

## Wyważanie sztywnego wirnika z wykorzystaniem jednocześnie dwóch płaszczyzn pomiarowych

Niewyważenie na wirniku sztywnym można zidentyfikować z użyciem dwóch płaszczyzn pomiarowych. Aby w pełni wykorzystać identyfikację, należy użyć także dwóch płaszczyzn korekcyjnych. Są one potrzebne do wyeliminowania składowej momentowej. Korekcję podczas wyważania poprzedza identyfikacja niewyważenia. Jest ona inna przy wykorzystaniu wyważarek podkrytycznych i inna przy nadkrytycznych oraz przy wyważaniu w łożyskach własnych.

Niewyważenie może mieć składowe:

- a) siłową, czyli statyczną,
- b) momentową, czyli dynamiczną.

Wirnik posadowiony na wyważarce podkrytycznej wykonuje tylko ruch obrotowy. Sztywność podpór jest wystarczająca do tego, aby uniemożliwić wirnikowi dodatkowy ruch drgający w płaszczyźnie zawierającej oś obrotu. Siły bezwładności nie powodują ugięć podpór.

*Od praktyka można usłyszeć pogląd, że przed pierwszym rezonansem o ruchu sztywnego wirnika decyduje sztywność jego podparcia, a po rezonansie: ilość i rozkład masy. Sztywność podpór nie zmienia się, natomiast ilość i rozkład masy się zmieniają: po wymianie wirnika na inny.*

W wyważarkach nadkrytycznych podpory mają kształt zawiesi o małej sztywności w poziomie. Mała sztywność nie jest w stanie zapobiegać ruchowi. Dlatego, nieskompensowane siły bezwładności, pochodzące od znajdujących się po przeciwnej stronie osi wirowania nieskompensowanych mas, wywołują ruch w poziomej płaszczyźnie.

Wirnik jest tak oczujnikowany, że pomiar następuje, jeden raz na obrót, zawsze w takim samym położeniu kątowym względem ostoi. W ten sposób ruch obrotowy jest przez układ pomiarowo-obliczeniowy „obserwowany” jako kinetostatyczny. Siły bezwładności, pochodzące od niewyważenia, są kątowo związane z wirnikiem. Podziałka kątowa jest także z nim związana. Musi ona narastać wraz z obrotami.

Rozkład masy wirnika można skorygować w wielu miejscach, wzdłuż jego długości. Miejsca korekcji, zwane płaszczyznami korekcji *PK*, nie muszą się pokrywać z punktami

pomiarowymi, zwanymi płaszczyznami pomiarowymi *PP*. Różna może także być liczba *PK* i *PP*.

Dla  $PP = PK = 2$  najkorzystniej ustalić płaszczyzny na końcach wirnika. Mierzone wielkości przyjmują tam największe wartości i do wyeliminowania momentu można użyć obciążniki o najmniejszej masie.

Do wyważenia wirnika należy przygotować zarówno wirnik jak i wyważarkę.

Przygotowując wirnik do wyważenia, należy zapewnić możliwość odczytu położenia kąтового wirnika względem stałego punktu osto. Realizuje się to poprzez naklejenie folii odblaskowej. Opcjonalnie, gdy maszyna nie tworzy tzw. dynamicznej podziałki, należy nanieść podziałkę kątową na wirnik.

Proces przygotowania wyważarki zależy od jej rodzaju.

