

Sprawdzanie poprawności wskazań wyważarek z użyciem testów opisanych w normie ISO 21940-21

Niewyważenia resztkowego na wirniku nie widać. Dodatkowo, wskazania wyważarki mogą być zadowalające - pomimo występującego niedozwolonego niewyważenia resztkowego. Taka sytuacja występuje, gdy maszyna jest źle skalibrowana lub niepoprawnie jest użyty osprzęt technologiczny, jak wałek technologiczny czy adapter. Dlatego skuteczność wyważania nie jest oceniana wraz z zakończeniem procesu wyważania. Jego weryfikacji można dokonać dopiero po zamontowaniu wirnika do jego własnych łożysk. Po drodze mamy różne koszty, m.inn.: koszty magazynowania wirnika, transportu, montażu, uruchamiania urządzenia. Jeżeli wirnik po montażu nie zachowuje się zgodnie z normą, to istnieje domniemanie, że nie został poprawnie wyważony. Po doliczeniu kolejnych kosztów demontażu, transportu i ew. wyważania w trzeciej firmie, następuje etap rozszczeń związanych ze zwrotem wszystkich poniesionych kosztów. Dlatego testowanie wyważarek jest nie tylko dbaniem o ich stan techniczny ale także o stan finansów Wyważającego.

Między innymi z tego powodu urządzenia pomiarowe podlegają tzw. legalizacji, gdyż za ich pomocą są wykonywane usługi dla zleceniodawców. Polega ona na sprawdzeniu adekwatności wskazań urządzenia pomiarowego. Legalizacja, rozumiana jako pisemne potwierdzenie adekwatności wskazań wyważarki, następuje po wykonaniu odpowiednich testów. Wymagają one zastosowania przemysłanych procedur z użyciem wzorcowych ilości materiałów lub zmian parametrów. Te procedury nazywamy testowaniem urządzenia pomiarowego.

Wyważarki są urządzeniami pomiarowymi. Legalizację zastąpiono testowaniem. Maszyny mierzą parametry ruchu drgającego lub siłę, jaką wirnik oddziałuje na ostoję. Dają w odpowiedzi wartości ciężarów obciążników korekcyjnych, które należy posadzić na wirniku w celu poprawienia kołowsymetrycznego rozkładu masy wirnika. Nie jest mierzone bezpośrednio niewyważenie. Poprzez powiązanie wyników pomiarów ze współczynnikami kalibracyjnymi - następuje wyliczenie niewyważenia.

Redukcja niewyważenia jest podstawowym zadaniem wyważarek. Jest ono realizowane skutecznie tylko wtedy, gdy układy: mechaniczny, hardware'owy i obliczeniowy nie są uszkodzone i poprawnie współpracują. Dodatkowo, musi być wprowadzony właściwy system powiązania sygnałów, pochodzących z pomiarów z wynikami obliczeń, wykonanymi z użyciem danych wprowadzanych z pulpitu maszyny. Te dane dotyczą miejsc posadowienia obciążników testowych lub kształtu wirnika i miejsc jego podparcia.

Już z tego krótkiego opisu zasady działania wynika, że wyważarka, będąc skomplikowanym urządzeniem pomiarowym, musi być okresowo sprawdzana pod względem poprawności wskazań poprzez testowanie.

Okres pomiędzy kolejnymi testami producenci maszyn przyjmują jako jeden rok kalendarzowy. Użytkownicy skracają go lub wydłużają w zależności od: ryzyka wystąpienia błędnych wskazań w dużych seriach lub w wirnikach, wobec których występują specjalne wymagania co do jakości wyważania itp.

Nie istnieje jednolity program testowania wyważarek. Wielość typów tych maszyn, które różnią się między sobą wieloma cechami, jak np. kinematyka ruchów, wielkość wraz z obciążalnością, wymagana dokładność, wyposażenie, wydajność, powodują, że badanie musi być w dużym stopniu zindywidualizowane. W praktyce testuje się maszyny zarówno za pomocą pojedynczych wirników, jak i dużych ich serii. Testowanie maszyn ma na celu zbadanie adekwatności ich wskazań.

Można testować także wirniki. Testowanie serii nowych wirników wykonuje się dla znalezienia powtarzającego się błędu kształtu i dzięki temu wprowadzenia poprawek w budowie np. form wtryskowych, w których wykonuje się te wirniki. Podczas testów są poszukiwane błędy powtarzalne, które można wyeliminować. Tym sposobem zmniejsza się ich niewyważenia początkowe. Wykonuje się je także z użyciem wyważarki, której adekwatność wskazań została potwierdzona za pomocą poniższych testów.

W wynikach pomiarów niewyważenia każdego wirnika są zawarte zarówno systematyczne, jak i przypadkowe składniki, które można nazwać błędami. Przyczyny powstawania jednych z nich są rozpoznawalne, innych nie.

Jednym z miejsc powstawania błędów jest styk wirnika z maszyną. Maszyna i wirnik mogą reagować na zmiany temperatury, wilgotności lub ciśnienia w elementach mocowania wirnika. W miejscach styku wirnika z maszyną, którymi są:

- a) uchwyt technologiczny w wyważarce pionowej,
- b) rolki toczne w wyważarce poziomej,

zachodzi najczęściej przypadkowych zdarzeń, jak niepowtarzalne zaciskanie się ruchomych elementów uchwytu na wybranej powierzchni walcowej wirnika lub toczenie się „stal po stali” w różnych miejscach na powierzchni rolek tocznych (gdzie ze względu na różnice średnic rolki i wirnika, których stosunek z reguły nie jest liczbą całkowitą, występuje styk zawsze różnych punktów). W efekcie różnicy w ustawieniach wysokości podpór lub zmian długości wału napędowego wywołanych nagrzewaniem się podczas jego pracy, zachodzą niewielkie zmiany miejsc podparcia wirnika. W związku z jego śladową krzywizną następuje zmiana niewyważenia i przez to zmiana składu sygnału z czujników w podporach. Kasacja luzów poosiowych skutkuje dodawaniem do wyników pomiarów przypadkowych sił pochodzących od ograniczników ruchu osiowego. Wpływ powyższych czynników może być nieznaczny w nowej maszynie. Jednak po dłuższej eksploatacji ich udział może wzrosnąć. Testy pozwalają ocenić stopień zużycia maszyny i podjąć decyzję o wykonaniu remontu.

Istotny wpływ na adekwatność wskazań ma posadowienie wyważarki na fundamencie. Istnieją dwie podstawowe przyczyny występowania błędu w wyliczonym niewyważeniu. Jedną są zmiany w samym fundamencie. Mogą to być pęknięcia, zmiana osadzenia fundamentu w jego otoczeniu powodująca zmianę jego skrępowania. Ma to znaczenie przy eksploatacji maszyn podkrytycznych, gdy fundament jest zbyt lekki lub maszyna jest posadowiona na stropie. W tym przypadku fundament, wraz z maszyną, tworzy

niekontrolowany układ drgający, najczęściej zaniżający wynik wyważania. Test pozwala na sprawdzenie i ewentualne wyeliminowanie takiego wpływu na wynik.

