

Badania innowacyjnego rozwiązania kabiny operatora dla dołowych maszyn samojezdnych

Antoni Kalukiewicz, Piotr Gospodarczyk, Grzegorz Stopka

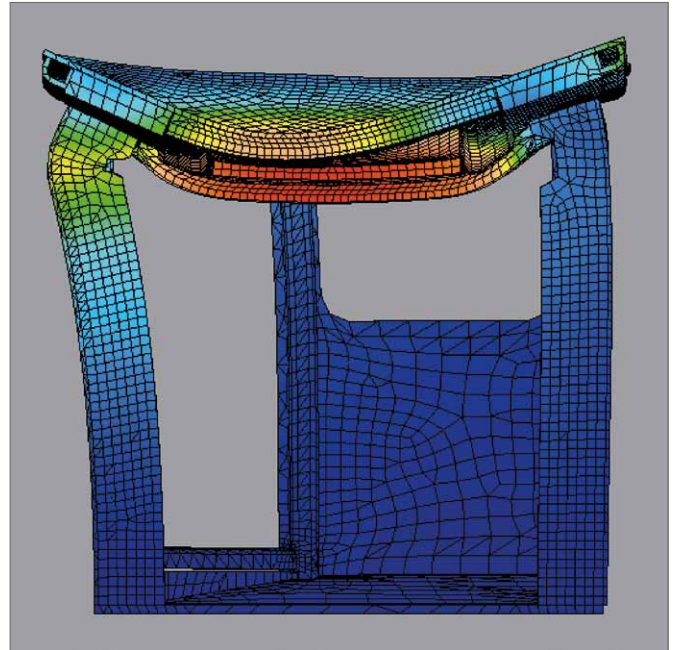
1. Wstęp

Jednym z zagadnień podejmowanych w ramach badań prowadzonych w Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie są aspekty bezpieczeństwa eksploatacji maszyn pracujących w ekstremalnych warunkach górniczych. Małe wysokości maszyn samojezdnych, wynikające z konieczności dostosowania gabarytów do niskich wyrobisk, stwarzają podstawowe problemy przy projektowaniu kabin operatorów w taki sposób, by zagwarantować operatorom maszyn możliwie najlepsze warunki pracy i możliwie najwyższy poziom bezpieczeństwa. W Katedrze MGpIT podejmowane są prace zmierzające zarówno do poprawy ergonomii pracy operatora, jak i zapewnienia mu odpowiedniej ochrony przed czynnikami zewnętrznymi. Do tego celu wykorzystywane są aplikacje CAD i CAE, które pozwalają na weryfikację i modyfikację konstrukcji celem poprawy jej wytrzymałości. Oprócz prac mających na celu opracowanie metodyki badań symulacyjnych weryfikujących konstrukcje kabin jednocześnie prowadzone są badania nad modelem nowych układów zabezpieczających i absorbujących energię uderzenia, celem zminimalizowania potencjalnych zagrożeń wynikających z uderowego charakteru obciążenia kabiny operatora.

W artykule przedstawiono wyniki dotychczasowych prac związanych z badaniami symulacyjnymi wybranej konstrukcji kabiny operatorskiej. Zakres badań symulacyjnych obejmował wykonanie testu obciążenia uderowego kabiny z uwzględnieniem dużych odkształceń kabiny, a także przeprowadzenie analiz mających na celu ocenę przydatności tzw. kinetycznego tłumika energii do redukcji skutków dynamicznych obciążeń konstrukcji kabin. Z uwagi na złożoność zagadnienia powstała konieczność zastosowania, oprócz narzędzi modelowania, analiz kinematyki, dynamiki i wytrzymałości oraz zintegrowanych analiz dynamiczno-wytrzymałościowych.

