

Teoria wyważania wirników

zarys zagadnienia

Wprowadzenie

Każdy wirnik obracający się z prędkością kątową ω generuje siły odśrodkowe. Gdy rozkład masy wirnika jest idealnie symetryczny względem osi obrotu, siły te równoważą się wzajemnie i wirnik nie przekazuje na łożyska żadnego dodatkowego obciążenia dynamicznego. W praktyce taka symetria nigdy nie występuje w sposób doskonały — błędy wykonania, niejednorodność materiału, luzy montażowe czy zużycie eksploatacyjne sprawiają, że środek ciężkości wirnika (a ściślej: jego główna, centralna oś bezwładności) nie pokrywa się z geometryczną osią wirowania. Taki stan nazywamy niewyważeniem, a proces jego usuwania — wyważaniem.

Niniejszy artykuł porządkuje podstawy teoretyczne wyważania: od źródeł niewyważenia, przez jego klasyfikację i sposoby opisu matematycznego, po praktyczne metody wyważania wirników sztywnych i giętkich, modelowanie układu pomiarowego oraz specyfikę wyważania w warunkach warsztatowych (w łożyskach własnych) w porównaniu z wyważaniem na dedykowanych maszynach (wyważarkach stacjonarnych).

Rozdział 1. Źródła i istota niewyważenia

Wirnik może być niewyważony z wielu powodów, których nie sposób w pełni wyliczyć. Do najważniejszych należą:

- błędy mocowania elementów konstrukcyjnych — tzw. „bicie” promieniowe lub kątowe,
- nieskompensowane ubytki materiału (podfrezowania, wpusty, otwory technologiczne),
- niejednorodna gęstość materiału, z którego wykonane są elementy wirnika,
- błędy kształtu powstałe w procesie produkcji.

Gdy rozkład masy w płaszczyźnie prostopadłej do osi wirowania nie jest kołowsymetryczny, środek ciężkości tej płaszczyzny („poła masowego”) przesuwają się względem osi obrotu. Jeśli lokalny nadmiar masy potraktujemy jako dyskretny element dm znajdujący się w odległości r od osi, to przesunięcie środka ciężkości całego wirnika o masie M wynosi:

$$e = (dm / M) \cdot r$$

Wielkość e jest miarą mimośrodowości i stanowi punkt wyjścia do ilościowego opisu niewyważenia — im większe dm i większy promień r , na którym ono działa, tym silniejszy efekt dynamiczny przy danej prędkości obrotowej.

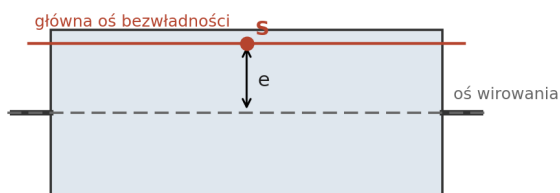
Niewyważenie statyczne i dynamiczne

W zależności od tego, jak główna oś bezwładności wirnika jest położona względem osi wirowania, rozróżnia się dwa podstawowe przypadki:

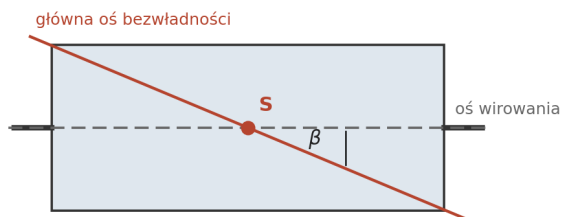
Niewyważenie statyczne występuje, gdy główna, centralna oś bezwładności jest równoległa do osi wirowania, ale od niej przesunięta. Środek ciężkości wirnika nie leży na osi obrotu. Taki stan można wykryć bez wprawiania wirnika w ruch — wirnik ułożony na poziomych pryzmach samoczynnie obróci się tak, aby jego środek ciężkości zajął najniższe możliwe położenie. Stąd nazwa: efekt jest obserwowalny statycznie.

Niewyważenie dynamiczne (czasem nazywane momentowym) występuje, gdy główna oś bezwładności nie jest równoległa do osi wirowania, lecz przecina się z nią w punkcie środka ciężkości. Na pryzmach taki wirnik pozostaje w równowadze w dowolnym położeniu kątowym — efektu nie da się wykryć bez wprawiania wirnika w ruch obrotowy. Ujawnia się on dopiero jako para sił działających na łożyska w przeciwnych fazach.

Niewyważenie statyczne
(osie równoległe, przesunięte o e)



Niewyważenie dynamiczne
(osie przecinają się w środku masy S)



Rys. 1. Niewyważenie statyczne (osie równoległe, przesunięcie e) i dynamiczne (osie przecinają się w środku masy S).

W ogólnym przypadku rzeczywisty wirnik wykazuje kombinację obu efektów. Pełny opis wymaga rozróżnienia jeszcze dwóch stanów pośrednich:

- niewyważenie quasistatyczne — oś główna bezwładności i oś wirowania przecinają się poza środkiem masy; siły reakcji N_1 i N_2 w dwóch płaszczyznach korekcji mają różne wartości bezwzględne ($|N_1| \neq |N_2|$), a wypadkowy moment $M = 0$,
- niewyważenie kinematyczne — przypadek graniczny, w którym $e = 0$, a osie przecinają się w innym punkcie niż środek masy; $|N_1| = |N_2|$, ale działają jako para sił.

