

ANALIZA DYNAMIKI WIELONACZYNIOWYCH KOPAREK KOŁOWYCH TYPU KWK

ANALYSIS OF THE DYNAMICS OF THE BUCKET WHEEL EXCAVATORS TYPE KWK

Eugeniusz Rusiński, Przemysław Moczko, Damian Pietrusiak – Katedra Konstrukcji i Badań Maszyn, Wydział Mechaniczny, Politechnika Wrocławska

W artykule przedstawiono zestawienie z badań eksperymentalnych trzech wielonaczyiniowych koparek kołowych typu KWK 1200, KWK 1500 oraz KWK 1500.1 pracujących w Kopalni Węgla Brunatnego „Turów”. Przeprowadzono porównanie poziomów drgań występujących podczas pracy maszyn i przeanalizowano je pod kątem różnic konstrukcyjnych, które mogą mieć wpływ na dynamikę przebadanych obiektów.

In the paper the results of the experimental measurements of the vibrations level of the machines type KWK 1200, KWK 1500 and KWK 1500.1 are presented. All of the machines operate in the Polish lignite mine KWB “Turów”. The analysis of the accelerations were performed with relation to the superstructure construction differences which could influence to the structure dynamics.

Wstęp

Koparki wielonaczyiniowe kołowe typu KWK należą do maszyn średniej wielkości, których masa nadwozia znajduje się w przedziale 800 do 1000 Mg. Cechują się one dość podobną konstrukcją nadwozia, które składa się z wysięgnika koła czerpakowego, wysięgnicy koła czerpakowego, wysięgnika przeciwwagi i platformy nadwozia. Pewne różnice można dostrzec w budowie części centralnej nadwozia. Koparka KWK 1500 posiada wieżę, określaną również pylonem oraz dodatkowe cięgno i podporę wysięgnika przeciwwagi. Koparka KWK 1200 nie posiada tych elementów, jednak nowsze maszyny tego typu wyposażone są w dodatkowy maszt w tym rejonie konstrukcji. Bardzo istotnym faktem jest, iż wszystkie prezentowane maszyny są dziełem polskiej myśli technicznej i wyprodukowane zostały przez krajowy przemysł. Mowa tutaj o koparkach KWK1200, KWK1500, KWK1500.1 oraz o nieistniejącej już koparce KWK 1400, która uległa katastrofie [6]. Wszystkie te maszyny pracują w Kopalni Węgla Brunatnego „Turów” w Bogatyni. Koparka KWK 1200 została oddana do ruchu w 1996 roku, koparka KWK 1500 w 1992 roku, natomiast koparka KWK 1500.1 jest maszyną zupełnie nową i została oddana do ruchu w drugiej połowie 2013 roku. Konstrukcja koparki KWK 1500.1 bazuje na koparce KWK 1500, jednakże wprowadzono wiele modyfikacji ustroju nośnego bazując na doświadczeniach w eksploatacji jej pierwowzoru. Dodatkowo wprowadzone zostały liczne zmiany konstrukcyjne i optymalizacyjne, które opracowano na podstawie przeprowadzonych kompleksowych analiz w zakresie wytrzymałości doraźnej, zmęczeniowej, wybozeniowej i dynamicznej. Warty podkreślenia jest fakt, że jest to pierwsza maszyna podstawowa w Polsce (i prawdopodobnie na świecie) objęta tak kompleksowym zakresem prac obliczeniowych (wykorzystujących metodę elementów skończonych) i badawczych (weryfikacja konstrukcji po wdrożeniu do eksploatacji), wykraczających poza wymagania norm projektowych. Istotnym podkreślenia jest fakt, iż jest to maszyna, która fabrycznie została wyposażona w wiele nowoczesnych rozwiązań np. takich jak mechatroniczne sprzęgło przeciążeniowe układu urabiania zabudowane na zmodyfikowanej przekładni napędu

koła czerpakowego, układ monitorowania wyężenia ustroju nośnego nadwozia, najnowszy system automatyki i sterowania pracą maszyny, nowe czerpaki z zębami wymiennymi typu R12E8 i inne.

