



Politechnika Lubelska

Wydział Mechaniczny



**Katedra Podstaw Konstrukcji Maszyn
i Mechatroniki**

Laboratorium nr 3

Wyważanie wirników sztywnych w łożyskach własnych

Opracował:

Dr inż. Łukasz Jedliński

LUBLIN 2018

1. Cel i zakres laboratorium

Głównym celem laboratorium jest przeprowadzenie procesu wyważania wirnika w łożyskach własnych. W ramach zajęć studenci zapoznają się z informacjami teoretycznymi na temat przyczyn, skutków i rodzajów niewyważenia. W części praktycznej wyznaczą wagę masy próbnej oraz położenie i wagę masy korekcyjnej, dokonując stosownych obliczeń metodą analityczną i graficzną.

2. Wyważanie wirników sztywnych

2.1. Podstawowa terminologia

Wyważanie – jest to proces kontroli stanu niewyważenia części mający na celu sprawdzenie, czy występująca wartość nie jest większa od przyjętej, a jeśli jest, to obejmuje wyznaczenie położenia i wielkości mas korekcyjnych oraz fizyczną realizację.

Wirnik – jest to część maszyny wykonująca ruch obrotowy względem obudowy i składająca się z wału oraz elementu służącego do wykonania pracy lub zmiany postaci energii.

Wirnik sztywny – jest to wirnik, który może być wyważony tylko w dwóch płaszczyznach korekcji, a wartość niewyważenia resztkowego nie jest większa od niewyważenia dopuszczalnego dla całego zakresu prędkości eksploatacyjnych.

W praktyce okazuje się, że wirnik jest sztywny, jeśli jego max. prędkości kątowa jest mniejsza niż połowa pierwszej prędkości krytycznej (częstotliwości rezonansowej).

Wyważanie w łożyskach własnych – wyważanie przeprowadzane w korpusie maszyny za pomocą aparatury przenośnej.

2.2. Informacje ogólne

Tematyka wyważania inaczej wyrównoważania dotyczy części maszyn będących w ruchu. Celem tego procesu jest zmniejszenie do minimum reakcji dynamicznych w węzłach łożyskowych pochodzących od sił odśrodkowych. Najczęściej spotykanym problemem jest wyważanie części wykonujących ruch obrotowy. Temu procesowi poddawane są także zespoły części (mechanizmy), jak układ korbowo-tłokowy czy czworobok przegubowy. Pierwszy etap następuje podczas projektowania i wykonuje go konstruktor – *wyważania konstrukcyjne*. W przypadku części wykonujących ruch obrotowy równomierny rozkład mas uzyskuje się najczęściej poprzez osiowosymetryczny kształt. W przypadku zespołu części, wykonujących również inne rodzaje ruchu, zagadnienie to jest bardziej skomplikowane. Wspomniany wcześniej układ korbowo-tłokowy jest najczęściej niewyważony konstrukcyjnie w założonym zakresie. Po wytworzeniu części czy zespołów wykonuje się *wyważanie technologiczne* w specjalnych maszynach zwanych wyważarkami lub w łożyskach własnych z użyciem aparatury przenośnej.

Wyważanie jest szczególnie istotne dla maszyn szybkoobrotowych. Siła odśrodkowa zależy od kwadratu prędkości kątowej, zwiększając prędkość dwukrotnie siła ta zwiększy się czterokrotnie. Niewyważenie nie tylko powoduje zwiększenie sił reakcji w łożyskach powodując ich przedwczesne zużycie. Jest to siła o zmiennym kierunku zmniejszająca wytrzymałość zmęczeniową maszyny i generująca drgania, które poprzez ramę lub fundament przenoszą się na inne obiekty. Może to obniżać jakość wytworów pierwotnego urządzenia lub sąsiednich. Oddziaływanie drgań i hałasu na człowieka również jest niekorzystne. Przy niewielkich wartościach obniża to komfort pracy, a przy większych ujemnie wpływa na organizm.

Jakość wyważania i czasochłonność w dużym stopniu zależy od niewyważenia początkowego wirnika. Im jest mniejsze, tym szybciej i dokładniej można wyważyć wirnik. Przyczyny powstania nie zrównoważonych sił odśrodkowych można podzielić na trzy grupy:

1. Czynniki konstrukcyjne – przyjęty rodzaj pasowania, wielkość pola tolerancji, sposób łączenia elementów, pozostawienie powierzchni nieobrobionych mechanicznie, założenie co do

technologii wykonania (odlewanie i spawanie nie sprzyja uzyskaniu małego niewyważenia początkowego), zaprojektowanie niesymetrycznego kształtu wirnika, opracowanie konstrukcji trudnej do wykonania i montażu.

2. Czynniki technologiczne:

2.1. Geometryczne: niedotrzymanie założonych przez konstruktora tolerancji kształtu i położenia urządzenia na skutek np. przyjętej ilości i miejsc mocowania obrabianego przedmiotu, głębokości i szybkości skrawania, metody spawania, kolejności wykonania spoin, zastosowanych metod redukcji odkształceń i naprężeń spawalniczych, przyjętej technologii i parametrów odlewania, wybranej metody i parametrów obróbki plastycznej, powstanie nadmiernych odkształceń na skutek niewłaściwie zaplanowanej obróbki cieplno-chemicznej.

2.2. Materiałowe: niejednorodność gęstości materiału wynikająca z zastosowanej technologii i jej parametrów. Dla elementu osiowosymetrycznego wykonanego z niejednorodnego materiału w trakcie wirowania wystąpią niezrównoważone siły odśrodkowe. Dotyczy to przede wszystkim elementów odlewanych z jamami skurczowymi a wpływ niejednorodnej gęstości materiału części wytworzonych innymi metodami jest niewielki.

2.3. Montażowe: np. nieprawidłowe osadzenie łożysk tocznych, niewłaściwe mocowanie elementów mogących w danych warunkach przemieszczać się a w stanie spoczynku powracać do pozycji początkowej (może to też być spowodowane błędną konstrukcją).

3. Czynniki eksploatacyjne – zmiana rozkładu masy na skutek: gromadzących się zanieczyszczeń, ubytku materiału spowodowanego kawitacją, zużyciem ściernym lub innym, uszkodzenia powodującego zmianę kształtu, jak tymczasowe zgięcie wału wirnika na skutek np. nierównomiernego nagrzewania, mogącego wystąpić w uszkodzonym silniku elektrycznym, trwałego odkształcenia wirnika, innych czynników np. oderwania masy korekcyjnej.

2.3. Weryfikacja przyczyn wzmożonych drgań maszyny o częstotliwości zgodniej z prędkością obrotową wirnika

Przystępując do wyważania lub w przypadku trudności z wyważeniem, należy sprawdzić, czy nie występuje inny powód nadmiernych drgań urządzenia o częstotliwości równej prędkości obrotowej wirnika. Można wyróżnić trzy przypadki:

- drgania są spowodowane przede wszystkim niewyważeniem,
- oprócz niewyważenia występuje inna przyczyna o zbliżonym oddziaływaniu,
- drgania są generowane głównie przez czynnik niezwiązany z niewyważeniem.

