

Analiza intensywności drgań wysięgnikowego kombajnu chodnikowego generowanych procesem urabiania

Piotr Cheluska
Dawid Plaszczyńska

Analysis of the intensity of vibrations of a boom-type roadheader generated by a cutting process

Streszczenie:

Kombajny chodnikowe podczas urabiania, zwłaszcza skał trudno urabialnych, podlegają działaniu silnych obciążeń dynamicznych i wymuszeń drgań. Zjawiska te są skutkiem dużej zmienności obciążenia głowic urabiających, wynikającej z przebiegu procesu skrawania skały. W efekcie, drgania generowane podczas urabiania przenoszone są z głowic urabiających na ich ustrój nośny – wysięgnik, obrotnicę oraz kadłub kombajnu. Duża intensywność drgań towarzyszących realizacji procesu roboczego może być przyczyną spadku trwałości i niezawodności kombajnu prowadząc do wzrostu jego awaryjności. Silne drgania tego rodzaju maszyn górniczych mają przy tym negatywny wpływ na środowisko (przenoszone są one za pośrednictwem podpór na spąg) oraz ergonomię i bezpieczeństwo ich użytkowania. W artykule przedstawiono wyniki pomiarów stanowiskowych przyspieszenia drgań w węzłach konstrukcyjnych wysięgnikowego kombajnu chodnikowego R-130 podczas urabiania powierzchni bloku wykonanego z materiałów ekwiwalentnych. Określona została intensywność drgań w różnych warunkach realizacji procesu urabiania. Zbadano wpływ technologii urabiania powierzchni czoła przodku oraz parametrów procesu urabiania na drgania kombajnu wysięgnikowego w trakcie jego pracy.

Abstract:

Boom-type roadheaders during cutting, especially hard rocks, are subjected to strong dynamic loads and vibration excitations. These phenomena result from the high variability of the load of cutting heads, resulting from the course of the process of cutting the rocks with picks in which these heads are equipped. As a result, the vibrations generated during cutting are transferred from the cutting heads to their load-carrying structure – the boom, the turntable and the body of the roadheader. High intensity of vibrations accompanying the working process may cause a decrease in durability and reliability of the roadheader, leading to an increase in its failure rate. Strong vibrations of this kind of mining machines have a negative impact on the environment (they are transferred via supports to the floor) as well as ergonomics and safety of their use. The article presents the results of stand measurements of vibration acceleration in selected construction nodes of the R-130 roadheader while cutting block surface made of equivalent materials. The intensity of vibrations in various conditions of the cutting process was determined. The influence of cutting technology on the heading face and cutting process parameters on the intensity of vibrations of the boom-type roadheader with transverse cutting heads was examined during its operation.

Słowa kluczowe: wysięgnikowy kombajn chodnikowy, proces urabiania, drgania, stanowisko doświadczalne, pomiary

Keywords: boom-type roadheader, cutting process, vibrations, experimental stand, measurements

1. Wprowadzenie

Urabianie mechaniczne skał zwłaszcza trudno urabialnych wysięgnikowymi kombajnami chodnikowymi jest procesem silnie dynamicznym. Oddziaływaniu narzędzi urabiających na caliznę skalną towarzyszą bowiem siły o dużej zmienności. Efekt ten wynika z własności mechanicznych urabianego ośrodka skalnego oraz jego budowy strukturalnej. Drgania oraz siły dynamiczne, których źródłem jest realizacja procesu urabiania powierzchni czoła przodku przenoszone są na ustrój nośny głowic urabiających – wysięgnik, obrotnicę, kadłub (nadwozie) maszyny i dalej – poprzez jej podpory – na spąg drążonego wyrobiska [1, 3, 4, 8].

Drgania te mają negatywny wpływ na trwałość konstrukcji kombajnu, a zwłaszcza węzłów łożyskowych łączących główne jego podzespoły [17, 18, 21, 27].

Kruczość skał sprawia, że oddzielane od calizny przez nóż skrawający ziarna urobku mają zróżnicowany kształt i wielkość. W efekcie, nawet gdy wykonywany jest skraw o stałej głębokości obciążenie narzędzia skrawającego jest zmienne. Przebieg tego obciążenia ma przy tym cykliczny charakter, wynikający z odspajania kolejnych ziaren urobku. Czas kolejnych cykli odspajania ziaren urobku (od chwili wejścia ostrza noża w kontakt z urabianą calizną do chwili oderwania się ziarna urobku) jest przy tym różny. Siły działające na nóż skrawający w kolejnych cyklach odspajania mogą dlatego różnić się i to znacznie. Wyniki badań teoretycznych i doświadczalnych procesu skrawania skał, realizowanych od wielu lat w krajowych i zagranicznych ośrodkach naukowych, potwierdzają skomplikowany jego mechanizm. Dotyczy to zwłaszcza skrawania nożami stożkowymi, powszechnie stosowanymi w kombajnach górniczych i nie tylko [7, 9 – 11, 14, 19, 20, 22, 24 – 26]. W miejscu kontaktu ostrza noża z urabianą skałą występuje złożony stan naprężeń. Występują przy tym duże siły tarcia, a ponadto dochodzi do wgniatania części roboczej noża w dno wykonywanej przezeń bruzdy, w wyniku czego ulega ono odkształceniom sprężystym i plastycznym. Utrzymanie zadanej głębokości skrawu wymaga więc dużych sił docisku noża do powierzchni urabianej skały [13]. W miarę ruchu noża, siła ta zmienia się w dużym zakresie, proporcjonalnie (w przybliżeniu) do siły skrawania. Ponieważ droga, na której realizowany jest proces skrawania przez poszczególne noże w kolejnych obrotach głowicy/organu urabiającego kombajnu górniczego ma określoną długość wynikającą z wysokości urabianej warstwy, kolejne noże wchodząc w kontakt z urabianą calizną są obciążane, natomiast z chwilą wyjścia z tego kontaktu – są odciążane. Rozmieszczenie noży skrawających na poboczniczy głowicy/organu urabiającego sprawia, że przebiegi czasowe obciążenia poszczególnych noży realizujących proces urabiania są przesunięte w czasie. Ponadto, liczba noży biorących jednocześnie udział w procesie urabiania zmienia się w czasie. Wymienione wyżej przyczyny sprawiają, że obciążenie od urabiania działające na głowicę/organ urabiający, napęd oraz ustrój nośny (kadłub maszyny) cechuje się dużą zmiennością. Proces urabiania skał kombajnami górniczymi jest źródłem silnych drgań i obciążeń dynamicznych węzłów konstrukcyjnych tego rodzaju maszyn. Dotyczy to zwłaszcza wysięgnikowych kombajnów chodnikowych.

W artykule zaprezentowano wybrane wyniki pomiarów przyspieszenia drgań w wytypowanych węzłach konstrukcyjnych wysięgnikowego kombajnu chodnikowego R-130 podczas urabiania. Badania te realizowano w skali półprzemysłowej na stanowisku badawczym zbudowanym specjalnie w tym celu w Hali Technologicznej Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej. Kombajn chodnikowy urabiał blok wykonany z materiałów ekwiwalentnych (mas cementowo-piaskowych) o odpowiednio dobranej urabialności. Składał się on z pięciu warstw o różnej grubości, nachylonych poprzecznie do podłoża pod kątem 10° , o wytrzymałości na ściskanie z przedziału od 33 do 69 MPa. Własności mechaniczne urabianego ośrodka oraz sposób ułożenia warstw odzwierciedlały warunki drażenia wyrobisk korytarzowych wysięgnikowymi kombajnami chodnikowymi eksploatowanymi w polskich kopalniach węgla kamiennego. W ramach niniejszej pracy określona została intensywność drgań wysięgnikowego kombajnu chodnikowego w różnych warunkach realizacji procesu urabiania. Zbadano wpływ technologii urabiania powierzchni czoła przodku (rodzaju wykonywanych skrawów) oraz parametrów procesu urabiania na intensywność jego drgań.

2. Pomiary drgań wysięgnikowego kombajnu chodnikowego

Obiektem badań był wysięgnikowy kombajn chodnikowy R-130 (Famur S.A.). Jest to podstawowy typ kombajnu chodnikowego stosowany do drążenia wyrobisk korytarzowych w kopalniach węgla kamiennego w Polsce. Wyposażony jest on w poprzeczne głowice urabiające napędzane przez silnik w układzie urabiania o mocy 130 kW. Na potrzeby realizowanych badań maszyna ta wyposażona została w układ pomiarowo-rejestrujący, który tworzyło 75 torów pomiarowych [5]. Pomiary zrealizowano w czasie symulowanego urabiania powierzchni czoła przodku wyrobiska korytarzowego w warunkach laboratoryjnych. Urabiano powierzchnię bloku cementowo-piaskowego.

