo 2D v. 2.54.]

Podczas śledzenia ruchu punktów pomiarowych największą dokładność uzyskiwano przy zastosowaniu do interpolacji metody funkcji sklepanych (ang. *spline*). W tej metodzie współczynniki wielomianów interpolujących są wyznaczone w taki sposób, aby w punktach zapewnić ciągłość nie tylko funkcji interpolującej, ale także jej pochodnych. Ma to znaczenie przy późniejszym dwukrotnym różniczkowaniu uzyskanego przebiegu czasowego przemieszczenia punktu pomiarowego. Wartość współczynnika korelacji nie powinna być mniejsza niż 0,95 w czasie całej operacji śledzenia ruchu punktów pomiarowych. Najlepsze wyniki śledzenia (szczególnie przy sygnałach szybkozmiennych) uzyskiwano przy ograniczeniu liczby punktów predykcji do 1.

Druga faza algorytmu obejmuje także dobranie odpowiedniej wartości współczynnika konwersji, co jest odpowiednikiem kalibracji klasycznego układu pomiarowego za pomocą źródła wzorcowego. Wartość współczynnika konwersji ma bezpośredni wpływ na wyniki analiz ilościowych.

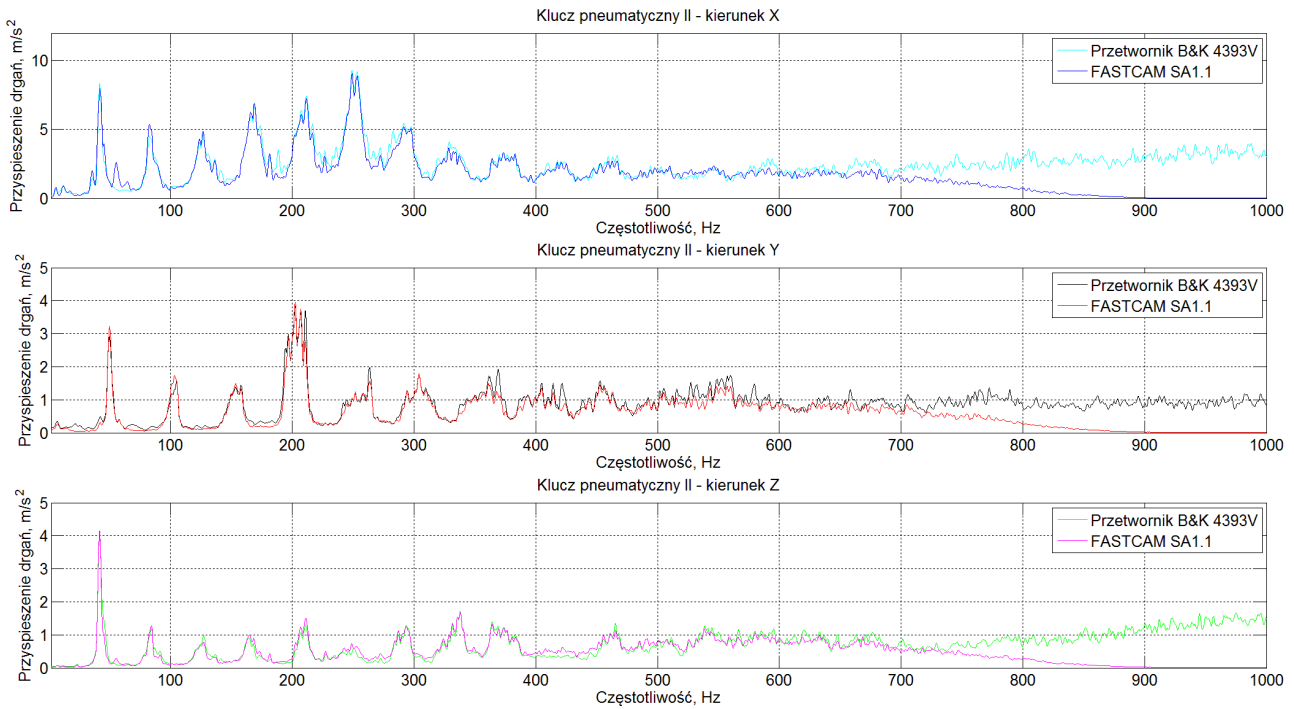
- Trzecia faza realizacji algorytmu metody (bloki w kolorze zielonym na schemacie algorytmu) zawiera analizy danych i obliczenia.

Poprzez dwukrotne różniczkowanie przebiegów czasowych przemieszczenia drgań, przy zastosowaniu filtrów CFC, uzyskiwane są przebiegi czasowe przyspieszenia drgań (fot. 4.).



Fot. 4. Przykładowe okno oprogramowania podczas wyznaczania przebiegów czasowych przemieszczenia i przyspieszenia drgań [źródło: fot. powstała przy wykorzystaniu oprogramowania MoviasNeo 2D v. 2.54.]