W sytuacji występowania dwóch czynników o podobnym oddziaływaniu nie będzie możliwe wyważenie z wymaganą dokładnością, a jeżeli dominującym czynnikiem nie jest niewyważenie, proces wyważania nie zmniejszy amplitudy drgań a nawet rezultat może być odwrotny. Dlatego w pierwszej kolejności wymagane jest rozwiązanie problemów spowodowanych przez inne czynniki (zakłada się, że proces wyważania był przeprowadzony prawidłowo).

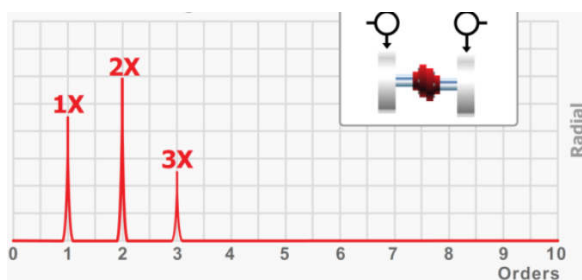
Typowymi nieprawidłowościami powodującymi podobne skutki do niewyważenia są:

- niewspółosiowość,
- nieprawidłowości dotyczące łożyska,
- luz,
- zgięty wał,
- nieprawidłowości dotyczące sprzęgła,
- nieprawidłowości dotyczące przekładni pasowej,
- nieprawidłowości dotyczące przekładni zębatej,
- zanieczyszczenia.

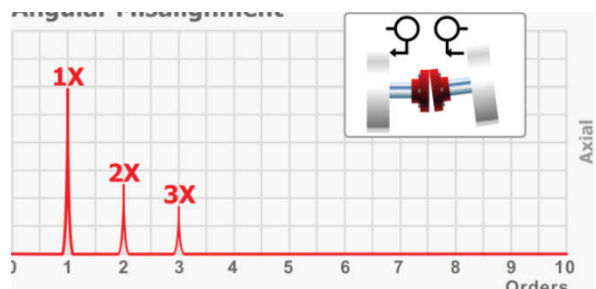
Rozróżnienie poszczególnych przyczyn jest możliwe na podstawie pomiarów drgań i kąta (przesunięcia) fazowego oraz analizy w dziedzinie czasu lub częstotliwości.

Niewspółosiowość jest to stan, w którym osie sprzęgniętych wałów nie pokrywają się. Wyróżnia się niewspółosiowość promieniową (poprzeczną), kątową i najczęściej spotykaną, czyli kombinację tych dwóch typów. W zależności od rodzaju niewspółosiowości widmo może mieć postać jak na rys. 1 i 2.

W urządzeniach do wyważania w jednej i dwóch płaszczyznach jest zaimplementowana i bardzo często stosowana metoda współczynników wpływu (ang. influence coefficient method I.C.M.). Wymaga ona pomiaru amplitudy z filtrowanego sygnału i kąta fazowego [Wowk]. W metodzie tej zakłada się liniową zależność co do amplitudy jak i kąta fazowego, np. zmieniając wagę masy próbnej (bez zmiany położenia) oczekiwana jest proporcjonalna zmiana amplitudy drgań. Niewspółosiowość powoduje, że ta zależność jest nieliniowa i wyniki otrzymane z obliczeń nie są poprawne. W przypadku wystąpienia trudności z wyważeniem spowodowanym niewspółosiowością najpierw należy skorygować położenie osi wałów.

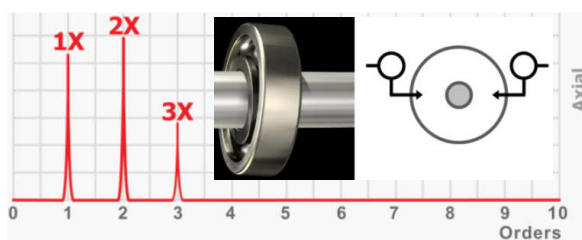


Rys. 1. Widmo drgań przy niewspółosiowości poprzecznej (promieniowej) [Mobius]

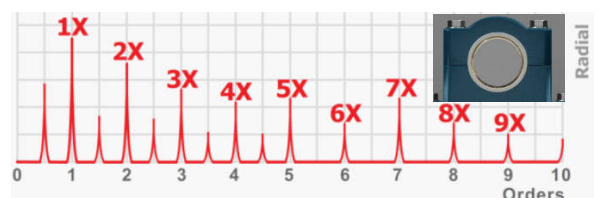


Rys. 2. Widmo drgań przy niewspółosiowości kątowej [Mobius]

Łożysko toczne nieprawidłowo osadzone w gnieździe łożyskowym albo na wale oraz nadmierny luz łożyska, również ślizgowego, powoduje drgania o częstotliwości zgodnej z obrotami wału. Przykładowe widma widoczne są na rys. 3 i 4. Błędy pozycji pierścieni łożyska mają podobny wpływ na wyważanie jak niewspółosiowość. Nadmierny luz skutkować może niestabilnością odczytu amplitudy i kąta fazowego drgań oraz tym, że dokładność wyważenia jest ograniczona do wartości luzu łożyskowego.

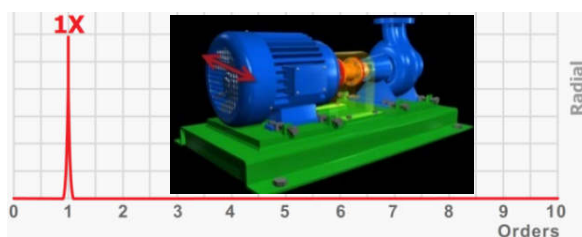


Rys. 3. Widmo drgań przy nieprawidłowym osadzeniu pierścienia zewnętrznego łożyska tocznego [Mobius]

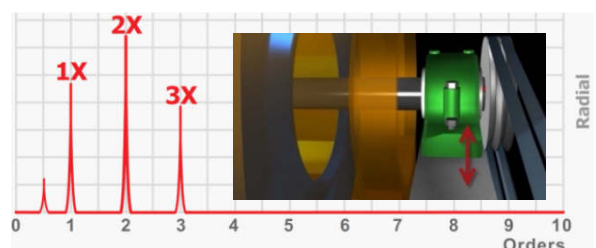


Rys. 4. Widmo drgań spowodowane nadmiernym luzem łożyska ślizgowego [Mobius]

Luz w mocowaniu oprawy stojącej łożyska do ramy lub luz wynikający z osłabienia podstawy urządzenia może powodować drgania widoczne na rys. 5 i 6. Wpływ na proces wyważania i rozwiązanie analogiczne jak dla niewspółosiowości.