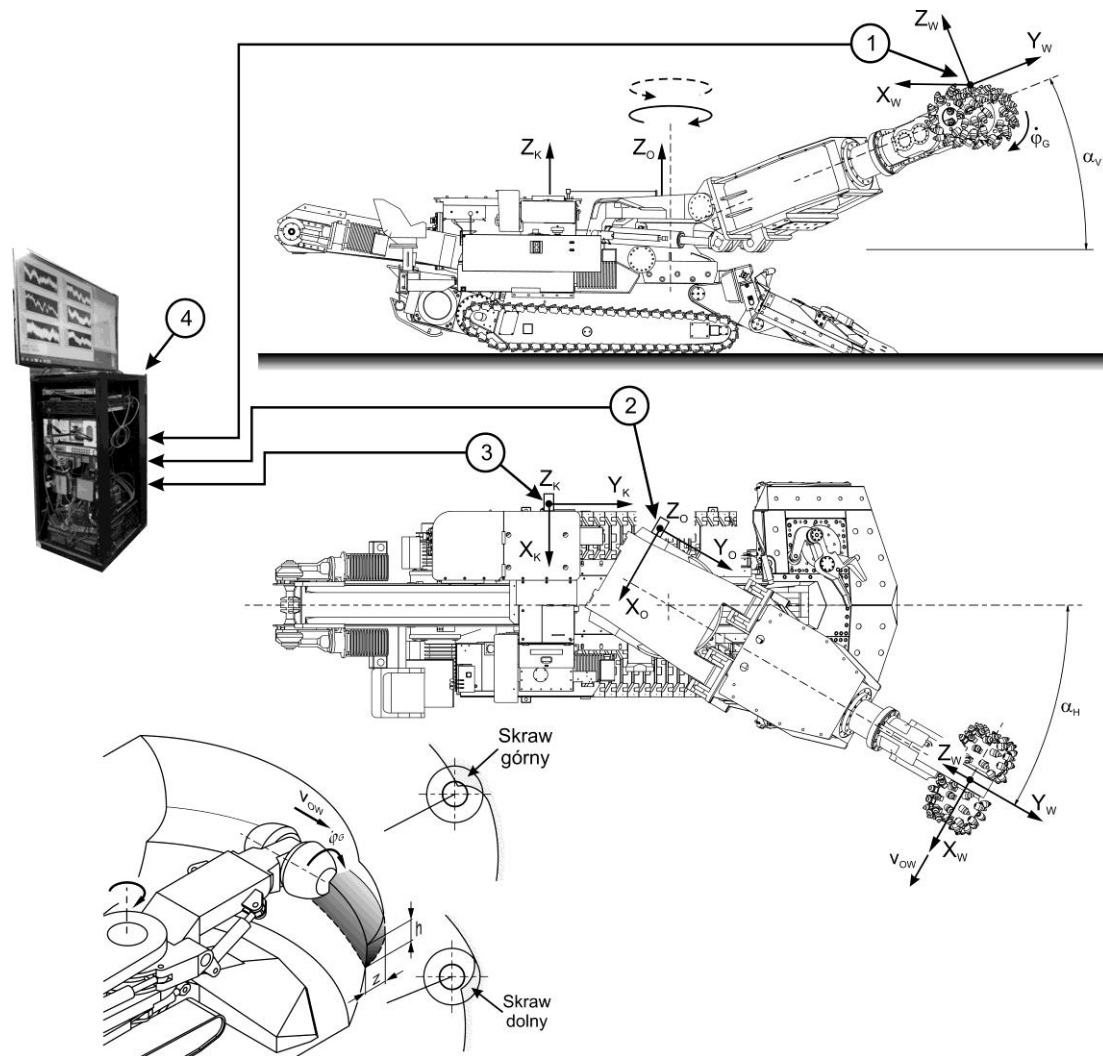
Dla potrzeb określenia intensywności drgań kombajnu chodnikowego podczas urabiania mierzono składowe przyspieszenia drgań w wytypowanych węzłach konstrukcyjnych kombajnu. Ze względu na modułową budowę tego rodzaju maszyn, pomiar przyspieszenia drgań obejmował wysięgnik, część ruchomą obrotnicy oraz kadłub kombajnu (rys. 1). Wykorzystano do tego czujniki akcelerometryczne HANSFORD SENSORS HS-100 [28]. Rozmieszczone one zostały w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach, w charakterystycznych punktach kombajnu, to jest:

- na końcu wysięgnika, w punkcie leżącym w przybliżeniu na przecięciu osi podłużnej wysięgnika z osią obrotu głowic urabiających (rys. 1 – poz. 1 oraz rys. 2a),
- w obrębie ucha lewego siłownika podnoszenia wysięgnika, poprzez które siłownik ten zamocowany jest do części ruchomej obrotnicy (rys. 1 – poz. 2 oraz rys. 2b),
- w tylnej części kadłuba lewego wózka gaśnicowego (rys. 1 – poz. 3 oraz rys. 2c).

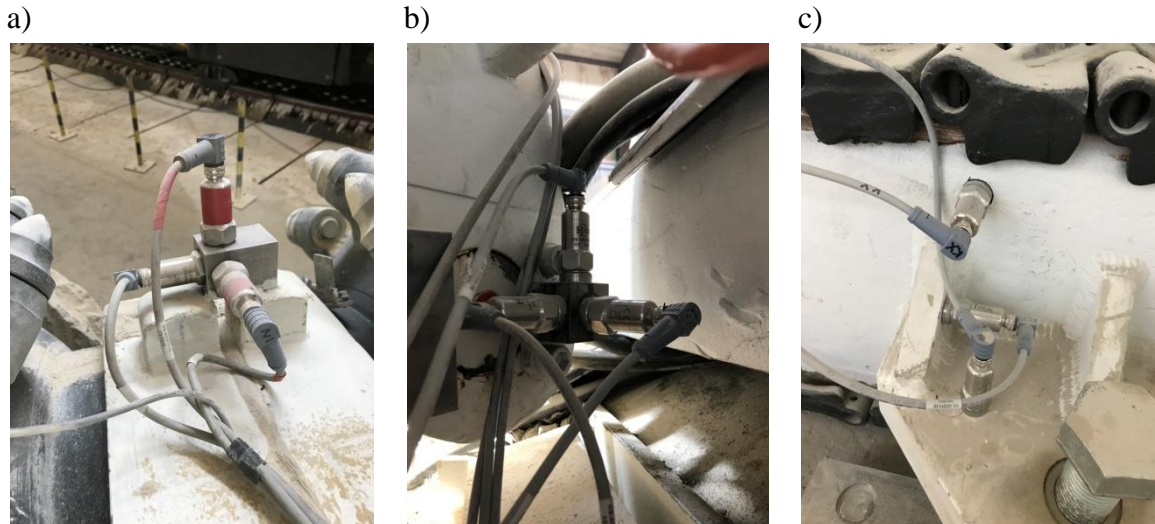
Sygnaly z układu pomiarowego doprowadzone zostały za pomocą ekranowanych przewodów do szafy pomiarowej (rys. 1 – poz. 4), w której zlokalizowany został układ do akwizycji, rejestracji i przetwarzania danych pomiarowych. Dla potrzeb rejestracji i przetwarzania danych pomiarowych zastosowano dedykowany komputer pomiarowy firmy National Instruments PXIe1071 (rys. 3a) z jednostką centralną PXIe-8820 (1), stanowiącą kompletny komputer klasy PC z dedykowanym systemem operacyjnym i zainstalowanym oprogramowaniem LabView. Jednostka centralna PXIe-8820 wyposażona została w procesor dual-core Intel Celeron 1020E taktowany z częstotliwością 2.2 GHz, pamięć RAM 8GB 1333 MHz DDR3L i dysk twardy o pojemności 250 GB [29]. Do komunikacji z urządzeniami zewnętrznymi wykorzystano sieć Ethernet oraz szybkie porty USB. Komputer NI PXIe1071 wraz z jednostką centralną, wyposażone są w złącza do instalacji specjalistycznych kart pomiarowych, dla różnego typu czujników i różnego rodzaju sygnałów pomiarowych. W rozpatrywanym przypadku komputer pomiarowy wyposażony został między innymi w kartę pomiarową PXIe-4492 (rys. 3a – poz. 2). Karta ta posiada 8 wejść analogowych napięciowych o maksymalnym napięciu wejściowym ± 10 V, rozdzielczości 24 bit i maksymalnej częstotliwości próbkowania 204,8 kS/s. Wykorzystana ona została do akwizycji sygnałów pomiarowych z akcelerometrów. Przewody sygnałów z akcelerometrów zakończone wtykami BNC podłączone zostały do karty pomiarowej za pośrednictwem terminala BNC-2144 (rys. 3b). Ze względu na niewystarczającą liczbę kanałów dla podłączenia akcelerometrów, w układzie pomiarowym zastosowano dodatkowo kontroler cDAQ-9188 prod. National Instruments (rys. 3c). Zabudowana w nim karta pomiarowa NI-9234 udostępniła dodatkowe wejścia sygnałów z akcelerometrów. Podobnie, jak terminal

BNC-2144 karta ta wyposażona jest w złącza BNC. Komunikacja kontrolera cDAQ z komputerem pomiarowym PXIe realizowana była za pośrednictwem sieci Ethernet.

