



*Problem walki z hałasem oraz eliminacja niepożądanych drgań pochodzących od różnego rodzaju elementów wirujących obecnie nabierają szczególnego znaczenia. Wejście Polski do Unii Europejskiej wymusiło na producentach urządzeń mechanicznych eliminację tego zjawiska w swoich urządzeniach.*

# VibroDAQ 2

## Nowoczesna metodyka badania niewyważenia elementów wirujących

Nie zawsze sobie zdajemy sprawę z tego, że w naszym otoczeniu pracuje bardzo duża ilość urządzeń mechanicznych, których elementy składowe wymagają wyważania. Jako przykłady można wymienić: silniki, wentylatory, koła samochodowe, tarcze ściernie, bębny pralek czy chociażby talerze twarde dysków w komputerach. Postaram się przybliżyć zjawisko niewyważenia oraz metody walki z nim w oparciu o autorski system pomiarowy VibroDAQ 2.

### Zarys teorii wyważania

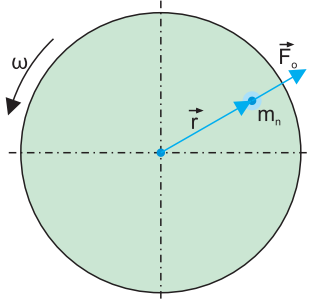
Na początek niezbędna jest porcja teorii związana z wyważaniem, bez której trudno jest poznać istotę rzeczy i skutecznie walczyć z problemem, bowiem aby skutecznie

stawić czoła przeciwnikowi, najpierw musimy go dobrze poznać.

Zacznijmy od zdefiniowania **środku masy obiektu**. Środkiem masy obiektu nazywamy taki jego punkt, którego podparcie pozwala na utrzymanie go w stanie równowagi. Odnosząc to do części maszyn: tak podparty detal nie wychyli się w żadnym kierunku określonym w dowolnym położeniu kątowym względem tego punktu. Najprostszym przykładem może być okrągły talerzyk o symetrycznej budowie, stanowiący geometryczną bryłę obrotową. W talerzyku znajdujemy środek symetrii będący środkiem okręgu wyznaczonym przez brzegi talerzyka. W tym przypadku wyznaczony środek okręgu będzie stanowił jednocześnie środek

masy przedmiotu. Jeżeli teraz podeprzemy talerzyk w środku jego masy, to znajdzie się on w stanie równowagi, czyli jego odchylenie w każdą ze stron będzie takie same. Aby tak się stało muszą być spełnione pewne warunki. Najważniejszy z nich dotyczy jednorodności materiału, z którego wykonany jest przedmiot. Jeżeli ciężar właściwy materiału będzie różny w różnych częściach przedmiotu, to detal mimo podparcia w jego geometrycznym środku nie pozostanie w równowadze, czyli będzie niewyważony.

Po tym krótkim wstępie możemy przejść do wprowadzenia pojęcia niewyważenia. **Niewyważenie** jest to usytuowanie środka masy przedmiotu w innym miejscu, przesuniętym w stosunku do osi jego obrotu.



Kilka podstawowych wzorów z fizyki:

$$F_o = \frac{m_n \cdot v^2}{r} \text{ – siła odśrodkowa działająca na obiekt wirujący}$$

$$\omega = \frac{2 \cdot \pi}{T} \text{ – prędkość kątowa obiektu wirującego}$$

gdzie:  $T$  – okres obrotu,  $m_n$  – masa niewyważenia  
W wyniku prostych podstawień otrzymujemy wzór na siłę odśrodkową:

$$F_o = m_n \cdot r \cdot \omega^2$$

gdzie  $m_n$  – masa niewyważenia,  $r$  – odległość masy niewyważenia od osi obrotu

**Rys. 1. Siła odśrodkowa działająca na wirujący obiekt**

W chwili obracania się przedmiotu (wirnika) przemieszczenie to powoduje powstawanie siły odśrodkowej, pod wpływem której generowane są drgania i dochodzi do pewnych wychyleń wirnika w stosunku do osi obrotu. Fizyczny odstęp ( $r$ ) pomiędzy środkiem masy detalu a centrum jego obrotu definiuje wielkość niewyważenia, która w ogólnym wypadku stanowi wektor o konkretnej długości oraz kącie względem punktu odniesienia znajdującego się na wirniku.

