

# Komputerowa analiza drgań na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego w aspekcie ergonomii i bezpieczeństwa

Computer analysis of vibrations on the roadheader operator station in terms of ergonomics and safety



*Dr hab. inż. Piotr Cheluszka,  
prof. PŚ\**



*Mgr inż. Jacek Gawlik\**

**Treść:** Zagadnienie wibroizolacji stanowisk pracy operatorów maszyn ma istotne znaczenie w świetle wymagań wynikających ze spełnienia obowiązujących norm z zakresu ergonomii i higieny pracy. Dotyczy to również maszyn górniczych, w tym – kombajnów chodnikowych. Silnie dynamiczny charakter realizowanego przezeń procesu roboczego sprawia, że intensywne drgania przenoszone są poprzez węzły konstrukcyjne na stanowisko operatora. W celu ograniczenia narażenia operatora na drgania niezbędne jest określenie wielkości i charakteru tych drgań w aspekcie dziennej ekspozycji na drgania oraz występowanie w ich spektrum szkodliwych, niebezpiecznych dla człowieka składowych. Identyfikacja wpływu procesu roboczego na intensywność drgań oraz określenie możliwości ich redukcji, a także określenie wymaganych charakterystyk leży u podstaw doboru układu wibroizolacji stanowiska operatora. W artykule przedstawiono wybrane wyniki obszernych badań komputerowych, które pozwoliły na ocenę stopnia narażenia operatora wysięgnikowego kombajnu chodnikowego na drgania. W przebiegach przyspieszenia drgań wyodrębnione zostały główne ich składowe, których częstotliwości skonfrontowane zostały z częstotliwościami rezonansowymi organów człowieka. Pokazany został wpływ wartości parametrów procesu urabiania na wartość skuteczną oraz dzienną ekspozycję na drgania. Określone zostały możliwości redukcji drgań poprzez dobór własności tłumiących mocowania siedziska operatora kombajnu. W badaniach symulacyjnych wykorzystany został oryginalny, zweryfikowany doświadczalnie model matematyczny wysięgnikowego kombajnu chodnikowego z głowicami poprzecznymi.

**Abstract:** The issue of vibration isolation of machine operator working stations is significant in terms of requirements resulting from meeting the applicable standards of ergonomics and occupational health. This also applies to mining machines, including roadheaders. Due to the highly dynamic nature of the working process executed by the machine, intense vibrations are transmitted via construction nodes to the operator station. In order to limit the exposure of the operator to vibrations, it is necessary to determine the magnitude and nature of those vibrations in terms of daily exposure to vibrations and their occurrence in the spectrum of components which are harmful and dangerous for a human. Identification of the impact of the working process on the intensity of vibrations and determination of possibilities to reduce them, as well as determination of required characteristics, constitute a basis for selection of a operator station's vibration insulation system. This paper presents selected results of extensive computer studies, which allowed to assess the degree of exposure of a boom roadheader operator to vibrations. In the waveforms of acceleration of vibrations, their main components have been isolated, the frequencies of which have been confronted with resonance frequencies of human organs. The results showed the impact of the values of parameters of the cutting process on the effective value and daily exposure to vibrations. The possibilities to reduce vibrations by selecting damping properties of mounting the roadheader operator's seat have been determined. The simulation research used the original, experimentally verified mathematical model of boom roadheader with transverse cutting heads.

**Słowa kluczowe:**

*kombajn chodnikowy, proces urabiania, drgania, wibroizolacja, badania komputerowe*

**Keywords:**

*roadheader, cutting process, vibrations, vibration isolation, computer research*

\*<sup>1</sup>) Politechnika Śląska, Gliwice, Wydział Górnictwa i Geologii

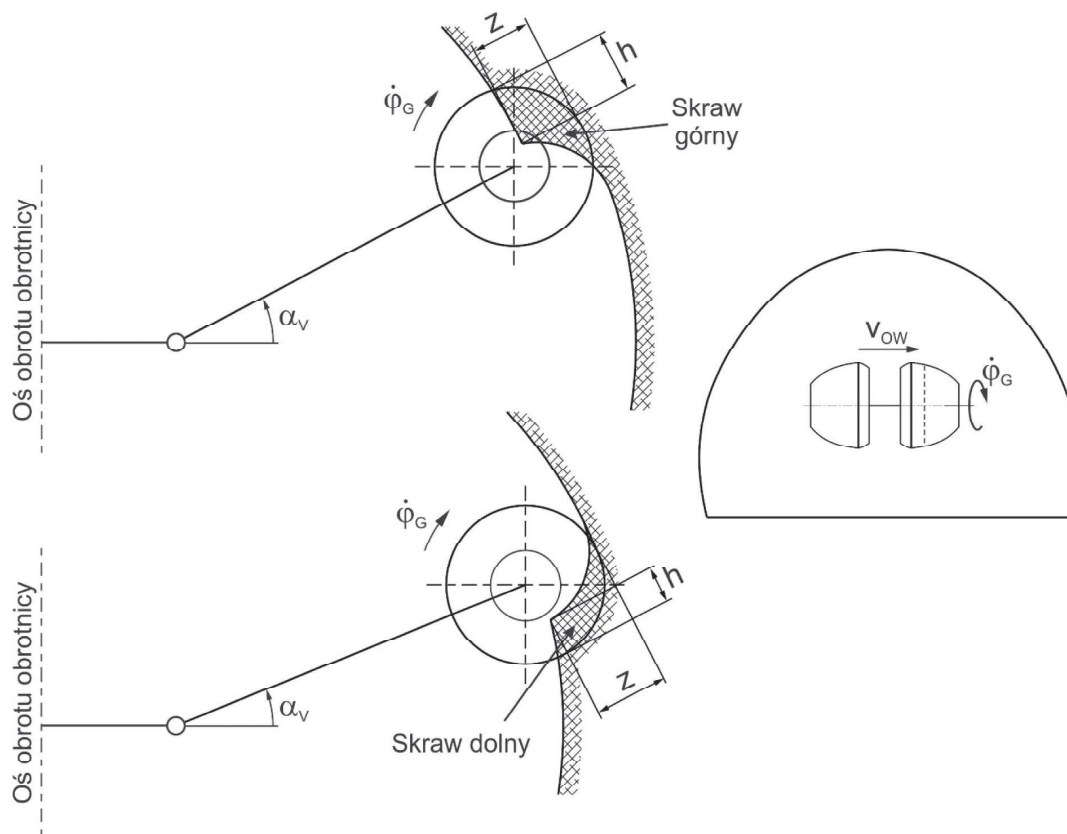
## 1. Wprowadzenie

Badania doświadczalne oraz symulacyjne wskazują, że wysięgnikowe kombajny chodnikowe, zwłaszcza podczas urabiania skał trudno urabialnych, podlegają działaniu silnych wymuszeń drgań oraz obciążeń dynamicznych (Cheluska i in. 2017, Dolipski, Cheluska 2002, Xueyi i in. 2016, Wang i in. 2016). Drgania te przenoszone są poprzez więzi z układu urabiania na kadłub kombajnu. W efekcie, wszystkie podzespoły kombajnu pobudzone są do drgań, będących rezultatem realizowanego przez kombajn procesu roboczego. Jest to efekt szalenie niepożądany, zwłaszcza w przypadku podzespołów szczególnie wrażliwych na drgania. Przykładem jest skrzynia aparatury elektrycznej, wewnątrz której zainstalowane są elementy układu zasilania i sterowania kombajnu. Ponieważ drgania prowadzić mogą do uszkodzeń elementów tych układów, nieodzowna jest wibroizolacja. Polega ona na zamocowaniu skrzyni aparatury elektrycznej do ramy głównej kombajnu za pośrednictwem na przykład wibroizolatorów gumowych.

Drgania generowane procesem urabiania przenoszone są poprzez ustrój nośny kombajnu również na stanowisko operatora kombajnu. Ze względu na spełnienie wymagań w zakresie bezpieczeństwa i ergonomii pracy istnieje potrzeba oceny intensywności drgań na stanowisku operatora. Identyfikacja potencjalnego zagrożenia drganiami mechanicznymi stanowi podstawę dla podjęcia działań w celu minimalizacji tego zagrożenia poprzez skuteczną wibroizolację stanowiska operatora. Ograniczona przestrzeń wyrobisk, w których eksploatowane są wysięgnikowe kombajny chodnikowe sprawia, że maszyny te nie posiadają zazwyczaj kabiny, jako odrębnego podzespołu zamocowanego do ramy głównej za

pośrednictwem zawieszenia. Eliminacja potencjalnego narażenia operatora na drgania mechaniczne możliwa jest więc w zasadzie jedynie poprzez tłumienie drgań siedziska operatora, dzięki zastosowaniu odpowiedniego układu amortyzacji w jego zawieszeniu (mocowaniu do ramy głównej kombajnu). W celu ochrony operatorów przed drganiami mechanicznymi w maszynach roboczych stosowane są pasywne lub aktywne układy wibroizolacji (Gołaś i in. 1987, Wojnarowski 1999). Układy pasywne mogą jedynie rozpraszać energię lub okresowo ją magazynować, a następnie oddawać (zbudowane są z elementów inercyjnych, sprężystych i tłumiących). Z kolei systemy aktywne wyposażone są w układy automatycznej regulacji (Margielewicz 2014). Układy wibroizolacji mają zapewnić z jednej strony redukcję przyspieszenia drgań działającego na operatora, z drugiej zaś – ograniczyć przemieszczenia względne operatora, aby możliwe było sterowanie maszyną (Maciejewski 2010). Właściwości wibroizolacyjne układów zawieszenia siedziska operatora dostosowane muszą być przy tym do wielkości i charakteru wymuszenia drgań wynikającego z realizowanego przez daną maszynę procesu roboczego.

