

ANALYSIS OF ENERGY FLOW MODEL IN THE BIOMECHANICAL SYSTEM HUMAN OPERATOR – AGRICULTURAL COMBINATION

Summary

Humans are most sensitive to whole body vibration under low-frequency excitation in seated position. Biodynamics of seated human subjects has been a topic of interest over the years, and a number of mathematical models have been established. A simple model that captures the essential dynamics of a seated human exposed to whole body vibration is 4-DOF dynamic models of the human body developed by Wan and Schimmels. After introduction of the excitation we can analyze the response in particular segments of the model. As an example, the operator's head displacement was determined for the cultivation of the soil

ANALIZA MODELU PRZEPEŁYWU ENERGII W SYSTEMIE BIOLOGICZNO- MECHANICZNYM CZŁOWIEK-AGREGAT ROLNICZY

Streszczenie

Człowiek jest najbardziej wrażliwy na drgania o niskich częstotliwościach występujące podczas postawy siedzącej. Modele biodynamiczne siedzącego człowieka są rozwijane od lat i powstało wiele modeli o różnym stopniu złożoności. Jednym z prostszych jest model o czterech stopniach swobody opracowany przez Wana i Schimmelsa. Po wprowadzeniu do modelu wymuszeń można analizować odpowiedź w poszczególnych segmentach modelu. Jako przykład wyznaczono przemieszczenia głowy operatora agregatu do uprawy gleby po wprowadzeniu do modelu przemieszczeń drgań siedziska kierowcy.

1. Wprowadzenie

Drgania mechaniczne, w większości przypadków, są procesami szkodliwymi. Wpływają niekorzystnie na działanie maszyn i mają ujemny wpływ na organizm człowieka. Skuteczne zapobieganie skutkom działania drgań mechanicznych na człowieka wymaga znajomości charakterystyk dynamicznych ciała ludzkiego. Częstotliwości drgań własnych większości narządów człowieka wahają się w granicach 2÷25 Hz, np.: częstotliwości drgań własnych głowy wynoszą 5 Hz i 25 Hz, szczęki 6÷8 Hz, narządów klatki piersiowej 5÷8 Hz, kończyn górnych 3 Hz, narządów jamy brzusznej 4,5÷10 Hz, pęcherza moczowego 10÷18 Hz, kończyn dolnych 5 Hz. Wartości tych częstotliwości określone zostały empirycznie na podstawie wielu długotrwałych badań [2, 7].

Specyficzną cechą sektora rolniczego są bardzo długie czasy ekspozycji na ponadnormatywne drgania miejscowe i ogólne – jest to związane z charakterem prac wykonywanych w rolnictwie [1]. Na stanowisku kierowcy ciągnika rolniczego występują drgania o charakterze niskoczęstotliwościowym.

Dopuszczalne drgania na siedzisku operatora ciągnika określa 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 (Dziennik Ustaw 2005 Nr 212 Poz. 1769).

Drgania na stanowisku pracy o ogólnym działaniu na organizm człowieka są charakteryzowane przez:

– ekspozycję dzienną, wyrażoną w postaci równoważnego energetycznie dla 8 godzin działania skutecznego, ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań, dominującego wśród przyspieszeń drgań, wyznaczonych dla trzech składowych kierunkowych, z uwzględnieniem właściwych współczynników (1,4awx, 1,4awy, awz),

– ekspozycję trwającą 30 minut i krócej, wyrażoną w postaci skutecznego, ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań, dominującego wśród przyspieszeń drgań, wyznaczonych dla trzech składowych kierunkowych, z uwzględnieniem właściwych współczynników (1,4awx, 1,4awy, awz) [5].

Wartość ekspozycji dziennej nie może przekraczać 0,8 m·s².

Wartość ekspozycji trwającej 30 minut i krócej nie może przekraczać 3,2 m·s². Rozporządzenie Ministra Gospodarki i Pracy w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy pracach związanych z narażeniem na hałas lub drgania mechaniczne z dnia 5 sierpnia 2005 r. określa wartość progu działania. Dla ekspozycji dziennej wyrażonej w postaci równoważnego energetycznie dla 8 godzin działania skutecznego, ważonego częstotliwościowo przyspieszenia drgań, dominującego wśród przyspieszeń drgań, wyznaczonych dla trzech składowych kierunkowych z uwzględnieniem właściwych współczynników (1,4awx, 1,4awy, awz) - wartość progu działania wynosi 0,5 m·s².

