

MACIEJEWSKI Igor

OCENA ODDZIAŁYWANIA DRGAŃ MECHANICZNYCH NA OPERATORÓW MASZYN ROBOCZYCH

Streszczenie

W pracy przedstawiono metody oceny szkodliwego wpływu wibracji na operatorów maszyn roboczych w czasie realizowanej przez nich pracy. Określono podstawowe wskaźniki oceny szkodliwego wpływu wibracji ogólnej na organizm człowieka w postaci wartości średniokwadratowej ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań oraz wartości dawki wibracji. Przeprowadzono ponadto badania eksperymentalne z udziałem ludzi oraz wyznaczono poziomy ich narażenia na wibracje w warunkach laboratoryjnych.

WSTĘP

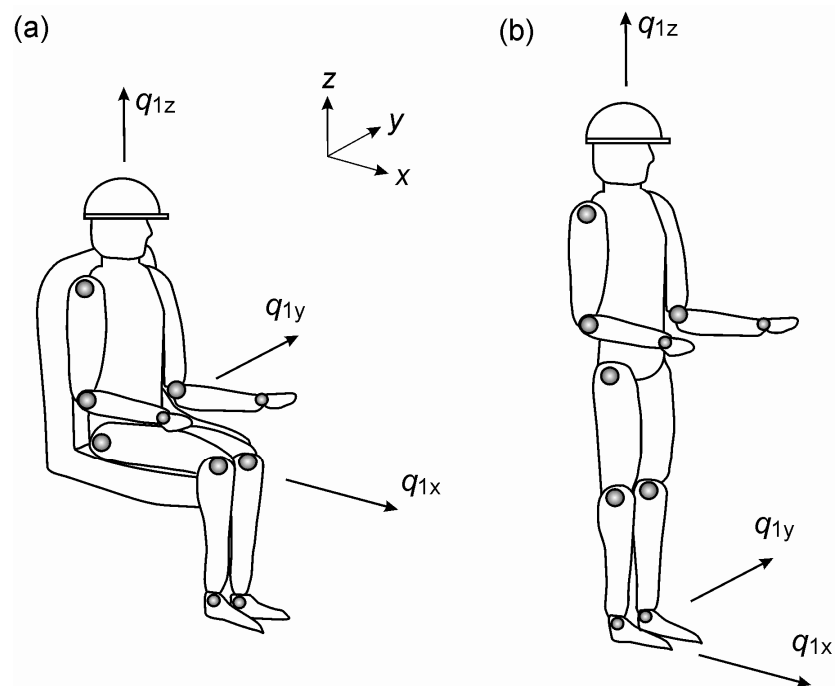
Hałas i drgania mechaniczne, występujące podczas pracy maszyn roboczych, stanowią poważne źródło zagrożenia chorobami zawodowymi pracowników oraz wpływają na obniżenie bezpieczeństwa pracy. Drgania i wstrząsy są bodźcami fizycznymi przekazywanymi bezpośrednio do ciała ludzkiego z pominięciem środowiska powietrznego. U człowieka przebywającego w środowisku wibracyjnym powstają zaburzenia czynności wielu narządów i ośrodków nerwowych, przejawiające się między innymi w zmniejszeniu sprawności wykonywania określonej pracy. Zdolność człowieka do wykonywania pracy można określić przebiegiem procesów pamięciowych, sprawnością ruchową, zdolnością widzenia, zdolnością swobodnego porozumiewania się itd. W zależności od stopnia intensywności oddziaływujących drgań, u człowieka powstaje stan zmęczenia ogólnego. Uczucie zmęczenia ogólnego, z fizjologicznego punktu widzenia, spełnia zadania obronne, to jest chroni przed przemęczeniem zmuszając do zmiany środowiska na takie, które zapewni konieczny wypoczynek. Dłuższe przebywanie w środowisku wibracyjnym powoduje niekorzystne zmiany czynności kory mózgowej, która jest podłożem procesów postrzegania, myślenia, zapamiętywania, odbierania wrażeń subiektywnych mających związek z pogorszeniem jakości pracy.

