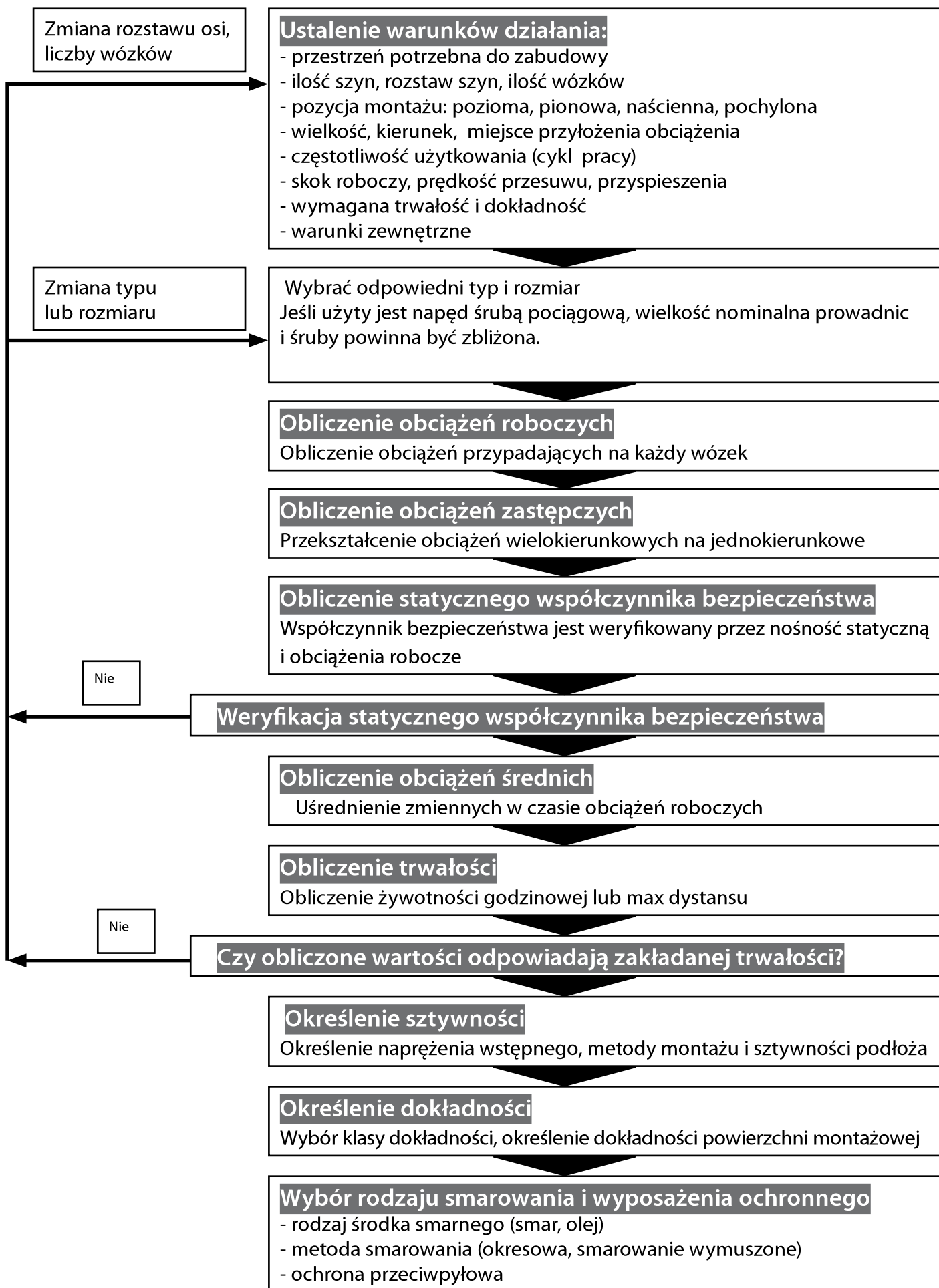


Procedura doboru prowadnicy z szyną profilową



Wybór zakończony

Obciążenie nominalne i trwałość użytkowa przewodnic liniowych

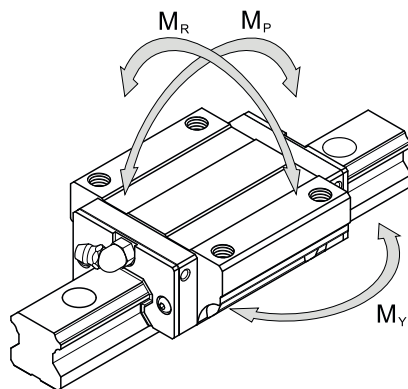
Aby dobrać model przewodnicy, który jest najbardziej odpowiedni do przewidywanych warunków pracy, należy uwzględnić jej nośność i żywotność. Kiedy bieżnie lub elementy toczne poddawane są powtarzającym się naprężeniom, żywotność przewodnicy jest definiowana jako całkowita droga przebyta przez wózek do momentu wystąpienia zużycia w postaci złuszczeń, spękań.

Nośność statyczna (C_0)

Trwałe odkształcenie między bieżnią a kulkami powstaje, kiedy przewodnica z szyną profilową zostanie podczas ruchu lub postoju narażona na nadmierne obciążenia lub uderzenia. Po przekroczeniu pewnej wielkości tego odkształcenia następuje wyraźne pogorszenie płynności ruchu wózka. Nośność statyczna (C_0) odpowiada takiemu obciążeniu statycznemu, które wywołuje trwałe odkształcenie wielkości 0,0001 średnicy kulki w obszarze kontaktu o największym obciążeniu. Maksymalne obciążenie statyczne, oddziałujące na przewodnicę nie może więc przekraczać nośności statycznej. Dane dotyczące nośności dla każdej przewodnicy zawarte są w tabelach.

Dopuszczalny moment statyczny (M_0)

Gdy wózek zostanie obciążony momentem skrętnym, elementy toczne nie są obciążone jednakowo wzdłuż bieżni szyny, lecz punktowo w zależności od płaszczyzny działania momentu. Dopuszczalny moment statyczny (M_0) odpowiada określonemu statycznemu obciążeniu działającemu w danym kierunku, które wywołuje w miejscu największego naprężenia trwałe odkształcenie bieżni o wielkości 0,0001 średnicy elementu tocznego. W systemach przewodnic liniowych dopuszczalne momenty statyczne definiowane są jako M_p , M_y , M_r w trzech kierunkach.



Współczynnik bezpieczeństwa obciążenia statycznego (f_s)

Z powodu uderzeń i wibracji występujących podczas przesuwu lub postoju, a także sił bezwładności wynikających z przyspieszeń i opóźnień, przewodnica szynowa może być narażona na dodatkowe obciążenia zewnętrzne. Dla zabezpieczenia przewodnicy przed skutkami takich mało przewidywalnych obciążeń należy przy doborze uwzględnić współczynnik bezpieczeństwa. Współczynnik bezpieczeństwa obciążenia statycznego zwiększa wstępnie obliczone wartości obciążeń proporcjonalnie do warunków pracy i otoczenia. Innymi słowy - współczynnik bezpieczeństwa pozostaje wyrażony przez stosunek nośności statycznej do obliczonych obciążeń. Empiryczne wartości współczynników bezpieczeństwa dla różnych zastosowań przedstawia tabela.