Jeśli całkowitą nierównomierność masy wirnika  $D$  sprowadzimy do masy niewyważenia  $m_n$ , wtedy iloczyn  $D = m_n \cdot r$  będzie stanowił niewyważenie detalu. Zauważmy, że odsuwając masę niewyważenia od środka obrotu niewyważenie  $D$  będzie wzrastać, a przysuwając ją w kierunku środka – maleć. Zatem niewyważenie można utrzymać na takim samym poziomie poprzez dobranie odpowiednich wartości  $m_n$  i  $r$ . Jest to istotne, gdyż w praktyce umieszczenie masy kompensacyjnej w dowolnym miejscu wirnika nie zawsze jest możliwe. Kompensacji można zatem dokonać na dowolnym promieniu, jedynie zachowując odpowiednią, właściwą wartość tego iloczynu.

Rozważmy cienki detal prostopadły do osi wału. Ze względu na niedoskonałość wykonania wału w wycinku będzie znajdować się niezrównoważona masa (masa niewywa-

żenia)  $m_n$ , której odległość od osi obrotu wynosi  $r$ . Po wprowadzeniu detalu w ruch obrotowy z prędkością  $\omega$  na wycinek zaczyna działać siła odśrodkowa  $F_o$ , której wielkość jest proporcjonalna do wielkości niewyważenia.

Tego typu siła ośrodkowa powstaje właśnie w wirniku na skutek przesunięcia środka masy obrotu względem jego osi obrotu i jest konsekwencją niewyważenia.

**Następstwa zjawiska niewyważenia**

Zjawisko niewyważenia prowadzi do powstania drgań, które mogą mieć następujące następstwa:

- doprowadzić do uszkodzenia lub szybkiego zużycia łożysk wirnika,
- doprowadzić do uszkodzenia innych elementów maszyny, jak również elementów budynku, jeśli rozmiary wirnika oraz jego masa są wystarczająco duże,
- wzrost poziomu hałasu w otoczeniu elementów wirujących,
- spowodować nieprawidłowe działanie maszyny (przykładem może być tarcza szlifierska, której „bicie” będące skutkiem niewyważenia sprawi, iż stopień chropowatości powierzchni szlifowanego obiektu nie będzie spełniał wymaganych parametrów),
- obniżenie parametrów użytkowych urządzenia,

Nie wolno lekceważyć żadnego z wyżej wymienionych zjawisk, ponieważ w konsekwencji mogą one doprowadzić do wypadku, który może mieć tragiczne następstwa.

**Niewyważenie w praktyce**

Celem wyważania jest eliminacja wymienionych, niekorzystnych zjawisk. W praktyce wyważanie sprowadza się do ustalenie wielkości i położenia masy korekcyjnej, kompensującej wielkość występującego niewyważenia.

Często używa się pojęcia „ciężkiego” lub „lekkiego miejsca”. Miejsce ciężkie to punkt detalu, w którym musimy dodać masę korekcyjną w celu kompensacji istniejącego niewyważenia. Miejsce lekkie określa nam ciężar detalu, który musi być z niego usunięty w celu dokonania niezbędnej korekcji.

Miejsce ciężkie i lekkie znajdują się na tym samym promieniu wirnika, ale są położone po przeciwnych jego stronach.