Zjawiska dynamiczne występujące w trakcie eksploatacji maszyn podstawowych górnictwa odkrywkowego generują drgania ich ustrojów nośnych. Doświadczenia płynące z ich eksploatacji wskazują jednoznacznie, że są to zjawiska niezwykle istotne z punktu widzenia bezpieczeństwa ich eksploatacji. Wpływają w sposób zasadniczy na wyczerpywanie trwałości eksploatacyjnej powodując degradację zmęczeniową oraz, przy występowaniu dużych amplitud, mogą mieć również wpływ na doraźne uszkodzenia maszyn. Oddziałują także, w sposób negatywny, na obsługę obiektu [1, 3].

W niniejszej pracy przedstawiono porównanie wymienionych wcześniej koparek pod kątem zjawisk dynamicznych. Porównanie to zostało przeprowadzone na podstawie badań prowadzonych w trakcie eksploatacji maszyn, podczas urabiania ośrodków nadkładowych w KWB Turów.

Opis badanych obiektów. Opis badań

Metodyka badań wszystkich maszyn, ze względu na ich znaczne podobieństwo (tab. 1) była identyczna. Zastosowano ten sam układ oraz metodę pomiarową. Jedynie drobne różnice miały miejsce przy rozmieszczeniu czujników, ze względu na możliwość dostępu oraz miejscami różną budowę koparek. Ogólnie jednak punkty pomiarowe dobierano, tak, aby nie znajdowały się one w węzłach postaci drgań (o ile nie było to wskazane ze względu na występowanie w tym miejscu ugięcia innej postaci) i zostały określone na podstawie wcześniej przeprowadzonych badań numerycznych [7–9]. Przykładowe rozmieszczenie punktów, w większości odpowiadające pozostałym maszynom, przedstawiono na rysunku 1. Umieszczenie punktów pomiarowych w ten sposób, umożliwia uzyskanie maksymalnej ilości informacji, przy minimalnym nakładzie sprzętu pomiarowego. Jest to fakt dość istotny, jeżeli weźmie się pod uwagę skomplikowaną budowę i gabaryty wielonaczyiniowych koparek kołowych.

Tab. 1. Sylwetki oraz podstawowe dane techniczne maszyn poddanych badaniom

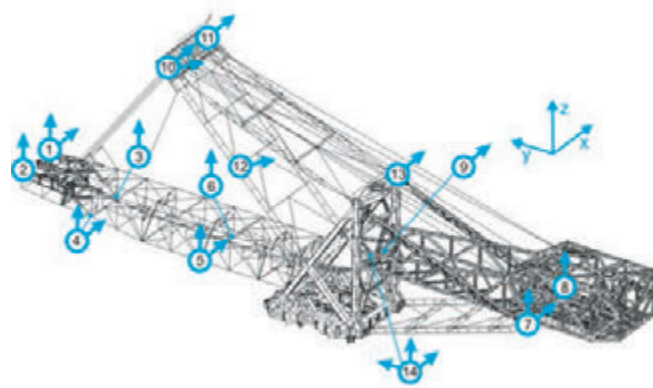
Tab. 1. Presentation of the machine and its basic parameters

Maszyna	Podstawowe dane techniczne
 KWK 1200	Masa nadwozia ~746Mg Masa całkowita ~1819Mg Wydajność teoretyczna 3750m³/h Częstotliwość wysypów ~0,87Hz
 KWK 1500	Masa nadwozia ~915Mg Masa całkowita ~1800Mg Wydajność teoretyczna 4100 m³/h Częstotliwość wysypów ~1Hz
 KWK 1500.1	Masa nadwozia ~897Mg Masa całkowita ~1970Mg Wydajność teoretyczna 4000 m³/h Częstotliwość wysypów ~1Hz

System pomiarowy składał się z czujników akcelerometrycznych zlokalizowanych w wybranych punktach konstrukcji (rys. 1) i układu rejestracji oraz podstawowej analizy danych pomiarowych (wielokanałowy rejestrator-analizator). Zgromadzone podczas badań dane były następnie poddane szczegółowym analizom, których wyniki przedstawiono w kolejnym rozdziale.

