

Dariusz Pabian*

PGE GIEK SA Oddział Elektrownia Dolna Odra

Nowy sposób na przedstawienie drgań maszyn - Motion Amplification®

A new way to visualize vibrations - Motion Amplification®

STRESZCZENIE

Motion Amplification® to metoda przetwarzania wideo, która wykrywa najmniejszy ruch i wzmacnia ten ruch do poziomu widocznego gołym okiem. W procesie tym światło jest dekodowane w celu pozyskania informacji wskazującej na ruch, nawet jeśli jest on zbyt mały, aby kamera mogła go wykryć zwykłymi metodami. Proces obejmuje użycie kamery Iris M™. Jest to kamera wideo wysokiej rozdzielczości i wysokiego zakresu dynamiki, w której każdy piksel staje się niezależnym czujnikiem tworzącym miliony punktów danych w jednej chwili. Zasada działania systemu Iris M™ wraz z kluczowymi funkcjami zostanie wyjaśniona na podstawie studium przypadków, w których Iris M™ można wykorzystać np. w kwestiach strukturalnych, montażowych, rozruchowych oraz typowych uszkodzeń maszyn. Inne, często występujące przypadki użycia również zostaną omówione w dalszej części opracowania.

Słowa kluczowe: *amplifikacja ruchu, pomiar wibracji, monitoring drgań, wibrodagnostyka maszyn*

ABSTRACT

Motion Amplification® is a video-processing method that detects subtle motion and amplifies that motion to a level visible to the naked eye. The process decodes the light to pull out the information that is indicative of motion, even if it is too small for the camera to detect with normal methods. The process involves the use of the Iris M™ camera, a high definition and high dynamic range video camera where every pixel becomes an independent sensor creating millions of data points in an instant.

Keywords: *Stainless steel; material fatigue; non-destructive testing*

1. Wstęp

System Iris M™ Motion Amplification® składa się z kamery Iris M™ zdolnej do pracy z prędkością 120 kl./s przy pełnej rozdzielczości klatki i 1300 kl./s oferującej górny zakres częstotliwości odpowiednio 60 Hz i 650 Hz. Kamera jest zasilana z laptopa, który wchodzi w skład zestawu pomiarowego i dzięki temu mamy możliwość akwizycji danych w dowolnym środowisku przemysłowym. Czasy analizy mającej na celu utworzenia filmu ze wzmocnieniem ruchu to w przybliżeniu 10–20 sekund. Dzięki zastosowaniu kamery Iris M™ możemy wyznaczyć wiele parametrów wspierających ocenę stanu urządzenia bądź struktury. Przykładem może być obliczenie przemieszczenia, które można wyznaczyć dla dowolnego miejsca na filmie, po prostu klikając i zaznaczając fragment na ekranie (ROI - Region of interest), na którym ma zostać określony żądany odczyt przemieszczenia. Przebiegi czasowe i widmo częstotliwości są mierzone dla wskazanej lokalizacji zarówno w kierunku osi X, jak i osi Y, patrząc zgodnie z kierunkiem ustawienia kamery. Oprogramowanie oferuje bardziej zaawansowane techniki, takie jak filtrowanie na podstawie częstotliwości. Użytkownik może korzystać z graficznego interfejsu użytkownika (GUI), gdzie na widmie częstotliwości uzyskanym z wideo może filtrować zarejestrowane przemieszczenia w celu uwidocznienia tylko interesujących

operatora częstotliwości drgań obiektu. Iris M™ ma możliwość automatycznej stabilizacji wideo przemieszczenia w przypadku wibracji otoczenia, aby usunąć nadmierne wibracje.

2. Zakres stosowania

Wzmocnienie ruchu ma szeroki zakres zastosowań. Problemy z wibracjami, takie jak niewspółosiowość, niewyważenie i luzy, są częstymi problemami diagnozowanymi za pomocą Motion Amplification®. Inne problemy, takie jak pęknięcia strukturalne, rezonans i miękka stopa, można również łatwo zdiagnozować za pomocą technologii Motion Amplification®. Zastosowanie obejmuje: uszczelnienia mechaniczne, pomiary pras hydraulicznych oraz urządzeń zabezpieczonych transparentnym szkłem bądź pleksi do których nie mamy bezpośredniego dostępu.