W odniesieniu do pomiarów i oceny drgań ogólnych, zapisy procedury badania drgań na stanowiskach pracy w zakresie mierzonych wielkości są identyczne z zapisami normy międzynarodowej ISO 2361-1:1997 dotyczącymi środowiska pracy i zapisami projektu normy europejskiej EN 14253:2002 [5].

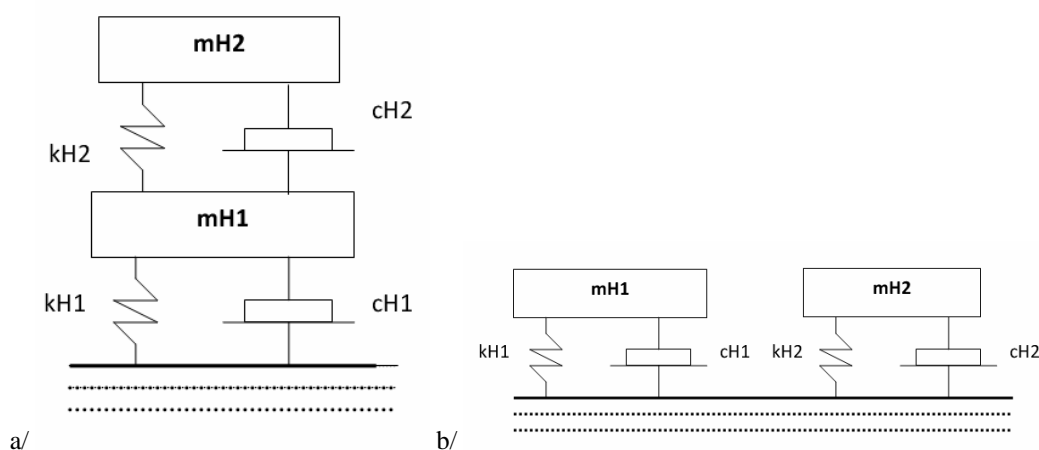
2. Biodynamiczne modele ciała człowieka

Modele biodynamiczne ciała człowieka tworzone są najczęściej jako modele strukturalne o kilku stopniach swobody. Najprostsze modele siedzącego człowieka, to modele o 1 stopniu swobody. Najczęściej jednak do badań siedzącego człowieka tworzy się bardziej złożone modele o 2-5 stopniach swobody. Najczęściej jest stosowany model o dwóch stopniach swobody (rys. 1).

Wskaźniki poziomu wibracji przenoszonej na ciało operatora (WBV) i zalecany dzienny czas ekspozycji podczas obsługi odpowiednich maszyn rolniczych:

L.p.	Rodzaj prac maszynami rolniczymi	Całkowity zakres poziomu wibracji [m/s^2]	Maksymalny czas narażenia operatora na oddziaływanie wibracji [h]
1.	Praca kombajnem	0,4 - 0,8	24 - 6
2.	Bronowanie maszynami aktywnymi	0,2 - 1,2	24 - 3
3.	Zwijanie bel	0,3 - 1,5	24 - 2
4.	Zbiór pasz	0,5 - 1,5	15 - 2
5.	Pielęgnacja żywoplotów rowów	0,5 - 1,5	15 - 2
6.	Siew nasion	0,9 - 1,5	5 - 2
7.	Opylanie i opryskiwania	1,0 - 1,6	4 - 1,5
8.	Orka	1,0 - 1,6	4 - 1,5
9.	Bronowanie	0,7 - 2,1	8 - 1
10.	Koszenie	0,9 - 2,1	5 - 1
11.	Przetrzęsanie siana	1,1 - 2,7	3 - 0,5
12.	Transport	1,0 - 2,7	4 - 0,5

Uwaga: Podczas prac na kombajnie poziom WBV w zakresie 0,4 – 0,8 $m \cdot s^{-2}$ oznacza, że przy wielkości 0,4 $m \cdot s^{-2}$ maksymalny czas ekspozycji wynosi 24 godz., a przy wielkości 0,8 $m \cdot s^{-2}$ maksymalny czas ekspozycji wynosi 6 godz.



