

Uwagi dotyczące stosowania normy ISO 21940-21:

„Drgania mechaniczne- wyważanie wirników. Procedury i tolerancje dla wirników sztywnych.”

Odbiorca nowego lub regenerowanego wirnika musi mieć pewność, że po zamontowaniu do maszyny wirnik nie będzie źródłem drgań w trakcie obrotów. Drgania mogą być wymuszone niedopuszczalnie dużym niewyważeniem resztkowym. Niewyważenia nie można zobaczyć i dlatego odbiorca dowie się, że występuje ono na wirniku, dopiero po uruchomieniu maszyny. Jeżeli pojawią się nadmierne drgania, to koszt naprawy, czyli: demontażu, wysyłki do dostawcy, doważenie na wyważarce, oraz powtórnego transportu i montażu mogą być tak wysokie, że suma przekroczy wartość dostawy. Dlatego przy realizacji usług wyważania i dostaw nowych i regenerowanych wirników, w postaci części składowych do montażu, poprawność wyważenia wirników jest ważnym kryterium jakości dostaw.

Norma zapewnia dostawcy i odbiorcy jednoznaczne kryterium jakości, chroniąc w ten sposób działalność gospodarczą. Normalizuje stosunki pomiędzy klientem i dostawcą wirnika. Jest podstawową, obowiązującą normą.

Norma:

- a) określa, jak postępować z różnymi wirnikami w celu ich wyważenia;
- b) przedstawia rodzaje wirników i przypisuje każdemu rodzajowi wartość dopuszczalnego niewyważenia resztkowego określonego tzw. Klasą Dokładności Wyważania;
- c) wskazuje, jaką przyjąć liczbę i jak rozdzielić przyjętą wartość dopuszczalnego niewyważenia na poszczególne płaszczyzny korekcyjne;
- d) opisuje wpływ błędów pomiarowych na wartość dopuszczalnego niewyważenia.

Najistotniejszym zaleceniem normy jest wskazanie wartości niewyważenia resztkowego, które może pozostać na wirniku po wyważeniu.

Norma opisuje trzy główne metody wyznaczania niezbędnej dokładności wyważania wirników.

Metoda 1: jest oparta na empirycznych klasach dokładności ustalonych w wyniku długoletnich doświadczeń praktycznych na typowych wirnikach i w typowych warunkach eksploatacyjnych.

Metoda 2: polega na eksperymentalnym wyznaczeniu dopuszczalnych niewyważień (jest proponowana do stosowania przy produkcji wielkoseryjnej).

Metoda 3: uwzględnia szczególne wymagania techniczne polegające na spełnieniu warunku nieprzekroczenia dopuszczalnych sił działających na łożyska. Opisuje szczególne przypadki geometrii wirnika, wraz z jego ułożyskowaniem, i odpowiadające im sposoby rozkładu niewyważenia na dwie płaszczyzny korekcji.

Zastosowanie jednej z metod 2 lub 3 łączy się z wykorzystaniem indywidualnych warunków. W końcowym etapie ich stosowania należy uwzględnić, przedstawiony w metodzie 1, sposób rozdziału niewyważenia.

Najczęściej stosowaną jest metoda pierwsza. Podaje jedną wartość niewyważenia resztkowego na cały wirnik, które jest posadowione w środku ciężkości wszystkich elementów wirujących. W innym rozdziale daje recepty, jak to niewyważenie podzielić na płaszczyzny korekcji. Nie przedstawia położenia kąтового niewyważenia. Wskazuje tylko na przyjmowanie takich położenia kątowych, przy których wystąpią największe siły w podparciu wirnika.

Zalecenia normy wynikają z dwóch założeń dotyczących wartości dopuszczalnego niewyważenia resztkowego \check{N}_{dop} :

- a) jest wprost proporcjonalne do masy wirnika m : $\check{N}_{dop} \sim m$,
- b) jest odwrotnie proporcjonalne do prędkości obrotowej wirnika n : $\check{N}_{dop} \sim \frac{1}{n}$.

Niewyważenie resztkowe uniezależniono od masy wirnika poprzez wprowadzenie parametru e_{dop} nazwanego: dopuszczalnym niewyważeniem resztkowym właściwym.