Typ maszyny	Warunki pracy	f_s
Inne maszyny lekkie	Normalne obciążenia	1,0 – 1,3
	Uderzenia i wibracje	2,0 – 3,0
Obrabiarki	Normalne obciążenia	1,0 – 1,5
	Uderzenia i wibracje	2,5 – 7,0

Współczynnik bezpieczeństwa dany jest

$$f_s = \frac{C_0}{P} \text{ oraz } f_s = \frac{M_0}{M} \text{ gdzie}$$

f_s – współczynnik bezpieczeństwa obciążenia statycznego

C_0 – nośność statyczna (N)

M_0 – dopuszczalny moment statyczny (Nm)

P – obciążenia obliczone (N)

M – obliczony moment (Nm)

Nośność dynamiczna (C_{dyn})

Nawet gdy identyczne prowadnice liniowe wyprodukowane były w ten sam sposób i użytkowane w tych samych warunkach, to ich trwałość użytkowa może być różna. Dlatego też do obliczeń trwałości prowadnic liniowych wykorzystuje się parametr zwany nośnością dynamiczną. Nośność dynamiczna (C) to obciążenie ustalone co do kierunku i wartości, dla którego 90% prowadnic z jednej grupy, użytkowanych w jednakowych warunkach osiągnie trwałość na poziomie 50 km dla typów kulkowych lub 100 km dla typów rolkowych bez objawów zużycia.

Trwałość nominalna (L)

Trwałość nominalna prowadnicy zależy przede wszystkim od wielkości obciążenia. Oprócz tego na trwałość prowadnic mają również wpływ: twardość bieżni, temperatura otoczenia oraz warunki ruchowe. Przy obliczaniu trwałości należy uwzględnić te parametry, stosując poniższe równania:

$$\text{Dla prowadnic kulkowych} \quad L = \left(\frac{f_H \times f_T}{f_W} \times \frac{C}{P} \right)^3 \times 50$$

$$\text{Dla prowadnic rolkowych} \quad L = \left(\frac{f_H \times f_T}{f_W} \times \frac{C}{P} \right)^{\frac{10}{3}} \times 100 \quad \text{gdzie}$$

L – trwałość nominalna (km)

C – nośność dynamiczna (N)

P – obciążenia (N)

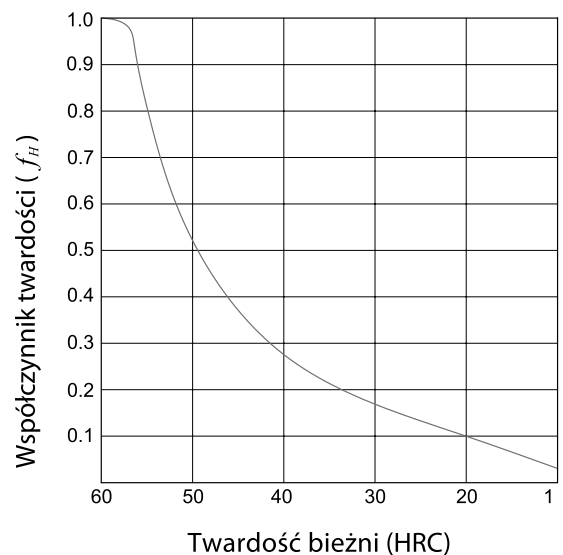
f_H – współczynnik twardości

f_T – współczynnik temperaturowy

f_W – współczynnik obciążenia

Współczynnik twardości f_H

Dla osiągnięcia optymalnej nośności bieżnie prowadnic mają twardość w zakresie 58 – 64 HRC. Wartość współczynnika twardości dla tego zakresu wynosi $f_H = 1$. Dla mniejszych twardości wartość współczynnika maleje zgodnie z poniższym wykresem. Zmniejszenie twardości skutkuje pogorszeniem nośności dynamicznej i statycznej. W przypadku twardości mniejszej niż 58 HRC nośność statyczną i dynamiczną należy skorygować poprzez pomnożenie przez adekwatną wartość współczynnika twardości.



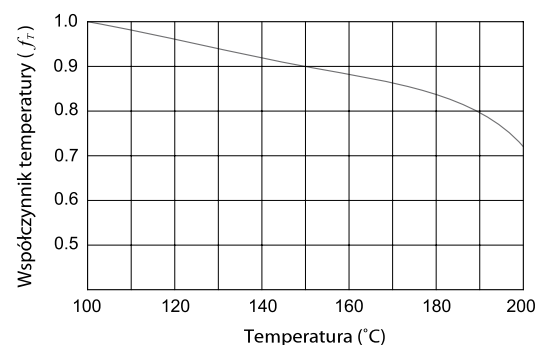
Współczynnik obciążenia f_W

Chociaż obciążenia robocze prowadnicy liniowej mogą być dość dokładnie obliczone to podczas pracy przeważnie są większe. Jest to spowodowane trudnymi do przewidzenia wibracjami i uderzeniami. Dlatego też nośność dynamiczna prowadnicy powinna być podzielona przez uzyskany empirycznie współczynnik obciążenia f_W .

Rodzaj obciążenia	Prędkość przesuwu	f_W
Bez uderzeń i wibracji	$V < 15 \text{ m/min}$	1,0 – 1,2
Niewielkie uderzenia i wibracje	$15 \text{ m/min} < V < 60 \text{ m/min}$	1,2 – 1,5
Umiarkowane uderzenia i wibracje	$60 \text{ m/min} < V < 120 \text{ m/min}$	1,5 – 2,0
Silne uderzenia i wibracje	$V > 120 \text{ m/min}$	2,0 – 3,5

Współczynnik temperaturowy f_T

Jeśli temperatura prowadnicy z szyną profilową przekracza 100°C , zmniejszeniu ulega dopuszczalne obciążenie i trwałość. Z tego powodu nośność dynamiczna i statyczna powinny zostać pomnożone przez współczynnik temperaturowy. Niektóre elementy prowadnic liniowych PMI wykonane są z tworzyw sztucznych i gumy, więc bardzo wskazane jest unikanie temperatury pracy wyższej niż 100°C .



Obliczenie trwałości (L_h)

Gdy znana jest trwałość nominalna L , trwałość godzinowa L_h może być obliczona dla stałej długości skoku i częstotliwości cykli roboczych.

$$L_h = \frac{L \times 10^3}{2 \times l_s \times n_1 \times 60} \quad \text{gdzie:}$$

L_h – trwałość w godzinach

L – trwałość nominalna (km)

l_s – długość skoku (m)

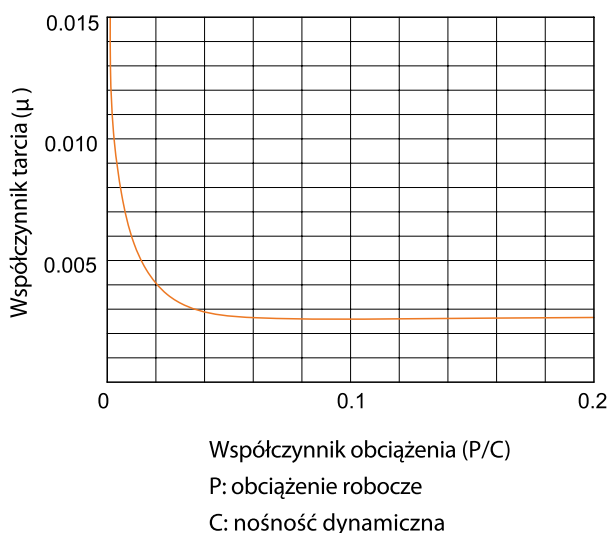
n_1 – ilość cykli przesuwu na minutę

Współczynnik tarcia

Działanie prowadnic liniowych PMI opiera się na przetaczaniu wózka na elementach tocznych po szynie profilowej. W przypadku tego typu konstrukcji, opór tarcia prowadnicy może stanowić jedynie 1/20 do 1/40 oporu tarcia porównywalnej prowadnicy ślizgowej. Jest to widoczne zwłaszcza dla tarcia statycznego, które jest dużo mniejsze dla prowadnicy tocznej. Ponadto, różnica między tarciem statycznym a dynamicznym jest bardzo mała, więc nie występuje kłopotliwy efekt drgań ciernych tzw. stick - slip effect. Dzięki tak małemu tarcu do napędu prowadnic nadają się napędy stosunkowo niewielkiej mocy.