Rys. 1. Model strukturalny siedzącego operatora jako układ o dwóch stopniach swobody (a) lub 2 układy o jednym stopniu swobody (b) [4]

Fig. 1. 1-DOF (a) and 2-SDOF (b) human whole-body model [4]

Parametrami modelu o dwóch stopniach swobody według Faraha [4] są:

- $mH1=74,5$ kg,
- $mH2=7,3$ kg
- $kH1=149,2$ kN/m,
- $kH2=15,4$ kN/m,
- $cH1=2,85$ kNs/m,
- $cH2=0,086$ kNs/m.

Parametrami modelu złożonego z dwóch układów o jednym stopniu swobody wg ISO 5982 [5] są:

- $mH1=69$ kg,
- $mH2=6$ kg,
- $kH1=68$ kN/m,
- $kH2=24$ kN/m,
- $cH1=1,54$ kNs/m,
- $cH2=0,19$ kNs/m.

Na rys. 2 przedstawiono model czteromasowy człowieka siedzącego. Elementami modelu są [4]:

- $m4$ – głowa (4,17 kg),
- $m3$ – górna część tułowia (15 kg),
- $m2$ – dolna część tułowia (5,5 kg),

- $m1$ – miednica (36 kg),
- $m0$ – siedzisko.

Przyjęto według Wana i Schimmelsa następujące wartości poszczególnych sztywności K i tłumień C w modelu ciała człowieka: $k4=134400$; $k3=10000$; $k31=192000$; $k2=20000$; $k1=49340$ [N/m]; $c4=250$; $c3=200$; $c31=909.1$; $c2=330$ $C1=2475$ [kg/s].

Znając parametry fizyczne modelu systemu człowiek-ciągnik można wyznaczyć funkcje odpowiedzi częstotliwościowej (charakterystyki widmowe) modelu ciała człowieka.

Model ciała człowieka można opisać równaniem:

$$[M]\{\ddot{x}\} + [C]\{\dot{x}\} + [K]\{x\} = \{f\}, \quad (1)$$

gdzie siła wymuszająca ma postać:

$$\{f\} = \{c1\dot{z}_0 + k1z_0, 0, 0, 0\}, \quad (2)$$

W dziedzinie częstotliwości równanie ma postać:

$$\{Z(j\omega)\} = [[K] - \omega^2[M] - j\omega[C]]^{-1}\{F_z(j\omega)\}, \quad (3)$$

wektor

$$Z(j\omega) = \{Z_1(j\omega), Z_2(j\omega), Z_3(j\omega), Z_4(j\omega)\}$$

zawiera zespolone przemieszczenia (odpowiedzi na wymuszenie) w poszczególnych masach n układu w funkcji częstotliwości.

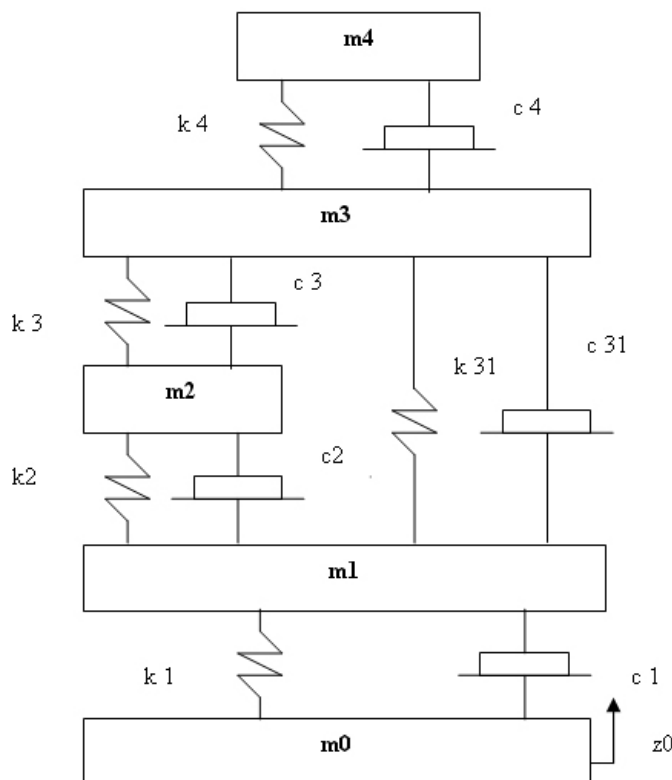
Wektor $F_z(j\omega)$ zawiera zespoloną siłę wymuszającą przyłożoną do poszczególnych mas. W przypadku wymuszenia od siedziska