W artykule przedstawiono wybrane wyniki obszernych badań numerycznych, w trakcie których analizowano drgania pionowe układu siedzisko–operator wysięgnikowego kombajnu chodnikowego podczas urabiania skał o określonej wytrzymałości na ściskanie głowicami poprzecznymi, przy założonych wartościach parametrów procesu urabiania. Mając na uwadze klasyczną technologię urabiania powierzchni czoła przodku kombajnem wysięgnikowym wyposażonym w głowice poprzeczne, symulowano wykonywanie skrawów dolnych i górnych o wysokości  $h$  z zabiorem  $z$ , podczas wychylania wysięgnika równoległe do spągu (przemieszczania głowic urabiających) z prędkością obwodową  $v_{OW}$  (rys.1).



Rys. 1. Parametry procesu urabiania głowicami poprzecznymi wysięgnikowego kombajnu chodnikowego:  $z$  – zabiór,  $h$  – wysokość skrawu,  $\dot{\varphi}_G$  – prędkość kątowna głowic urabiających,  $v_{OW}$  – prędkość przemieszczania głowic urabiających  
Fig. 1. Parameters of the cutting process using transverse cutting heads of a boom-type roadheader:  $z$  – cut height,  $\dot{\varphi}_G$  – angular velocity of cutting heads,  $v_{OW}$  – movement speed of cutting heads

W badaniach wykorzystano opracowany, oryginalny model dynamiczny kombajnu wysięgnikowego (rys.2) (Cheluska, Gawlik 2016). Model matematyczny opisujący ruch w modelu fizycznym badanego obiektu tworzy układ 19. nieliniowych równań różniczkowych zwyczajnych drugiego rzędu. Do rozwiązania równań ruchu użyto metody Rungego–Kutty 4. rzędu zaimplementowanej w środowisku Matlab/Simulink. Model ten zweryfikowany został doświadczalnie w oparciu o zarejestrowane w trakcie badań eksperymentalnych charakterystyki dynamiczne wysięgnikowego kombajnu chodnikowego. Przeprowadzone symulacje komputerowe umożliwiły wyznaczenie wielkości i charakteru przebiegu przyspieszeń drgań, jakim podlega operator wysięgnikowego kombajnu chodnikowego oraz wartości charakteryzujących go parametrów. Skonfrontowane one zostały z dopuszczalnymi poziomami drgań mechanicznych oddziałującymi na człowieka na stanowiskach pracy w celu oceny zagrożenia drganiami operatora wysięgnikowego kombajnu chodnikowego.

## 2. Badania symulacyjne

Celem przeprowadzonych badań symulacyjnych było określenie wielkości narażenia operatora na drgania oraz możliwości redukcji drgań siedziska operatora  $Sc_{FO}$  (w kierunku prostym do podłoża) – rys.2. W niniejszej pracy analizowano dwa parametry opisujące drgania – wartość skuteczną przyspieszenia drgań ( $a_{RMS}$ ) oraz dzienną ekspozycję na drgania  $A(8)$ . Dla osiągnięcia powyższego celu przeprowadzono symulacje komputerowe mające na celu zbadanie wpływu następujących parametrów na dynamikę stanowiska operatora kombajnu chodnikowego:

- prędkości kątowej głowic urabiających  $\dot{\phi}_G$ ,
- prędkości obwodowej wychylania wysięgnika  $v_{OW}$ ,
- wytrzymałości urabianej skały na ściskanie  $R_c$ ,
- współczynnika tłumienia fotela operatora  $c_{FO}$ .

Wartości pierwszych trzech parametrów decydują o przebiegu procesu urabiania skały, czwarty zaś – charakteryzuje własności tłumiące mocowania siedziska, którego zadaniem jest redukcja drgań przenoszonych na operatora kombajnu podczas realizacji procesu urabiania. Obok masy siedziska

wraz z operatorem (traktowanych jako element inercyjny) oraz sztywności mocowania siedziska, współczynnik tłumienia elementu tłumiącego charakteryzuje własności dynamiczne pasywnego układu amortyzacji drgań na stanowisku operatora rozpatrywanej maszyny. W badaniach komputerowych założono, że masa operatora wraz z siedziskiem  $m_{FO} = 100$  kg.

Wyniki przeprowadzonych symulacji komputerowych porównane zostały z wartościami dopuszczalnymi przyspieszeń oddziałujących na organizm człowieka na stanowisku pracy. W przypadku ekspozycji krótkotrwałej wartość skuteczna przyspieszenia drgań nie powinna przekraczać  $3,2$  m/s<sup>2</sup>, natomiast maksymalna wartość ekspozycji dziennej na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka nie powinna przekraczać  $0,8$  m/s<sup>2</sup> (Rozporządzenie ... 2014). Przyjęto przy tym, iż całkowity dzienny czas ekspozycji operatora kombajnu chodnikowego na drgania wynikające z realizacji procesu urabiania skał podczas jednej zmiany wynosi przeciętnie 75 minut (Czarnota 2014). W celu określenia dziennej ekspozycji na drgania, jakiej poddany zostaje operator wysięgnikowego kombajnu chodnikowego (PN-EN 14253+A1 2011):

$$A(8) = a_{RMS} \sqrt{\frac{T_U}{T_0}} \quad [\text{m/s}^2] \quad (1)$$

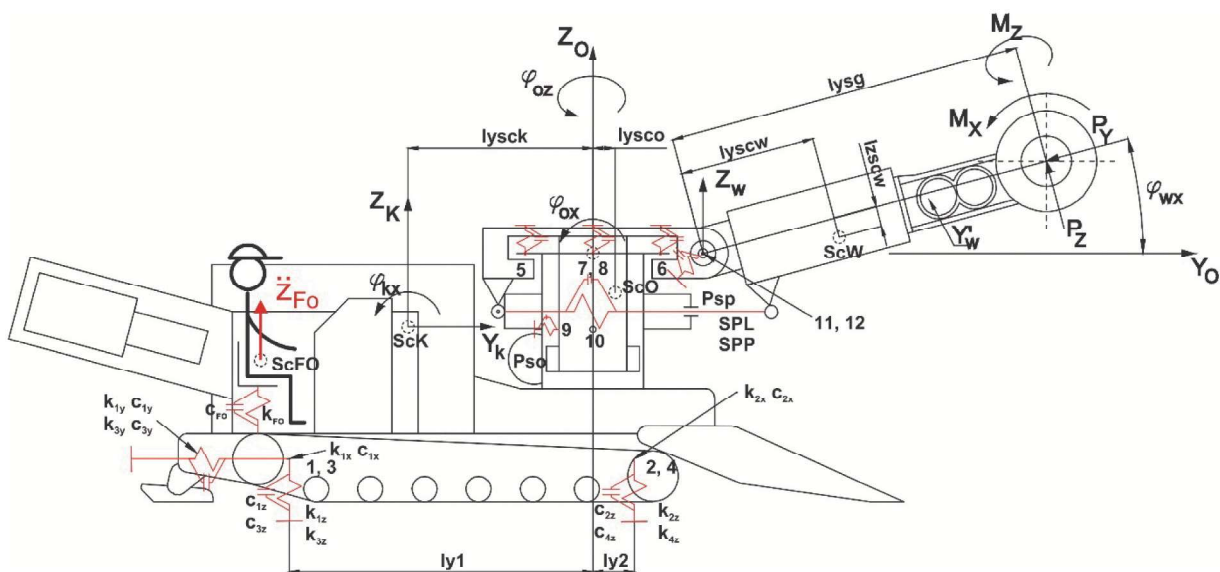
niezbędne jest wyznaczenie wartości skutecznej przyspieszenia drgań:

$$a_{RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T \dot{z}_{FO}(t) dt} \quad [\text{m/s}^2] \quad (2)$$

gdzie:

- $a_{RMS}$  – wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedziska operatora,
- $\dot{z}_{FO}$  – przyspieszenie drgań siedziska operatora  $Sc_{FO}$  (rys.2),
- $T$  – okres drgań,
- $T_U$  – całkowity dzienny czas ekspozycji wynikający z realizacji procesu urabiania ( $T_U = 75$  min.),
- $T_0$  – czas odniesienia (trwania zmiany) wynoszący 480 min.