Opór tarcia prowadnic liniowych może wahać się w pewnych granicach ze względu na zależność od obciążenia, napięcia wstępnego, lepkości środka smarnego, ilości uszczelnień i innych czynników. Opór tarcia prowadnicy może być obliczony dzięki równaniu bazującemu na obciążeniu roboczym i tarcu uszczelnień. Generalnie współczynnik tarcia będzie różny dla różnych serii. Dla typów kulkowych wynosi 0,002 – 0,003 (bez uszczelnień), a dla typów rolkowych 0,001 – 0,002 (bez uszczelnień).

$$F = \mu \times P + f$$



Zależność między obciążeniem roboczym a współczynnikiem tarcia.

Obliczanie obciążeń roboczych

Obciążenia oddziałujące na zestaw przewodnic liniowych mogą być różne ze względu na kilka czynników, takich jak: położenie środka ciężkości, umiejscowienie sił obciążających, siły wynikające z przyspieszania i zwalniania.

Aby dokonać wyboru właściwej prowadnicy powyższe warunki muszą być rozpatrzone celem określenia wielkości przyłożonego obciążenia.

Przykłady kalkulacji obciążeń:

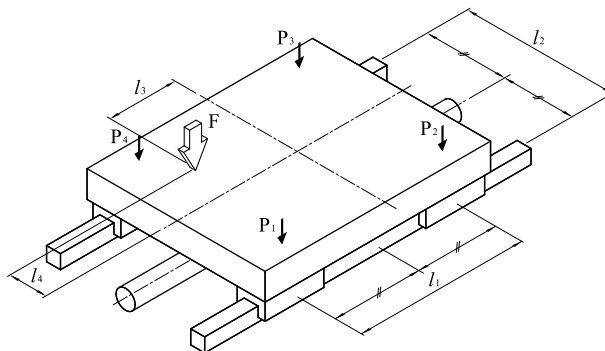
Układ poziomy, ruch jednostajny lub postój

$$P_1 = \frac{F}{4} + \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_2 = \frac{F}{4} - \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_3 = \frac{F}{4} - \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_4 = \frac{F}{4} + \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$



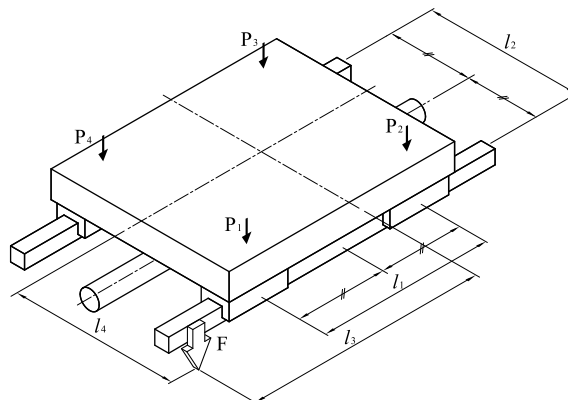
Układ poziomy, obciążenie przyłożone poza obrysem sań, ruch jednostajny lub postój

$$P_1 = \frac{F}{4} + \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_2 = \frac{F}{4} - \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_3 = \frac{F}{4} - \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

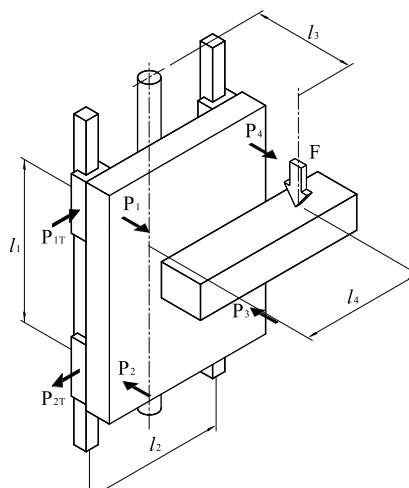
$$P_4 = \frac{F}{4} + \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$



Układ pionowy, ruch jednostajny lub postój

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

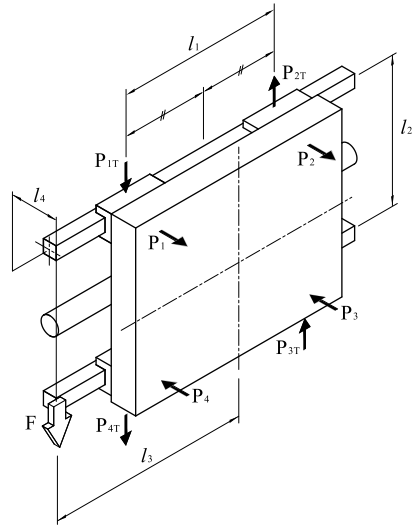


Układ naścienny, ruch jednostajny lub postój

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{F \cdot l_4}{2 \cdot l_2}$$

$$P_{1T} = P_{4T} = \frac{F}{4} + \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{2T} = P_{3T} = \frac{F}{4} - \frac{F \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$



Układ pochylony poprzecznie

$$P_1 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_2}$$

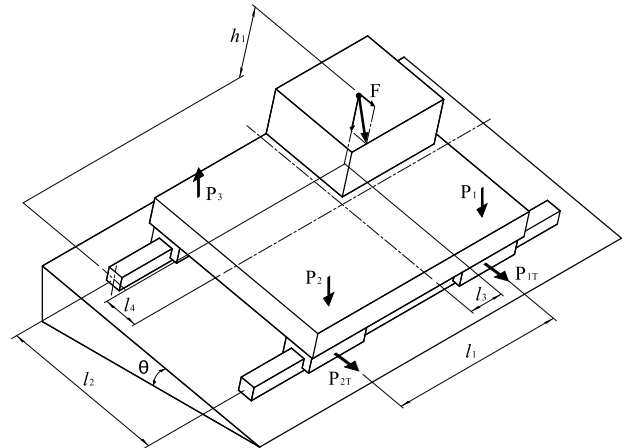
$$P_2 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_2}$$

$$P_3 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_2}$$

$$P_4 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_2}$$

$$P_{1T} = P_{4T} = \frac{F \cdot \sin \theta}{4} + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{2T} = P_{3T} = \frac{F \cdot \sin \theta}{4} - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$



Układ pochylony wzdłużnie

$$P_1 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_1}$$

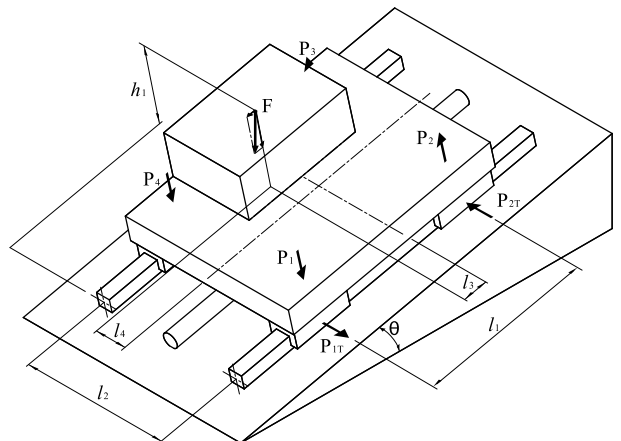
$$P_2 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_1}$$

$$P_3 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} - \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_1}$$

$$P_4 = \frac{F \cdot \cos \theta}{4} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_3}{2 \cdot l_1} + \frac{F \cdot \cos \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_2} + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot h_1}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{4T} = + \frac{F \cdot \sin \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{2T} = P_{3T} = - \frac{F \cdot \sin \theta \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$