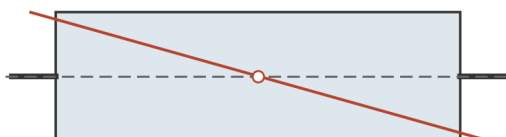
Niewyważenie statyczne
 $N_1 = N_2$ ($S \neq 0, M = 0$)



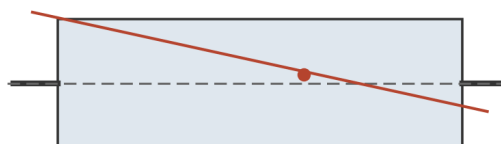
Niewyważenie quasistatyczne
 $|N_1| \neq |N_2|$ ($M = 0$)



Niewyważenie kinematyczne
 $|N_1| = |N_2|$ ($e = 0$)



Niewyważenie dynamiczne
 $N_1 \neq N_2$, różne płaszczyzny



Rys. 2. Cztery podstawowe przypadki wzajemnego położenia osi wirnika i odpowiadające im typy niewyważenia.

Płaszczyzny korekcji i pomiaru

Aby praktycznie skorygować rozkład masy, niewyważenie „rozłożone” wzdłuż długości wirnika sprowadza się — zgodnie z zasadami statyki — do dwóch wypadkowych wektorów sił działających w dwóch dowolnie wybranych płaszczyznach prostopadłych do osi wirowania, zwanych płaszczyznami korekcji (K_1 , K_2). Niezależnie od nich definiuje się płaszczyzny pomiarowe (P_1 , P_2), w których umieszcza się czujniki drgań. Płaszczyzny korekcji i pomiarowe nie muszą się pokrywać — o ich wzajemnym położeniu decydują warunki pomiarowe i możliwości fizycznej korekcji masy. Warto jednak pamiętać, że współczynniki kalibracyjne wyznacza się tym precyzyjniej, im bliżej siebie leżą płaszczyzny korekcyjne i pomiarowe.



Rys. 3. Płaszczyzny korekcji K_1 , K_2 i płaszczyzny pomiarowe P_1 , P_2 na wirniku.

Niewyważenie wirnika sztywnego można więc przedstawić na dwa równoważne sposoby: (1) jako dwa wektory sił N_1 i N_2 działające w płaszczyznach korekcji K_1 i K_2 , albo (2) jako układ: siła główna (wypadkowa) + moment główny, liczony względem płaszczyzny przechodzącej przez linię działania siły wypadkowej.

Rozdział 2. Wyważanie wirnika sztywnego — definicje i klasyfikacja błędów

Wirnik sztywny jest wyważony, gdy jego główna, centralna oś bezwładności pokrywa się z geometryczną osią wirowania — podczas ruchu obrotowego nie powstają wówczas żadne siły odśrodkowe działające na łożyska.

Wyważaniem nazywamy taką zmianę rozkładu masy wirnika, która przesuwa główną, centralną oś bezwładności w pobliże osi wirowania, w granicach przyjętej tolerancji. Proces ten składa się zawsze z dwóch czynności: pomiaru wartości niewyważenia oraz wykonania czynności technologicznej (np. spawania, wiercenia, dospawania odważnika), która realizuje założoną zmianę rozkładu masy.

Zależnie od tego, jak środek ciężkości i główna oś bezwładności są położone względem osi wirowania, praktyka wyróżnia charakterystyczne przypadki błędów montażowych i odpowiadające im typy niewyważenia:

Przypadek	Niewyważenie w K_1 , K_2	Efekt wypadkowy
Brak błędów montażowych	$N_1 = 0$, $N_2 = 0$	Wirnik całkowicie wyważony
Przemieszczenie środka masy ($c = 0$)	$N_1 = N_2$	Wypadkowa $S \neq 0$, moment $M = 0$ — niewyważenie statyczne
Przesunięcie środka masy, osie przecinają się w punkcie c	$ N_1 \neq N_2 $	$M = 0$ — niewyważenie quasistatyczne

Przypadek	Niewyważenie w K_1, K_2	Efekt wypadkowy
Osie przecinają się w punkcie $s, e = 0$	$ N_1 = N_2 $	Para sił F_1, F_2 — niewyważenie kinematyczne
Przesunięcie środka masy, osie się nie przecinają	$N_1 \neq N_2$, różne płaszczyzny	F_1 i F_2 w jednej płaszczyźnie, S w innej — niewyważenie dynamiczne

Rozdział 3. Wyważanie wirników giętkich

Odształcenie wirnika podatnego

Powyższy opis dotyczy wirnika sztywnego, dla którego odształcenie wału pod wpływem sił odśrodkowych jest pomijalne. W praktyce, przy dostatecznie dużych prędkościach obrotowych lub dostatecznie smukłych konstrukcjach, wał ulega ugięciu — mówimy wtedy o wirniku giętkim.