Analiza składu widmowego przebiegów przyspieszeń drgań uzyskanych z symulacji komputerowych pozwoliła określić, czy występują w tych przebiegach składowe



Rys. 2. Model fizyczny wysięgnikowego kombajnu chodnikowego (kolorem czerwonym zaznaczono wektor przyspieszeń drgań siedziska operatora)

Fig. 2. A physical model of boom-type roadheader (red color shows the vector of accelerations of vibrations of the operator's seat)



o częstotliwości, na których działanie organizm ludzki jest najbardziej wrażliwy (tab.1).

## 2.1. Wpływ prędkości kątowej głowic urabiających na drgania na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego

Badania symulacyjne wpływu prędkości kątowej głowic urabiających na drgania siedziska operatora obejmowały realizację procesu roboczego w skałach o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 60 MPa, dla następujących parametrów:

- zabioru  $z = 100$  mm,
- wysokości skrawu  $h = 200$  mm,
- prędkości obwodowej wychyłania wysięgnika  $v_{ow} = 100$  mm/s.

Badano drgania generowane procesem urabiania podczas wykonywania skrawu dolnego oraz górnego (Dolipski i in. 2017).

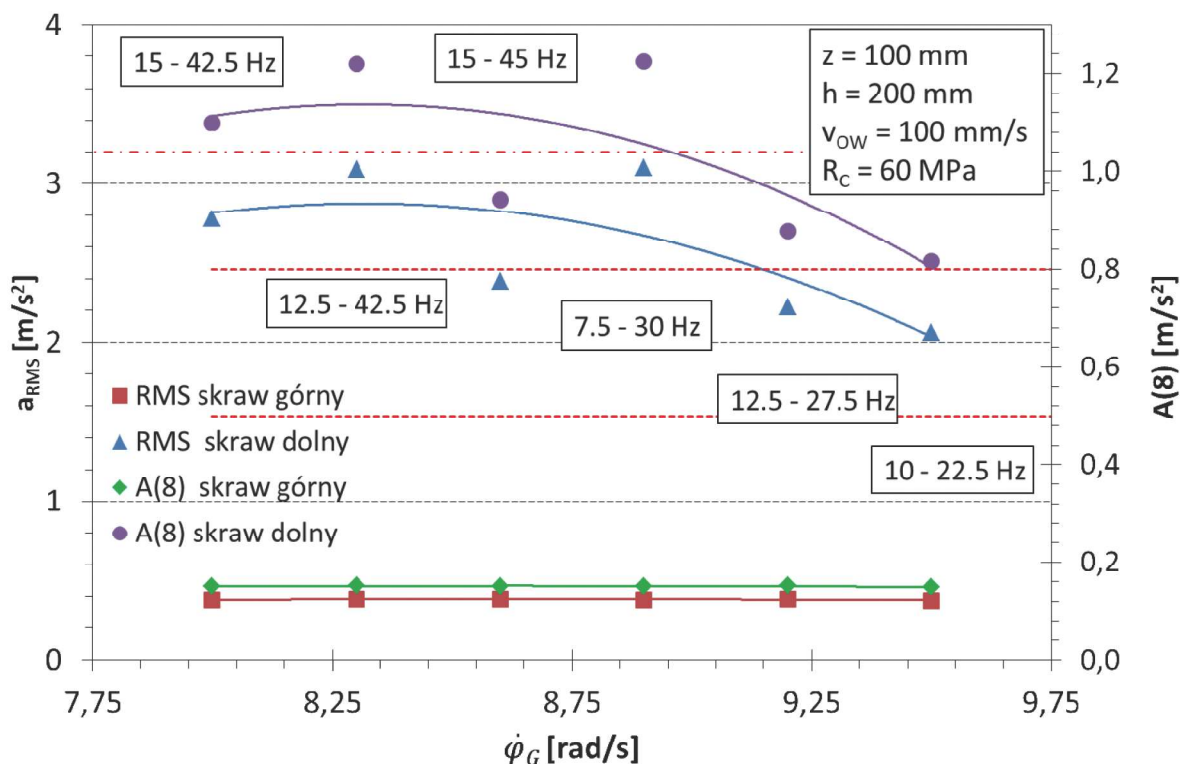
Ze względu na obserwowane zjawisko utraty stateczności przez kombajn podczas wykonywania skrawu dolnego przy niskich prędkościach kątowych głowic urabiających (objawiające się utratą kontaktu kombajnu z podłożem w punktach jego podparcia), symulacje komputerowe obejmowały prędkości kątowe głowic urabiających z przedziału od 8 do 9,5 rad/s.

Wraz ze wzrostem wartości prędkości kątowej głowic urabiających w badanym zakresie podczas wykonywania skrawu dolnego maleją wartości parametrów opisujących analizowane przyspieszenia (rys.3).

Wartości skuteczne przyspieszeń podczas wykonywania skrawu dolnego nie przekroczyły dopuszczalnej wartości dla ekspozycji krótkotrwałej i wnosły maksymalnie 3,1 m/s<sup>2</sup>. Maksymalna wartość dziennej ekspozycji na drgania wynio-

śla 1,2 m/s<sup>2</sup> (150% wartości dopuszczalnej), a jej minimalna wartość była równa 0,82 m/s<sup>2</sup>. Pomimo relatywnie krótkiego czasu oddziaływania drgań na operatora kombajnu dzienna ekspozycja na drgania przekracza wartość dopuszczalną w całym badanym zakresie prędkości kątowej głowic urabiających (dla założonych wartości parametrów tego procesu oraz przyjętej wytrzymałości urabianej skały na ściskanie). Im większa jest jednak prędkość kątowa głowic urabiających, tym intensywność drgań jest mniejsza (maleje wartość skuteczna przyspieszenia drgań oraz dzienna ekspozycja na drgania). W przypadku skrawu górnego wartości analizowanych parametrów utrzymywały się w przybliżeniu na stałym poziomie – 0,38 m/s<sup>2</sup> w przypadku wartości skutecznej oraz 0,15 m/s<sup>2</sup> – dla wartości dziennej ekspozycji na drgania o działaniu ogólnym (dla całego badanego zakresu prędkości) była ona niższa od progu działania wynoszącego 0,5 m/s<sup>2</sup>).

W trakcie każdego cyklu urabiania przy rozpatrywanej technologii tego procesu (urabianie warstwami równoległymi do spągu) wykonywane są zarówno skrawy dolne, jak i górne. Udział czasu wykonywania tego rodzaju skrawów zależy przy tym będzie od wysokości, na której dokonywane jest zawrębienie głowic urabiających (poniżej tej wysokości wykonywane są skrawy dolne, powyżej zaś – skrawy górne). Łączny czas wykonywania skrawów dolnych w trakcie trwania zmiany  $T_{UD}$ , szczególnie niekorzystnych ze względu na dużą intensywność drgań, jest więc krótszy od założonego czasu urabiania  $T_U$ . Stąd, w ocenie narażenia operatora kombajnu na drgania uwzględnić powinno się zarówno intensywność drgań i czas wykonywania skrawów dolnych, jak i skrawów górnych. Jeżeli pominąć zawrębienie głowic urabiających, dzienna ekspozycja na drgania wyrażona będzie zatem wzorem (Koradecka i in. 2017):



Rys. 3. Wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedziska operatora oraz dzienna ekspozycja operatora na drgania w funkcji prędkości kątowej głowic urabiających podczas wykonywania skrawu dolnego oraz górnego z założonymi wartościami parametrów procesu urabiania

Fig. 3. Effective value of accelerations of vibrations of the operator's seat and the daily exposure of the operator to vibrations in the function of angular velocity of cutting heads during lower and upper cut with the assumed values of parameters of the cutting process

$$A(8) = \sqrt{\frac{1}{T_0} \sum_{i=1}^n a_{RMSi}^2 \cdot t_i} = \sqrt{\frac{T_U}{T_0} [k_{UD} \cdot (a_{RMSD}^2 - a_{RMSG}^2) + a_{RMSG}^2]} \quad [\text{m/s}^2] \quad (3)$$

przy czym:

$$k_{UD} = \frac{T_{UD}}{T_U} \quad (4)$$

gdzie:

$a_{RMSD}$ ,  $a_{RMSG}$  – wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedzi-  
ska operatora podczas wykonywania odpo-  
wiednio: skrawu dolnego oraz skrawu górnego,  
 $T_{UD}$ ,  $T_{UG}$  – czas wykonywania odpowiednio: skrawów  
dolnych oraz skrawów górnych w trakcie  
trwania zmiany.