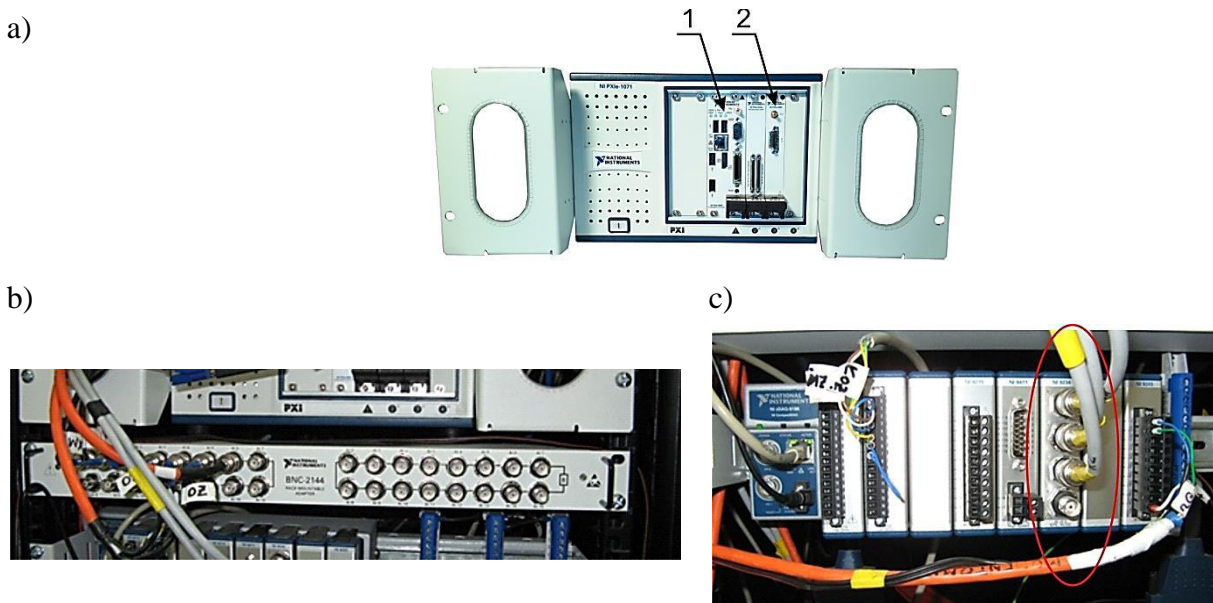
Pomiary drgań oraz parametrów pracy kombajnu chodnikowego dokonane zostały w trakcie wykonywania skrawów górnych i dolnych równoległe do podłoża, przy różnych wartościach parametrów charakteryzujących proces urabiania, to znaczy (rys. 1): zabioru z , wysokości skrawu h , prędkości kątowej głowic urabiających φ_G oraz prędkości ich przemieszczania (prędkości obwodowej wychylania wysięgnika) v_{OW} . Jest to bowiem zasadniczy sposób skrawania skały w powszechnie stosowanej technologii urabiania powierzchni czoła przodku drążonych wyrobisk korytarzowych, wysięgnikowymi kombajnami chodnikowymi wyposażonymi w poprzeczne głowice urabiające [15].



Rys. 1. Schemat ideowy układu do pomiaru przyspieszenia drgań w węzłach konstrukcyjnych kombajnu chodnikowego oraz punkty i kierunki pomiaru składowych przyspieszenia drgań: 1 – wysięgnika (wzdłuż osi układu współrzędnych $X_w Y_w Z_w$), 2 – części ruchomej obrotnicy (wzdłuż osi układu współrzędnych $X_o Y_o Z_o$), 3 – kadłuba kombajnu (wzdłuż osi układu współrzędnych $X_k Y_k Z_k$), 4 – rejestrator danych



Rys. 2. Rozmieszczenie czujników akcelerometrycznych na: a) wysięgniku, b) części ruchomej obrotnicy, c) kadłubie kombajnu



Rys. 3. Rejestrator danych pomiarowych: a) komputer PXIe1071 z kartami pomiarowymi (1 – jednostka centralna PXIe-8820, 2 – karta pomiarowa PXIe-4492), b) terminal BNC-2144, c) cDAQ-9188

3. Określenie intensywności drgań głównych podzespołów wysięgnikowego kombajnu chodnikowego podczas urabiania – wybrane przykłady

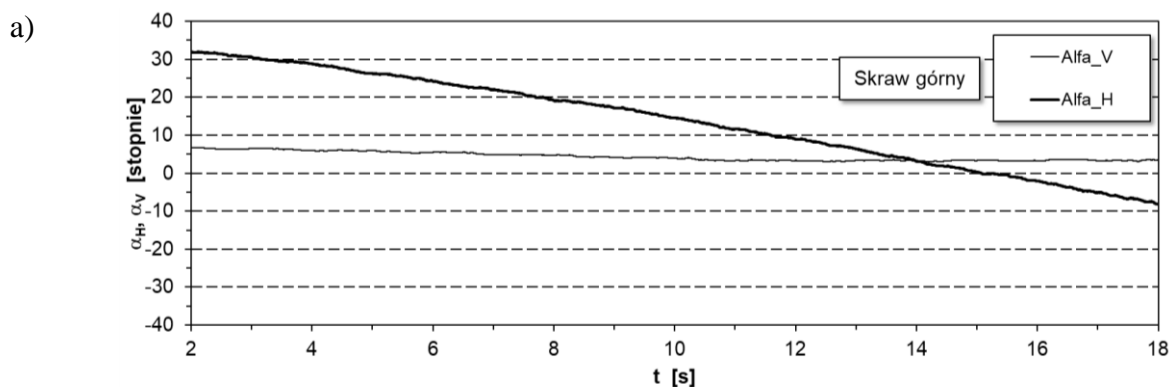
W niniejszym rozdziale przedstawiono przebiegi czasowe przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba kombajnu chodnikowego w czasie wykonywania skrawu górnego oraz dolnego. Proces urabiania realizowany był przy zmiennych wartościach charakteryzujących go parametrów. Zmienna była zatem wielkość pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawów na ich długości oraz wydajność urabiania. Wynikało to ze zmieniających się, w miarę wykonywania skrawu, wartości zabioru, wysokości skrawu oraz prędkości ruchu głowic urabiających. Ze względu na urabianie powierzchni bloku cementowo-piaskowego o budowie warstwowej, zmieniała się również

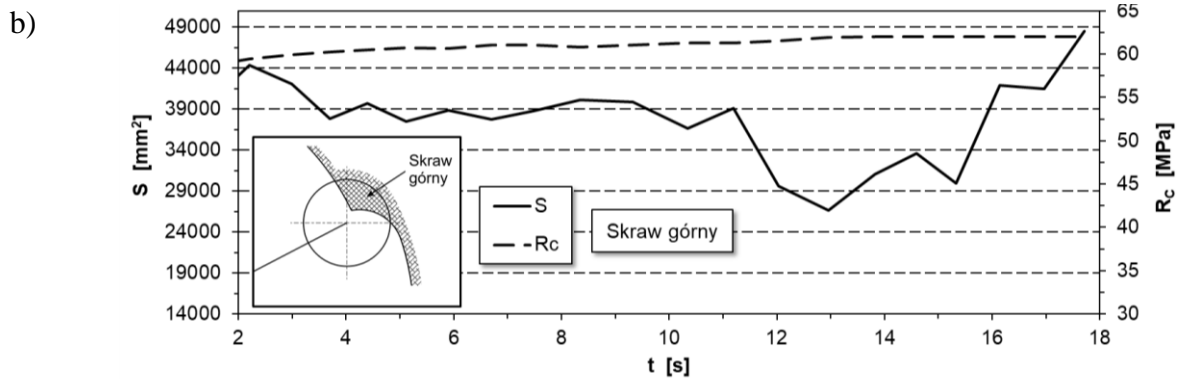
wytrzymałość na ściskanie urabianego ośrodka, w miarę przemieszczania się głowic urabiających.