Ma wymiar długości i przy niewyważeniu statycznym jest odległością środka masy wirnika od osi obrotu:

$$e_{dop} = \frac{\check{N}_{dop}}{m} \left[\frac{gmm}{kg} \right] \rightarrow [mm]. \quad (1)$$

Uwzględnienie drugiego założenia polega na przyjęciu nieznanego parametru c_1 w równaniu:

$$e_{dop} = \frac{c_1}{n} = \frac{c_1 \cdot \pi}{30\omega}, \quad (2)$$

gdzie: $n = \frac{30\omega}{\pi}$. Po przekształceniu występuje współczynnik c_2 :

$$e_{dop} \cdot \omega = c_2 \left[\frac{mm}{s} \right]. \quad (3)$$

W równaniu (4) współczynnik c_2 zastąpiono innym, znanym co do wartości, współczynnikiem G . Współczynnikowi G nadano stałe wartości dla każdego z rodzajów wirników. Są to liczby od: 0,4 do 4000. Każda następną liczbą jest 2,5 razy większa od poprzedniej. Przyjęto je na podstawie wieloletnich doświadczeń, polegających na sprawdzaniu zachowania się wirników po wyważeniu, ich żywotności, odporności na zakłócenia w ruchu, akceptowalnej nośności ruchowej ułożyskowania w warunkach drgań

wymuszonych. Im liczba jest większa, tym mniejsze są wymagania dotyczące niewyważenia reszkowego. Otrzymano równanie:

$$e_{dop} \cdot \omega = G \left[\frac{mm}{s} \right], \quad (4)$$

gdzie: G – jest jednocześnie oznaczeniem klasy dokładności wyważania.

Uwzględniając równanie (1), otrzymuje się, narzucone przez normę, wartości dopuszczalnego niewyważenia reszkowego ze związku:

$$\check{N}_{dop} = \frac{G \cdot m}{\omega} \left[\frac{mm}{s} kg \frac{1}{s} \right] \rightarrow [kg \cdot mm], \quad (5)$$

gdzie: $\omega = \frac{\pi n}{30}$.

Definiuje on wartości i podaje tabelę klas dokładności wyważania: od $G0,4$ do $G4000$.

Dla przykładu:

Napęd obrabiarki obraca się w maszynie z prędkością obrotową: $n = 2800$ obr./min.

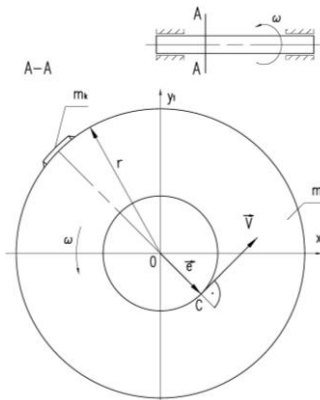
Masa wirnika wynosi 380 kg.

Z tabeli nr 1 w normie można odczytać wymaganą klasę dokładności wyważania, dla tego rodzaju wirnika: $G2,5$.

Zgodnie z równaniem (5):

$$\check{N}_{dop} = \frac{2,5 \cdot 380 \cdot 30}{3,14 \cdot 2800} = 3,241 [kg \cdot mm] = 3241 [g \cdot mm].$$

Klasę dokładności wyważania można interpretować fizycznie jako wartość składowej stycznej do toru prędkości środka ciężkości wirnika w ruchu obrotowym lub maksymalna prędkość drgań w paśmie obrotów roboczych wirnika. Pokazano to na rysunku 1.



Rys. 1. Klasy dokładności wyważania w ujęciu geometrycznym.

Tarcza o masie m i promieniu r wiruje z prędkością kątową ω i nie jest wyważona. Tarcza jest obciążona dodatkowym obciążnikiem o masie m_k . W związku z niewyważeniem: jej środek ciężkości nie leży na rzeczywistej osi wirowania i jest od niej odsunięty o wartość e . Norma stanowi, że klasy dokładności wyważania G mają wymiar prędkości liniowej v mierzonej w $[\frac{mm}{s}]$. Wartość prędkości liniowej punktu środka ciężkości c wynika z równania wektorowego:

$$\vec{v} = \vec{\omega} \times \vec{e}.$$

Wektory $\vec{\omega}$ i \vec{e} są względem siebie prostopadłe. Wektor prędkości liniowej \vec{v} jest prostopadły do obu wektorów tworzących iloczyn wektorowy. Można więc zapisać równanie:

$$v = \omega \cdot e.$$

W związku z powyższym stwierdzeniem otrzymamy:

$$v = G.$$

Niezależnie od powyższych związków momenty statyczne mas: całego wirnika i masy korygującej są sobie równe (wynika to z równań statyki):

$$m_k \cdot r = m \cdot e.$$

Dla wyznaczenia wartości masy korygującej lub klasy dokładności wyważania stosujemy układ trzech równań:

$$G = \omega e,$$

$$\omega = \frac{\pi n}{30},$$

$$m_k r = m e,$$

których rozwiązanie daje oczekiwaną odpowiedź:

$$m_k = \frac{30mG}{\pi r n},$$

gdzie: $n - \frac{\text{obr.}}{\text{min}}$

lub odwrotnie:

$$G = \frac{\pi m_k r n}{30m}.$$

Przykład liczbowy .

Wyznaczyć masę dopuszczalnego niewyważenia w [g] dla wirnika o masie $m = 10 \text{ kg}$ i średnicy $\emptyset 150 \text{ mm}$, który obraca się z prędkością $n = 1500 \frac{\text{obr.}}{\text{min}}$, tak, aby nie została przekroczona klasa dokładności wyważania G6,3.

$$m_k = \frac{30mG}{\pi r n} = \frac{30 \cdot 1 \cdot 10^4 \cdot 6,3}{3,14 \cdot 75 \cdot 1500} = 5,35 \text{ g}$$

Odpowiedź: masa dopuszczalnego niewyważenia wynosi: 5,35 g.

Norma narzuca sposób rozdziału \check{N}_{dop} na dwie płaszczyzny, dla wirnika sztywnego, ale nie narzuca wyboru płaszczyzn, dla których będą określone graniczne wartości \check{N}_{dop_1} i \check{N}_{dop_2} , gdzie: indeksy 1,2 oznaczają płaszczyzny pierwszą i drugą. Zdroworozsądkowo należy przyjąć te płaszczyzny w miejscu płaszczyzn pomiarowych. Wiedząc, w którym miejscu znajdują się płaszczyzny pomiarowe, i szacując położenie środka ciężkości, możemy rozdzielić \check{N}_{dop} na dwie składowe. Podczas użytkowania wyważarek uniwersalnych, z poziomą osią wirowania, daje się to łatwo wykonać, gdyż położenie płaszczyzn pomiarowych wynika z aktualnego rozstawu podpór. W wyważarkach z pionową osią

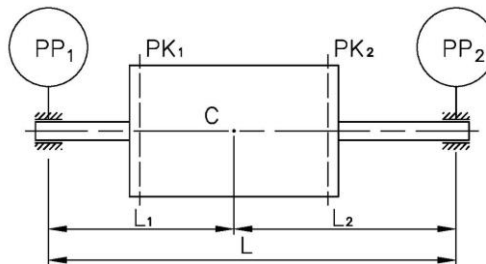
wirowania położenia czujników nie widać, lecz rozstaw podpór jest stały. Dlatego rozdział \check{N}_{dop} wykonuje się w nich systemowo w maszynie.

Wirniki sztywne są wyważane w dwóch płaszczyznach korekcyjnych. Powstaje więc pytanie: jak, korzystając z wyznaczonej wartości \check{N}_{dop} , ustalić dwie wartości odpowiednie dla dwóch płaszczyzn korekcyjnych? Płaszczyzny korekcyjne mogą być dowolnie przesunięte, wzdłuż osi wirowania, w stosunku do płaszczyzn pomiarowych.

W celu rozwiązania tego problemu w oprogramowaniu wyważarek pierwsza metoda jest połączona z trzecią. Trzecia jest dodatkowym warunkiem, przy spełnieniu którego uzyskuje się podział dopuszczalnego niewyważenia na dwie płaszczyzny pomiarowe. Spełnienie warunku polega na wyznaczeniu sił działających na ułożyskowanie wirnika, pochodzące od granicznego dopuszczalnego niewyważenia (wynikającego z normy) i skorzystanie z tych sił dla wyznaczenia niewyważenia w przyjętych płaszczyznach korekcyjnych za pomocą równań kinetostatyki.

Norma wskazuje uproszczony sposób postępowania przy podziale \check{N}_{dop} na dwie płaszczyzny korekcji $PK1$ i $PK2$. W zależności od położenia środka ciężkości podaje sposoby przeliczania. Sposoby rozdziału niewyważenia na dwie płaszczyzny pomiarowe $PP1$ i $PP2$ są intuicyjne. Wynikają z równań statyki. Będzie to pokazane poniżej. Przedstawimy sposób dla dwóch podstawowych konfiguracji podparcia wirnika.