Dla pojedynczego, elementarnego wycinka wirnika, którego środek masy jest oddalony o e od geometrycznego środka pola (pokrywającego się w spoczynku z osią wirowania), siła odśrodkowa wynosi:

$$F = m \cdot \omega^2 \cdot e$$

Wraz z obrotami wirnik odkształca się sprężysto, co zwiększa promień r , na jakim działa siła odśrodkowa, a to z kolei zwiększa samą siłę. Proces narastania ugięcia trwa aż do osiągnięcia równowagi między siłami sprężystości odkształconego wirnika a siłami bezwładności i wymuszeniem. Efektem jest tzw. niewyważenie postaciowe — oś wirnika przyjmuje w ruchu złożony, zakrzywiony kształt.

Kąt wyprzedzenia siły i mechanizm tworzenia się postaci drgań

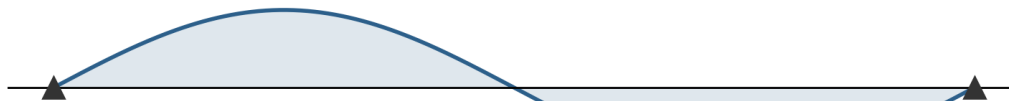
Kierunek działania siły odśrodkowej wyprzedza w fazie płaszczyznę ugięcia wału, obracając się względem niej w kierunku obrotów. Wielkość tego wyprzedzenia zależy od relacji między aktualną prędkością obrotową a prędkością rezonansową: poniżej pierwszego rezonansu kąt wyprzedzenia zawarty jest między 0° a 90° , dokładnie w rezonansie wynosi 90° , a powyżej rezonansu jest rozarty, a siła zaczyna działać w kierunku środka krzywizny wału (efekt „samocentrowania”).

To właśnie ten mechanizm — postępujące przesuwanie się fazy siły wymuszającej względem układu odniesienia związanego z wałem — jest podstawowym warunkiem tworzenia się kolejnych postaci drgań wirnika giętkiego, analogicznie do postaci drgań własnych struny czy belki. Pierwsza postać tworzy się przy prędkości poniżej pierwszej rezonansowej i przyjmuje kształt zbliżony do połowy sinusoidy. Powyżej pierwszego rezonansu następuje samocentrowanie od jednego z końców wału, gdzie zaczyna tworzyć się węzeł drgań — jest to początek narastania drugiej postaci ugięcia.

Pierwsza postać drgań (ω_1)



Druga postać drgań (ω_2)



Trzecia postać drgań (ω_3)



podpora

długość wirnika

podpora

Rys. 4. Pierwsza, druga i trzecia postać drgań wirnika giętkiego podpartego na obu końcach.

Klasyfikacja wirników giętkich

Norma PN-93/N-01362 dzieli wirniki giętkie na pięć klas, różniących się podejściem do wyważania:

- Klasa 1 — wirniki wyważalne metodami dla wirników sztywnych, w dwóch płaszczyznach korekcyjnych; nie wykazują podbicia rezonansowego po skutecznej korekcji.
- Klasa 2 — wirniki o cechach pośrednich (np. ciężka tarcza na podatnym, lekkim wale); wyważane zmodyfikowanymi metodami wolnoobrotowymi, minimalizującymi jednocześnie siły, momenty i niewyważenie postaciowe.
- Klasa 3 — wirniki wymagające metod wyważania szybkoobrotowego, wykorzystujących zjawisko uginania się wału; podzielone na podklasy według liczby możliwych postaci ugięcia.
- Klasa 4 — wirniki złożone, wymagające wyważania przy wielu prędkościach obrotowych z powodu dodatkowych, podatnie zamocowanych elementów.
- Klasa 5 — wirniki mogące wykazywać kilka postaci ugięcia, lecz z przyczyn technologicznych wyważane tylko przy jednej prędkości roboczej.

Metody wyważania wirników giętkich

Dla klasy trzeciej stosuje się dwie podstawowe metody.

Metoda wyważania postaciowego

Polega na obliczeniu kolejnych mas korekcyjnych dla kolejnych postaci ugięcia. Opiera się na dwóch zasadach: (a) wzajemnej ortogonalności wpływu odważników — korekta jednej postaci nie zwiększa obciążenia innych, jeśli odważniki mocuje się w węzłach postaci poprzednich, oraz (b) zmienności niewyważenia postaciowego

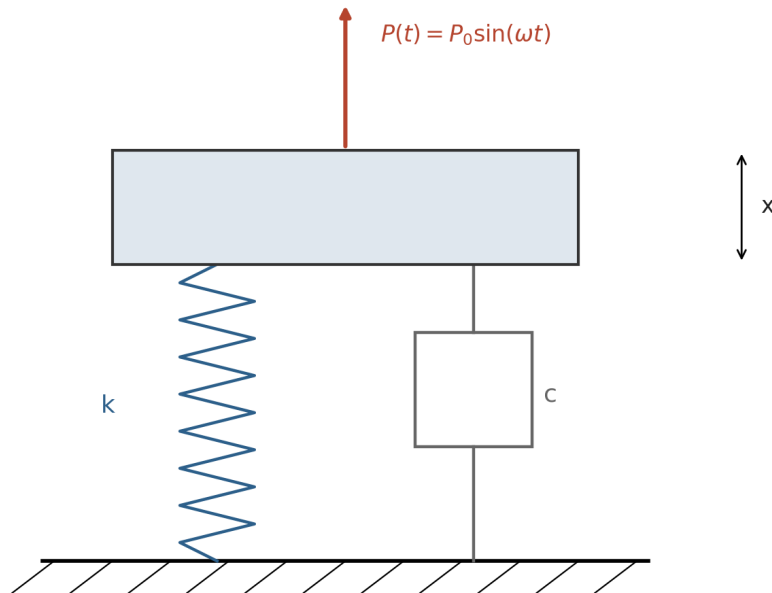
z niewyważeniem dyskretnym — ugięcie postaciowe można wyeliminować, mocując odpowiednio dobrane masy skupione.