2. Badania symulacyjne wytrzymałości kabiny na uderzenia uderowe

Na bazie opracowanego modelu wirtualnego wybranej konstrukcji kabiny operatorskiej w pierwszym etapie prac przeprowadzono badania symulacyjne wytrzymałości kabiny na uderzenia uderowe. Warunki brzegowe modelu zdefiniowano na podstawie programu badań stanowiskowych kabin maszyn roboczych zawartych w normie PN-92/G-59001 (RSPS) „Samojezdne maszyny górnicze. Konstrukcje chroniące operatora przed obwałami skał. Wymagania i badania”. Obliczenia wytrzymałościowe wykonano z wykorzystaniem programu Autodesk Simulation (moduł Mechanical Event Simulation). Nieliniową analizę dynamiczną uderowego obciążenia kabiny spadającą

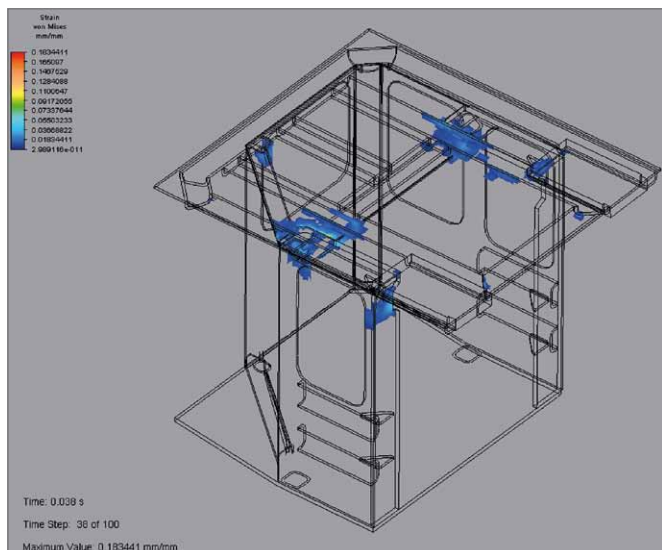


Rys. 1. Deformacja konstrukcji kabiny operatorskiej, będąca wynikiem obciążenia uderowego

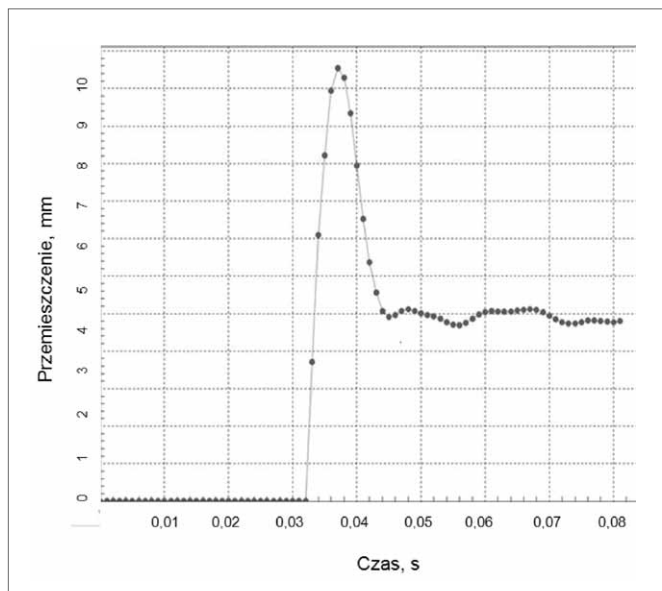
masą przeprowadzono dla wartości energii uderzenia równej 60 000 J. Na rys. 2–3 pokazano przykładowe wyniki przeprowadzonych analiz.