Układ poziomy z uwzględnieniem bezwładności

Podczas przyspieszania

$$P_1 = P_4 = \frac{mg}{4} - \frac{m \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_2 = P_3 = \frac{mg}{4} + \frac{m \cdot a_1 \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{m \cdot a_1 \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

W ruchu ustalonym

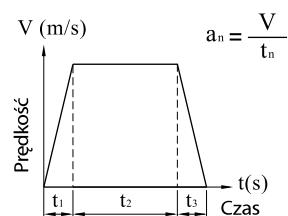
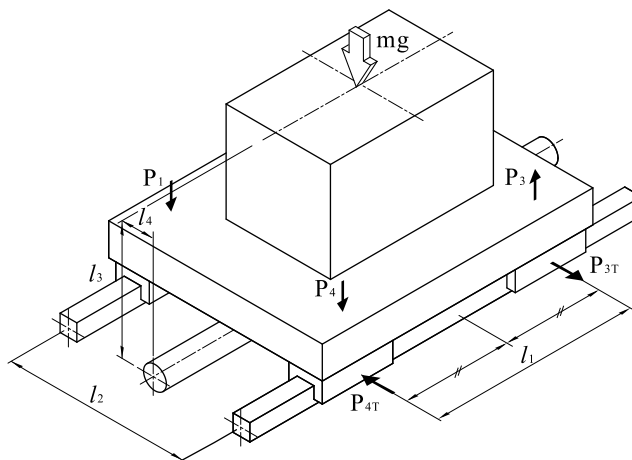
$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{mg}{4}$$

Podczas hamowania

$$P_1 = P_4 = \frac{mg}{4} + \frac{m \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_2 = P_3 = \frac{mg}{4} - \frac{m \cdot a_3 \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{m \cdot a_3 \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$



Układ pionowy z uwzględnieniem bezwładności

Podczas przyspieszania

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{m \cdot (g + a_1) \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{m \cdot (g + a_1) \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

W ruchu ustalonym

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{m \cdot g \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{m \cdot g \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

Podczas hamowania

$$P_1 = P_2 = P_3 = P_4 = \frac{m \cdot (g - a_3) \cdot l_3}{2 \cdot l_1}$$

$$P_{1T} = P_{2T} = P_{3T} = P_{4T} = \frac{m \cdot (g - a_3) \cdot l_4}{2 \cdot l_1}$$

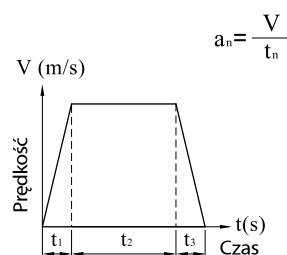
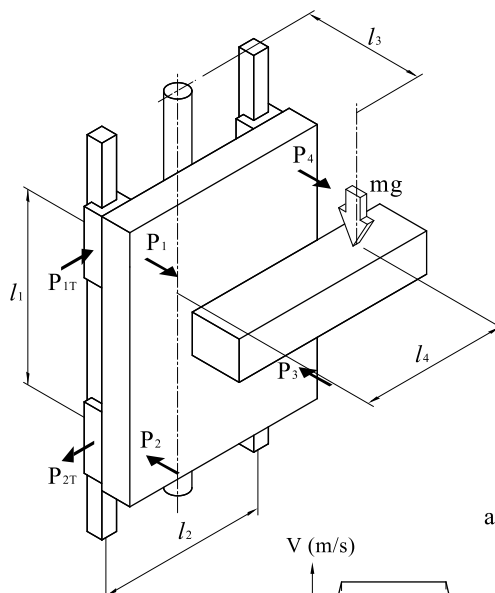


Diagram prędkości

Obliczanie obciążenia zastępczego

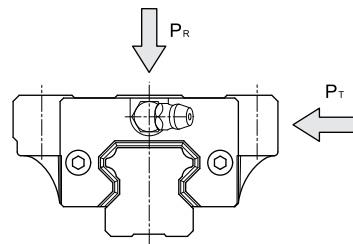
System prowadnic liniowych może przyjmować obciążenia i momenty we wszystkich kierunkach prostopadłych do osi przesuwu jednocześnie. Kiedy prowadnica przenosi jednocześnie więcej niż jedno obciążenie to wszystkie te obciążenia da się zastąpić promieniowym lub poprzecznym obciążeniem zastępczym, aby móc uzyskać żywotność i statyczny współczynnik bezpieczeństwa. Prowadnice liniowe PMI zostały zaprojektowane do przenoszenia podobnych obciążeń we wszystkich prostopadłych do osi kierunkach. Obliczenie obciążeń zastępczych dla zestawu dwóch lub więcej prowadnic przeprowadza się według poniższych zależności.

$$P_E = |P_R| + |P_T|$$

P_E – obciążenia zastępcze (N)

P_R – obciążenia promieniowe (N)

P_T – obciążenia poprzeczne (N)



Dla układu z pojedynczą szyną działanie momentu obrotowego powinno być uwzględnione zgodnie z poniższym równaniem.

$$P_E = |P_R| + |P_T| + C_0 \cdot \frac{|M|}{M_R}$$

P_E – obciążenia zastępcze (N)

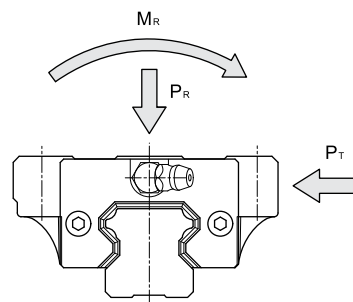
P_R – obciążenia promieniowe (N)

P_T – obciążenia poprzeczne (N)

C_0 – nośność statyczna (N)

M – obliczeniowy moment (Nm)

M_R – dopuszczalny statyczny moment (Nm)



Obliczanie obciążeń średnich

Kiedy system przewodnic liniowych jest obciążany w sposób zmienny, to trwałość godzinowa może być obliczona po uwzględnieniu przewidywalnych i systematycznych zmian obciążenia. Obciążenie średnie (P_m) jest obciążeniem, dla którego trwałość jest równoważna dla systemu przewodnic pracujących pod zmiennym obciążeniem. Równanie obciążeń średnich:

$$P_m = e \sqrt{\frac{1}{L} \cdot \sum_{n=1}^n (P_n^e \cdot L_n)}$$

P_m – obciążenia średnie (N)

P_n – obciążenia zmienne (N)

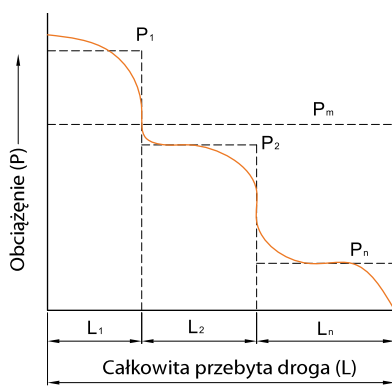
L – całkowita przebyta droga (mm)

L_n – droga przebyta pod obciążeniem P_n (mm)

Przykład obliczania obciążeń średnich

Typ zmiennych obciążeń

Obciążenia zmienne stopniowo



Obliczanie obciążeń średnich

$$P_m = e \sqrt{\frac{1}{L} P_1^e \cdot L_1 + P_2^e \cdot L_2 + \dots + P_n^e \cdot L_n}$$