Metoda (N+2)

Jest dwuetapowa: najpierw wykonuje się wstępne wyważenie wolnoobrotowe wirnika traktowanego jako sztywny (w dwóch płaszczyznach korekcyjnych), likwidując siłę i moment od niewyważenia sztywnego; następnie, przy prędkości szybkoobrotowej, koryguje się wybraną postać ugięcia, mocując odważniki tak, by nie naruszały już osiągniętej równowagi sztywnej.

Rozdział 4. Model dynamiczny miejsca pomiaru — układ o jednym stopniu swobody

Maszyna wirnikowa jako całość jest układem mechanicznym o wielu stopniach swobody. Dla potrzeb wyważania nie modeluje się jednak całego wirnika, lecz wyłącznie zachowanie punktu, w którym zamocowany jest czujnik drgań — sprowadzając je do prostego modelu jednomasowego (masa–sprężyna–tłumik), pobudzanego siłą harmoniczną pochodzącą od niewyważenia.



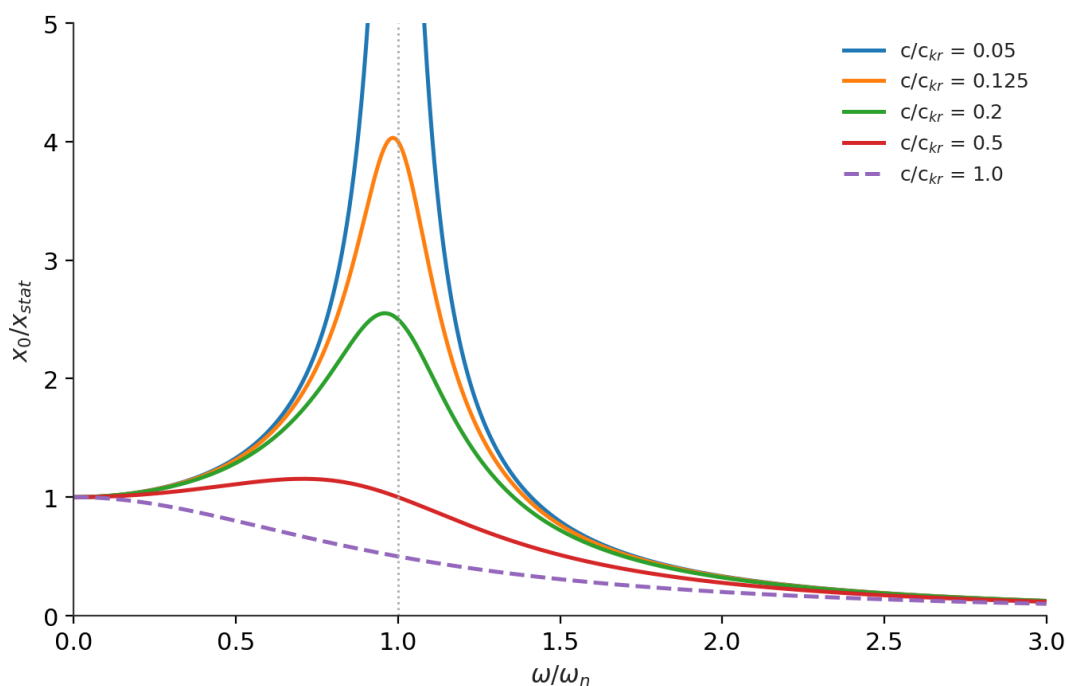
Rys. 5. Model dynamiczny miejsca pomiaru: układ masa–sprężyna–tłumik z wymuszeniem harmonicznym $P(t)$.

Ruch takiego układu opisuje klasyczne równanie różniczkowe drugiego rzędu:

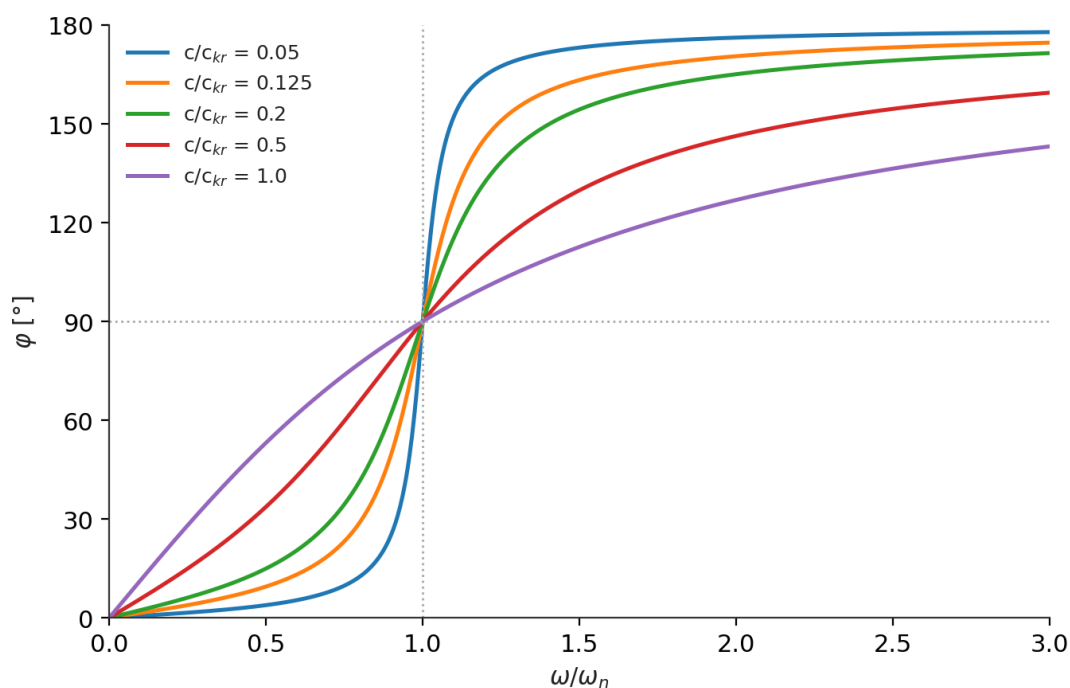
$$m \cdot x'' + c \cdot x' + k \cdot x = P \cdot \sin(\omega t)$$

gdzie $m \cdot x''$ to siła bezwładności, $c \cdot x'$ — siła tłumienia, $k \cdot x$ — siła sprężystości, a $P(t)$ — siła wymuszająca. Jego rozwiązanie w stanie ustalonym daje amplitudę drgań oraz kąt przesunięcia fazowego ϕ między siłą a ruchem:

$$x_0 = P_0 / \sqrt{(c \cdot \omega)^2 + (k - m \cdot \omega^2)^2}$$
$$\tan \varphi = c \cdot \omega / (k - m \cdot \omega^2) \quad \omega_n = \sqrt{k/m}$$



Rys. 6. Charakterystyka amplitudowo-częstotliwościowa x_0/x_{stat} dla różnych wartości tłumienia względnego c/c_{kr} .



Rys. 7. Charakterystyka fazowa — kąt φ pomiędzy siłą wymuszającą a ruchem w funkcji ω/ω_n .

Częstość drgań własnych ω_n jest najistotniejszą właściwością modelu — to przy niej gwałtownie rośnie amplituda drgań (rezonans mechaniczny). Kąt fazowy φ zmienia się w charakterystyczny sposób wraz ze zmianą prędkości obrotowej: poniżej rezonansu wynosi ok. 0° , w rezonansie — 90° , a znacznie powyżej rezonansu dąży do 180° . Ta zależność ma fundamentalne znaczenie praktyczne — determinuje, w jakim obszarze pracy (pod- czy nadkrytycznym) działa dana konstrukcja wyważarki, o czym mowa w rozdziale 6.

Warto podkreślić właściwość filtracyjną czujnika drgań: rejestruje on ruch z pełną czułością wyłącznie w kierunku swojej głównej osi, a wzmocnienie maleje wraz z kątem odchylenia rzeczywistego kierunku drgań od tej osi (charakterystyka „listkowa”). Ma to znaczenie zwłaszcza przy wyważaniu w łożyskach własnych,

gdzie sygnał zawiera nie tylko składową pochodzącą od niewyważenia, lecz również szereg innych składowych ruchu maszyny.

Rozdział 5. Wyważanie w łożyskach własnych a wyważanie na wyważarkach stacjonarnych

Specyfika wyważania w łożyskach własnych

Wyważanie w łożyskach własnych polega na minimalizacji drgań maszyny wirnikowej za pomocą korekcji rozkładu masy wirnika zamontowanego w jego docelowych, roboczych łożyskach — w odróżnieniu od wyważarek stacjonarnych, gdzie masa i gabaryty wirnika nie mają większego znaczenia, ale wirnik trzeba zdemontować i zamocować na dedykowanym stanowisku.

Wyważanie to jest technicznie trudniejsze i mniej zbieżne niż na wyważarce stacjonarnej z trzech głównych powodów: (1) wyważany obiekt jest nieznany co do swojej reakcji dynamicznej na niewyważenie, podczas gdy wyważarka jest urządzeniem rozpoznany; (2) ruch maszyny roboczej jest złożony i często zakłócony, w przeciwieństwie do wyważarki, skonstruowanej tak, by wirnik wykonywał ruch złożony z dwóch czystych składowych harmonicznym; (3) sama maszyna (nie wyważarka) jest zwykle nieznana obsłudze pod względem technicznym.

Z tego powodu pierwszym krokiem jest zawsze rozpoznanie dynamiczne maszyny — za pomocą odważników korekcyjnych mocowanych w płaszczyznach korekcji sprawdza się, jak znana masa wpływa na parametry ruchu w miejscach zamocowania czujników (najczęściej obsadach łożysk).