$$F_z(j\omega) = \{(k1 + j\omega c1)Z_0(\omega), 0, 0, 0\},$$

gdzie: $Z_0(\omega)$ jest amplitudą przemieszczenia siedziska [4].

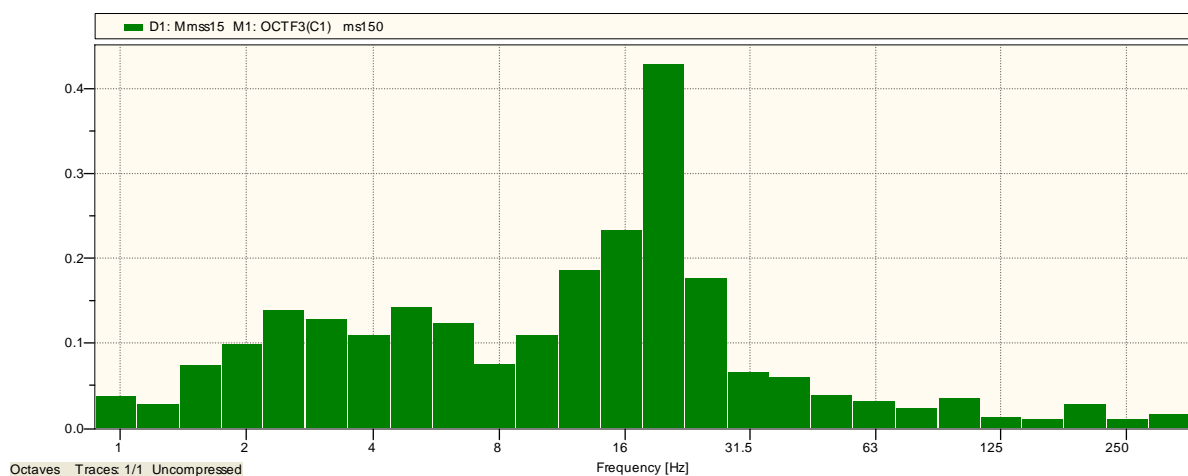
3. Drgania na siedzisku agregatu do upraw przedsięwziętych z nowej generacji narzędziami uprawowymi w funkcji prędkości pracy agregatu

W Przemysłowym Instytucie Maszyn Rolniczych przeprowadzono badania polowe agregatu do upraw przedsięwziętych, pracującego z różnymi prędkościami roboczymi: 5; 7,5; 10; 12,5 i 15 km/h. W trakcie badań mierzono amplitudy drgań mechanicznych w węzłowych punktach agregatu oraz drgania mechaniczne o oddziaływaniu miejscowym na siedzisku operatora. Pomiar drgań na siedzisku wykonano w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach „x” „y” „z”. Na rys. 3-5 zamieszczono widma tercjowe przyspieszeń drgań siedziska wyznaczone podczas pracy z prędkością 15 km/h.