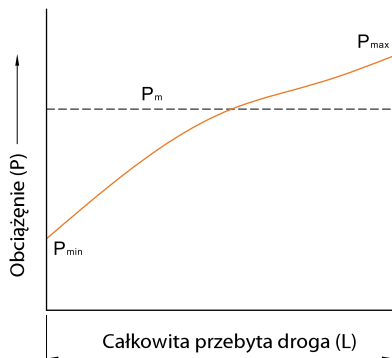
P_m – obciążenie średnie (N)

P_n – obciążenie zmienne (N)

L – całkowita przebyta droga (mm)

L_n – całkowita przebyta droga pod obciążeniem P_n (mm)

Obciążenia zmienne jednostajnie



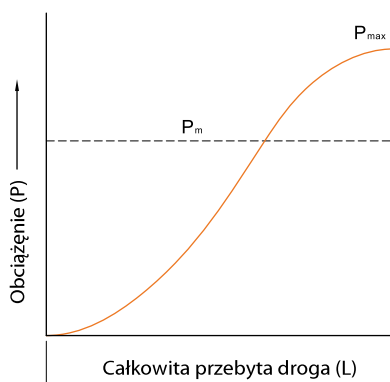
$$P_m \cong \frac{1}{3} (P_{min} + 2 \cdot P_{max})$$

P_m – obciążenie średnie (N)

P_{min} – obciążenie min (N)

P_{max} – obciążenie max (N)

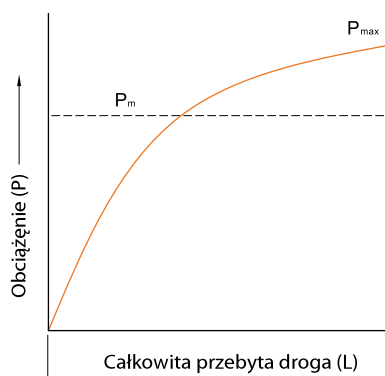
Obciążenia zmienne sinusoidalnie



$$P_m \cong 0.65 \cdot P_{max}$$

P_m – obciążenie średnie (N)

P_{max} – obciążenie max (N)



$$P_m \cong 0.75 \cdot P_{max}$$

P_m – obciążenie średnie (N)

P_{max} – obciążenie max (N)

Obliczanie obciążeń średnich

Przykład obliczeniowy

Warunki pracy:

Typ prowadnicy

MSA 35 LA 2SS FC + R2520-20/20 P II

Nośność dynamiczna $C = 63,6 \text{ kN}$

Nośność statyczna $C_0 = 100,6 \text{ kN}$

Masa	$m_1 = 700 \text{ kg}$ $m_2 = 450 \text{ kg}$	Skok	$l_s = 1500 \text{ mm}$
Prędkość	$V = 0,75 \text{ m/s}$	Odległości	$l_1 = 650 \text{ mm}$
Czas	$t_1 = 0,05 \text{ s}$		$l_2 = 450 \text{ mm}$
	$t_2 = 1,9 \text{ s}$		$l_3 = 135 \text{ mm}$
	$t_3 = 0,15 \text{ s}$		$l_4 = 60 \text{ mm}$
Przyspieszenia	$a_1 = 15 \text{ m/s}^2$		$l_5 = 175 \text{ mm}$
	$a_2 = 5 \text{ m/s}^2$		$l_6 = 400 \text{ mm}$

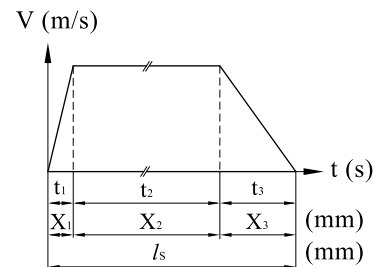
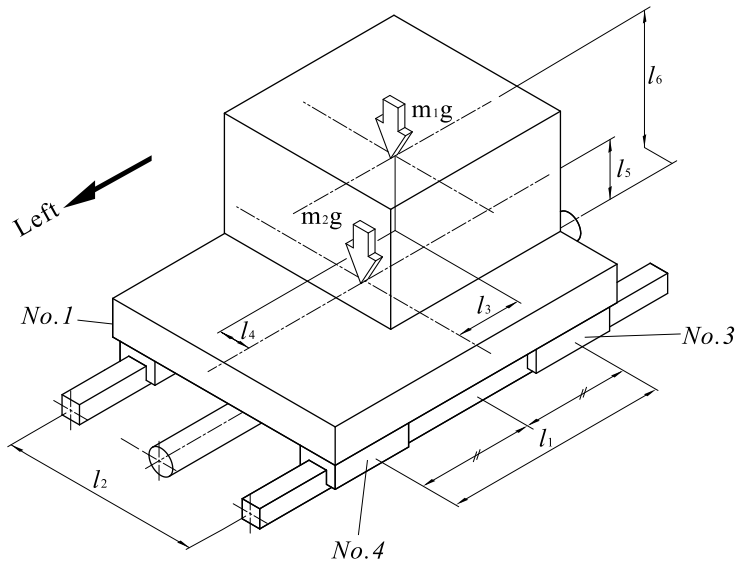


Diagram prędkości

Obliczenie obciążeń przypadających na każdy wózek

Ruch jednostajny, obciążenie promieniowe P_n

$$P_1 = \frac{m_1 g}{4} - \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_1 g \cdot l_4}{2l_2} + \frac{m_2 g}{4}$$

$$= 2562.4 \text{ N}$$

$$P_2 = \frac{m_1 g}{4} + \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} + \frac{m_1 g \cdot l_4}{2l_2} + \frac{m_2 g}{4}$$

$$= 3987.2 \text{ N}$$

$$P_3 = \frac{m_1 g}{4} + \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} - \frac{m_1 g \cdot l_4}{2l_2} + \frac{m_2 g}{4}$$

$$= 3072.6 \text{ N}$$

$$P_4 = \frac{m_1 g}{4} - \frac{m_1 g \cdot l_3}{2l_1} - \frac{m_1 g \cdot l_4}{2l_2} + \frac{m_2 g}{4}$$

$$= 1647.8 \text{ N}$$

Obliczenie obciążeń przypadających na każdy wózek

Podczas przyspieszania w lewo, obciążenie promieniowe $P_n la_1$

$$P_1 la_1 = P_1 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= -1577 \text{ N}$$

$$P_2 la_1 = P_2 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 8126.6 \text{ N}$$

$$P_3 la_1 = P_3 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 7212 \text{ N}$$

$$P_4 la_1 = P_4 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= -2491.6 \text{ N}$$

Obciążenie poprzeczne $Pt_n la_1$

$$Pt_1 la_1 = - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = -484.6 \text{ N}$$

$$Pt_2 la_1 = \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = 484.6 \text{ N}$$

$$Pt_3 la_1 = \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = 484.6 \text{ N}$$

$$Pt_4 la_1 = - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = -484.6 \text{ N}$$

Podczas zwalniania w lewo, obciążenie promieniowe $P_n la_1$

$$P_1 la_3 = P_1 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 3942.2 \text{ N}$$

$$P_2 la_3 = P_2 - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 2607.4 \text{ N}$$

$$P_3 la_3 = P_3 - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 1692.8 \text{ N}$$

$$P_4 la_3 = P_4 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 3027.6 \text{ N}$$

Obciążenie poprzeczne $Pt_n la_3$

$$Pt_1 la_3 = \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = 161.5 \text{ N}$$

$$Pt_2 la_3 = - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = -161.5 \text{ N}$$

$$Pt_3 la_3 = - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = 161.5 \text{ N}$$

$$Pt_4 la_3 = \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = -161.5 \text{ N}$$

Podczas zwalniania w prawo, obciążenie promieniowe $P_n ra_1$

$$P_1 ra_1 = P_1 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 6701.8 \text{ N}$$

$$P_2 ra_1 = P_2 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= -152.2 \text{ N}$$

$$P_3 ra_1 = P_3 - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= -1066.8 \text{ N}$$

$$P_4 ra_1 = P_4 + \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_1 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 5787.2 \text{ N}$$

