POLITECHNIKA BIAŁOSTOCKA

WYDZIAŁ INŻYNIERII ZARZĄDZANIA

KATEDRA ZARZĄDZANIA PRODUKCJĄ

Instrukcja do zajęć laboratoryjnych z przedmiotu:

Systemy kontrolno-pomiarowe

Kod przedmiotu: **KSU011012, KNU011012**

Ćwiczenie Nr 2

WYWAŻANIE WIRNIKÓW SZTYWNYCH W ŁOŻYSKACH PRZY POMOCY SYSTEMU *KSD-400*

O p r a c o w a ł :

dr inż. Arkadiusz Łukjaniuk

Białystok 2020

Wszystkie prawa zastrzeżone

Wszystkie nazwy handlowe i towarów występujące w niniejszej instrukcji są znakami towarowymi zastrzeżonymi lub nazwami zastrzeżonymi odpowiednich firm odnośnych właścicieli.

CEL ĆWICZENIA: celem ćwiczenia jest zapoznanie studentów z problematyką wyważania wirników, opanowanie umiejętności pracy z systemem KSD-400, a także wykonanie wyważania wirników sztywnych maszyn w łożyskach własnych i ocena jakości wykonania tej operacji.

1. WPROWADZENIE

Przy symetrycznym rozłożeniu mas wirujących elementów względem osi obrotu siły odśrodkowe wywołane przez nie 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 niezrównoważonej siły odśrodkowej. Jednym z objawów jej oddziaływania są intensywne drgania wirnika, łożysk, kadłuba i fundamentów. Pogarszają one w znaczny sposób niezawodność maszyny i skracającej 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.

Wyważanie jest to proces polegający na dążeniu do poprawy rozkładu masy ciała w taki sposób, żeby wirowało ono w swoich łożyskach bez niezrównoważonych sił odśrodkowych. Cel ten może być osiągnięty jedynie do pewnego stopnia, ponieważ nawet po wyważeniu wirnik ma pewne niewyważenie resztkowe.

Norma PN-93/N-01359 wyszczególnia:

- ✓ sposoby przedstawiania niewyważenia w jednej lub dwóch płaszczyznach;
- ✓ metody wyznaczania dopuszczalnego niewyważenia resztkowego;
- ✓ metody przypisywania niewyważenia płaszczyznom korekcji;
- ✓ metody pomiarowego określenia stanu niewyważenia resztkowego wirnika;
- ✓ rodzaje błędów związanych z określeniem niewyważenia resztkowego.

Wirniki sztywne

Według normy PN-93/N-01361 wirnik sztywny, to wirnik, którego niewyważenie może być skorygowane w dwóch dowolnych płaszczyznach. Po

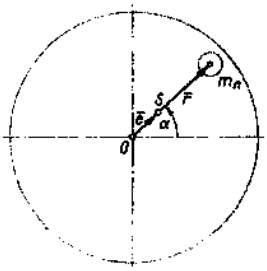
korekcji jego niewyważenie resztkowe nie zmienia się znacząco (w odniesieniu do osi wału) dla wszystkich prędkości aż do prędkości roboczej maksymalnej. Wirnik sztywny utożsamiany jest z masą sztywną.

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.

Niewyważenie

W celu wyprowadzenia podstawowych pojęć techniki wyważania rozpatrzymy 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 ***0*** (rys.l).



Rys. 1. Niewyważona wirująca tarcza

Jeżeli na tarczy znajduje się niezrównoważona masa m_n, której środek ciężkości jest określony wektorem wodzącym $\bar{r}$, to wtedy środek ciężkości wirnika mieści się w punkcie **S**, którego położenie wyznacza wektor wodzący $\bar{e}$ nazywany mimośrodowością środka ciężkości. Jego moduł równa się odległości środka ciężkości **S** od osi wirnika, położenie kątowe określane jest kątem **α**. W wyniku obracania się wirnika z prędkością kątową **ω** na niezrównoważoną masę **m** działa siła odśrodkowa bezwładności.

$$\bar{F} = m_n \cdot \bar{r} \cdot \omega^2 . \qquad (1)$$

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 $\bar{r} = const$.

Przy wyważaniu wartość $\mathbf{m_n}$ 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 ($\mathbf{m_w}$+$\mathbf{m_n}$) skupionej w środku ciężkości **S** i wirującej po okręgu $\bar{e}$ z prędkością kątową **ω**. W tym przypadku niezrównoważoną siłę odśrodkową można wyrazić wzorem:

$$\overline{F} = (m_w + m_n) \cdot \bar{e} \cdot \omega^2 . \qquad (2)$$

Z porównania prawych stron wzorów (1) i (2) otrzymano:

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

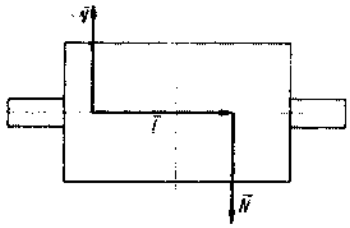
Z uwagi na to, że masa niewyważona $\mathbf{m_n}$ jest zawsze bardzo mała w porównaniu z masą wirnika $\mathbf{m_w}$, więc zależność tę można zastąpić wzorem przybliżonym:

$$\bar{e} = \frac{\overline{N}}{m_w} . \qquad (3)$$

Iloraz $\frac{N}{m_w}$ nazwano niewyważeniem właściwym, ponieważ jest on równy wartości niewyważenia przypadającego na jednostkę masy wirnika. Ze wzoru (3) wynika, że niewyważenie właściwe jest liczbowo równe modułowi mimośrodowości środka ciężkości wirnika $\bar{e}$. Jeżeli wartość **N** jest podawana w **[g·mm]**, a masa wirnika $\mathbf{m_w}$ w kilogramach, to wymiarem niewyważenia właściwego (modułu mimośrodowości) jest mikrometr.

Moment niewyważenia

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



Rys. 2. Moment niewyważenia

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

$$\overline{M_n} = \overline{N} \times \bar{l} .$$

Z własności iloczynu wektorowego wynika, że wektor momentu niewyważenia $\overline{M_n}$ jest prostopadły do płaszczyzny wyznaczonej przez oś wirnika i wektor niewyważenia $\overline{N}$.

Moduł iloczynu wektorowego wynosi:

$$M_n = N \cdot l,$$

ponieważ kąt pomiędzy wektorami $\overline{N}$ 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 $\mathbf{m_n}$ względem osi wirnika i płaszczyzny do niej prostopadłej. Moment niewyważenia ma wymiar **[g·mm^2]**.

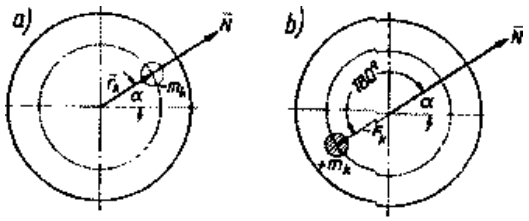
Wyważanie

Wyważanie jest procesem korygowania rozkładu masy wirnika. Operację tę wykonuje się dodając lub ujmując na promieniu korekcji $\mathbf{r_k}$ taką masę korekcyjną $\mathbf{m_k}$, dla której suma sił odśrodkowych, a więc suma niewyważeń jest równa zeru:

$$\overline{N} + m_k \cdot \overline{r_k} = 0.$$

W ten sposób niewyważenie $\overline{N}$ jest zrównoważone niewyważeniem $(-m_k \cdot r_k)$.

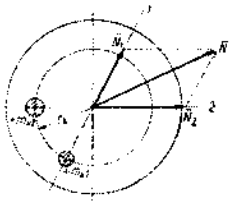
Korekcję masy wirnika wykonuje się przeważnie na tej średnicy, która pokrywa się z kierunkiem niewyważenia $\overline{N}$. Jeżeli z wirnika usuwamy masę w miejscu określonym kątem niewyważenia **α** (rys. 3a), to nazywamy ją ujemną masą korekcyjną. Jeżeli w miejscu położonym pod kątem **α+180°** dodajemy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



Rys. 3. Masa korekcyjna $\mathbf{m_k}$: 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 $\overline{N}$ rozkłada się na dwa kierunki, na których korekcja masy jest możliwa (rys. 4). W ten sposób otrzymuje się dwie składowe niewyważenia $\overline{N}_1$ i $\overline{N}_2$, które równoważy się dodatnimi lub ujemnymi masami korekcyjnymi $\mathbf{m_{k1}}$ i $\mathbf{m_{k2}}$.

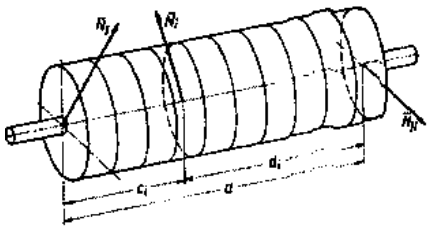


Rys. 4. Rozkład niewyważenia $\overline{N}$ na dwie składowe $\overline{N}_1$ i $\overline{N}_2$

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

Wirnik niewyważony

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



Rys. 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 $\overline{N_i}$, a stan niewyważenia całego wirnika jest określony zbiorem tych wektorów. Dla sił odśrodkowych wywołanych niewyważeniami można zapisać dwa równania równowagi momentów:

$$\overline{N_I} \cdot a \cdot \omega^2 = \sum_{i=I}^{n} \overline{N_i} \cdot d_i \cdot \omega^2 \qquad \text{i} \qquad \overline{N_{II}} \cdot a \cdot \omega^2 = \sum_{i=I}^{n} \overline{N_i} \cdot c_i \cdot \omega^2 ,$$

gdzie: $\overline{N_I}$ i $\overline{N_{II}}$ - niewyważenia wypadkowe obliczone dla dwóch dowolnie przyjętych płaszczyzn poprzecznych **I** i **II**.

