

Materiały szkoleniowe

DRGANIA MECHANICZNE
ZAGROŻENIA I PROFILAKTYKA

Serwis internetowy BEZPIECZNIEJ

CIOP-PIB

1. Wprowadzenie

Drganiami nazywane są procesy, w których charakterystyczne dla nich wielkości fizyczne są zmienne w czasie. Węższym pojęciem są **drgania mechaniczne**, definiowane jako ruch cząstek ośrodka sprężystego względem położenia równowagi. Drgania mechaniczne mogą rozprzestrzeniać się w ośrodkach zarówno płynnych, jak i stałych. Jednak w aspekcie ochrony i bezpieczeństwa człowieka w środowisku pracy, rozpatrywane są **jedynie** drgania mechaniczne (wibracje), które rozprzestrzeniają się w ośrodkach stałych.

Drgania mechaniczne są niejednokrotnie czynnikiem celowo generowanym, niezbędnym do realizacji określonych procesów technologicznych. Często jednak stanowią tzw. czynnik resztkowy, są zjawiskiem ubocznym, które w sposób niezamierzony towarzyszy eksploatacji maszyn i urządzeń. W obu przypadkach drgania mechaniczne, generowane przez różnego rodzaju źródła, mogą powodować uszkodzenia konstrukcji mechanicznych i zakłócać prawidłową ich pracę a także przyspieszać zużycie elementów. Prawie zawsze drgania są również bezpośrednią przyczyną hałasu. Przy bezpośrednim kontakcie człowieka z drgającym źródłem, drgania są przekazywane do jego organizmu, i zależnie m.in. od ich amplitudy oraz czasu narażenia na ich działanie, mogą stanowić zagrożenie dla zdrowia, a nawet życia. Niekorzystny wpływ drgań mechanicznych na organizm człowieka jest od kilkudziesięciu lat przedmiotem systematycznych obserwacji i badań.

Drgania własne - drgania, których charakter zależy tylko od właściwości fizycznych układu drgającego (bezwładności, tłumienia i sprężystości), a nie od sposobu wymuszenia drgań.

Drgania wymuszone - drgania układu drgającego wywołane zewnętrznym źródłem energii, mające taki sam charakter, jak siły wymuszające.

Rezonans drgań - zjawisko zachodzące w układach fizycznych, polegające na gwałtownym wzroście amplitudy drgań danego układu pod wpływem wymuszającej siły zewnętrznej o częstotliwości wymuszenia równej lub bliskiej częstotliwości drgań własnych układu bez dostarczania dodatkowej energii

Ryzyko zawodowe - prawdopodobieństwo wystąpienia niepożądanych zdarzeń związanych z wykonywaną pracą, powodujących straty, w szczególności wystąpienia u pracowników niekorzystnych skutków zdrowotnych w wyniku zagrożeń zawodowych występujących w środowisku pracy lub sposobu wykonywania pracy.

Źródło drgań mechanicznych - układ fizyczny wytwarzający drgania mechaniczne, które są przekazywane do innych układów fizycznych, w tym także do organizmu człowieka.

2. Wielkości charakteryzujące drgania mechaniczne na stanowiskach pracy

Podstawowymi parametrami charakteryzującymi drgania są:

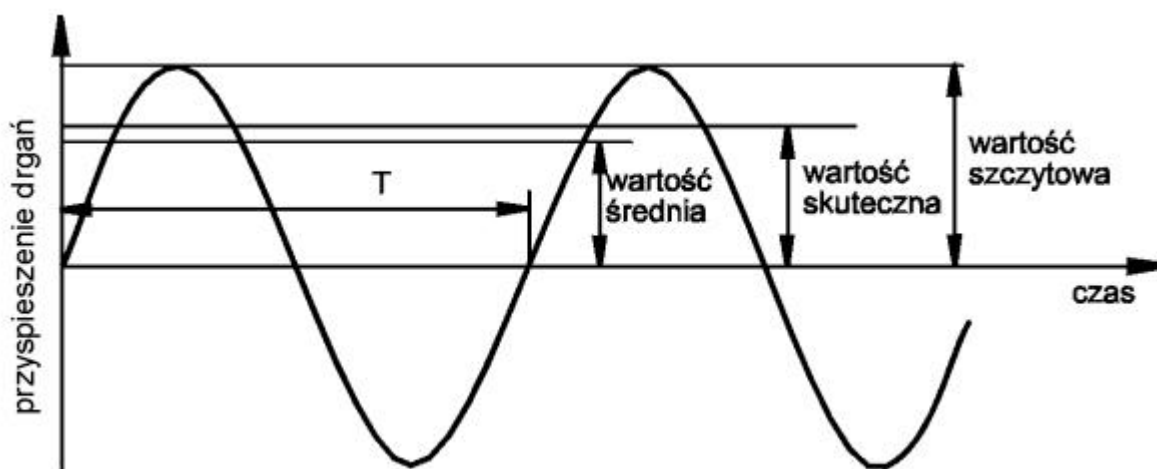
- **amplituda**
- **częstotliwość**

Amplituda drgań mechanicznych może być opisana przez jedną z następujących wielkości:

- przemieszczenie (wychylenie)
- prędkość
- przyspieszenie.

Przy ocenie wpływu drgań mechanicznych na organizm człowieka na stanowisku pracy wykorzystywaną zazwyczaj miarą amplitudy jest przyspieszenie drgań. Wielkość ta charakteryzuje stronę energetyczną ruchu drgającego; do tego parametru odnosi się większość obowiązujących obecnie norm krajowych, europejskich i międzynarodowych, podających metody pomiaru drgań na stanowiskach pracy, a także przepisów ustalających wartości kryterialne (dopuszczalne) dla drgań mechanicznych ze względu na ochronę zdrowia pracowników.

Przebieg sygnału drganiowego w czasie może mieć różny charakter. Gdy ruch drgający odbywa się z jedną częstotliwością (drgania sinusoidalne) ma wtedy jedną składową drgań. Najczęściej sygnał drganiowy złożony jest z wielu składowych drgań o różnych częstotliwościach przebiegających jednocześnie. Przebieg drgań o jednej składowej (sinusoidalnych) przedstawia rys. 1.