Przesuwanie podpór po łożu maszyny, w obecności luzów na wpustach służących do równoległego prowadzenia podpór po łożu, może doprowadzić do występowania sił poosiowych. Tworzą się linie śrubowe na styku: wirnik - rolka. Podpory przęcając się, w kierunku poosiowym, i skokowo - rozprężając, oddziałują na czujniki. Te rejestrują dodatkowe, szkodliwe sygnały. Testy pośrednio to pokazują.

W maszynach podkrytycznych trudno jest, np. poprzez dotykanie elementu podpory, sprawdzić organoleptycznie skuteczność wyważania. Uzyskuje się pewność, że niewyważanie było skuteczne, dopiero po zamontowaniu wirnika w jego łożyskach własnych. Okresowe testowanie maszyn przybliża do jedyńki prawdopodobieństwo osiągnięcia założonego niewyważenia resztkowego.

Osobnym problemem jest zbieżność procesu wyważania. Każdy użytkownik woli wyważyć wirnik w jednym niż w kilku krokach. Decydują tutaj: nakład pracy i koszty. Okresowe testowanie pozwala na znalezienie przyczyny niewystarczającej zbieżności. Poszczególne testy pokazują miejsce, w którym powstają błędy pomiarowe, np. element konstrukcji maszyny lub elektronika albo kalibracja. Odseparowanie jednej przyczyny błędów od innych zwiększa szanse na jej eliminację.

W czasie eksploatacji maszyn użytkownicy sporządzają, dla własnych potrzeb, algorytmy wykonywania testów. Mogą one być tak zaprojektowane, że wskażą miejsce powstawania błędów. Typowym testem jakościowym wykonywanym na wyważarce pionowej, który może wskazać miejsce powstawania błędów w pomiarach, jest próba polegająca, w pierwszym kroku, na wielokrotnym pomiarze niewyważenia tarczy zamocowanej w uchwycie i każdorazowym zapisywaniu wyników pomiarów. Próba jest wykonywana podczas obrotów, gdzie po każdym pomiarze obroty są wyłączane, a uchwyt nie jest luzowany. W drugim kroku po załączeniu obrotów i po wykonaniu pomiaru uchwyt jest luzowany. W trzecim kroku dochodzi czynność wyjęcia tarczy z uchwytu i powtórnego zamocowania w niezmienionym położeniu kątowym. W ostatnim kroku, po zluźnieniu, wyważana tarcza jest obracana o 180° . Można ją obracać o inny, ale zawsze ten sam kąt. Zapisane wyniki są następnie analizowane. Mogą być także poddane obróbce statystycznej poza maszyną, po odczytaniu wyników pomiarów.

Dla poprawnej eksploatacji wyważarek należy testować dodatkowo działanie oprzyrządowania technologicznego i podprogramów warsztatowo-technologicznych, wykonywanych dla potrzeb konkretnego wyważania. Testując maszynę, upewniamy się, że jej czułość pomiarowa jest wystarczająca do zadań.

Poniżej będą przedstawione podstawowe testy, które opisano w normie ISO 21940-21. Poniższe testy są przeznaczone dla maszyn będących w eksploatacji. W trakcie realizacji testów są wykorzystywane dane zawarte w dokumentacji producenta wyważarki, jak najmniejsze osiągalne niewyważenie NR_u , współczynnik redukcji niewyważenia WRN ,

wpływ niewyważenia momentowego na wynik obciążenia statycznego (dla wyważarek pionowych) czy test względnego obrotu.

Norma nakazuje wykonać wykres jedno- lub dwupłaszczyznowy w zależności od weryfikowanej liczby płaszczyzn korekcyjnych.

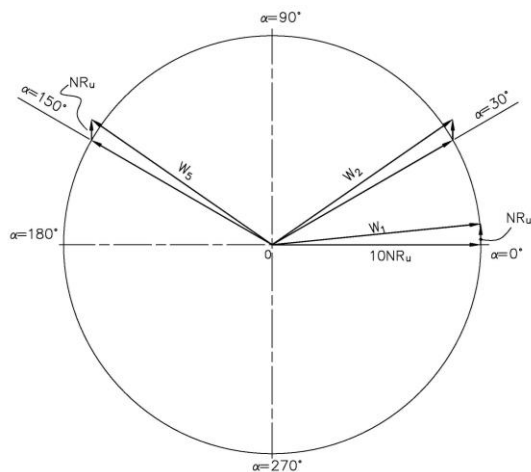
Test najmniejszego uzyskiwanego niewyważenia resztkowego NR_d .

Wykonując test należy rozróżnić najmniejsze niewyważenie resztkowe deklarowane przez producenta maszyny NR_d od najmniejszego niewyważenia resztkowego uzyskiwanego przez wyważenie NR_u . Wartość deklarowana powinna być większa od uzyskiwanej. Ta zasada między innymi chroni producenta maszyny przed roszczeniami finansowymi jej użytkowników i odbiorców usług wyważania.

Przyjęcie wartości deklarowanej NR_d większej od uzyskiwanej NR_u umożliwia lub ułatwia uzyskanie pozytywnego wyniku testu. Decyduje tutaj ilość masy obciążnika testowego, która, w tym przypadku, jest większa od krytycznej. Dla ilości granicznej masy obciążnika, wartości pomiarów niewyważenia testowego leżą na granicy, która oddziela poprawny wynik testowania od negatywnego. Każda większa masa obciążnika oddala wyniki pomiarów od tej granicy w kierunku poprawnego wyniku.

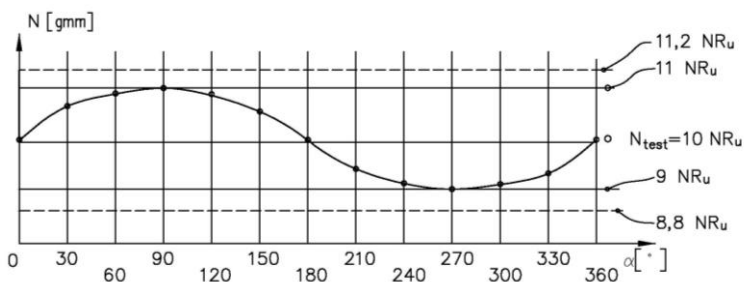
W celu praktycznego pokazania zasady działania testu, parametr NR_d jest tutaj zastąpiony analogicznym parametrem NR_u . To zastępstwo jest wykonane celowo. Powoduje, że po zastąpieniu, wyniki rzeczywistych pomiarów są rozrzucone po całym polu zawartym pomiędzy wartościami granicznymi. Dzięki temu lepiej widać zasadę działania przepisów normy. Gdyby zastosować NR_d , które jest większe od NR_u , to wyniki byłyby zgromadzone bliżej średniej z pomiarów.

