

Wyważanie wirników

1. Wprowadzenie

Jeżeli masy wirujących elementów są rozłożone symetrycznie względem osi obrotu, to wywołane przez nie siły odśrodkowe równoważą się wzajemnie i dzięki temu w elementach wirujących powstają tylko naprężenia kinetostatyczne. Elementy takie nazywa się *wyważonymi*. Maszyny i urządzenia z wyważonymi elementami pracują spokojnie, bez drgań i hałasu.

Przy większych prędkościach obrotowych nawet nieznaczna asymetria mas wirującego elementu powoduje stan *niewyważenia*, charakteryzujący się powstaniem dużej nierównoważonej siły odśrodkowej. Jednym z objawów jej oddziaływania są intensywne drgania wirnika, łożysk, kadłuba i fundamentów. Pogarszają one w znaczny sposób niezawodność maszyny i skracają jej żywotność.

Ponieważ większość maszyn i urządzeń ma wirujące elementy, dlatego ich wyważanie stało się ważną i powszechnie stosowaną operacją technologiczną. Jest ona wykonywana nie tylko przy produkcji nowych maszyn, lecz również w czasie ich eksploatacji oraz przy remontach kapitalnych.

2. Wirniki sztywne

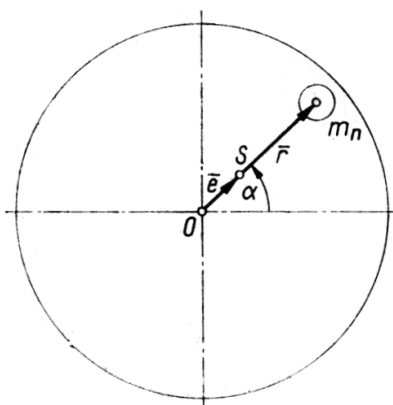
Według normy PN-93/N-01361 wirnik sztywny, to wirnik, którego niewyważenie może być skorygowane w dwóch dowolnych płaszczyznach: po korekcji, jego niewyważenie resztkowe nie zmienia się znacząco (w odniesieniu do osi wału) dla wszystkich prędkości aż do prędkości roboczej maksymalnej. Wirnik sztywny utożsamiany jest z masą sztywną.

2.1. Wirnik sztywny doskonale wyważony

Jest to wirnik idealny, którego centralna główna oś bezwładności jest osią obrotu, czego wynikiem jest zerowe niewyważenie oraz brak dynamicznych sił reakcji na łożyskach wirnika.

2.2. Niewyważenie

W celu wyprowadzenia podstawowych pojęć techniki wyważania rozpatrzono cienką tarczę wirnikową zamocowaną na środku wału o stałej średnicy. Jeśli tarcza byłaby doskonale wyważona, jej środek ciężkości znajdowałby się w środku geometrycznym, który leży na osi obrotu tarczy O (rys. 1).



Rysunek 1. Niewyważona wirująca tarcza

Jeżeli na tarczy znajduje się niezerównoważona masa m_n , której środek ciężkości jest określony wektorem wodzącym $\vec{r}$, to wtedy środek ciężkości wirnika mieści się w punkcie S , którego położenie wyznacza wektor wodzący $\vec{e}$ nazywany *mimośrodowością środka ciężkości*. Jego moduł równa się odległości środka ciężkości S od osi wirnika, położenie katowe określone jest kątem α . W wyniku obracania się wirnika z prędkością kątową ω na

niezrównoważoną masę m działa siła odśrodkowa bezwładności

$$\bar{F} = m_n \cdot \bar{r} \cdot \omega^2 \quad (1.1)$$

Moment statyczny tej masy względem osi wirnika $\bar{N} = m_n \cdot \bar{r}$ nazwano *niewyważeniem*, będącym miarą niezrównoważenia mas wirnika. Niewyważenie jest wielkością wektorową o kierunku i zwrocie określonym przez wektor niezrównoważonej siły odśrodkowej $\bar{F}$. Moduł wektora $N = m_n \cdot r$ nazwano wartością niewyważenia, a kąt α *kątem niewyważenia*.

Mimo, że siła odśrodkowa $\bar{F}$ zależy zawsze od prędkości kątowej ω , to samo niewyważenie od niej nie zależy, jeżeli tylko wirnik jest nieodkształcalny (sztywny), czyli $\bar{r} = \text{const.}$

Przy wyważaniu wartość m_n podaje się najczęściej w gramach, a promień r określa się w milimetrach. Stąd wymiarem wartości niewyważenia jest [g·mm].

Rozważany wirnik można zastąpić uproszczonym, lecz kinetostatycznie równoważnym, modelem fizycznym w postaci masy ($m_w + m_n$) skupionej w środku ciężkości S i wirującej po okręgu o promieniu $\bar{e}$ z prędkością kątową ω . W tym przypadku niezrównoważoną siłę odśrodkową można wyrazić wzorem

$$\bar{F} = (m_w + m_n) \cdot \bar{e} \cdot \omega^2 \quad (1.2)$$

Z porównania prawych stron wzorów (1.1) i (1.2) otrzymano

$$\bar{e} = \frac{m_n \cdot \bar{r}}{m_w + m_n}$$

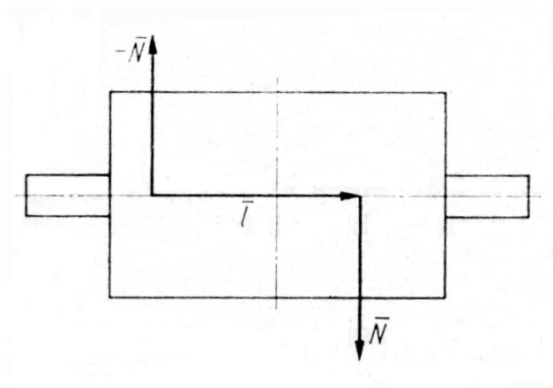
Z uwagi na to, że masa niewyważona m_n jest zawsze bardzo mała w porównaniu z masą wirnika m_w , więc zależność tę można zastąpić wzorem przybliżonym