Zasadniczym celem analizy wytrzymałościowej konstrukcji kabiny było określenie maksymalnej dynamicznej strzałki ugięcia, będącej wynikiem obciążenia dynamicznego. Na bazie przeprowadzonych testów ustalono, że maksymalna wartość dynamicznej strzałki ugięcia konstrukcji kabiny wynosi około 12 mm, a więc jest znacznie mniejsza od wartości dopuszczalnej, jaką określa norma PN-92/G-59001 (RSPS). Na skutek uderzenia stwierdzono jednak występowanie licznych odkształceń plastycznych konstrukcji. Uplastycznieniu uległy obszary połączenia środkowej belki daszka z belkami wzdłużnymi oraz pas blachy mocowanej do słupa nośnego tylnej części kabiny. Taka postać i skala trwałej deformacji kabiny sprawia, że konstrukcja ta praktycznie przestaje być użyteczna, gdyż nie spełnia wymogów zapewnienia bezpieczeństwa obsługi w wypadku dalszych obciążeń uderowych.

Aby zredukować deformacje, a przez to umożliwić dalszą skuteczną pracę kabiny lub umożliwić danej konstrukcji przeniesienie większych obciążeń niż założone w trakcie próby, zde-



Rys. 2. Rozkład odkształceń plastycznych kabiny po przeprowadzonych próbach

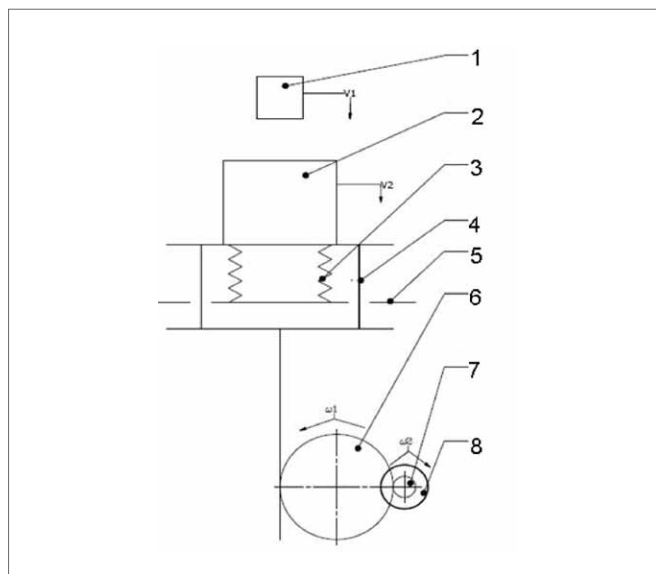


Rys. 3. Dynamiczna strzałka ugięcia konstrukcji kabiny

cydowano się na zastosowanie kinetycznego absorbera energii, mogącego skutecznie dyssypować energią pochodzącą od obciążeń udarowych. Koncepcja i struktura przyjętego dyssypatora energii przedstawiona jest w kolejnym rozdziale.

3. Analizy dynamiczne konstrukcji kabiny z zastosowanym układem tłumiącym

Podstawą działania kinetycznego dyssypatora energii jest zamiana strumienia energii uderzenia na energię kinetyczną mas wirujących. Schemat fizyczny dyssypatora przedstawia rys. 4. Ideą zaprezentowanego rozwiązania jest możliwość częściowej redukcji energii uderzenia, a więc zmniejszenia sił dynamicznych działających na konstrukcję kabiny, poprzez zastosowanie układu mas wirujących połączonych z konstrukcją kabiny. Absorpcja energii uderzenia obciążnikiem jest wynikiem zamiany energii kinetycznej ruchu postępowego kabiny na energię