Analiza obciążeń dynamicznych koparek

Głównym założeniem determinującym realizację badań był fakt, że zjawiska drgań maszyn podstawowych są jednym z najważniejszych czynników wpływających na wyczerpywanie ich trwałości eksploatacyjnej. Uznano za zasadne przeprowadzenie porównania zachowań dynamicznych maszyn typu



Rys. 1. Rozmieszczenie punktów pomiarowych na koparce KWK 1500

Fig. 1. Placement of the accelerometers on the KWK 1500 excavator

KWK. Możliwe jest dzięki temu określenie ich potencjalnej podatności na uszkodzenia zmęczeniowe. Co jest także istotne, porównanie to pozwoli na ocenę poszczególnych elementów konstrukcyjnych badanych koparek dzięki odpowiedniemu uszczegółowieniu przeprowadzonych badań doświadczalnych (możliwość oceny drgań lokalnych i globalnych) i analiz otrzymanych wyników.

W celu przeprowadzenia porównania przyjęto, jako kryterium oceny, wartość normowego współczynnika obciążenia dynamicznego D [12]. Definiuje on statyczne obciążenia zastępcze, które należy uwzględnić w przypadku występowania efektów dynamicznych. Norma [12] definiuje go jako ułamek zwykły, który po przemnożeniu przez wartość obciążenia statycznego daje wartość obciążenia zastępczego. W celu łatwiejszego zapisu i porównania, w prezentowanej pracy użyto odwrotności tego współczynnika $1/D$. Jest on określany dla poszczególnych elementów konstrukcyjnych maszyn podstawowych oraz dla trzech wzajemnie ortogonalnych kierunków. Wartości normowe współczynnika różnią się w zależności od przyjętego kierunku oraz elementu maszyny. Przedstawiono je w tabeli 2 w kolumnie 6. Im wartość w tabeli większa tym przyjmowane do obliczeń obciążenie zastępcze jest mniejsze.

Na podstawie badań eksperymentalnych przeprowadzonych na omawianych maszynach, obliczono wartość eksperymentalną współczynnika D . Jako obciążenie statyczne przyjęto przyspieszenie ziemskie $g=9,81\text{m/s}^2$ rzeczywista natomiast wartość przyspieszeń obliczona została, jako wartość skuteczna drgań (RMS – Root Mean Square) zmierzona podczas pracy. Wartość RMS, dla sygnału cyfrowego oblicza się według następującego wzoru [4]

$$RMS = \sqrt{\frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2} \quad (1)$$

gdzie N oznacza liczbę próbek. Mając zdefiniowaną wartość RMS, wartość współczynnika dynamicznego została obliczona według następującej zależności:

$$\frac{1}{D} = \frac{g}{RMS} \quad (2)$$

Na podstawie otrzymanych danych możliwe jest porównanie normowych wartości współczynnika oraz wartości obliczonych na podstawie zmierzonych wartości przyspieszeń. Wyniki porównania przedstawione zostały w tabeli 2. D_Q , D_V

oznaczają odpowiednio wartość współczynnika D w kierunku poprzecznym oraz pionowym do maszyny natomiast D_N oznacza wartość normową. O przekroczeniu wartości zakładanych do obliczeń przez normę mówimy jeśli zmierzony w spółczynnik $1/D$ jest mniejszy od współczynnika normowego $1/D_N$.