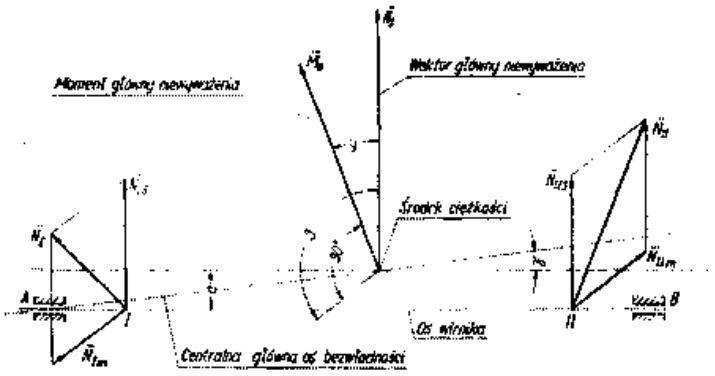
Z ostatnich dwóch zależności obliczono:

$$\overline{N_I} = \frac{\sum_{i=I}^{n} \overline{N_i} \cdot d_i \cdot \omega^2}{a} \qquad \text{i} \qquad \overline{N_{II}} = \frac{\sum_{i=I}^{n} \overline{N_i} \cdot c_i \cdot \omega^2}{a} . \tag{4}$$

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 i moment główny tych sił. Odpowiadają im wektor główny niewyważenia $\overline{N_S}$ i moment główny niewyważenia $\overline{M_S}$ (rys. 6.)



Rys. 6. Wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia.

Wektor główny niewyważenia jest prostopadły do osi wirnika, przechodzi przez jego środek ciężkości i zgodnie ze wzorem (3), jest równy:

$$\overline{N_S} = \boldsymbol{m}_w \cdot \bar{\boldsymbol{e}}. \qquad (5)$$

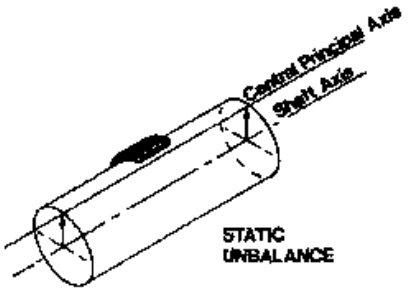
Zgodnie z warunkami równowagi sił i momentów wektor $\overline{N_S}$ można rozłożyć na równoległe do niego dwa wektory $\overline{N_{IS}}$ i $\overline{N_{IIS}}$, działające w dwóch dowolnych płaszczyznach poprzecznych **I** i **II**.

Wektor momentu głównego niewyważenia $\overline{M_N}$ jest prostopadły do centralnej głównej osi bezwładności wirnika i osi wirnika. Jeżeli osie te przecinają się, to wyznaczają płaszczyznę, w której działa moment $\overline{M_N}$. Moment ten można określić również za pomocą pary wektorów niewyważenia $\overline{N_{Im}}$ i $\overline{N_{IIm}}$, 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 $\overline{N_S}$ i $\overline{N_m}$ w płaszczyznach **I** i **II** otrzymano wektory niewyważenia $\overline{N_I}$ i $\overline{N_{II}}$ określone wzorami (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.

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 $\overline{N_S}$, ponieważ moment główny $\overline{M_N}$ jest w tym przypadku równy zeru. Ze wzoru (5) wynika, że wartość niewyważenia statycznego wirnika można jednoznacznie określić podając moduł mimośrodowości jego środka ciężkości $\bar{e}$.



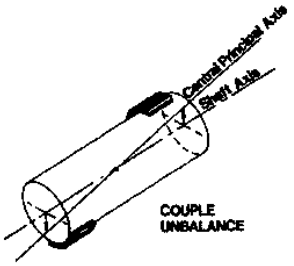
Rys. 7. Niewyważenie statyczne.

Jeżeli wirnik ma tylko niewyważenie statyczne, to można go wyważyć tylko w jednej płaszczyźnie przechodzącej przez środek ciężkości. Umieszczając w tej płaszczyźnie niewyważenie korekcyjne $\overline{N_k} = \overline{N_S}$ przesuwa się równolegle 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.**

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 $\bar{e} = 0$.



Rys. 8. Niewyważenie momentowe.

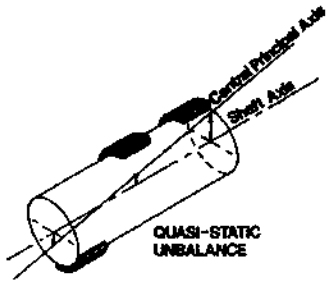
Ze wzoru (5) wynika, że wtedy $\overline{N_S} = 0$ i dlatego niewyważenie jest określone tylko momentem głównym niewyważenia $\overline{M_N}$. Wektor tego momentu jest prostopadły do płaszczyzny przechodzącej przez oś wirnika i centralną główną oś bezwładności. W płaszczyźnie tej można przyjąć nieskończoną liczbą par niewyważeń, których momenty będą równe modułowi wektora $\overline{M_N}$, 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 niewyważeń.

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 $\overline{N_S}$ i niewyważenia momentowego $\overline{M_N}$ - wektor główny niewyważenia i moment główny niewyważenia leżą w jednej płaszczyźnie, która przechodzi przez oś wirnika i jego centralną główną oś bezwładności, a obie osie przecinają się poza środkiem ciężkości.



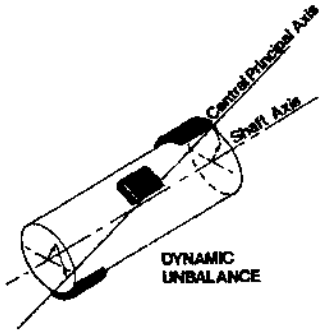
Rys. 9. Niewyważenie quasi-statyczne

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

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 niewyważeń nie pokrywają się.



Rys. 10. Niewyważenie dynamiczne.

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

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.

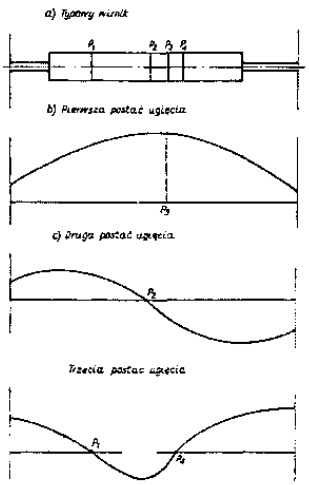
W przypadku gdy poszczególne części wyważa się oddzielnie należy wpierw uzgodnić czy będą one wyważane wraz z elementami łączącymi, takimi jak np. śruby i wpusty.

Wirniki giętkie

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.

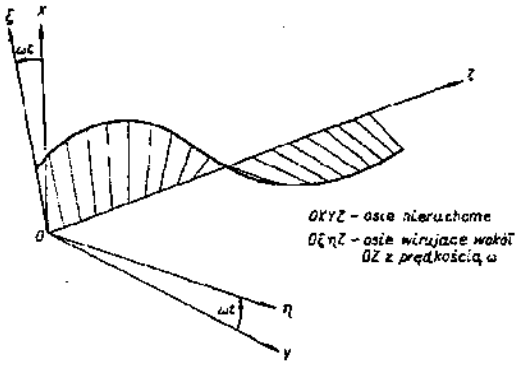
Formy postaci wirnika giętkiego

Jeśli pominie się tłumienie, postacie wirnika są głównymi postaciami ugięcia i w przypadku wirnika podpartego przez łożyska izotropowe, te postacie ugięcia są krzywymi wirującymi wokół osi wału. Typowe krzywe dla trzech głównych postaci wirnika prostego, podpartego łożyskami podatnymi w pobliżu jego końców, ilustruje rys. 11.



Rys.. 11. Typowe postacie dla wirników giętkich montowanych na podporach podatnych.

Dla zespołu tłumionego wirnik-łożysko, postacie ugięcia mogą być krzywymi przestrzennymi, wirującymi wokół osi wału, szczególnie w przypadku odczuwalnego tłumienia uzyskiwanego w łożyskach z płynnym tarciem. Druga postać tłumiona pokazana jest na rys. 12. 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 oddziaływują właściwości dynamiczne, rozmieszczenie osiowe łożysk oraz ich podłoża.



Rys. 12. Druga możliwa postać tłumiona.

Podział wirników giętkich

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

- **Klasa l** - 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 wymaga zastosowania metod wyważania przy podwyższonej prędkości.
- **Klasa 4** - wirnik, który może należeć do klasy l, 2 lub 3, lecz przedstawia jeden lub dwa dodatkowe elementy giętkie 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.

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 wyważany 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 tych wymienionych powyżej przypadków są opisane w normie PN-93/N-01362.

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 opisaliśmy 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 odstąpienia 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

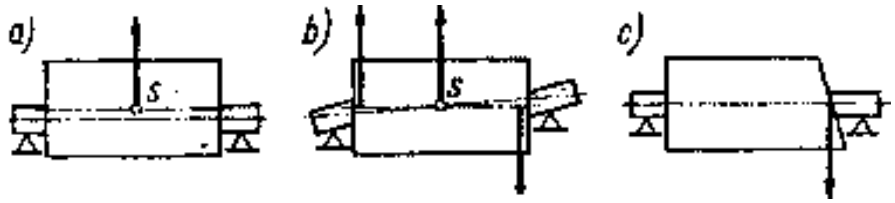
Przesunięcie środka ciężkości wirnika z osi symetrii może być wywołane niejednorodnością materiału. Jest ona największa w elementach odlewanych, ponieważ zdarzają się w nich dość często jamy skurczowe. W mniejszym stopniu na stan niewyważenia wirnika wpływa nierównomierny rozkład gęstości samego materiału.

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 rysunku (rys. 13a) przedstawiono wirnik z nie wyważeniem 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. 13b). Dodatkowe niewyważenie może być wywołane wykonaniem płaszczyzn nie prostopadłych do osi wirnika (rys. 13c).