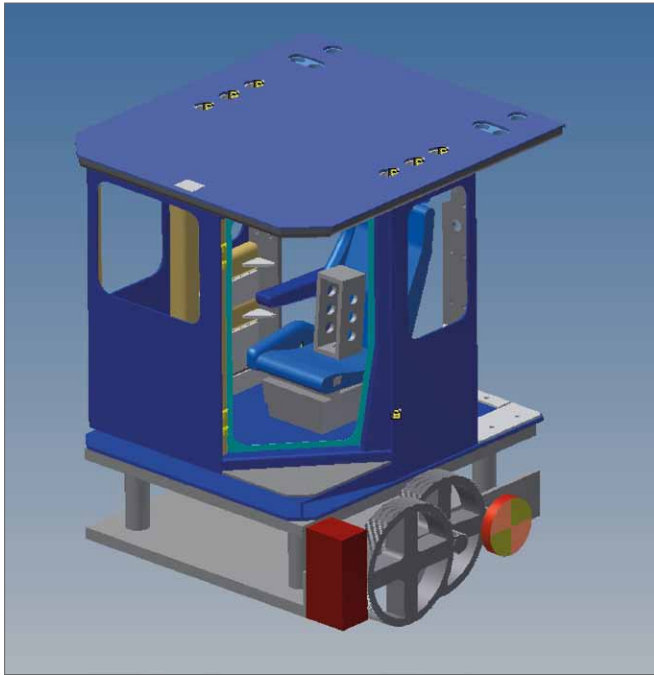
Rys. 4. Model fizyczny stanowiska wirtualnego: 1 - obciążnik; 2 - kabina, 3 - pakiet sprężyn; 4 - układ prowadzący; 5 - rama stanowiska; 6 - koło wolnobieżne; 7 - koło szybkobieżne; 8 - masa akumulująca

kinetyczną ruchu obrotowego masy akumulującej (8). Kabina jest w tym wypadku zamocowana suwliwie względem ramy stanowiska (5) i amortyzowana pakietem sprężyn (3). Napędzenie masy akumulującej możliwe jest dzięki układowi przekładni mechanicznej, którą ograniczono do minimalnej liczby elementów w postaci koła wolno- i szybkobieżnego (6 i 7). Na wale wyjściowym koła szybkobieżnego osadzona jest wirująca masa akumulująca.

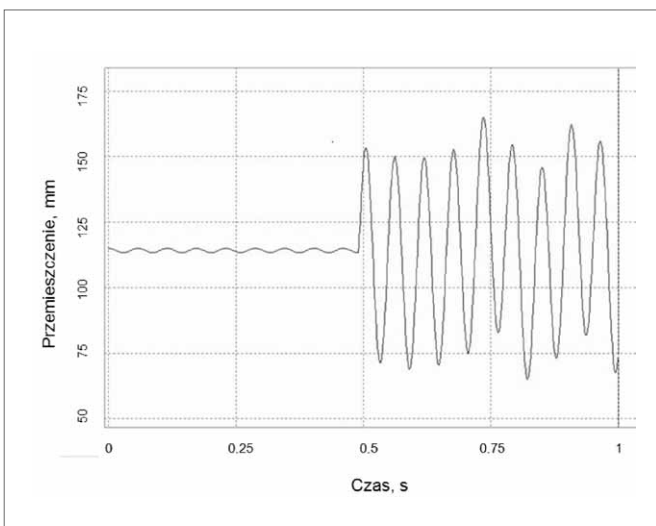
W oparciu o przedstawioną strukturę kinematyczną modelu opracowano jego postać 3D, celem integracji z badaną konstrukcją kabiny. Prace modelowe przeprowadzono w środowisku Autodesk Inventora, a ich efekt pokazuje rys. 5.

Proces absorpcji energii przez opisany układ jest zjawiskiem złożonym, a o jego przebiegu i efektywności decyduje szereg parametrów konstrukcyjnych. Wymienić tu należy zwłaszcza całkowite przełożenie przekładni absorbera i wartość masowego momentu bezwładności masy akumulującej. Ocena potencjału opisanego wyżej tłumika w konstrukcjach kabin wymagała zatem iteracyjnej optymalizacji parametrów absorbera przy wykorzystaniu środowiska symulacyjnego. Badania symulacyjne polegały na przeprowadzeniu prób obciążeń kabiny spadającym obciążnikiem, zgodnie z wymaganiami opisanymi w normie PN-92/G-59001, dla różnej konfiguracji wyżej wymienionych parametrów związanych z konstrukcją absorbera energii i określeniu ich wpływu na wielkość pochłoniętej energii. Do badań wykorzystano środowisko dynamiki bryły sztywnej programu Autodesk Inventor. Jako miarę dla porównania wielkości pochłoniętej energii przez układ tłumiący przyjęto wychylenie masy drgającej, która została zamocowana przy pomocy dwóch sprężyn do ramy, a tę z kolei utwierdzono do siedziska operatora. Przykładowe wyniki testów symulacyjnych prezentują rys. 6 i 7.