Przyjmując, że udział czasu zawrębiania stanowi 10% czasu urabiania, w pozostałych 90% czasu urabiania  $T_U$  wykonywane są skrawy dolne (w czasie  $T_{UD}$ ) oraz górne (w czasie  $T_{UG} = T_U - T_{UD}$ ). Zakładając dalej, że udział czasu wykonywania skrawów dolnych zawierać się może w granicach  $k_{UD} = (0,1 \div 0,8)$  oraz odpowiadający mu udział czasu wykonywania skrawów górnych zawierać się będzie w granicach  $k_{UG} = (0,8 \div 0,1)$ , dzienna ekspozycja na drgania wyznaczona ze wzoru (3) zmieniać się będzie w granicach od 0,4 m/s<sup>2</sup> – dla  $k_{UD} = 0,1$  i  $k_{UG} = 0,8$  do 1,1 m/s<sup>2</sup> – dla  $k_{UD} = 0,8$  i  $k_{UG} = 0,1$  (rys.4). Wartość dopuszczalna ekspozycji dziennej na drgania operatora kombajnu nie zostanie przekroczona, gdy czas wykonywania skrawów dolnych nie będzie stanowił więcej niż 40% czasu urabiania powierzchni czoła przodku.

Częstotliwości głównych składowych drgań (podane na rys.3) dla poszczególnych prędkości kątowych głowic  $\phi_G$  odpowiadają częstotliwościom rezonansowym niektórych

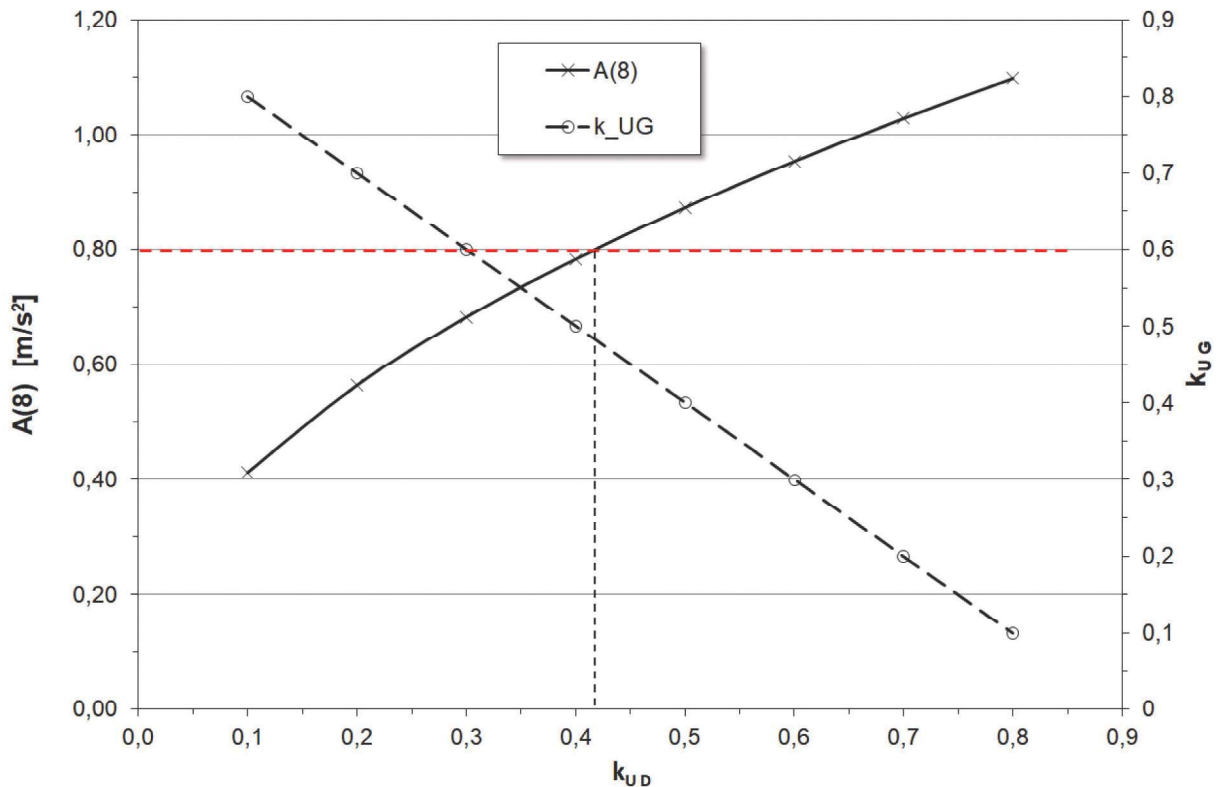
narządów człowieka (tab.1). Biorąc pod uwagę sposób przenoszenia drgań na operatora kombajnu chodnikowego, drgania te mogą mieć niekorzystny wpływ na jego zdrowie (dotyczy to zwłaszcza narażenia na drgania rezonansowe głowy, gałek ocznych oraz kręgosłupa). Jest to istotne szczególnie w przypadku ekspozycji dziennej podczas wykonywania skrawu dolnego, dla którego wartości dopuszczalne były przekroczone dla całego analizowanego zakresu prędkości kątowych głowic urabiających.

## 2.2. Wpływ prędkości obwodowej wychylania wysięgnika na drgania na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego

Badania symulacyjne wpływu prędkości obwodowej wychylania wysięgnika  $v_{OW}$  na drgania siedziska operatora obejmowały urabianie skał o  $R_c = 60$  MPa podczas wykonywania skrawu dolnego oraz górnego o wysokości  $h = 200$  mm, z zabiorem  $z = 100$  mm, przy prędkości kątowej głowic urabiających  $\phi_G = 9,24$  rad/s.

Badano wpływ prędkości wychylania wysięgnika w zakresie od 18 do 100 mm/s. Przy większych prędkościach dochodziło do utraty stateczności kombajnu w wyniku występowania zjawiska podnoszenia przedniej części maszyny.

Podczas wykonywania skrawu dolnego w przypadku prędkości obwodowych wychylania wysięgnika z zakresu od 18 do 68 mm/s widoczny jest wzrost wartości dziennej ekspozycji na drgania w granicach od 0,07 do 0,6 m/s<sup>2</sup> oraz wartości



Rys. 4. Zależność wartości dziennej ekspozycji na drgania od udziału czasu wykonywania skrawu dolnego w czasie urabiania powierzchni czoła przodku

Fig. 4. Dependency of the value of daily exposure to vibrations on the share of time of execution of a lower cut when cutting the surface of the heading face

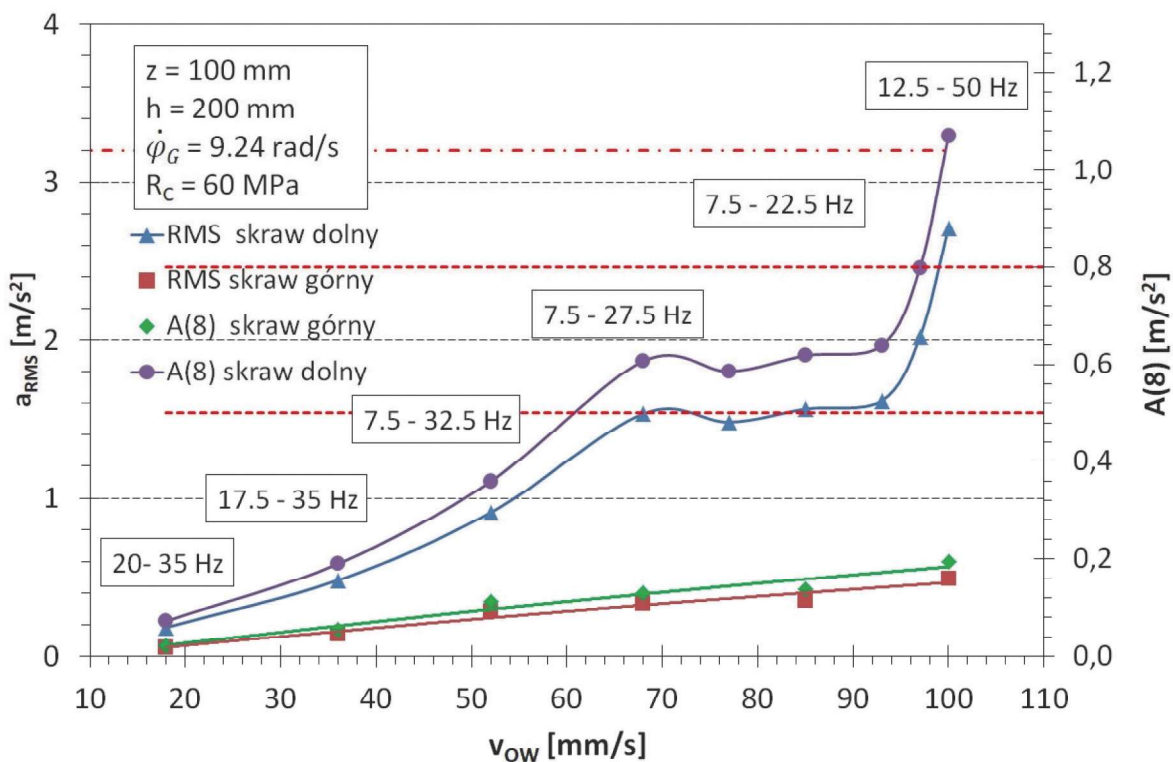
Tabela 1. Zestawienie częstotliwości rezonansowych elementów ciała człowieka (Dobry, Hermann 2014)