Rys. 13. Błędy mocowania obrabianego elementu.

Częstymi przyczynami powstawania dużych niewyważeń 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 trwałe 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.

Pomiary niewyważenia wykonywane są metodami elektrycznymi i wymagają przetworzenia sygnałów mechanicznych na proporcjonalne wielkości elektryczne (prąd lub napięcie elektryczne).

Operacja ta może odbywać się przy użyciu następujących przetworników:

- przetworników piezoelektrycznych;
- przetworników indukcyjnych;
- przetworników pojemnościowych.

Zasada działania przetwornika piezoelektrycznego

W używanym w laboratorium systemie pomiarowym KSD-400 do pomiarów drgań stosowane są czujniki piezoelektryczne i dlatego w skrócie opiszemy ich budowę i zasadę działania. W przetwornikach tych wykorzystuje się odkryte przez Piotra Curie właściwości niektórych kryształów poddawanych ściskaniu lub rozciąganiu. Siły deformujące kryształ powodują powstawanie na jego ściankach ładunków elektrycznych i związanej z nimi różnicy potencjałów (napięcia elektrycznego) między ściankami. Ładunki te zanikają po ustąpieniu sił deformujących kryształ, co oznacza, że zjawisko ma charakter odwracalny. Opisane zjawisko nosi nazwę ***zjawiska piezoelektrycznego.***

Znane jest także zjawisko odwrotne, zwane ***zjawiskiem elektrostrykcji***. Polega ono na zmianie wymiarów geometrycznych kryształu w wyniku przyłożenia do jego ścianek napięcia elektrycznego. Obydwa zjawiska występują w stanach statycznych i dynamicznych.

Najpowszechniej wykorzystywanym do budowy przetworników pomiarowych materiałem jest kwarc (SiO_2), który krystalizuje w układzie heksagonalnym. Po ścięciu górnej i dolnej części kryształu, otrzymuje się prostopadłościan regularny o podstawie sześciokątnej [2]. W prostopadłościanie

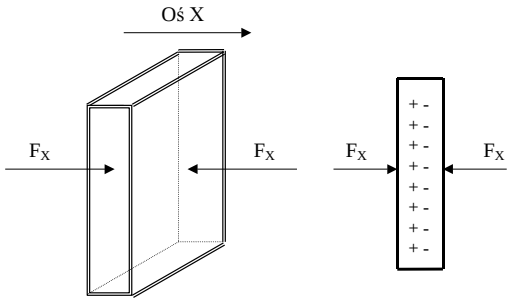
wyróżnić można szereg osi symetrii o charakterystycznych właściwościach (trzy osie elektryczne - **x**, trzy osie mechaniczne - **y** oraz oś optyczną - **z**). Z kryształu wycina się płytkę o ściankach prostopadłych do osi **x,y,z.** Gdy płytkę taką poddamy siłom ściskającym, działającym w kierunku osi **x** (rys.14), wówczas na ściankach prostopadłych do tej osi powstaje ładunek elektryczny proporcjonalny do działającej siły $\boldsymbol{F_X}$:

$$Q = k \cdot F_X .$$

Współczynnik $\boldsymbol{k}$ – (moduł) piezoelektryczności charakteryzuje intensywność zjawiska piezoelektrycznego. Jest to iloraz ładunku elektrycznego $\boldsymbol{Q}$ (mierzonego w kulombach) i siły $\boldsymbol{F_X}$ działającej na kryształ (mierzonej w niutonach), pod wpływem której ten ładunek powstaje:

$$k = \frac{Q}{F_X} \cdot \left[\frac{C}{N}\right],$$

(dla kwarcu k = 2,3 10^{-12} C/N – [kulombów na niuton]).



Rys. 14. Płytka kwarcu poddana działaniu sił ściskających

Przy przejściu ze ściskania na rozciąganie, zmieniają się znaki ładunków. Wartości ładunków w obu przypadkach nie zależą od wymiarów płytki. Opisane zjawisko nazywane jest efektem piezoelektrycznym wzdłużnym. Gdy siła **F** działa w kierunku osi mechanicznej, ładunki pojawiają się na ściankach prostopadłych do osi elektrycznej **x**, ale o znakach przeciwnych aniżeli w poprzednim przypadku. Teraz powstające ładunki określa wzór:

$$Q = k \cdot F_X \frac{b}{a} , \qquad (5)$$

w którym występuje stosunek wymiarów płytki **a, b**. Dla otrzymania dużej wartości ładunku, zwiększa się wartość tego stosunku.

W czujnikach piezoelektrycznych na które działają duże siły, te ostatnie kieruje się w kierunku równoległym do osi elektrycznej **x** , gdy działające siły są niewielkie, kieruje się równolegle do osi mechanicznej **y**. Przy produkcji czujników piezoelektrycznych stosuje się wycinanie płytki tylko w wymienionych kierunkach głównych. Płytki wycinane pod innymi kątami w stosunku do osi głównych

stosowane są w generatorach kwarcowych w celu stabilizacji wytwarzanych przez nie drgań elektrycznych.

W celu wykorzystania efektu piezoelektrycznego, nakłada się na płytki elektrody metalowe lub metalizuje ich powierzchnię, otrzymując kondensator, którego pojemność oblicza się ze wzoru:

$$C = 0{,}0885 \cdot \frac{\varepsilon \cdot A}{a} \cdot [pF],$$

gdzie:A – pole powierzchi elektrod metalowych wyrażone w cm^2;

a – odległość między ich wewnętrznymi powierzchniami w cm;

ε – stała dielektryczna materiału płytki (np. kwarcowej).

Na powierzchni płytki poddanej działaniu siły **F** powstaną równe co wartości lecz przeciwnego znaku ładunki elektryczne **Q**, których wartość określa równanie (5). Ładunki te wywołają między okładkami płytki kwarcowej o pojemności **C** napięcie elektryczne o wartości:

$$U = \frac{Q}{C} = \frac{kF}{C}.$$

Napięcie to należy zmierzyć przyrządem wyposażonym w układ o dużej rezystancji wejściowej, by zapobiec rozładowaniu się kondensatora.

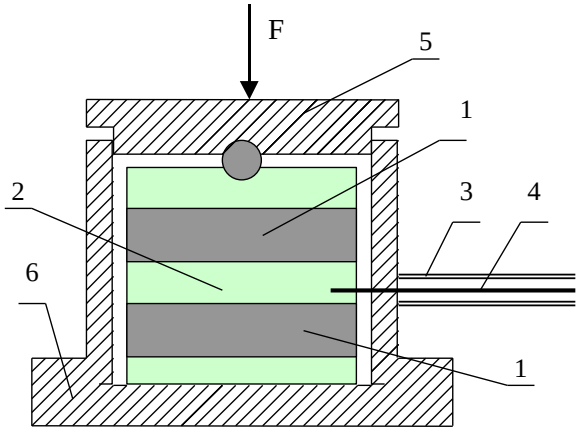
W praktyce omawiane napięcie mierzyć można tylko w stanie dynamicznym pracy czujnika, to znaczy gdy działająca nań siła zmienia swoją wartość w czasie. Przy stałej sile, powstający pod jej działaniem ładunek spłynąłby do masy poprzez rezystancję nieidealnej przecież izolacji użytych do budowy czujnika materiałów. Tak więc czujniki piezoelektryczne nadają się głównie do pomiaru drgań. Zauważmy, że wartość powstającego ładunku elektrycznego i związanego z nim napięcia nie zależy od pola powierzchni płytki, stąd czujnik mierzy siłę a nie ciśnienie (siłę działającą na powierzchnię jednostkową).

Kwarc nie ma największego współczynnika piezoelektryczności (większą ma np. tzw. sól Seignette'a), ale stosowany jest najczęściej do budowy czujników ze względu przede wszystkim na nadzwyczaj dużą wytrzymałość mechaniczną wynoszącą 800 kG/cm^2. Jest to istotna cecha w przypadku pomiaru drgań przy dużych (rzędu wielu ton) naciskach na czujnik, np. wagonu kolejowego lub lokomotywy. Moduł sprężystości kwarcu wynosi ok.0,8 10^6 kG/cm^2. Duża wartość modułu jest korzystna z punktu widzenia konstrukcji przetwornika, oznacza bowiem występowanie niewielkich zmian liniowych kwarcu pod wpływem działających sił.

Przetworniki piezoelektryczne mogą pracować w bardzo dużym zakresie częstotliwości, od kilku Hz do kilku MHz. Także zakres przyśpieszeń jest imponujący, od ułamka przyśpieszenia ziemskiego **g** do tysięcy **g.**

Budowa przetwornika piezoelektrycznego

Studenci zechcą sami przeanalizować budowę przetwornika piezoelektrycznego, którego szkic przedstawiono na rysunku 15.



Rys. 15. Budowa przetwornika piezoelektrycznego: 1 – płytki kwarcowe, 2 – elektroda środkowa, 3 – ekran kabla koncentrycznego, 4 – przewód sygnałowy (gorący) kabla, 5 – ruchome jarzmo przetwornika, 6 – obudowa przetwornika, F – siła nacisku

2. KOMPUTEROWY SYSTEM DIAGNOSTYCZNY *KSD-400*

2.1. WPROWADZENIE

Komputerowy analizator drgań KSD-400 [3] jest wszechstronnym wielokanałowym urządzeniem pomiarowym przeznaczonym do badania drgań maszyn wirujących oraz ich diagnostyki, regulacji turbin , badania silników spalinowych itp. Na rys. 15 przedstawiony jest widok analizatora diagnostycznego KSD-400.

Rys. 15. Widok analizatora diagnostycznego KSD-400.