Rys. 1. Sygnał drganiowy w funkcji czasu

Spośród parametrów charakteryzujących przyspieszenie drgań występujących na stanowisku pracy wykorzystywana jest **wartość skuteczna przyspieszenia drgań** a_{RMS} , w m/s^2 , która uwzględnia zarówno historię czasową przebiegu drgań, jak i informacje o wielkości amplitudy.

Do analizy drgań złożonych stosowany jest także ich opis w funkcji częstotliwości. Rozkładanie drgań złożonych na drgania składowe o poszczególnych częstotliwościach nazywane jest analizą widmową. Analiza widmowa prowadzi do określenia widma drgań, definiowanego jako zbiór wartości wielkości zmiennej (np. przyspieszenia) odpowiadających poszczególnym częstotliwościom.

Reakcja organizmu człowieka na działanie drgań mechanicznych zależy od wielu czynników, w tym również od częstotliwości, a więc od widma drgań występujących na danym stanowisku pracy. Zróżnicowaną reakcję organizmu na drgania, w zależności od ich częstotliwości uwzględnia się przez wprowadzenie charakterystyk korekcyjnych. Po ich zastosowaniu uzyskiwane są: **skorygowane w dziedzinie częstotliwości wartości skuteczne przyspieszenia drgań (skorygowane wartości przyspieszenia drgań)** $a_{w,RMS}$, w m/s^2 . Podczas pomiarów przyspieszenia drgań korekcja częstotliwościowa realizowana jest przez filtry o odpowiednich charakterystykach; przepuszczają one w całości te składowe drgania, na które organizm człowieka jest najbardziej wrażliwy, natomiast tłumią składowe o częstotliwościach uznawanych za mniej szkodliwe. Wartości skorygowane przyspieszenia drgań zmierzone na stanowisku pracy z zastosowaniem odpowiednich filtrów korekcyjnych, stanowią podstawę do wyznaczenia wielkości, służących do oceny narażenia pracownika na drgania.

3. Podział drgań mechanicznych

Drgania mechaniczne można podzielić w różnoraki sposób, w zależności od przyjętych kryteriów. Przy ocenie wpływu drgań na organizm człowieka istotne są cztery klasyfikacje, w których za kryteria podziału przyjmuje się:

- charakter zmienności drgań w funkcji czasu
- charakter narażenia na drgania
- rodzaj oddziaływania drgań, zależny od miejsca ich wnikania do organizmu człowieka

Ze względu na różny charakter zmienności sygnału drganiowego w czasie, drgania można podzielić na:

- ustalone
- nieustalone.

Drgania ustalone są to drgania, których skorygowane wartości skuteczne przyspieszenia (lub wartości skuteczne przyspieszenia w tercjowych pasmach częstotliwości) zmieniają się nie więcej niż 2 razy w stosunku do najmniejszej zmierzonej wartości.

Drgania nieustalone są to drgania, których skorygowane wartości skuteczne przyspieszenia (lub wartości skuteczne przyspieszenia w tercjowych pasmach częstotliwości) zmieniają się więcej niż 2 razy w stosunku do najmniejszej zmierzonej wartości.

W klasyfikacji drgań istotny jest również podział ze względu na charakter narażenia, jakie wywołują. Uwzględniając to kryterium drgania można podzielić na:

- ciągłe (narażenie ciągłe)
- przerywane (narażenie przerywane)
- sporadyczne (narażenie sporadyczne).

Drgania ciągłe są to drgania występujące bez przerw w trakcie całej zmiany roboczej, z pominięciem: regularnych przerw w pracy, przerw na posiłki, czynności przed podjęciem pracy i po jej zakończeniu.

Drgania przerywane są to drgania występujące wielokrotnie w ciągu zmiany roboczej, z przerwami, które mogą być spowodowane przemieszczaniem się osób narażonych, cyklicznością technologii, wyłączaniem źródeł itp.

Drgania sporadyczne są to drgania występujące nieregularnie, związane z czynnościami wykonywanymi dorywczo, np. raz w ciągu zmiany roboczej, raz w tygodniu itp.

Podział drgań ze względu na sposób ich oddziaływania drgań na organizm człowieka, jest jedną z najważniejszych klasyfikacji drgań w środowisku pracy. Rozróżniane są drgania:

- o ogólnym działaniu na organizm człowieka, przenikające do organizmu przez stopy, miednicę, plecy lub boki (drgania ogólne)
- działające na organizm człowieka przez kończyny górne (drgania miejscowe).

4. Skutki działania drgań mechanicznych na organizm człowieka

Skutki biologiczne

Drgania mechaniczne przenoszone z układów drgających do organizmu człowieka mogą negatywnie oddziaływać bezpośrednio na poszczególne tkanki i naczynia krwionośne bądź też spowodować wzbudzenie drgań całego ciała lub jego części, a nawet struktur komórkowych. Długotrwałe narażenie człowieka na drgania może wywołać zaburzenia w organizmie, doprowadzając w konsekwencji do trwałych, nieodwracalnych zmian chorobowych, przy czym rodzaj tych zmian zależy od rodzaju drgań, na które jest ekspozycja człowiek (ogólne czy miejscowe) [3, 5, 6, 7, 8, 14].

Drgania działające na organizm człowieka przez kończyny górne

Narażenie na drgania mechaniczne przenoszone do organizmu przez kończyny górne powoduje głównie zmiany chorobowe w układach:

- krążenia krwi (naczyniowym)
- nerwowym
- kostno-stawowym.

Wyniki badań epidemiologicznych wskazują na silny wpływ narażenia na drgania mechaniczne na powstawanie zmian chorobowych w wymienionych układach. Zespół tych zmian, zwany zespołem wibracyjnym (*Hand-arm vibration syndrome - HAVS*), został uznany w wielu krajach, w tym również w Polsce, za chorobę zawodową.

Według danych statystycznych zespół wibracyjny stanowi w Polsce ok. 3 % wszystkich rejestrowanych chorób zawodowych i znajduje się na 7. pozycji na liście tych chorób, po przewlekłych chorobach narządu głosu, zawodowym uszkodzeniu słuchu, pylicach płuc, chorobach zakaźnych i inwazyjnych, chorobach skóry oraz przewlekłych chorobach oskrzeli.