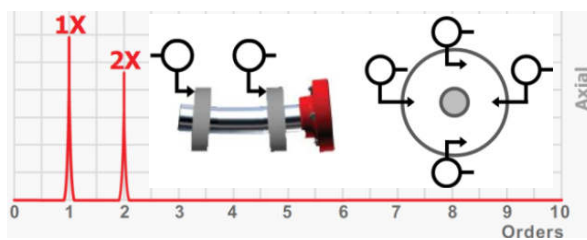
Rys. 3. Widmo drgań przy niewłaściwej spójności fundamentu [Mobius]



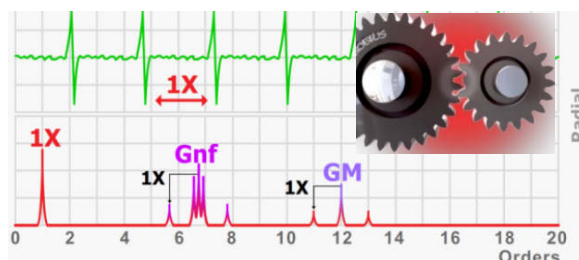
Rys. 4. Widmo drgań spowodowane luzem oprawy łożyska [Mobius]

Zgięty wał lub odkształcony łatwo jest uznać za typowe niewyważenie (rys. 5). Jednakże przy próbie wyważania masy korekcyjne będą miały najczęściej niespotykane duże wartości. Taki wał może nie zapewniać prawidłowej pracy łożysk, osadzonych na nim kół zębatych, pasowych itp., dlatego należy wymienić go na nowy. W technice występuje szereg obiektów, dla których odchyłki geometryczne muszą być zachowane, a wyważenie nie rozwiązuje problemu generowania nadmiernych drgań w trakcie pracy. Można tu się posłużyć przykładem wyważania kół pojazdów samochodowych. Jeżeli na obręczy w miejscu osadzenia opony występuje nadmierne bicie promieniowe lub osiowe, to pomimo wyważenia takiego koła, w trakcie jazdy w wyniku współpracy z podłożem, wystąpią dodatkowe siły wprawiające pojazd w drgania.

Wyłamany ząb *przekładni zębatej* generuje widmo widoczne na rys. 6. Wpływ na proces wyważania i rozwiązanie jest analogiczne jak dla niewspółosiowości.



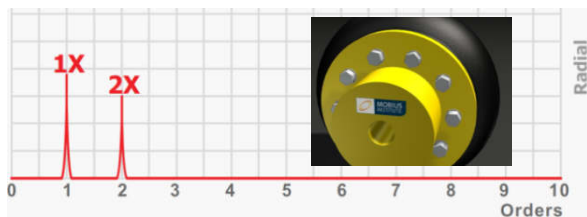
Rys. 5. Widmo drgań urządzenia ze zgiętym wałem [Mobius]



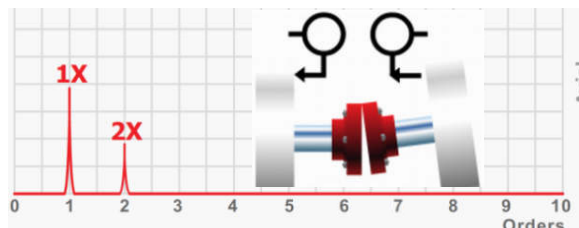
Rys. 6. Widmo drgań przekładni zębatej z wyłamanym zębem [Mobius]

Sprzęgło łączące wały może być nieprawidłowo zamontowane, obsługiwane lub wykonane i również powodować wzmożone drgania (rys. 7 i 8). Wpływ na proces wyważania i rozwiązanie jest analogiczne jak dla niewspółosiowości.

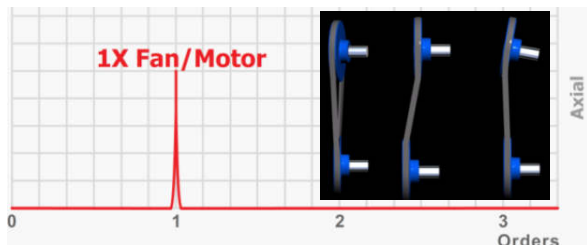
Przekładnia pasowa pracująca z nieprawidłowo ustawionymi kołami pasowymi lub pracująca przy częstotliwości rezonansowej pasa pobudza do drgań urządzenie z częstotliwością równą prędkości obrotowej wału (rys. 9 i 10). Wpływ na proces wyważania i rozwiązanie jest analogiczne jak dla niewspółosiowości.



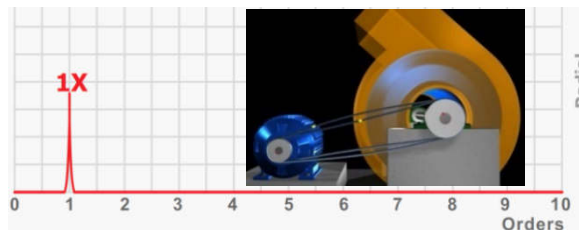
Rys. 7. Widmo drgań urządzenia z niewyważonym sprzęgłem [Mobius]



Rys. 8. Widmo drgań przekładni ze sprzęgłem o nierównoległych ściankach [Mobius]



Rys. 9. Widmo drgań urządzenia z nieprawidłowo ustawionymi kołami pasowymi [Mobius]



Rys. 10. Widmo drgań urządzenia przy prędkości odpowiadającej prędkości krytycznej pasa [Mobius]

Zanieczyszczenia, które występujące często m.in. na łopatach wentylatorów, mogą powodować stan niewyważenia. W pierwszej kolejności należy je usunąć wykonując pomiary przed i po tej operacji. Może się okazać, że inne dodatkowe działania nie są potrzebne.

Omówione dotychczas potencjalne przyczyny braku sukcesu przy wyważaniu nie wyczerpują listy możliwych problemów. Zasygnalizowane zostaną jeszcze trzy przypadki.

Pierwszy problem dotyczy rezonansu. Jeżeli wirnik pracuje z prędkością równą krytycznej, to większość metod stosowanych do wirników sztywnych nie będzie skuteczna. Może to być także inna część urządzenia, która jest w rezonansie i sprawia, że obiekt nie może zostać uznany za liniowy. Jeżeli problem nie dotyczy wirnika proces wyważania można przeprowadzić przy innej prędkości obrotowej. Niemniej jednak wskazana jest zmiana częstotliwości drgań własnych części poprzez zmianę sztywności, ponieważ jeżeli występuje rezonans przy roboczej prędkości obrotowej, to jest to sytuacja bardzo niekorzystna. Innym rozwiązaniem jest zastosowanie metody, która nie zakłada liniowości obiektu. Do wyważania w jednej płaszczyźnie można zastosować metodę czterech uruchomień.

Niekorzystne warunki mogą powodować sąsiadujące maszyny pracujące z taką samą prędkością obrotową. Jeśli drgania przenoszą się na wyważaną maszynę to może wystąpić zjawisko dudnienia widoczne jako zmiana wartości amplitudy i niestabilność kąta fazowego. Najprostszym rozwiązaniem jest wyłączenie na czas wyważania sąsiednich maszyn powodujących problem.

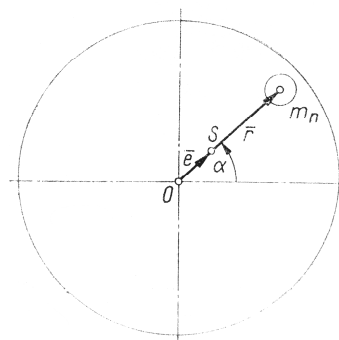
Instalacje wykonane ze sztywnych elementów podłączonych do urządzenia mogą powodować jego przemieszczenia względem silnika, a tym samym wprowadzać niewspółosiowość wałów, którą można błędnie zinterpretować jako niewyważenie. Naprężenia w instalacji mogą być spowodowane wprowadzonymi w niej zmianami np. wymianą zaworu.