Przypadek 1: Środek ciężkości znajduje się pomiędzy punktami podparcia wirnika:



Rys. 2. Wirnik podparty z obu stron.

gdzie: 1, 2 oznacza położenie płaszczyzn pomiarowych,
c – położenie środka ciężkości wszystkich elementów wirujących.

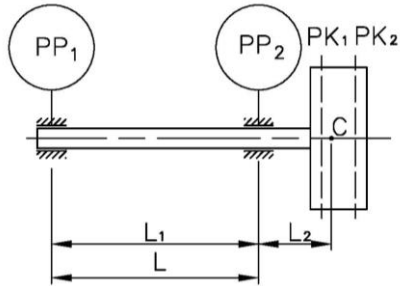
Z normy należy odczytać wartość \check{N}_{dop} dla płaszczyzny, w której się znajduje środek ciężkości. Rozdział na płaszczyzny pomiarowe jest następujący:

$$\check{N}_{dop_1} = \check{N}_{dop} \cdot \frac{l_2}{l} [gmm],$$

$$\check{N}_{dop_2} = \check{N}_{dop} \cdot \frac{l_1}{l} [gmm].$$

Jest to zgodne z warunkami obciążenia statycznego punktów podparcia wirnika.

Przypadek 2:



Rys. 3. Wiriik przewieszony.

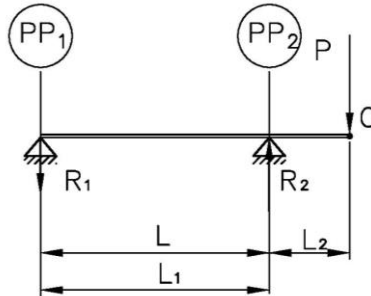
W tym przypadku środek ciężkości znajduje się poza punktami podparcia.

Norma zaleca rozdział \tilde{N}_{dop} analogicznie jak w pierwszym przypadku, tzn. odpowiednio do statycznych obciążeń punktów podparcia:

$$\tilde{N}_{dop1} = \tilde{N}_{dop} \cdot \frac{l_2}{l} [gmm],$$

$$\tilde{N}_{dop2} = \tilde{N}_{dop} \cdot \frac{l_1}{l} [gmm].$$

Sprawdźmy, ile wynoszą siły reakcji w punktach 1, 2 w punktach podparcia, na siłę P umieszczoną tak jak siła ciężkości wirnika.



Rys. 4. Belka obciążona siłą P.

Równania statycznej równowagi są następujące:

suma rzutów wszystkich sił na kierunku pionowy: $\sum R_{iy} = 0$,

suma momentów wszystkich sił policzonych względem punktu 1: $\sum M_1 = 0$.

Przyjmując kierunki działania reakcji w podporach i rozwijając równania, mamy:

$$R_1 - R_2 + P = 0,$$

$$R_2 l - P l_1 = 0,$$

$$R_2 = P \frac{l_1}{l}, \quad R_1 = P \frac{l_2}{l}.$$

Otrzymaliśmy identyczne związki z tymi, które zaleca norma.

W celu uniknięcia skrajnych rozkładów wynikających z bliskości jednej z podpór w stosunku do środka ciężkości, dla przypadku pokazanego na rysunku 2, norma ogranicza różnicę w rozkładzie \tilde{N}_{dop} na dwie strony do wartości:

- a) większa z dwóch wartości nie może przekroczyć udziału: $0,7 \tilde{N}_{dop}$,
- b) mniejsza z dwóch wartości nie może być mniejsza niż: $0,3 \tilde{N}_{dop}$.

Z podobnej przyczyny, dla przypadku podparcia pokazanego na rysunku 3, norma ogranicza różnicę w rozkładzie do wartości:

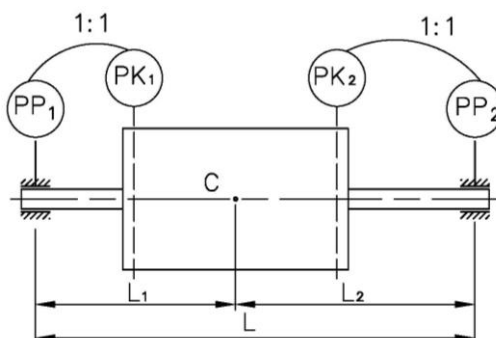
- a) większa wartość nie może być większa niż: $1,3 \tilde{N}_{dop}$,
- b) mniejsza wartość nie może być mniejsza niż: $0,3 \tilde{N}_{dop}$.