Podstawowym pomiarem, jaki wykonuje Motion Amplification®, jest przemieszczenie. Z tego powodu Motion Amplification® doskonale nadaje się do zastosowań o niskiej i bardzo niskiej częstotliwości drgań. Przemieszczenie jest najbardziej wyraźne przy niskiej częstotliwości i maleje wraz ze wzrostem częstotliwości. Wzmocnienie ruchu uzupełnia tradycyjne techniki wibracyjne, które często wykorzystują akcelerometry jako czujnik gromadzenia danych. Akcelerometry są mniej czułe w przedziale niskich częstotliwości i często mają problemy z wykrywaniem błędów w części widma niskiej częstotliwości. Dzięki amplifikacji ruchu możemy zobaczyć przemieszczenia występujące od

*Autor korespondencyjny. E-mail: darek@sensor.pl

częstotliwości rzędu ułamków herców. Aplikacje pracujące z niską prędkością obejmują: piece, turbiny wiatrowe i rezonans niskiej częstotliwości.

Proces akwizycji należy rozpocząć od nagrania całego obiektu, aby uzyskać pełny obraz maszyny. Następnie skoncentrować się na zaobserwowanym problemie i przejść do obserwacji ruchu elementu, który stał się widoczny na nagraniu. Głębsza analiza w danym obszarze może wymagać zgromadzenia danych o szerszym zakresie częstotliwości lub ustawienia kamery pod innym kątem.

System jest również wykorzystywany w fazie projektowania i uruchamiania maszyn. Korzystanie z zestawu pomiarowego Iris M™, na tym etapie eksploatacji instalacji, pozwala użytkownikowi zobaczyć problemy, zanim staną się znaczące lub spowodują problemy wtórne. Rzeczywisty widok ewentualnej niesprawności pozwala zarówno inwestorowi, jak i producentowi OEM na obiektywny pogląd, w razie wystąpienia sytuacji spornych podczas instalacji. Zachowane nagranie zapewnia podstawowy zestaw danych, który uwidacznia zachowanie przedmiotu badań podczas jego pierwszego uruchomienia. Zarejestrowane nagranie można następnie wykorzystać jako punkt odniesienia, przy późniejszej diagnozie stanu maszyny czy instalacji.

Zestaw Iris M™ jest szczególnie przydatny podczas pierwszego uruchomienia instalacji na obiekcie. Za pomocą zestawu Iris M™ diagnosta może szybko przeanalizować stan rozległej instalacji. W jednym nagraniu, za pomocą systemu można wizualizować stan wielu silników lub dużych konstrukcji. Wyjątkową zaletą jest technologii amplifikacji ruchu, jest szybki pomiar podczas rutynowych przeglądów. Często użytkownicy wykorzystują możliwości systemu w ten sposób, aby przeanalizować stan swoich instalacji. Częstym efektem jest ujawnienie niewralgicznych elementów, które poddawane są znacznym przemieszczeniom z powodu drgań, ale nie zostały zdiagnozowane, ponieważ te zasoby lub struktury nie są objęte programem monitorowania opartym na pomiarach w ścieżce lub nie są stale monitorowane.

3. Badanie struktur

Jednym ze sposobów wykorzystania technologii Motion Amplification® jest analiza strukturalna maszyn przemysłowych, takich jak silniki i pompy. Niewystarczająca sztywność ramy fundamentowej silnika to nagminny problem obserwowany w zakładach produkcyjnych. Często struktury te się starzeją lub modernizuje się je niskim kosztem i bez fazy projektowania, aby zamontować na nich nowsze silniki. W innych przypadkach są instalowane pomimo, że nie są dedykowane do nowego typu silnika. Na domiar złego diagnozowanie podstaw montażowych lub problemów konstrukcyjnych jest z reguły kłopotliwe, a konstrukcje lub podpory same w sobie są rzadko, jeśli w ogóle, monitorowane. Metody oparte na pomiarach okresowych koncentrują się na maszynach wirnikowych i zwykle nie są nastawione na wykrywanie problemów strukturalnych, a jeśli takie zostaną wykryte, to są na ogół maskowane wśród wielu innych niesprawności, mających podobny obraz widma drgań. Jednoznaczne zidentyfikowanie problemu strukturalnego, jako podstawowej przyczyny, może

być czasochłonne i trudne.

Badanie polegające na eksploatacyjnej analizie modalnej (ODS) może pomóc zdiagnozować problemy strukturalne, ale z reguły jest to czasochłonne i kosztowne. Badanie ODS w przypadku prostej kombinacji silnik-pompa może zająć pół dnia lub dłużej, w zależności od stopnia szczegółowości. Betonowe fundamenty mogą komplikować te wysiłki, ponieważ umieszczanie akcelerometrów w betonie jest w wielu przypadkach procesem uciążliwym. Mówiąc wprost, metody te nie są adekwatne z punktu widzenia kosztów i korzyści.