$$\bar{e} = \frac{\bar{N}}{m_w} \quad (1.3)$$

Iloraz N/m_w nazwano niewyważeniem właściwym, ponieważ jest on równy wartości niewyważenia przypadającego na jednostkę masy wirnika. Ze wzoru (1.3) wynika, że niewyważenie właściwe jest liczbowo równe modułowi mimośrodowości środka ciężkości wirnika e . Jeżeli wartość N jest podawana w g·mm, a masa wirnika m_w w kilogramach, to wymiarem niewyważenia właściwego (modułu mimośrodowości) jest mikrometr.

2.3 Moment niewyważenia

Rysunek 2 przedstawia wirnik sztywny, na który działają dwa przeciwne wektory niewyważenia $\bar{N}$ i $-\bar{N}$.



Rysunek 2. Moment niewyważenia

Tworzą one parę wektorów odpowiadającą parze sił odśrodkowych wywołanych niewyważeniami. Para ta wytwarza *moment niewyważenia*. Jest to wektor $\bar{M}_n$ równy iloczynowi wektorowemu niewyważenia $\bar{N}$ i ramienia $\bar{l}$

$$\bar{M}_n = \bar{N} \times \bar{l}$$

Z własności iloczynu wektorowego wynika, że wektor momentu niewyważenia $\bar{M}_n$ jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez oś wirnika i wektor niewyważenia $\bar{N}$. Moduł iloczynu wektorowego wynosi

$$M_n = N \cdot l$$

ponieważ kąt pomiędzy wektorami $\bar{N}$ i $\bar{l}$ jest zawsze kątem prostym. Po podstawieniu zależności $N = m_n \cdot r$ otrzymano związek

$$M_n = m_n \cdot r \cdot l$$

z którego wynika, że moment niewyważenia jest to moment odśrodkowy masy niewyważonej m_n względem osi wirnika i płaszczyzny do niej prostopadłej. Moment niewyważenia ma wymiar $\text{g} \cdot \text{mm}^2$.

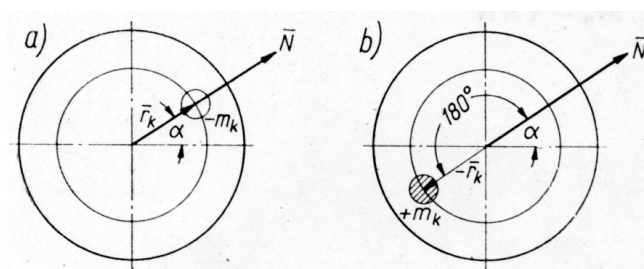
2.4. Wyważanie

Wyważanie jest procesem korygowania rozkładu masy wirnika. Operację tę wykonuje się dodając lub ujmując na *promieniu korekcji* r_k taką *masę korekcyjną* m_k dla której suma sił odśrodkowych, a więc suma niewyważań jest równa zero:

$$\bar{N} + m_k \cdot \bar{r}_k = 0$$

W ten sposób niewyważenie $\bar{N}$ jest zrównoważone niewyważeniem $(-m_k \cdot \bar{r}_k)$.

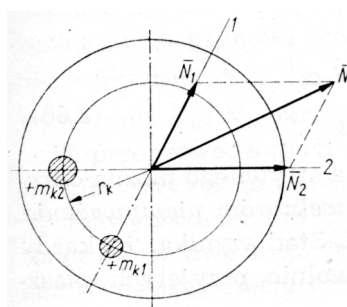
Korekcję masy wirnika wykonuje się przeważnie na tej średnicy, która pokrywa się z kierunkiem niewyważenia $\bar{N}$. Jeżeli z wirnika usuwamy masę w miejscu określonym kątem niewyważenia α (rys. 3a), to nazywamy ją *ujemną masą korekcyjną*. Jeżeli w miejscu położonym pod kątem $\alpha + 180^\circ$ dodajemy masę równoważącą (rys. 3b), to mówimy o *dodatniej masie korekcyjnej*.



Rysunek 3. Masa korekcyjna m_k : a) ujemna, b) dodatnia

W pewnych przypadkach nie można wykonać korekcji masy wirnika w sposób poprzednio opisany. Najczęściej wynika to z braku miejsca do wykonania korekcji na średnicy pokrywającej się z wektorem niewyważenia.

W takich przypadkach wektor niewyważenia $\bar{N}$ rozkłada się na dwa kierunki, na których korekcja masy jest możliwa (rys. 4). W ten sposób otrzymuje się dwie składowe niewyważenia $\bar{N}_1$ i $\bar{N}_2$, które równoważy się dodatnimi lub ujemnymi masami korekcyjnymi m_{k1} i m_{k2} .

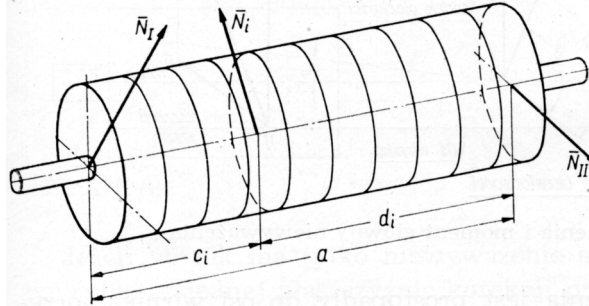


Rysunek 4. Rozkład niewyważenia $\bar{N}$ na dwa składowe niewyważenia $\bar{N}_1$ i $\bar{N}_2$

Płaszczyzna, w której wykonuje się korekcję masy wirnika, jest zawsze prostopadła do osi wirnika i nazywa się *płaszczyzną korekcji*.