Podstawowymi elementami analizatora są:

- ❖ czujniki przekształcające wielkości mechaniczne na elektryczne sygnały;
- ❖ wzmacniacze pomiarowe dopasowujące sygnały z czujników do współpracy z kartą przetwornika AC (są to wymienne panele pozwalające dopasować poszczególne tory pomiarowe do potrzeb użytkownika);
- ❖ 16-kanałowa karta przetwornika AC o standardzie PCMCIA typu NIDAQ-700 lub 6024E;
- ❖ komputer klasy IBM typu "notebook" z wejściem typu USB (wraz z oprogramowaniem), jest on niezależnym urządzeniem zestawu z możliwością wykorzystania do obsługi dowolnych programów.

Zestaw może współpracować między innymi z czujnikami drgań bezwzględnych (akcelerometrami lub przetwornikami elektrodynamicznymi), bezkontaktowymi czujnikami drgań względnych, przesunięć liniowych oraz ciśnień. Analizator KSD-400 jest urządzeniem 16-kanałowym umożliwiającym multipleksowaną rejestrację szesnastu sygnałów pomiarowych. Jednym z kanałów analizatora jest tor „strobowania" sygnałów pomiarowych przez fotoelektryczny czujnik refleksyjny. Sygnał z tego czujnika umożliwia synchroniczne wyzwalanie pomiaru, określanie prędkości obrotowej oraz rejestrację zmian poziomu drgań w funkcji obrotów maszyny.

Akumulatorowe zasilanie zestawu umożliwia ok. 3-godzinną pracę w terenie bez konieczności doładowywania urządzenia. Możliwa jest też praca z wykorzystaniem zasilania z sieci 220V.

2.2. PARAMETRY TECHNICZNE.

***Parametry cyfrowej obróbki sygnałów*:**

- ➢ Ilość kanałów pomiarowych: 16;
- ➢ Ilość próbek na kanał: 4 – 262144;
- ➢ Częstotliwość próbkowania: 16 – 100000 lub 200000;
- ➢ Odstępy pomiarów czasowych: 0.1 - 3600 s;
- ➢ Odstęp pomiaru w funkcji obrotów: 10 - 500 obr/min;
- ➢ Tryb zapisu na dysk: binarny oraz tekstowy.

Karty pomiarowe:

- ➢ Karty synchronizujące: czujnik fotoelektryczny laserowy typu CFL-10;
- ➢ Karty drganiowe: czujniki piezoelektryczne z transmisją prądową typu CP-03 lub elektrodynamiczne typu CS-110;
- ➢ Karty przemieszczeń względnych: wiroprądowe czujniki bezkontaktowe typu CW;
- ➢ Karty ciśnień: czujniki "PELLTRON" ze wzmacniaczem;

- Karty przesunięć liniowych: czujniki "MEGATRON";
- Karty napięciowe: +/- 10V;
- Karty prądowe: 4-20 mA;
- Inne karty: na życzenie użytkownika.

Zakresy pomiarowe.

- Zakres pomiarowy częstotliwości:
  - drgania bezwzględne: 4 - 15.000 Hz (przy czujnikach CP-03) (-3 dB);
  - drgania względne: 0 - 10.000 Hz (-3dB);
- Zakres pomiarowy przyśpieszeń: 0 - 70 m/s2 (RMS);
- Zakres pomiarowy prędkości drgań: 0 - 70 mm/s (RMS);
- Zakres pomiarowy amplitudy drgań: 0 - 700 μm (RMS);
- Zakres przesunięć względnych: 0,5 - 3,2 mm;
- Zakresy innych czujników wg życzeń użytkownika.

Tryby wyzwalania pomiarów:

- synchroniczny - sterowany impulsem z czujnika fotoelektrycznego;
- asynchroniczny (natychmiastowy) - wyzwalany klawiszem;
- w funkcji czasu;
- w funkcji zmian prędkości obrotowej maszyny.

Zasilanie zestawu pomiarowego:

- Komputer: z wbudowanych akumulatorów (czas pracy ok. 2 godz. - możliwa praca ciągła z zasilaniem z sieci 220 V);
- Walizka pomiarowa: z wbudowanych akumulatorów (czas pracy ok. 3 godz. - możliwa praca ciągła z zasilaniem z sieci 220V);
- Czas ładowania akumulatorów: komputer - ok .1,5 godz., walizka - ok. 8 godz.

Wymagania sprzętowe.

Komputer: „notebook" min. Pentium mono lub kolor.

Instalowanie programu w komputerze.

W komputerze dla obsługi programu KSD-400 niezbędne jest zainstalowanie programu NIDAQ do obsługi karty przetwornika PCMCIA. Instalację przeprowadza się z dostarczonej płyty CD.

Po zainstalowaniu sterowników karty PCMCIA, należy skopiować na dysk twardy program KSD-400.

Uwaga! Po skopiowaniu programu należy dokonać zmiany atrybutów dwóch plików programowych: ***sensor.ini*** oraz ***ksd400.exe.*** W obydwóch plikach należy odznaczyć „tylko do odczytu", a zaznaczyć „archiwalny".

2.3. PRZYGOTOWANIE ANALIZATORA DO PRACY

Uruchomienie programu:

a) połączyć kablem USB walizkę pomiarową z komputerem;
b) podłączyć czujniki pomiarowe do gniazd wejściowych analizatora;
c) włączyć zasilanie walizki pomiarowej;
d) sprawdzić stan naładowania akumulatorów komputera;
e) sprawdzić stan naładowania akumulatorów walizki pomiarowej (powinna świecić się zielona dioda LED);
f) uruchomić komputer w środowisku Windows;
g) uruchomić program pomiarowy plikiem ***KSD400.exe.***

2.4. OBSŁUGA PROGRAMU KOMPUTEROWEGO.

- ✓ Uruchomienie programu następuje po uruchomieniu pliku ***KSD400.exe*;**
- ✓ Program zgłasza się zawsze konfiguracją zatwierdzoną w ostatnio wykonywanym pomiarze;
- ✓ W celu obsługi programu najlepiej posługiwać się kursorem "myszki";
- ✓ Ustawień rodzaju pomiaru, widoku ekranu oraz konfiguracji systemu dokonuje się poprzez użycie górnej linii obsługi programu;
- ✓ Rozwijając okno " **Konfiguracja**" można zaprogramować wymagane interfejsy pomiarowe, które dopasowują parametry wzmacniaczy w poszczególnych kanałach do potrzeb programu (ustawienie minimalnego i maksymalnego mierzonego napięcia, wybór jednostki miary i zakresu pomiarowego). Wraz z dostarczonymi wzmacniaczami użytkownik otrzymuje już skonfigurowane interfejsy.

W oknie "**Konfiguracja**" można także dokonywać przyporządkowania kanałom poszczególnych interfejsów oraz ustawiać parametry pomiarów. W tym celu należy rozwinąć okno "Parametry pomiarów". Można w ten sposób ustawić ilość aktywnych kanałów pomiarowych, częstotliwość próbkowania i liczbę pobranych do pamięci próbek.

Częstotliwość próbkowania i liczba próbek podawana jest w odniesieniu do jednego kanału. Wynikają stąd następujące zależności:

a) czas pobierania próbek $\mathbf{T = n/f_p}$, gdzie: **n** - ilość próbek na kanał, $\mathbf{f_p}$ - częstotliwość próbkowania na jeden kanał;
b) zakres częstotliwości analizy FFT sygnału mierzonego $\mathbf{f_{gr} = f_p/2}$ (dla tej częstotliwości włączane są automatycznie filtry antyaliazingowe);
c) rozdzielczość analizy FFT $\mathbf{R = f_p/n}$.

Parametry pomiarów należy ustawić oddzielnie dla poszczególnych rodzajów pomiarów:

- ➢ ***natychmiastowego***, ***w funkcji czasu*** (dodatkowe parametry to odstęp czasowy i maksymalna liczba pomiarów);

- ***w funkcji obrotów*** (dodatkowe parametry to różnica obrotów między kolejnymi pomiarami i maksymalna ich liczba) - w tym trybie pracy konieczne jest użycie czujnika fotoelektrycznego.

W oknie "**Konfiguracja**" dokonuje się też następujących ustawień systemu:

- ✓ ilość cyfr po przecinku wyświetlanych liczb;
- ✓ częstotliwość filtru dolno-przepustowego przy analizie FFT;
- ✓ numeru urządzenia (tylko dla celów serwisowych);
- ✓ numeru wyzwalającego bitu (tylko dla celów serwisowych).

Również w oknie "**Konfiguracja**" można wpisać krótki opis dokonywanego pomiaru w danym kanale **("Opis okna...")** i dokonać zerowania karty przetwornika AC.

Rozwijając okno "**Pomiary**" można uruchomić określony rodzaj pomiaru:

- ✓ natychmiastowy wg znacznika (synchroniczny) **F2;**
- ✓ natychmiastowy - **F3;**
- ✓ w funkcji czasu - **F4;**
- ✓ w funkcji obrotów - **F5;**
- ✓ wyważanie - **F8**.

W oknie "**Pomiary**" dokonywany jest też zapis i odczyt wyników pomiarów oraz zakończenie pracy programu.

W oknie "**Widok**" można dokonywać wyboru rodzaju zobrazowania wyników pomiarów:

- włączenia wartości RMS - uaktywnienia tej opcji można też dokonać za pomocą strzałki znajdującej się na górze paska z numerami kanałów (pasek ten służy do przywołania na ekran lub też schowania poszczególnych kanałów pomiarowych);
- włączenia zobrazowania na ekranie wartości minimum i maksimum zarejestrowanego sygnału;
- włączenia pomiaru fazy (konieczne jest w tym celu podłączenie czujnika fotoelektrycznego);
- całkowania sygnału (jedno- lub dwukrotnego - w zależności od zdefiniowania interfejsu) - scałkowany sygnał jest zawsze zobrazowany na transformacie Fouriera FFT
- włączenia sygnału chwilowego (przejście do próbek sygnału);
- wyboru trybu XY (zobrazowanie jednego kanału w funkcji innego);
- włączenia transformaty Fouriera FFT;
- powiększenia obrazu danego kanału (efekt ten można także uzyskać poprzez szybkie dwukrotne kliknięcie "myszką" na wybrany rysunek (zmniejszenie – analogicznie);
- schowania wybranego wykresu;
- pokazania wszystkich szesnastu wykresów;

- schowania wszystkich wykresów. Trzy ostatnie czynności można także wykonać posługując się paskiem z numerami kanałów z prawej strony ekranu);
- uzyskania informacji o nastawionych parametrach pomiarów;
- wydruku ekranu pomiarowego.