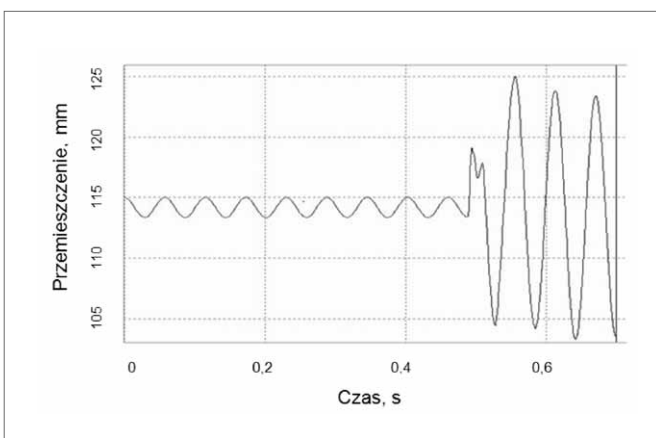
Badania symulacyjne potwierdziły możliwość absorpcji energii uderu poprzez proponowany układ tłumiący. Odpowiedni dobór wartości przełożenia całkowitego przekładni absorbera



Rys. 5. Kabina z zamontowanym kinetycznym absorberem energii



Rys. 6. Przemieszczenie masy drgającej względem oprawy układu drgającego w przypadku wyłączonego absorbera energii

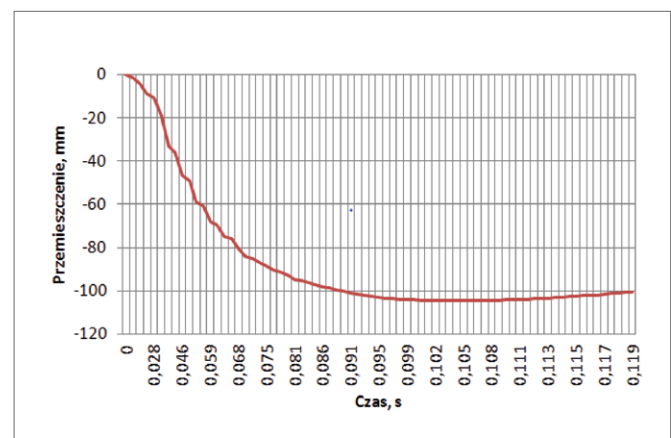


Rys. 7. Przemieszczenie masy drgającej względem oprawy układu drgającego w przypadku wyłączonego absorbera energii

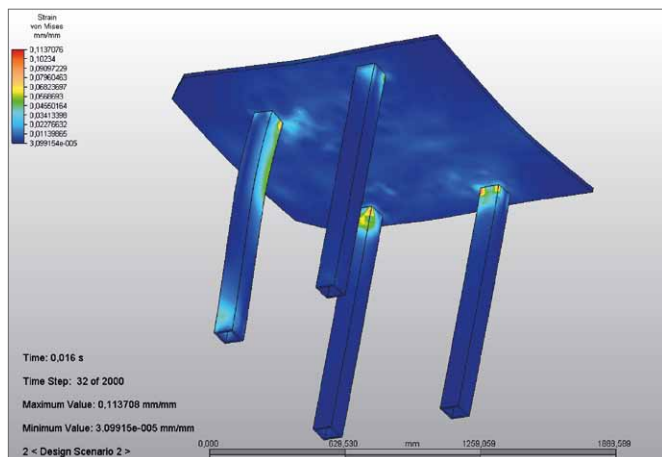
oraz masowego momentu bezwładności masy akumulującej pozwolił na znaczący spadek amplitudy przemieszczeń masy drgającej, znajdującej się wewnątrz kabiny operatora. Efektywność absorbera potwierdziły także analizy przebiegów sił w sprężynach zawieszenia kabiny. Pozytywne wyniki analiz kinematycznych i dynamicznych skłoniły zatem do podjęcia dalszych prac, ukierunkowanych na określenie wpływu zastosowanego tłumika energii na naprężenia i odkształcenia konstrukcji podanej obciążeniom udarowym.