2.5. Wirnik niewyważony

Rysunek 5 przedstawia długi wirnik w kształcie walca. Wyniki analizy stanu niewyważenia takiego wirnika mogą być uogólnione dla wirników o dowolnych kształtach.



Rysunek 5. Model fizyczny długiego niewyważonego wirnika

Dla uproszczenia rozważań przyjęto, że wirnik składa się z wielu cienkich tarcz wirnikowych prostopadłych do osi wirnika. Stan niewyważenia każdej tarczy jest określony wektorem niewyważenia $\bar{N}_i$, a stan niewyważenia całego wirnika jest określony zbiorem tych wektorów. Dla sił odśrodkowych wywołanych niewyważeniami można zapisać dwa równania równowagi momentów:

$$\bar{N}_I \cdot a \cdot \omega^2 = \sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot d_i \cdot \omega^2 ; \quad \bar{N}_{II} \cdot a \cdot \omega^2 = \sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot c_i \cdot \omega^2$$

gdzie $\bar{N}_I$ i $\bar{N}_{II}$ – niewyważenia wypadkowe obliczone dla dwóch dowolnie przyjętych płaszczyzn poprzecznych I i II .

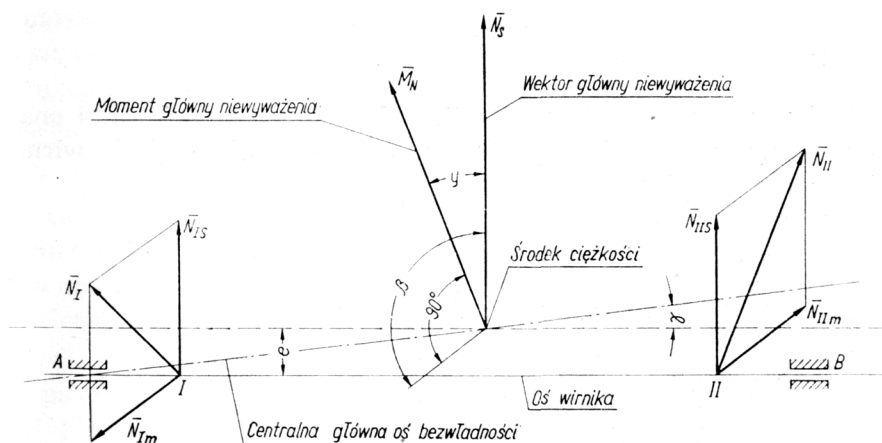
Z ostatnich dwóch zależności obliczono

$$\bar{N}_I = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot d_i \cdot \omega^2}{a} ; \quad \bar{N}_{II} = \frac{\sum_{i=1}^n \bar{N}_i \cdot c_i \cdot \omega^2}{a} \quad (1.4)$$

Oznacza to, że stan niewyważenia każdego wirnika sztywnego można określić za pomocą dwóch wektorów niewyważenia, działających w dwóch dowolnych płaszczyznach. Stąd wynika, że każdy wirnik sztywny można wyważyć w dwóch dowolnie przyjętych płaszczyznach korekcji.

Wszystkie siły odśrodkowe działające na ten wirnik można zredukować względem środka ciężkości wirnika i w ten sposób otrzymuje się wektor główny moment główny

tych sił. Odpowiadają im wektor główny niewyważenia $\bar{N}_S$ i moment główny niewyważenia $\bar{M}_N$ (rys. 6).



Rysunek 6. Wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia

Wektor główny niewyważenia jest prostopadły do osi wirnika jest prostopadły do osi wirnika, przechodzi przez jego środek ciężkości i, zgodnie ze wzorem (1.3), jest równy

$$\bar{N}_S = m_w \cdot \bar{e} \quad (1.5)$$

Zgodnie z warunkami równowagi sił i momentów wektor $\bar{N}_S$ można rozłożyć na równoległe do niego dwa wektory $\bar{N}_{Is}$ i $\bar{N}_{IIs}$, działające w dwóch dowolnych płaszczyznach poprzecznych I i II .

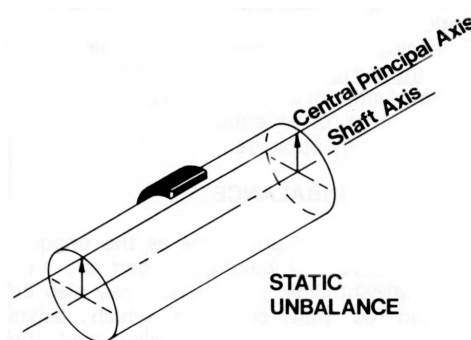
Wektor momentu głównego niewyważenia $\bar{M}_N$ jest prostopadły do centralnej głównej osi bezwładności wirnika i osi wirnika. Jeżeli osie te przecinają się, to wyznaczają płaszczyznę, w której działa moment $\bar{M}_N$. Moment ten można określić również za pomocą pary wektorów niewyważenia $\bar{N}_{Im}$ i $\bar{N}_{IIIm}$, rozmieszczonych w dwóch dowolnych płaszczyznach poprzecznych I i II , przy czym moduł momentu głównego niewyważenia równa się iloczynowi jednego z tych wektorów i ich ramienia. Po złożeniu wektorów $\bar{N}_S$ i $\bar{N}_m$ w płaszczyznach I i II otrzymano wektory niewyważenia $\bar{N}_I$ i $\bar{N}_{II}$ określone wzorami (1.4).