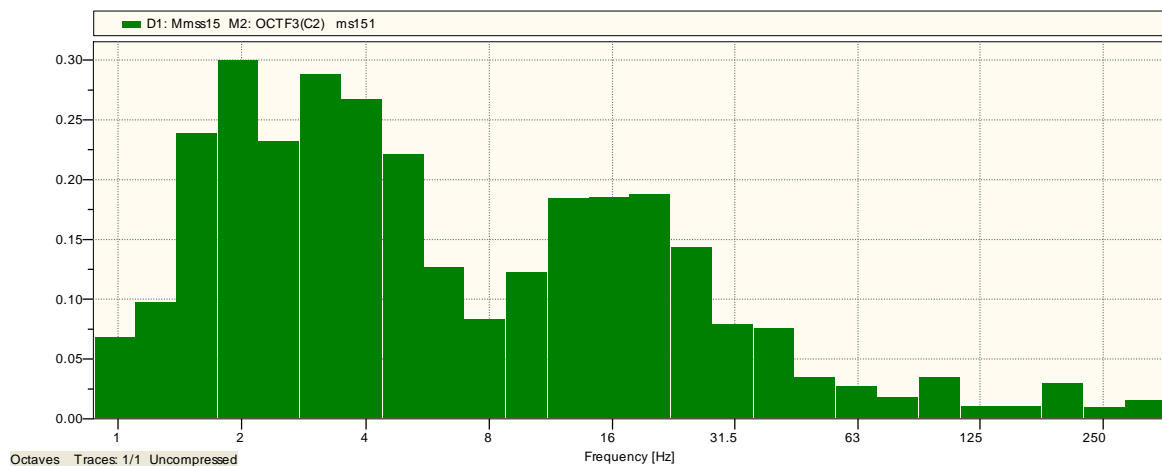
Rys. 2. Model strukturalny siedzącego operatora ciągnika o 4 stopniach swobody [3]

Fig. 2. 4-DOF seated human whole-body model [3]



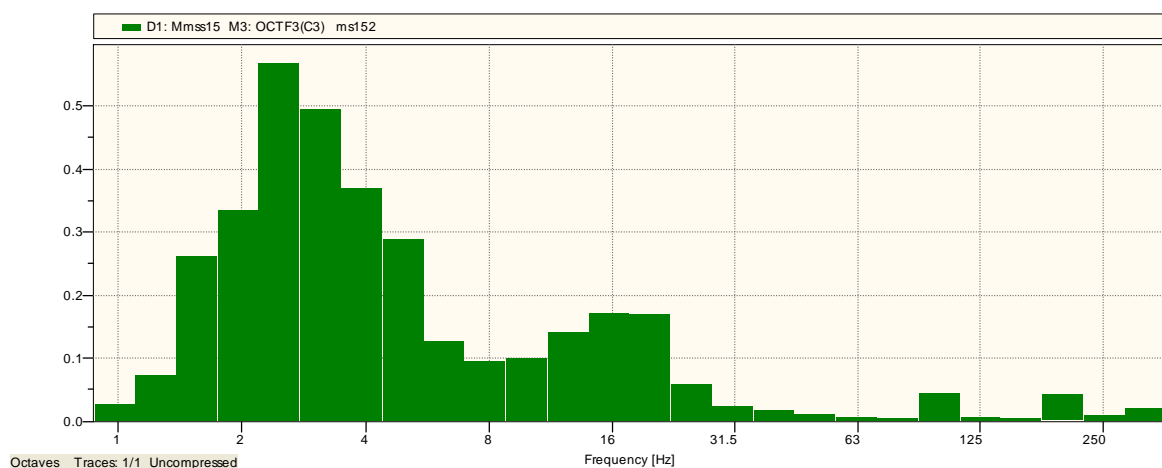
Rys. 3. Przykładowe widmo tercjowe przyspieszeń drgań na siedzisku operatora agregatu wyznaczone dla składowej „x” (wzdłuż kierunku jazdy) podczas pracy agregatu $v = 15$ km/h

Fig. 3. The example of 1/3 octave spectrum of the accelerations of vibrations in operator’s seat of the aggregate (direction “x”, speed $v = 15$ km/h)



Rys. 4. Przykładowe widmo tercjowe przyspieszeń drgań na siedzisku operatora agregatu wyznaczone dla składowej „y” podczas pracy agregatu $v = 15$ km/h

Fig. 4. The example of 1/3 octave spectrum of the accelerations of vibrations in operator's seat of the aggregate (direction "y", speed $v = 15$ km/h)



Rys. 5. Przykładowe widmo tercjowe przyspieszeń drgań na siedzisku operatora agregatu wyznaczone dla składowej „z” podczas pracy agregatu $v = 15$ km/h