Szczególnie niebezpieczne dla organizmu człowieka są drgania o częstotliwościach wymuszeń odpowiadających częstotliwościom drgań własnych poszczególnych narządów człowieka. Wówczas nawet małe amplitudy drgań z otoczenia mogą wzbudzić znaczne drgania rezonansowe poszczególnych narządów, doprowadzając do zjawisk patologicznych, wpływających negatywnie na zdrowie człowieka i jego wydajność pracy. Przykładowo, częstotliwość drgań własnych głowy wynosi 4 i 25 Hz, szczęki 6-8 Hz, narządów wewnętrznych klatki piersiowej 5-8 Hz, kończyn górnych 3 Hz, narządów wewnętrznych jamy brzusznej 4,5-10 Hz, pęcherza moczowego 10-18 Hz, kończyn dolnych 5 Hz [2]. Wartości tych częstotliwości określono statystycznie na podstawie wielu długotrwałych badań. Należy jednak podkreślić, iż indywidualne właściwości fizyczne poszczególnych osób

mogą wpływać na zmiany wartości częstotliwości drgań własnych poszczególnych narządów ciała ludzkiego. Podjęcie tematyki analizy oddziaływań dynamicznych w układzie operator-maszyna posiada swoje głębokie uzasadnienie w dążeniu do naukowego poznania tej tematyki i praktycznego działania w zakresie ograniczania negatywnego oddziaływania tych czynników na człowieka.

1. PODSTAWOWE POZYCJE CIAŁA CZŁOWIEKA

Badanie wpływu wibracji na organizm ludzki jest zwykle rozpatrywane w zależności od miejsca przekazywania drgań oraz pozycji ciała człowieka podczas pracy. Działanie wibracji ze względu na miejsce przekazywania można podzielić na drgania ogólne i miejscowe. Drgania ogólne są przenoszone do organizmu człowieka poprzez nogi, miednicę (biodra), plecy i boki, natomiast drgania miejscowe są przenoszone przez kończyny górne [2, 3]. Wśród objawów szkodliwego oddziaływania drgań ogólnych na człowieka można wymienić takie jak: wzrost napięcia mięśniowego, uczucie zmęczenia, zawroty głowy, zaburzenia równowagi, wrażenie wibrowania organów wewnętrznych, bóle kręgosłupa i wiele innych [11], co w konsekwencji wzmacnia niechęć człowieka do wykonywanej przez niego pracy. Pośród skutków oddziaływania drgań miejscowych należy wymienić następujące: zaburzenia przepływu krwi w palcach, zmiany w układzie kostno-stawowym układu ręka-ramię, uszkodzenia i zmiany w mięśniach, zaburzenia lokalnego i centralnego układu nerwowego [9].



Rys. 2. Pozycje ciała ludzkiego w czasie wykonywania pracy przez operatorów maszyn roboczych: siedząca (a), stojąca (b)

W warunkach normalnej ekspozycji zawodowej, jaką jest praca operatora maszyny roboczej, rozróżnia się dwie podstawowe pozycje ciała człowieka (rys. 2) [4]:

- pozycja siedząca (drgania mechaniczne są przekazywane przez miednicę), która pozbawia człowieka możliwości czynnego tłumienia drgań za pomocą kończyn dolnych,
- pozycja stojąca (drgania mechaniczne są przekazywane przez stopy), która umożliwia człowiekowi w zakresie najniższych częstotliwości drgań zastosować amortyzację czynną, polegającą na przeciwdziałaniu wychyleniom postawy kosztem wzmożonej pracy układu mięśniowego.

2. METODY OCENY SZKODLIWEGO WPŁYWU WIBRACJI

Podstawowa metoda oceny szkodliwego wpływu wibracji ogólnej [6] na organizm człowieka polega na pomiarze wartości przyspieszenia drgań, które oddziałują w danym miejscu ciała i dla danego kierunku znormalizowanego układu odniesienia (rys. 2). Najczęściej wykonuje się pomiary z wymuszeniami pionowymi (wzdłuż osi z), gdyż właśnie w tym kierunku wymuszenia spotykane w wielu maszynach roboczych posiadają największe amplitudy [10]. Przykładem tego typu wymuszenia mogą być drgania pionowe podłogi w kabinie wywrotki, która porusza się po nierównym terenie, a jej operator pracuje w pozycji siedzącej [8].