4. Badania porównawcze naprężeń występujących w konstrukcji kabiny w aspekcie zastosowania kinetycznego absorbera energii.

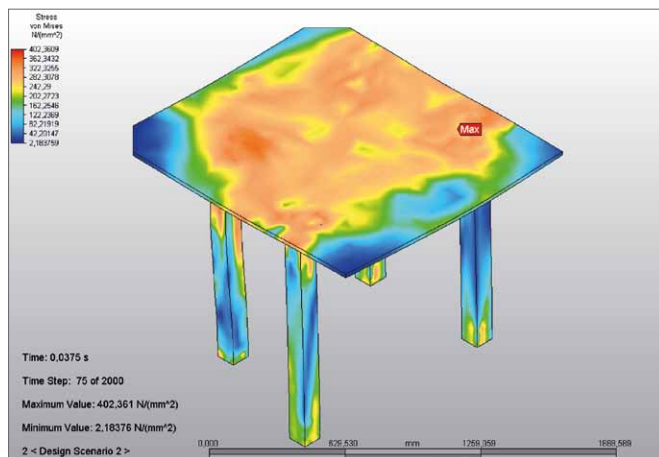
Pozytywne wyniki analiz dynamicznych z udziałem kinetycznego absorbera energii dały podstawę do przeprowadzenia porównawczych analiz wytrzymałości konwencjonalnej konstrukcji kabiny oraz kabiny z aktywnym układem tłumiącym. Z uwagi na dużą złożoność obliczeniową przeprowadzonych prób, a przez to znaczną ich czasochłonność, dla efektywniejszego przeprowadzenia analiz konstrukcja kabiny została poddana uproszczeniu. W analizowanym przypadku rozważana jest tylko konstrukcja nośna, przejmująca największą część energii udaru (co wykazały analizy przedstawione na wcześniejszych etapach). Model uproszczony nie zawiera płaszczyzny podstawy kabiny, w zastępstwie której utwierdzeniu uległy dźwigary nośne na swojej spodniej powierzchni. W przypadku standardowego rozwiązania kabiny przyjęto identyczne warunki brzegowe jak w przypadku opisanym w rozdziale drugim. Dla kabiny wyposażonej w absorber energii przyjęto kinematyczne wymuszenie w postaci przemieszczenia podstawy kabiny, będące pochodną dynamicznej interakcji masy obciążającej z tłumioną kabiną (rys. 8). Przeprowadzone analizy miały na celu wyznaczenie dwóch najistotniejszych rozkładów parametrów, a mianowicie naprężenia zredukowanego oraz odkształcenia konstrukcji (rys. 9–10). Parametry te zostały zestawione na odpowiadających sobie wykresach. Poza tym analizowano przemieszczenia wybranych punktów kabiny celem identyfikacji dynamicznych strzałek ugięcia konstrukcji. Na rys. 13 przedstawiono przebiegi dynamicznej strzałki ugięcia w punkcie, będącym geometrycznym środkiem dachu kabiny, dla układu bez absorbera i układu z aktywnym absorberem energii.