Warto tu zwrócić uwagę na fakt, iż wielkość dopuszczalnego niewyważenia dla poszczególnych klas urządzeń jest zdefiniowana w normach. Należy przy tym zaznaczyć, że idealne wyważenie detalu możliwe jest tylko w teorii. W praktyce zawsze decyduje o tym dokładność pomiaru oraz właściwy dobór masy korekcyjnej. Każda z klas ustala dopuszczalne resztkowe niewyważenie, czyli dopuszczalną wielkość niewyważenia jaka może pozostać w przypadku urządzenia o określonej w normie konstrukcji i przeznaczeniu. W przypadku tarczy szlifierskiej przyczyną powstawania drgań może być niejednorodność materiału ściernego wynikająca ze specyficznych cech tego materiału. Dodatkowo w wyniku niedokładnego pasowania tarczy na wale szlifierki może dojść do przesunięcia centrum masy względem środka obrotu.

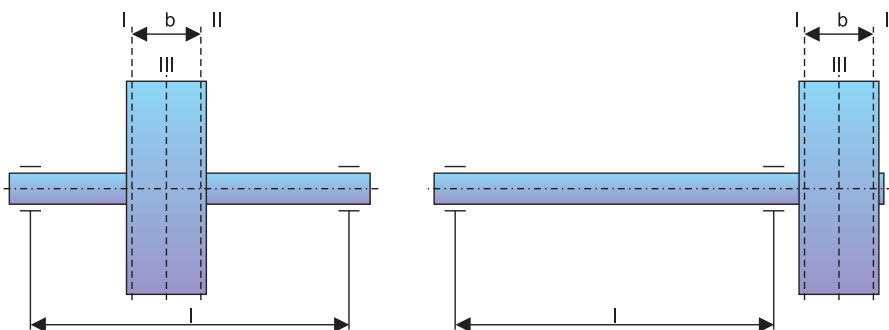
Często spotyka się w praktyce, że szlifierze umieszczają tarczę na metalowym wałku, a następnie całość toczą po rolkach. Jeżeli detal zatrzymuje się permanentnie w tym samym miejscu, uznają najniższy punkt tarczy za „miejsce ciężkie”. Następnie przesuwają kamienie zabieraka szlifierski w taki sposób, aby po stronie przeciwnej do tego miejsca wytworzyć właściwą przeciwwagę.

Jest to bardzo zgrubna metoda wyważania, obarczona dużym błędem pochodzącym z dwóch źródeł. Pierwsze z nich to siła tarcia wału o rolki, a druga to fakt, iż tarcza szlifierska po zakończeniu badania niewyważenia zakładana jest na całkowicie inne wrzeciono szlifierki.

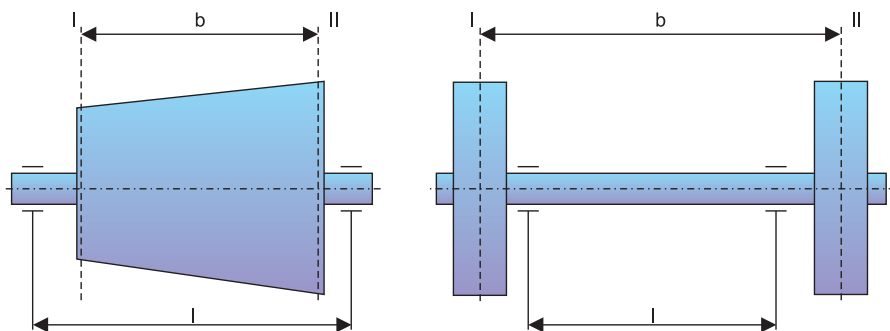
Z tego względu, tarcze szlifierskie po otrzymaniu od producenta, powinny być wyważane na szlifierce tzn. w miejscu ich pracy. Wyważenie tarczy na szlifierce daje możliwość wyważenie całego układu wirującego szlifierki, a więc ściernicy wraz z wrzecionem.

Korekcja niewyważenia tarczy szlifierskiej powinna być dokonywana regularnie w miarę jej zużywania, w skrajnym przypadku niewykonywanie tej czynności może doprowadzić nawet do zerwania ściernicy lub/i uszkodzenia łożysk.