Podczas realizacji przykładowego skrawu górnego wysięgnik wychylany był w lewo w zakresie kąta jego obrotu α_H od $+32^\circ$ do -9° (rys. 4a). Kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża α_V kształtował się przy tym na poziomie $+7^\circ$. Poprzeczne głowice urabiające wykonywały skraw górny o średniej wysokości h wynoszącej 230 mm, z zabiorem $z = 130$ mm. Ze względu na zmienną wartość tych parametrów na długości skrawu zmieniało się pole powierzchni jego przekroju poprzecznego S w granicach od około 26 700 do 48 500 mm² (rys. 4b – linia ciągła). Wartości tego pola określono na podstawie analizy przekrojów skrawu na jego długości uzyskanych w wyniku skanowania urabianej powierzchni przed i po wykonaniu danego skrawu za pomocą geodezyjnego skanera laserowego [2]. Wytrzymałość urabianej calizny na ściskanie R_c rosła w niewielkim zakresie, w miarę przemieszczania się głowic urabiających, bo od 59,5 do 62 MPa (linia przerywana). Zmienność ta wynikała z przechodzenia głowic urabiających przez kolejne warstwy urabianego bloku. Proces urabiania realizowany był w tym przypadku przy średniej prędkości kątowej głowic urabiających oraz prędkości ich przemieszczania równoległe do podłoża wynoszących odpowiednio: $\varphi_G = 7,8$ rad/s i $v_{OW} = 152$ mm/s.

Intensywność drgań głównych podzespołów kombajnu wysięgnikowego jest wyraźnie różna. Drganiom o największym przyspieszeniu poddawany był wysięgnik kombajnu (rys. 5a), najmniejszym zaś – część ruchoma obrotnicy (rys. 5b). Drgania rozpatrywanych podzespołów kombajnu są złożeniem drgań translacyjnych wzdłuż osi przyjętych układów odniesienia oraz drgań kątowych wokół tych osi. Ten drugi rodzaj drgań ma szczególnie duże znaczenie zwłaszcza w przypadku wysięgnika. Nie bez znaczenia jest tu położenie punktów pomiarowych oraz własności dynamiczne kombajnu. Własności te wynikają między innymi z rozkładu masy oraz ze sposobu realizacji i parametrów sprężysto-tłumieniowych więzów łączących poszczególne podzespoły kombajnu ze sobą. Jako miarę intensywności drgań przyjęto wartości skuteczne (RMS) składowych przyspieszenia drgań mierzonych w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach (rys. 1):

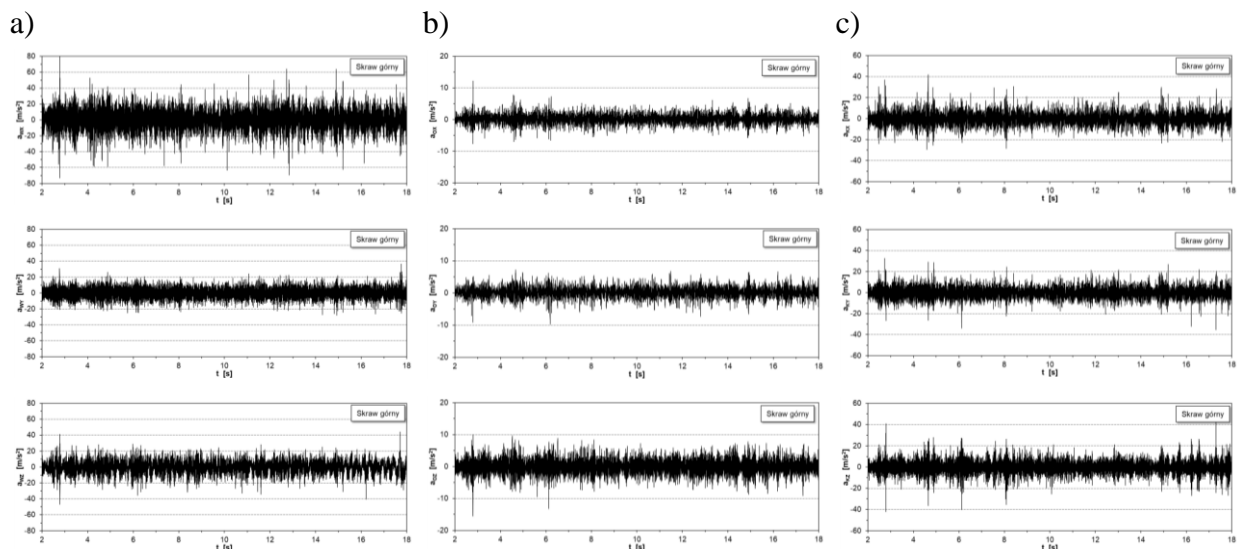
- w kierunku osi X_W (drżania obwodowe), Y_W (drżania wzdłużne) i Z_W (drżania poprzeczne) – w przypadku wysięgnika,
- w kierunku osi X_O , Y_O i Z_O – w przypadku części ruchomej obrotnicy,
- w kierunku osi X_K , Y_K i Z_K – w przypadku kadłuba kombajnu.





Rys. 4. Przebiegi czasowe: a) kątów wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (α_H) i prostopadłej do podłoża (α_V), b) pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawu (S) oraz średniej wytrzymałości urabianej calizny na ściskanie (R_c) podczas realizacji przykładowego skrawu górnego

Podczas realizacji analizowanego skrawu wartość skuteczna przyspieszenia drgań obwodowych wysięgnika (a_{WX}), dla badanego interwału czasowego, wyniosła blisko 12 m/s^2 (tab. 1). Drgania wysięgnika w tym kierunku cechowały się największą intensywnością. Wartości skuteczne przyspieszenia drgań wzdluznych (a_{WY}) oraz poprzecznych (a_{WZ}) były bowiem odpowiednio o blisko połowę i 1/3 mniejsze. Wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy nie przekraczały 30% wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika. Mieściły się one w zakresie od 1,6 do $2,2 \text{ m/s}^2$ (tab. 1). Z kolei, wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań kadłuba kombajnu w kierunku osi związanego z nim układu odniesienia kształtowały się w granicach od 5,1 (a_{KY}) do $6,1 \text{ m/s}^2$ (a_{KX}).



Rys. 5. Przebiegi czasowe składowych przyspieszenia drgań podczas realizacji przykładowego skrawu górnego: a) wysięgnik, b) część ruchoma obrotnicy, c) kadłub kombajnu

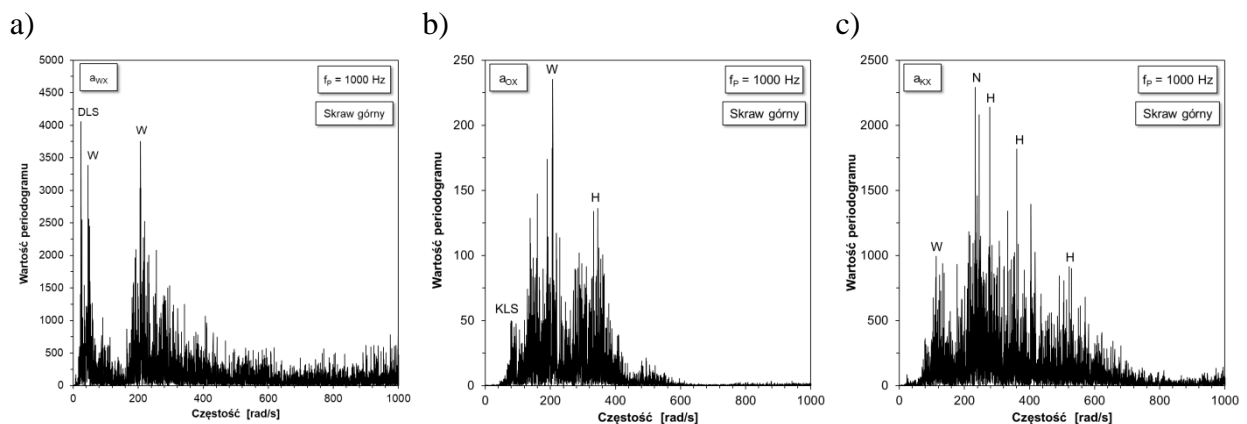
Wartości skuteczne przyspieszenia drgań dla przykładowego skrawu górnego oraz dolnego