1. Przygotowanie wyważarki podkrytycznej z napędem paskowym:
  - a) jeżeli ta opcja jest dostępna, trzeba wybrać wagę wirnika: małą, średnią lub dużą;
  - b) wprowadzić wymiary geometryczne, w których są informacje o położeniu punktów podparcia wirnika i oraz położenie i średnice płaszczyzn korekcji;
  - c) utworzyć ścieżkę pomiarową dla czujnika obrotów poprzez ustawienie czujnika laserowego dogodnie dla odbicia wiązki światła od folii odblaskowej przyklejonej do wirnika w dowolnym miejscu;
  - d) wybrać, z menu maszyny, sposób podparcia wirnika uwzględniający dwie *PP*; uniwersalna kalibracja maszyny jest właściwa dla każdego rozkładu masy wirnika i dopasowana do wprowadzonych danych z pomiarów geometrycznych i podparcia wirnika; prędkość dostosować przy ograniczeniach wynikających tylko ze względów bezpieczeństwa i doświadczenia zawodowego obsługi;
  - e) ustawić ograniczniki ruchu osiowego w środku geometrycznym na końcach czopów wirnika; siły tarcia z ograniczników, jeżeli mają kierunek poziomy, przenoszą się bezpośrednio na czujniki w podporach maszyny - jako zakłócenie.
2. Przygotowanie wyważarki nadkrytycznej z napędem paskowym:
  - a) utworzyć ścieżkę pomiarową dla czujnika obrotów poprzez ustawienie czujnika laserowego dogodnie dla odbicia wiązki światła od folii odblaskowej przyklejonej do wirnika w dowolnym miejscu;
  - b) jeżeli wirnik ma inną masę lub kształt geometryczny od poprzednio wyważanych wirników, wykonać kalibrację uwzględniającą ilość masy i jej rozkład i prędkość obrotową zastosowaną przy kalibracji; przy kalibracji wykorzystać podziałkę kątową związaną z wirnikiem dla wprowadzenia kąta posadowienia obciążnika testowego;
  - c) ustawić ograniczniki ruchu osiowego w środku geometrycznym na końcach czopów wirnika; siły tarcia z ograniczników, jeżeli mają kierunek poziomy,

przenoszą się bezpośrednio na - czujniki w podporach maszyny, jako zakłócenie.

3. Przygotowanie aparatury przenośnej służącej do wyważania w łożyskach własnych:
  - a) sprawdzić wskazania amplitudy drgań w kilku miejscach, wzdłuż długości wirnika i w dwóch wzajemnie prostopadłych kierunkach, np. w poziomie i pionie;
  - b) posadzić czujniki w tych miejscach, w których: w kierunku prostopadłym do wybranego kierunku, amplitudy drgań są najmniejsze (po pierwszym kroku wyważania drgania w wybranym kierunku zmniejszą się, ale w kierunku prostopadłym drgania mogą pozostać duże i tym zakłócać działania czujników);
  - c) wykonać powiązanie układu pomiarowego maszyny z wirnikiem poprzez przyklejenie folii odbłaskowej w dowolnym położeniu kątowym na wirniku;
  - d) nanieść podziałkę kątową lub liczbową o dowolnej liczbie podziału obwodu; wraz z obrotami wartość kąta lub działek musi narastać;
  - e) przyjąć bazę pomiarową wspólną dla wszystkich pomiarów polegającą na możliwości poprawnego odczytania położenia kąтового wirnika w odniesieniu do ostoi, dla każdego z etapów.

Identyfikacja dzieli się na części: pomiarową i obliczeniową.

Część pomiarowa dzieli się na etapy:

- a) zerowy, w którym są mierzone ruchy lub siły w obu *PP* przy niewyważeniu początkowym;
- b) pierwszy, w którym są mierzone ruchy lub siły w obu *PP* przy niewyważeniu początkowym i wynikającym z posadowienia obciążnika testowego w pierwszej *PK*;
- c) drugi, w którym są mierzone ruchy lub siły w obu *PP* przy niewyważeniu początkowym i wynikającym z posadowienia obciążnika testowego w drugiej *PK* (po zdjęciu obciążnika z pierwszej *PK*).

Przyjmuje się, że każdy z pomiarów ruchu lub siły ma dwa składniki, które są rozróżniane według miejsca ich pochodzenia. Są to składniki wynikające z niewyważenia sumującego się do wypadkowej działającej w danej *PP* i składniki przeniesione - za pomocą sił sprężystości z jednego końca wirnika na drugi.