Każdy element wirujący ma swoją specyfikę i przyczyny powstawania niewyważenia mogą być różne. Dlatego służby zajmujące się utrzymaniem ruchu lub osoby odpowiedzialne za nadzór nad konstrukcją różnych detali wirujących powinny być wyposażone w przyrządy pomiarowe odpowiednie do tego celu, pozwalające na szybkie usunięcie niebezpiecznych drgań, niedopuszczenie do powstania awarii oraz dalszych konsekwencji będących jej następstwem.



**Rys. 2. Przykład wirników spełniających warunek wyważania jednopłaszczyznowego**



Rys. 3. Wirniki wyważane dwupłaszczyznowo

### Rodzaje niewyważania

Wyróżnia się następujące rodzaje niewyważania:

- *niewyważenie statyczne*, kiedy centralna główna oś bezwładności przesunięta jest równoległe do osi wału,
- *niewyważenie quasi-statyczne*, kiedy centralna główna oś bezwładności przecina oś wału w punkcie innym niż środek ciężkości,
- *niewyważenie momentowe*, kiedy centralna główna oś bezwładności przecina oś wału w punkcie ciężkości,
- *niewyważenie dynamiczne*, kiedy centralna główna oś bezwładności jest przesunięta nierównoległe do osi wału i nie przecina jej.

### Wyważanie jednopłaszczyznowe

Wyważanie jednopłaszczyznowe stosuje się do wirników o kształcie tarczowym (rys. 2), w których odległość między łożyskami jest dostatecznie duża oraz bicie osiowe jest dostatecznie małe. Norma (PN-93/N-01359, ISO 1940/1-1986) określa, że wyważanie tego typu może być stosowane, gdy odległość  $b$  między płaszczyznami korekcyjnymi I i II jest mniejsza od jednej trzeciej odległości  $l$  pomiędzy łożyskami

$$b < \frac{l}{3}$$

W takim przypadku stosuje się jedną płaszczyznę korekcyjną (III).

Wyważanie jednopłaszczyznowe może zostać także przeprowadzone bez potrzeby wprowadzania wirnika w ruch obrotowy. Należy wtedy tak ułożyć masę korekcyjną, aby była zachowana równowaga statyczna w jego dowolnej pozycji kątovej. W wielu przypadkach taki sposób wyważania może okazać się niewystarczająco dokładny i nie zmniejszy niewyważenia resztkowego do akceptowalnego poziomu.

### Wyważanie dwupłaszczyznowe

Wyważanie dwupłaszczyznowe stosuje się do wirników niespełniających podanego wcześniej kryterium (rys. 3). Do wyważania dwupłaszczyznowego jest konieczne wprowadzenie wirnika w ruch obrotowy. Stan niewyważania dowolnego wirnika sztywnego może zostać określony przy pomocy dwóch wektorów niewyważania, działających

w dwóch, dowolnych płaszczyznach. Każdy wirnik sztywny można wyważyć w dwóch, dowolnie przyjętych płaszczyznach korekcyjnych. Wartość i kąt niewyważania w każdej z płaszczyzn I i II może być różny, powodując nie tylko przesunięcie ale i skręcenie centralnej, głównej osi bezwładności względem osi wirnika. Obserwuje się wtedy wpływ niewyważenia z jednej płaszczyzny na niewyważenie drugiej. Stan niewyważenia wirnika sztywnego przedstawia rys. 4, kolorem zielonym oznaczono centralną główną oś bezwładności przesuniętą i skręconą względem osi wału.

### Wyważanie wielopłaszczyznowe

Wyważanie wielopłaszczyznowe dotyczy wałów giętkich, gdzie siły odśrodkowe powodują dodatkowo ugięcie wału. Ilość płaszczyzn korekcyjnych jest w tym przypadku większa niż dwie. W szczególnych przypadkach wały sprężnięte, osadzone oddzielnie w swoich łożyskach, mogą być wyważane niezależnie jako sztywne pod warunkiem, że masa sprężła nie jest istotna w odniesieniu do masy wałów.