Na rysunku 1, dla większej przejrzystości, pokazano wybrane trzy, z 12 wskazań, wyważarki $W_i, i = 1, 2, 5$. Wynikają one z kolejnych położenia obciążnika wędrującego, przy stałym położeniu niewyważenia resztkowego względem wirnika. Rysunek 1 oraz wykresy 1 i 2 nie obrazują rzeczywistej sytuacji, którą można zastać podczas wykonywania testu. Pokazują wartości teoretyczne niewyważenia czyli są pozbawione wszelkich zakłóceń pomiarowych.



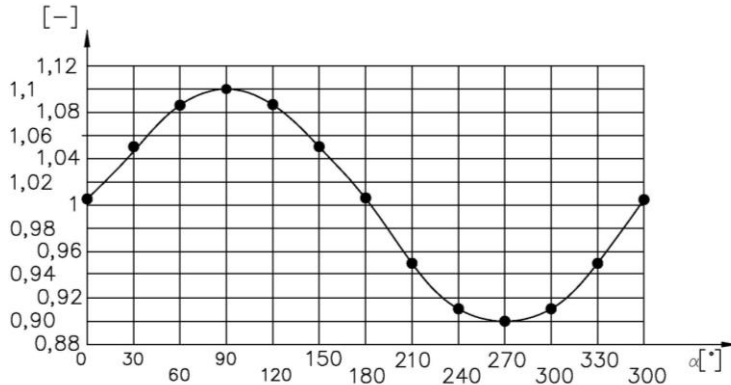
Rys. 1. Związki geometryczne wykorzystane w teście najmniejszego niewyważenia reszkowego.

Wykres 1, który jest wykresem pomocniczym, nie jest pokazany w normie. Przedstawia sposób budowy wykresu 2. Wykonanie wykresu 2 nakazuje norma. Można go nazwać: właściwym. Oba wykresy różnią się skalą na pionowej osi. Wykres pomocniczy, na pionowej osi, pokazuje wartości pochodzące z rzeczywistych pomiarów niewyważenia. Niewyważenie jest wywołane sumowaniem się niewyważień od obciążnika testowego i pozostawionego niewyważenia reszkowego osiągniętego NR_u .



Wykres 1. Wykres wykonany na podstawie wyników pozyskanych w teście NR_u z użyciem bezwzględnych wartości pomierzonego niewyważenia.

Wykres właściwy jest wykonywany z pomocniczego poprzez odniesienie wartości pomiarowych niewyważenia do wartości średniej ze wszystkich 12 pomiarów.



Wykres 2. Wykres wykonany na podstawie wyników uzyskanych w teście NR_u z użyciem względnych wartości odniesionych do wartości średniej niewyważenia.

Wykres 2, jednopłaszczyznowy, powstaje w wyniku pomiarów wskazań niewyważenia powstałego z sumowania się dwóch niewyważań: pozostałego NR_u , które ma stałe położenie kątowe, i $N_{test} = 10NR_u$, które 12 razy zmienia swoje położenie kątowe względem wirnika ($N_{test}[gmm] = m_{test}[g] \cdot r[mm]$). Jest to pokazane na rysunku 1. Wykres dwupłaszczyznowy zawiera dwie krzywe.

Test NR_u jest wykonywany w dwóch etapach.

Etap przygotowawczy testu NR_u , czyli niewyważenia resztkowego uzyskanego.

W etapie przygotowawczym, oprócz ewentualnego wyeliminowania nadmiernego niewyważenia, jest wstępnie sprawdzana zdolność maszyny do uzyskania niewyważenia resztkowego NR_u o wartości mniejszej niż NR_d , czyli niewyważenia resztkowego deklarowanego przez producenta maszyny lub serwisanta tego producenta. Etap kończy się zmianą fazy pomiędzy niewyważeniem i funkcjami generowanymi w układzie pomiarowym. Jest ona realizowana poprzez przeniesienie punktu odniesienia (punktu zera fazowego) o kąt np. 60° względem wirnika (bieg 6 w tabeli 8 w normie). Dzięki temu można sprawdzić tzw. kołowsymetryczność wskazań amplitudy i fazy sygnałów generowanych przez układ hardware'owy (wskutek uszkodzenia lub zesterzenia się podzespołów hardware'owych może wystąpić uzależnienie wzmocnienia, w kanałach pomiarowych, od położenia kątowego znacznika zera).

W etapie przygotowawczym należy wykonać czynności:

1. Ustawić maszynę poprzez skalibrowanie odpowiednio do wirnika testowego, na przykład typu *B*, którego niewyważenie nie może przekraczać wartości: $5 NR_d$ na płaszczyznę (dla całego wirnika nie może przekraczać wartości $10 NR_d$).
2. Zamocować dwa obciążniki, dające dodatkowe niewyważenie, o masach nie większych niż wywołujące niewyważenie $10 NR_d$ przypadające na płaszczyznę, w pobliżu płaszczyzn korekcji 1 i 2 wirnika w ten sposób, że:
 - a) oba odważniki omijają płaszczyzny korekcji i testowe,
 - b) nie leżą ani na tym samym kącie, ani nie są przesunięte względem siebie o 180° .

Dla wyważania jednopłaszczyznowego niewyważenie od jednego obciążnika testowego nie może przekraczać $20 NR_d$.

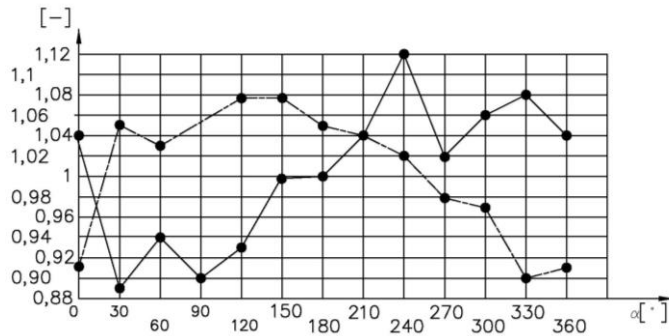
3. Wykonać maksymalnie cztery cykle wyważania dwupłaszczyznowego, zgodnie z procedurą zawartą w dokumentacji maszyny, wraz z korekcjami. W ostatnim cyklu wyważania powinien być wykorzystany cały zakres czułości maszyny. Dane z pomiarów zapisać w tabeli (tabela 8 w normie lub do skopiowania na stronie www.cimat.pl). Obciążniki korekcyjne o obliczonych masach pozostawić na wirniku.
4. Przy napędzie realizowanym za pomocą wału kardana: obrócić wyważany wirnik, względem mocowania wału kardana o 60° , a przy napędzie paskowym: odkleić znacznik od wału i przykleić go w miejscu oddalonym kątowno o 60° .
5. Sprawdzić wartości niewyważenia.