Stąd wyważanie wirników z jednoczesną identyfikacją w dwóch *PP* jest uważane za rozwinięcie sposobu wyważania wirników w jednej *PP*. Rozwinięcie polega na:

- a) rozszerzeniu pojęcia wektora kalibracji  $a$  (występującego przy wyważaniu z użyciem jednej *PP*) i zastąpieniu go dwoma współczynnikami określającymi

podatności układu mechanicznego w dwóch punktach, w których są zamontowane czujniki; współczynniki są wyznaczone na podstawie reakcji układu mechanicznego w tych  $PP$ , na posadowienia obciążników testowych w najbliższym ich otoczeniu w odpowiednich  $PK$ ; czyli jest to np. reakcja układu pomierzona po lewej stronie wirnika, będąca odpowiedzią na posadowienie obciążnika także po lewej stronie; ten rodzaj współczynników nazywamy równoindeksowymi  $a_{ii}$ ;

- b) zdefiniowaniu drugiego rodzaju współczynników wyznaczających reakcje układu mechanicznego w obu  $PP$ , w odpowiedzi na posadowienie, kolejno, każdego z obciążników w  $PK$  znajdujących się na przeciwległych końcach wirnika, w stosunku do każdego z  $PP$ ; te współczynniki nazywamy różnoindeksowymi  $a_{ij}$ ; współczynniki określają sposób przenoszenia ruchu lub siły, np. z lewej  $PK$  do prawego  $PP$  i odwrotnie, czyli z jednego punktu wirnika do drugiego, wzdłuż długości wirnika.

Współczynniki są liczbami zespolonymi.

Współczynniki podatności są wyznaczone jako stosunki reakcji dynamicznych układu na obciążniki testowe posadowione po tych samych stronach, po których następują pomiary.

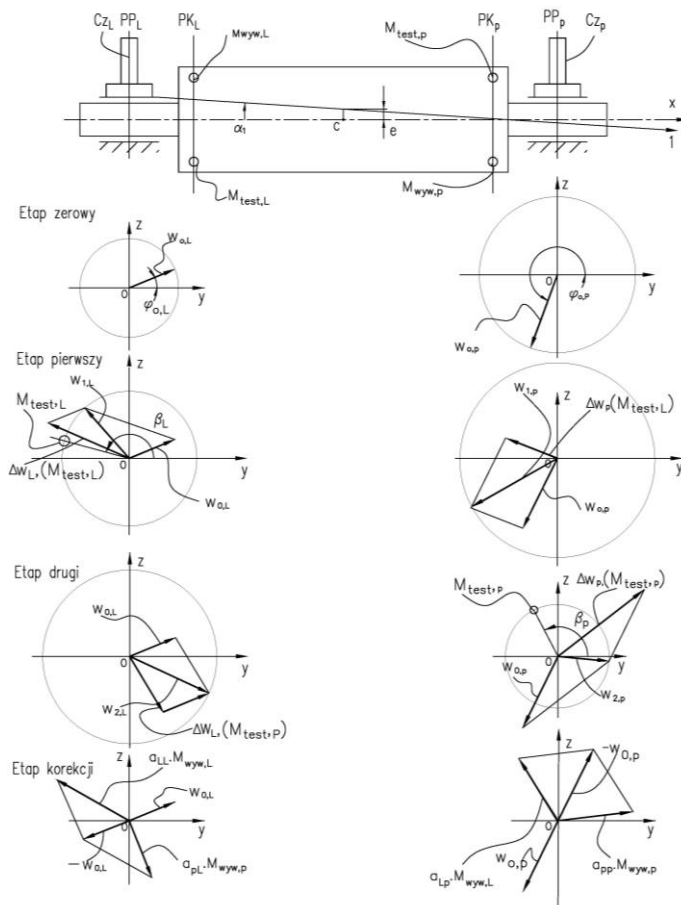
Współczynniki przenoszenia są wyznaczone jako stosunki reakcji dynamicznych układu na obciążniki testowe posadowione po przeciwnych stronach, po których następują pomiary.

Drugą istotną informacją, która jest zawarta w związkach (1) i (2), jest odniesienie zmian wskazów wektorowych do zerowych wskazań w obu etapach. Podkreśla to znaczenie zerowych wskazań na wynik obliczeń niewyważenia.

Cały proces wyważania można przeanalizować, korzystając z rysunku 1. Jest na nim przedstawiony niewyważony sztywny wirnik.