Table 1. List of resonance frequencies of a human body parts (Dobry, Hermann 2014)

Nazwa narządu	Częstotliwości [Hz]
Głowa	20 ÷ 30
Gałki oczne	20 ÷ 90
Obręcz barkowa	4 ÷ 5
Ramię	5 ÷ 10
Przedramię	16 ÷ 30
Dłoń	30 ÷ 50
Kręgosłup	10 ÷ 12
Brzuch	4 ÷ 8

skutecznej przyspieszenia drgań – w przedziale od 0,18 do 1,5 m/s<sup>2</sup> (rys.5). W zakresie prędkości wychylania wysięgnika od 68 do 93 mm/s widoczna jest stabilizacja analizowanych charakterystyk odpowiednio na poziomie: 1,5 m/s<sup>2</sup> (wartość skuteczna przyspieszenia) oraz 0,6 m/s<sup>2</sup> (dzienna ekspozycja na drgania). Z kolei dla prędkości wychylania wysięgnika większych od 93 mm/s widoczny jest intensywny wzrost wartości dziennej ekspozycji (do 1,07 m/s<sup>2</sup>) oraz wartości skutecznej przyspieszenia drgań (do 2,7 m/s<sup>2</sup>).

Podczas wykonywania skrawu górnego wartości analizowanych parametrów rosną liniowo – wartość skuteczna od 0,06 do 0,49 m/s<sup>2</sup>, natomiast wartość A(8) od 0,02 do 0,19 m/s<sup>2</sup>. Drgania na stanowisku operatora, podobnie jak w przypadku prędkości kątowej głowic urabiających, cechowały się występowaniem szkodliwych dla człowieka składowych, jednakże wartości ekspozycji krótkotrwałej na drgania o działaniu ogólnym nie przekroczyły poziomu dopuszczalnego (ich maksymalna wartość wyniosła 2,7 m/s<sup>2</sup>).



Rys. 5. Wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedziska operatora oraz dzienna ekspozycja operatora na drgania w funkcji prędkości przemieszczania głowic urabiających podczas wykonywania skrawu dolnego oraz górnego z założonymi wartościami parametrów procesu urabiania

Fig. 5. Effective value of accelerations of vibrations of the operator's seat and the daily exposure of the operator to vibrations in the function of velocity of the move of cutting heads during lower and upper cut with the assumed values of parameters of the cutting process



natomiast dopuszczalna wartość dziennej ekspozycji została przekroczona jedynie podczas wykonywania skrawu dolnego z prędkością wychylenia wysięgnika większą od 97 mm/s.

Na rysunku 6 przedstawiono fragmenty przykładowych przebiegów przyspieszeń drgań o najmniejszej (linia niebieska) oraz największej (linia czerwona) intensywności, odpowiadające okresowi obrotu głowic urabiających. W przypadku symulacji urabiania z prędkością obwodową wychylenia wysięgnika  $v_{ow} = 100$  mm/s wartość skuteczna była w przybliżeniu 15-krotnie większa niż podczas urabiania z prędkością  $v_{ow} = 18$  mm/s (odpowiednio 2,7 m/s<sup>2</sup> oraz 0,18 m/s<sup>2</sup>). Wartość dziennej ekspozycji na drgania dla większej z rozpatrywanych prędkości wychylenia wysięgnika wyniosła 1,07 m/s<sup>2</sup> i była ponad 15-krotnie większa od wartości tego parametru uzyskanego dla  $v_{ow} = 18$  mm/s (0,07 m/s<sup>2</sup>). W celu poprawy czytelności rysunku przebiegi przedstawione zostały na dwóch osiach rzędnych (od -20 do +25 m/s<sup>2</sup> dla  $v_{ow} = 100$  mm/s oraz od -2 do +2,5 m/s<sup>2</sup> dla  $v_{ow} = 18$  mm/s).

### 2.3. Wpływ wytrzymałości na ściskanie urabianej skały na drgania na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego

Analiza wpływu wytrzymałości urabianej skały na przebieg przyspieszenia drgań siedziska operatora obejmowała wyniki symulacji komputerowych procesu urabiania wysięgnikowym kombajnem chodnikowym skał o wytrzymałości na ściskanie  $R_c$  z zakresu od 20 do 65 MPa podczas wykonywania skrawu dolnego oraz górnego o wysokości  $h = 200$  mm, z zabiozem  $z = 100$  mm, przy prędkości kątowej głowic urabiających  $\dot{\varphi}_G = 9,24$  rad/s oraz prędkości obwodowej wychylenia wysięgnika  $v_{ow} = 100$  mm/s.

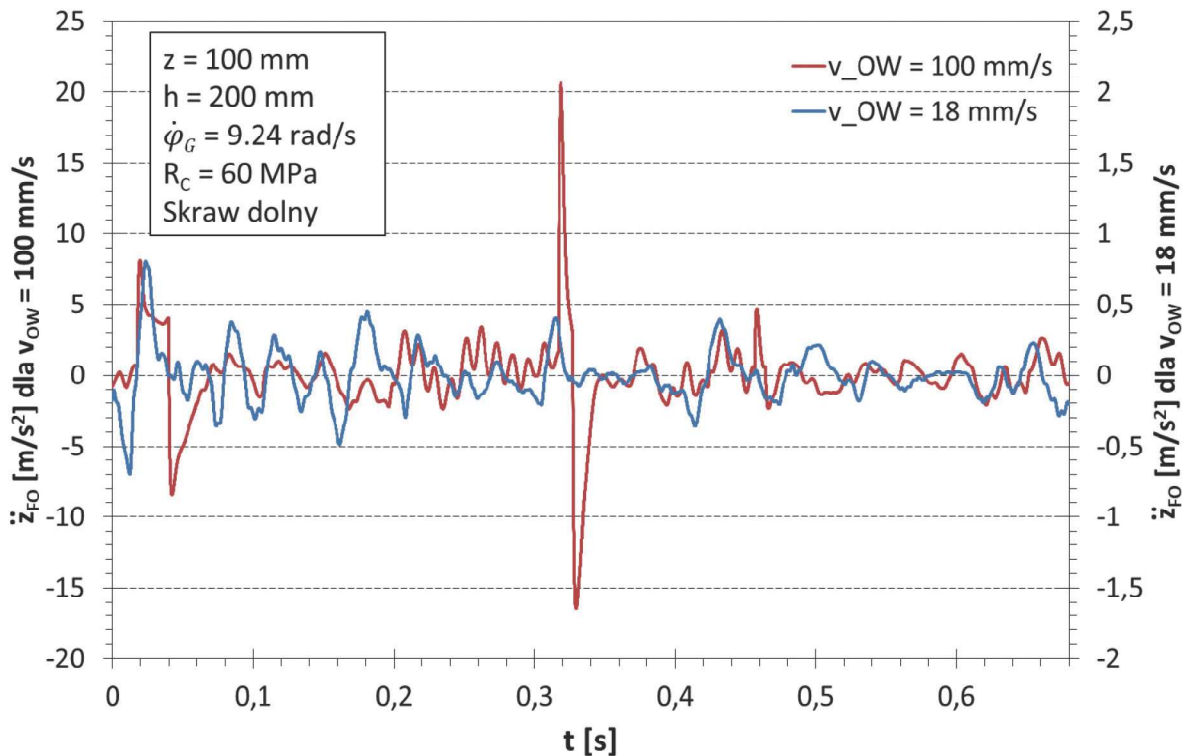
Ze wzrostem wytrzymałości skały na ściskanie intensywność drgań rośnie (rys.7). W przypadku wykonywania skrawu

dolnego zależność wartości skutecznej przyspieszenia drgań oraz wartości dziennej ekspozycji na drgania od wytrzymałości urabianej skały na ściskanie jest aproksymacyjnie paraboliczna. W badanym zakresie zmienności  $R_c$  wartość skuteczna przyspieszenia drgań  $a_{RMS}$  rośnie w granicach od 0,5 m/s<sup>2</sup> – dla  $R_c = 20$  MPa do 2,84 m/s<sup>2</sup> – dla  $R_c = 65$  MPa. Wartość dziennej ekspozycji na drgania  $A(8)$  zmienia się przy tym w granicach od 0,2 m/s<sup>2</sup> do 1,12 m/s<sup>2</sup>. Symulacje komputerowe wykonywania skrawu górnego wykazały, iż dla przyjętych parametrów procesu urabiania wartości parametrów charakteryzujących intensywność drgań były dużo niższe od wartości dopuszczalnych (w przypadku ekspozycji krótkotrwałej ponad sześciokrotnie, a w przypadku ekspozycji dziennej – ponad czterokrotnie). Podobnie jak w poprzednich przypadkach, główne składowe przyspieszenia drgań należą do grupy, na którą organizm ludzki jest szczególnie wrażliwy (w szczególności głowa i kręgosłup).