Z przeprowadzonych rozważań wynika, że dowolny stan niewyważenia wirnika sztywnego określa wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia lub dwa

komplementarne wektory niewyważenia wyznaczone w dwóch dowolnych płaszczyznach prostopadłych do osi wirnika. W dalszych punktach rozważono szczególne przypadki stanu niewyważenia, które mają praktyczne znaczenie.

2.6. Niewyważenie statyczne

Jeżeli oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są równoległe, to taki stan niewyważenia nazywa się *niewyważeniem statycznym* (rys. 7). Jest ono określone tylko wektorem głównym niewyważenia $\bar{N}_S$, ponieważ moment główny $\bar{M}_N$ jest w tym przypadku równy zeru. Ze wzoru (1.5) wynika, że wartość niewyważenia statycznego wirnika można jednoznacznie określić podając moduł mimośrodowości jego środka ciężkości e .



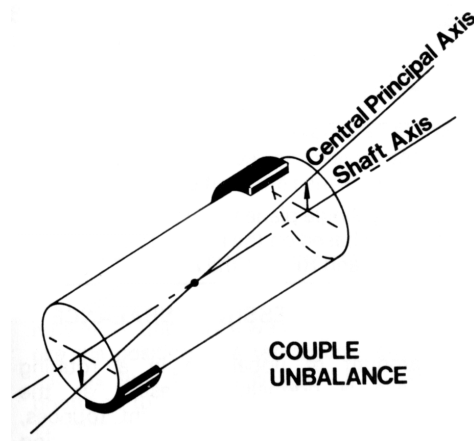
Rysunek 7. Niewyważenie statyczne

Jeżeli wirnik ma tylko niewyważenie statyczne, to można go wyważyć tylko w jednej płaszczyźnie przechodzącej przez środek ciężkości. Umieszczając w tej płaszczyźnie niewyważenie korekcyjne $\bar{N}_k = \bar{N}_S$ przesuwa się równoległe centralną główną oś bezwładności o wartość mimośrodu $\bar{e}$, to znaczy aż do pokrycia się z osią wirnika.

Bardzo często nie można przeprowadzać korekcji masy w płaszczyźnie poprzecznej przechodzącej przez środek ciężkości i w takim przypadku korekcję wykonuje się w dwóch innych łatwo dostępnych płaszczyznach I i II .

2.7. Niewyważenie momentowe

Jeżeli oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności przecinają się w środku ciężkości, to taki stan niewyważenia nazywa się *niewyważeniem momentowym* (rys. 8). W tym przypadku środek ciężkości leży na osi wirnika, czyli jego mimośród $\bar{e} = 0$.



Rysunek 8. Niewyważenie momentowe

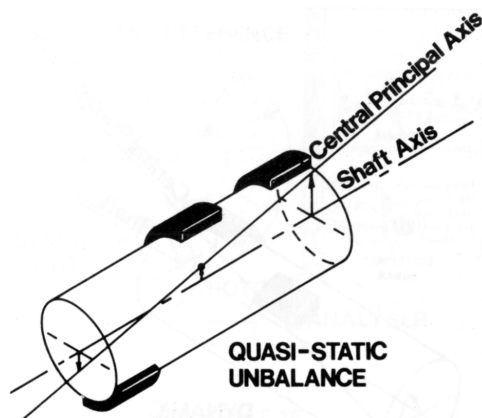
Ze wzoru (1.5) wynika, że wtedy $\bar{N}_S = 0$ i dlatego niewyważenie jest określone tylko momentem głównym niewyważenia $\bar{M}_N$. Wektor tego momentu jest prostopadły do płaszczyzny przechodzącej przez oś wirnika i centralną główną oś bezwładności. W płaszczyźnie tej można przyjąć nieskończoną liczbą par niewyważań, których momenty będą równe modułowi wektora $\bar{M}_N$, to znaczy

$$M_N = N \cdot l$$

Pary te mogą działać symetrycznie lub asymetrycznie względem środka ciężkości wirnika, przy czym nie zawsze musi on leżeć między wektorami niewyważań.

2.8. Niewyważenie quasi-statyczne

Jeżeli na doskonale wyważonym wirniku umieści się masę niewyważoną w płaszczyźnie poprzecznej, nie przechodzącej przez środek ciężkości wirnika, to wywoła się *niewyważenie quasi-statyczne*. Taki stan niewyważenia pokazano na rys. 9. Jak widać, niewyważenie quasi-statyczne jest złożeniem niewyważenia statycznego $\bar{N}_S$ i niewyważenia momentowego $\bar{M}_N$ – wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia leżą w jednej płaszczyźnie, która przechodzi przez oś wirnika i jego centralną główną oś bezwładności; obie osie przecinają się poza środkiem ciężkości.

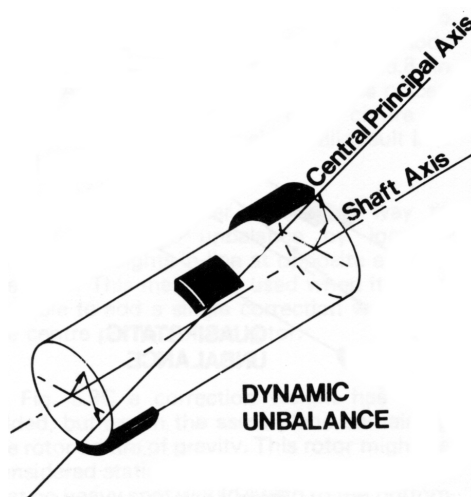


Rysunek 9. Niewyważenie quasi-statyczne

Niewyważenie quasi-statyczne można usunąć za pomocą wyważania wirnika w jednej płaszczyźnie poprzecznej, której położenie można określić z warunków równowagi momentów niewyważień.