Podstawowa informacja, która jest zawarta na rysunku, jest następująca:

- a) wirnik jest niewyważony, gdyż główna, centralna oś bezwładności nie pokrywa się z osią obrotów;
- b) zamocowanie obciążnika testowego w lewej  $PK_L$  powoduje zarówno zmianę wskazania aparatury (co do amplitudy i fazy) w lewej  $PP_L$ , jak i w prawej  $PP_P$ ;
- c) zamocowanie obciążnika testowego w prawej  $PK_P$  powoduje zarówno zmianę wskazania aparatury (co do amplitudy i fazy) na prawej  $PP_P$ , jak i na lewej  $PP_L$ ;
- d) powyższe zmiany wskazów wektorowych różnią się między sobą odmiennymi przyrostami amplitud i faz;
- e) zmiana wektora wskazu, po przeciwnej stronie w stosunku do zamocowanego obciążnika sugeruje, że obie strony wpływają na siebie, a brak symetrii w oddziaływaniu dowodzi, że kierunek wpływania ma znaczenie;
- f) reakcje podpór na zamocowane obciążniki są specyficzne dla każdej z podpór.



Rys. 1. Etapy jednoczesnej identyfikacji w dwóch płaszczyznach pomiarowych.

Komentarz dotyczący rysunku (analizując od góry do dołu):

1. W etapie zerowym wyważarka pokazuje dwa wskaźy wektorowe  $W_{0,L}$  i  $W_{0,P}$ , które przedstawiają ruch lub siły początkowe zidentyfikowane i pomierzone w obu  $PP$ . Skala wzmocnienia jest automatycznie przyjęta przez maszynę.
2. W pierwszym etapie identyfikacyjnym, w którym obciążnik testowy  $M_{test,L}$  jest zamocowany w lewej  $PK$ , wyważarka wskazuje  $W_{1,L}$  i  $W_{1,P}$ , gdzie:

- a) wskaz wektorowy  $W_{1,L}$  jest sumą wektorową pierwotnego wskazu  $W_{0,L}$  i reakcji  $\Delta w_{L,(M_{test,L})}$  lewej podpory na obciążnik  $M_{test,L}$ ; reakcja jest zależna od współczynnika podatności w lewej podporze;
  - b) wskaz wektorowy  $W_{1,P}$  jest sumą wektorową pierwotnego wskazu  $W_{0,P}$  i reakcji prawej podpory  $\Delta w_{P,(M_{test,L})}$  na obciążnik  $M_{test,L}$ ; reakcja jest zależna od współczynnika przenoszenia sygnału z lewej na prawą podporę.
3. W drugim etapie identyfikacyjnym, w którym obciążnik testowy  $M_{test,P}$  jest zamocowany w prawej  $PK$ , wyważarka wskaże  $W_{2,L}$  i  $W_{2,P}$ , gdzie:
- a) wskaz wektorowy  $W_{2,L}$  jest sumą wektorową pierwotnego wskazu i reakcji  $\Delta w_{L,(M_{test,P})}$  lewej podpory na obciążnik  $M_{test,P}$ ; reakcja jest zależna od współczynnika przenoszenia z prawej podpory na lewą;
  - b) wskaz wektorowy  $W_{2,P}$  jest sumą wektorową pierwotnego wskazu, po tej stronie wirnika, i reakcji prawej podpory  $\Delta w_{P,(M_{test,P})}$  na obciążnik  $M_{test,P}$ ; reakcja jest zależna od współczynnika podatności układu na sygnał pochodzący z prawej na prawą podporę.