Na ich podstawie wyznaczane są nieskorygowane i skorygowane widma przyspieszeń drgań (rys. 2.), a także dokonywana jest korekta kalibracji uwzględniająca wartości odniesienia wzorcowego źródła drgań. Skorygowane widmo przyspieszeń drgań jest wykorzystywane do obliczenia całkowych wartości przyspieszenia drgań.



Rys. 2. Przykładowe widma przyspieszeń drgań uzyskane na podstawie analizy obrazu ruchu oscylacyjnego i przy wykorzystaniu klasycznego układu pomiarowego [źródło: rys. powstał przy wykorzystaniu środowiska MATLAB]

Analizy i obliczenia powtarzane są dla każdego kierunku pomiarowego X, Y, Z, a następnie po uwzględnieniu czasu narażenia jest wyznaczana dzienna (lub krótkotrwała) ekspozycja na drgania. Na jej podstawie przeprowadzana jest identyfikacja i ocena narażenia na drgania operatora obsługującego badane narzędzie/ urządzenie.

Badania narażenia na drgania opracowaną metodą

Do badań zostało wybranych 10 narzędzi ręcznych generujących drgania zróżnicowane pod względem charakteru, działające przez kończyny górne (fot. 5.) oraz 3 przykładowe urządzenia generujące drgania ogólne o różnym sposobie oddziaływania na operatora (fot. 6.). Rejestracji sygnałów drganiowych dokonano podczas wykonywania typowych operacji lub ich symulacji. Aby zweryfikować otrzymywane wyniki badań za pomocą kamery szybkołatkowej, równoległe przeprowadzono badania metodą standardową przy wykorzystaniu klasycznych piezoelektrycznych przetworników drgań i systemu analizy B&K PULSE.

W tabeli 1. zostały zamieszczone wyniki identyfikacji narażenia na drgania uzyskane na podstawie badań opracowaną metodą i badań metodą znormalizowaną.



Fot. 5. Narzędzia ręczne wybrane do badań [źródło własne]



Platforma pomiarowa CIOP-PIB



Miniciągnik Stiga Park Pro 16

Fot. 6. Wybrane do badań urządzenia generujące drgania ogólne [źródło własne]

Tabela.1. Wyniki identyfikacji narażenia na drgania generowane przez badane narzędzia i urządzenia

Obiekt pomiaru	Dzienna ekspozycja na drgania A(8), m/s ²		Krotność przekroczenia wartości dopuszczalnej		Narażenie	
	Pulse	Kamera	Pulse	Kamera	Pulse	Kamera
Klucz pneumatyczny I	4,88	4,86	1,74	1,74	duże	duże
Klucz pneumatyczny II	4,72	4,77	1,69	1,70	duże	duże
Kosa spalinowa Kawasaki TH34	5,08	4,92	1,82	1,76	duże	duże
Nożyce elektryczne Hecht 655	4,09	4,05	1,46	1,45	duże	duże
Pilarka elektryczna FPCS1800A	2,21	2,34	0,79	0,84	średnie	średnie
Pilarka spalinowa Stihl 025	15,30	16,11	5,46	5,75	duże	duże
Piła do tworzyw Bosch GSG 300	1,70	1,61	0,61	0,57	średnie	średnie
Szlifierka oscylacyjna CMI C-SS 200	5,08	5,08	1,82	1,82	duże	duże
Wkrętarka akumulatorowa Makita DF347D	3,16	3,25	1,13	1,16	duże	duże
Wyrzynarka Bosch GST 150BCE	4,89	4,94	1,75	1,77	duże	duże
Dmuchawa spalinowa Stihl BR 450	0,77	0,74	0,96	0,93	średnie	średnie
Miniciągnik Stiga Park Pro 16	0,06	0,06	0,07	0,07	małe	małe
Platforma pomiarowa CIOP	1,78	1,69	2,23	2,11	duże	duże

Podsumowanie, wnioski i spostrzeżenia

Na podstawie otrzymanych wyników można stwierdzić, że została uzyskana pełna zgodność ocen narażenia przeprowadzonych w oparciu o opracowaną metodę identyfikacji oraz przy wykorzystaniu metody znormalizowanej.