2.9. Niewyważenie dynamiczne

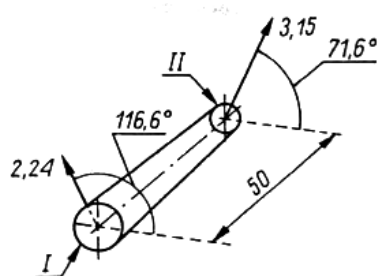
Niewyważenie dynamiczne jest najogólniejszym stanem niewyważenia wirnika, w którym oś wirnika i jego centralna główna oś bezwładności są skośne (rys. 10). Ten rodzaj niewyważenia jest jednoznacznie określony wektorem niewyważenia i momentem głównym niewyważenia lub dwoma wektorami niewyważenia leżącymi w dwóch dowolnych płaszczyznach poprzecznych. Niewyważenie dynamiczne można uważać za superpozycję niewyważenia statycznego i niewyważenia momentowego, przy czym płaszczyzny działania tych niewyważień nie pokrywają się.



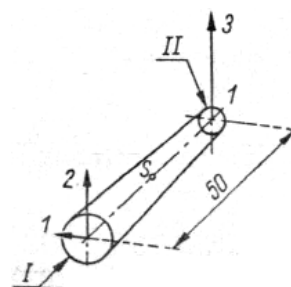
Rysunek 10. Niewyważenie dynamiczne

Ten typ niewyważenia można usunąć za pomocą korekcji mas w dwóch dowolnych

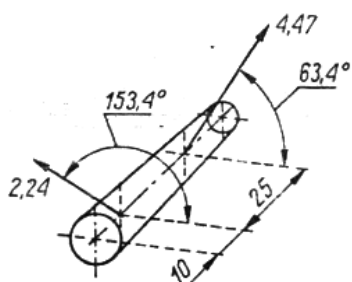
płaszczyznach korekcji.



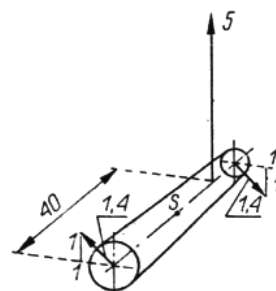
a) Wektory niewyważenia w płaszczyznach korekcji I i II



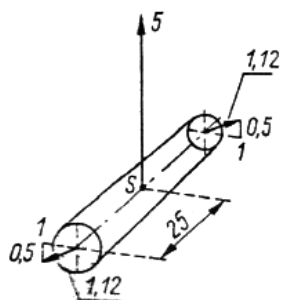
b) Dwie składowe wektora, niewyważenia w każdej z dwóch płaszczyzn korekcji I i II



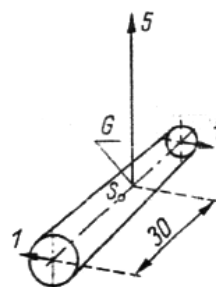
c) Wektory niewyważenia w dwóch innych płaszczyznach korekcji



d) Wektor wypadkowego niewyważenia wraz z przynależną parą wektorów niewyważenia, odniesioną do płaszczyzn korekcji I i II. Wektor wypadkowy niewyważenia może być zlokalizowany gdziekolwiek, np. na jednej z płaszczyzn korekcji; wartość pary wektorów niewyważenia jest zależna od pozycji wypadkowego wektora niewyważenia.



e) Szczególny przypadek d), a mianowicie: niewyważenie statyczne – para niewyważień. Wektor wypadkowy niewyważenia przechodzi przez środek masy wirnika. Występuje skojarzona para niewyważień.



f) Inny szczególny przypadek d), wektor wypadkowy niewyważenia przechodzi przez środek niewyważenia przy czym skojarzona para niewyważień jest minimalna.

Rysunek 11. Różne sposoby przedstawiania tego samego stanu niewyważenia wirnika sztywnego

To samo niewyważenie dynamiczne można przedstawić jako superpozycję różnych przypadków szczególnych. Na rysunku 11 pokazano sześć sposobów przedstawienia tego samego stanu niewyważenia wirnika, którego środek ciężkości znajduje się w równych odległościach od płaszczyzn korekcji *I* i *II*.

2.10. Zespoły konstrukcyjne

Niektóre wirniki można wyważać jako integralne pojedyncze części, inne zaś jako zespoły konstrukcyjne. Dla każdego zespołu niewyważenia części składowych należy dodawać wektorowo, przy czym należy brać pod uwagę wszelkie niewyważenia powodowane niedokładnościami montażu. Szczególnie należy uwzględnić fakt, że części składowe mogą być później zmontowane w pozycjach różnych od tych, w jakich zmontowane były na wyważarce.

Jeżeli na skutek oddzielnego wyważania każdej części nie jest możliwe osiągnięcie tolerancji niewyważenia określonej dla zespołu, należy wyważać ten zespół jako całość.

