

XVI Konferencja Naukowo-Techniczna

TKI2022

TECHNIKI KOMPUTEROWE W INŻYNIERII

18–21 października 2022

Biomechaniczny model człowieka do badań bezpieczeństwa operatorów maszyn

Paulina Działak¹, Jacek Karliński¹, Paweł Maślak¹

¹Katedra Konstrukcji Badań Maszyn i Pojazdów, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wroclawska
email: paulina.dzialak@pwr.edu.pl, jacek.karliński@pwr.edu.pl, pawel.maslak@pwr.edu.pl

STRESZCZENIE: Autorzy opracowali prosty model biomechaniczny siedzącego człowieka do badań dynamicznych związanych z możliwością wystąpienia obciążeń o charakterze udarowym. Założono, iż ciało ludzkie można zastąpić jednowymiarowym modelem wielomasowym (w formie mas skupionych połączonych sprężynami i tłumikami o odpowiednich parametrach). Tego typu modele są stosowane do badań ergonomii w pojazdach, jednak są one dostosowane do znacznie mniejszych obciążeń dynamicznych niż te, które działają na operatora w sytuacjach wypadkowych w kopalniach. W literaturze opisanych zostało wiele takich modeli, w których charakterystyki sztywności i tłumienia są stałe. Z uwagi na specyfikę analizowanych obciążeń działających na operatora skupiono się głównie na modelach służących do analizy sił pionowych. Autorzy zaimplementowali jeden z modeli ciała ludzkiego posiadający 4 stopnie swobody do analizy obciążeń dynamicznych o charakterze udarowym. Poprzez zmodyfikowanie charakterystyk sztywności umożliwili jego zastosowanie do wymuszeń dynamicznych charakteryzujących się dużymi przemieszczeniami. Walidacja opracowanego modelu została wykonana z wykorzystaniem pełnowymiarowego modelu człowieka w pozycji siedzącej znajdującym się na fotelu operatora, umieszczonego w kabinie.

SŁOWA KLUCZOWE: bezpieczeństwo bierne, biomechanika, MES

1. Wstęp

Wymagania stawiane konstrukcjom chroniącym operatorów maszyn ograniczają się do oceny skutków przewrócenia się maszyny (ROPS – ang. Roll-Over Protective Structure) oraz oceny skutków zdarzeń związanych ze spadającymi przedmiotami (FOPS – ang. Falling Object Protective Structure) [1]. Badania te w żaden sposób nie określają obrażeń operatorów. Opisują jedynie deformacje ustroju nośnego kabiny i poddają analizie przestrzeń chronioną wewnątrz kabiny, która nie może zostać naruszona. Wiele zaistniałych sytuacji wypadkowych wskazuje jednak, iż nie jest to wystarczające do oceny bezpieczeństwa operatorów. Potrzebne jest określenie oraz ocena kryteriów biomechanicznych, a także uwzględnienie innych czynników wywołujących wypadki zagrażające zdrowiu i życiu operatorów.

Analiza sytuacji wypadkowych na przestrzeni ostatnich kilku dekad potwierdza, iż aktualne normy nie zapewniają wystarczającej ochrony operatorów maszyn przy udarowych obciążeniach o kierunku pionowym. Za jedno z największych zagrożeń autorzy uznali obrażenia operatorów spowodowane wyrzutem maszyny w górę. W kopalniach podziemnych jest to spowodowane m. in. wypiętrzeniem spągu, w wyniku którego maszyna jest wyrzucana w kierunku pionowym. Skutkuje to często stałym uszczerbkiem na zdrowiu, a nawet śmiercią operatora, co jest związane z ograniczoną przestrzenią nad głową operatora, wynikającą bezpośrednio z niskiej wysokości transportowej maszyny.