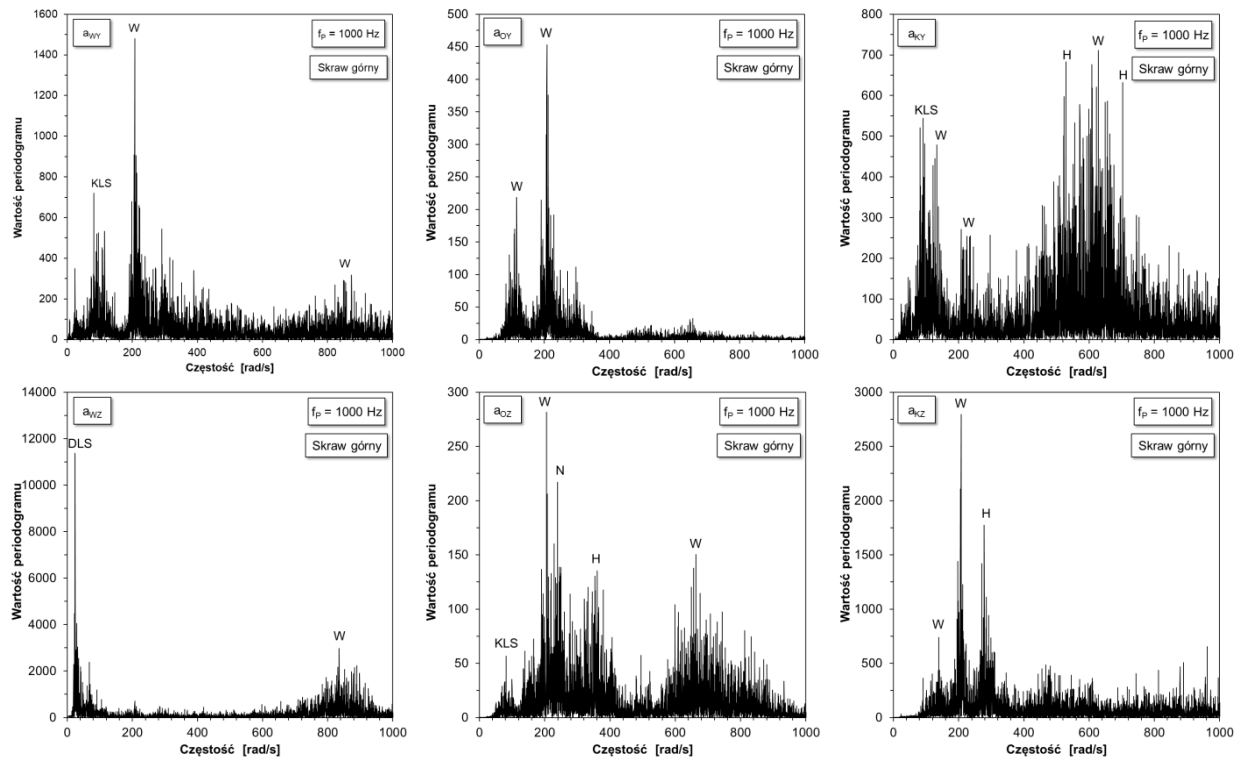
Tabela 1

[m/s^2]	Skraw górny	Skraw dolny	SD/SG
1	2	3	4
a_{WX}^{RMS}	11,6	7,5	0,65
a_{WY}^{RMS}	6,1	4,6	0,75

1	2	3	4
a_{WZ}^{RMS}	7,9	8,9	1,13
a_{OX}^{RMS}	1,6	1,4	0,88
a_{OY}^{RMS}	1,7	1,3	0,77
a_{OZ}^{RMS}	2,2	1,4	0,64
a_{KX}^{RMS}	6,1	3,9	0,64
a_{KY}^{RMS}	5,1	2,8	0,55
a_{KZ}^{RMS}	5,8	4,4	0,76

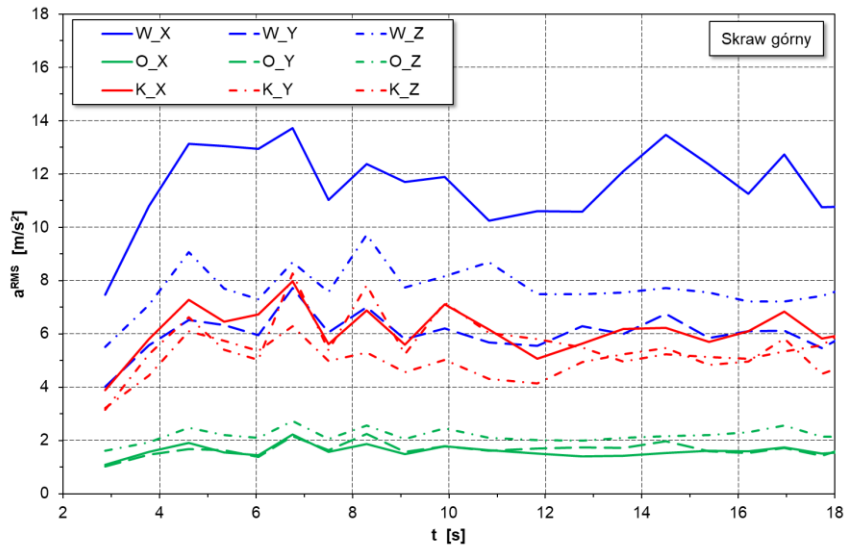
Analiza widmowa sygnału drganiowego wykazała istnienie pewnych wyraźnych składowych przyspieszenia drgań o charakterystycznych częstościach (rys. 6). Wynikają one z przebiegu wymuszenia drgań nadwozia kombajnu generowanego procesem urabiania oraz własności dynamicznych badanego obiektu. Pierwszy z wymienionych czynników związany jest w dużym stopniu ze sposobem rozmieszczenia noży skrawających na głowicy urabiającej oraz przebiegiem procesu skrawania poszczególnymi nożami głowicy urabiającej. Noże skrawające na głowicach badanego kombajnu chodnikowego rozmieszczone były w sposób wysoce uporządkowany, wzdłuż trzech linii śrubowych o dużym kącie zwicia i jednocześnie wzdłuż 12-tu linii śrubowych o małym kącie zwicia. Częstość drgań wynikająca z rozmieszczenia noży wzdłuż długich linii śrubowych (*DLS*) jest 3-krotnie większa od częstości kołowej głowic urabiających odpowiadającej ich prędkości kątowej. Częstość linii śrubowych o małym kącie zwicia (*KLS*) jest z kolei 4-krotnie większa od częstości linii śrubowych o dużym kącie zwicia (*DLS*). Proces wchodzenia w kontakt z urabianą calizną kolejnych noży jest dodatkowo źródłem składowej drgań o częstości nożowej (*N*). Wynika ona z liczby noży biorących udział w procesie skrawania oraz ich podziałki kątowej na głowicy urabiającej. Ponadto, w widmie przyspieszenia drgań ujawniają się również wyższe harmoniczne wymuszenia drgań (*H*), wynikające z nakładania się przebiegów wymuszenia generowanych działaniem poszczególnych noży (cykliczności przebiegu obciążenia noży związanej z odspajaniem ziaren urobku od calizny). Składowe widma przyspieszenia drgań oznaczone literą *W* odpowiadają natomiast częstościom drgań własnych badanego obiektu.





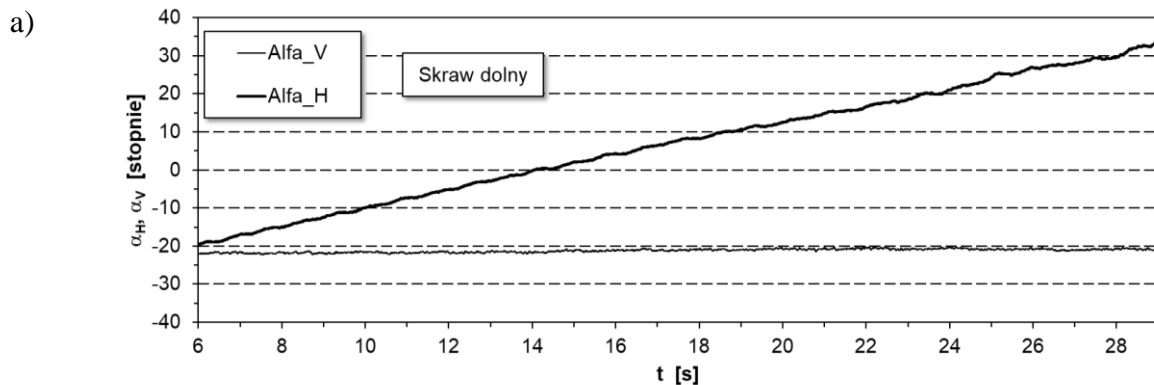
Rys. 6. Charakterystyki amplitudowo–częstościowe składowych przyspieszenia drgań podczas realizacji przykładowego skrawu górnego: a) wysięgnik, b) część ruchoma obrotnicy, c) kadłub kombajnu