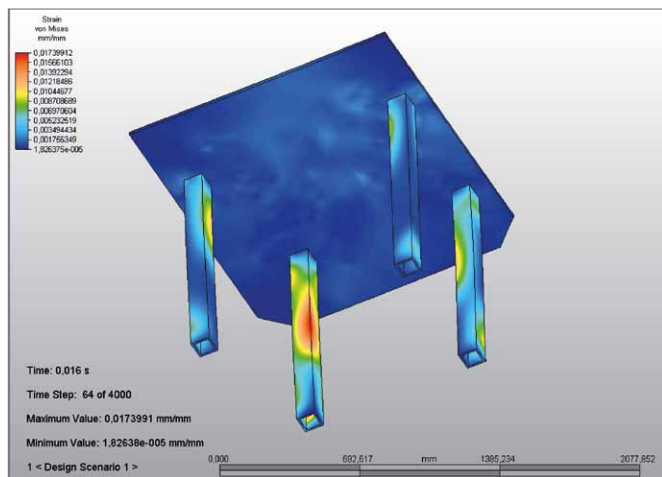
Rys. 8. Charakterystyka przemieszczenia podstawy kabiny wyposażonej w absorber energii



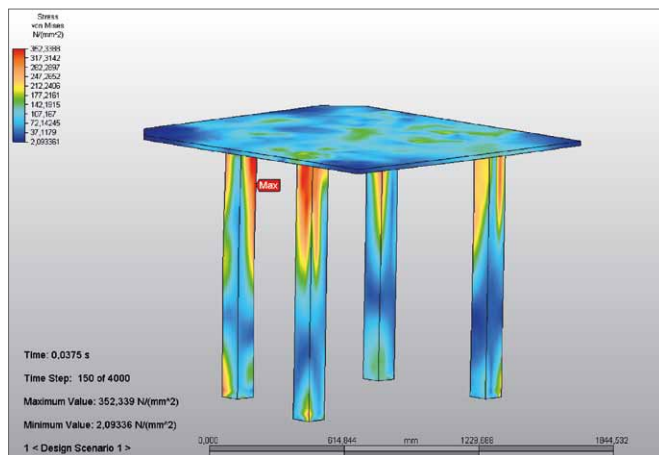
Rys. 9. Obraz odkształceń kabiny po 16 ms od uderzenia dla kabiny bez absorbera energii. Maksymalne odkształcenie 0,11



Rys. 11. Obraz maksymalnych naprężeń zredukowanych próby uderzenia dla kabiny bez absorbera energii. Maksymalne naprężenie ok. 402 MPa



Rys. 10. Obraz odkształceń kabiny po 16 ms od uderzenia dla kabiny z zastosowanym absorberem. Maksymalne odkształcenie 0,017



Rys. 12. Obraz maksymalnych naprężeń zredukowanych próby uderzenia dla kabiny z absorberem energii. Maksymalne naprężenie ok. 352 MPa (spadek o 13%)

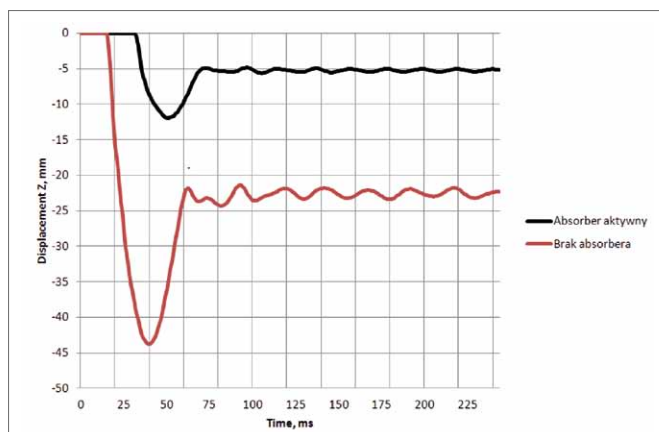
Jak można łatwo zauważyć, zastosowanie kinetycznego absorbera energii ograniczyło wartość dynamicznej strzałki ugięcia kabiny o około 75%. Również średnia wartość maksymalnego odkształcenia plastycznego kabiny została zredukowana niemal o 80%.