Obciążenie poprzeczne $Pt_n ra_1$

$$Pt_1 ra_1 = \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = 484.6 \text{ N}$$

$$Pt_2 ra_1 = - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = -484.6 \text{ N}$$

$$Pt_3 ra_1 = - \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = -484.6 \text{ N}$$

$$Pt_4 ra_1 = \frac{m_1 \cdot a_1 \cdot l_4}{2l_1} = 484.6 \text{ N}$$

Podczas zwalniania w prawo, obciążenie promieniowe $P_n ra_3$

$$P_1 ra_3 = P_1 - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 1182.6 \text{ N}$$

$$P_3 ra_3 = P_3 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 4452.4 \text{ N}$$

$$P_2 ra_3 = P_2 + \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} + \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 5367 \text{ N}$$

$$P_4 ra_3 = P_4 - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_6}{2l_1} - \frac{m_2 \cdot a_3 \cdot l_5}{2l_1}$$

$$= 268 \text{ N}$$

Obciążenie poprzeczne $Pt_n la_1$

$$Pt_1 ra_3 = - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = -161.5 \text{ N}$$

$$Pt_3 ra_3 = \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = 161.5 \text{ N}$$

$$Pt_2 ra_3 = \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = 161.5 \text{ N}$$

$$Pt_4 ra_3 = - \frac{m_1 \cdot a_3 \cdot l_4}{2l_1} = -161.5 \text{ N}$$

Obliczanie obciążenia zastępczego

W ruchu jednostajnym

$$P_{E1} = P_1 = 2562.4 \text{ N}$$

$$P_{E3} = P_3 = 3072.6 \text{ N}$$

$$P_{E2} = P_2 = 3987.2 \text{ N}$$

$$P_{E4} = P_4 = 1647.8 \text{ N}$$

Podczas przyspieszania w lewo

$$P_{E1} la_1 = |P_1 la_1| + |Pt_1 la_1| = 2061.6 \text{ N}$$

$$P_{E3} la_1 = |P_3 la_1| + |Pt_3 la_1| = 7696.6 \text{ N}$$

$$P_{E2} la_1 = |P_2 la_1| + |Pt_2 la_1| = 8611.2 \text{ N}$$

$$P_{E4} la_1 = |P_4 la_1| + |Pt_4 la_1| = 2976.2 \text{ N}$$

Podczas zwalniania w lewo

$$P_{E1} la_3 = |P_1 la_3| + |Pt_1 la_3| = 4103.7 \text{ N}$$

$$P_{E3} la_3 = |P_3 la_3| + |Pt_3 la_3| = 1854.3 \text{ N}$$

$$P_{E2} la_3 = |P_2 la_3| + |Pt_2 la_3| = 2768.9 \text{ N}$$

$$P_{E4} la_3 = |P_4 la_3| + |Pt_4 la_3| = 3189.1 \text{ N}$$

Podczas przyspieszania w prawo

$$P_{E1} ra_1 = |P_1 la_1| + |Pt_1 la_1| = 7186.4 \text{ N}$$

$$P_{E3} ra_1 = |P_3 la_1| + |Pt_3 la_1| = 1551.4 \text{ N}$$

$$P_{E2} ra_1 = |P_2 la_1| + |Pt_2 la_1| = 636.8 \text{ N}$$

$$P_{E4} ra_1 = |P_4 la_1| + |Pt_4 la_1| = 6271.8 \text{ N}$$

Podczas zwalniania w prawo

$$P_{E1} ra_3 = |P_1 la_3| + |Pt_1 la_3| = 1344.1 \text{ N}$$

$$P_{E3} ra_3 = |P_3 la_3| + |Pt_3 la_3| = 4613.9 \text{ N}$$

$$P_{E2} ra_3 = |P_2 la_3| + |Pt_2 la_3| = 5528.5 \text{ N}$$

$$P_{E4} ra_3 = |P_4 la_3| + |Pt_4 la_3| = 429.5 \text{ N}$$

Obliczanie statycznego współczynnika bezpieczeństwa

Jak wynika z wcześniejszych obliczeń, maksymalne obciążenie przypada na wózek 2 podczas przyspieszania prowadnicy w lewo.

$$f_s = \frac{C_o}{P_{E2} l a_1} = \frac{100.6 \times 10^3}{8611.2} = 11.7$$

Obliczanie obciążeń średnich przypadających na każdy wózek P_{m_n}

$$P_{m1} = \sqrt[3]{\frac{(P_{E1} l a_1^3 \cdot X_1 + P_{E1}^3 \cdot X_2 + P_{E1} l a_3^3 \cdot X_3 + P_{E1} r a_1^3 \cdot X_1 + P_{E1}^3 \cdot X_2 + P_{E1} r a_3^3 \cdot X_3)}{2l_s}} = 2700.7 \text{ N}$$

$$P_{m2} = \sqrt[3]{\frac{(P_{E2} l a_1^3 \cdot X_1 + P_{E2}^3 \cdot X_2 + P_{E2} l a_3^3 \cdot X_3 + P_{E2} r a_1^3 \cdot X_1 + P_{E2}^3 \cdot X_2 + P_{E2} r a_3^3 \cdot X_3)}{2l_s}} = 4077.2 \text{ N}$$

$$P_{m3} = \sqrt[3]{\frac{(P_{E3} l a_1^3 \cdot X_1 + P_{E3}^3 \cdot X_2 + P_{E3} l a_3^3 \cdot X_3 + P_{E3} r a_1^3 \cdot X_1 + P_{E3}^3 \cdot X_2 + P_{E3} r a_3^3 \cdot X_3)}{2l_s}} = 3187.7 \text{ N}$$

$$P_{m4} = \sqrt[3]{\frac{(P_{E4} l a_1^3 \cdot X_1 + P_{E4}^3 \cdot X_2 + P_{E4} l a_3^3 \cdot X_3 + P_{E4} r a_1^3 \cdot X_1 + P_{E4}^3 \cdot X_2 + P_{E4} r a_3^3 \cdot X_3)}{2l_s}} = 1872.6 \text{ N}$$

Obliczanie trwałości nominalnej L_n

Bazując na równaniu trwałości nominalnej, przyjmujemy $f_w = 1,5$ i otrzymujemy:

$$L_1 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m1}} \right)^3 \times 50 = 193500 \text{ km}$$

$$L_3 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m3}} \right)^3 \times 50 = 117700 \text{ km}$$

$$L_2 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m2}} \right)^3 \times 50 = 56231 \text{ km}$$

$$L_4 = \left(\frac{C}{f_w \cdot P_{m4}} \right)^3 \times 50 = 580400 \text{ km}$$

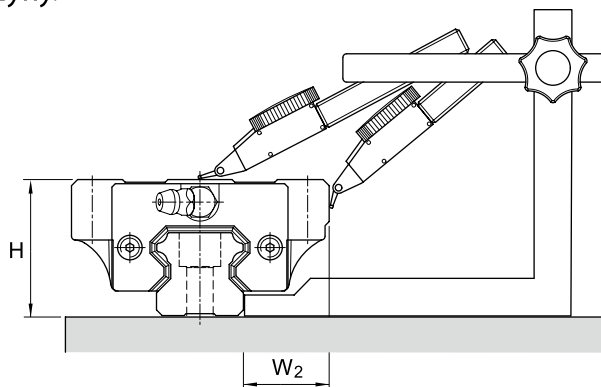
Dla sprecyzowanych w tym przykładzie warunków pracy z obliczeń wynika, iż trwałość wózka nr 2 wyniesie 56231 km.