Dodatkowe możliwości zobrazowania wyników pomiarów:

- włączenie lub wyłączenie dwóch kursorów na danym rysunku kanału pomiarowego poprzez kliknięcie "myszką" okna "**Analiza**" w lewym górnym rogu ekranu (pierwszy kursor zatwierdzany jest lewym przyciskiem "myszy", a drugi - prawym);
- włączenie "**zoomu**" (tzw. "lupy", czyli powiększenia - rozciągnięcia osi poziomej wykresu) - można to osiągnąć poprzez wielokrotne naciśnięcie klawisza "+" komputera, wielokrotne naciśnięcie klawisza "-" zmniejsza wykres;
- uruchomienie przemieszczania się po osi "x" - poprzez jednoczesne wciśnięcie klawiszy **Alt i strzałki** (prawej lub lewej);
- zobrazowanie obrotów maszyny w prawym górnym rogu ekranu - poprzez podłączenie czujnika fotoelektrycznego.

2.5. ZAPIS I ODCZYT WYNIKÓW POMIARÓW.

Zapisu wyników pomiarów można dokonać w dwóch formatach:

- w postaci pliku binarnego – rozszerzenie: ****.sen***;
- w postaci pliku tekstowego- rozszerzenie: ****.txt***.

Pliki binarne są bezpośrednio odczytywane przez program KSD400, natomiast pliki tekstowe można przenosić do programów przetwarzających dane pomiarowe, np. do programu Excel.

Ponieważ pliki tekstowe są niezrozumiałe dla programu KSD400, zalecany jest zapis wyników w formacie binarnym. W razie potrzeby wykorzystania pliku tekstowego można po pomiarach dokonać odczytu danego pliku binarnego, a następnie powtórnie zapisać go w pliku tekstowym.

Podczas zapisu wyników pomiarów w funkcji czasu lub obrotów w formacie tekstowym można zapamiętać wszystkie serie pomiarowe lub tylko wybrane albo też same wartości RMS.

2.6. FUNKCJA WYWAŻANIA

Wybór tej opcji jest dokonywany poprzez wybranie funkcji wyważania w oknie "**Pomiary**". Następnie należy wykonać następujące czynności:

- wybrać rodzaj wyważania: jedno- lub dwupłaszczyznowe;
- wybrać kanały pomiarowe, do których podłączone są czujniki drgań;
- wybrać wielkość mierzoną (ustawienie odpowiedniej jednostki miary);

- wpisać wartość masy ciężarka próbnego;
- zatwierdzić wyważanie.

Podczas procesu wyważania maszyny na ekranie pomiarowym zobrazowane są następujące wielkości:

- wartość drgań dla wyfiltrowanej składowej obrotowej (ozn. jako "**Drgania**");
- wartość drgań szerokopasmową (10 - 1000Hz, ozn. jako **"ISO RMS");**
- faza drgań (kąt pomiędzy znacznikiem "foto", a przejściem sygnału drganiowego przez "zero";
- obroty maszyny.

2.5.1. Wyważanie jednopłaszczyznowe

Po zatwierdzeniu procedury wyważania jednopłaszczyznowego należy wykonać następujące czynności:

a) uruchomić maszynę;
b) zainicjalizować pomiar – przycisk "**Start**";
c) zatwierdzić pomiar – przycisk "**Stop**";
d) zatrzymać maszynę;
e) zamocować ciężarek próbny;
f) uruchomić maszynę;
g) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
h) zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
i) zatrzymać maszynę;
j) odczytać wyniki wyważania;
k) zdjąć ciężarek próbny;
l) zamocować wyliczony ciężarek korekcyjny w podanym miejscu;
m) uruchomić maszynę;
n) wykonać pomiar testowy (sprawdzający).

2.5.2. Wyważanie dwupłaszczyznowe

Po zatwierdzeniu procedury wyważania dwupłaszczyznowego należy wykonać następujące czynności:

a) uruchomić maszynę;
b) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
c) zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
d) zatrzymać maszynę;
e) zamocować ciężarek próbny na płaszczyźnie ***1***;
f) uruchomić maszynę;
g) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
h) zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
i) zatrzymać maszynę;
j) zdjąć ciężarek próbny z płaszczyzny **1** i zamocować go na płaszczyźnie ***2***;

k) uruchomić maszynę
l) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
m) zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
n) zatrzymać maszynę;
o) odczytać wyniki wyważania;
p) zdjąć ciężarek próbny;
q) zamocować wyliczone ciężarki korekcyjne w podanych miejscach na płaszczyznach ***1 i 2;***
r) uruchomić maszynę;
s) wykonać pomiar testowy (sprawdzający).

Kąt fazowy należy odmierzyć od miejsca zamocowania ciężarka próbnego w kierunku przeciwnym do obrotów maszyny („nabiegająco").

2.6. UWAGI

Przedstawione w instrukcji parametry dotyczą oprogramowania bazowego dostarczanego standardowo. Istnieje możliwość modyfikacji niektórych parametrów w postaci opcji, wymagających osobnych ustaleń technicznych i handlowych. Wzmacniacze wejściowe poszczególnych kanałów pomiarowych posiadają budowę panelową co pozwala to na sukcesywną rozbudowę systemu.

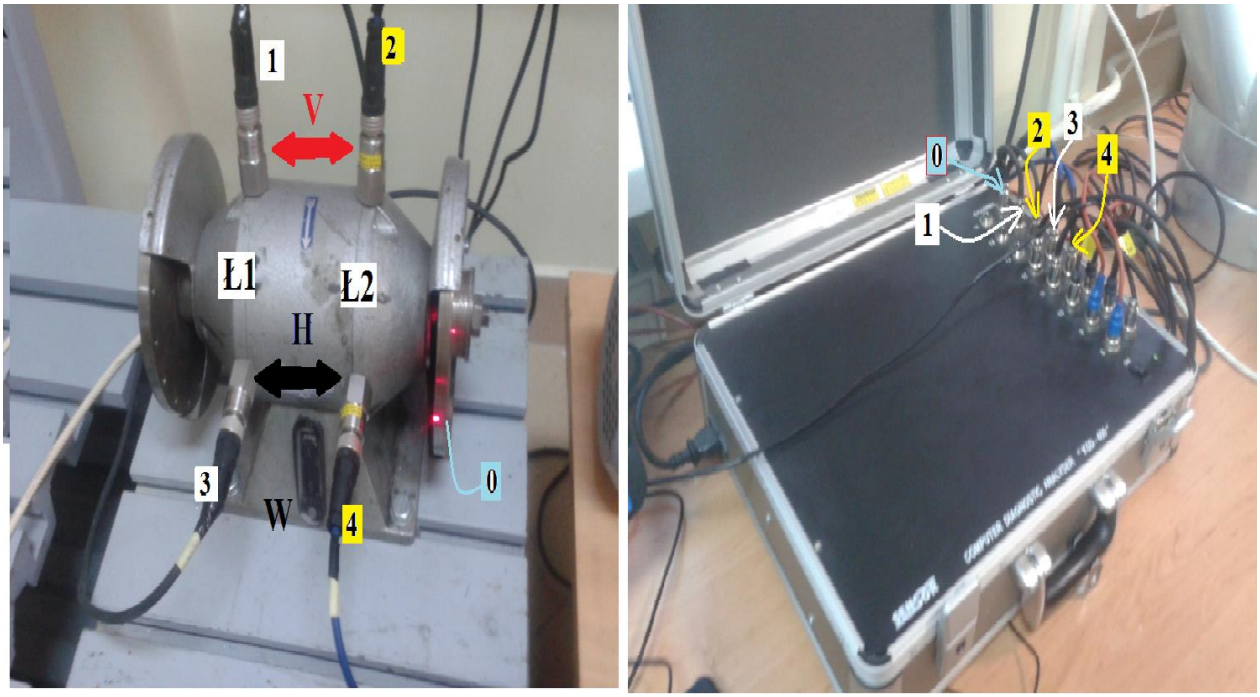
2.7. SKRÓTY KLAWISZOWE DO OBSŁUGI PROGRAMU

- Odczytaj wyniki pomiarów: **Ctrl+O.**
- Zapisz wyniki pomiarów: **Ctrl+S.**
- Włącz wyświetlanie wartości RMS **Ctrl+R.**
- Drukuj: **Ctrl+P.**
- Analiza Fouriera: **Ctrl+F.**
- Powiększanie wykresu: **Ctrl+Z.**
- Włączenie automatycznego skalowania: **Ctrl+A.**
- Zaznacz punkty pomiaru: **Ctrl+T.**
- Próbki: **Ctrl+B.**
- Tryb pracy X_Y: **Ctrl+X.**
- Parametry analizy FFT: **F 10.**
- Parametry pomiarów: **F 12.**

3. PRZEBIEG POMIARÓW

3.1. Pomiar drgań przed wyważaniem - kolejność operacji:

a) przeprowadzić podłączenia czujników na stanowisku pomiarowym zgodnie z rys. 16;