Zgodnie z normą [6], wartość średniokwadratowa ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań powinna zostać obliczona przy wykorzystaniu następującej zależności:

$$(a_{iiv})_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{t_k} \int_0^{t_k} \ddot{q}_{iiv}^2(t) dt}, \quad i = x, y, z \quad (1)$$

gdzie: \ddot{q}_{iiv}^2 jest kwadratem pomierzonej amplitudy ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań wzdłuż danej osi kartezjańskiego układu współrzędnych, natomiast t_k jest czasem obserwacji. Wazenie przyspieszenia drgań polega na korygowaniu pomierzonych wartości za pomocą filtra korekcyjnego o odpowiedniej charakterystyce częstotliwościowej (podanej w normie [6], którą zdefiniowano dla danej pozycji ciała człowieka oraz danego kierunku oddziaływania drgań).

Inną miarą oceny wpływu drgań na organizm człowieka jest wartość dawki wibracji (ang. *Vibration Dose Value*), która została zdefiniowana jako [5]:

$$VDV_{iiv} = \sqrt[4]{\int_0^{t_k} \ddot{q}_{iiv}^4(t) dt}, \quad i = x, y, z \quad (2)$$

gdzie: \ddot{q}_{iiv}^4 jest czwartą potęgą pomierzonej amplitudy ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań wzdłuż danej osi kartezjańskiego układu współrzędnych, t_k jest czasem obserwacji. Wartość dawki wibracji VDV_{iiv} jest miarą szkodliwego oddziaływania drgań na człowieka, przy użyciu której uwypukla się wpływ szczytowych amplitud drgań w porównaniu ze wskaźnikiem opisanym zależnością (1). Według normy [6] przy obliczaniu wartości dawki wibracji nie należy stosować operacji uśredniania po czasie. W konsekwencji prowadzi to do uzyskania następującej jednostki dawki wibracji $m/s^{1,75}$.

Zgodnie z normą [6] wartości średniokwadratowe przyspieszenia wypadkowego, stanowiącego sumę przyspieszeń przekazywanych na człowieka z trzech kierunków, obliczyć można ze wzoru:

$$a_{RMS} = \sqrt{(k_x \cdot (a_{1,xw})_{RMS})^2 + (k_y \cdot (a_{1,yw})_{RMS})^2 + (k_z \cdot (a_{1,zw})_{RMS})^2} \quad (3)$$

Podobnie można obliczyć wartości wypadkowej dawki wibracji, która stanowi sumę dawek przekazywanych na człowieka z trzech kierunków:

$$VDV = \sqrt[4]{(k_x \cdot VDV_{1,xw})^4 + (k_y \cdot VDV_{1,yw})^4 + (k_z \cdot VDV_{1,zw})^4} \quad (4)$$

gdzie: k_x , k_y , k_z są współczynnikami, których wartości są uzależnione od kierunku oddziaływania drgań na człowieka. W przypadku kierunków poziomych wynoszą one $k_x = k_y = 1,4$; natomiast dla kierunku pionowego współczynnik wynosi $k_z = 1$.

Jeśli dodatkowo wziąć pod uwagę okres oddziaływania drgań poprzez odniesienie wartości średniokwadratowej pomierzonego przyspieszenia a_{RMS} oraz dawki wibracji VDV do czasu ekspozycji t_k , można wtedy wyznaczyć wartości dziennego narażenia operatora na szkodliwe działanie wibracji według zależności:

$$a_{8h} = a_{RMS} \sqrt{\frac{t_{exp}}{t_h}} \quad (5)$$

$$VDV_{8h} = VDV \sqrt{\frac{t_{exp}}{t_h}} \quad (6)$$

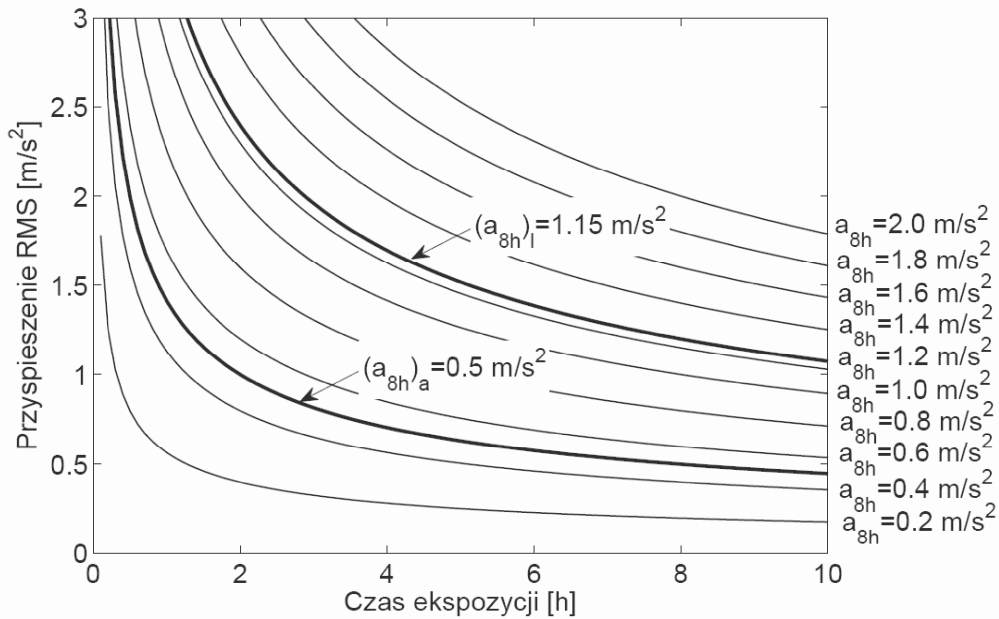
gdzie: a_{8h} jest wartością średniokwadratową przyspieszenia drgań w czasie dnia pracy, VDV_{8h} jest wartością dawki wibracji w czasie dnia pracy, t_h jest normatywnym czasem pracy.

Dyrektywa [1] definiuje graniczne wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań i dawki wibracji w czasie ośmiogodzinnego dnia pracy. Wynoszą one odpowiednio:

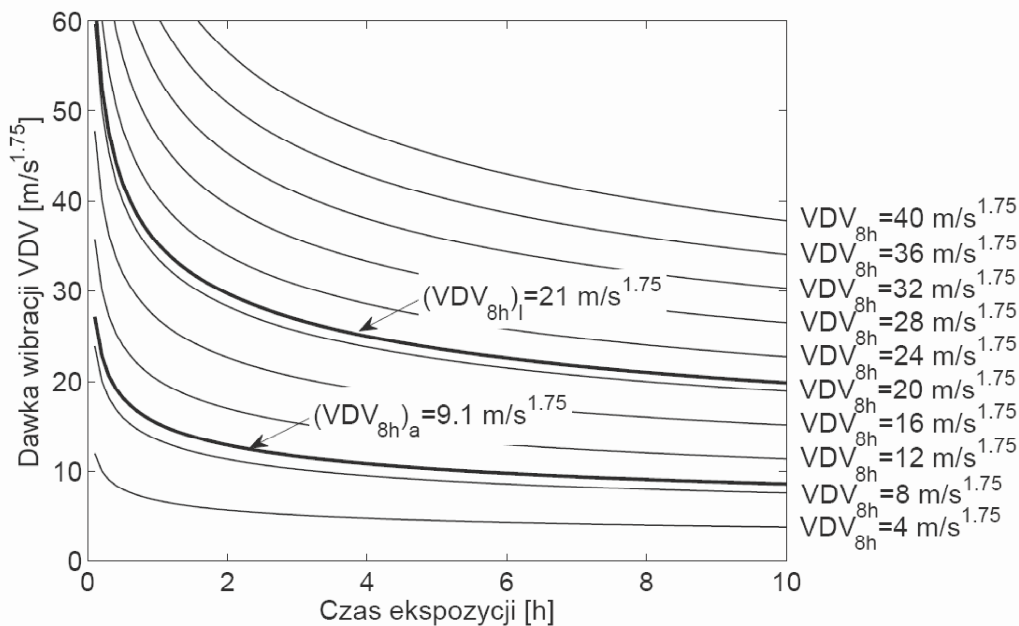
- średniokwadratowe przyspieszenie drgań
 - granica odczuwalności $(a_{8h})_a = 0,5 \text{ m/s}^2$
 - granica dopuszczalności $(a_{8h})_l = 1,15 \text{ m/s}^2$
- dawka wibracji
 - granica odczuwalności $(VDV_{8h})_a = 9,1 \text{ m/s}^{1,75}$
 - granica dopuszczalności $(VDV_{8h})_l = 21 \text{ m/s}^{1,75}$