Do niedawna najczęściej rejestrowano postać naczyniową, charakteryzującą się napadowymi zaburzeniami krążenia krwi w palcach rąk. Występujące wówczas napadowe skurcze naczyń krwionośnych objawiają się blednięciem opuszki jednego lub kilku palców. Stąd pochodzi jedno z potocznych określeń tej postaci zespołu wibracyjnego - „choroba białych palców”. W ostatnich latach coraz częściej rozpoznawane są zmiany w układzie kostno-stawowym ręki powstające głównie na skutek działania drgań miejscowych o częstotliwościach mniejszych od 30 Hz. Obserwuje się m.in. zniekształcenia szpar stawowych, zwapnienia torebek stawowych, zmiany okostnej, zmiany w utkaniu kostnym. Mogą występować też postaci mieszane zespołu wibracyjnego [6, 7, 8, 9].

Zmiany w układzie nerwowym powstałe na skutek działania drgań miejscowych to głównie zaburzenia czucia: dotyku, wibracji, temperatury, a także dolegliwości w postaci drętwienia czy mrowienia palców i rąk. Jeżeli narażenie na drgania jest kontynuowane, zmiany pogłębiają się, prowadząc do ograniczenia zdolności do pracy i wykonywania innych czynności życiowych.

Na drgania mechaniczne oddziałujące na organizm człowieka przez kończyny górne narażeni są głównie operatorzy wszelkiego rodzaju ręcznych narzędzi wibracyjnych stosowanych powszechnie w przemyśle maszynowym, hutniczym, stoczniowym, przetwórczym, a także w leśnictwie, rolnictwie, kamieniarstwie, górnictwie i budownictwie. Zatem obszar potencjalnego zagrożenia pracowników tym rodzajem drgań jest bardzo rozległy.

Drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka

Negatywne skutki zawodowej ekspozycji na drgania o oddziaływaniu ogólnym dotyczą zwłaszcza:

- układu kostnego
- narządów wewnętrznych.

W układzie kostnym zmiany chorobowe powstają głównie w odcinku lędźwiowym kręgosłupa, rzadziej w odcinku szyjnym. Zespół bólowy kręgosłupa, będący następstwem zmian chorobowych i występujący u osób narażonych zawodowo na drgania ogólne, został uznany w niektórych krajach (np. w Belgii i w Niemczech) za chorobę zawodową, podobnie jak zespół wibracyjny będący następstwem działania drgań miejscowych.

Niekorzystne zmiany w narządach wewnętrznych, pojawiające się na skutek działania drgań ogólnych, są głównie wynikiem pobudzenia poszczególnych narządów do drgań rezonansowych (częstotliwości drgań własnych większości narządów zawierają się w zakresie 2 - 18 Hz). Oznacza to, że drgania ogólne o częstotliwościach z tego zakresu i wartościach przyspieszeń przekraczających określoną wartość progową mogą wywołać drgania narządów o niebezpiecznej amplitudzie, co z kolei może doprowadzić do pojawienia się zaburzeń w ich czynnościach, krwotoków wewnętrznych, wybroczyn, a nawet - w skrajnych przypadkach - do mechanicznego rozerwania narządów.

Najlepiej udokumentowane są niekorzystne zmiany w czynnościach narządów układu pokarmowego, w tym głównie żołądka i przełyku. Badania dużych grup narażonych zawodowo na drgania ogólne wskazują jednak, że zaburzenia występują również m.in. w narządzie przedsiolkowo-ślimakowym, narządach układu rozrodczego kobiet, narządach klatki piersiowej, narządach jamy nosowo-gardłowej.

Drgania o działaniu ogólnym mogą wywoływać, oprócz uszkodzeń narządów wewnętrznych, wiele innych zaburzeń i schorzeń w organizmie, takich jak zaburzenia narządu równowagi, zaburzenia czynności mięśni i ścięgien, uszkodzenia stawów, pogarszanie się ostrości wzroku, zaburzenia w układzie krwionośnym.

Podobnie jak w przypadku drgań miejscowych, ryzyko wystąpienia zaburzeń w organizmie człowieka na skutek oddziaływania drgań ogólnych jest tym większe, im dłuższy jest czas ekspozycji na drgania i im większa jest ich amplituda.

Na drgania mechaniczne o działaniu ogólnym na organizm są narażeni przede wszystkim kierowcy, motorniczowie, maszyniści, operatorzy maszyn budowlanych i drogowych. W tych przypadkach drgania przenoszone są do organizmu z siedzisk pojazdów przez miednicę, plecy i boki. Zawodowa ekspozycja na drgania ogólne często związana jest też z obsługą przez pracowników maszyn i urządzeń stacjonarnych. W takich przypadkach drgania z obsługiwanych maszyn transmitowane są do organizmu pracownika (przez miednicę, plecy i boki gdy pracuje w pozycji siedzącej lub przez stopy gdy pracuje na stojąco) przez podłoże. Z drgającego podłoża, na którym usytuowane jest stanowisko pracy, drgania przenikają do organizmu pracownika przez jego stopy, a skutki działania tych drgań są podobne jak drgań transmitowanych z siedzisk.

Skutki funkcjonalne

Skutkiem biologicznym oddziaływania drgań miejscowych i ogólnych na organizm człowieka towarzyszą zazwyczaj tzw. skutki funkcjonalne [3, 8]. Zalicza się do nich m.in.:

- wydłużenie czasu reakcji ruchowej
- wydłużenie czasu reakcji wzrokowej
- zakłócenia w koordynacji ruchów
- nadmierne zmęczenie
- bezsenność
- rozdrażnienie
- osłabienie pamięci.

Niekorzystne zmiany funkcjonalne prowadzą do obniżenia efektywności i jakości wykonywanej pracy, a czasami w ogóle ją uniemożliwiają.

Ze względu na powszechne występowanie drgań mechanicznych w środowisku pracy oraz negatywne skutki ich oddziaływania na organizm człowieka, konieczna jest kontrola tego czynnika na stanowiskach pracy zarówno w celu oceny narażenia zawodowego i ryzyka utraty zdrowia jak i ukierunkowania działań ograniczających występujące ryzyko.