Dlatego też, coraz częściej wykorzystuje się technologię Motion Amplification® do identyfikowania problemów strukturalnych oraz projektowych. Szybkość, z jaką można wykonać analizę, sprawia, że jest to opłacalny sposób analizowania nawet najmniej znaczących aktywów w skali krytyczności lub maszyn, które powodują małe straty podczas nieplanowanych przestojów.

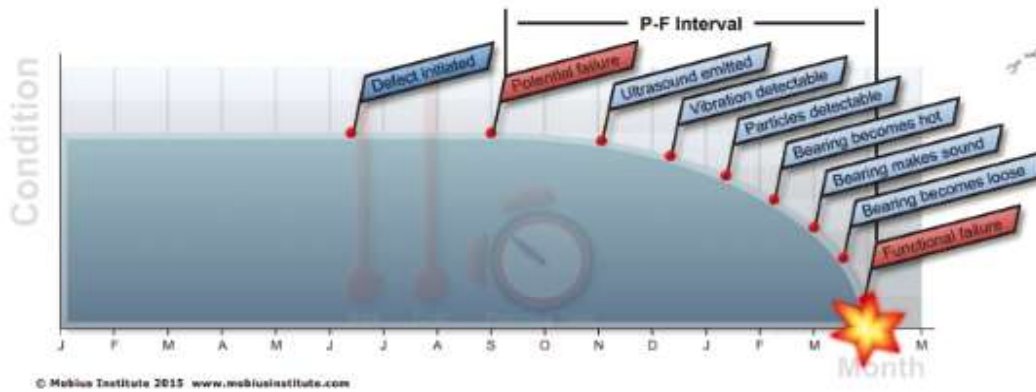
4. Wykrywanie wczesnych stadiów niesprawności

Wykorzystanie technologii Motion Amplification® do analizy stanu struktur, pozwala użytkownikowi końcowemu wykryć problem wcześniej, w kontekście krzywej potencjalnych uszkodzeń. Weźmy na przykład typowy proces rozwoju wady łożyska. W takim przypadku główną przyczyną jest problem strukturalny, wynikający z niewystarczającej sztywności podparcia silnika.

Ten stan może ulec pogorszeniu, jeśli wystąpi rezonans. Luzy mogą pojawiać się również z powodu niedokręconych śrub mocujących i pęknięć wynikających ze zmęczenia. Ostatecznie stan łożyska ulegnie pogorszeniu i może wystąpić poważna awaria. Niezauważenie problemu w odpowiednim czasie może mieć katastrofalny efekt, powodując zatrzymanie silnika i nieplanowane przestoje.

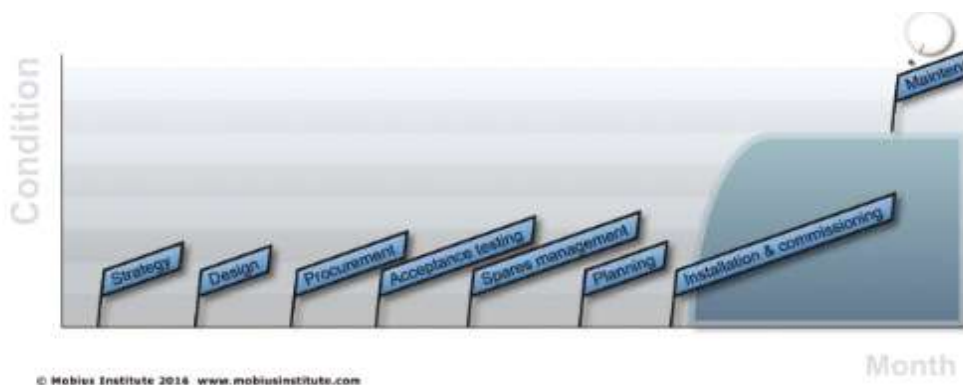
Ten scenariusz może się również powtórzyć, jak pokazano na rys. 1, za pomocą niebieskich odnośników. Rys 1. pokazuje typowy przedział P-F wady łożyska. Tutaj widzimy, że wada łożyska została zainicjowana znacznie wyżej na krzywej P-F i zaczyna być wykrywalna przez różne technologie na różnych etapach. Na przykład charakter drgań może pozwalać na detekcję uszkodzenia łożyska, jeśli silnik jest poddawany monitorowaniu drgań. Silnik może zostać wyłączony, a wada łożyska może zostać wyeliminowana, w ramach planowanego przeglądu. Silnik zostaje przywrócony do trybu pracy, a charakter drgań, wskazujący na uszkodzenie łożyska, może zostać wyeliminowany. Jednak podstawowa, pierwotna przyczyna niesprawności (problem strukturalny) nadal istnieje.