Dokładność wykonania

Dokładność wykonania prowadnic liniowych zawiera tolerancję wymiarów wysokości, szerokości, precyzji poruszania się wózka po szynie. Prowadnice produkowane są w pięciu klasach dokładności wykonania: normalnej (N), wysokiej (H), precyzyjnej (P), super precyzyjnej (SP) i ultra precyzyjnej (UP).

Równoległość przesuwu

Tolerancja równoległości biegu jest odchyleniem między powierzchniami referencyjnymi wózka i szyny mierzonymi na całej długości szyny.



Różnica wysokości (ΔH) oznacza różnicę wysokości między wózkami zainstalowanymi na tej samej płaszczyźnie.

Różnica szerokości (ΔW_2) oznacza różnicę szerokości między wózkami zainstalowanymi na szynie.

Dodatkowe uwagi:

1. Kiedy dwie lub więcej prowadnice liniowe są używane na tej samej płaszczyźnie, tolerancja wymiaru W_2 i różnica ΔW_2 mają zastosowanie tylko do szyny Master
2. Dokładność jest mierzona na środku środkowej powierzchni wózka

Klasy dokładności wykonania zalecane dla niektórych urządzeń:

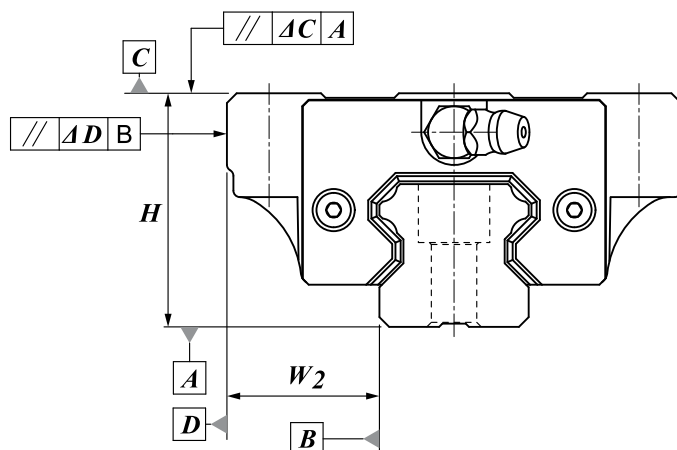
Zastosowanie	N	H	P	SP	UP	Zastosowanie	N	H	P	SP	UP
Centra obróbcze			•	•		Roboty przemysłowe	•	•	•		
Tokarki			•	•		Roboty skanujące	•	•			
Frezarki			•	•		Spawarki drutów			•	•	
Wiertarki			•	•		Główce testujące				•	•
Wytaczarki				•	•	Automaty osadzające elementy		•	•		
Szlifierki				•	•	Wiertarki płytek drukowanych		•	•	•	
Maszyny erozyjne			•	•	•	Wtryskarki	•	•			
Wytłaczarki		•	•	•		Maszyny pomiarowe 3D				•	•
Wypalanki laserowe		•	•			Maszyny biurowe	•	•			
Maszyny do drewna	•	•	•			Urządzenia transportowe	•	•			
Wiertarki NC		•	•			Stoły XY		•	•	•	
Gwintownice		•	•			Plotery	•	•			
Zmieniarki palet	•					Maszyny spawalnicze	•	•			
Zmieniarki narzędzi	•					Urządzenia medyczne	•	•			
Elektrodrążarki drutowe			•	•		Automaty cyfrowe		•	•	•	
Urządzenia justowania				•	•	Urządzenia testujące			•	•	•

Klasy dokładności wykonania poszczególnych serii

Dokładności dla serii MSA, MSB, MSR, SME i SMR

Model	Parametr tolerancji	Normalna <i>N</i>	Wysoka <i>H</i>	Precyzyjna <i>P</i>	Super precyzyjna <i>SP</i>	Ultra precyzyjna <i>UP</i>
15 20	Tolerancja wysokości <i>H</i>	± 0,1	± 0,03	0 - 0,03	0 - 0,015	0 - 0,008
	Różnica wysokości ΔH	0,02	0,01	0,006	0,004	0,003
	Tolerancja wymiaru W_2	± 0,1	± 0,03	0 - 0,03	0 - 0,015	0 - 0,008
	Różnica wymiaru $W_2(\Delta W_2)$	0,02	0,01	0,006	0,004	0,003
	Równoległość powierzchni wózka <i>C</i> do płaszczyzny <i>A</i>	ΔC (Zobacz: kolejna tabela)				
	Równoległość powierzchni wózka <i>D</i> do płaszczyzny <i>B</i>	ΔD (Zobacz: kolejna tabela)				
25 30 35	Tolerancja wysokości <i>H</i>	± 0,1	± 0,04	0 - 0,04	0 - 0,02	0 - 0,01
	Różnica wysokości ΔH	0,02	0,015	0,007	0,005	0,003
	Tolerancja wymiaru W_2	± 0,1	± 0,04	0 - 0,04	0 - 0,02	0 - 0,01
	Różnica wymiaru $W_2(\Delta W_2)$	0,03	0,015	0,007	0,005	0,003
	Równoległość powierzchni wózka <i>C</i> do płaszczyzny <i>A</i>	ΔC (Zobacz: kolejna tabela)				
	Równoległość powierzchni wózka <i>D</i> do płaszczyzny <i>B</i>	ΔD (Zobacz: kolejna tabela)				
45 55	Tolerancja wysokości <i>H</i>	± 0,1	± 0,05	0 - 0,05	0 - 0,03	0 - 0,02
	Różnica wysokości ΔH	0,03	0,015	0,007	0,005	0,003
	Tolerancja wymiaru W_2	± 0,1	± 0,05	0 - 0,05	0 - 0,03	0 - 0,02
	Różnica wymiaru $W_2(\Delta W_2)$	0,03	0,02	0,01	0,007	0,005
	Równoległość powierzchni wózka <i>C</i> do płaszczyzny <i>A</i>	ΔC (Zobacz: kolejna tabela)				
	Równoległość powierzchni wózka <i>D</i> do płaszczyzny <i>B</i>	ΔD (Zobacz: kolejna tabela)				
65	Tolerancja wysokości <i>H</i>	± 0,1	± 0,07	0 - 0,07	0 - 0,05	0 - 0,03
	Różnica wysokości ΔH	0,03	0,02	0,01	0,007	0,005
	Tolerancja wymiaru W_2	± 0,1	± 0,07	0 - 0,07	0 - 0,05	0 - 0,03
	Różnica wymiaru $W_2(\Delta W_2)$	0,03	0,025	0,015	0,01	0,007
	Równoległość powierzchni wózka <i>C</i> do płaszczyzny <i>A</i>	ΔC (Zobacz: kolejna tabela)				
	Równoległość powierzchni wózka <i>D</i> do płaszczyzny <i>B</i>	ΔD (Zobacz: kolejna tabela)				

Seria MSR i SMR nie występuje w klasie dokładności *N*



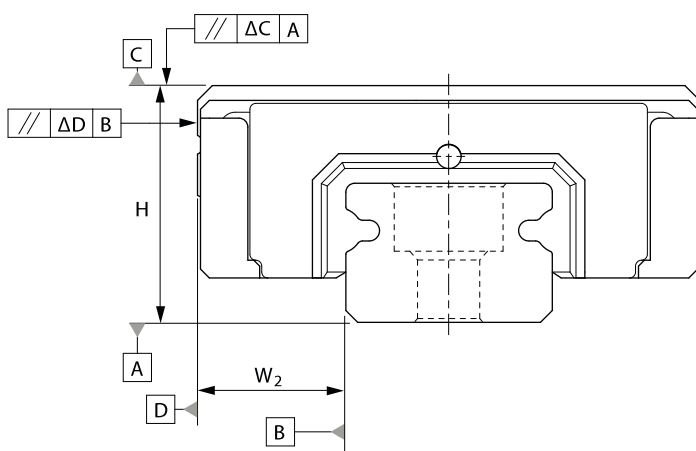
Tolerancja równoległości między wózkiem jezdny a szyną profilową