Na rysunkach 3 oraz 4 zilustrowano wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań a_{RMS} oraz dawki wibracji VDV , wyznaczone przy różnych poziomach narażenia człowieka na szkodliwe oddziaływanie drgań w czasie ośmiogodzinnego dnia pracy. Na przedstawionych rysunkach można wyróżnić trzy obszary narażenia człowieka:

- gdy $a_{RMS} < (a_{8h})_a$ oraz $VDV_{RMS} < (VDV_{8h})_a$ jest to obszar o niewielkim poziomie narażenia na wibracje,
- gdy $(a_{8h})_a \leq a_{RMS} < (a_{8h})_l$ oraz $(VDV_{8h})_a \leq VDV < (VDV_{8h})_l$ jest to obszar o znacznym poziomie narażenia na wibracje,
- gdy $a_{RMS} \geq (a_{8h})_l$ oraz $VDV_{RMS} \geq (VDV_{8h})_l$ jest to obszar o niedopuszczalnym poziomie narażenia na wibracje.



Rys. 3. Wartości dopuszczalne przyspieszenia drgań przy różnych poziomach narażenia człowieka na szkodliwe oddziaływanie drgań w czasie ośmiogodzinnego dnia pracy

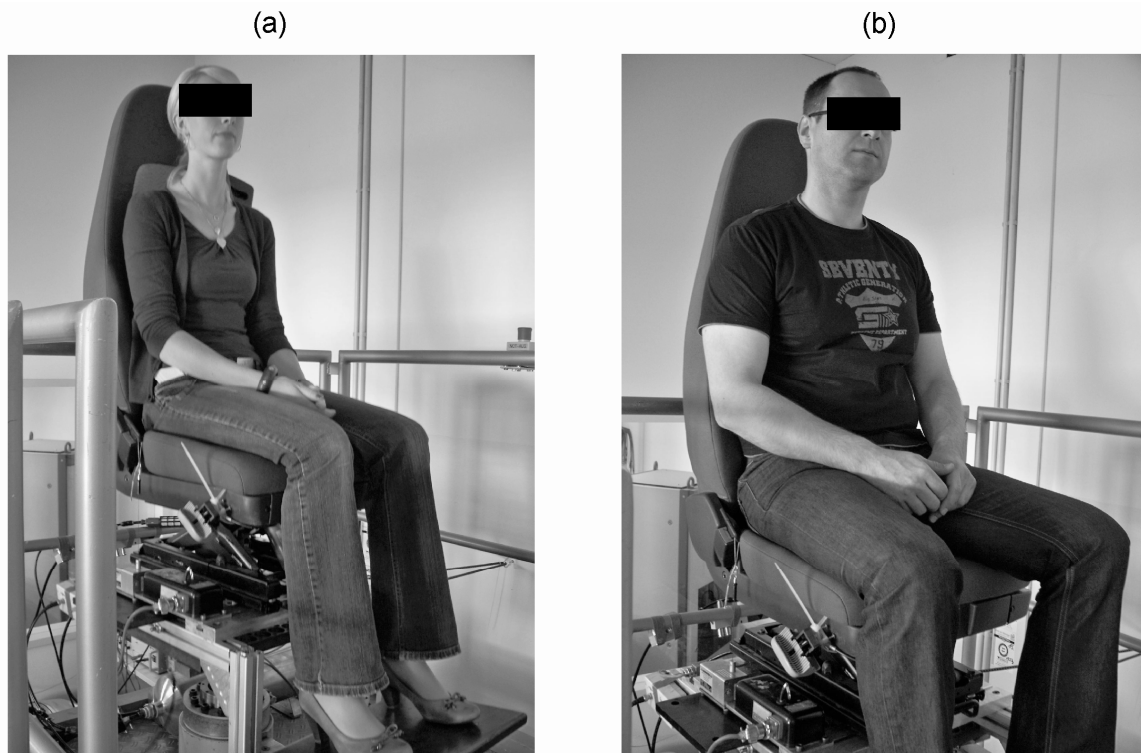


Rys. 4. Wartości dopuszczalne dawki wibracji przy różnych poziomach narażenia człowieka na szkodliwe oddziaływanie drgań w czasie ośmiogodzinnego dnia pracy