Fig. 5. The example of 1/3 octave spectrum of the accelerations of vibrations in operator's seat of the aggregate (direction "z", speed $v = 15$ km/h)

Wyznaczono sumę wektorową, średniokwadratową wartości ważonych przyspieszeń drgań dla poszczególnych składowych x, y, z drgań, obliczoną ze wzoru:

$$(a_w)_{wek} = \sqrt{[1,4(a_w)_x]^2 + [1,4(a_w)_y]^2 + [(a_w)_z]^2} \quad (4)$$

Drgania występujące na siedzisku kierowcy rosną wraz ze wzrostem prędkości roboczej agregatu. Dla prędkości jazdy agregatu 15 km/h dopuszczalny czas pracy operatora wynosi 1,5 godziny dziennie.

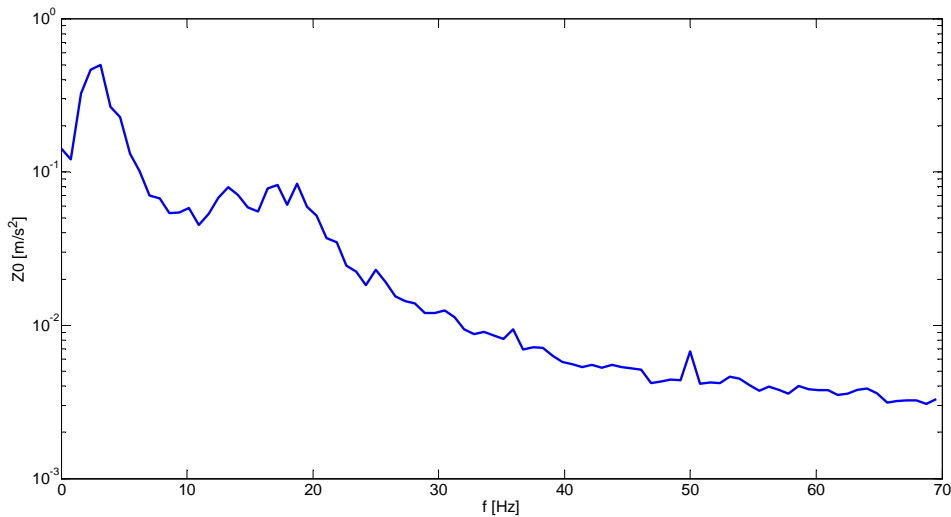
Na rys. 6 zamieszczono widmo przyspieszeń drgań mechanicznych siedziska wyznaczone podczas jazdy agregatu z prędkością 15 km/h.

Uzyskane wyniki badań mogą być wprowadzone do modelu biodynamicznego operatora i na tej podstawie można wnioskować o przenoszeniu drgań na poszczególne elementy modelu. Jako przykład, na rys. 7 przedstawiono widmo przemieszczeń drgań głowy operatora uzyskane po wprowadzeniu do modelu o czterech stopniach swobody wymuszenia zmierzonego na siedzisku kierowcy.

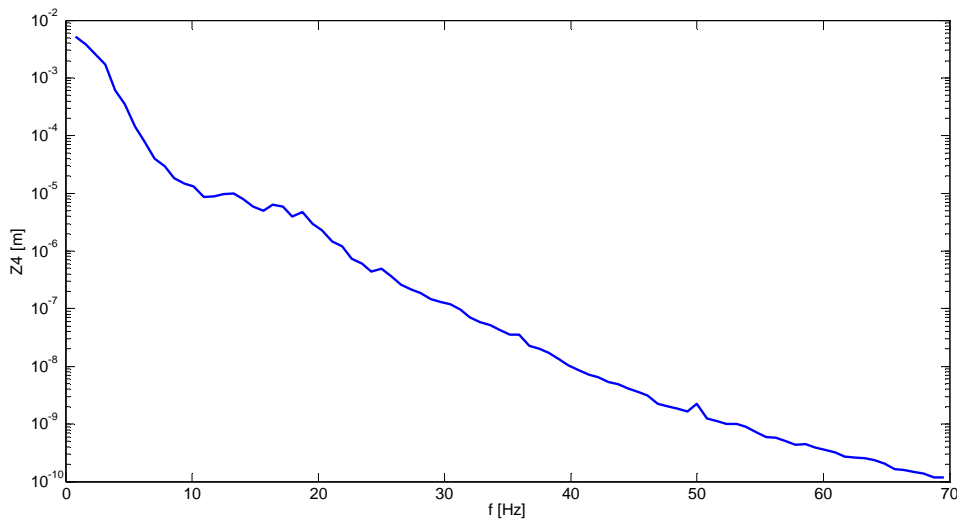
Tab. 1. Wartości ważne oraz suma wektorową, średniokwadratową wartości ważonych przyspieszeń drgań dla poszczególnych składowych x, y, z podczas pracy agregatu z różnymi prędkościami roboczymi