2.4. Wyznaczanie niewyważenia wirnika w płaszczyznach korekcji i w środku ciężkości

Niewyważenie występuje jeśli główna oś bezwładności nie pokrywa się z osią obrotu. Siły odśrodkowe wywołane masą wirnika sztywnego nie są zrównoważone w takiej sytuacji i w ogólnym przypadku można je zredukować w środku ciężkości do jednej siły i momentu pary sił lub dwóch wektorów leżących w płaszczyznach korekcji. Zanim jednak taka analiza zostanie przeprowadzona, korzystnie jest rozważyć sytuacje, w których występuje tylko pojedyncza siła powodująca niewyważenie albo para sił.

2.4.1. Niewyważenie i niewyważenie właściwe

Na środku idealnie wyważonego wału o stałej średnicy zamocowana jest tarcza o pomijalnej grubości. Taki wirnik jest doskonale wyważony i środek ciężkości leży na osi obrotu w punkcie O w płaszczyźnie tarczy (rys. 11). Umieszczając na tarczy masę m_n o położeniu określonym wektorem \vec{r} , powoduje się przemieszczenie się środka ciężkości wirnika do punktu S , którego położenie definiuje wektor \vec{e} zwany *mimośrodowością środka ciężkości*.



Rys. 11. Niewyważenia wirnika masą zamocowaną do tarczy [Łączkowski]

Niewyważeniem $\vec{N} = m_n \vec{r}$ nazywa się iloczyn masy m_n i wektora wodzącego \vec{r} . Jak wynika z zależności niewyważenie nie zależy od prędkości kątowej i najczęściej jest wyrażane w g mm. Moduł niewyważenia $|\vec{N}|$ nazywa się *wartością niewyważenia* a kątem α *kątem niewyważenia* (rys. 11).

Siła obciążająca wirnik jest siłą odśrodkową powodowaną przez masę m_n równą:

$$\vec{F} = m_n \vec{r} \omega^2 \quad (1)$$

Można ją też obliczyć bazując na masie całkowitej składającej się z masy wirnika m_w i masy dodanej m_n z zależności:

$$\vec{F} = (m_w + m_n) \vec{e} \omega^2 \quad (2)$$

Porównując prawe strony równania (1) i (2) oraz przekształcając zależność otrzymano wzór:

$$\vec{e} = \frac{m_n \vec{r}}{m_w + m_n} \quad (3)$$

Ponieważ masa wirnika jest znacznie większa od masy niewyważenia, dlatego można zastosować wzór przybliżony na mimośrodkowość środka ciężkości o postaci:

$$\vec{e} = \frac{m_n \vec{r}}{m_w} = \frac{\vec{N}}{m_w} \quad (4)$$

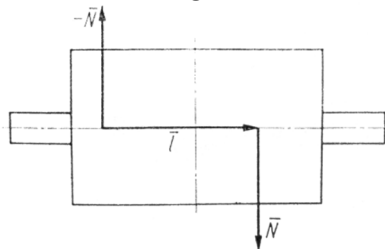
Wartość $\frac{N}{m_w}$ nazywa się *niewyważeniem właściwym*, ze względu na podzielenie przez masę wirnika, co sprawia, że wartość niewyważenia odniesiona jest na jednostkę masy.

2.4.2. Niewyważenie parą sił

Drugi szczególny przypadek obciążenia wirnika jest powodowany przez dwie siły równoległe \vec{N} o równych wartościach, przeciwnych zwrotach i kierunkach prostopadłych do osi obrotu (rys. 12). Tworzą one parę sił, która obciąża wał *momentem niewyważenia* \vec{M}_n równym:

$$\vec{M}_n = \vec{l} \times \vec{N} \quad (5)$$

Z właściwości pary sił wynika, że wektor momentu niewyważenia \vec{M}_n jest prostopadły do płaszczyzny rysunku, w której leżą wektory siły \vec{N} i ramienia \vec{l} . Ponieważ \vec{M}_n jest wektorem swobodnym, jego początek może być dobrany dowolnie. Wartość tego momentu równa jest modułowi $[M_n] = lN$.



Rys. 12. Niewyważenia wirnika momentem niewyważenia \vec{M}_n [Łączkowski]

2.4.3. Ogólny przypadek niewyważenia wirnika

Wirnik sztywny można rozpatrzeć jako składający się z n ($i= 1, \dots, n$) tarcz, których ścianki są prostopadłe do jego osi (rys. 13). Każda tarcza odznacza się niewyważeniem określonym wektorem niewyważenia \vec{N}_i , a w trakcie ruchu występują siły odśrodkowe o wartości $\vec{F}_i = m_{ni} \vec{r}_i \omega^2 = \vec{N}_i \omega^2$. W celu wyznaczenia niewyważań wypadkowych \vec{N}_I i \vec{N}_{II} przyjmuje się dwie dowolnie położone

płaszczyzny korekcji I i II prostopadłe do osi wirnika, oddalone od siebie o dystans a . Równania równowagi momentów względem punktów wyznaczonych przez założone płaszczyzny korekcji i oś wirnika mają postać:

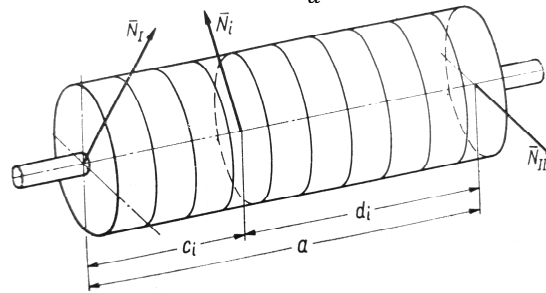
$$\vec{N}_I a \omega^2 = \sum_{i=1}^n \vec{N}_i d_i \omega^2 \quad (7)$$

$$\vec{N}_{II} a \omega^2 = \sum_{i=1}^n \vec{N}_i c_i \omega^2 \quad (8)$$

Po redukcji prędkości kątowej i przekształceniu wzorów (7) i (8) otrzymano zależności na wektory wypadkowe leżące w płaszczyznach korekcji zwane *komplementarnymi wektorami niewyważenia*:

$$\vec{N}_I = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{N}_i d_i}{a} \quad (9)$$

$$\vec{N}_{II} = \frac{\sum_{i=1}^n \vec{N}_i c_i}{a} \quad (10)$$



Rys. 13. Model wirnika składającego się w n tarcz wraz z wyznaczonymi komplementarnymi wektorami niewyważenia \vec{N}_I i \vec{N}_{II} [Łączkowski]