Długość szyny (mm)		Tolerancja równoległości (μm)				
od	do	N	H	P	SP	UP
0	315	9	6	3	2	1,5
315	400	11	8	4	2	1,5
400	500	13	9	5	2	1,5
500	630	16	11	6	2,5	1,5
630	800	18	12	7	3	2
800	1000	20	14	8	4	2
1000	1250	22	16	10	5	2,5
1250	1600	25	18	11	6	3
1600	2000	28	20	13	7	3,5
2000	2500	30	22	15	8	4
2500	3000	32	24	16	9	4,5
3000	3500	33	25	17	11	5
3500	4000	34	26	18	12	6

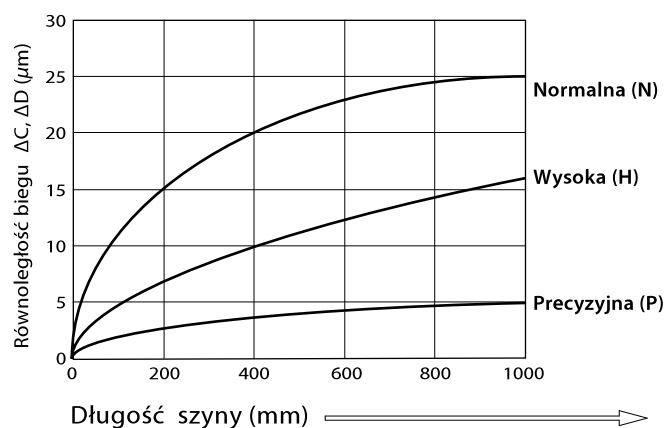
Dokładność

Dokładność serii MSC i MSD została podzielona na 3 klasy: normalną (N), wysoką (H) oraz precyzyjną (P), jak pokazano w Tabeli 1

Model	Parametr tolerancji	Klasa dokładności		
		Normalna N	Wysoka H	Precyzyjna P
MSC 7 MSC 9 MSC 12 MSC 15 MSD 7 MSD 9 MSD 12 MSD 15	Tolerancja wysokości H	0,04	0,02	0,01
	Różnica wysokości (ΔH)	0,03	0,015	0,007
	Tolerancja wymiaru W_2	0,04	0,025	0,015
	Różnica wymiaru W_2 (Δ W_2)	0,03	0,02	0,01
	Równoległość biegu powierzchni C względem powierzchni A	Δ C (zob. rys.2)		
	Równoległość biegu powierzchni D względem powierzchni B	Δ D (zob. rys.2)		



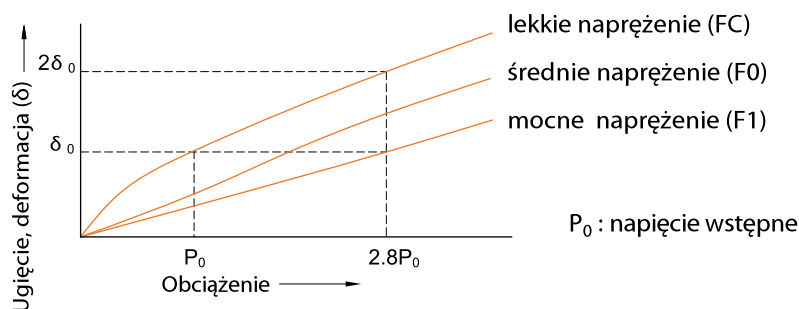
rys.2 Równoległość biegu wózka



Długość szyny (mm)		Tolerancja równoległości (μm)			Długość szyny (mm)		Tolerancja równoległości (μm)		
od	do	N	H	P	od	do	N	H	P
0	40	8	4	1	520	550	22	12	4
40	70	10	4	1	550	580	22	13	4
70	100	11	4	2	580	610	22	13	4
100	130	12	5	2	610	640	22	13	4
130	160	13	6	2	640	670	23	13	4
160	190	14	7	23	670	700	23	13	5
190	220	15	7	3	700	730	23	14	5
220	250	16	8	3	730	760	23	14	5
250	280	17	8	3	760	790	23	14	5
280	310	17	9	3	790	820	23	14	5
310	340	18	9	3	820	850	24	14	5
340	370	18	10	3	850	880	24	15	5
370	400	19	10	3	880	910	24	15	5
400	430	20	11	4	910	940	24	15	5
430	460	20	12	4	940	970	24	15	5
460	490	21	12	4	970	1000	25	16	5
490	520	21	12	4					

Napężenie wstępne

Sztywność prowadnicy liniowej można podnieść poprzez zwiększenie napięcia wstępnego. Jak widać na wykresie, obciążenie robocze może być podniesione do 2,8 razy stosowanego napięcia wstępnego. Przy obciążeniu $2,8P_0$ ugięcie wynosi połowę wartości występującej przy lekkim naprężeniu. Naprężenie wstępne wynika z zastosowania ponadwymiarowych elementów tocznych (kulek, rolek).



Wybór napięcia wstępnego zależy od zastosowania i warunków pracy, co pokazuje poniższa tabela.

Napięcie wstępne	Warunki pracy	Główne zastosowania
Napięcie lekkie (FC)	- ustalony kierunek obciążenia, ewentualne lekkie wibracje i uderzenia, dwie osie równoległe, - nie jest wymagana wysoka precyzja, natomiast wymagane niskie opory ruchu	Maszyny spawające, maszyny intrologatorskie, automatyczne maszyny pakujące, osie XY maszyn przemysłowych, aparaty spawalnicze, maszyny tnące, zmieniaarki narzędzi, podajniki
Napięcie średnie (F0)	- przeciążenia i duże momenty - układy jednoszynowe - duża dokładność przy nie-wielkich obciążeniach	Osie przesuwania stołów szlifierskich, automatyczne maszyny lakiernicze, roboty przemysłowe, szybkie podajniki materiału, wiertarki NC, osie Z maszyn przemysłowych, wiertarki płytek drukowanych, automaty erozyjne, aparaty pomiarowe, stoły precyzyjne XY
Napięcie mocne (F1)	- urządzenie narażone na duże wibracje i uderzenia, - wymagana duża sztywność	Obrabiarki z dużą siłą skrawającą Centra obróbcze, obrabiarki NC, osie przesuwu kół szlifierskich, stojak prowadzący głowicy narzędziowej frezarek, osie Z maszyn obróbczych
Napięcie ultra mocne (F2)	- urządzenie narażone na duże wibracje i uderzenia, - wymagana duża sztywność	Obrabiarki z dużą siłą skrawającą Centra obróbcze, obrabiarki NC, osie przesuwu kół szlifierskich, stojak prowadzący głowicy narzędziowej frezarek, osie Z maszyn obróbczych

Napięcia wstępne przewidziane dla poszczególnych serii przedstawia tabela. Napięcie wstępne wyrażone jest w procentach nośności dynamicznej (C) poszczególnych serii (patrz: tabele wymiarów).

Napięcie	Seria	MSA	MSB	MSR	SME	SMR
Napięcie lekkie (FC)	0,02 C	●	●		●	●
Napięcie średnie (F0)	0,05 C	●	●	●	●	●
Napięcie mocne (F1)	0,08 C	●	●	●	●	●
Napięcie ultra mocne (F2)	0,13 C			●		●