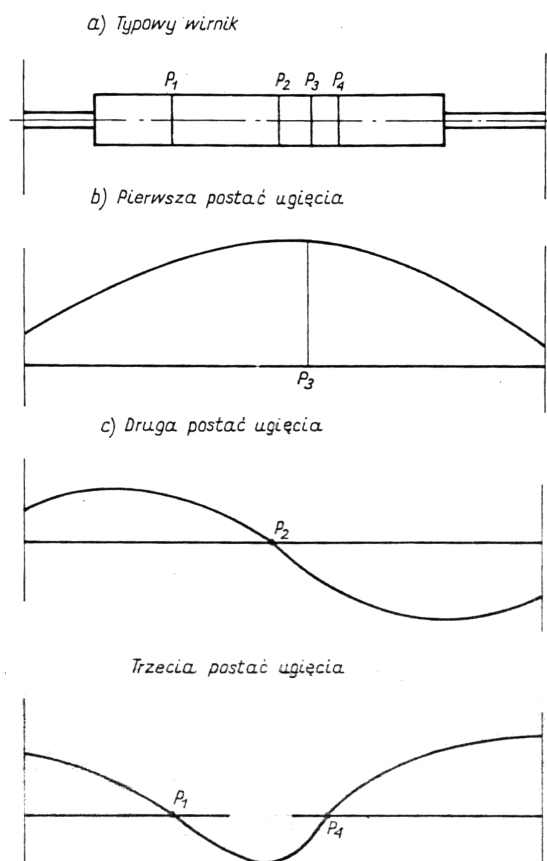
W przypadku gdy poszczególne części wyważa się oddzielnie należy w pierwszej kolejności uzgodnić czy będą one wyważane wraz z elementami łączącymi, takimi jak np. śruby i wpusty (norma międzynarodowa określająca sposób traktowania wpustów wału podczas wyważania jest opracowywana).

3. Wirniki giętkie

Wirniki giętkie są to wirniki nie odpowiadające definicji podanej w punkcie drugim. Wyważenie wirnika giętkiego w dwóch płaszczyznach korekcji nie zapewnia tego samego stopnia niewyważenia dla wszystkich prędkości aż do maksymalnej prędkości roboczej, ze względu na pojawiające się odkształcenia giętne.

3.1. Formy postaci wirnika giętkiego

Jeśli pominie się tłumienie, postaci wirnika są głównymi postaciami ugięcia i w przypadku wirnika podpartego przez łożyska izotropowe, te postaci ugięcia są krzywymi wirującymi wokół osi wału. Typowe krzywe dla trzech głównych postaci wirnika prostego, podpartego łożyskami podatnymi w pobliżu jego końców, ilustruje rys. 12.



Rysunek 12. Typowe postaci dla wirników giętkich montowanych na podporach podatnych

Dla zespołu tłumionego wirnik-łożysko, postaci ugięcia mogą być krzywymi przestrzennymi, wirującymi wokół osi wału, szczególnie w przypadku odczuwalnego tłumienia uzyskiwanego w łożyskach z płynnym tarcie. Druga postać tłumiona pokazana jest na

rys. 13. W pewnych przypadkach postacie tłumione mogą być w przybliżeniu traktowane jako główne i wskutek tego, rozważane jako krzywe wirujące. Należy podkreślić, że na formy postaci i odpowiedź wirnika silnie oddziałują właściwości dynamiczne, rozmieszczenie osiowe łożysk oraz ich podłoża.

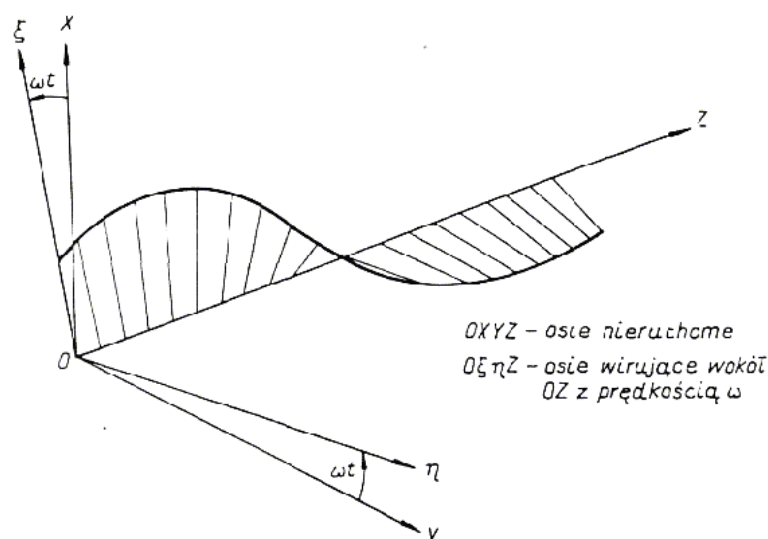
3.2. Odpowiedź wirnika giętkiego na niewyważenie

Rozkład niewyważenia może być wyrażony przez składowe postaciowe, a ugięcie w każdej postaci jest powodowane przez odpowiednie składowe postaciowe niewyważenia. Ponadto, odpowiedź wirnika w pobliżu prędkości krytycznej jest zazwyczaj dominująca wśród towarzyszących postaci. Odpowiedź postaciowa wirnika jest największa przy prędkości krytycznej wirnika odpowiadającej tej postaci. Tak więc, gdy wirnik obraca się z prędkością bliską krytycznej, jest on w stanie przybrać kształt ugięcia odpowiadający postaci towarzyszącej tej prędkości krytycznej. Stopień ugięcia wirnika przy dużych amplitudach drgań jest określony jednocześnie przez składową niewyważenia w rozważanej postaci i przez tłumienie występujące w układzie wirnika w danych warunkach. Jeśli składowa niewyważenia określonej postaci jest zmniejszona przez pewną liczbę mas dyskretnych, odpowiednia składowa postaci ugięcia jest zmniejszona w podobny sposób.