W tabeli przedstawiono również porównanie wartości współczynnika D zdefiniowanego przez normę oraz zmierzoną na obiekcie rzeczywistym. Dzięki temu porównaniu wyraźnie widoczne jest, iż największe zagrożenie degradacją, biorąc pod uwagę kryterium obciążeń dynamicznych, występuje na koparce KWK1200. Maszyna ta aż w dwóch przypadkach nie spełnia przyjętych wartości normowych. Drgania poprzeczne wysięgnika koła czerpakowego i drgania poprzeczne jego wysięgnicy są wyższe niż wartości dopuszczalne. Wyjaśnia to występowanie już wcześniej zaobserwowanych problemów z dynamiką ustroju nośnego maszyn typu KWK1200 [2]. W przypadku koparki KWK1500 zaobserwowano niespełnienie kryterium normowego tylko w jednym przypadku: drgania poprzeczne wysięgnicy koła czerpakowego. Szczególną uwagę należy zwrócić na fakt, iż niespełnione kryterium jest tożsame w tych dwóch koparkach. Ponadto, wyraźnie widać, że stosunki wartości normowej drgań wysięgnicy koła czerpakowego do wartości zmierzonych są mocno zbliżone. W przypadku koparki KWK1500.1 nie zaobserwowano tego samego zjawiska, mimo niemalże identycznej sylwetki nadwozia w porównaniu z koparką KWK1500. Szczegółowa analiza rozwiązań konstrukcyjnych i ich możliwy wpływ na obciążenia dynamiczne koparek kołowych przedstawiona jest w kolejnej części artykułu.

Konstrukcja koparek KWK i jej wpływ na zachowania dynamiczne

Analizując wyniki badań, najistotniejszy wydaje się fakt niespełnienia tego samego kryterium normowego obciążeń dynamicznych dla koparek KWK1200 oraz KWK1500 i jego spełnienie w przypadku koparki KWK1500.1. Kryterium to dotyczy drgań wysięgnicy wysięgnika koła czerpakowego w kierunku poprzecznym do maszyny (rys. 1 – kierunek x). Jeśli przeanalizujemy sylwetki opisanych maszyn wyraźnie widać, że wysięgnica koparki KWK1200 cechuje się małą sztywnością poprzeczną wynikającą z podparcia jej na dwóch wiotkich dźwigarach wzdłużnych nieusztynwionych poprzez wykratowania w dolnej otwartej części umożliwiającej zwo-

Tab. 2. Porównanie wartości współczynników obciążenia dynamicznego

Tab. 2. Comparison of the level of the coefficients of the dynamic load

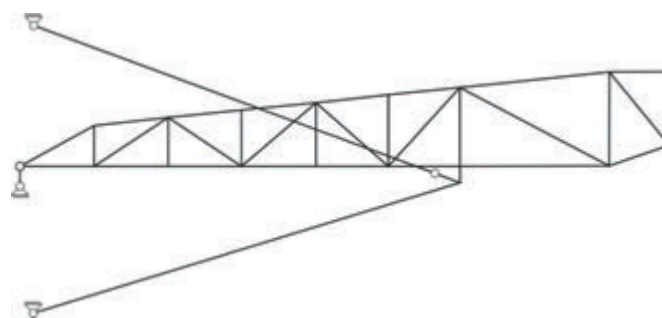
element maszyny	typ współczynnika D	Eksperymentalna wartość $1/D$			Wartość normowa $1/D_N$	D_N/D		
		KWK1200 [13]	KWK1500 [14]			KWK1200	KWK1500	
wysięgnik koła czerpakowego	średni D_Q	45	97	93	60	0,75	1,62	1,54
wysięgnica koła czerpakowego	średni D_V	22	41	20	10	2,20	4,10	2,00
	średni D_Q	37	45	208	60	0,62	0,75	3,46
wysięgnik przeciwwagi	średni D_V	35	53	32	10	3,48	5,30	3,18
	średni D_Q	132	88	168	30	4,40	2,95	5,61
	średni D_V	71	84	30	25	2,84	3,37	1,22