Jeżeli uzyskane niewyważenie resztkowe NR_u ma wartość mniejszą w stosunku do zawartej w dokumentacji maszyny NR_d , to można przejść do fazy wykonawczej. Jeżeli nie, należy odnaleźć przyczynę błędu i ją wyeliminować.

W etapie wykonawczym, wykonanym z użyciem obciążnika testowego mocowanego w trzeciej płaszczyźnie testowej, należy wykonać następujące czynności:

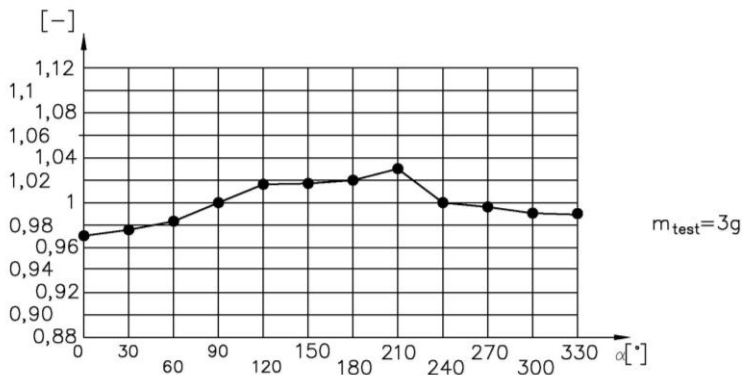
1. Zamocować w trzeciej płaszczyźnie korekcyjnej obciążnik testowy dający niewyważenie o wartości do $10 NR_u$. Przeszawić obciążnik kolejno, w trakcie wykonywania testu, na 12 możliwych położeniach kątowych.
2. Wykonać pomiary niewyważenia, jednocześnie w obu pozostałych płaszczyznach pomiarowych, każdorazowo po zmianie pozycji kątownej o 30° , oraz zapisać kolejne wyniki niewyważenia w tabeli (tabela 9 w normie lub skopiowana ze strony www.cimat.pl) w kolumnach: 2 i 3.
3. Oddzielnie dla każdej z płaszczyzn pomiarowych: wyznaczenie sumy wskazań 12 pomiarów i zapisanie ich w tabeli w kolumnach: 2 i 3.
4. Oddzielnie dla każdej z płaszczyzn: wyznaczyć wartość średnią z wyników pomiarów i zapisać w tabeli w kolumnach 2 i 3.
5. Podzielić każdy z wyników pomiarów, oddzielnie, przez wartość średnią z odpowiedniej płaszczyzny, uzyskując w wyniku wartość każdorazowo odniesioną do średniej z pomiarów, i zapisać w odpowiednich wierszach - w 4. i 5. kolumnie.
6. Zaznaczyć punkty, na wykresach przedstawionych na wykresie 2. (rysunek 7 w normie), oddzielnie dla każdej z płaszczyzn z wykorzystaniem wartości zapisanych w kolumnach: 4 i 5.

Na wykresie 3 są pokazane wyniki rzeczywistego testu z krytyczną (czyli granicznie małą) masą obciążnika testowego.



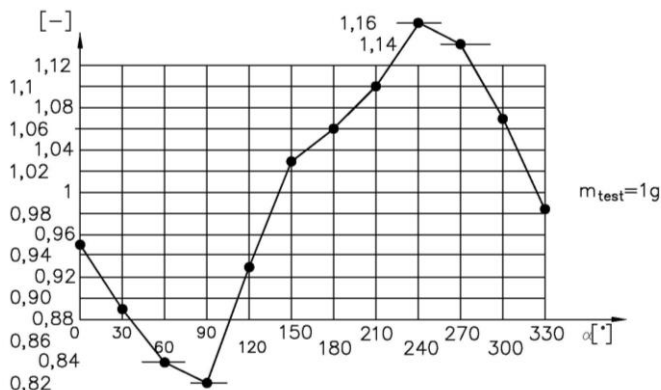
Wykres 3. Wykres wykonany na podstawie rzeczywistych wyników pomiarów uzyskanych w teście NR_u z użyciem względnych wartości odniesionych do wartości średniej niewyważenia, gdzie wartość deklarowaną NR_d zastąpiono uzyskaną NR_u . Pomiary wykonano na uniwersalnej, poziomej wyważarce z napędem paskowym CMT 200 H2P, wyprodukowanej w 1994 roku w Przedsiębiorstwie CIMAT Sp. z o.o., z użyciem obciążnika testowego o masie granicznej $m_{test} = 1,6 \text{ g}$ przy $NR_u = 0,16 \text{ g} \cdot 88 \text{ mm} = 14,08 \text{ gmm}$.

Wyniki powyższego testu, wykonanego z obciążnikiem dającym niewyważenie równe $10 \cdot NR_u$, są rozrzucone na całej powierzchni wykresu. Wyważarka może być eksploatowana. Warunki testu są spełnione, gdyż użyto obciążnika testowego o masie granicznej, wynikającej z rzeczywiście uzyskanego niewyważenia resztkowego. Norma dopuszcza większą masę wynikającą z niewyważenia deklarowanego. Za pomocą kolejnych wykresów można wywnioskować, jak ilość masy obciążnika testowego wpływa na wynik testu.



Wykres 4. Wykres wykonany na podstawie rzeczywistych wyników pomiarów uzyskanych w teście NR_u z użyciem względnych wartości odniesionych do wartości średniej niewyważenia. Pomiary wykonano na uniwersalnej, poziomej wyważarce z napędem paskowym CMT 200 H2P, wyprodukowanej w 1994 roku w Przedsiębiorstwie CIMAT Sp. z o.o., z użyciem obciążnika testowego o masie większej od granicznej $m_{test} = 3,0 \text{ g}$ przy $NR_u = 0,16 \text{ g} \cdot 88 \text{ mm} = 14,08 \text{ gmm}$ oraz $m_{deklarow} = 2,84 \text{ g}$ przy $NR_d = 0,28 \text{ g} \cdot 88 \text{ mm} = 24,64 \text{ gmm}$.

Na wykresie 4 wyniki testu, wykonanego z obciążnikiem dającym niewyważenie mniejsze od $10 \cdot NR_u$, są rozrzucone na powierzchni wykresu bliżej wartości średniej niewyważenia.