Wartość skuteczna oraz amplituda przebiegu przyspieszenia drgań podczas urabiania skał o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 65 MPa są ponad pięciokrotnie większe od wartości tych parametrów uzyskanych dla  $R_c = 20$  MPa (rys.8). W przypadku urabiania skał łatwo urabialnych intensywność drgań na stanowisku operatora jest niska i nie stanowi zagrożenia dla operatora. Podczas urabiania skał trudno urabialnych drgania te jednak nasilają się, niekorzystnie oddziałując na operatora kombajnu.

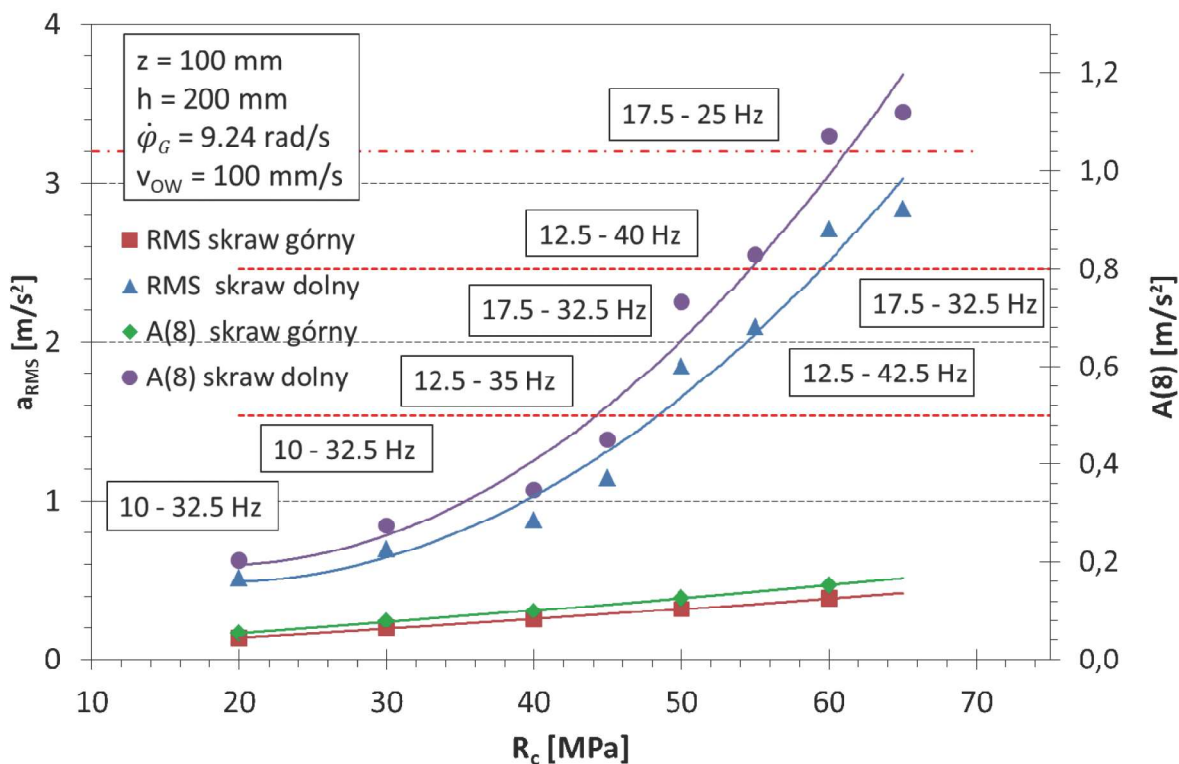
### 2.4. Wpływ wartości współczynnika tłumienia na drgania na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego

Jedną z metod wibroizolacji na stanowiskach pracy operatorów maszyn jest odpowiedni dobór parametrów tłumienia mocowania siedziska (wibroizolacja pasywna). W celu określenia wpływu współczynnika tłumienia w tym mocowaniu



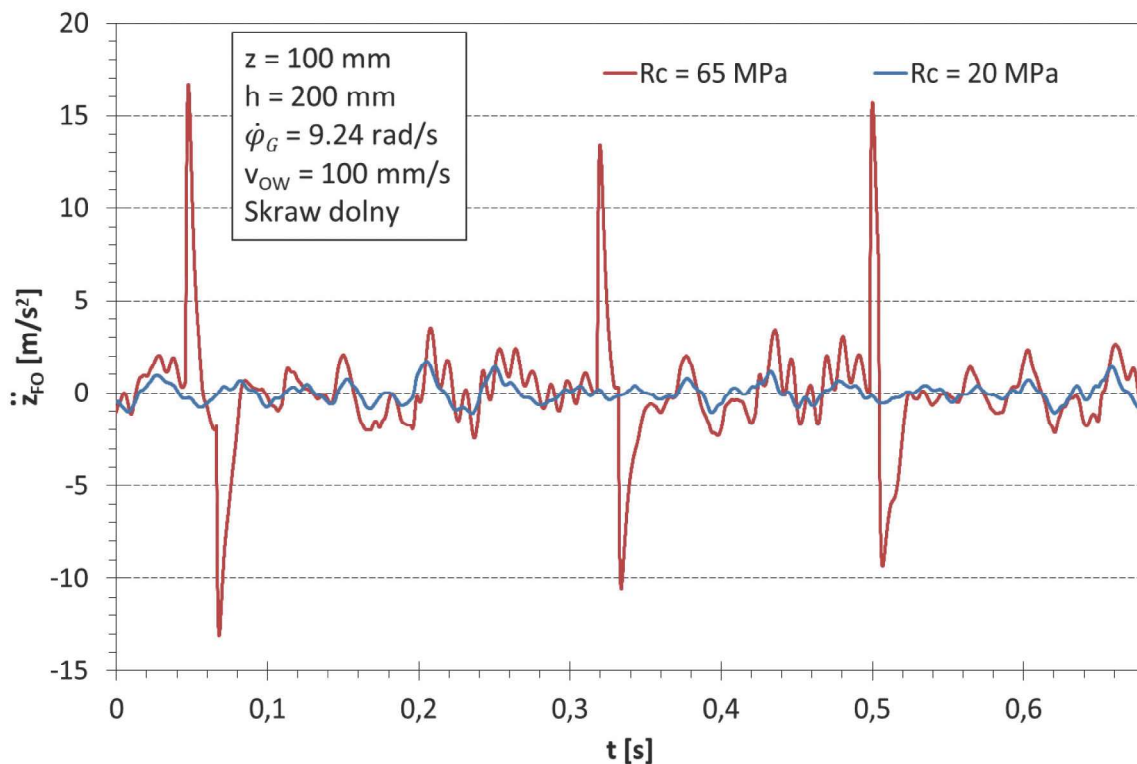
Rys. 6. Porównanie przebiegów przyspieszeń drgań siedziska operatora o najmniejszej i największej spośród badanych intensywności (dla dwóch skrajnych wartości prędkości obwodowej wychylenia wysięgnika)

Fig. 6. Comparison of waveforms of accelerations of vibrations of the operator's seat of the lowest and highest studied intensities (for two extreme values of boom deflection speeds)



Rys. 7. Wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedziska operatora oraz dzienna ekspozycja operatora na drgania w funkcji wytrzymałości na ściskanie urabianych skał

Fig. 7. Effective value of acceleration of vibrations of the operator's seat and daily exposure of the operator to vibrations in the function of mined rocks uniaxial compressive strength



Rys. 8. Porównanie przebiegów przyspieszeń drgań siedziska operatora dla skrajnych, spośród badanych, wartości wytrzymałości na ściskanie urabianych skał

Fig. 8. Comparison of waveforms of accelerations of vibrations of the operator's seat for mined rocks uniaxial compressive strength values which were extremes among the studied values



na charakter przebiegu przyspieszenia drgań oraz wartości charakteryzujących go parametrów przeprowadzono symulacje komputerowe procesu urabiania skał o wytrzymałości na ściskanie wynoszącej 50 MPa. Podobnie jak poprzednio, symulowano wykonywanie skrawu dolnego oraz górnego. Przyjęto przy tym następujące wartości parametrów procesu urabiania:

- zabiór  $z = 100$  mm,
- wysokość skrawu  $h = 200$  mm,
- prędkość kątowa głowic urabiających  $\dot{\varphi}_G = 9,24$  rad/s,
- prędkość obwodowa wychylania wysięgnika  $v_{ow} = 100$  mm/s.