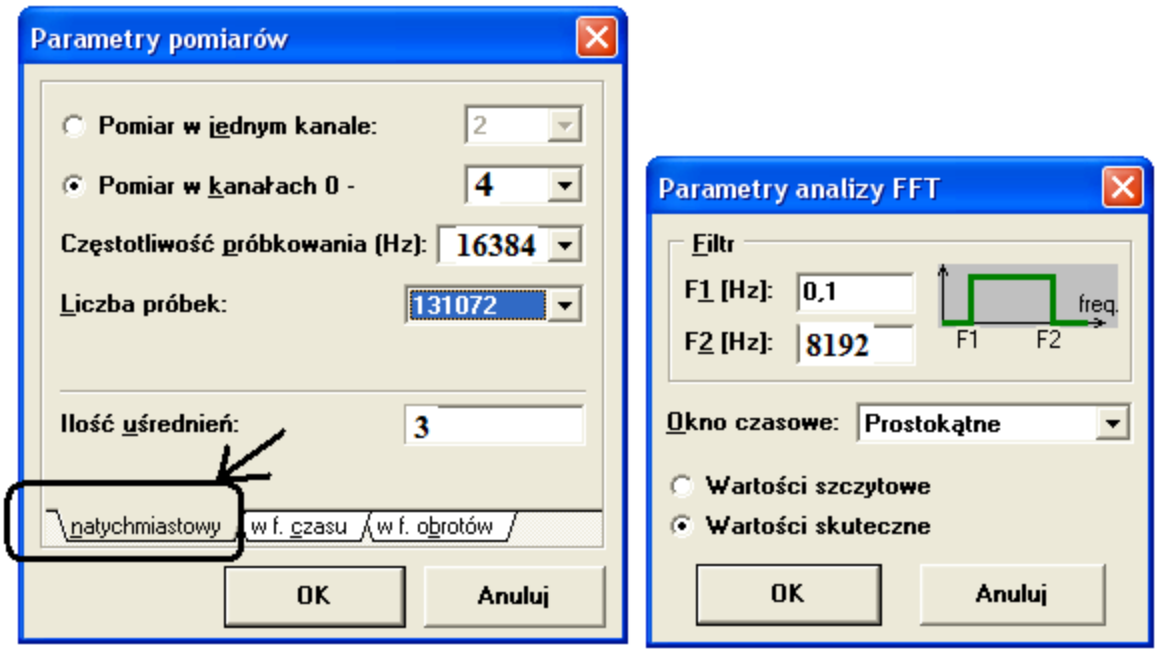


Rys.16. Konfiguracja połączeń stanowiska pomiarowego: 0- czujnik laserowy (kanał 0 - pomiar prędkości obrotowej); 1 – czujnik piezoelektryczny (kanał 1 - pomiar parametrów drgań w obszarze łożyska pierwszego, płaszczyzna pionowa); 2 - czujnik piezoelektryczny (kanał 2 - pomiar parametrów drgań w obszarze łożyska drugiego, płaszczyzna pionowa); 3-czujnik piezoelektryczny (kanał 3 - pomiar parametrów drgań w obszarze łożyska pierwszego, płaszczyzna pozioma); 4 - czujnik piezoelektryczny (kanał 4 - pomiar parametrów drgań w obszarze łożyska drugiego, płaszczyzna pozioma).

b) włączyć analizator KSD i przeprowadzić konfigurację systemu:

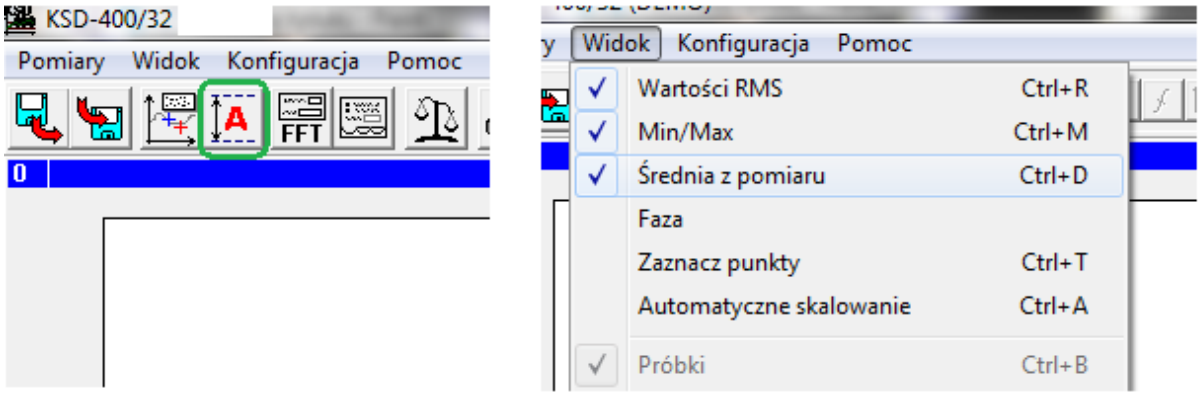
- uruchomić program KSD_400.exe;
- wybrać: konfiguracja→parametry pomiarów (klawisz **F12**);
- ustawić częstotliwość próbkowania, liczbę próbek – rys. 17a;
- pomiar w 0-4 kanałach;
- tryb pomiaru – natychmiastowy;
- zatwierdzić **OK;**
- klawisz F10 - ustawić w parametrach analizy FFT – (rys. 17b) częstotliwość filtru F2 równą połowie częstotliwości próbkowania **fp/2**;
- pozostałe parametry FFT – jak na rys. 17b i zatwierdzić **OK;**
- wybrać: Widok→wartości RMS, Min/Max, średnia z pomiaru – rys. 18a;

➢ włączyć autoskalowanie – **Ctrl A** lub kliknąć ikon z literką A – rys. 18b;



a) b)

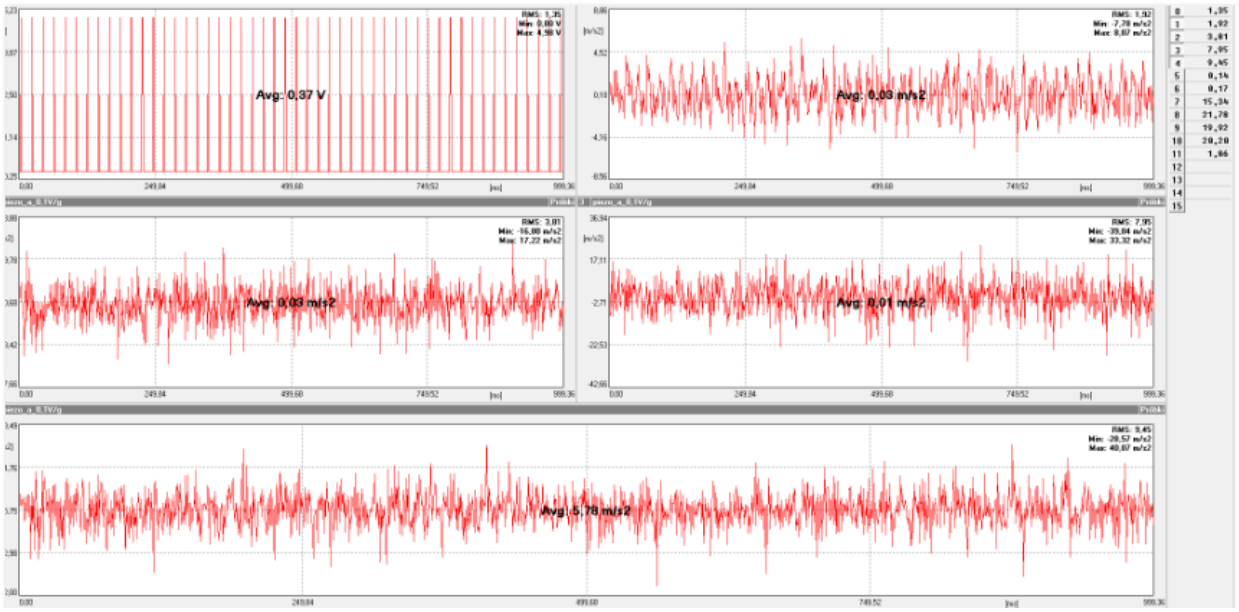
Rys. 17. Konfiguracja okien pomiarowych: a) ustawianie częstotliwości próbkowania, liczby próbek, kanałów pomiarowych i trybu pomiaru; b) ustawianie parametrów analizy FFT.



a) **b)**

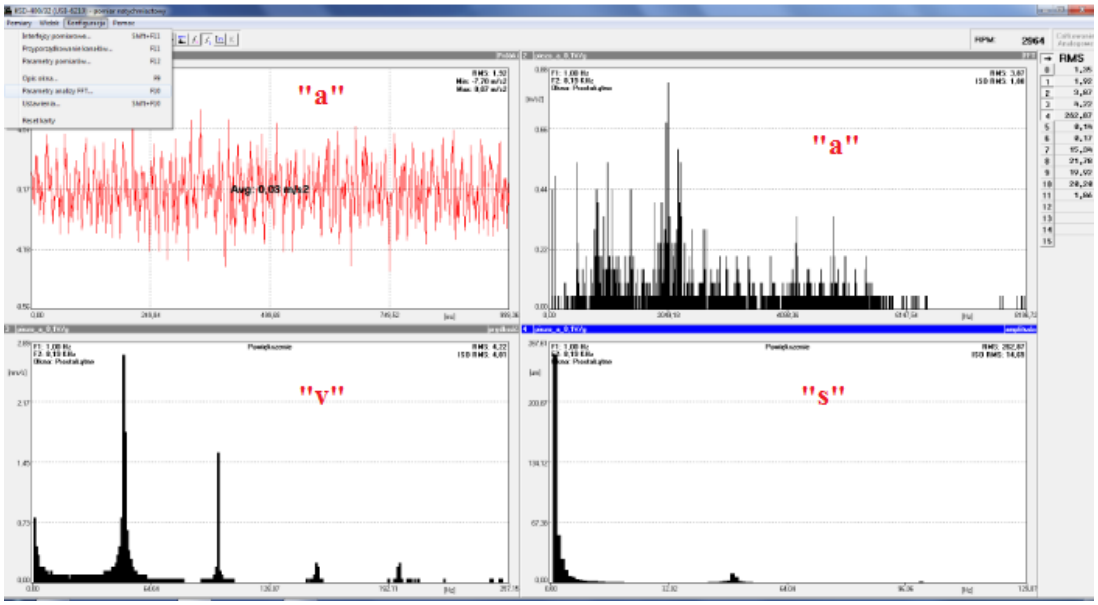
Rys. 18. Konfiguracja okien pomiarowych: a) ustawianie autoskalowania, b) aktywowanie wartości sygnału wyświetlanych na ekranie.