Wzmocnienie ruchu stało się narzędziem, które można wykorzystać jako uzupełnienie istniejących technologii monitorowania drgań. Problemy strukturalne, takie jak poprzednio szczegółowo opisane, są często trudne do zdiagnozowania. Eksploatacyjna analiza modalna jest metodą, którą można zastosować do zidentyfikowania problemów strukturalnych, ale jest ona kosztowna, czasochłonna i kłopotliwa. Wzmocnienie ruchu można wykorzystać do spojrzenia na całe instalacje, a w tym przypadku na silnik. Stan całej struktury jest obrazowany,



Rys. 1. Wykres krzywej P-F.

Fig. 1. P-F Curve chart.



Rys. 2. Wykres interwału zdarzeń występujących przed awarią.

Fig. 2. P-F interval pre-failure.

a ruch może być wzmacniany, często ujawniając podstawową wadę projektu konstrukcji, na przykład niewystarczające podparcie. Udokumentowano wiele przypadków eliminacji wad za pomocą zestawu Iris M™.

Rysunek 2. przedstawia wykres krzywej P-F. W tym przypadku daleko jesteśmy od wystąpienia wady łożyska. Motion Amplification® można stosować na bardzo wczesnych etapach takich jak projektowanie i instalacja, aby przeanalizować obiekt przed jego uruchomieniem. W tym przypadku nie dopuszczamy do powstania uszkodzeń łożysk, ponieważ przyczyny, które mogą prowadzić do ich uszkodzenia, takie jak wysoki poziom drgań wynikający z luzów bądź wad projektowych będą wyeliminowane przed dopuszczeniem do pracy. Oznaczałoby to nie tylko korzyść z oszczędności kosztów i czasu, ale także wyeliminowało wystąpienie pierwszego uszkodzenia łożyska. Tego rodzaju analiza za pomocą Motion Amplification™ może prowadzić do największych oszczędności.

5. Studium przypadków

Poniżej przedstawiono wykorzystanie technologii Motion Amplification® do diagnostyki problemów strukturalnych generatora w elektrowniach. Istnieją dwie (pracująca i rezerwowa) pompy chłodzące stojana (SCP), które są krytyczne dla każdego 500-megawatowego turbogeneratora elektrowni Loy Yang. Jeden z dwóch SCP dla

turbogeneratora 1 ma długą historię. Ponad 10 lat, wysokich vibracji bocznych, czasami osiągających 20 mm/s RMS. Podjęto wiele prób rozwiązania tego problemu, których koszt wyniósł około 120 000 USD. Kwota nie uwzględnia szacowanego kosztu pracy diagnostów wynoszącego ponad 500 roboczogodzin i utraty przychodów z wytwarzania energii. Niektóre próby rozwiązania tego problemu obejmują: osiowanie, zgrzewanie punktowe ramy nośnej, usztywnienie orurowania, dopasowanie elastycznych mieszkań do orurowania ssącego i tłocznego pompy, dwukrotna wymiana pompy, wymiana silnika, wymiana sprzęgła itp. Zlecono firmie Optical Motion Technologies (OMT) zastosowanie technologii RDI Motion Amplification® do rozwiązania problemu. Dotarcie do lokalizacji SCP w elektrowni, skonfigurowanie systemu akwizycji kamer wideo, a następnie zebranie dziewięciu filmów zajęło mniej niż godzinę.

Rysunek 3 pokazuje konfigurację kamery dla tego procesu. W ciągu godziny dokonano również analizy zebranych wyników. Proces polegał na zrobieniu szerokokątnych filmów dla „całej maszyny” oraz ich natychmiastowej analizie, a następnie opracowaniu filmów ustalających przyczyny problemu. Z filmów wideo MA jasno wynikało, że problemem była kulawa łapa między ramą bazową pompy, a profilem płyty fundamentowej. W rzeczywistości istniało odkształcenie ramy bazowej pompy. Podczas planowego postoju wykonano szereg spoin pachwinowych ramy bazowej



Rys. 3. Ustawienie kamery wzmacniającej ruch.