Autorzy przeprowadzili analizę numeryczną takiego zjawiska wykorzystując pełnowymiarowy, antropometryczny model człowieka, uwzględniający jego

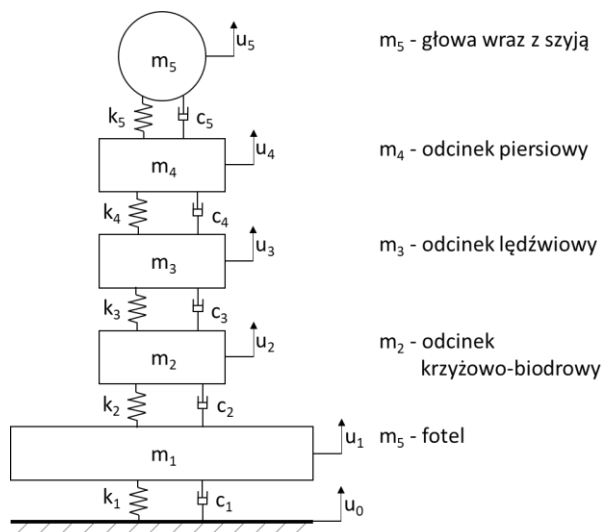
biomechanikę (rys. 1). Zostało to wykonane za pomocą połączenia dwóch programów: MADYMO oraz LS-Dyna.



Rys. 1. Pełnowymiarowy model manekina wraz z fotelem i kabiną operatora

Określone zostały obrażenia, jakich może doznać operator w zależności od prędkości z jaką wyrzucana jest maszyna. Badania te umożliwiły ocenę bezpieczeństwa operatora dla wielu różnych sytuacji wypadkowych. Metoda ta nie jest jednak wolna od wad. Obliczenia pełnego modelu człowieka wraz z fotelem i kabiną są skomplikowane i czasochłonne, a stosowane oprogramowanie jest kosztowne i wymaga specjalistycznej wiedzy w tym zakresie. W związku z tym, autorzy podjęli próbę uproszczenia tego modelu tak, by opisywana metoda badawcza mogła być szerzej wykorzystywana do badań bezpieczeństwa operatorów. Opracowany został jednowymiarowy model siedzącego człowieka, którego odpowiedź dynamiczna na zadane wymuszenia jest zbliżona

do pełnowymiarowego manekina usadowionego na fotelu operatora (rys. 2).



Rys. 2. Zastosowany, uproszczony model operatora wraz z fotelem, o 5 stopniach swobody

Jest to model o 5 stopniach swobody, którego analizę można przeprowadzić za pomocą dowolnego oprogramowania umożliwiającego analizy dynamiczne. Model został opisany za pomocą różniczkowych równań ruchu przedstawionych poniżej (1).

$$m_1 \cdot \ddot{u}_1 + c_1(\dot{u}_1 - \dot{u}_0) + k_1(u_1 - u_0) - c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) - k_2(u_2 - u_1) = 0$$

$$m_2 \cdot \ddot{u}_2 + c_2(\dot{u}_2 - \dot{u}_1) + k_2(u_2 - u_1) - c_3(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) - k_3(u_3 - u_2) = 0$$

$$m_3 \cdot \ddot{u}_3 + c_3(\dot{u}_3 - \dot{u}_2) + k_3(u_3 - u_2) - c_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) - k_4(u_4 - u_3) = 0$$

$$m_4 \cdot \ddot{u}_4 + c_4(\dot{u}_4 - \dot{u}_3) + k_4(u_4 - u_3) - c_5(\dot{u}_5 - \dot{u}_4) - k_5(u_5 - u_4) = 0$$

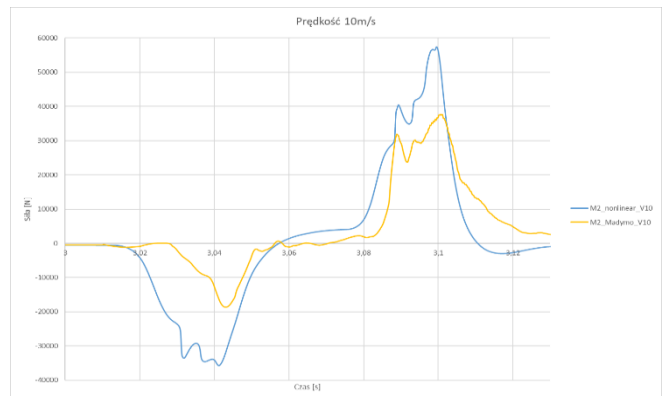
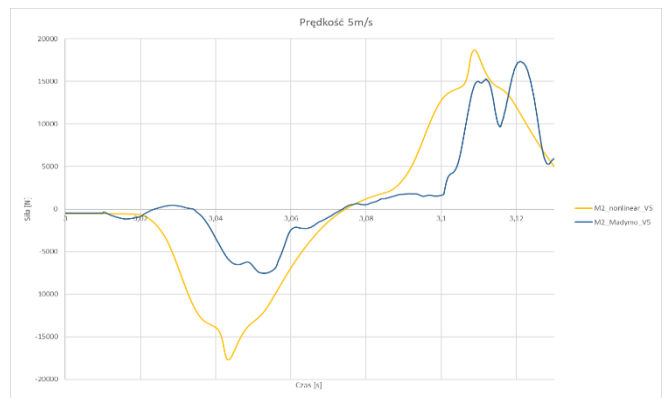
$$m_5 \cdot \ddot{u}_5 + c_5(\dot{u}_5 - \dot{u}_4) + k_5(u_5 - u_4) = 0 \quad (1)$$