c) włączyć szlifierkę (operację wykonać pod nadzorem prowadzącego);
d) przystąpić do pomiarów; pomiary→pomiar natychmiastowy (lub F3) i na ekranie powinny pojawić się przebiegi jak na rysunku 19;



Rys. 19. Przykładowe przebiegi wyświetlone na ekranie monitora

e) po wykonaniu pomiarów (po ok. 32s) wybrać: pomiary→zapisz wyniki pomiarów (Ctrl+S), wpisać nazwę pliku np.: *drgania_płaszcz_V_H* i zapisać;
f) wyłączyć szlifierkę;
g) odczytać niezbędne (do uzupełnienia tabeli 1) wartości przyspieszenia (ikona - widok FFT) i prędkości (ikona - widok 1 całka) - niezbędne przyciski znajdują się w pasku menu przed paskiem **Pomiar**;
h) wykonać zrzut z ekranu i dołączyć go do sprawozdania (przykładowy widok jest pokazany na rys. 20).



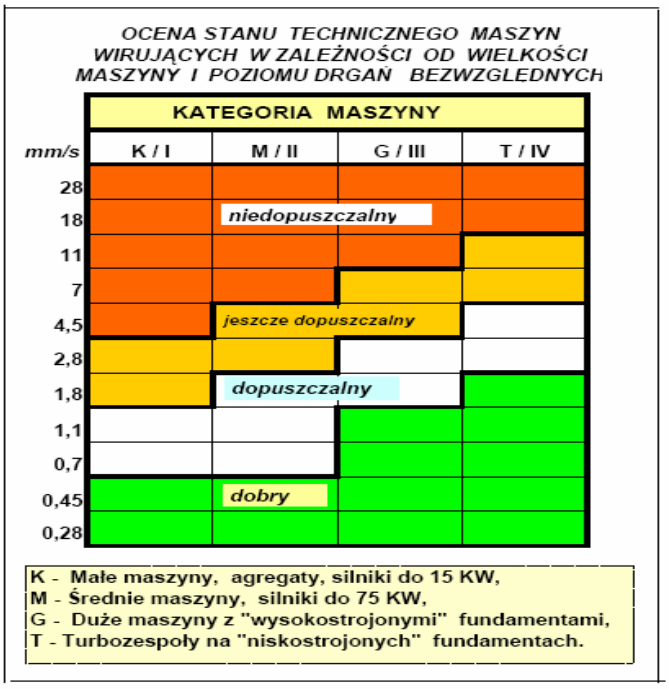
Rys. 20. Przykładowy „zrzut" ekranu monitora.

Wykorzystując dane z rys. 21 ocenić stan techniczny szlifierki (szlifierka należy do maszyn typu K/I). Jeżeli prędkość drgań (FFT ISO) przekracza poziom „dobry” – należy przeprowadzić wyważanie maszyny.

Tabela 1.

Płaszczyzna pomiaru drgań			Wartości RMS odczytane z przebiegów widmowych			
			a	**v**		**s**
			m/s^2	mm/s		µm
			FFT**	FFT**	FFT ISO*	FFT**
Łożysko Nr 1	H	Przed wyważaniem				
		Po wyważaniu				
	V	Przed wyważaniem				
		Po wyważaniu				
Łożysko Nr 2	H	Przed wyważaniem				
		Po wyważaniu				
	V	Przed wyważaniem				
		Po wyważaniu				
Wartość dopuszczalna prędkości drgań (K/I – rys. 21)						**1,8**

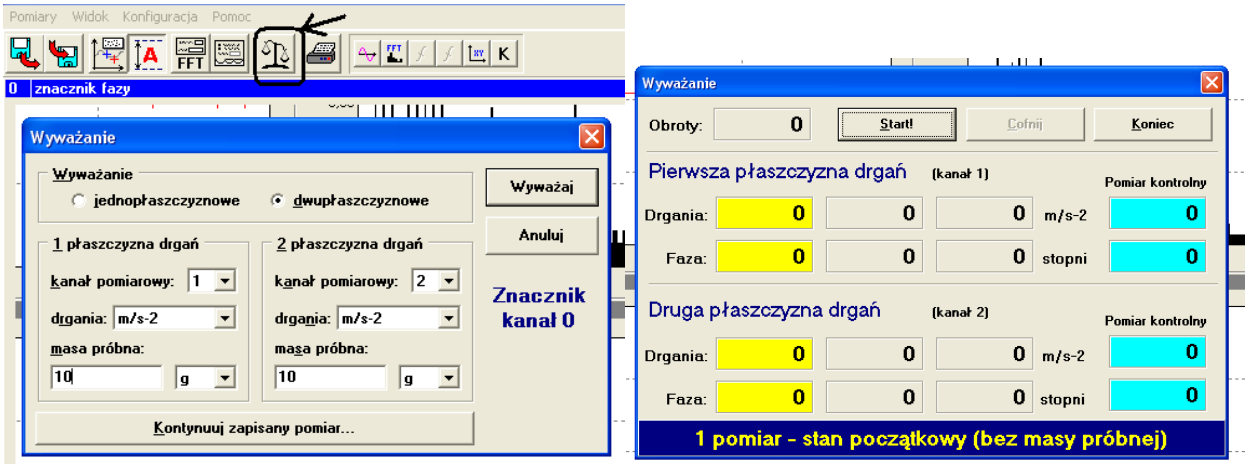
* – wartość wyznaczana w paśmie częstotliwości **10-1000Hz**;
** - wartość wyznaczana w paśmie częstotliwości **0 -fp/2.**



Rys. 21. Dane do oceny stanu technicznego maszyn wirujących.

3.2. Wyważanie dwupłaszczyznowe - kolejność operacji:

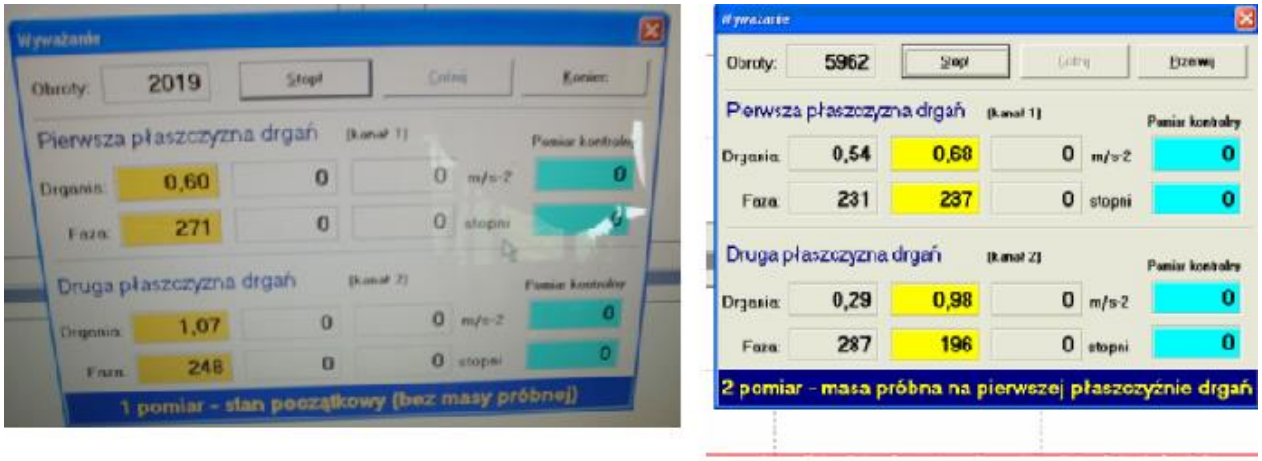
a) wcisnąć ikonę wyważanie (lub F8) i po pojawieniu się okna wyważanie (rys. 22a) wybrać „dwupłaszczyznowe" i wpisać wartości mas próbnych (po konsultacji z prowadzącym ćwiczenie);



a) b)

Rys. 22. Widok okien przy wyważaniu: a) wybór rodzaju i parametrów wyważania; b) okno ilustrujące przebieg procesu wyważania

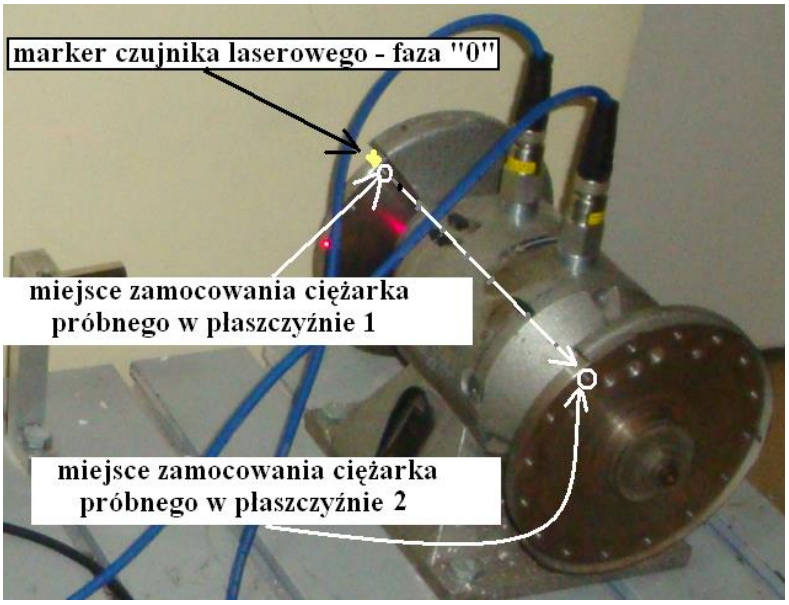
b) uruchomić maszynę (operację wykonać pod nadzorem prowadzącego);
c) po wciśnięciu ***„Wyważaj"*** pojawi się okno jak na rys. 22b);
d) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
e) po ustabilizowaniu się wskazań w pierwszej kolumny z lewej (rys.22b) - zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**" (pojawi się okno jak na rys. 23b);
f) zatrzymać maszynę;



a) b)