5. Źródła drgań mechanicznych w środowisku pracy

Uwzględniając podział drgań ze względu na rodzaj ich oddziaływania na organizm człowieka, czyli podział na drgania ogólne i miejscowe, źródła drgań można również podzielić w podobny sposób.

Źródłami drgań o działaniu ogólnym są np.:

- podłogi, podesty, pomosty w halach produkcyjnych i innych pomieszczeniach, na których zlokalizowane są stanowiska pracy. Wymienione źródła drgań związane są bezpośrednio z eksploatacją w pomieszczeniach lub poza nimi maszyn oraz urządzeń: stacjonarnych, przenośnych lub przewoźnych, które wprawiają w drgania podłoże, na którym przebywa operator. Przyczyną drgań podłoża może też być ruch uliczny czy kolejowy
- platformy
- siedziska i podłogi środków transportu (samochodów, ciągników, autobusów, tramwajów, trolejbusów oraz pojazdów kolejowych, statków, samolotów itp.)
- siedziska i podłogi maszyn budowlanych (np. do robót ziemnych, fundamentowania, zagęszczania gruntów).

Źródłami drgań działających na organizm człowieka przez kończyny górne są głównie:

- ręczne narzędzia uderzeniowe o napędzie pneumatycznym, hydraulicznym, spalinowym lub elektrycznym (młotki pneumatyczne, ubijaki mas formierskich i betonu, nitowniki, wiertarki udarowe, klucze udarowe itp.)
- ręczne narzędzia obrotowe o napędzie elektrycznym, pneumatycznym lub spalinowym (wiertarki, szlifierki, piły łańcuchowe itp.)
- dźwignie sterujące maszyn i pojazdów, obsługiwane ręcznie
- źródła technologiczne (np. obrabiane elementy trzymane w dłoniach lub prowadzone ręką przy procesach szlifowania, gładzenia, polerowania itp.).

Niektóre narzędzia ręczne, zaliczane do typowych źródeł drgań miejscowych (np. młoty, pilarki), mogą generować drgania o bardzo dużej amplitudzie. Wówczas drgania te mogą być przenoszone przez barki na tułów i głowę, co w konsekwencji może doprowadzić do wzbudzenia drgań rezonansowych narządów wewnętrznych. W takim przypadku narzędzia ręczne są również źródłami drgań o działaniu ogólnym [8].

Przedstawiony podział źródeł drgań nie wyklucza oczywiście innych podziałów, np. podziału ze względu na przyczyny powstawania drgań [3, 8], jest jednakże użyteczny przy ocenie narażenia pracowników.

6. Pomiary drgań mechanicznych i ocena narażenia - wartości dopuszczalne

Ogólne zasady wykonywania pomiarów drgań mechanicznych w środowisku pracy określa *rozporządzenie Ministra Zdrowia w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy* [17]. Szczegółowy opis metod pomiaru i oceny drgań mechanicznych zawierają następujące normy:

- PN-EN ISO 5349 *Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 1: Wymagania ogólne.*, Część 2: *Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy.* [22, 23],
- PN-EN 14253+A1 *Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia. Wytyczne praktyczne.* [24].

Wielkością mierzoną na stanowisku pracy jest **skorygowane przyspieszenie drgań**. Zarówno dla drgań ogólnych jak i miejscowych pomiaru wartości skorygowanej przyspieszenia wykonuje się w trzech prostopadłych do siebie kierunkach: x, y, z prawoskrętnego, prostokątnego układu współrzędnych.

Pomiary przeprowadza się w typowych warunkach występujących na danym stanowisku pracy, przy wykonywaniu przez pracownika typowych czynności, podczas normalnej eksploatacji pojazdu, narzędzia, maszyny lub urządzenia.

Zmierzone na stanowisku pracy **skorygowane skuteczne przyspieszenie drgań**, charakteryzujące drgania w poszczególnych kierunkach x, y i z, wraz z **czasem** ich działania jest podstawą do wyznaczenia wielkości służących do oceny narażenia na drgania:

- **dziennej ekspozycji** (odniesionej do 8 godzin),
- **ekspozycji krótkotrwałej** (trwającej 30 min lub krócej).

Określenie **dziennej ekspozycji** pozwala na uwzględnienie narażenia pracownika na drgania pochodzące z różnych źródeł (np. podczas obsługi kolejno kilku narzędzi, które wytwarzają drgania o różnych amplitudach i częstotliwościach) w ciągu całego dnia pracy. Poprzez dawki drgań (wyznaczane podczas obliczeń wartości dziennej ekspozycji jako wielkość pomocnicza) określane dla wszystkich zidentyfikowanych czynności wykonywanych przez pracownika w narażeniu na drgania bierze się pod uwagę nie tylko amplitudę drgań ale i czasy trwania poszczególnych ocenianych czynności. Zależność opisująca dawkę drgań: a^2t związana jest z reakcją organizmu człowieka na docierającą do niego energię w postaci drgań. Jak można zauważyć nie jest to zależność liniowa, co oznacza, że zwiększenie amplitudy drgań wywołuje

negatywne skutki w organizmie w znacznie większym stopniu, niż wynikałoby to ze wzrostu wartości przyspieszenia drgań.

Wyznaczanie **ekspozycji krótkotrwałej** ma na celu zidentyfikowanie sytuacji, w których na pracownika działają drgania o bardzo dużych amplitudach, lecz przez stosunkowo krótki czas (30 min lub krócej). Wyznaczenie dziennej ekspozycji w takich przypadkach mogłoby doprowadzić do błędnej oceny narażenia – energia drgań działających tak krótko po przeliczeniu jej na wartość równoważną za 8 godzin osiągnęłaby wartość, z której mogłoby wynikać, że zagrożenia nie ma lub jest niewspółmiernie małe. Bardzo duża amplituda drgań działających nawet bardzo krótko może wywołać bardzo niebezpieczne skutki w organizmie pracownika.

W zależności od rodzaju drgań - ogólne czy działające przez kończyny górne - **różny** jest sposób wyznaczania **dziennej ekspozycji i ekspozycji krótkotrwałej**.