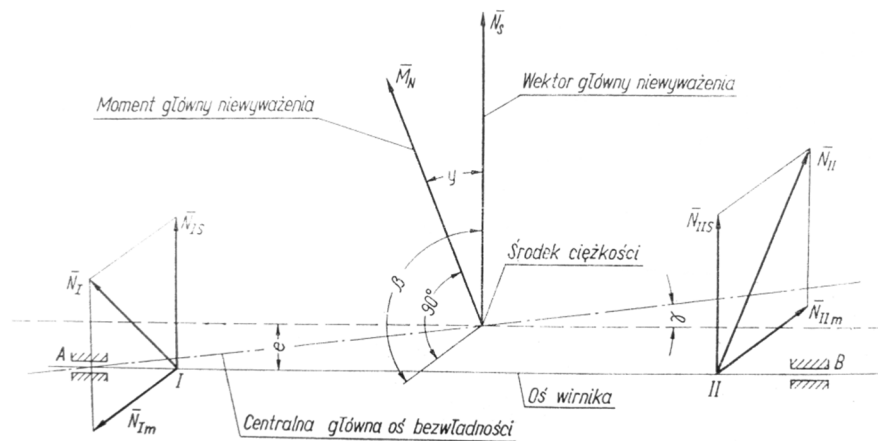
Dowolny przestrzenny układ sił może być zredukowany do siły i pary sił w jakimkolwiek punkcie. Taka analiza zostanie przeprowadzona dla środka ciężkości i wektorów niewyważenia. Wektory niewyważenia \vec{N}_i mogą być zastąpione siłą wypadkową \vec{N}_S , zwaną *wektorem głównym niewyważenia*, a ponieważ wszystkie te siły składowe znajdują się w płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika, również i siła wypadkowa leży w takiej płaszczyźnie, a kierunek jej działania przechodzi przez środek ciężkości:

$$\vec{N}_S = \sum_{i=1}^n \vec{N}_i \approx m_w \vec{e} \quad (11)$$

Należy jeszcze określić moment wypadkowy sił nazywany *momentem głównym niewyważenia* \vec{M}_N . Jest on równy sumie iloczynów wektorowych odległości między środkiem ciężkości a początkiem wektorów niewyważenia \vec{h}_i i wektorami niewyważenia \vec{N}_i :

$$\vec{M}_N = \sum_{i=1}^n \vec{h}_i \times \vec{N}_i \quad (12)$$

Wektor momentu głównego niewyważenia \vec{M}_N jest prostopadły do głównej osi bezwładności i osi wirnika (rys. 14). Jeśli główna oś bezwładności przecina się z osią wirnika, to wektor momentu jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez te osie.



Rys. 14. Wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia rozłożone na komplementarne wektory niewyważenia \vec{N}_I i \vec{N}_{II} [Łączkowski]

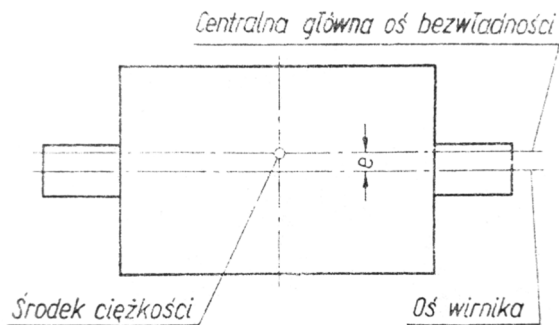
Wektor główny niewyważenia można rozłożyć zgodnie z warunkami równowagi sił i momentów na dwie składowe równoległe \vec{N}_{IS} i \vec{N}_{IIS} , leżące w dwóch dowolnie wybranych płaszczyznach korekcji. Moment główny niewyważenia również zastępuje się parą sił \vec{N}_{Im} i \vec{N}_{IIIm} leżącą w tych samych płaszczyznach korekcji. Z definicji pary sił wynika, że są to siły równoległe, o takich samych wartościach i przeciwnych zwrotach, a wartość momentu pary sił równa jest iloczynowi modułu jednego z wektorów i najmniejszej odległości między ich kierunkami. Po zsumowaniu składowych wektorów głównego niewyważenia i momentu głównego otrzymano dwa komplementarne wektory niewyważenia (rys. 14). Wynika z tego, że dowolny stan niewyważenia wirnika sztywnego może być jednoznacznie przedstawiony poprzez dwa komplementarne wektory niewyważenia lub wektor głównego niewyważenia i moment główny niewyważenia. Dodatkowo należy zauważyć, że do wyważenia wirnika sztywnego w ogólnym przypadku potrzebne i wystarczające są dwie niepokrywające się płaszczyzny korekcji.

2.5. Podział niewyważień wirnika ze względu na szczególne przypadki obciążenia

Zanim zostanie podany podział należy zaznaczyć, że każde niewyważenie jest z natury dynamiczne, ponieważ występuje tylko podczas ruchu. W praktyce warsztatowej ukształtował się podział na niewyważenie statyczne i dynamiczne. Nazwa niewyważenie statyczne pochodzi od okoliczności, w których można je zaobserwować i zniwelować. Wirnik nie musi być napędzany, wystarczy go tylko oprzeć czopami na prowadnicach, rolkach albo tarczach, a przy dużych wartościach niewyważenia i małych oporach węzłów łożyskowych może się to odbyć w łożyskach własnych. Niewyważenie statyczne spowoduje ruch wirnika. Natomiast do zaobserwowania i wyważenia dynamicznego konieczne jest wprawienie elementu wyważanego w ruch. Bardziej szczegółowa klasyfikacja występuje w rozważaniach teoretycznych mających na celu określenie oddziaływania sił odśrodkowych na łożyska i ustalenie sposobu ich zrównoważenia. Niewyważenie dzieli się w tym przypadku na: statyczne, momentowe, quasi-statyczne i dynamiczne.

2.5.1. Niewyważenie statyczne

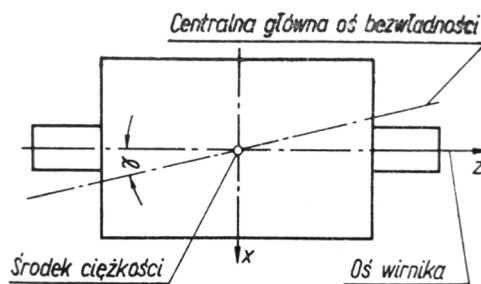
Ten typ niewyważenia występuje, jeśli główna oś bezwładności jest równoległe przesunięta względem osi obrotu (rys. 15). Siły reakcji w łożyskach spowodowane niewyważeniem są zgodne w fazie. Do jednoznacznego określenia potrzebna jest znajomość tylko wektora głównego niewyważenia (moment główny niewyważenia jest równy zero) albo jednego komplementarnego wektora niewyważenia znajdującego się w płaszczyźnie przechodzącej przez środek ciężkości. Wynika z tego, że wyważenie może być przeprowadzone tylko w jednej płaszczyźnie korekcji, przy czym ze względów praktycznych może zachodzić potrzeba podziału masy korekcyjnej na dwie płaszczyzny. Wartość niewyważenia określona jest poprzez wartość mimośrodowości środka ciężkości.



Rys. 15. Położenie osi obrotu i głównej osi bezwładności przy niewyważeniu statycznym [Łączkowski]

2.5.2. Niewyważenie momentowe

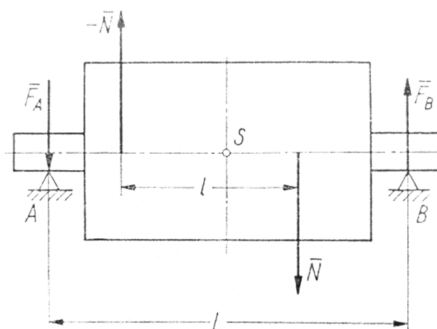
Jest to stan, w którym oś obrotu i główna oś bezwładności przecinają się w środku ciężkości (rys. 16). Wartości sił reakcji są w fazie przeciwnej, czyli przesunięcie wynosi 180° .