Wykres 5. Wykres wykonany na podstawie rzeczywistych wyników pomiarów uzyskanych w teście NR_u z użyciem względnych wartości odniesionych do wartości średniej niewyważenia. Pomiaru wykonano na uniwersalnej, poziomej wyważarce z napędem paskowym CMT 200 H2P, wyprodukowanej w 1994 roku w Przedsiębiorstwie CIMAT Sp. z o.o., z użyciem obciążnika testowego o masie mniejszej od granicznej $m_{test} = 1,0 \text{ g}$ przy $NR_u = 0,16 \text{ g} \cdot 88 \text{ mm} = 14,08 \text{ gmm}$.

Na wykresie 5 wyniki testu, wykonanego z obciążnikiem dającym niewyważenie mniejsze od $10 \cdot NR_u$, są rozrzucone na i poza powierzchnią wykresu. Z użyciem tak lekkiego obciążnika testowego wyważarka nie spełniłaby warunków testu NR_u .

Wzór wykresu można pobrać ze strony www.cimat.pl.

Kolejnym testem jest Test Współczynnika Redukcji Niewyważenia WRN.

Przy wykonywaniu testu są wykorzystywane obciążniki testowe o masie dającej wielokrotnie większe niewyważenie niż resztkowe. Dlatego w poniższej analizie nie występuje pojęcie NR_u . Badanie maszyny odbywa się przy dużych wskazaniach wyważarki.

Praktyczne znaczenie mają dwa testy oceniające stopień redukcji niewyważenia: wielokrotnościowy i procentowy. Pierwszy polega na wyważeniu wirnika i sprawdzeniu: ile razy niewyważenie po jednokrotnej korekcji jest mniejsze od niewyważenia przed korekcją.

$$WRN_n = \frac{N_1}{N_2},$$

gdzie:

N_1 – jest niewyważeniem, w wybranej płaszczyźnie, przed wyważaniem,

N_2 – jest niewyważeniem, w tej samej płaszczyźnie, po jednokrotnej korekcji.

Drugim testem jest test określający procent redukcji niewyważenia i jest opisany w normie ISO 21940-21. W skrócie można go nazwać $WRN_{\%}$.

Obydwa mogą być wykonywane za pomocą wszystkich typów wirników testowych: *A*, *B* i *C*.

Przygotowanie wirnika do wykonania testów $WRN_{\%}$ polega na wykonaniu identycznych czynności jak w fazie przygotowawczej – w teście uzyskiwanego niewyważenia resztkowego NR_u . Łącznie z obróceniem napędu wałkiem kardana o 60° względem wyważanego wirnika lub przemieszczeniem o kąt 60° znacznika obrotów na wirniku przy napędzie paskowym. Testy są wykonywane z użyciem obciążników testujących. Obciążenie niewyważeniem testowym następuje, w obu testach, w fazie wykonawczej.

Na tym się kończą podobieństwa obu testów. Różnice natomiast są zasadnicze.

Test wielokrotnościowy jest wykonywany jak wyważanie z tą różnicą, że niewyważenie początkowe testowe wirnika ma w teście około $250 NR_d$ i nie rozpoznaje się jego położenia kąтового. W teście wielokrotnościowym po obciążeniu niewyważeniem testowym, w wybranej płaszczyźnie korekcyjnej, następuje wyważanie i porównywanie ilości masy od niewyważenia początkowego z masą od niewyważenia resztkowego.

Test $WRN_{\%}$ jest wykonywany w jednej lub dwóch płaszczyznach testowych. Bada wyważarkę w sposób bardziej kompleksowy, w odniesieniu do wielokrotnościowego, ale w przypadku ujemnego wyniku testu nie wskazuje, czy przyczyną błędnych obliczeń niewyważenia są niedokładności w wyznaczeniu wartości mas obciążników korekcyjnych, ich położenia kątowych i czy zostały użyte niepoprawne współczynniki kalibracyjne. Przyczyny błędów muszą być ustalone w osobnych procedurach.

Analizę wykonuje się na wartościach względnych, odniesionych do masy obciążników stacjonarnych. W metodzie rozróżniamy dwa rodzaje niewyważenia, jakim jest obciążony wirnik, w czasie trwania testu: niewyważenie stacjonarne $N_{stacjon}$ i wędrujące $N_{wędruj}$. Niewyważenie stacjonarne $N_{stacjon}$ dają obciążniki testujące o wartości od 20 do $60 NR_d$ i mocowane w pierwszej i drugiej płaszczyźnie testowej. Położenie kątowe pierwszego obciążnika testującego jest dowolne. Wartości mas obu obciążników (w obu płaszczyznach) mogą się między sobą różnić, a kąt zamocowania drugiego obciążnika nie może być ani taki sam, ani przesunięty o 180° w stosunku do pierwszego. Wartości mas, wraz ze średnicą zamocowania, są zapisywane w górnej części tabeli (tabela 10 w normie), a kąty zamocowania pod pozycją *Bieg* 1 w dolnej części tabeli.

Niewyważeniem wędrującym $N_{wędruj}$ są obciążniki testowe o masie $5 N_{stacjon}$ i są one mocowane w wolnych pozycjach (niezajętych przez obciążniki stacjonarne) w obu płaszczyznach korekcyjnych kolejno w 11 biegach. Przenoszenie obciążnika w drugiej płaszczyźnie odbywa się w przeciwnym kierunku w porównaniu do pierwszej. Wybór kierunku przemieszczania obciążników w pierwszej płaszczyźnie jest dowolny. Wyniki wskazań, co do wartości niewyważenia i kątów, są zapisywane dla obu płaszczyzn w dolnej części tabeli. Dla obu płaszczyzn wyznaczane są wielokrotności niewyważenia stacjonarnych poprzez dzielenie odczytanych wyników przez wartość niewyważenia masy testowej

stacjonarnej. Wyniki są zapisywane w tabelach (tabela 11 w normie lub skopiowana ze strony www.cimat.pl) i (tabela 10 w normie). Na ich podstawie są rysowane wykresy przedstawione na rysunku 1. (rysunek 9 w normie) i rysunku 2 (rysunek 8 w normie). Norma opisuje sposób budowy, a następnie sposób jego wykorzystania.

Dokumentem przedstawiającym wyniki uzyskane w teście $WRN_{\%}$, jest wykres. Poprzez podzielenie, zawartych w jednej z tabel (tabela 10 lub 11 w normie), dołączonej do wykresu, wyników wyważania przez $N_{stacjon\ 1,2}$ wykres staje się uniwersalny, niezależny od NR_d . Wartość niewyważenia resztkowego uzyskanego jest właściwa dla testowanej wyważarki. W ten sposób można skorzystać z wykresu, z wystarczającą dokładnością, w każdym przypadku, w którym obciążnik testowy stacjonarny wywołuje niewyważenie od 20 do 60 NR_u , a $N_{wędruj}$ jest od niego 5 razy cięższy.