Drgania działające przez kończyny górne mierzone są rękojęściach i uchwytach narzędzi, dźwigniach i elementach sterujących itp. Sposób oceny narażenia na nie jest następujący:

Na podstawie zmierzonych trzech składowych drgań: $a_{hwx,i}$; $a_{hwy,i}$; $a_{hwz,i}$ dla każdej wyodrębnionej czynności jaką wykonuje pracownik podczas dnia pracy, obliczana jest wartość sumy wektorowej skorygowanych skutecznych przyspieszeń drgań $a_{hv,i}$ wg wzoru (5) :

$$a_{hv,i} = \sqrt{a_{hwx,i}^2 + a_{hwy,i}^2 + a_{hwz,i}^2} \quad (5)$$

gdzie: $a_{hwx,i}$; $a_{hwy,i}$; $a_{hwz,i}$ - skorygowane skuteczne wartości przyspieszenia drgań, zmierzone dla kierunku x , y i z na stanowisku pracy przy wykonywaniu i -tej czynności w narażeniu na drgania, w m/s^2 .

i - numer kolejnej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania

Określa się także całkowity czas narażenia pracownika na drgania w ciągu doby, t (w min) będący sumą czasów trwania t_i (w min) poszczególnych i -tych czynności, ze wzoru (6):

$$t = \sum_{i=1}^n t_i \quad (6)$$

gdzie: n - liczba czynności wykonywanych w narażeniu na drgania na kontrolowanym stanowisku pracy.

W zależności od długości wyznaczonego całkowitego czasu narażenia pracownika na drgania w ciągu doby t_e , przeprowadzane są odpowiednie obliczenia:

- gdy określony czas całkowity t jest równy lub krótszy niż 30 min ($t \leq 30$ min), dla kontrolowanego stanowiska pracy, spośród n wyznaczonych sum wektorowych wybierana jest maksymalna wartość sumy wektorowej skorygowanych, skutecznych przyspieszeń drgań $a_{hv,max}$ - **ekspozycja krótkotrwała**, w m/s^2 , wg wzoru (7):

$$a_{hv,max} = \max \{ a_{hv_1}, a_{hv_2}, \dots, a_{hv_n} \} \quad (7)$$

gdzie: a_{hv_i} - jak we wzorze (1),

n - jak we wzorze (2).

- jeżeli określony czas całkowity t jest dłuższy niż 30 min ($t > 30$ min) wyznaczana jest **dzienna (8-godzinna) ekspozycja na drgania, $A(8)$** w m/s^2 , wg wzoru (8):

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{hv_i}^2 \cdot t_i} \quad (8)$$

gdzie: a_{hv_i} - suma wektorowa skutecznych, ważonych przyspieszeń drgań,

wyznaczona dla i -tej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania ze wzoru 1, w m/s^2 ,

i - numer kolejnej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania,

t_i - czas trwania i -tej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania, w minutach,

n - liczba czynności wykonywanych w narażeniu na drgania na kontrolowanym stanowisku pracy,

T - 480 min (8 godzin).

- gdy określony czas całkowity t jest dłuższy niż 30 min lecz jedna lub więcej czynności trwało krócej (lub równo) niż 30 min ($t > 30$ min ale $t_i \leq 30$ min), wyznaczana jest dzienna ekspozycja na drgania $A(8)$ wg wzoru (4) oraz dodatkowo, spośród sum wektorowych wyznaczonych dla czynności o czasie trwania krótszym lub równym 30 min ($t_i \leq 30$ min), wybierana jest suma wektorowa o największej wartości $a_{hv,max}$ - ekspozycja krótkotrwała, wg wzoru (7).

Drgania działające w sposób ogólny mierzone są na siedziiskach pojazdów, platformach, podłogach itp. Sposób ich oceny znacznie różni się od stosowanego do

oceny drgań działających przez kończyny górne. Zamiast obliczanej wartości sumy wektorowej (wyznaczanej na podstawie trzech składowych kierunkowych skorygowanych przyspieszeń drgań) wyznacza się tzw. *dominujące skorygowane przyspieszenie drgań* – największą wartość skorygowanego przyspieszenia drgań wybieraną spośród trzech składowych kierunkowych przyspieszeń, a więc w rzeczywistości jedną składową kierunkową. Na jej podstawie, w zależności od długości wyznaczonego całkowitego czasu narażenia pracownika na drgania w ciągu doby t , przeprowadzane są następujące obliczenia:

- gdy określony czas całkowity t jest równy lub krótszy niż 30 min ($t \leq 30$ min), dla kontrolowanego stanowiska pracy wybierana jest wartość dominująca $a_{w,max}$, spośród n wyznaczonych skutecznych, skorygowanych przyspieszeń drgań a_{w,l_i} , z uwzględnieniem właściwych współczynników $(1,4a_{w,x}, 1,4a_{w,y}, a_{w,z})$ w m/s^2 , wg wzoru (9). Współczynniki o wartościach 1,4 dla kierunku x i y oraz 1,0 dla kierunku z odzwierciedlają zróżnicowaną reakcję organizmu człowieka na drgania poziome i pionowe.

$$a_{w,max} = \max \{ a_{w,l_1}, a_{w,l_2}, \dots, a_{w,l_n} \} \quad (9)$$

gdzie: a_{w,l_i} - skorygowane skuteczne wartości przyspieszenia drgań, zmierzone dla kierunku l ($l = x$ lub $l = y$ lub $l = z$) na stanowisku pracy przy wykonywaniu i -tej czynności w narażeniu na drgania, w m/s^2 ,
 n - jak we wzorze (2).

- jeśli określony czas całkowity t jest dłuższy niż 30 min ($t > 30$ min) wyznaczana jest dla każdego kierunku l ($l = x$ lub $l = y$ lub $l = z$) oddzielnie 8-godzinna ekspozycja, $A(8)_l$ w m/s^2 , wg wzoru (10):

$$A(8)_l = k_l \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{i=1}^n a_{w,l_i}^2 \cdot t_i} \quad (10)$$

gdzie: a_{w,l_i} - jak we wzorze (9),

$l = x$ lub $l = y$ lub $l = z$

k_l - współczynnik kierunkowy ($k_x = k_y = 1,4$; $k_z = 1$)

t_i - czas trwania i -tej czynności wykonywanej w narażeniu na drgania, w minutach,

n - liczba czynności wykonywanych w narażeniu na drgania na kontrolowanym stanowisku pracy,

T - 480 min (8 godzin).