Fig. 3. Setting the camera to strengthen the movement.

pompy do profili płyty fundamentowej. Kiedy pompa została przywrócona do pracy, drgania poprzeczne oraz wibracje zostały zmniejszone o ponad 70 % i wynosiły teraz mniej niż 4,9 mm/s RMS. Rozwiązanie tego problemu zostało osiągnięte z minimalnym nakładem czasu oraz kosztów, dzięki zastosowaniu technologii Motion Amplification®.

6. Inne zastosowania

Podpory strukturalne to tylko jeden obszar, w którym stosuje się wzmocnienie ruchu w celu uzupełnienia istniejących lub tradycyjnych narzędzi predykcyjnego utrzymania ruchu. Innym obszarem, w którym technologia Motion Amplification® okazała się przydatna, jest instalacja rurowa. Rurociągi mogą być trudne do monitorowania z wielu powodów. Często orurowanie jest niezelazne, co utrudnia przymocowanie czujników. Dotyczy to również rur owiniętych izolacją, wielokrotnie punkty pomiarowe wymagają rusztowania, aby uzyskać dostęp do optymalnych lokalizacji. Innym razem rurociąg tłoczy medium o wysokiej temperaturze, wymagającej wyspecjalizowanych czujników zaprojektowanych do pracy w wyższych temperaturach.

Wreszcie, rurociągi często znajdują się w rozległych sieciach, w których występuje wiele rur, co czyni je niedostępnymi, i pojawia się pytanie „od czego zacząć pomiary?”. Wzmocnienie ruchu staje się idealnym narzędziem w tym scenariuszu. Analityk może po prostu nagrać sieć rur z dużej odległości, aby odizolować i uwidocznić obiekty wykazujące największą amplitudę przemieszczeń. Zazwyczaj problem można natychmiast dostrzec na wzmocnionym filmie. Iris M™ jest szczególnie przydatny, przy instalacjach rurowych o małych średnicach.

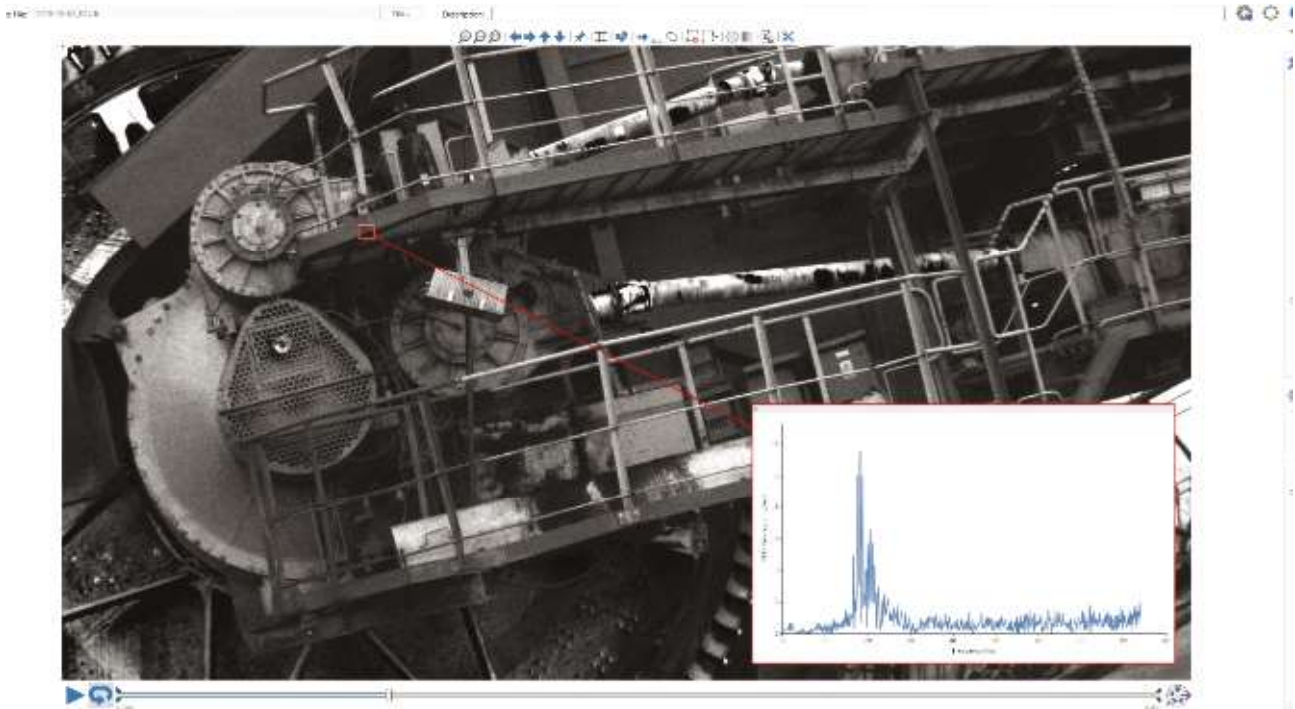
Rurociągi o małych średnicach tradycyjnie nie są mierzone, ale wibracje na rurach o małych przekrojach mogą prowadzić do zmęczenia materiału, co ostatecznie może doprowadzić do wycieków. Sama ilość rur o małych średnicach sprawia,