Stosunek ciężarów obu obciążników musi wynosić 1:5 z dokładnością określoną w punkcie 10.3.4.1 normy wynoszącą: $\pm 0,1(100\% - WRN_{\%})$ dla każdego z obciążników, gdyż w tym samym stosunku zostały przyjęte odległości na wykresach przedstawionych na rysunkach 1 i 2.

Wykres pokazany w normie na rysunkach 8 i 9 i opisany w tabelach B. 1 i B. 2 w aneksie B jest wykonany dla przypadku, w którym $N_{stacjon} = 30 NR_d$.

Realizacja testu polega na porównaniu długości i położeń kątowych wskazów wektorowych, które pojawiają się na ekranach monitorów wyważarek, dla poszczególnych posadowień $N_{wędruj}$, z odległościami wyznaczonymi na wykresie za pomocą poniższych równań.

W związku z założeniem proporcjonalności wskazów do niewyważenia, poprawne jest równanie wektorowe:

$$N = N_{stacjon} + N_{wędruj}, \quad (1)$$

gdzie: N – jest sumą wektorową niewyważenia pochodzącego od obciążnika stacjonarnego i wędrującego,

$N_{stacjon}$ – składowa wektorowa niewyważenia pochodząca od obciążnika stacjonarnego,

$N_{wędruj}$ – składowa wektorowa niewyważenia pochodząca od obciążnika wędrującego.

Każdy z wyrazów w równaniu (1) ma cechy wektora, gdyż niewyważenia mają masę i swoje położenia kątowe.

Budowa szablonu wykresu zawartego w normie i służącego jako podkład do naniesienia punktów pomiarowych nie jest oparta na równaniu zawierającym masy i niewyważenia. Jest oparta na analizie zachowania się wskazów wektorowych. Te wskaźniki mają długości wprost proporcjonalne do mas i kierunki działania obrócone według jednej, wspólnej zasady wynikającej z budowy mechanicznej podpory wyważarki. Dlatego można równanie zapisać tak, jak w normie:

$$R = r_s + r_w, \quad (2)$$

gdzie: R – przedstawia wskaz wektorowy pojawiający się na ekranie monitora wyważarki, dla wybranego posadowienia $N_{wędruj}$,

r_s – wskaz wektorowy pochodzący od niewyważenia stacjonarnego,

promień drugiego pod względem wielkości największego okręgu z danego zestawu okręgów (dla wyważania jednopłaszczyznowego) jest obliczany z proporcji:

$$\begin{aligned} \text{jeżeli } 6 &\rightarrow 76 \text{ mm}, & (3) \\ \text{to } 0,868 &\rightarrow x, \end{aligned}$$

gdzie: wartość $r = 0,868$ wynika równania, zawartego w normie, ale można ją także odczytać w tabeli B. 2 w dodatku B do normy.

Stąd na przykład drugie pod względem wielkości okręgi leżące na kątach 60° i 300° mają promienie: $x = r_{85\%} = 0,868 \frac{76}{6} = 10,994 \cong 11,0 \text{ mm}$.

Jeżeli odległość jest różna od 76 mm , to nową wartość x należy wyznaczyć z proporcji (3). Jeżeli Czytelnik zastanawia się dlaczego $11,0 \text{ mm}$ jest promieniem drugiego co do wielkości okręgu w danym zestawie, to po spojrzeniu na wykres stwierdzi, że 85% dokładności wskazań dotyczy tego okręgu.

W normie ISO 21940-21 znajduje się stwierdzenie, że test $WRN_{\%}$ całościowo testuje adekwatność wskazań maszyny, zarówno co do wartości mas, jak i miejsc ich posadowienia oraz sprawdza oddzielenie obu płaszczyzn.

W układach mechanicznych dzisiejszych maszyn podkrytycznych nie zachodzi oddzielenie dynamiczne płaszczyzn w tym sensie, że one nie oddziałują na siebie, gdy wirnik się obraca. W epoce przedkomputerowej rozdzielano mechanicznie płaszczyzny, w maszynach nadkrytycznych, blokując ruch drgający poprzeczny obracającego się wirnika po przeciwnej stronie w odniesieniu do płaszczyzny pomiarowej. Sprawdzenie adekwatności wskazań i oddzielenia płaszczyzn należy rozumieć jako sprawdzenie pośrednie, czy w module pomiarowo-obliczeniowym wyważarki, na drodze matematycznej, w procesie kalibracji maszyny: wyznaczono takie współczynniki, że wynik wyważania jest poprawny. Dla maszyn nadkrytycznych są to współczynniki miejscowej podatności i przenoszenia oddziaływania z jednej płaszczyzny na drugą. W maszynach podkrytycznych są to współczynniki określające rozkład sił, w układzie kinetostatycznym, z uwzględnieniem sił występujących w miejscu podparcia wirnika. O tych współczynnikach wspomniano w poprzednich opracowaniach.

Wykonując jednopłaszczyznowy test $WRN_{\%}$ wg normy DIN ISO 21940-21, należy dane z pomiarów zapisać w tabeli 11.

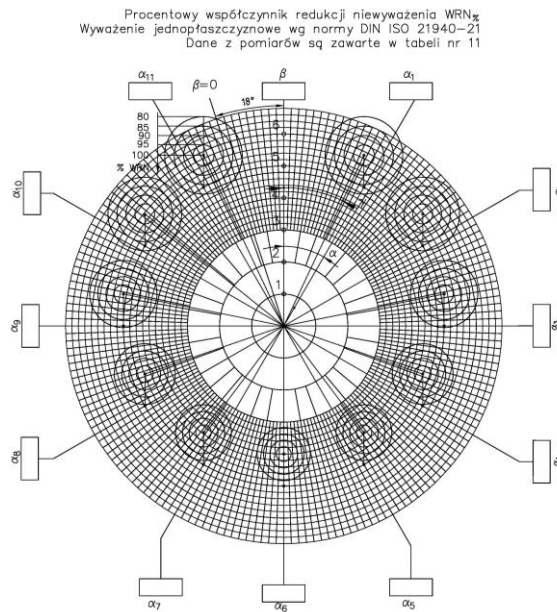
Każdy wirnik testowy (wzorcowy) ma naniesioną podziałkę kątową. Przy wypełnianiu poniższych tabel nie należy korzystać z tych podziałek. Dla uzyskania poprawnego wyniku testu należy:

- a) wykorzystać podziałkę elektroniczną; chwilowe położenie kątowe wirnika, zgodne z tą podziałką, jest pokazywane na ekranie monitora wyważarki,*
- b) ustawić wskaźy dla „zdejmowanego” materiału z wirnika w trakcie korekcji (to ustawienie spowoduje, że wyniki z pomiarów znajdą się w obrębie współśrodkowych okręgów okalających centralny punkt wykresów gdyż pokazany w nich kąt jest wtedy zgodny z położeniem kątowym sumy wektorowej obu zastosowanych obciążników traktowanych jako wektory).*