- gdy określony czas całkowity t jest dłuższy niż 30 min lecz jedna lub więcej czynności trwało krócej (lub równo) niż 30 min ($t > 30$ min ale $t_i \leq 30$ min), wyznaczana jest 8-godzinna ekspozycja, $A(8)_i$ w m/s^2 , wg wzoru (10) oraz dodatkowo, spośród n wyznaczonych skorygowanych skutecznych przyspieszeń drgań, a_{w_i} dla czynności trwających krócej lub równo 30 min ($t_i \leq 30$ min), wybierana jest wartość dominującą $a_{w,max}$ wg wzoru (9).

Ocena narażenia pracownika (z uwzględnieniem jego ewentualnej przynależności do takich grup jak młodociani czy kobiety w ciąży) na drgania mechaniczne polega na porównaniu wartości wyznaczonych wielkości charakteryzujących drgania z określonymi w przepisach ich wartościami dopuszczalnymi [11, 13, 15].

Wartości dopuszczalne (NDN)

Obowiązujące obecnie wartości dla *dziennej ekspozycji* i *ekspozycji krótkotrwałej* określone jako dopuszczalne ze względu na ochronę zdrowia pracowników podane są w *rozporządzeniu Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (NDN)* [18]. Zamieszczono je w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości dopuszczalne ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN) [18]

Rodzaj drgań	Wartości dopuszczalne dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN)	Wartości dopuszczalne krótkotrwałych ekspozycji na drgania mechaniczne (NDN)
Drgania działające przez kończyny górne (drgania miejscowe)	$A_{dop} = 2,8 m/s^2$	$a_{hv,30min,dop} = 11,2 m/s^2$
Drgania o działaniu ogólnym (drgania ogólne)	$A_{dop} = 0,8 m/s^2$	$a_{w,30min,dop} = 3,2 m/s^2$

Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne [19] wprowadza, za dyrektywą 2002/44/WE, dodatkowe kryterium oceny dziennej ekspozycji na drgania - **próg działania**. Wartości progów działania zawiera tabela 2.

Tabela 2. Wartości progów działania dla dziennej ekspozycji na drgania mechaniczne

Rodzaj drgań	Wartości progów działania dla drgań mechanicznych
Drgania działające przez kończyny górne (drgania miejscowe)	$A_{działanie} = 2,5 m/s^2$
Drgania o działaniu ogólnym (drgania ogólne)	$A_{działanie} = 0,5 m/s^2$

Po przekroczeniu podanych w rozporządzeniu wartości pracodawca zobowiązany jest do podjęcia działań zmniejszających ryzyko zawodowe (ze względu na drgania).

W *Rozporządzeniu Rady Ministrów w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac* [21] podano wartości dopuszczalne drgań mechanicznych dla tej grupy pracowników. Przedstawiono je w tabeli 3; zamieszczono w niej także wartości dopuszczalne drgań mechanicznych dla kobiet w ciąży z *rozporządzenia Rady Ministrów w sprawie wykazu prac szczególnie uciążliwych lub szkodliwych dla zdrowia kobiet* [20].

Tabela 3. Wartości dopuszczalne ekspozycji drgań mechanicznych (NDN) dla młodocianych i kobiet w ciąży [20,21]

Rodzaj drgań	Rodzaj ekspozycji	Wartości dopuszczalne (NDN) dla młodocianych	Wartości dopuszczalne (NDN) dla kobiet w ciąży
Drgania działające przez kończyny górne (drgania miejscowe)	dzienna ekspozycja	$A_{dop} = 1,0 m/s^2$	$A_{dop} = 1,0 m/s^2$
	ekspozycja krótkotrwała	$a_{hv,30 min,dop} = 4,0 m/s^2$	$a_{hv,30 min,dop} = 4,0 m/s^2$
Drgania o działaniu ogólnym (drgania ogólne)	dzienna ekspozycja	$A_{dop} = 0,19 m/s^2$	Praca wzbroniona
	ekspozycja krótkotrwała	$a_{w,30 min,dop} = 0,76 m/s^2$	

7. Ograniczanie narażenia na drgania

Ograniczanie narażenia na drgania związane jest z minimalizowaniem ilości energii wibroakustycznej docierającej ze źródła do organizmu człowieka. Podejmowane w tym zakresie działania opierają się na rozwiązaniach technicznych i organizacyjnych.

Rozwiązania techniczne to m.in. :

- minimalizowanie drgań u źródła ich powstawania (zmniejszanie wibroaktywności źródeł),
- minimalizowanie drgań na drodze ich propagacji,
- automatyzację procesów technologicznych i zdalne sterowanie źródłami drgań,
- dodatkowe układy redukcji drgań,
- aktywna i semi-aktywna redukcja drgań.

Zmniejszenie wibroaktywności źródeł można osiągnąć ingerując w ich konstrukcję (minimalizacja luzów, poprawa wyrównoważenia elementów wirujących, eliminacja wzajemnych uderzeń elementów współpracujących i ich właściwy montaż, właściwe mocowanie maszyn do podłoża - fundamentowanie itp.) [2, 3, 4, 8].

Tłumienie drgań na drodze ich propagacji uzyskuje się np. przez wprowadzenie dylatacji między fundamentami maszyn i urządzeń a otoczeniem, stosowanie materiałów wibroizolacyjnych w różnej postaci (maty, podkładki, specjalne wibroizolatory), a także przez stosowanie środków ochrony indywidualnej. W przypadku zmniejszania narażenia na drgania mechaniczne działające przez kończyny górne najczęściej stosowanym środkiem ochrony indywidualnej są rękawice antywibracyjne [10, 12, 26, 27, 28]. Skuteczność rękawic antywibracyjnych charakteryzują współczynniki przenoszenia drgań podawane przez producentów:

- \overline{TR}_M - wartość średnia skorygowanego współczynnika przenoszenia drgań przez rękawicę wyznaczona w zakresie częstotliwości $32 \div 200$ Hz,
- \overline{TR}_H - wartość średnia skorygowanego współczynnika przenoszenia drgań przez rękawicę wyznaczona w zakresie częstotliwości $200 \div 1250$ Hz.