Rys. 16. Położenie osi obrotu i głównej osi bezwładności przy niewyważeniu momentowym [Łączkowski]

Do określenia niewyważenia może zostać zastosowany tylko moment główny niewyważenia (wektor główny niewyważenia jest równy zero) albo dwa komplementarne wektory niewyważenia. Oznacza to, że wyważanie musi być przeprowadzone w dwóch płaszczyznach korekcji poprzez parę sił. Nie musi występować symetria względem środka ciężkości tej pary sił (rys. 17), a jej wartość powinna być równa momentowi głównemu niewyważenia:

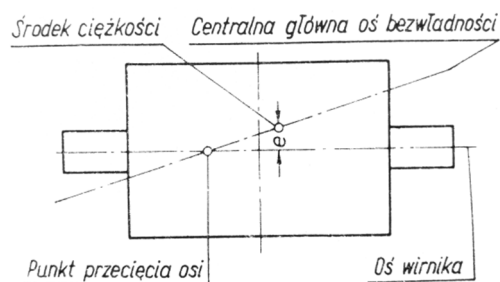
$$M_N = Nl \quad (13)$$



Rys. 17. Położenie osi obrotu i głównej osi bezwładności przy niewyważeniu statycznym [Łączkowski]

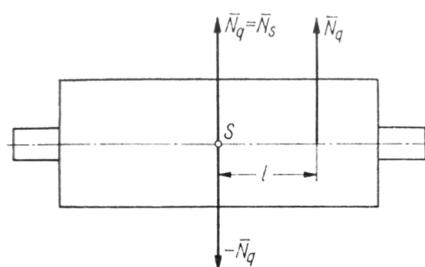
2.5.3. Niewyważenie quasi-statyczne

Jeżeli główna oś bezwładności przecina się z osią obrotu poza środkiem ciężkości, to występuje niewyważenie quasi-statyczne (rys. 18). Wartości sił reakcji są w fazie przeciwnej, czyli przesunięcie wynosi 180° .



Rys. 18. Położenie osi obrotu i głównej osi bezwładności przy niewyważeniu quasi-statycznym [Łączkowski]

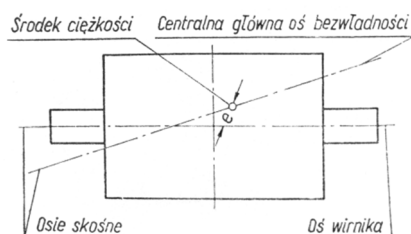
Stan taki może powstać w wyniku dodania masy do wyrównoważonego wirnika w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu i nieprzechodzącej przez środek ciężkości. Wywoła to siłę oznaczoną na rys. 19 jako \vec{N}_q . Jeżeli w środku ciężkości zostaną przyłożone dwa wektory \vec{N}_q o przeciwnych zwrotach, to można takie obciążenie interpretować jako wektor główny niewyważenia $\vec{N}_s = \vec{N}_q$ i moment główny niewyważenia o wartości $M_N = N_q l$. Tak więc niewyważenie quasi-statyczne można traktować jako sumę niewyważenia statycznego i dynamicznego. Para sił tworząca moment główny niewyważenia i wektor główny niewyważenia leżą w jednej płaszczyźnie korekcji.



Rys. 19. Niewyważenie quasi-statyczne spowodowane wektorem \vec{N}_q [Łączkowski]

2.5.4. Niewyważenie dynamiczne

Jest to ogólny stan niewyważenia, w którym oś obrotu wirnika i główna oś bezwładności nie są równoległe i nie przecinają się, czyli są skośne (rys. 20). Kąt fazowy siły reakcji łożysk jest dowolny z wyłączeniem 0° (360°) i 180° . Ten rodzaj niewyważenia również można interpretować jako superpozycję niewyważenia statycznego i dynamicznego, przy czym wektor główny niewyważenia i para sił tworząca moment główny niewyważenia nie leżą w jednej płaszczyźnie. Oprócz wymienionej siły i momentu ten rodzaj niewyważenia może być jednoznacznie określony dwoma komplementarnymi wektorami niewyważenia, a więc masy korekcyjne muszą być umieszczone przynajmniej w dwóch płaszczyznach.



Rys. 20. Położenie osi obrotu i głównej osi bezwładności przy niewyważeniu dynamicznym [Łączkowski]

2.6. Wyważanie wirników sztywnych w łożyskach własnych

Przystępując do wyważania in situ należy się upewnić czy możliwe jest:

- uruchamianie i zatrzymywanie urządzenia oraz kontrolowanie prędkości obrotowej i obciążenia,
- dostęp do wirnika, umożliwiający korygowanie masy oraz odczyt kąta fazowego (dla metod wymagających takiego pomiaru).

Bardzo ważną kwestią jest bezpieczeństwo, dlatego należy zadbać o to, aby nie było możliwości przypadkowego włączenia urządzenia. Wirnik może być wprawiony w ruch również z innych powodów, np. w wentylatorach przez przepływające powietrze. Należy zapobiec takim sytuacjom. Kolejnym zagrożeniem jest użyta dodatkowa masa. Jej mocowanie musi być pewne, a w trakcie próby należy być w bezpiecznym miejscu, czyli takim, w którym szansa na wystąpienie ciężarka po jego oderwaniu jest jak najmniejsza lub za solidnym obiektem. Dodatkowo zagrożenie może wynikać z gorących części, gorącego powietrza, szkodliwych oparów, ostrych krawędzi itp.

Wyważanie przeprowadzane jest jako statyczne albo częściej jako dynamiczne. Norma ISO 19499:2007 podaje ogólne wytyczne, w których określa, że wyważanie może być przeprowadzone jako statyczne dla sztywnej tarczy prostopadłej do osi obrotu osadzonej na elastycznym wale, którego niewyważenie może być zaniedbane dla każdej prędkości obrotowej. Norma Departamentu Obrony Stanów Zjednoczonych MIL-STD-167-1A (2005) przewiduje możliwość wyważania statycznego dla wirników o odpowiednim stosunku długości L do średnicy D w zależności od prędkości obrotowej n , a mianowicie:

- $L/D \leq 0.5$ dla $n = 0 - 1000$ obr/min,
- $L/D \geq 0.5$ dla $n = 0 - 150$ obr/min.

Jeśli warunki nie są spełnione, należy przeprowadzić wyważenie dynamiczne.