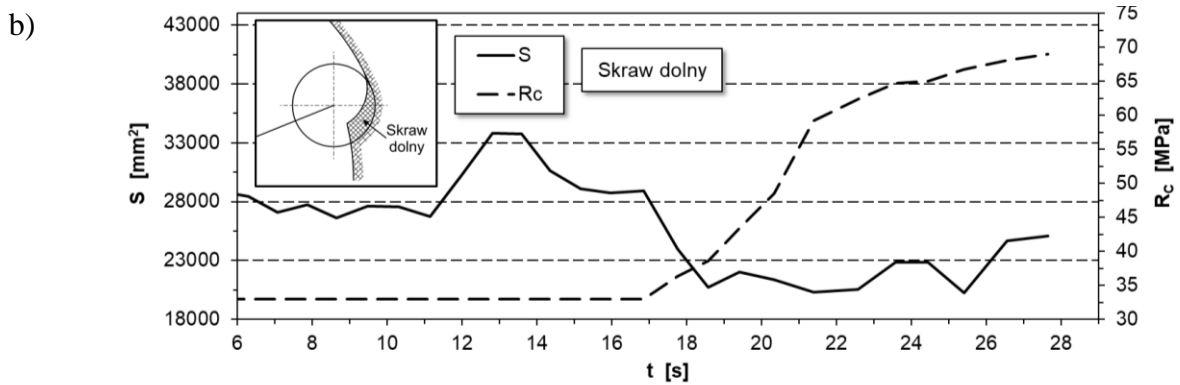
Ze względu na zmienność warunków realizacji procesu urabiania na długości skrawu, wyznaczano wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy i kadłuba badanego kombajnu chodnikowego w okresie kolejnych obrotów głowic urabiających (rys. 7). Wpływ tych warunków jest najbardziej widoczny w przypadku drgań obwodowych wysięgnika (w kierunku osi X_W) – linia ciągła w kolorze niebieskim. Wartość skuteczna przyspieszenia drgań obwodowych, po wzroście w początkowej fazie urabiania do 14 m/s^2 , malała osiągając minimum lokalne w 11-tej sekundzie pomiaru (wynoszące około 10 m/s^2). W końcowej fazie skrawania intensywność drgań ponownie wzrosła. Analizując przebiegi pokazane na rysunku 7 można zauważyć, że największą intensywnością cechowały się tu drgania obwodowe (linia niebieska ciągła) oraz poprzeczne wysięgnika (linia niebieska punktowa). Przebiegi wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań kadłuba w analizowanych kierunkach (linie w kolorze czerwonym) oraz przyspieszenia drgań wzdłużnych wysięgnika (linia niebieska przerywana) są podobne, co do charakteru i wartości. Zdecydowanie najniżej położone są przy tym linie odwzorowujące przebiegi wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy (linie zielone).



Rys. 7. Porównanie wyznaczonych na obrót głowic urabiających wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotownicy oraz kadłuba kombajnu podczas realizacji przykładowego skrawu górnego

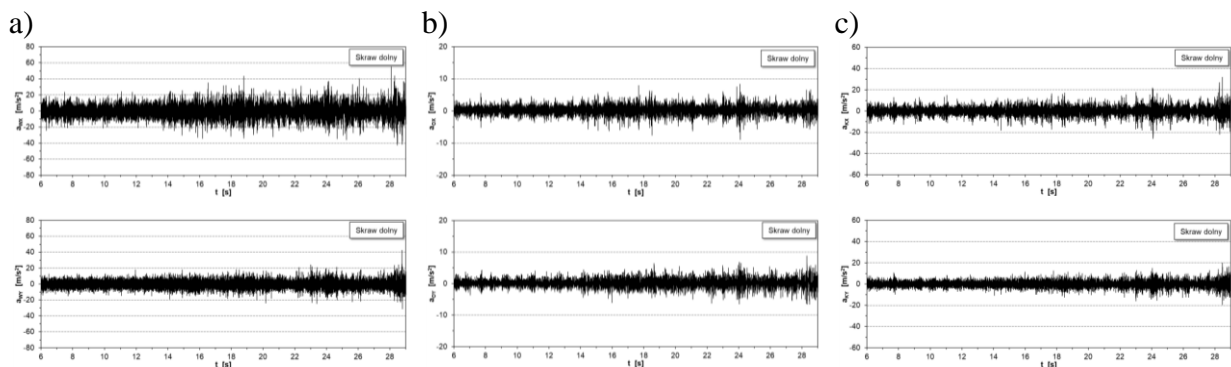
Sposób obciążenia wysięgnika od urabiania, podczas wykonywania skrawu dolnego, inny w porównaniu do skrawu górnego, miał wyraźny wpływ na intensywność drgań w węzłach konstrukcyjnych badanego kombajnu chodnikowego. Przykładowy skraw dolny wykonywany był podczas wychylenia wysięgnika równoległe do podłoża w zakresie kąta α_H od -20° do $+32^\circ$ (rys. 8a). Urabianie realizowane było tu w okolicy podłoża (kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie do niego prostopadłej α_V wynosił około -20°). Pole powierzchni przekroju poprzecznego skrawu na jego długości zmieniało się w granicach od $20\,300\text{ mm}^2$ – 22 sekundzie pomiaru do $33\,825\text{ mm}^2$ – 13 sekundzie pomiaru (rys.8b – linia ciągła). Do 17-tej sekundy pomiaru urabiana była warstwa o wytrzymałości na ściskanie R_c wynoszącej 33 MPa (linia przerywana). Po tym czasie wartości tego parametru rosła dochodząc do 69 MPa. Urabianie realizowane tu było przy średnich wartościach parametrów tego procesu: zabioru $z = 270\text{ mm}$, wysokości skrawu $h = 56\text{ mm}$, prędkości kątowej głowic urabiających $\varphi_G = 7,2\text{ rad/s}$ oraz prędkości ich przemieszczania $v_{OW} = 147\text{ mm/s}$.

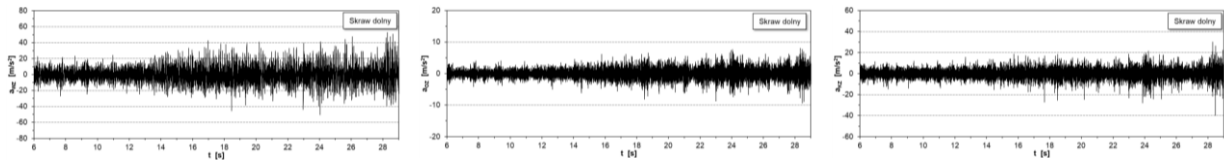




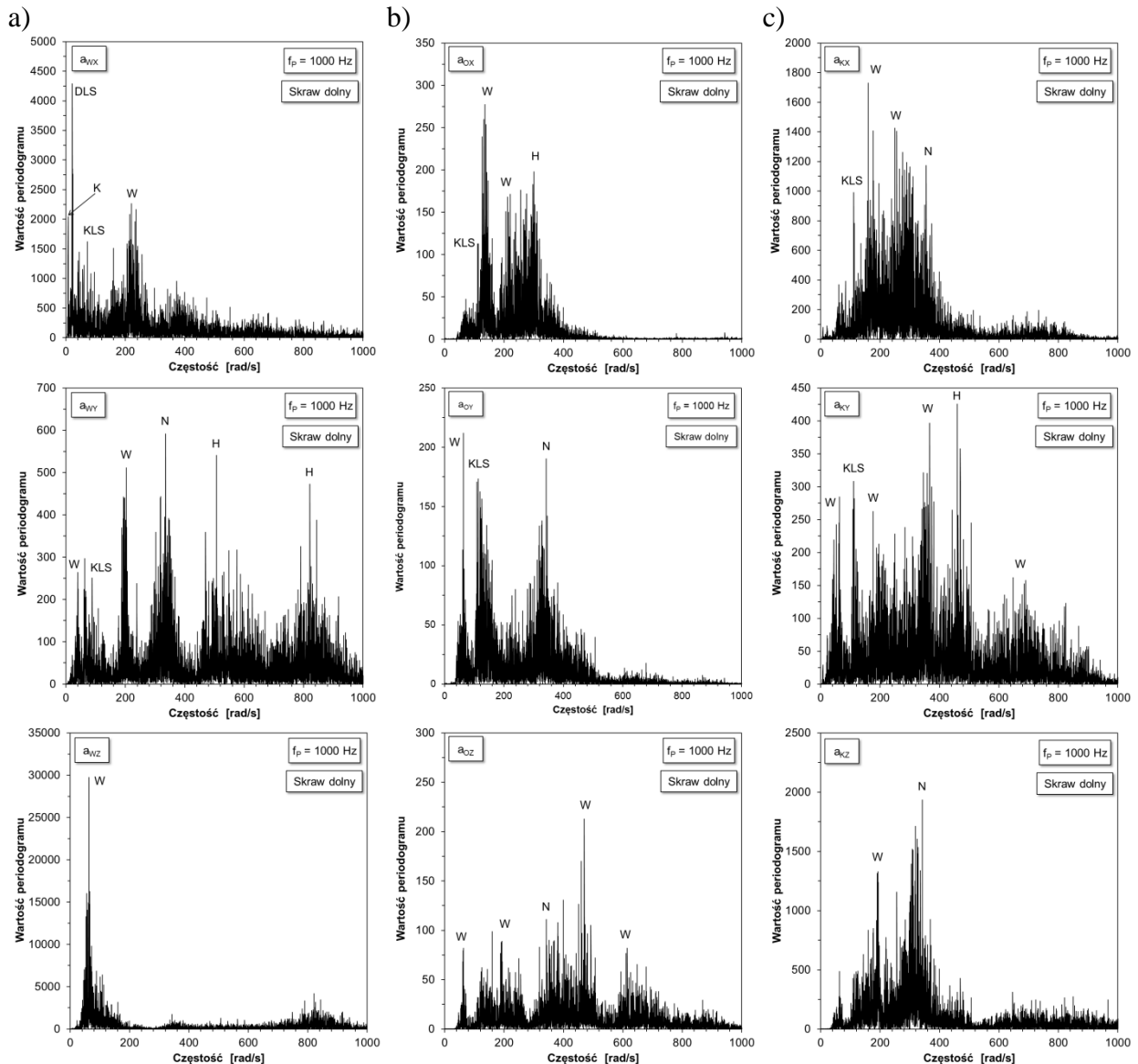
Rys. 8. Przebiegi czasowe: a) kątów wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (α_H) i prostopadłej do podłoża (α_V), b) pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawu (S) oraz średniej wytrzymałości urabianej calizny na ściskanie (R_c) podczas realizacji przykładowego skrawu dolnego