Kalibracja jedno- i dwupłaszczyznowa

Wyważanie może być jednopłaszczyznowe (poszukiwanie jednej siły od niewyważenia, na podstawie czterech danych pomiarowych) lub dwupłaszczyznowe (poszukiwanie wszystkich składowych niewyważenia, na podstawie dwunastu danych). Za pierwszym przemawia szybkość i duża zbieżność procesu; za drugim — skuteczność w usuwaniu składowej momentowej. Uproszczony model liniowy zakłada wprost proporcjonalną zależność wskazań układu pomiarowego od amplitudy niewyważenia w danym miejscu maszyny.

Istotnym, praktycznym pojęciem jest tu środek drgań — umowny, nieruchomy względem otoczenia punkt wyważanej maszyny. Charakterystyczną właściwością wyważania jednopłaszczyznowego jest właśnie przesuwanie środka drgań maszyny w kierunku osi działania czujnika drgań: po skutecznym wyważeniu w jednym punkcie drgania w miejscu czujnika mogą niemal zniknąć, podczas gdy w innych miejscach maszyny nadal będą obecne — tym większe, im dalej od miejsca wyważania.

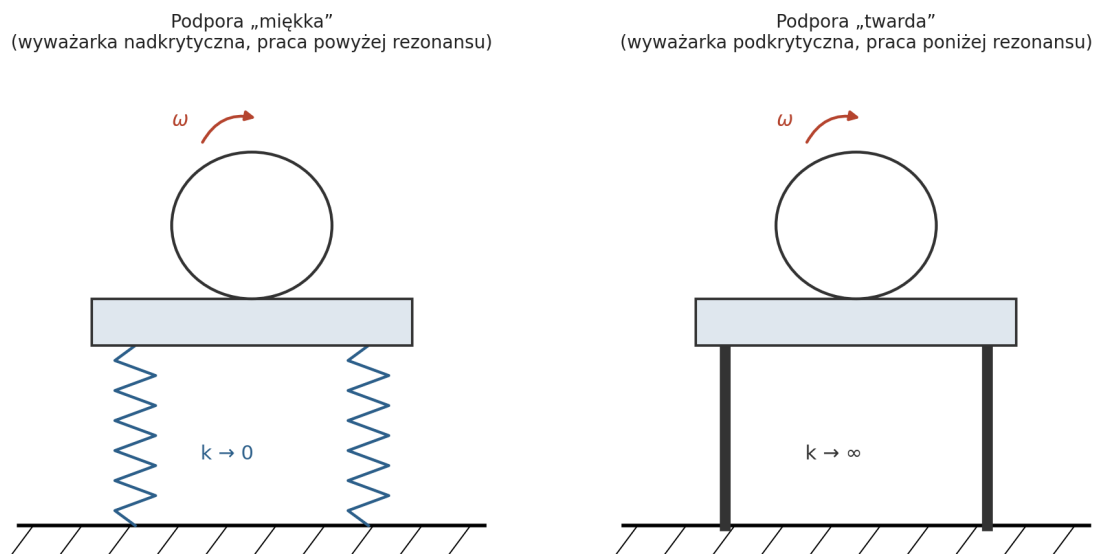
Rozkład niewyważenia na składową siłową (przyłożoną w środku masy) i momentową jest możliwy wyłącznie po kalibracji dwupłaszczyznowej. Ma to szczególne znaczenie dla wirników wąskich, przewieszonych poza obsady łożysk (np. tarcz wentylatorów), które są zwykle znacznie mniej wrażliwe na moment niż na siłę — dobrą praktyką jest wtedy skalibrowanie dwupłaszczyznowe, zignorowanie składowej momentowej i skorygowanie wyłącznie składowej statycznej.

Praktyczne wskazówki dla wirników wąskich

Ze względu na bliskość dostępnych płaszczyzn korekcji, masy potrzebnych odważników są często bardzo duże, a wyniki obliczeń — obciążone znacznym błędem co do wartości i kąta. Praktyka wypracowała procedurę łączoną: wykonuje się najpierw wyważanie jednopłaszczyznowe, następnie dwupłaszczyznowe z symetrycznie dobranymi, identycznymi co do masy odważnikami (eliminującymi moment), po czym powtarza się korekcję jednopłaszczyznową, a w razie potrzeby — dwupłaszczyznową. Takie postępowanie gwarantuje zbieżność procesu.

Rozdział 6. Kalibracja wyważarek nadkrytycznych i podkrytycznych

Konstrukcja podpór wyważarki decyduje o tym, w jakim obszarze charakterystyki amplitudowo-częstotliwościowej (poniżej czy powyżej rezonansu) pracuje układ „wirnik + podpory”. Rozróżnia się cztery podstawowe typy wyważarek stacjonarnych: o podporach „miękkich” (nadkrytyczne), o podporach „twardych” (podkrytyczne), o podporach specjalizowanych (dopasowanych do konkretnego zadania) oraz przenośne zestawy do wyważania w łożyskach własnych.



Rys. 8. Zasada działania podpory „miękkiej” (wyważarka nadkrytyczna) i „twardej” (wyważarka podkrytyczna).