Jeśli wirnik obraca się z prędkością bliską pierwszej prędkości krytycznej, kształt ugięcia wirnika jest zbliżony do kształtu postaci ugięcia przedstawionej na rys. 12b). Formy ugięcia wirnika obracającego się z prędkością bliską swej drugiej lub trzeciej prędkości krytycznej, przypominają w taki sam sposób formy ugięcia przedstawione na rys. 12c) i 12d).

Postacie główne typu prezentowanego na rys. 12b) do 12d) określają składowe postacie niewyważenia. Ponadto, wynik wyważania, uzyskany przy danej korekcji dla danej postaci, zależy od rzędnej krzywej postaci na oś korekcji.

W ten sposób masa korekcyjna umocowana na wirniku jak na rys. 12a) w płaszczyźnie P_2 nie spowoduje zmiany odpowiedzi drugiej postaci. Masa korekcyjna umocowana albo w P_1 albo w P_4 nie wpłynie również na odpowiedź trzeciej postaci. Odwrotnie, masa korekcyjna w płaszczyźnie P_3 spowoduje maksymalny efekt na pierwszą postać. Jeśli zespół wirnik-łożysko ma znaczące tłumienie, ugięcie wirnika utworzy krzywe przestrzenne, które są zależne od form postaci tłumionych, wymienionych powyżej. W takich okolicznościach, dla prędkości bliskich drugiej prędkości krytycznej, krzywa ugięcia będzie podobnego typu do przedstawionej na rys. 13.



Rysunek 13. Druga możliwa postać tłumiona

3.3. Podział wirników giętkich

Norma PN-93/N-01362 dzieli wirniki na pięć klas głównych. Każda z klas wymaga różnych technik wyważania.

Klasa 1 – wirnik, którego niewyważenie może być korygowane w dwóch płaszczyznach metodami wyważania wirników sztywnych.

Klasa 2 – wirnik, który nie może być traktowany jako sztywny, ale może być wyważany zmodyfikowanymi technikami wyważania wirników sztywnych.

Klasa 3 – Wirnik, który nie może być wyważany zmodyfikowanymi technikami wyważania wirników sztywnych, lecz który wymaga zastosowania metod wyważania przy podwyższonej prędkości.

Klasa 4 – Wirnik, który może należeć do klasy 1, 2 lub 3, lecz przedstawia jeden lub dwa dodatkowe elementy giętke lub zamocowane w sposób giętki.

Klasa 5 – Wirnik, który może należeć do klasy 3 lecz, z pewnych względów, np. ekonomicznych, jest wyważany przy jednej prędkości roboczej.

Wirniki klasy 2 podzielone są następująco:

- wirniki, których osiowy rozkład niewyważenia jest znany lub znany jest częściowo,
- wirniki, których osiowy rozkład niewyważenia nie jest znany.

Klasa 3 jest podzielona z tego względu, że techniki wyważania, kryteria i wymagania dotyczące łożysk mogą znacząco się różnić dla różnych wirników.

3.4. Wyważanie

Celem teoretycznym wyważania większości wirników giętkich jest korekcja niewyważenia miejscowego na każdym elemencie długości przez korekcje wyważenia tego elementu. W ten sposób uzyskuje się wirnik, którego środek ciężkości każdego elementu długości znajduje się na osi wału.

Tak idealnie wyważony wirnik nie ma nie tylko niewyważenia statycznego i niewyważenia od momentu sił, lecz również żadnego składnika postaciowego niewyważenia.. Taki doskonale wyważony wirnik będzie działał w zadowalający sposób, z punktu widzenia niewyważenia, przy wszystkich prędkościach.

Tak więc, gdy osiowe rozmieszczenia niewyważenia wirnika są znane, każda technika wyważania wolnoobrotowego zapewniająca korekcję niewyważenia we własnej płaszczyźnie poprzecznej, będzie zadowalająca.

Gdy osiowe rozmieszczenia niewyważenia nie są znane, często można uzyskać akceptowany stan wyważenia na wyważarce wolnoobrotowej przez kontrolowanie niewyważenia początkowego wirnika (tzn. przed osiągnięciem wyważenia końcowego) podczas procesu produkcji i montażu.

Wirniki, które nie spełniają wymagań dla wirników sztywnych lub giętkich klasy 2, opisanych w normie, mogą wymagać innych metod wyważania, niż stosowanych dla wyważarki wolnoobrotowej.

Metody wyważania dla trzech wymienionych powyżej przypadków są opisane w normie PN-93/N-01362.

4. Niewyważenie początkowe

Wyważanie jest operacją technologiczną, która musi być wykonana dla większości elementów wirujących. Czas wyważania i dokładność wyważania w dużej mierze zależą od niewyważenia początkowego, to znaczy od niewyważenia, jakie miał wirnik przed korekcją masy. Im mniejsze jest niewyważenie początkowe, tym krótszy jest czas wyważania i lepsza jego jakość. Poza tym przy dużym niewyważeniu początkowym wartość masy korekcyjnej może być tak duża, że jej usunięcie lub dodanie może być bardzo trudne, a niekiedy nawet niemożliwe.

Z przytoczonych argumentów wynika, że przyjęte metody konstruowania i stosowane w przemyśle procesy wytwarzania elementów wirujących powinny sprzyjać minimalizacji niewyważenia początkowego. Warunek ten może być spełniony tylko wtedy, gdy projektanci i wytwórcy będą znali przyczyny, które mogą zwiększyć niewyważenie produkowanych elementów. Z myślą o tym opisano dalej najważniejsze przyczyny powstawania początkowego niewyważenia typowych elementów wirujących.