Jeżeli z oszacowania gabarytów lub rachunków wynikają wartości poza tymi granicami, to należy je skorygować do wartości normatywnej.

Kolejnym problemem, na który wskazuje norma (oraz w oczywisty sposób praktyka wyważania) i podpowiada jego rozwiązanie, jest przeliczenie z uzyskanych \tilde{N}_{dop_1} i \tilde{N}_{dop_2} w płaszczyznach pomiarowych na inne płaszczyzny, czyli na blisko leżące płaszczyzny korekcji: \tilde{N}_{dop}^{k1} i \tilde{N}_{dop}^{k2} .

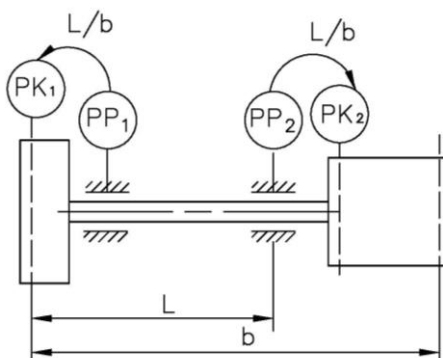
Podobnie, jak poprzednio, norma rozróżnia dwa przypadki:

- a) wirnika podpartego z obu stron,
- b) wirnika przewieszzonego.



Rys. 5. Współczynniki przeliczeniowe dla wirnika obustronnie podpartego.

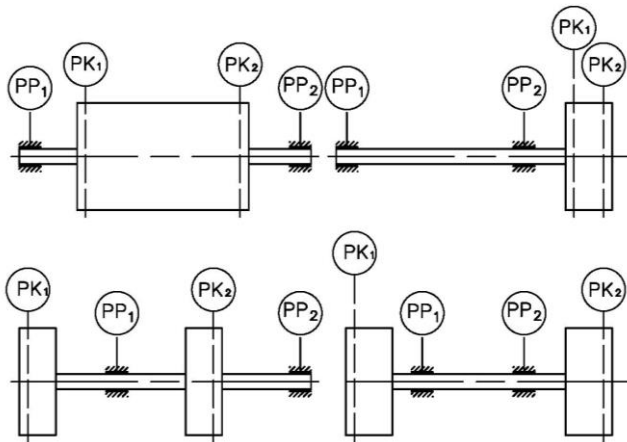
Zgodnie z normą, dla tego przypadku, należy przenosić wartości dopuszczalnego niewyważenia z płaszczyzny pomiarowej do najbliższej leżącej płaszczyzny korekcyjnej ze współczynnikiem 1, czyli bez zmian.



Rys. 6. Współczynniki przeliczeniowe dla wirnika obustronnie przewieszzonego.

Jak zaznaczono na rysunku 6, norma nakazuje zmniejszyć wartość \check{N}_{dop} uzyskaną z rozkładu na dwie płaszczyzny do wartości \check{N}_{dop}^{k1} i \check{N}_{dop}^{k2} , wprost proporcjonalnie do stosunku odległości pomiędzy podparciem wirnika i odległości pomiędzy płaszczyznami korekcji. Taki sposób korygowania wynika z równań statyki. Każde obciążenie siłowe wałka, które znajduje się poza punktami podparcia, daje na bliższej podporze dwie siły: równą obciążeniu i dodatkowo siłę pochodzącą od momentu siły. Aby przeciwdziałać dodatkowemu zwiększeniu obciążenia na łożyska, wartość dopuszczalną przez normę należy dodatkowo obniżyć.

Norma nie mówi o pozostałych czterech przypadkach podparcia wirnika, np. wirnik jednostronnie przewieszony, podparty naprzemiennie itp., jak pokazano na poniższym rysunku.



Rys. 7. Sposoby podparcia wirnika wymagające przeliczenia wartości z N_{dop} na N_{dop}^k .