W przypadku, gdy wyznaczone wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań a_{8h} bądź dawki wibracji VDV_{8h} znajdują się w obszarze niewielkiego narażenia na wibracje (rys. 3 i 4), to nawet wtedy nie można wnioskować o bezpiecznych warunkach pracy operatorów maszyn roboczych [1]. Również w takich sytuacjach należy zwrócić uwagę na możliwość wystąpienia narażenia niektórych operatorów, szczególnie w przypadku wieloletniego oddziaływania drgań mechanicznych.

3. OCENA SZKODLIWEGO WPLYWU WIBRACJI NA OPERATORA MASZINY ROBOCZEJ W WARUNKACH LABORATORYJNYCH

W celu wyznaczenia wskaźników określających wpływ vibracji na operatora maszyny roboczej przeprowadzono badania eksperymentalne z wykorzystaniem stanowiska przedstawionego na rysunku 5. Badaniu w warunkach laboratoryjnych poddano osoby usytuowane w pozycji siedzącej, które umiejscowiono na amortyzowanym fotelu przeznaczonym do pracy w maszynach roboczych. Masy ciała badanych osób wynosiły odpowiednio 55 oraz 98 kg. Sposób ich umiejscowienia na siedzisku w pozycji całkowitego kontaktu z oparciem był zgodny z wytycznymi, które zdefiniowano w normie [7].



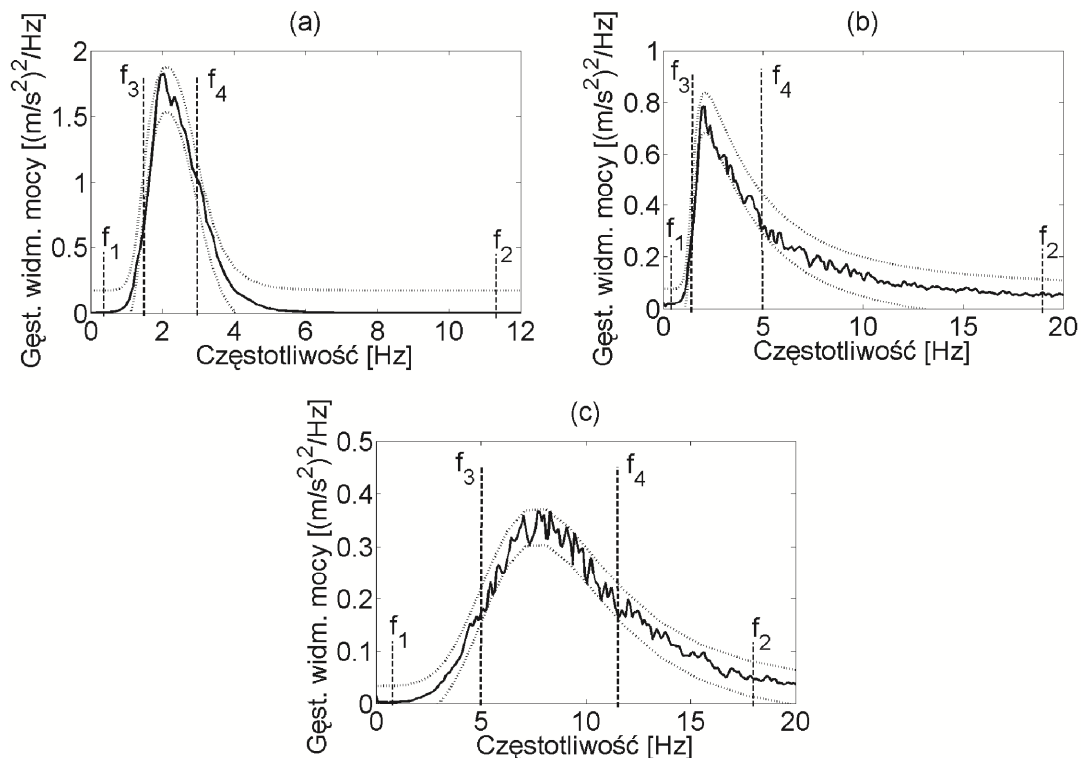
Rys. 5. Stanowisko eksperymentalne do badań vibracyjnych z udziałem ludzi : osoba o masie ciała 55 kg (a) oraz osoba o masie ciała 98 kg (b)