Odzwierciedleniem zachowania się kombajnu wysięgnikowego podczas realizacji skrawu dolnego jest intensywność drgań poprzecznych wysięgnika (a_{WZ}) i kadłuba kombajnu (a_{KZ}) – rysunek 9. W przypadku analizowanego wcześniej skrawu górnego, wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi Z_W oraz kadłuba kombajnu w kierunku osi Z_K stanowiły odpowiednio: 66% i 97% wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań tych podzespołów w kierunku osi X_W i X_K . Dla omawianego skrawu dolnego natomiast, wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi Z_W oraz kadłuba kombajnu w kierunku osi Z_K były większe od wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań w kierunku osi X_W i X_K odpowiednio o 20% i 15%. Porównując wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy i kadłuba kombajnu w badanych kierunkach podczas wykonywania analizowanego skrawu górnego i dolnego można stwierdzić, że stosunek wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań dla skrawu dolnego i górnego (SD/SG) jest zasadniczo mniejszy od jedności (tab. 1 – kol. 4). Wyjątkiem są drgania poprzeczne wysięgnika (a_{WZ}). W tym bowiem przypadku stosunek ten jest większy od jedności i wynosi 1,13. Oznacza to, że wartość skuteczna tej składowej przyspieszenia drgań podczas wykonywania skrawu dolnego była o 13% większa od wartości uzyskanej dla skrawu górnego. Podczas wykonywania skrawu dolnego większa jest więc, w porównaniu do skrawu górnego, intensywność drgań poprzecznych wysięgnika. W widmie składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba kombajnu dla skrawu dolnego ujawniły się, podobnie jak to miało miejsce dla skrawu górnego, częstotliwości drgań własnych badanego obiektu (W) oraz częstotliwości wynikające z przebiegu procesu urabiania – częstotliwość linii śrubowych o małym (KLS) i dużym (DLS) kącie zwicha, wyższe harmoniczne wymuszenia drgań (H) oraz częstotliwość nożowa (N) – rysunek 10.





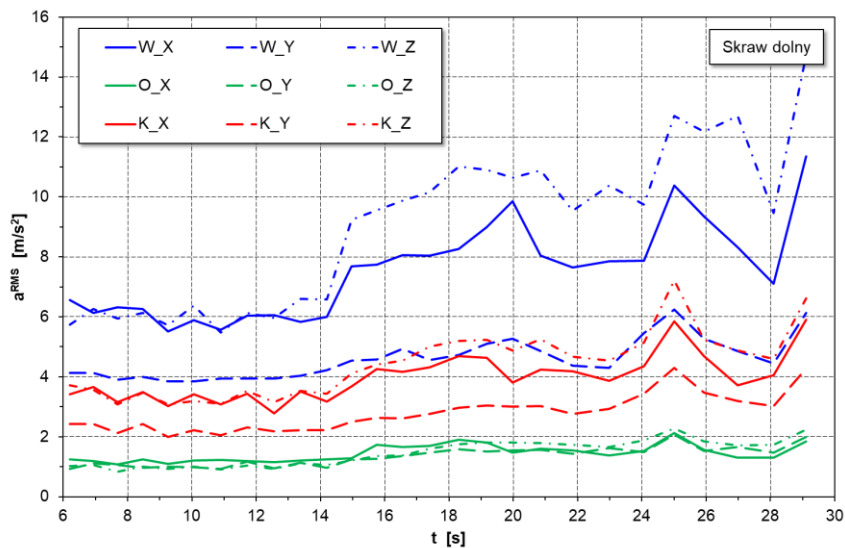
Rys. 9. Przebiegi czasowe składowych przyspieszenia drgań podczas realizacji przykładowego skrawu dolnego: a) wysięgnik, b) część ruchoma obrotnicy, c) kadłub kombajnu



Rys. 10. Charakterystyki amplitudowo–częstościowe składowych przyspieszenia drgań podczas realizacji przykładowego skrawu dolnego: a) wysięgnik, b) część ruchoma obrotnicy, c) kadłub kombajnu

Wzrost intensywności drgań (zwłaszcza wysięgnika) ze wzrostem oporów urabiania spowodowanych wzrostem wytrzymałości urabianej calizny na ściskanie widoczny jest na przebiegu wartości skutecznych analizowanych składowych przyspieszenia drgań wyznaczonych na okres obrotu głowic urabiających (rys. 11). Efekt ten dotyczy przede wszystkim przyspieszenia drgań obwodowych (a_{wx}) oraz poprzecznych (a_{wz}) wysięgnika (odpowiednio: linia ciągła i punktowa w kolorze niebieskim). W drugiej części skrawu wartości skuteczne tych składowych przyspieszenia drgań wzrosły od początkowej wartości wynoszącej w obu przypadkach około 6 m/s^2 do blisko 15 m/s^2 – w przypadku drgań poprzecznych i około 11 m/s^2 – w przypadku drgań obwodowych wysięgnika, w końcowej

fazie jego realizacji. Obserwowany jest przy tym również wzrost wartości skutecznych pozostałych badanych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy i kadłuba kombajnu.



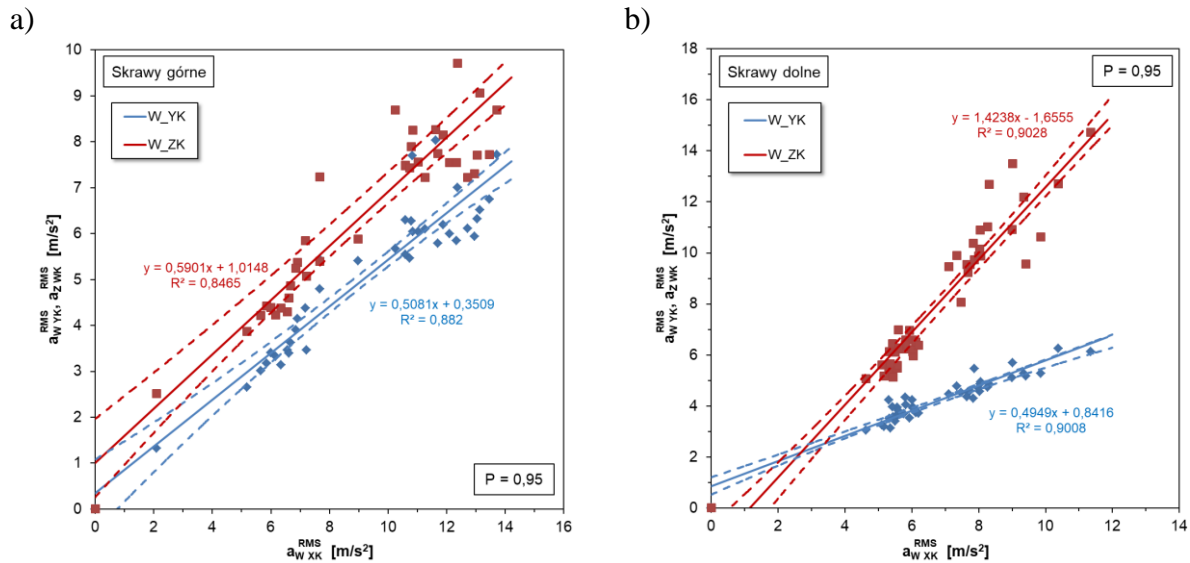
Rys. 11. Porównanie uśrednionych na obrót głowic urabiających wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba kombajnu podczas realizacji przykładowego skrawu dolnego

4. Analiza wpływu rodzaju skrawów wykonywanych poprzecznymi głowicami urabiającymi na intensywność drgań nadwozia wysięgnikowego kombajnu chodnikowego

Układy współrzędnych, wzdłuż osi których mierzone były składowe przyspieszenia drgań wysięgnika, części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba badanego kombajnu chodnikowego nie są równoległe. Dodatkowo, układy współrzędnych związane z wysięgnikiem i częścią ruchomą obrotnicy są ruchome (patrz rys. 1). Podczas wykonywania danego skrawu wysięgnik wychylony był bowiem w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża pod kątem α_V o określonej wartości. Ponadto, w miarę realizacji procesu urabiania wysięgnik oraz część ruchoma obrotnicy wychylane były w płaszczyźnie równoległej do podłoża, a ich chwilowe ustawienie charakteryzowane było za pomocą kąta α_H . W celu porównania wartości przyspieszenia drgań w rozpatrywanych węzłach konstrukcyjnych kombajnu, wektory składowych przyspieszenia drgań wysięgnika i części ruchomej obrotnicy zrzutowano na nieruchomy układ współrzędnych związany z kadłubem kombajnu $X_K Y_K Z_K$. Transformacja ta dotyczyła w zasadzie pięciu z dziewięciu składowych przyspieszenia drgań: a_{WX} , a_{WY} , a_{WZ} , a_{OX} oraz a_{OY} . W efekcie uzyskano przebiegi składowych przyspieszenia drgań rozpatrywanych podzespołów kombajnu w układzie odniesienia $X_K Y_K Z_K$: a_{WXK} , a_{WYK} , a_{WZK} , a_{OKK} , a_{OYK} , a_{OKK} , a_{KYK} , a_{KZK} .