Dla poprawnego wykonania testu, ale także każdego wyważania wykonanego z wykorzystaniem elektronicznej podziałki kątowej, należy starannie wykonać czynności

związane z uzyskaniem elektronicznej podziałki kątowej na wirniku. Przetwornik obrotowo-impulsowy, zainstalowany na jednym z kół pasowych (w napędzie pasowym) lub wrzecionie (we wrzecienniku) zlicza „swoje wewnętrzne” impulsy występujące pomiędzy dwoma kolejnymi impulsami pochodzącymi od znacznika zamocowanego na wale lub wrzecionie. Każde przejście przez zero skutkuje zliczaniem impulsów od początku. W zależności od przyjętej, na pulpicie obsługowym liczby podziału, system obliczeniowy dzieli pełen obrót wirnika na równe części. Po wyłączeniu napędu jest pokazane chwilowe położenie kątowe wirnika względem tej podziałki. Szczególnie przy wykorzystaniu napędu paskowego należy kilkakrotnie obrócić wirnikiem i upewnić się, że liczba impulsów, przypadająca na kolejny obrót jest równa poprzedniej, z dokładnością do kilku impulsów.

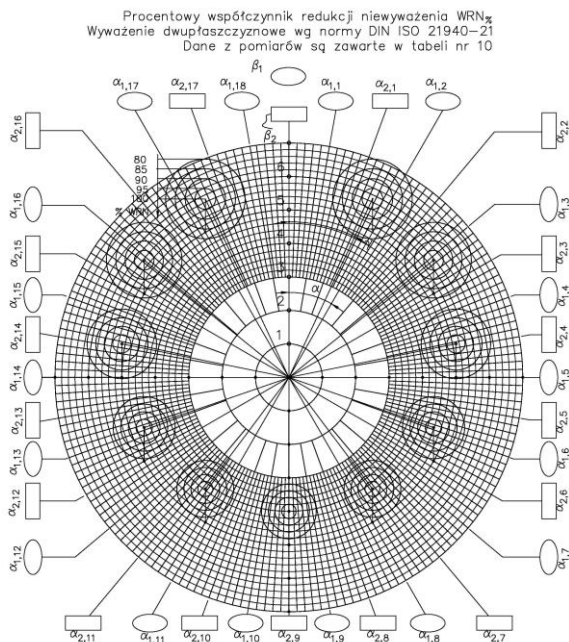
Zmiana położenia kątowego znacznika zera nie zmieni wyników wyważania po zakończonej indywidualnej kalibracji lub po pobraniu z pamięci wyważarki danych kalibracyjnych.



Rys. 3. Szablon wykresu jednopłaszczyznowego $WRN_{\%}$.

Wzór wykresu jednopłaszczyznowego można pobrać ze strony www.cimat.pl.

Na tym wykresie, niezależnie od przyjętej skali powiększenia całego obrazu, stosunki promieni „dużych” do „małych” okręgów pozostają prawidłowe.



Rys. 4. Szablon wykresu dwupłaszczyznowego $WRN_{\%}$.

Wzór wykresu dwupłaszczyznowego można pobrać ze strony www.cimat.pl.

Następnym testem jest Test obciążenia momentowego.

Praktyka wyważania pokazuje, że na wynik pomiarów składowej siłowej może wpływać składowa momentowa w zauważalnym stopniu. Na skutek błędnej kalibracji maszyny część jednej z sił, pochodzącej od pary sił (składowej momentowej niewyważenia), dodaje się geometrycznie do składowej siłowej.

Dlatego norma ustala test, który pozwala wyeliminować proces wyważania na źle skalibrowanej maszynie. Norma nie określa wartości „Współczynnika obciążenia momentowego deklarowanego” WOM_d . Tę wartość deklaruje producent maszyny. Pokazuje tylko niebezpieczeństwo praktycznego wykorzystywania niepoprawnych wyników obliczeń niewyważenia.

Do wyważania wirników typu tarcza zostały zaprojektowane wyważarki z pionową osią wirowania. Jeżeli tarcza jest cienka, to fizycznie można skorygować pierwotne niewyważenie tylko w jednej płaszczyźnie. Maszyna jest tak skalibrowana, że mierzy oddzielnie składową siłową i momentową od niewyważenia. Składowa momentowa jest każdorazowo porównywana z wartością dopuszczalną. Maszyna nie wskazuje, że wystąpił brak, jeżeli składowa momentowa jest mniejsza od dopuszczalnej. Ta wiedza nie jest wystarczająca do oceny jakości wyważania. W szczególności nie jest znana adekwatność wskazań składowej siłowej, która jest porównywana z wartością dopuszczalną NR_{dop} . Po wykonaniu testu mamy pewność, że błędy pomiarowe i

obliczeniowe mieszczą się w dopuszczalnych granicach, przy jednoczesnym występowaniu składowej momentowej niewyważenia.

Można go zastosować wtedy, gdy maszyna jest skalibrowana dla wykonania wyważania jednopłaszczyznowego. W dzisiejszej praktyce wyważania nie rozróżniamy wyważarek jednopłaszczyznowych i dwupłaszczyznowych. Rozróżniamy procesy wyważania jedno-, dwu- i wielopłaszczyznowego.

W dokumentacji każdej maszyny powinna być informacja o osiągalnej wartości niewyważenia na 1 kg masy wirnika NRW_d i wpływ momentu na wynik niewyważenia siłowego WOM .

Do testu wirnik powinien być przygotowany tak, jak do testu NR_u .

Deklarowany wskaźnik oddziaływania momentowego $WOM_d \left[\frac{1}{mm} \right]$ jest definiowany następująco:

$$WOM_d = \frac{\Delta N}{M_{N_{test}}} = \frac{W_i - NR_u}{M_{N_{test}}} \left[\frac{g \text{ mm}}{g \text{ mm}^2} \rightarrow \frac{1}{mm} \right],$$

gdzie: $i = 1, \dots, 4$,

$W_i [gmm]$ – jest wartością pomierzonego niewyważenia spowodowanego posadowieniem dodatkowego niewyważenia momentowego testowego na wybranym kącie (tabela 1),

$M_{N_{test}} [g \text{ mm}^2]$ – jest testowym momentem od niewyważenia.

Powyższy związek określa ilość dodatkowego niewyważenia siłowego, przypadającego na jednostkę testowego momentu od niewyważenia.