Metody wyważania można podzielić na amplitudowe i amplitudowo-fazowe. W metodach amplitudowo-fazowych dokonywany jest pomiar amplitudy i fazy drgań. Obecnie powszechnie stosowana jest metoda współczynników wpływu. Podstawową zaletą tej metody jest krótki czas przeprowadzania procesu. Przy ponownym wyważaniu tego samego wirnika możliwe jest, przy pierwszym uruchomieniu, ustalenie docelowych mas korekcyjnych bez mocowania czegokolwiek. Jest to możliwe pod warunkiem zapisania w pamięci urządzenia współczynników wpływu uzyskanych na tym obiekcie przy poprzednim wyważaniu. Do wad należy zaliczyć to, że metoda zakłada liniowość obiektu i dlatego jest najskuteczniejsza dla sztywnych wirników z dość podatnym podparciem i prędkości obrotowej znacznie niższej od krytycznej. Metody amplitudowe wymagają pomiaru tylko amplitudy a więc koszt urządzeń jest znacznie niższy niż z pomiarem fazy. Popularna jest metoda czterech uruchomień (ang. four run method) dla wyważania statycznego i metoda siedmiu uruchomień (ang. seven run method) dla wyważania dynamicznego w dwóch płaszczyznach. Metoda czterech uruchomień daje dobre rezultaty w większości przypadków nawet dla prędkości rezonansowych, obliczenia mogą być przeprowadzone graficznie na wykresie biegunowym. Jeśli w sygnale dominująca częstotliwość pochodzi od niewyważenia, to taki sygnał może być niefiltrowany przy pomiarze amplitudy. Do wad zalicza się konieczność czterokrotnego pomiaru amplitudy, pierwszy w stanie zastanym i z masą próbną w trzech pozycjach.

Jedną z kwestii, którą należy określić w trakcie wyważania, jest położenie i wielkość masy próbnej. Generalnie zakłada się dla metod amplitudowo-fazowych, że zmiana amplitudy powinna wynieść min. 30%, a kąt powinien się zmienić o min. 30°. Zbyt mała masa nie wywoła wyraźnej zmiany amplitudy, zbyt duża może spowodować nadmierne obciążenie urządzenia. W literaturze podawane są różne zalecenia, tutaj zostanie przytoczona reguła, która definiuje, że zastosowana masa powinna wywołać obciążenie równe 10% obciążenia statycznego, czyli ciężaru wirnika. Z zależności na siłę odśrodkową F_{od} otrzymuje się:

$$F_{od} = m_p \omega^2 r = 0,1 m_w g$$

gdzie:

F_{od} – siła odśrodkowa w N,

m_p – masa próbna w kg,

m_w – masa wirnika w kg,

ω – prędkość kątowna w rad/s,

g – przyspieszenie ziemskie $9,81 \text{ m/s}^2$,

r – promień osadzenia masy próbnej w m,

n – prędkość obrotowa w obr/min.

a po przekształceniu masę próbną można wyznaczyć z zależności:

$$m_p = \frac{0,1m_w g}{\omega^2 r} = \frac{0,1m_w g}{\left(\frac{\pi n}{30}\right)^2 r} \text{ [kg]} \quad (14)$$

Wzór przybliżony, w którym masa wirnika m_w jest w kg, promień osadzenia r w mm, a wynik masy próbnej m_p w g ma postać:

$$m_p \approx \frac{10^8 m_w}{n^2 r} \text{ [g]} \quad (15)$$

2.6.1. Metoda czterech uruchomień

Jest to metoda umożliwiająca statyczne wyważanie wirników na podstawie pomiaru tylko amplitudy drgań. Nie ma wpływu na wynik to, czy dokonuje się pomiaru przemieszczenia, prędkości czy przyspieszenia drgań. Etapy procesu z wykorzystaniem metody graficznej na wykresie biegunowym są następujące:

1. Odczytać amplitudę drgań wirnika w stanie zastanym A_z i narysować czerwony okrąg na wykresie o współrzędnych środka $S(0,0)$ i promieniowi równym odczytanej amplitudzie (rys. 21).
2. Narysować trzy znaczniki o współrzędnej kątowej 0° , 120° i 240° na czerwonym okręgu. Na wyważanym wirniku również nanieść trzy oznaczenia 0° , 120° i 240° .
3. Umieścić masę próbną na wirniku w 0° , odczytać amplitudę i narysować niebieski okrąg, którego środkiem jest znacznik 0° a promień jest równy odczytanej amplitudzie.
4. Powtórzyć kroki dla dwóch pozostałych położeń.
5. Okręgi powinny się przeciąć w jednym punkcie, jeśli system jest liniowy.
6. Narysować wektor \vec{W} , którego początek ma współrzędne $(0,0)$ a koniec jest w miejscu przecięcia okręgów. Z modułu wektora określa się wartość masy korekcyjnej m_k z zależności:

$$m_k = \frac{A_z}{|\vec{W}|} m_p \quad (16)$$

gdzie:

m_k – masa korekcyjna w g,

A_z – wartość amplitudy drgań wirnika w stanie zastanym, jednostka zgodnie z przyjętą,

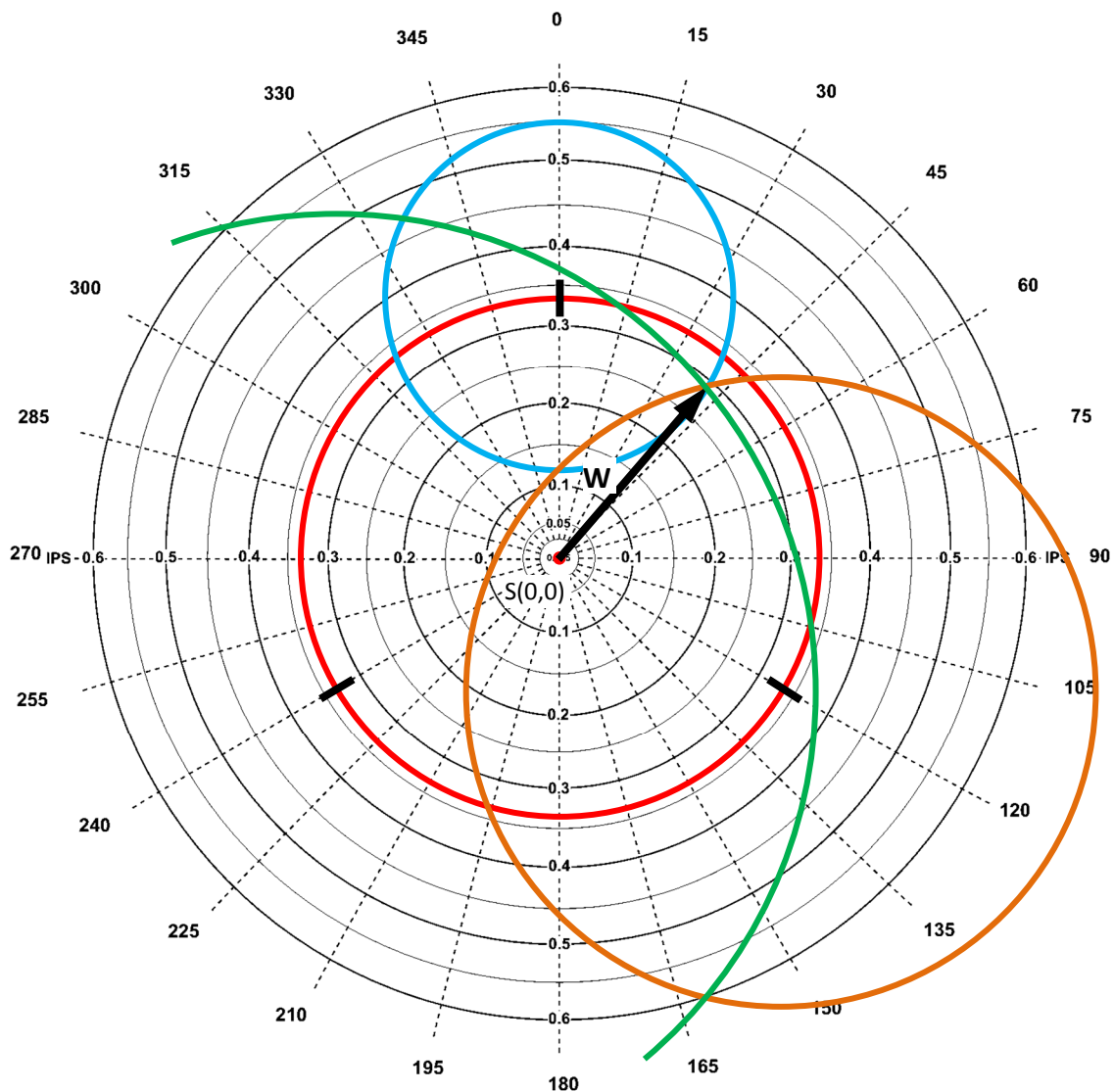
$|\vec{W}|$ – moduł (długość) wektora wyznaczonego przez współrzędne bieguny $(0,0)$ i przecięcie trzech okręgów, jednostka zgodnie z przyjętą,