dzenie wysięgnika koła czerpakowego. Dodatkowo wysięgnica stanowi zawieszenie wysięgnika przeciwwagi poprzez dwa, długie a tym samym podatne elementy ciągnowe. Konstrukcja taka daje możliwość dużego ruchu poprzecznego wysięgnika wysięgnika koła czerpakowego, co znajduje swoje odzwierciedlenie w zmierzonych wartościach drgań, a tym samym otrzymanym na podstawie danych eksperymentalnych współczynnikiem obciążenia dynamicznego. W koparce KWK1500 nie zastosowano bezpośredniego połączenia wysięgnika przeciwwagi z wysięgnicą wysięgnika koła czerpakowego. Elementem pośrednim jest tutaj wieża części środkowej, która istotnie zwiększa sztywność połączenia w kierunku poprzecznym do koparki. Jednakże wysięgnica posiada podobną budowę jak na koparce KWK1200 z brakiem wykratowania poprzecznego w jej dolnej części. Porównując wyniki przedstawione w tabeli numer 2 widać, iż stosunek D_N/D wzrasta z wartości 0,62 (koparka KWK1200) do wartości 0,75 (koparka KWK1500). Należy zwrócić również uwagę na fakt, iż w przypadku koparki KWK1200 zaobserwowano niespełnienie tego samego kryterium także na wysięgniku koła czerpakowego. Ponieważ, jest to element bezpośrednio związany z wysięgnicą zasadnym jest wnioskowanie, iż to niewystarczająca sztywność poprzeczna wysięgnicy oraz połączenia ciągnowego wysięgnica-wysięgnik przeciwwagi powoduje również nadmierne drgania wysięgnika koła czerpakowego. Potwierdzeniem tego jest fakt, iż zastosowanie sztywniejszego połączenia w koparce KWK1500 (wysięgnica-wieża-wysięgnik przeciwwagi) pozwoliło uniknąć drgań wysięgnika koła czerpakowego przekraczających wartości normowe. Wstępna analiza sylwetek koparek KWK1500 oraz KWK1500.1 pozwala stwierdzić, iż są one bardzo podobne. Spodziewać by się należało również podobnego zachowania pod względem dynamicznym. Analiza wyników badań (tab. 2) wykazała jednak istotną różnicę w zachowaniu wysięgnicy, czyli około pięciokrotnie niższy poziom drgań w stosunku do koparki KWK1500.

Koparka KWK1500.1 jako najnowsza pracująca wielonaczyniowa koparka w Polsce została zaprojektowana z zastosowaniem najnowszych narzędzi projektowych oraz wspomagających obliczenia. Dzięki zastosowaniu metody elementów skończonych konstrukcja koparki, już na etapie projektu wstępnego była poddawana szczegółowym analizom i optymalizacji konstrukcji. Między innymi w wyniku prowadzonych obliczeń numerycznych w zakresie dynamicznym, zaobserwowano możliwość wystąpienia drgań rezonansowych wysięgnika przeciwwagi wraz z układem jej podwieszenia/podparcia. Dokładne obliczenia oraz modyfikacje przedstawione są w pracy [9]. Aby wyeliminować możliwość wystąpienia niekorzystnego zjawiska, wprowadzono zmianę sposobu podparcia wysięgnika przeciwwagi. Liczba stopni swobody układu została nie zmieniona, ale zmienił się układ uwolnionych stopni swobody. Schematyczne porównanie obu konstrukcji przedstawione jest na rysunkach 2 oraz 3.