Podpory miękkie (wyważarki nadkrytyczne)

Duża amplituda ruchu podpory ułatwia działanie czujnika drgań nawet o niewielkiej czułości, a sama konstrukcja podpory pełni funkcję naturalnego filtra mechanicznego — na wyjściu z czujnika otrzymuje się sumę dwóch czystych sinusoid. Wadą jest ograniczenie stosowania do wirników o niewyważeniu początkowym mniejszym od granicznego (przy przekroczeniu progu elementy ruchome uderzają o zderzaki).

Podpory twarde (wyważarki podkrytyczne)

Ruch czopa wału praktycznie nie jest zauważalny, co pozwala wyważać wirniki obciążone dużym niewyważeniem początkowym, ale wymaga czujników o dużej czułości (często stosuje się mechaniczne wzmacniacze ruchu typu dźwigniowego).

Rama elektryczna a kalibracja z odważnikami próbnymi

Klasyczną metodą kalibracji wyważarki nadkrytycznej było posłużenie się tzw. ramą elektryczną, „ustawianą” za pomocą wirnika wzorcowego o zbliżonym kształcie i masie do wirnika docelowego oraz uprzednio wyważonego „do zera”. Współczesne rozwiązanie, rozwijane m.in. przez producentów aparatury pomiarowej, wykorzystuje kalibrację za pomocą odważników próbnych, znanych co do masy i kąta zamocowania — nie wymaga ona posiadania wirnika wzorcowego. Kalibracja jednopłaszczyznowa (3 etapy pomiarowe) dostarcza danych o jednym odważniku korekcyjnym; dwupłaszczyznowa (4 etapy) — o dwóch, pozwalając zmierzyć wszystkie składowe niewyważenia wirnika sztywnego.

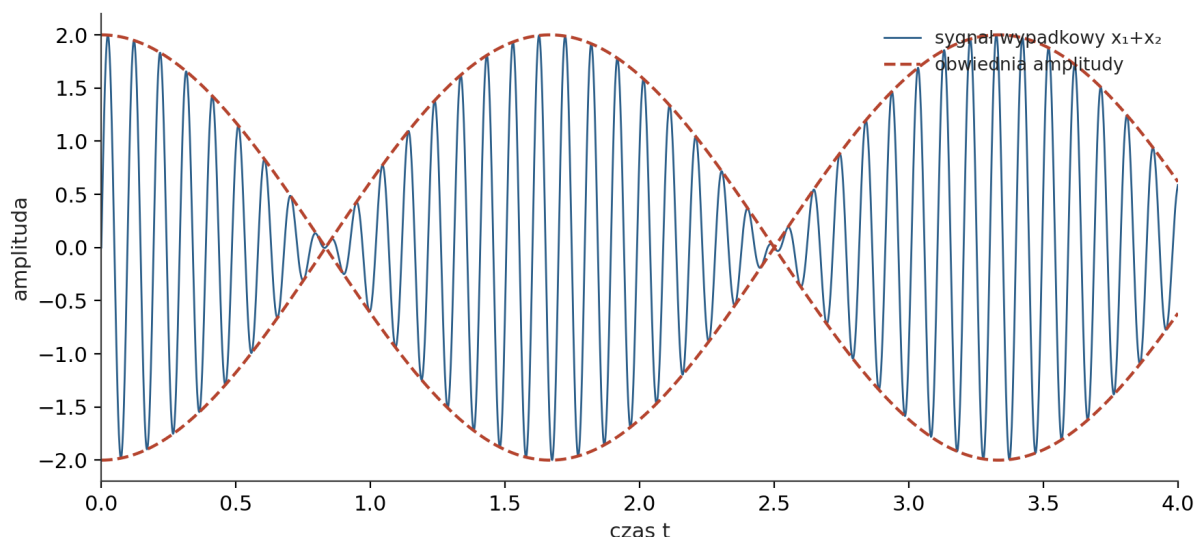
Kluczowy dla powodzenia kalibracji jest właściwy dobór masy odważnika próbnego: po jego zamocowaniu parametry ruchu powinny zmienić się nie mniej niż o ok. 30% i nie więcej niż o ok. 500% — zbyt mały odważnik daje zmianę niezauważalną na tle zakłóceń pomiarowych, zbyt duży sprawia, że ruch początkowy staje się pomijalnie mały względem ruchu z odważnikiem.

Rozwiązania konstrukcyjne podpór specjalizowanych

W praktyce przemysłowej stosuje się konstrukcje podpór celowo faworyzujące jedną ze składowych niewyważenia. Przykładem jest rozwiązanie typu „podwójnej płetwy” — filtr mechaniczny odfiltrowujący drugą postać drgań, stosowany przy wyważaniu wirników w kształcie tarczy (sprzęgła, tarcze, koła pasowe), gdzie mierzy się wyłącznie składową siłową, a moment z założenia pozostaje poniżej dopuszczalnej granicy. Odwrotny przypadek reprezentuje rozwiązanie typu „rolki poprzeczne”, stosowane np. przy wyważaniu krążników przenośnikowych, eliminujące tarcie suche w podparciu i umożliwiające dokładny pomiar obu składowych niewyważenia jednocześnie.