Ponieważ te same rękawice mogą zupełnie inaczej spełniać swoją funkcję w zależności od charakteru widma drgań generowanych przez źródło, wywieranych przez pracownika sił zacisku i nacisku, warunków środowiskowych, sposobu pracy, konieczny jest ich właściwy dobór [26-28].

Do technicznych metod ograniczania zagrożenia powodowanego drganiami mechanicznymi zalicza się także automatyzację procesów technologicznych i zdalne

sterowanie źródłami drgań. Metody te pozwalają oddalić pracowników od obszarów zagrożonych drganiami mechanicznymi, zmniejszają zatem ryzyko utraty zdrowia na skutek działania drgań.

Poprzez przyłączanie do drgających obiektów dodatkowych układów mechanicznych takich jak np. dynamiczne eliminatory drgań, możliwe jest ograniczenie amplitudy ich drgań. Ponieważ eliminatory drgań wymagają dostrojenia ich do konkretnej częstotliwości (wąskiego zakresu częstotliwości), takie rozwiązania stosowane są dla maszyn i urządzeń stacjonarnych generujących drgania ustalone lub zbliżone do ustalonych.

Metody aktywnej redukcji drgań należą do najbardziej nowoczesnych i efektywnych sposobów ograniczania lub eliminowania drgań mechanicznych. Redukcję drgań tymi metodami uzyskuje się poprzez zastosowanie w miejscach zagrożonych drganiami dodatkowych układów mechanicznych. Aktywne sterowanie zapewnia dostosowywanie się ich na bieżąco do warunków (drgań wytwarzanych przez źródło) tak, aby efekt redukcji w każdej chwili był jak największy.

Metody organizacyjno-administracyjne ograniczania zagrożeń drganiami mechanicznymi to głównie:

- skracanie czasu narażenia na drgania w ciągu zmiany roboczej,
- wydzielanie specjalnych pomieszczeń do odpoczynku,
- przesuwanie do pracy na innych stanowiskach osób szczególnie wrażliwych na działanie drgań,
- szkolenia pracowników:
 - w celu uświadomienia im występujących zagrożeń powodowanych ekspozycją na drgania,
 - w zakresie bezpiecznej obsługi maszyn, narzędzi, pojazdów.

Metody organizacyjno-administracyjne powinny być stosowane zwłaszcza tam, gdzie brak jest możliwości ograniczenia zagrożeń metodami technicznymi [1, 29, 30].

W minimalizacji zagrożeń drganiami mechanicznymi niebagatelną rolę odgrywa także profilaktyka medyczna. Ma ona na celu przede wszystkim niedopuszczenie do zatrudniania osób szczególnie wrażliwych na działanie drgań mechanicznych na stanowiskach operatorów maszyn i narzędzi wytwarzających drgania o znacznych amplitudach. U osób ze schorzeniami stan czynnościowy organizmu pod wpływem drgań może znacznie się pogorszyć. Osoby pracujące w warunkach narażenia na drgania powinny być systematycznie poddawane badaniom okresowym. Zakres i

częstotliwość wstępnych, okresowych i kontrolnych badań lekarskich pracowników narażonych w miejscu pracy na działanie różnych czynników, w tym także drgań mechanicznych, określa rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w kodeksie pracy [16].

W praktyce, w walce z zagrożeniami powodowanymi drganiami mechanicznymi najlepsze rezultaty daje stosowanie kilku wymienionych metod jednocześnie.

8. Podsumowanie

Zawodowe narażenie na drgania mechaniczne jest problemem badanym zarówno przez służby techniczne, jak i medyczne. Źródła nadmiernych drgań mechanicznych i związane z nimi zagrożenie zdrowia, występują powszechnie w środowisku pracy. Wyniki badań wskazują, że pracownicy wykorzystujący zawodowo pojazdy jednośladowe mogą być także narażeni na drgania mechaniczne, przekraczające wartości dopuszczalne ustalone ze względu na ochronę zdrowia.

Według danych statystycznych, spośród ok. 6 mln, ok. 40 tys. osób pracuje w warunkach zagrożenia drganiami mechanicznymi, tj. w warunkach przekroczenia ustalonych dla drgań wartości najwyższych dopuszczalnych natężeń. Corocznie stwierdzanych jest ponad 200 nowych przypadków zespołu wibracyjnego, czyli choroby zawodowej wywoływanej działaniem drgań miejscowych. Zespół wibracyjny stanowi 2,7% wszystkich zarejestrowanych przypadków chorób zawodowych i znajduje się na 7 pozycji listy tych chorób.

Ze względu na niepożądane skutki zawodowej ekspozycji na drgania mechaniczne: zdrowotne, społeczne i ekonomiczne (obniżenie wydajności i jakości pracy, koszty związane z absencją w pracy, leczeniem i rentami inwalidzkimi), konieczne jest:

- szybkie rozpoznawanie zagrożenia w przedsiębiorstwie
- kontrolowanie stanowisk pracy przez wykonanie pomiarów drgań zgodnie z obowiązującymi procedurami
- analizowanie i ocenianie stanu zagrożenia i ryzyka zawodowego
- podejmowanie na bieżąco przedsięwzięć zmierzających do ograniczenia zagrożeń drganiami
- opracowywanie programów poprawy bezpieczeństwa pracy, m.in. w zakresie ograniczania zagrożeń drganiami mechanicznymi
- realizowanie opracowanych programów
- prowadzenie wstępnych i okresowych badań lekarskich pracowników
- organizowanie szkoleń w celu poszerzenia wiedzy o występującym zagrożeniu oraz szkoleń w zakresie prawidłowej, bezpiecznej obsługi pojazdów, maszyn i urządzeń.