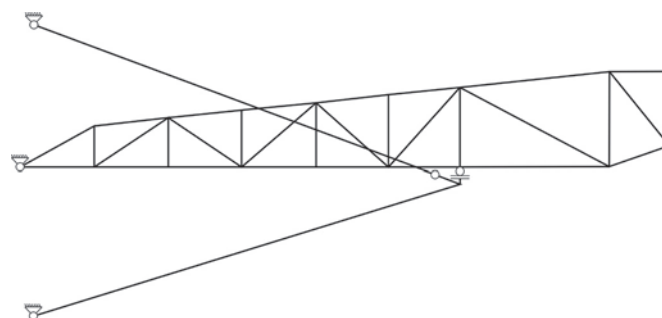
Na rysunkach 4-7 pokazano opisane powyżej rozwiązania na obiektach rzeczywistych.

W rezultacie zastosowanie przedstawionego rozwiązania, postać drgań z częstotliwością okołorezonansową została zupełnie wyeliminowana [9]. Koparka KWK1500.1, w żadnym z przypadków nie przekracza normowych wartości współczynników obciążeń dynamicznych.



Rys. 2. Schemat podparcia przeciwwagi koparki KWK 1500

Fig. 2. Scheme of the counterweight boom support of the KWK 1500 excavator



Rys. 3. Schemat podparcia przeciwwagi koparki KWK 1500.1 [9]

Fig. 3. Scheme of the counterweight boom support of the KWK 1500.1 excavator [9]



Rys. 4. Podparcie na wieży – koparka KWK1500

Fig. 4. Support on the tower – KWK 1500 excavator



Rys. 5. Podparcie pod skrzynią przeciwwagi – koparka KWK1500

Fig. 5. Support under the counterweight – KWK 1500 excavator



Rys. 6. Podparcie na wieży – koparka KWK1500.1

Fig. 6. Support on the tower – KWK 1500.1 excavator



Rys. 7. Podparcie pod skrzynią przeciwwagi – koparka KWK1500.1

Fig. 7. Support under the counterweight – KWK 1500.1 excavator

Podsumowanie i wnioski

W pracy przedstawiono porównanie właściwości dynamicznych trzech sylwetek wielonaczyniowych koparek kołowych. Zostały one wybrane do porównania ze względu na ich duże podobieństwo konstrukcyjne oraz parametry pracy (wydajność, częstotliwość wymuszenia...). Szczegółowej analizie poddano zachowanie dynamiczne maszyn w warunkach eksploatacyjnych. Jak wykazały badania, obserwowane są istotne różnice występujących obciążeń dynamicznych. Dwie pierwsze koparki (KWK1200, KWK1500) wykazały większe wartości współczynnika obciążenia dynamicznego (D), w stosunku do wartości normowych. W przypadku koparki KWK1500.1 takiego przekroczenia nie zaobserwowano. Szczegółowa analiza rozwiązań konstrukcyjnych zastosowanych na koparkach o bliźniaczej konstrukcji (koparki KWK1500), wykazała, iż z dużym prawdopodobieństwem spełnienie warunku normowego, w przypadku koparki KWK1500.1 wynika z faktu zastosowania innego rodzaju podparcia wysięgnika przeciwwagi. Obliczenia numeryczne przeprowadzone metodą elementów skończonych,

na etapie projektu wstępnego koparki KWK1500.1, pozwoliły nie tylko wyeliminować prawdopodobieństwo wystąpienia rezonansu, ale również przyczyniły się do poprawienia zachowania dynamicznego koparki w ogólnym charakterze. W przypadku konieczności zredukowania drgań na obiektach już istniejących konieczne może być zastosowanie znacznie bardziej skomplikowanych rozwiązań [5, 10, 11].

Przeprowadzone badania eksperymentalne potwierdziły, iż nowy rodzaj podparcia przeciwwagi wprowadzony na koparce KWK1500.1 jest rozwiązaniem korzystnym z punktu widzenia dynamiki obiektu. Badania te potwierdzają również słusność i poprawność przeprowadzonych na etapie projektu, analiz numerycznych oraz wprowadzonych modyfikacji. Jest to fakt o tyle istotny, iż tak kompleksowa i wielotorowa analiza numeryczna wielonaczyniowej koparki kołowej nie była dotychczas prowadzona podczas projektowania nowej maszyny podstawowej górnictwa odkrywkowego. Wskazuje to więc na zasadność prowadzenia tego typu analiz na etapie projektowym, co nie jest obecnie realizowane, ze względu na brak takich wymagań w normach przedmiotowych.