Realizacja testu jest intuicyjna. Wirnik testowy powinien być przygotowany tak samo, jak do innych testów. Po uzyskaniu niewyważenia NR_u powinien być wykonany dwukrotny pomiar niewyważenia: przed i po przestawieniu znacznika kąta o 60° . Jeżeli niewyważenie pozostanie w okolicy NR_u , to oznacza, że maszyna jest przygotowana do przeprowadzenia testu momentowego.

Test jest wykonywany poprzez mocowanie dwóch obciążników o identycznych masach - dających czysty moment o wartości $M_{N_{test}} [g \cdot mm^2]$. Niewyważenia tych obciążników mogą mieć od $100NR_u$ do $300NR_u$. Każde mocowanie obu obciążników testowych następuje w położeniach kątowych różniących się między sobą o 180° , na przykład 30° i 210° . Przy takim zamocowaniu nie jest wprowadzane niewyważenie siłowe. Pierwsze mocowanie następuje w dowolnej pozycji, a trzy następne są przesunięte kątowo o 90° w stosunku do poprzedniego. Wyniki pomiarów niewyważenia siłowego generowanego przez niewyważenie momentowe są zapisywane do analizy.

Test pokazuje wynik pozytywny, gdy żadna z pomierzonych wartości niewyważenia, w obecności momentu, nie przekroczy wartości dopuszczalnej:

$$W_{dop} \leq NR_u + M_{N_{test}} \cdot WOM_d. \quad (4)$$

Obrazuje to poniższy przykład.

Dane dotyczące maszyny (odczytane z DTR): $NRW_d = 1,5 \frac{gmm}{1 kg}$, $m_{wirnika} = 5 kg$.

Zadeklarowana w DTR wartość $WOM_d = 1,8 \cdot 10^{-4} \frac{1}{mm}$.

W wyniku przygotowawczego wyważania wirnika o masie $m = 5 kg$

uzyskano: $NRW_u = 1,2 \frac{gmm}{1 kg}$.

W ramach testu zamocowano dwa obciążniki, przyjmując ich wartość $200NR_u$.

Zamocowano je w płaszczyznach odległych od siebie o $h = 25 mm$.

W związku z tą odległością moment od niewyważenia wynosi:

$$M_{N_{test}} = 200 \cdot NRW_d \cdot m \cdot h = 200 \cdot 1,2 \cdot 5 \cdot 25 = 30000 gmm^2,$$

gdzie: $NR_u = 1,2 \cdot 5 = 6 gmm$.

Test przeprowadzono z zamocowanymi obciążnikami naprzeciw siebie. Wykonano cztery pomiary, zmieniając jednocześnie ich położenia o 90° .

Tabela 1. Wartości niewyważień uzyskane po posadowieniu momentowego niewyważenia testującego.

Lp.	Położenia kątowe obciążników [°]	Pomierzone niewyważenie W_i (*) [gmm]
	1	2
1	30/ 210	7,7
2	120/300	9,4
3	210/30	10,9
4	300/120	8,7

(*) – obliczone na podstawie pomiarów.

W związku z równaniem (4) dopuszczalne wyniki pomiarów muszą wynosić:

$$W_{dop} \leq NRW_u \cdot m + M_{N_{test}} \cdot WOM_d = 1,2 \cdot 5 + 30000 \cdot 1,8 \cdot 10^{-4} = 6 + 5,4 = 11,4 \text{ gmm.}$$

Najgorszy wynik z czterech pomiarów wynosił: $W = 10,9 \text{ gmm}$. Jest on mniejszy od wartości dopuszczalnej.

Pytanie: czy wynik testu umożliwia dalszą eksploatację maszyny?

Odpowiedź: $W < W_{dop}$. Maszyna może być eksploatowana.

Ostatnim testem, opisanym w normie, jest **Test względnego obrotu**.

Jest przeznaczony do sprawdzenia skuteczności systemu minimalizacji niewyważenia spowodowanego powtarzającą się niecentrycznością mocowania wirnika. W wyważarkach pionowych taka sytuacja ma miejsce przy mocowaniu głowicy uniwersalnej do wrzeciona, następnie mocowaniu wybranego uchwyty do głowicy i kolejno wirnika typu tarcza w uchwycie. Każde mocowanie następuje z błędem bicia promieniowego. W wyważarkach poziomych ten problem pojawia się przy zastosowaniu oprzyrządowania w postaci wałka technologicznego. Każde takie połączenie jest obciążone błędem montażu. Wyważarki są wyposażone w funkcję minimalizacji wpływu na niewyważenie błędu montażowego w postaci bicia promieniowego.

Test jest wykonywany na dowolnym wirniku i polega na wykonaniu pomiarów niewyważenia w dwóch różnych złożeniach kątowych, elementów mocowania wirnika, obróconych o wartość kąta właściwą dla oprogramowania danej maszyny. Ze względu na wymogi mechaniczne: najczęściej względny obrót odbywa się o 180° .

Dla poprawnego przeprowadzenia testu należy względny obrót wykonać tym elementem, którego niewyważenie mierzymy. Pozostałe elementy oprzyrządowania pozostają na tym samym położeniu kątowym, liczonym względem podziałki stosowanej w systemie obliczeniowym.

Podsumowanie.

1. Praktyka pokazuje, że testy przyczyniają się do znajdowania źródeł błędnych wskazań niewyważenia przez wyważarki. Następuje to dlatego, że zawarte w nich procedury separują skutki błędnych wskazań i kojarzą je z konkretnymi przyczynami. W związku z tym obsługujący maszynę ma do czynienia z wybraną przyczyną błędnych wskazań i jednym zmiennym parametrem.
2. Etap przygotowawczy do testu NR_d wskazuje granicę czułości maszyny na działanie niewyważenia obciążnika testowego.

3. Analiza wykresów 1 i 2 wskazuje, że stan wyważarki, przy którym niewyważenie resztkowe uzyskiwane NR_u jest większe od deklarowanego NR_d , uniemożliwia spełnienie wymagań normy jakościowej ISO 21940-21. Niektóre wyniki pomiarów przekraczają wtedy graniczne wartości.
4. Wynik testu jest zależny od ilości masy obciążnika testowego. Graniczną dolną wartością jest $m_{test} = 10 \cdot m_{resztkowe\ uzyskane}$, czyli obciążnik graniczny ma masę $m_{test} = \frac{10NR_u}{r}$. Test da negatywny wynik z użyciem obciążnika lżejszego od granicznego. Test wykonany z obciążnikiem cięższym od granicznego, np. mający masę $m_{test} = \frac{10NR_d}{r}$ lub większą, da pozytywny wynik testowania.
5. Stosunki średnic wszystkich okręgów, zawartych na szablonach przedstawionych na rysunkach 3 i 4, są względem siebie ściśle określone w normie.

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

Dystrybutorem książki jest: www.fachowa.pl

Mirosław Malec