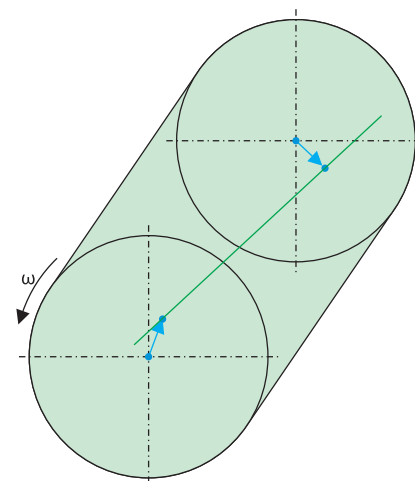
### Wyważanie na stanowisku oraz w łożyskach własnych

W praktyce wyważenie wirnika przeprowadza się na dwa sposoby:

- używając specjalizowanego stanowiska zwanego popularnie wyważarką, na którym mocuje się wirnik po wymontowaniu z urządzenia,
- wyważając w miejscu zainstalowania wirnika zamontowanego w łożyskach własnych.

Wyważanie w specjalizowanym stanowisku stosowane jest najczęściej na etapie produkcji detalu, kiedy kontroli poddawana jest duża seria jednakowych elementów oraz wtedy, gdy dostęp do wirnika jest utrudniony lub niemożliwy (w takim przypadku można znacznie uprościć i przyspieszyć proces wyważania). Tę metodę można również stosować do wstępnego, niskoobrotowego wyważenia wirnika, np. po przeprowadzeniu prac remontowych, kiedy istnieje obawa o silne niewyważenie mogące zniszczyć urządzenie po wprowadzeniu wirnika w obrót z prędkością znamionową.

Drugi ze sposobów wyważania tj. w miejscu jego zainstalowania, uznaje się za najbardziej dokładny. Pozwala on na wyważanie



Rys. 4. Stan niewyważenia wirnika sztywnego

przy prędkości znamionowej i może być używany do precyzyjnego wyważania wirnika wstępnie wyważonego przy pomocy wcześniej opisywanej metody. Metoda ta eliminuje niewyważenie technologiczne, które może powstać na etapie montażu wirnika. Wadą tego sposobu jest bardziej skomplikowany cykl pomiarowy. Z uwagi na sposób dokonywania pomiarów metoda wyważania w miejscu zainstalowania może nie sprawdzić się w przypadku urządzeń, w których wiele wirników obraca się z taką samą prędkością.

Warto zwrócić uwagę na fakt, iż wyważanie w łożyskach własnych różnych obiektów niejednokrotnie wymaga od wyważającego dysponowania czujnikami o różnej czułości. Jest to spowodowane tym, że możemy się spotkać z różnymi wielkościami przyspieszeń i czujnik, którym dysponujemy może pracować poniżej lub powyżej swojego zakresu pomiarowego. Należy tu zwłaszcza wziąć pod uwagę zakres mierzonych przyspieszeń, prędkości lub przemieszczeń drgań, jak również zakres częstotliwości pracy danego czujnika.

Na koniec można przytoczyć przykład z życia codziennego, który zna każdy kierowca: wyważanie kół samochodowych. Koła wyważane są na specjalnych stanowiskach, a następnie montowane w samochodzie. Jak już wcześniej zostało wspomniane, w takim wypadku wystąpi błąd związany z różnicą pasowania koła na stanowisku pomiarowym oraz na osiach samochodu. Dokładne usunięcie niewyważenia z kół samochodowych powinno być przeprowadzone w miejscu ich użytkowania, czyli na samochodzie. Należałoby najpierw ustawić samochód na odpowiednim stanowisku, wprowadzić koło w ruch jednostajny i dokonać stosownego pomiaru. Ta metoda usunęłaby niewyważenia z całego zespołu napędowego, co znacząco wpłynęłoby na obniżenie poziomu drgań.

Robert Kacprzycki  
RK-SYSTEM  
[www.rk-system.com.pl](http://www.rk-system.com.pl)

1) Płaszczyzna korekcyjna – prostopadła do osi wału wirnika płaszczyzna, w której dokonuje się korekty niewyważenia