że monitorowanie ich w całości jest uciążliwym zadaniem. Ponadto ogromna większość rur o małych średnicach nie wykazuje wibracji, które doprowadzą do zmęczenia. Mówiąc najprościej, to jest jak szukanie igły w stogu siana, dlatego nie jest monitorowane. Korzystanie z Iris M™ pozwala użytkownikowi skanować duże obszary i sprawnie zlokalizować rury o małych średnicach, które wykazują niepożądane drgania.

Szczególna przydatność technologii Motion Amplification® ujawnia się w analizowaniu wielkich struktur o skomplikowanej konstrukcji, jak koparki w kopalniach odkrywkowych. W takich przypadkach nie ma z reguły norm określających dopuszczalne przemieszczenia poszczególnych elementów konstrukcji i napędów. Wszelkie pomiary przypominają prace badawcze i próby doszukiwania się przyczyn konkretnych, powtarzających się problemów eksploatacyjnych.

Ogólny pogląd na większą część struktury, otrzymywany z kamery Iris M™ pozwala wyodrębnić rzeczywiście problematyczne elementy i współpracujące z nimi części maszyny, a także skupić się na miejscu występowania problemu. Maszyny te operują z niskimi prędkościami obrotowymi, a konstrukcje są rozległe – stąd częstotliwości rezonansowe są z reguły niskie i niezwykle trudne do prawidłowego zdiagnozowania przez akcelerometry. Filtracja częstotliwości w oprogramowaniu Motion Amplification® jest nieocenioną funkcjonalnością, która izoluje rzeczywisty problem od potencjalnych zakłóceń.

W górnictwie odkrywkowym nieprzerwana praca przenośników taśmowych decyduje o efektywności całego procesu wydobywania, a ich przekładnie napędowe, bębny zwrotne i napinające, działają w najtrudniejszych warunkach. Kontrola sprawności polegająca na pomiarach drgań akcelerometrami może być nieskuteczna, ze względu na ich ograniczoną czułość dla niskich częstotliwości i wysoki



Rys. 4. Oprogramowanie Motion Amplification*

Fig. 4. Motion Amplification* software.

poziom zakłóceń, przez co rozwój awarii może być przeoczony.

Pomiar temperatury opraw łożyskowych bywa wskaźnikiem zbyt późno informującym o poważnej degradacji łożyska. Nagrania maszyny przy pomocy zestawu Iris M™ (Rys. 4) pozwalają ocenić prawidłowość pracy zespołu wraz ze współpracującymi elementami i uchronić przed zniszczeniem taśmy przenośnika

7. Podsumowanie

Wzmacnianie ruchu ma szeroki zakres zastosowań, w tym profesjonalną analizę drgań oraz wykrywanie wad takich jak: niewyważenie, niewspółosiowość i luzy. Ponadto jest to narzędzie szczególnie przydatne do analizy i diagnozowania wad i problemów strukturalnych. Problemy strukturalne są często podstawowym źródłem awarii, który prowadzi do

innych awarii, które są wykrywane na znacznie późniejszym etapie życia maszyn.

Często spotykamy się z korygowaniem usterki, a pierwotna przyczyna nadal pozostaje aktywna, prowadząc ostatecznie do kolejnych awarii. Iris M™ można wykorzystać do szybkiej i skutecznej identyfikacji problemów strukturalnych. Prowadzi to do wykrycia problemów na etapie projektowania i instalacji, zanim mogą one spowodować kolejne niesprawności i zanim nastąpi wtórna awaria.

Technologia ta zapewnia możliwość obrazowania i analizowania ruchu konstrukcji, gdy tradycyjne techniki pomiarowe byłyby trudne w użyciu