Rozdział 7. Zjawisko dudnienia przy wyważaniu w łożyskach własnych

W wielu przypadkach wyważania w łożyskach własnych obserwuje się dudnienie — cykliczną zmienność zarówno amplitudy, jak i fazy mierzonego sygnału drgań w czasie. Zjawisko to powstaje na skutek sumowania się dwóch ruchów harmonicznym o zbliżonych (choć nie identycznych) częstotliwościach, np. dwóch wirników na wspólnej osi obracających się z nieco różnymi prędkościami, albo drgań wirnika nakładających się na drgania podatnego podłoża wzbudzanego przez inną, sąsiednią maszynę.



Rys. 9. Zjawisko dudnienia — sumowanie dwóch sygnałów harmonicznym o zbliżonych częstotliwościach i powstająca obwiednia amplitudy.

Rozróżnia się tu dwa mechanizmy dopływu energii do układu drgającego:

- wymuszenie dynamiczne — energia dopływa poprzez siły wymuszające pochodzące bezpośrednio od niewyważenia (np. dwa wirniki na wspólnej osi); w tym przypadku kąt wyprzedzenia siły względem ruchu pozostaje stały, niezależny od chwili pomiaru — oba ruchy są dynamicznie „rozprężone”;
- wymuszenie kinematyczne — energia dopływa poprzez wymuszony ruch sztywnego źródła zewnętrznego (np. drgającego stropu, wzbudzanego przez inną maszynę); tu kąt wyprzedzenia zależy od wzajemnego przesunięcia fazowego między wymuszeniem dynamicznym i kinematycznym i zmienia się w sposób nieregularny, choć okresowy.

Praktyczne postępowanie w warunkach dudnienia

Ponieważ dostępna aparatura pomiarowa nie pozwala rozdzielić obu ruchów składowych w czasie rzeczywistym, praktyka wypracowała uproszczoną procedurę:

1. odczytać minimalną i maksymalną wartość amplitudy ruchu,
2. obliczyć ich średnią i wprowadzić ją do programu obliczeniowego,
3. odczytać wartość kąta fazowego w chwili, gdy amplituda osiąga wartość maksymalną (wtedy szybkość zmian kąta fazowego jest najmniejsza), i również wprowadzić ją do obliczeń.

Analogiczne, choć słabsze zjawisko dudnienia może wystąpić także na wyważarce uniwersalnej, gdy średnice rolki podporowej i czopa wyważanego wału są bardzo zbliżone — błędy kształtu rolek (bicie promieniowe) generują wówczas niewyważenie pozorne pochodzące z wymuszenia kinematycznego, nakładające się na sygnał użyteczny. Skutecznym rozwiązaniem jest w takim wypadku po prostu wymiana rolek na inne, o innej średnicy.

Rozdział 8. Podstawy normatywne

Wyważanie wirników jest zagadnieniem znormalizowanym. Do najważniejszych norm krajowych i międzynarodowych, tworzących spójny system oceny i wyznaczania jakości wyważania, należą m.in.:

- PN-93/N-01361 — terminologia wyważania,
- PN-77/M-04000 oraz PN-93/N-01359 — klasy dokładności wyważania wirników sztywnych i metody wyznaczania dopuszczalnego niewyważenia resztkowego,
- PN-93/N-01360 i PN-93/N-01362 — kryteria oceny stanu wyważenia oraz klasyfikacja i metody wyważania wirników giętkich,
- PN-90/N-01358 i PN-ISO 10816-1 — metody pomiarów i oceny drgań maszyn wirnikowych w eksploatacji, wraz ze strefami klasyfikacyjnymi jakości pracy maszyny.

Szczególne znaczenie ma norma PN-93/N-01359, ponieważ obecnie każde wyważenie powinno kończyć się protokołem z pomiarów zawierającym wartość pozostawionego niewyważenia resztkowego — dokumentem, który w praktyce warsztatowej bywa najsłabiej dostępną informacją dla obsługi.

Podsumowanie

Teoria wyważania łączy w sobie prostą ideę fizyczną — doprowadzenie osi bezwładności wirnika do zgodności z osią jego obrotu — z bogatym instrumentarium pojęciowym potrzebnym do praktycznego opanowania tego zadania: podziałem na niewyważenie statyczne, dynamiczne, quasistatyczne i kinematyczne, koncepcją płaszczyzn korekcji i pomiaru, klasyfikacją wirników sztywnych i giętkich oraz modelowaniem układu pomiarowego jako prostego oscylatora o jednym stopniu swobody.

Z punktu widzenia praktyki najistotniejsze jest zrozumienie różnicy między wyważaniem na wyważarce stacjonarnej (proces dobrze rozpoznany, o wysokiej zbieżności) a wyważaniem w łożyskach własnych (trudniejsze metrologicznie, podatne na zakłócenia i zjawiska takie jak dudnienie) — oraz świadomy dobór metody: jedno- czy dwupłaszczyznowej, w zależności od tego, która składowa niewyważenia — siłowa czy momentowa — dominuje w danym przypadku. Zrozumienie mechanizmu przesuwania się fazy siły wymuszającej względem ruchu wraz ze zmianą prędkości obrotowej — kluczowe zarówno dla interpretacji zachowania wirników giętkich, jak i dla projektowania i kalibracji samych wyważarek — spina te zagadnienia w spójną całość.