Obecnie wyważarki działające na podstawie programów komputerowych mają w systemie zaprogramowane sposoby:

- rozdziału niewyważenia \check{N}_{dop} na dwie płaszczyzny pomiarowe \check{N}_{dop1} i \check{N}_{dop2} , które dla danej prędkości wirującej masy i oczekiwanej klasy dokładności wyważania określa norma;
- przeliczenia rozdzielonych wartości \check{N}_{dop1} i \check{N}_{dop2} z płaszczyzn pomiarowych na płaszczyzny korekcyjne: \check{N}_{dop1}^{k1} i \check{N}_{dop2}^{k2} stosownie do sposobu podparcia wirnika.

Obie czynności są wykonywane automatycznie po wybraniu sposobu podparcia i określeniu prędkości znamionowej dla wirnika.

Opisując sposoby rozdziału niewyważenia na płaszczyzny, nie wspomniano o położeniach kątowych niewyważenia. Norma nie określa położenia kątowych niewyważań. Z ostrożności procesowej, w systemach obliczeniowych wyważarek, przyjmowane są do analizy wektory sił obciążających punkty podparcia wyważanego wirnika w najmniej korzystnych konfiguracjach kątowych. Jeżeli wymagania nie stanowią inaczej, jako mniej korzystny przyjmuje się przypadek równych faz. Odpowiada on pierwszej postaci własnej wirnika zarówno sztywnego, jak i podatnego giętnie.

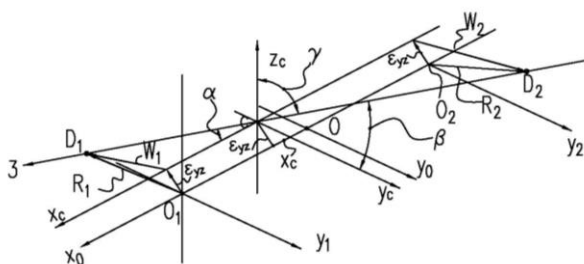
Niezależnie od wyżej opisanej normy funkcjonuje w praktyce inny sposób oceny niewyważenia. Wartość niewyważenia jest oceniana według względnego położenia dwóch osi: obrotu i głównej, centralnej osi bezwładności. Oś mogą przyjmować, względem siebie, następujące położenia w zależności od składowych niewyważenia:

- równoległe, gdy w niewyważeniu jest tylko składowa statyczna;
- przecinające się w środku ciężkości, gdy w niewyważeniu jest tylko składowa momentowa;
- przecinające się poza środkiem ciężkości, gdy w niewyważeniu jest składowa momentowa i statyczna, ale wektor momentu jest prostopadły do płaszczyzny, na której leżą obie osie (para sił tworząca moment leży w tej płaszczyźnie);
- skośne, gdy w niewyważeniu są obie składowe i siły tworzące składową momentową działają w kierunku, który nie jest prostopadły do siły tworzącej składową statyczną.

To zagadnienie nie jest jeszcze znormalizowane. Można przewidywać, że proces normalizacji obejmie także ten problem. Taki wniosek się nasuwa, gdyż są dziedziny przemysłu, w których jakość niewyważenia jest określana względnym położeniem obu wyżej wymienionych osi.

Przewaga tak postawionego zagadnienia oceny wartości niewyważenia, w stosunku do opisywanej normy, polega na uniezależnieniu się od właściwości dynamicznych wirnika i jego podparcia.

Miarą niewyważenia mogą być punkty przebicia dwóch płaszczyzn, prostopadłych do osi wirowania przez główną i centralną oś bezwładności D_1 i D_2 . Innym sposobem oceny jest wartość kąta nachylenia osi głównej w stosunku do osi wirowania α i wartość jej równoległego przemieszczania się od punktu środka ciężkości ε_{yz} .



ε_{yz} po lewej i prawej stronie są takie same,
 $W_1 \neq W_2$ przez $x_c \neq 0$ ale są przeciwieście skierowane,
 Punkty: D_1 - leży na końcu R_1 ; $\vec{R}_1 = \vec{\varepsilon}_{yz} + \vec{W}_1$
 D_2 - leży na końcu R_2 ; $\vec{R}_2 = \vec{\varepsilon}_{yz} + \vec{W}_2$

Rys. 8. Położenie głównej, centralnej osi bezwładności określone punktami przebicia D_1 oraz D_2 płaszczyzn prostopadłych do osi wirowania.

Powyzsze zagadnienia zostaly szczegolowo opisane w mojej ksiazce: M. Malec:
 Wyważenie dynamiczne wirników w teorii i praktyce. Bydgoszcz 2022.
 Dystrybutorem książki jest: www.fachowa.pl