Urządzeniem generującym drgania był wzbudnik elektrohydrauliczny, do którego zamocowano platformę z zainstalowanym układem zawieszenia siedziska. Zawieszenie siedziska w postaci konwencjonalnego układu pasywnego składało się z nożycowego mechanizmu prowadzenia, sprężyny pneumatycznej oraz amortyzatora hydraulicznego. W celu zrealizowania pomiaru przyspieszenia drgań oddziaływującego na operatora maszyny roboczej zamontowano przetwornik w miejscu kontaktu ciała ludzkiego z powierzchnią siedziska (w zagłębieniu poduszki siedziska). Przetwornik drgań w zagłębieniu poduszki siedziska został zamocowany za pomocą półsztywnego dysku mocującego. Ruch całego układu wymuszano sygnałami reprezentatywnymi dla wybranych maszyn roboczych [7], takimi jak:

- EM3 - ładowarki kołowe o masie własnej powyżej 4500 kg,
- EM5 - spycharki kołowe,
- EM6 - spycharki i ładowarki gąsienicowe.

Czas trwania każdego z przeprowadzonych badań wynosił 300 sekund przy wymuszeniach zdefiniowanych dla różnych klas maszyn roboczych, tj. EM3, EM5 oraz EM6. Gęstości widmowe mocy wyżej wymienionych sygnałów wymuszających, dla których

oceniano szkodliwy wpływ wibracji na operatora maszyny roboczej, zaprezentowano na rysunku 6.



Rys. 6. Gęstości widmowe mocy przyspieszenia drgań wymuszających (linia ciągła) w przypadku klas sygnałów: EM3 (a), EM5 (b), EM6 (c), pola tolerancji charakterystyk widmowych sygnałów (linia przerywana)

Uzyskane wartości wyznaczonych wskaźników oceny, tj. wartość średniokwadratowej ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań a_{RMS} oraz wartość dawki wibracji VDV , zestawiono w tabeli 1.

Tab. 1. Zestawienie wartości pomierzonych wskaźników oceny szkodliwego wpływu wibracji na człowieka

Wymuszenie	Wartość średniokwadratowa przyspieszenia drgań w czasie dnia pracy a_{RMS} [m/s^2]		Wartość dawki wibracji w czasie dnia pracy VDV [$m/s^{1,75}$]	
	Masa ciała 55 kg	Masa ciała 98 kg	Masa ciała 55 kg	Masa ciała 98 kg
EM3	1,90	1,80	10,56	10,00
EM5	1,49	1,35	7,90	7,11
EM6	0,76	0,64	3,78	3,17

Jak wynika z przedstawionych rezultatów badań eksperymentalnych (tab. 1), w przypadku sygnałów wymuszającego ruch drgający EM3 i EM5 (reprezentatywnych dla ładowarek i sycharek kołowych) została przekroczona granica dopuszczalności przyspieszenia drgań w czasie ośmiogodzinnego dnia pracy. Dla sygnału wymuszającego EM6 uzyskano natomiast niewielki poziom narażenia na wibracje w przypadku obu badanych osób, tj. osobie o masie ciała 55 oraz 98 kg. Z kolei zmierzone wartości dawki wibracji zawierają się w obszarze o niewielkim poziomie narażenia na wibracje w przypadku wszystkich z rozpatrywanych w niniejszej pracy sygnałów wymuszających ruch: EM3, EM5 oraz EM6.