Bibliografia

1. Augustyńska D., P. Kowalski: *Strategia ochrony pracowników przed drganiami mechanicznymi według nowych przepisów prawnych – europejskich i krajowych*. Bezpieczeństwo Pracy, str. 8 - 10, Nr 5 (416), Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, maj 2006.
2. Cempel Cz.: *Wibroakustyka stosowana*. Warszawa, PWN 1989.
3. Engel Z.: *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*. Warszawa, PWN 1993.
4. Engel Z., Koton J., Kowalski P., Szopa J.: *Metody ochrony przed drganiami mechanicznymi*. [W:] *Ochrona przed hałasem i drganiami w środowisku pracy*. Red. D. Augustyńska, W. M. Zawieska. Warszawa, CIOP 1999, s.151-169.
5. Griffin M. J.: *Handbook of Human Vibration*. London, Academic Press 1990.
6. Harazin B.: *Drgania mechaniczne*. Sosnowiec, IMPiZŚ 1996.
7. Harazin B.: *Zagrożenie zdrowia wywołane działaniem drgań mechanicznych*. Sosnowiec, IMPiZŚ 2000.
8. Koradecka D., Lipowczan A.: *Drgania mechaniczne (wibracje)*. [W:] *Bezpieczeństwo pracy i ergonomia*. Red. D. Koradecka. T.1. Warszawa, CIOP 1999, s. 323-372.
9. Koton J., Harazin B.: *Skutki zdrowotne zawodowego narażenia na drgania miejscowe*. Warszawa, CIOP 2000.
10. Koton J., Kowalski P., Szopa J.: *Rękawice antywibracyjne – metoda badań i kryteria oceny*. Bezpieczeństwo Pracy 1997, nr 3, s. 20-22.
11. Koton J., Szopa J.: *Drgania mechaniczne*. [W:] *Ocena ryzyka zawodowego*. T. 1. Podstawy metodyczne. Wyd. 2. Warszawa, CIOP 2001.
12. Koton J., Szopa J.: *Rękawice antywibracyjne – ocena skuteczności i zasady doboru do stanowisk pracy*. Bezpieczeństwo Pracy 1999, nr 11, s. 2-5.
13. Kowalski P.: *Pomiar i ocena drgań mechanicznych w środowisku pracy według nowych przepisów prawnych*. Bezpieczeństwo Pracy, str. 24 - 26, Nr 9 (420), Centralny Instytut Ochrony Pracy, Warszawa, wrzesień 2006.
14. Markiewicz L.: *Wibracje*. Warszawa, Inst. Wyd. CRZZ 1980.
15. Pelmear P. L., Taylor W., Wasserman D. E.: *Hand-Arm Vibration*. New York, Van Nostrand Reinhold 1992.
16. Rozporządzenie Ministra Zdrowia i Opieki Społecznej z dnia 30 maja 1996 r. w sprawie przeprowadzania badań lekarskich pracowników, zakresu profilaktycznej opieki zdrowotnej nad pracownikami oraz orzeczeń lekarskich wydawanych do celów przewidzianych w Kodeksie Pracy. (Dz. U. 1996 Nr 69, poz.

- 332, ze zmianami ostatnia zm.: Dz. U. 2001, nr 128 poz. 1405, Dz. U. 2010, nr 240, poz. 1611).
17. Rozporządzenie Ministra Zdrowia z dnia 20 kwietnia 2005 r. w sprawie badań i pomiarów czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. (Dz. U. 2005 Nr 73 poz. 645, Dz.U. 2011 nr 33 poz. 166).
 18. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 10 października 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy. (Dz. U. 2005 Nr 212 poz. 1769, Dz.U. 2007 nr 161 poz. 1142, Dz.U. 2009 nr 105 poz. 873, Dz.U. 2010 nr 141 poz. 950, Dz.U. 2011 nr 274 poz. 1621).
 19. Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy z dnia 5 sierpnia 2005 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne. (Dz. U. 2005 Nr 157 poz. 1318).
 20. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 10 września 1996 r. w sprawie wykazu prac szczególnie uciążliwych lub szkodliwych dla zdrowia kobiet. (Dz. U. nr 114, poz. 545 ze zm. Dz.U. 2002, nr 127, poz. 1092).
 21. Rozporządzenie Rady Ministrów z dnia 5 lipca 2005 r. zmieniające rozporządzenie w sprawie wykazu prac wzbronionych młodocianym i warunków ich zatrudniania przy niektórych z tych prac. (Dz. U. 2005, nr 136 poz. 1145, Dz.U. 2006 nr 107 poz. 724).
 22. PN-EN ISO 5349 – 1 Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 1: Wymagania ogólne.
 23. PN-EN ISO 5349 – 2 Drgania mechaniczne. Pomiar i wyznaczanie ekspozycji człowieka na drgania przenoszone przez kończyny górne. Część 2: Praktyczne wytyczne do wykonywania pomiarów na stanowisku pracy.
 24. PN-EN 14253 Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia – Wytyczne praktyczne.
 25. PN- EN ISO 8041 Drgania mechaniczne oddziałujące na człowieka. Mierniki.
 26. PN EN 420: Wymagania ogólne dla rękawic.
 27. PN EN 388: Rękawice ochronne chroniące przed zagrożeniami mechanicznymi
 28. PN EN ISO 10819 Drgania i wstrząsy mechaniczne – Drgania oddziałujące na organizm człowieka przez kończyny górne – Metoda pomiaru i oceny współczynnika przenoszenia drgań przez rękawice na dłoń operatora.
 29. PN-N-18001 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higiena pracy. Wymagania.

30. PN-N-18002 Systemy zarządzania bezpieczeństwem i higieną pracy. Ogólne wytyczne do oceny ryzyka zawodowego.

PYTANIA SPRAWDZAJĄCE

1. Jak definiowane są drgania działające w środowisku pracy?
2. Poprzez jakie części ciała działają na pracownika drgania ogólne?
3. Jakie zaburzenia obejmuje zespół wibracyjny?
4. Dla jakiego czasu narażenia określone są w polskich przepisach wartości NDN dla drgań mechanicznych?
5. Co to jest rezonans drgań?
6. Jaka wielkość fizyczna wykorzystywana jest podczas pomiarów drgań na stanowiskach pracy ?
7. Od czego zależy wartość ekspozycji na drgania?
8. Wymień skutki funkcjonalne działania drgań mechanicznych na pracownika.
9. Czy wartości dopuszczalne dla drgań mechanicznych są takie same dla wszystkich pracowników ?
10. Jakie środki techniczne stosowane są przy ograniczaniu narażenia na drgania w środowisku pracy ?
11. Czy do wszystkich narzędzi ręcznych powinny być stosowane takie same rękawice antywibracyjne ?
12. W jakim celu wykonuje się badania medyczne pracownikom przed ich zatrudnieniem w warunkach narażenia na drgania mechaniczne?