Table 1. The vector-sum (root-sum-of-squares) vibration magnitude and the r.m.s. acceleration values measured in three orthogonal directions during the work of the aggregate at various working speeds

Wartości ważne dla poszczególnych kierunków drgań	Prędkość robocza agregatu [km/h]				
	5	7,5	10	12,5	15
„x”	0.2436	0.2589	0.3286	0.5413	0.4452
„y”	0.2448	0.3393	0.4128	0.5919	0.6055
„z”	0.3000	0.4287	0.5871	1.0082	1.1409
$(a_w)_{wek}$	0.9131	1.1020	1.3114	1.7583	1.8409
dopuszczalny czas pracy t [min]	360	250	175	95	90



Rys. 6. Widmo FFT przyspieszeń siedziska w kierunku pionowym wyznaczone podczas pracy agregatu z prędkością 15 km/h
 Fig. 6. The FFT spectrum of seat's accelerations in the vertical direction appointed during the work of the aggregate at the speed of 15 km/h



Rys. 7. Widmo FFT przemieszczeń głowy operatora w kierunku pionowym wyznaczone z modelu układu o 4 stopniach swobody (prędkość agregatu 15 km/h)
 Fig. 7. The FFT spectrum of operator's head displacement in the vertical direction computed from 4-DOF model (aggregate speed 15 km/h)

4. Wnioski

1. Znajomość strukturalnego modelu operatora ciągnika pozwala na wyznaczenie charakterystyk dynamicznych modelu oraz na badanie przepływu energii między elementami modelu.
2. Podczas badań agregatu do upraw przedsięwziętych z nowej generacji narzędziami uprawowymi stwierdzono, że wartości prędkości drgań mechanicznych o ogólnym działaniu na organizm człowieka są około 2 razy wyższe podczas pracy z prędkością 15 km/godz. aniżeli dla przy prędkości 5 km/godz.

5. Literatura

- [1] Cieślowski B.: Modelling of the vibration damping in an operator's seat system. TEKA Kom. Mot. Energ. Roln. – OL PAN, 2009, 9: 24-31.

- [2] Engel Zb., Kowal J.: Sterowanie procesami wibroakustycznymi. Wydawnictwa AGH Kraków, 1995.
- [3] Farah A.: Human response: A criterion for the assessment of structural serviceability. Thesis (PhD). University of Waterloo, Ontario, Canada, 1977.
- [4] Cho-Chung Liang, Chi-Feng Chiang: A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration. International Journal of Industrial Ergonomics, 2006, 36: 869-890.
- [5] ISO – Vibration and shock – Mechanical driving point impedance of the human body. ISO 5982:1981. Geneva, Switzerland: International Organization for Standardization (ISO), 1981.
- [6] Książek M.A.: Modelowanie i optymalizacja układu Człowiek-wibroizolator-maszyna. Politechnika Krakowska, Kraków, 1999.
- [7] Nowak B.: Ocena wpływu drgań siedziska pojazdu mechanicznego na operatora. Praca magisterska, ATR Bydgoszcz, 2001.
- [8] Osiński Z.: Tłumienie drgań. Warszawa: PWN, 1997.

Publikacja powstała w wyniku realizacji projektu badawczego własnego nr N N313 789040 Symulacyjne metody energetyczne wyznaczania obciążeń dynamicznych oddziałujących na operatora agregatów rolniczych.