PODSUMOWANIE

Badania eksperymentalne z udziałem ludzi wykazały, że w przypadku pracy operatorów w niektórych maszynach roboczych występują duże zagrożenia wibracjami. Świadczą o tym duże wartości średniokwadratowe przyspieszenia drgań, które uzyskano dla sygnałów wymuszających reprezentatywnych dla ciężkich ładowarek kołowych oraz spycharek kołowych. W przypadku maszyn roboczych tego typu można mówić o znacznym obniżeniu poziomu bezpieczeństwa pracy oraz o możliwości wystąpienia chorób zawodowych wśród pracowników.

BIBLIOGRAFIA

1. Directive 2002/44/EC of the European Parliament and of the Council *On the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibration)*, Official Journal of the European Communities (2002), pp. 13-18.
2. Engel Z., *Ochrona środowiska przed drganiami i hałasem*, Wydawnictwo Naukowe PWN, Warszawa 1993.
3. Engel Z., Kowal J., *Sterowanie procesami wibroakustycznymi*, Wydawnictwa AGH, Kraków 1995.
4. Griffin, M.J., Howarth, H.V.C., Pitts, P.M., Fischer, S., Kaulbars, U., Donati, P.M., Bereton, P.F. *Guide to good practice on whole-body vibration. Non-binding guide to good practice with a view to implementation of Directive 2002/44/EC on the minimum health and safety requirements regarding the exposure of workers to the risks arising from physical agents (vibrations)*, European Commission, Luxembourg 2006.
5. Griffin M.J., *Handbook of Human Vibration*, Elsevier Academic Press, London 1996.
6. International Organization for Standardization, *Mechanical vibration and shock - Evolution of human exposure to whole body vibration*, ISO 2631, Genewa 1997.
7. International Organization for Standardization, *Earth-moving machinery - Laboratory evaluation of operator seat vibration*, ISO 7096, Genewa 2000.
8. Krzyżyński T., Maciejewski I., Chamera S., *Modeling and simulation of active system of truck vibroisolation with biomechanical model of human body under real excitation*, VDI Publications (The Association of German Engineers), No 1821 (2004), pp. 377-390.
9. Książek M., *Modelowanie i optymalizacja układu człowiek - wibroizolator - maszyna*, Politechnika Krakowska, Kraków 1999.
10. Maciejewski I., Krzyżyński T., *Research and development of seat suspension in working machines and its relationship to anti-vibration health protection of operators*, Machine Dynamics Problems, Publishing House of Warsaw University of Technology, Vol. 31, No 2 (2007), pp. 95-103.
11. Nader M., *Modelowanie i symulacja oddziaływania drgań pojazdów na organizm człowieka*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2001.
12. Preumont A., *Vibration Control of Active Structures An Introduction*, Kluwer Academic Publishers, London 2002.

EVALUATION OF THE INFLUENCE OF MECHANICAL VIBRATIONS ON THE WORKING MACHINE OPERATORS

Abstract

In this paper the methods of evaluation the influence of mechanical vibrations on the working machine operators are presented. The basic indexes concerning the influence of harmful vibrations on the human body are defined as the root mean square value of frequency weighed acceleration and the vibration dose value. The experimental investigations with humans are also performed and the vibration exposure levels are evaluated in the test laboratory.

Autor:

dr hab. inż. **Igor Maciejewski** – Politechnika Koszalińska, Instytut Technologii i Edukacji,
Zakład Mechatroniki i Mechaniki Stosowanej