- Zastosowane podczas badań wartości parametrów rejestracji obrazu są kompromisem pomiędzy wymaganą częstotliwością próbkowania a czasem pojedynczego zapisu, który powinien zapewnić pobranie reprezentacyjnej próbki sygnału drganiowego. Możliwości wykorzystywanej kamery były ograniczone jej pamięcią o pojemności 32 GB.
- Zarówno wyniki analiz charakterystyk częstotliwościowych, jak i wartości całkowitych przyspieszeń drgań (przeprowadzone w zakresie częstotliwości 1 – 1000Hz dla drgań działających przez kończyny górne oraz w zakresie 1 – 400 Hz dla drgań działających w sposób ogólny) wskazują, że mogą być one wykorzystywane do identyfikacji narażenia na drgania.
- Opracowana metoda identyfikacji narażenia na drgania w środowisku pracy na podstawie obrazu ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/narzędzi pozwala na uzyskiwanie wyników takich samych lub bardzo zbliżonych do tych otrzymywanych metodami znormalizowanymi, co umożliwia jej wykorzystanie na stanowiskach pracy.
- Główną zaletą opracowanej metody jest możliwość pozyskiwania dodatkowych informacji o zjawiskach obserwowanych podczas generacji drgań i ich oddziaływania na pracownika lub inne układy mechaniczne, często bez konieczności ich dalszej identyfikacji, analizy i interpretacji. Dodatkowe dane mogą m.in. zostać wykorzystane bezpośrednio do doboru optymalnych metod i środków redukcji drgań, a także stanowić bazę do projektowania układów mechanicznych i znacznie ograniczyć liczbę koniecznych do przeprowadzenia badań i symulacji. Przykładem takiego wykorzystania metody jest możliwość obserwacji zjawisk kontaktowych np. podczas obsługi narzędzi udarowych na ich rękojeściach prowadzonych/trzymanych ręką przez pracownika, a także możliwość oceny skuteczności rozwiązań antywibracyjnych (układów wibroizolacji, nakładek, rękawic antywibracyjnych). W przypadku środków ochrony rąk możliwe są badania drgań i zjawisk zachodzących w obrębie palców, gdzie do tej pory nie są one wykonywane, mimo że pierwsze objawy zespołu wibracyjnego rozpoczynają się w tej części ręki.

- Metoda identyfikacji drgań oparta na analizie obrazu ruchu oscylacyjnego elementów maszyn/narzędzi pozwala z zarejestrowanego obrazu wybrać interesujące informacje, a w razie potrzeby dane mogą być powtórnie analizowane pod innym kątem, np. identyfikacji elementów, które są w rezonansie i częstotliwości, przy których rezonans wystąpił. Dotyczy to szczególnie mikrostruktur i mikroelementów, których rozmiary uniemożliwiają zastosowanie np. wibrometru laserowego ze względu na zbyt duży rozmiar plamki laserowej.
- Badania prowadzone opracowaną metodą posiadają wszystkie zalety związane z pomiarami bezkontaktowymi. Główne z nich to eliminacja wpływu mocowanych dodatkowych elementów na charakterystykę badanych drgań i na sposób obsługi urządzeń przez operatorów oraz brak zakłóceń związanych z połączeniami kablowymi.
- Wykorzystanie posiadanej kamery szybkoeklatkowej w przedstawionych badaniach było związane z ograniczeniem zakresu częstotliwości badanych drgań do 1000 Hz. W warunkach rzeczywistych oznacza to pogorszenie dokładności pomiarów w zakresie częstotliwości 700 – 1000 Hz. Jednak – jak wykazały dodatkowe badania – wiarygodne wyniki można uzyskać już przy zakresie analizowanych częstotliwości 1 – 600 Hz.
- Ze względu na konieczność dużego powiększania obrazu ruchu oscylacyjnego przy częstotliwościach powyżej 20 – 30 Hz, przy amplitudach rzędu nm , może okazać się niewystarczające użycie klasycznych obiektywów i innych elementów optycznych (telekonwertery, pierścienie pośrednie). Analiza ruchu oscylacyjnego zapisanego w zakresie 2 – 3 pixeli nie ma uzasadnienia merytorycznego.
- Prawidłowa praca kamery wiąże się z zapewnieniem odpowiedniej stabilizacji jej pozycji, co utrudnia jej zastosowanie w ruchu.
- Podobnie jak przy wykorzystaniu wibrometrów laserowych użycie kamery szybkoeklatkowej wymaga dostępności odpowiedniej przestrzeni wokół badanego obiektu, która zazwyczaj musi być większa niż w przypadku klasycznych metod pomiaru drgań.
- Dodatkowym wymogiem do wykonania prawidłowej rejestracji obrazu ruchu za pomocą kamery szybkoeklatkowej jest konieczność zapewnienia dobrego oświetlenia (światłem ciągłym) badanego obiektu.

Dynamiczny rozwój w zakresie technologii produkcji urządzeń do rejestracji obrazu, mikroprocesorów, pamięci komputerowych nowej generacji oraz technik opartych na rozpoznawaniu i analizie obrazu pozwala przewidywać, że występujące podczas realizacji projektu ograniczenia związane m.in. z czasem rejestracji kamerą szybkoklatkową w najbliższej przyszłości przestaną istnieć. Skrócenie czasu analiz obrazu i wprowadzenie doskonalszych metod śledzenia i rozpoznawania obrazu oraz analizy sygnałów zapewni rozwój i możliwość wykorzystania opracowanej metody nie tylko do identyfikacji drgań w środowisku pracy.