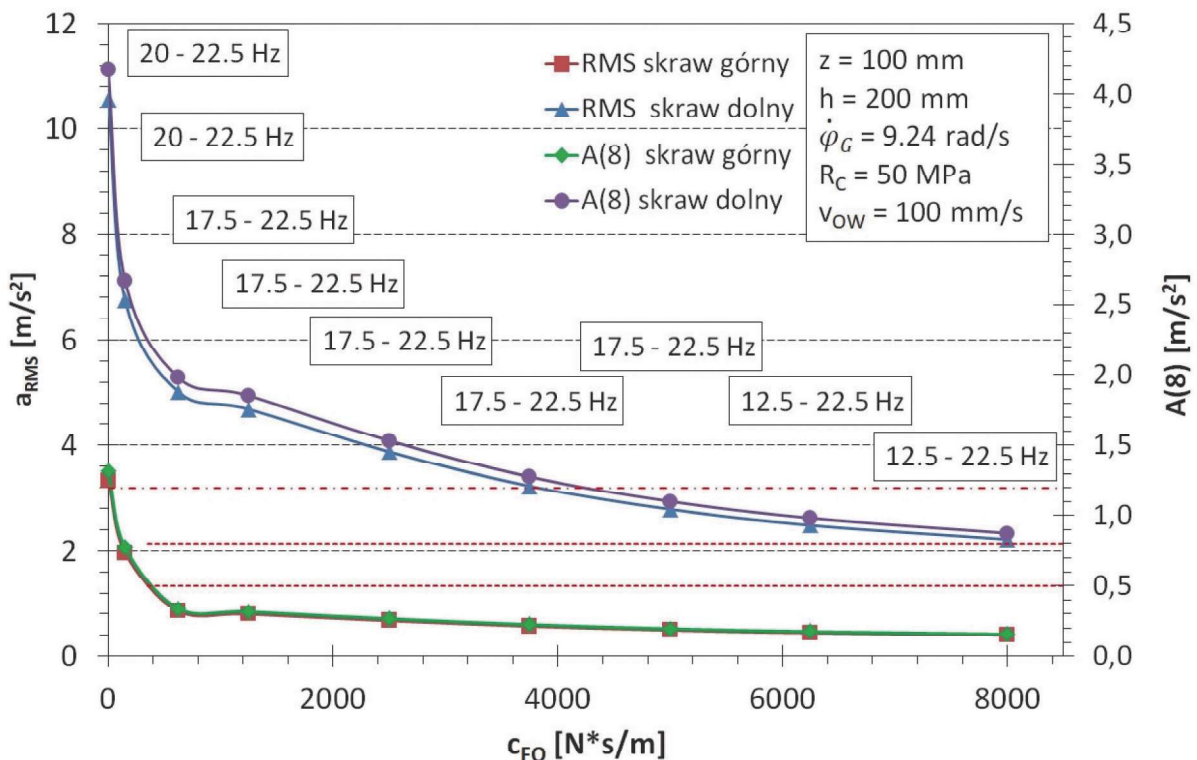
Wpływ wartości współczynnika tłumienia  $c_{FO}$  na przyspieszenia drgań siedziska operatora przedstawiony został na rysunku 9. W przypadku skrawu dolnego, wraz ze wzrostem wartości współczynnika tłumienia w badanym zakresie (od 0 do  $8 \cdot 10^3$  N·s/m) zaobserwować można spadek wartości skutecznej przyspieszenia drgań  $a_{RMS}$  w granicach od 10,6 do 2,2 m/s<sup>2</sup> oraz dziennej ekspozycji na drgania  $A(8)$  – od 4,2 do 0,9 m/s<sup>2</sup> (ponad 4-krotna redukcja). Z kolei, podczas realizacji skrawu górnego, ze wzrostem wartości współczynnika tłumienia w rozpatrywanym przedziale, wartości skuteczna przyspieszenia drgań zmieniała się w przedziale od 3,3 do 0,4 m/s<sup>2</sup>, zaś wartość dziennej ekspozycji malała w przedziale od 1,3 do 0,16 m/s<sup>2</sup>. Wzrostowi wartości współczynnika tłumienia towarzyszy tu zatem ponad 8-krotny spadek wartości analizowanych parametrów charakteryzujących intensywność drgań na stanowisku operatora. Przebiegi zależności:  $a_{RMS} = f(c_{FO})$  oraz  $A(8) = f(c_{FO})$  mają kształt zbliżony do hiperbolicznego. Oznacza to, że największa redukcja intensywności drgań odpowiada zmianom wartości współczynnika tłumienia  $c_{FO}$  w dolnym zakresie badanego przedziału jego zmienności (od zera do  $2 \times 10^3$  N·s/m). Dla wartości współczynnika tłumienia  $c_{FO}$  większych od  $2 \times 10^3$  N·s/m wpływ tłumienia w mocowaniu

siedziska operatora na wartość skuteczną przyspieszenia drgań oraz dzienną ekspozycję na drgania jest wyraźnie mniejszy.

Przebiegi przyspieszeń drgań siedziska operatora dla dwóch skrajnych przypadków: bez tłumienia ( $c_{FO} = 0$ ) oraz maksymalnej, spośród badanych, wartości współczynnika tłumienia ( $c_{FO} = 8 \times 10^3$  N·s/m) różnią się istotnie (rys.10). Brak tłumienia w mocowaniu siedziska operatora powoduje, że przebieg przyspieszenia drgań na stanowisku operatora cechuje się dużą zmiennością z wyraźnie ujawniającym się okresem drgań (wynoszącym około 0,05 s). W przypadku drgań nietłumionych amplituda jest ponad czterokrotnie większa w porównaniu z sytuacją, w której mocowanie siedziska operatora cechuje się dużym tłumieniem drgań. Dzięki zastosowaniu w układzie mocowania siedziska operatora kombajnu elementu tłumiącego o dużym współczynniku tłumienia możliwa jest więc nawet 4-krotna redukcja wartości skutecznej przyspieszenia drgań oraz dziennej ekspozycji na drgania.

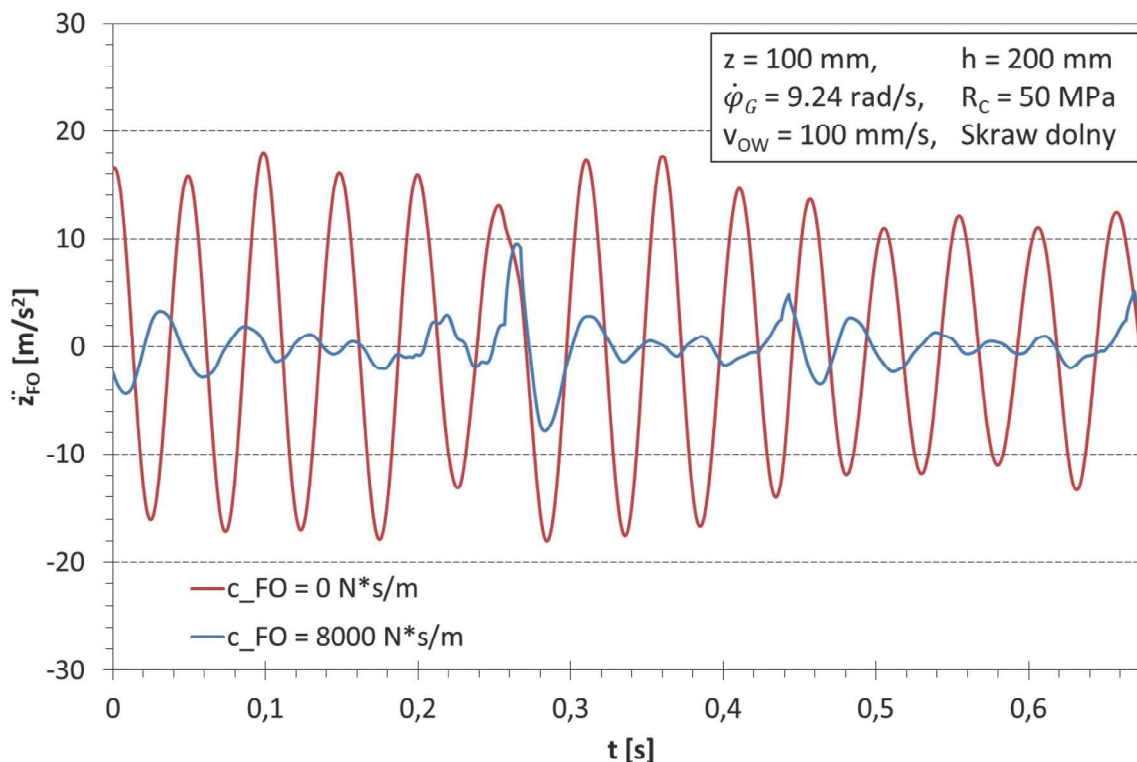
### 3. Podsumowanie

Przy wyznaczaniu dziennej ekspozycji na drgania o działaniu ogólnym na organizm człowieka istotnym czynnikiem wpływającym na szkodliwość wykonywanej pracy jest czas jej wykonywania w stosunku do czasu przebywania pracownika na stanowisku pracy (czasu trwania zmiany). W przypadku kombajnów chodnikowych eksploatowanych w kopalniach węgla kamiennego podczas drążenia wyrobisk korytarzowych, efektywny czas urabiania przypadający na zmianę produkcyjną stanowi przeciętnie 15%. Mimo to, jak wskazują przeprowadzone badania symulacyjne, może dochodzić do przekroczenia dopuszczalnych, określonych przepisami, wartości dziennej ekspozycji na drgania. Sytuacja taka może mieć miejsce zwłaszcza podczas urabiania skał