gdzie: m_n – masa kolejnych członów; u_n – ugięcie; k_n – sztywność, będąca nieliniową funkcją ugięcia; c_n – tłumienie.

2. Porównanie modeli

Do wykonania modelu jednowymiarowego autorzy posłużyli się istniejącymi już modelami opracowanymi do oceny ergonomii maszyn i pojazdów [2]. Zostały one opracowane na podstawie badań eksperymentalnych na ludziach, poddawanych niskim wymuszeniom dynamicznym (wibracje o relatywnie małych częstotliwościach) bezpiecznym dla zdrowia badanych. Jednak nie sprawdzają się one dla większych wymuszeń, z jakimi mierzą się operatorzy maszyn [3].

Autorzy wprowadzili modyfikację istniejących już modeli w taki sposób, aby ich odpowiedź dynamiczna była taka sama jak w przypadku pełnowymiarowych manekinów, również dla dużych wymuszeń kinematycznych. Opracowano odpowiednie parametry, które pozwalają na dostosowanie takiego modelu do odmiennych obciążeń. W celu weryfikacji poprawności opracowanego modelu porównano wyniki dla różnych prędkości wymuszeń dla obu analizowanych modeli (rys. 3).



Rys. 3. Porównanie wyników obciążeń odcinka krzyżowo-biodrowego operatora dla dwóch różnych prędkości wyrzutu maszyny: 5 i 10 m/s; niebieski – model jednowymiarowy, żółty – model pełnowymiarowy

3. Podsumowanie

Autorzy przeprowadzili porównanie wyników uzyskanych z dwóch modeli, do analizy których przyjęto te same warunki brzegowe. Jeden z nich to pełnowymiarowy model operatora wraz z fotelem i kabiną, drugi natomiast to autorski model jednowymiarowy.

- 1) Opracowano dwa modele umożliwiające analizę sytuacji wypadkowych w kopalniach, które do tej pory nie były brane pod uwagę przy badaniach bezpieczeństwa.
- 2) Wprowadzono jednowymiarowy model ciała człowieka umożliwiający relatywnie prostą i szybką analizę obciążeń działających na ciało człowieka, który może we wstępnej analizie zastąpić model pełnowymiarowy.
- 3) Parametry pozwalające zastosować do tej analizy wielomasowy model o 5 stopniach swobody zostały opracowane na podstawie autorskiej metody.

Opracowany model może służyć także do analizy innych sytuacji i zjawisk, nie tylko do oceny bezpieczeństwa operatorów maszyn górniczych.

Literatura

- [1] Kalita M., *Konstrukcja ochronna operatora ładowarki górniczej w świetle przepisów i badań niszcących*, Maszyny Górnicze, Vol. 20, No. 4, pp. 322-334, 2013.
- [2] Liang C. C., Chiang C. F., *A study on biodynamic models of seated human subjects exposed to vertical vibration*, International Journal of Industrial Ergonomics, Vol. 36, No. 10, pp. 869-890, 2006.
- [3] Działak P., Rusiński E., Karliński J., Ptak M., *Analiza obciążeń działających na operatorów samodzielną maszyn górniczych podczas tapani*, Górnictwo Odkrywkowe, Vol. 55, No. 4/5, pp. 191-196, 2014.