m_p – masa próbna w g.

Kąt umieszczenia masy odczytujemy dla wektora \vec{W} z wykresu, a na wale masę korekcyjną umieszczamy zgodnie z oznaczeniami wykonanymi dla pozycji masy próbnej.

7. Jeśli okręgi się nie przetną szukamy geometrycznego środka albo punktu najbliższego trzech okręgów.

W przedstawionym sposobie postępowania założono, że promień osadzenia dla masy próbnej i korekcyjnej jest taki sam, a waga masy próbnej dla trzech pozycji jest stała.



Rys. 21. Wyznaczanie wektora siły korygującej niewyważenie metodą czterech uruchomień [pusty wykres – Smart Avionics]

3. Przebieg laboratorium

- I. Sprawdzić, czy możliwe jest bezpieczne wyważenie wurnika.
- II. Ocenic przyczyny niewyważenia wurnika, ustalic najdogodniejsze miejsce mocowania mas.
- III. Wyznaczyć wagę masy próbnej z zależności (14) na podstawie masy wału i dwóch tarcz, których dane są w załączniku.
- IV. Wyznaczyć wagę i położenie masy korekcyjnej metodą czterech uruchomień.
- V. Zanotować amplitudę niewyważenia resztkowego.

3.1. Sprawozdanie

- I. Cel i zakres laboratorium.
- II. Opis stanowiska.
- III. Zestawienie wyników badań w formie tabel i wykresów.
- IV. Podsumowanie.

4. Podstawowe wymagania BHP

1. Zabrania się włączania, wyłączenia, podłączania, odłączania, manipulowania przy stanowisku pomiarowym i obiekcie badań bez wyraźnego polecenia prowadzącego zajęcia.
2. Należy zachować szczególną ostrożność przy urządzeniach elektrycznych i z częściami wirującymi.
3. Wszelkie wypadki, niesprawności, uszkodzenia i awarie należy niezwłocznie zgłaszać do prowadzącego zajęcia.
4. Przebywanie w okryciu wierzchnim, spożywanie jedzenia i picia oraz wykonywanie innych czynności niezwiązanych z zajęciami jest zabronione.

5. Literatura

1. Łączkowski R.: Wyważanie elementów wirujących. WNT, Warszawa 1979.
2. Mobius Institute. Firma szkoleniowa z zakresu diagnostyki maszyn. Dostępny w Internecie: <http://www.mobiusinstitute.com>.
3. Wowk V.: Field balancing revealed. Sometimes it's simply a game of chance. Uptime Magazine 2007, str. 28 – 32. Dostępny w Internecie: https://www.machinedyn.com/docs/articles/Field_Balance_Revealed_Uptime_Feb2007.pdf
4. ISO 19499:2007 Mechanical vibration – Balancing – Guidance on the use and application of balancing standards.
5. MIL-STD-167-1A (2005) - Mechanical vibrations of shipboard equipment (type I – environmental and type II – internally excited).
6. Smart Avionics. Producent awioniki. Rysunek pustego wykres biegunowego. Dostępny w Internecie: <http://www.smartavionics.com/pb2/polar-chart.pdf>.
7. Kot W., Wiciak P., Kosiński M.: Dokumentacje techniczne. EC Systems 2014.

6. Pytania kontrolne

1. Wyjaśnij pojęcia: wyważanie, wirnik, wirnik sztywny i wyważanie w łożyskach własnych.
2. W jakim celu przeprowadza się wyważanie?
3. Podaj główne przyczyny występowania niewyważenia.
4. Wymień inne przyczyny powodujące podobne skutki do niewyważenia. Dlaczego należy w pierwszej kolejności usunąć te inne nieprawidłowości przed wyważaniem?
5. Co to jest niewyważenie i niewyważenie właściwe?
6. Wymień dwa sposoby jednoznacznego opisu stan dowolnego rodzaju niewyważenia.
7. Omów podział niewyważień wirnika ze względu na szczególne przypadki obciążenia.
8. Jakie warunki muszą być spełnione, aby była możliwość przeprowadzenia wyważania w łożyskach własnych? Wymień występujące zagrożenia dla zdrowia i sposoby ich minimalizacji.
9. W jaki sposób dobiera się masę próbną?
10. Przedstaw proces wyważania metodą czterech uruchomień.

Załączniki

I. Wyznaczanie masy

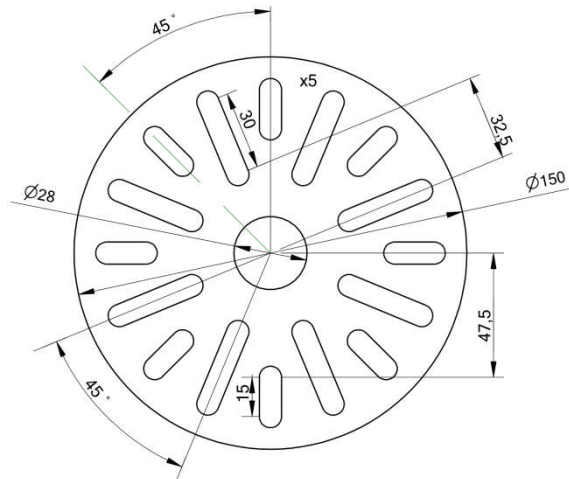
Zależność na wyznaczenie masy m na podstawie znajomości gęstości ρ i objętości v :

$$m = v\rho$$

m – masa w kg,
 v – objętość w m^3 ,
 ρ – gęstość w kg/m^3 .

Wymiary wału $\varnothing 20 \times 550$, materiał stal 1.4401, gęstość $\rho = 8000 \text{ kg/m}^3$

Wymiary charakterystyczne tarczy umieszczonej na wale, grubość tarczy 5 mm, $\rho = 7830 \text{ kg/m}^3$, rys. [Kot i inni]



UWAGA: Waga pojedynczego elementu stosowanego do wyważania, składającego się z śruby dwustronnej, dwóch nakrętek kołpakowych oraz dwóch podkładek płaskich i sprężystych ząbkowanych zewnątrz, wynosi ok. 27 g.

II. Wykres biegunowy, rys. [Smart Avionics]