4. Etap korekcji jest poprzedzony obliczeniami, w których są wyznaczone:
- a) współczynniki równoindeksowe, czyli podatności układu określone w poszczególnych  $PK$ :  $a_{LL}$  i  $a_{PP}$ ; są one wyliczone, dla tych płaszczyzn, na podstawie wyników pomiarów uzyskanych w odpowiednich  $PP$ ; współczynniki określające podatność, w miejscu zamocowania czujnika i w kierunku działania jego osi pomiarowej, mają postać:

$$a_{ll} = \frac{W_{1,l} - W_{0,l}}{M_{test,l}} \quad a_{pp} = \frac{W_{2,p} - W_{0,p}}{M_{test,p}}, \quad (1)$$

- b) współczynniki różnoindeksowe, czyli przenoszenia z jednej  $PK$  do drugiej, określone dla poszczególnych  $PK$ :  $a_{LP}$  i  $a_{PL}$ , wyliczone na podstawie wyników pomiarów pomierzonych w odpowiednich  $PP$ ; współczynniki określające sposób przenoszenia oddziaływania dynamicznego z jednego końca wirnika na drugi, mają postać:

$$a_{lp} = \frac{W_{1,p} - W_{0,p}}{M_{test,l}} \quad a_{pl} = \frac{W_{2,l} - W_{0,l}}{M_{test,p}}, \quad (2)$$

- c) masy obciążników wyważających  $M_{wyw,L}$  i  $M_{wyw,P}$ , wyliczone na podstawie powyższych współczynników i wskazów początkowych  $W_{0,L}$  i  $W_{0,P}$ ; masy obciążników korekcyjnych są obliczane ze związków:

$$M_{wyw,p} = \frac{a_{lp}W_{0,l} - a_{ll}W_{0,p}}{a_{pp}a_{ll} - a_{pl}a_{lp}},$$

$$M_{wyw,l} = \frac{a_{pl}W_{0,p} - a_{pp}W_{0,l}}{a_{pp}a_{ll} - a_{lp}a_{pl}}.$$

Indeksy:  $l, p$  oznaczają lewą i prawą stronę wirnika; 0, 1, 2 oznaczają etapy: zerowy, pierwszy i drugi;  $M_{test,l}$  jest masą testową posadowioną w lewej PK.

Wyrażenie np.:  $W_{1p} - W_{0p} = \Delta W_{1,p(M_{test,l})}$  oznacza zmianę wskazu wektorowego po prawej stronie na skutek posadowienia obciążnika testowego po lewej stronie wirnika. Z opisu wynika istotność pomiarów uzyskanych w zerowym etapie. W każdym następnym etapie identyfikacji te pomiary są wykorzystywane.

Podsumowanie:

1. Dla wyważenia sztywnego wirnika należy skorzystać minimum z dwóch płaszczyzn pomiarowych i korekcyjnych.
2. Identyfikacja dynamiczna wykonana w płaszczyznach pomiarowych na maszynie nadkrytycznej, za pomocą obciążników testowych, jest oparta na pomiarze odpowiedzi układu drgającego: wirnik + podparcie w miejscu i kierunku działania czujnika. W sygnale są zawarte składniki pochodzące od drgań poprzecznych całego wirnika. Nie jest to identyfikacja uniwersalna. Dlatego obciążniki testowe mogą być zamocowane tylko tam, gdzie będą następnie mocowane obciążniki korekcyjne.
3. Identyfikacja dynamiczna wykonana w płaszczyznach pomiarowych na maszynie podkrytycznej, za pomocą obciążników testowych, jest oparta na pomiarze odpowiedzi układu kinetostatycznego: wirnik + podparcie. Wykonywana jest jednorazowo przez producenta maszyny, gdyż w sygnałach z czujników nie występują składowe od drgań poprzecznych wirnika. W sygnale są zawarte tylko składniki pochodzące od sił bezwładności od niewyważenia. Mają one stałe ułożenie względem wirnika. Jest to identyfikacja uniwersalna. Dlatego obciążniki korekcyjne mogą być zamocowane w dowolnej płaszczyźnie, niezależnie od położenia płaszczyzn pomiarowych. Każda zmiana położenia płaszczyzny korekcyjnej wymaga przeliczenia wartości i kąta posadowienia obciążnika korekcyjnego według zasad statyki.

*Powyższe zagadnienia zostały szczegółowo opisane w mojej książce: M. Malec: Wyważanie dynamiczne wirników w teorii i praktyce. Bydgoszcz 2022.*

*Dystrybutorem książki jest: [www.fachowa.pl](http://www.fachowa.pl)*

Mirosław Malec