Błędy konstrukcyjne

Najczęściej popełnianym błędem konstrukcyjnym, powodującym duże niewyważenie wirników, jest projektowanie osiowo-niesymetrycznych elementów wirujących. Prawidłowo skonstruowana część wirująca powinna mieć kształt bryły obrotowej. Jeżeli względy funkcjonalne zmuszają konstruktora do odstępiania od tej zasady, to musi on przewidzieć w konstrukcji wirnika pełne zrównoważenie wszystkich wirujących mas.

Błędem jest również pozostawienie nie obrobionych powierzchni (zewnętrznych i wewnętrznych) w elemencie wirującym. Najczęściej wynika to z chęci zmniejszenia przez konstruktora pracochłonności projektowanego wyrobu.

Przyjęcie przez konstruktora zbyt luźnego pasowania dla osadzenia na wale elementów wirnika może być przyczyną ich bicia promieniowego i osiowego, co w efekcie zwiększa niewyważenie początkowe wirnika. Należy przy tym pamiętać, że siły odśrodkowe rozciągają elementy nasadzone na wale wirnika i wskutek tego jeszcze bardziej pogarszają jakość pasowania. Dotyczy to również elementów połączonych skurczowo z wałem.

Jeżeli konstruktor umieści na wirniku element, który w czasie wirowania może zmieniać swoje położenie w sposób osiowo-niesymetryczny, to element ten zwiększy

znacznie niewyważenie początkowe.

Wady materiałowe

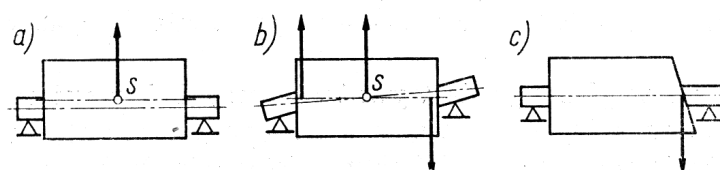
Przesunięcie środka ciężkości wirnika z osi symetrii może być wywołane niejednorodnością materiału. Jest ona największa w elementach odlewanych, ponieważ zdarzają się w nich dość często jamy skurczowe. W mniejszym stopniu na stan niewyważenia wirnika wpływa nierównomierny rozkład gęstości samego materiału.

W spawanych elementach wirujących duże niewyważenie początkowe jest dość często spowodowane nierównomierną grubością półfabrykatów użytych do spawania.

Błędy wykonania

Wyjątkowo duże niewyważenie początkowe wirnika może być wywołane błędami kształtu jego części spawanych i odlewanych. Znacznie mniejsze niewyważenie początkowe mają elementy wykonane za pomocą obróbki skrawaniem, przy czym o wartości tego niewyważenia decydują przede wszystkim błędy mocowania obrabianego elementu.

Na poniższym rysunku (rys. 14a) przedstawiono wirnik z niewyważeniem statycznym powstałym z powodu równoległego przesunięcia osi wytoczenia czopów wirnika i jego pozostałych części. Jeżeli osie te nie są równoległe, to oprócz niewyważenia statycznego powstaje na wirniku również niewyważenie momentowe, reprezentowane przez parę sił (rys. 14b). Dodatkowe niewyważenie może być wywołane wykonaniem płaszczyzn nie prostopadłych do osi wirnika (rys. 14c).



Rysunek 14. Błędy mocowania obrabianego elementu

Częstymi przyczynami powstawania dużych niewyważień początkowych są trwałe odkształcenia, jakie powstają przy obróbce elementów wirujących. Mogą być one wywołane wyzwoleniem naprężeń szczątkowych, które znajdowały się w obrabianym półfabrykacie. Przyczyną może być również duże napięcie wstępne obrabianego elementu.

Wyjątkowo duże odkształcenia trwałe mogą wystąpić przy skurczowym połączeniu elementów wirnika z wałem. W czasie stygnięcia osadzony element kurczy się w kierunku

promieniowym i osiowym. Z tej przyczyny między powierzchnią wału i wewnętrzną powierzchnią piasty nasadzonego elementu powstają bardzo duże osiowe siły tarcia, które wywołują w wale odpowiednio duże naprężenia ściskające. Są one rozłożone przeważnie asymetrycznie względem osi wału i dlatego powodują jego zginanie. Duży wpływ na stopień asymetrii tych naprężeń ma dokładność wykonania i gładkość współpracujących ze sobą powierzchni wału i nasadzonego elementu. Smarując je pastą molibdenową lub rtęciową można znacznie zmniejszyć siły tarcia, a tym samym uniknąć odkształceń wału.

Duże odkształcenia trwale występują również w lutowanych i spawanych elementach wirujących.

Nierównomierne dokręcanie połączeń śrubowych wirnika, może być przyczyną powstania asymetrycznych odkształceń złącza, a to jest już wystarczającym powodem powstania dodatkowego niewyważenia. Może ono powstać w złączu śrubowym również wskutek zamontowania śrub o nierównych długościach oraz różnych rodzajów podkładek i nakrętek.

Literatura

- [1] Łączkowski R.: *Wyważanie elementów wirujących*. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa 1979.

Normy związane

PN-93/N-01359 (idt ISO 1940/1-1986) *Drgania mechaniczne. Wyważanie wirników sztywnych. Wyznaczenie dopuszczalnego niewyważenia resztkowego.*

PN-93/N-01360 (idt ISO 5343-1983) *Drgania mechaniczne. Wyważanie wirników giętkich. Kryteria oceny stanu wyważenia wirnika giętkiego.*

PN-93/N-01362 (idt ISO 5406-1980) *Drgania mechaniczne. Wyważanie mechaniczne wirników giętkich.*