W analizowanych modelach nie sposób wiarygodnie porównać przebiegu wartości bezwzględnych naprężeń zredukowanych w czasie, ze względu na zbyt duży stopień uproszczenia stosowanego modelu. Do wykonania ostatecznej analizy porównawczej niezbędnym staje się wykonanie bardziej szczegółowego modelu, przy wykorzystaniu dedykowanego środowiska symulacyjnego, takiego jak Ansys, LSdyna lub Autodesk Simulation.

Wnioski końcowe

Badania symulacyjne kabiny operatorskiej wyposażonej w innowacyjny układ tłumiący dają podstawę do sformułowania następujących wniosków:

- Wyniki analiz potwierdziły możliwość absorpcji energii uderzenia poprzez proponowany układ tłumiący.
- Przeprowadzone analizy dynamiczne wykazały wyraźny spadek wartości przemieszczenia masy drgającej, a więc spadek



Rys. 13. Porównanie dynamicznej strzałki ugięcia dla układu bez absorbera i układu z aktywnym absorberem energii

jej przyspieszenia, w przypadku, gdy układ tłumiący był włączony.

- Wykonane analizy wytrzymałościowe z udziałem uproszczonej konstrukcji nośnej kabiny dają podstawę do stwierdzenia korzystnego wpływu wykorzystania kinetycznego absorbera energii do redukcji obciążeń konstrukcji kabiny operatorskiej.


- Na efekt pochłaniania energii przez badany układ wyraźnie wpływa całkowita wielkość przełożenia przekładni absorbera oraz wartość masowego momentu bezwładności masy akumulacyjnej względem osi jej obrotu.
- Przebadany symulacyjnie nowy układ tłumiący jest koncepcją interesującą, a wyniki badań symulacyjnych z jego udziałem wskazują na potrzebę rozwijania i badania nowych, innowacyjnych rozwiązań absorberów energii, które poza zastosowaniem w układach ochronnych maszyn roboczych, mogą znaleźć dużo szersze zastosowania przemysłowe. Jest to jednak tylko koncepcja strukturalna. Jednym z koniecznych kroków, które należy podjąć do osiągnięcia celu wdrożenia, jest rozszerzenie zakresu dotychczasowych badań modelowych, co będzie tematyką przyszłych prac badawczych i rozwojowych. Pozwoli to na racjonalną parametryzację konstrukcji, co jest warunkiem jej praktycznej użyteczności jako wyposażenia maszyny górniczej.

Literatura

- [1] Badania symulacyjne w projektowaniu innowacyjnego rozwiązania spągoadowarki – Simulation tests in designing an innovative

solution of a dinting machine / Piotr GOSPODARCZYK, Grzegorz STOPKA, Paweł MENDYKA // Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze: przenośniki, dźwignice, pojazdy, maszyny robocze, napędy i sterowanie, urządzenia pomocnicze; ISSN 1899-5489.

- [2] Zastosowanie kinetycznego absorbera energii uderzenia w kabinach górniczych maszyn samojezdnych w celu zwiększenia bezpieczeństwa pracy operatorów – Possibility of application kinetic impact energy absorber in cabin construction to increase safety of mining operators of mobile machinery / Piotr GOSPODARCZYK, Grzegorz STOPKA, Paweł MENDYKA // W: Problemy bezpieczeństwa w budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń górnictwa podziemnego: monografia / pod red. Krzysztofa Krauze; Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego Sp. z o.o. – Łódź: CBiDGP Sp. z o.o., 2013.

 **Antoni Kalukiewicz** – AGH w Krakowie
Piotr Gospodarczyk – AGH w Krakowie
Grzegorz Stopka – AGH w Krakowie

artykuł recenzowany