Rys. 9. Wartość skuteczna przyspieszeń drgań siedziska operatora oraz dzienna ekspozycja operatora na drgania w funkcji współczynnika tłumienia jego mocowania

Fig. 9. Effective value of acceleration of vibrations of the operator's seat and daily exposure of the operator to vibrations in the function of damping coefficient of its mounting



Rys. 10. Porównanie przebiegów przyspieszeń drgań siedziska operatora dla przypadku bez tłumienia ( $c_{FO}=0$  N\*s/m) oraz z dużym tłumieniem ( $c_{FO}=8\times 10^3$  N\*s/m)

Fig. 10. Comparison of waveforms of accelerations of vibrations of the operator's seat without damping ( $c_{FO}=0$  N\*s/m) and at high damping ( $c_{FO}=8\times 10^3$  N\*s/m)

trudno urabialnych, w trakcie wykonywania skrawów dolnych. O intensywności drgań, na których działanie narażony jest operator na stanowisku sterowania kombajnem decyduje wiele czynników. Zaliczyć do nich należy z jednej strony cechy konstrukcyjne kombajnu chodnikowego, w tym między innymi: jego własności dynamiczne (parametry masowe, sprężyste i tłumienie), parametry ruchowe i siłowe oraz stereometrię głowic urabiających. Z drugiej zaś strony – parametry procesu urabiania oraz własności mechaniczne urabianego ośrodka skalnego. Poprzez odpowiednie sterowanie parametrami procesu roboczego (dobór zabioru, wysokości wykonywanych skrawów oraz prędkości ruchu głowic urabiających) możliwe jest ograniczanie intensywności drgań generowanych procesem urabiania tak, aby spełnione były wymagania wynikające z norm z zakresu ergonomii i bezpieczeństwa pracy oraz zapewnione były odpowiednie warunki pracy operatora kombajnu chodnikowego. Skuteczna wibroizolacja stanowiska operatora jest równie istotnym czynnikiem przyczyniającym się do redukcji negatywnego wpływu oddziaływania dynamicznego na operatora w trakcie pracy maszyny. Jak wynika z przeprowadzonych badań komputerowych, poprzez odpowiedni dobór charakterystyki tłumienia mocowania siedziska operatora do ramy głównej kombajnu możliwa jest redukcja drgań na stanowisku operatora kombajnu chodnikowego, a przez to obniżenie narażeń zawodowych wynikających z wysokiej ekspozycji operatora na drgania. Dobór tych charakterystyk możliwy jest w oparciu o wyniki badań symulacyjnych z wykorzystaniem adekwatnych modeli matematycznych badanej maszyny oraz realizowanego przezeń procesu roboczego. Innym sposobem eliminacji narażenia operatora kombajnu chodnikowego na drgania generowane procesem urabiania powierzchni czoła przodku drażnionego wyrobiska korytarzowego jest jego odsunięcie od maszyny na

bezpieczną odległość. Osiągnąć to można dzięki zastosowaniu układu zdalnego sterowania pracą kombajnu chodnikowego.

#### Podziękowania

Praca zrealizowana w ramach projektu pt.: „Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych” dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B2/15/2015).

#### Literatura

- CHELUSZKA P., GAWLIK J. 2016 – Computer modelling of roadheader's body vibration generated by the working process. *Vibrations in Physical Systems* Vol. XXVII, p. 67–74.
- CHELUSZKA P., REMIORZ E., GAWLIK J. 2017 – Simulation investigations of roadheader dynamics for automatic control of cutting process. 17<sup>th</sup> International Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, www.sgem.org, SGEM2017 Conference Proceedings, ISBN 978-619-7105-00-1 / ISSN 1314-2704, 29 June–5 July, 2017, Vol. 17, Issue 13, p. 805–816, DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.102
- CZARNOTA S. 2014 – Analiza intensywności zużycia noży w kombajnie chodnikowym MR340 w zmiennych warunkach eksploatacyjnych. Praca dyplomowa magisterska wykonana w Instytucie Mechanizacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- DOBRY M.W., HERMANN T. 2014 – A Comparison of Human Physical Models Used in the ISO 10068:2012 Standard Based on Power Distribution PART 2, Vol. 26, Poznan University of Technology, Poznań.
- DOLIPSKI M., CHELUSZKA P. 2002 – Dynamika układu urabiania kombajnu chodnikowego. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- DOLIPSKI M., CHELUSZKA P., SOBOTA P., REMIORZ E. 2017 – New computer simulation procedure of heading face mining process with

- transverse cutting heads for roadheader automation. Arch. Min. Sci. 62 (2017), 1, p. 83–104, DOI: 10.1515/amsc-2017-0007.
- GOŁAŚ A., KOWAL J., SZEPSKI M. 1987 – Analiza własności wibroizolatorów aktywnych typu poduszka powietrzna. J. Theor. Appl. Mech., 25, No. 4, pp. 599–609.
- KORADECKA D., KOTON J., LIPOWCZAN A., KOWALSKI P. 2017 – Nauka o pracy – Bezpieczeństwo, higiena, ergonomia. Rozdział 6.4: Drgania mechaniczne (wibracje). Centralny Instytut Ochrony Pracy – strona internetowa: nop.ciop.pl.
- XUEYI L., YONGGANG L., QINGLIANG Z., JINTAO W. 2016 – Nonlinear Dynamics Analysis on Transverse Cutting Heads of Roadheader. Journal of Computational and Theoretical Nanoscience, 13, No. 4, p. 2467–2474.
- MACIEJEWSKI I. 2010 – Kształtowanie właściwości wibroizolacyjnych układu zawieszenia siedziska. Materiały VII Konferencji Naukowo-Technicznej „LogiTrans – Logistyka, Systemy Transportowe, Bezpieczeństwo w Transporcie”, Szczyrk, 14–16 kwietnia 2010 r., s. 1843–1850.
- MARGIELEWICZ J. 2014 – Badania modelowe układu aktywnej wibroizolacji kabin maszyn roboczych. Zesz. Nauk. Politechniki Śląskiej, s. Transport, z. 82, s. 145–154.
- WANG W., YAN L., WANG T., GUAN S., ZHANG C., ZHANG Y., WANG D. 2016 – Dynamic load identification method of rock roadheader using multi neural network and evidence theory. In Proceedings on 2016 IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, August 7–10 2016, Harbin, China, 2016, p. 1238–1243.
- WOJNAROWSKI J. (red.) 1999 – Modele układów maszyna – operator w ograniczaniu oddziaływania drgań wzbudzanych ruchem przerywanym. Zeszyty Katedry Mechaniki Robotów i Maszyn Politechniki Śląskiej, z. 6.
- PN-EN 14253+A1:2011 – Drgania mechaniczne. Pomiar i obliczanie zawodowej ekspozycji na drgania o ogólnym działaniu na organizm człowieka dla potrzeb ochrony zdrowia. Wytyczne praktyczne.
- Rozporządzenie Ministra Pracy i Polityki Społecznej z dnia 6 czerwca 2014 r. w sprawie najwyższych dopuszczalnych stężeń i natężeń czynników szkodliwych dla zdrowia w środowisku pracy (Dz. U. 2014 r. poz. 817).
- Artykuł wpłynął do redakcji – styczeń 2018  
Artykuł akceptowano do druku 20.02.2018

---

## NACZELNY REDAKTOR

w zeszycie 1-2/2010 Przeglądu Górniczego, zwrócił się do kadr górniczych z zachętą do publikowania artykułów ukierunkowanych na wywołanie

### POLEMIKI – DYSKUSJI.

Trudnych problemów, które czekają na rzetelną, merytoryczną wymianę poglądów – jest wiele! Od niej – w znaczącej mierze – zależy skuteczność praktyki i nauki górniczej w działaniach na rzecz bezpieczeństwa górniczego oraz postępu technicznego i ekonomicznej efektywności eksploatacji złóż.

**Od naszego wysiłku w poszukiwaniu najlepszych rozwiązań  
– zależy przyszłość polskiego górnictwa!!!**