Badania współfinansowane ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

Literatura

- [1] Bosnjak, S. and Zrnic, N. 2012. Dynamics, failures, redesigning and environmentally friendly technologies in surface mining systems. *Archives of Civil and Mechanical Engineering*. 12, 3 (2012), 348–359
- [2] Czmochoński, J. 2008. *Identyfikacja modeli modalnych maszyn urabiających w górnictwie węgla brunatnego*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej
- [3] Jamroziak, K., Kosobudzki, M. and Ptak, J. 2013. Assessment of the comfort of passenger transport in special purpose vehicles. *Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability*. 15, 1 (2013), 25–30
- [4] Lyons, R.G. 1999. *Wprowadzenie do cyfrowego przetwarzania sygnałów*. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności
- [5] Maślanka, M., Weber, F., Control, P., Mickiewicz, A. and Duebendorf, C.- Precise Stiffness Control with MR Dampers AGH University of Science and Technology, Faculty of Mechanical Engineering and Robotics, Empa, Swiss Federal Laboratories for Materials Science and Technology, Structural Engineering
- [6] Rusiński, E., Czmochoński, J., Iluk, A. and Kowalczyk, M. 2010. An analysis of the causes of a BWE counterweight boom support fracture. *Engineering Failure Analysis*. 1, 17 (2010), 179–191
- [7] Rusiński, E., Czmochoński, J. and Pietrusiak, D. 2012. Problems of steel construction modal models identification. *Eksploatacja i niezawodność – Maintenance and reliability*. 14, 1 (2012), 54–61

- [8] Rusiński, E., Czmochoowski, J., Pietrusiak, D. and Stańco, M. 2012. Wpływ rodzajów modeli numerycznych na wyniki analizy modalnej mostu zwałowarki. *Przegląd Mechaniczny*. 7-8 (2012), 55–58
- [9] Rusiński, E., Kaczyński, P., Moczko, P. and Pietrusiak, D. 2012. Bucket Wheel Excavator Dynamics Optimization on The Stage of Preliminary Project. *Górnictwo Odkrywkowe*. 3-4, (2012), 25–28
- [10] Sapiński, B. 2011. Experimental study of a self-powered and sensing MR-damper-based vibration control system. *Smart Materials and Structures*. 20, 10 (Oct. 2011), 13pp
- [11] Weber, F., Feltrin, G., Maślanka, M., Fobo, W. and Distl, H. 2009. Design of viscous dampers targeting multiple cable modes. *Engineering Structures*. 31, 11 (2009), 2797–2800
- [12] 2011. *PN-G-47000-2 Górnictwo odkrywkowe. Koparki wielonaczyniowe i zwałowarki. Część 2: Podstawy obliczeniowe*. Polski Komitet Normalizacyjny
- [13] *Raporty Inst. Konstr. Ekspl. Masz. PWroc. 2009., Ser. SPR; nr 91; BADANIA, EKSPERTYZY I DIAGNOSTYKA MASZYN PODSTAWOWYCH KWK-1500S (K-9), KWK-1200M (K-14), SCHRS-1200 (K-22) Cz. 2. Badania koparki KWK-1200 (K-14)*
- [14] *Raporty Inst. Konstr. Ekspl. Masz. PWroc. 2009., Ser. SPR; nr 92; BADANIA, EKSPERTYZY I DIAGNOSTYKA MASZYN PODSTAWOWYCH KWK-1500S (K-9), KWK-1200M (K-14), SCHRS-1200 (K-22) Cz. 3. Badania koparki KWK-1500 (K-9)*