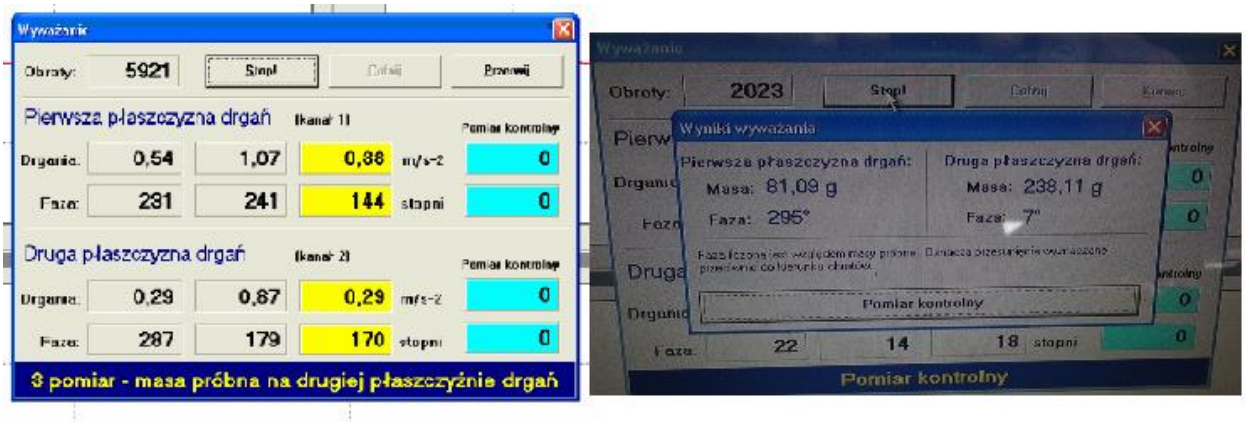
Rys. 23. Widok okien przy wyważaniu: a) wynik wyważania bez mas próbnych; b) wynik wyważania z masą próbną w płaszczyźnie **1**.

g) zamocować ciężarek próbny o wadze wpisanej w p. 3.2a) na płaszczyźnie ***1*** (rys. 24);



Rys. 24. Miejsca mocowań ciężarków próbnych.

h) uruchomić maszynę;
i) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";
j) po ustabilizowaniu się wskazań w drugiej kolumnie z lewej (rys.23b) - zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
k) zatrzymać maszynę;
l) zdjąć ciężarek próbny z płaszczyzny **1** i zamocować go na płaszczyźnie ***2*** (rys. 24);
m) uruchomić maszynę;
n) zainicjalizować pomiar - przycisk "**Start**";



a) b)

Rys. 25. Widok okien przy wyważaniu: a) wynik wyważania z masą próbną w płaszczyźnie **2**; b) wyniki wyważania – wartości mas korekcyjnych i miejsca zamocowań.

o) po ustabilizowaniu się wskazań w trzeciej kolumnie z lewej (rys. 25a) - zatwierdzić pomiar - przycisk "**Stop**";
p) zatrzymać maszynę;
q) odczytać wyniki wyważania (rys. 25b);
r) zdjąć ciężarek próbny;
s) zamocować wyliczone ciężarki korekcyjne w podanych miejscach na płaszczyznach ***1 i 2;***
t) uruchomić maszynę;
u) wykonać pomiar kontrolny i zatrzymać maszynę;

Rys. 26. Przykładowe wyniki pomiaru kontrolnego.

Porównać wartości drgań w płaszczyźnie **1** i **2** przed i po wyważaniu (rys. 26) i powtórzyć proces wyważania, gdy zmniejszenie się poziomu drgań nie jest znaczne. W przypadku niezadowalającego wyniku wyważania powtórzyć pomiary z punktów 3.1 d-j i przeprowadzić ocenę stanu maszyny wg norm z rys. 21.

W sprawozdaniu należy zamieścić:

- wypełnione tabele 1, 2 i 3;
- zamieścić wybrane (wskazane przez prowadzącego ćwiczenia) przebiegi zarejestrowanych charakterystyk amplitudowych przyspieszenia i prędkości w funkcji częstotliwości;
- przeprowadzić analizę zarejestrowanych przebiegów i rezultatów pomiarów;
- przeprowadzić ocenę stanu badanego urządzenia przed i po wyważeniu posługując się danymi zamieszczonymi na rys. 22 (szlifierka należy do klasy maszyn K/I);

Tabela 2.

KSD - 400	m_{cp}= g	φ_{cp}= deg	
Rodzaj operacji	Nr płaszczyzny	Wartość przyspieszenia drgań	Wartość fazy drgań
		m/s^2	deg
Przed wyważaniem	**I**		
	II		
Po umieszczeniu masy próbnej w pierwszej płaszczyźnie	**I**		
	II		
Po umieszczeniu masy próbnej w drugiej płaszczyźnie	**I**		
	II		
Po zamieszczeniu ciężarków próbnych	**I**		
	II		
	Nr płaszczyzny	Masa ciężarków korekcyjnych	Wartość fazy zamocowania ciężarków korekcyjnych
	I	g	deg
wyznaczone	**I**		
	II		
zamieszczone	**I**		
	II		

Tabela 3.

Parametr drgań	Jednostki	Operacja wyważania	Numer harmonicznej			
			1	2	3	4
a	m/s^2	przed				
		po				
v	mm/s	przed				
		po				
s	µm	przed				
		po				

4. PYTANIA KONTROLNE

1. Omów podstawowe wielkości charakteryzujące ruch drgający i związki występujące między nimi. Wymienić i zdefiniować jednostki występujące w równaniach ruchu drgającego.
2. Wymień rodzaje przetworników do pomiaru drgań oraz porównaj ich pod względem wad i zalet
3. Narysuj i opisz budowę oraz zasadę działania przetwornika do pomiaru drgań.
4. Omów wpływ drgań na konstrukcje mechaniczne.
5. Wymień i omów przyczyny niewyważenia początkowego.
6. Wymień rodzaje niewyważeń, zilustruj jedno z nich i omów je.
7. Omów procedurę wyważania dwupłaszczyznowego przy pomocy KSD-400.

5. LITERATURA

1. Polskie Normy:

PN-82/N-01350	PN-91/N-01355
PN-82/N-01351	PN-91/N-01356
PN-91/N-01352	PN-90/N-01357
PN-91/N-01353	PN-90/N-01358
PN-91/N-01354	PN-93/N-01359

2. Chwaleba A., Czajewski J.: *Przetworniki pomiarowe wielkości fizycznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej 1993.

3. *Analizator diagnostyczny KSD-400. Instrukcja obsługi*. PUP "SENSOR" sc. Łódź. 2010.
4. Szlachetko T.: *Pewne aspekty wyważania ciężkich wirników w łożyskach własnych*. Materiały VIII Szkoły Diagnostyki. Poznań – Rydzyna 1987.
5. Łączkowski Ryszard *Wibroakustyka maszyn i urządzeń*. WNT Warszawa 1983.
6. Chwaleba A. i inni: *Metrologia elektryczna*. WNT, Warszawa 2003.
7. Czajka J.H.: *Pomiary drgań i hałasu na stanowiskach pracy* w transporcie. Warszawa : Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2000.

WYMAGANIA BHP

Warunkiem przystąpienia do praktycznej realizacji ćwiczenia jest zapoznanie się z instrukcją BHP i instrukcją przeciw pożarową oraz przestrzeganie zasad w nich zawartych. Wybrane urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym mogą posiadać instrukcje stanowiskowe. Przed rozpoczęciem pracy należy zapoznać się z instrukcjami stanowiskowymi wskazanymi przez prowadzącego.

W trakcie zajęć laboratoryjnych należy przestrzegać następujących zasad.

- Sprawdzić, czy urządzenia dostępne na stanowisku laboratoryjnym są w stanie kompletnym, nie wskazującym na fizyczne uszkodzenie.
- Sprawdzić prawidłowość połączeń urządzeń.
- Załączenie napięcia do układu pomiarowego może się odbywać po wyrażeniu zgody przez prowadzącego.
- Przyrządy pomiarowe należy ustawić w sposób zapewniający stałą obserwację, bez konieczności nachylania się nad innymi elementami układu znajdującymi się pod napięciem.
- Zabronione jest dokonywanie jakichkolwiek przełączeń oraz wymiana elementów składowych stanowiska pod napięciem.
- Zmiana konfiguracji stanowiska i połączeń w badanym układzie może się odbywać wyłącznie w porozumieniu z prowadzącym zajęcia.
- W przypadku zaniku napięcia zasilającego należy niezwłocznie wyłączyć wszystkie urządzenia.
- Stwierdzone wszelkie braki w wyposażeniu stanowiska oraz nieprawidłowości w funkcjonowaniu sprzętu należy przekazywać prowadzącemu zajęcia.
- Zabrania się samodzielnego włączania, manipulowania i korzystania z urządzeń nie należących do danego ćwiczenia.
- W przypadku wystąpienia porażenia prądem elektrycznym należy niezwłocznie wyłączyć zasilanie stanowisk laboratoryjnych za pomocą wyłącznika bezpieczeństwa, dostępnego na każdej tablicy rozdzielczej w laboratorium. Przed odłączeniem napięcia nie dotykać porażonego.