Na rysunku 12 pokazano zależność wartości skutecznej składowych przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi Y_K i Z_K od wartości skutecznej składowej jego przyspieszenia drgań w kierunku osi X_K podczas wykonywania skrawów górnych (a) oraz dolnych (b). Analizie poddano wartości skuteczne przyspieszenia drgań wyznaczone na okres obrotu głowic urabiających podczas realizacji dwóch skrawów górnych oraz dwóch skrawów

dolnych. Ogółem analiza ta obejmowała zbiór 89 punktów pomiarowych: 38 – dla skrawów górnych oraz 51 – dla skrawów dolnych, wykonywanych w różnych warunkach.



Rys. 12. Zależność wartości skutecznej przyspieszenia drgań wsięgnika w kierunku osi Y_K i Z_K od wartości skutecznej przyspieszenia drgań wsięgnika w kierunku osi X_K dla: a) skrawów górnych, b) skrawów dolnych

W przypadku skrawów górnych, ze wzrostem wartości skutecznej przyspieszenia drgań wsięgnika w kierunku osi X_K rosną wartości skuteczne składowe jego przyspieszenia w kierunku pozostałych osi układu odniesienia $X_K Y_K Z_K$. Jest to zależność aproksymacyjnie liniowa (rys. 12a). Przeprowadzone testy statystyczne potwierdziły istotność współczynnika korelacji badanych zależności (prawdopodobieństwo testowe p było mniejsze od przyjętego poziomu istotności $\alpha=0,05$, co pozwoliło odrzucić hipotezę zerową o braku korelacji [16]). Wartości współczynników korelacji wyniosły w tym przypadku odpowiednio: 0,94 i 0,92 (korelacja niemal pełna). Model liniowy w dobry sposób opisuje zatem relacje pomiędzy składowymi przyspieszenia drgań wsięgnika. Testy istotności współczynników równań regresji opisujących badane zależności wykazały, że:

- współczynnik kierunkowy równania opisującego zależność $a_{W_{YK}}^{RMS} = f(a_{W_{XK}}^{RMS})$ istotnie różni się od zera ($p < 0,05$), przy czym model przechodzi blisko punktu $(0,0)$ – wyraz wolny nieistotnie różni się od zera ($p = 0,24$),
- współczynnik kierunkowy równania opisującego zależność $a_{W_{ZK}}^{RMS} = f(a_{W_{XK}}^{RMS})$ istotnie różni się od zera ($p < 0,05$), jednak model nie przechodzi przez punkt $(0,0)$ – wyraz wolny istotnie różni się od zera ($p < 0,05$).

Ponieważ oczywiste jest, że gdy $a_{W_{XK}}^{RMS} = 0$ wartości pozostałych składowych przyspieszenia drgań wsięgnika powinny być równe zero, w drugim z wymienionych przypadków zbudowany model regresji, w zakresie wartości składowych przyspieszenia drgań wsięgnika mniejszych od 2 m/s^2 , daje wyniki obarczone pewnym akceptowalnym błędem. Liniami przerywanymi zaznaczono przedziały ufności dla obu rozpatrywanych zależności (dla $P = 0,95$).

O ile w przypadku analizowanych skrawów górnych linie trendu badanych zależności są prawie równoległe (różnica kątów nachylenia wynosi niecałe 4°) o tyle dla skrawów dolnych, ze wzrostem wartości skutecznej składowej przyspieszenia drgań wsięgnika w kierunku osi X_K , wartość skuteczna składowej jego przyspieszenia drgań w kierunku osi Z_K rośnie

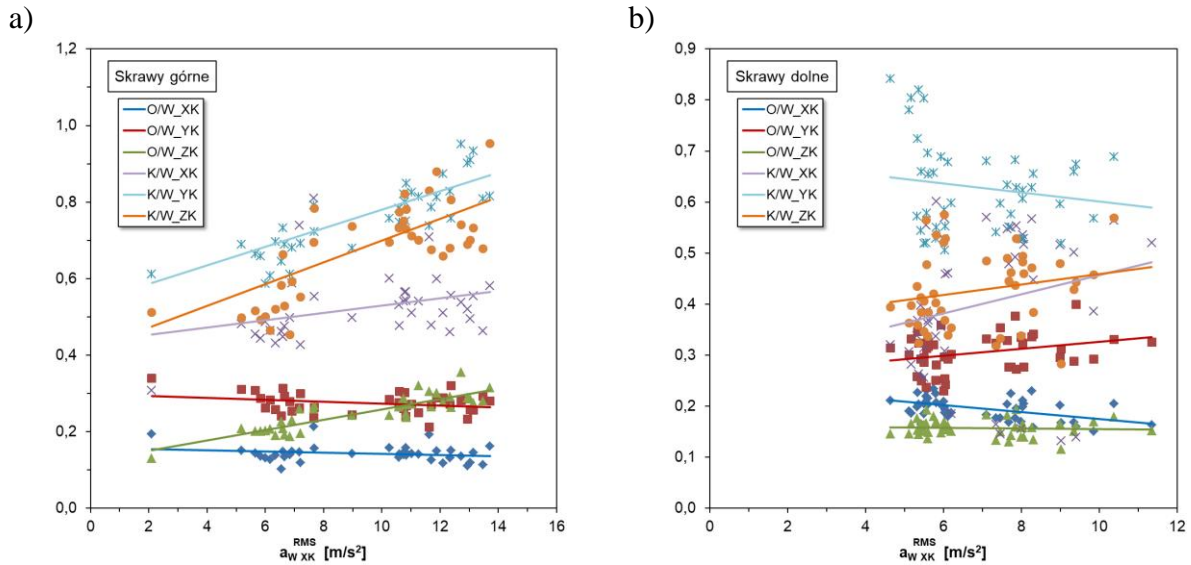
wyraźnie szybciej niż w kierunku osi Y_K (rys. 12b). Różnica kąta nachylenia linii trendu wynosi tu blisko 30° . Szybkość przyrostu wartości skutecznej przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi Y_K dla skrawów dolnych jest przy tym zbliżona do szybkości przyrostu wartości skutecznej tej składowej przyspieszenia drgań dla skrawów górnych (współczynniki kierunkowe równań regresji różnią się o około 10%). Również dla skrawów dolnych model liniowy w dobrym stopniu opisuje badane zależności. Uzyskane współczynniki korelacji są istotne statystycznie (prawdopodobieństwo testowe p w obu przypadkach było mniejsze od przyjętego poziomu istotności $\alpha = 0,05$). Wysokie wartości współczynników korelacji wskazują na niemal pełną korelację badanych wielkości ($r = 0,95$). Współczynniki kierunkowe obu równań regresji istotnie różnią się od zera ($p < 0,05$). Ocena istotności wyrazów wolnych wskazuje jednak w obu przypadkach, że modele liniowe nie przechodzą przez punkt $(0,0)$ – prawdopodobieństwo testowe $p < 0,05$ [23].

W celu powiązania intensywności drgań części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba kombajnu z intensywnością drgań wysięgnika wyznaczono względne wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań tych podzespołów kombajnu. Wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy zrzutowane na osie układu odniesienia $X_K Y_K Z_K$ oraz kadłuba kombajnu odniesione zostały do wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi tego układu współrzędnych. Zależność wyznaczonych w ten sposób względnych wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy oraz kadłuba kombajnu od wartości skutecznej składowej przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi X_K pokazano na rysunku 13. W przypadku skrawów górnych, cztery z sześciu badanych zależności są aproksymacyjnie rosnące (rys. 13a). Różne jest przy tym nachylenie linii trendu. Wskazuje to na zróżnicowane relacje pomiędzy składowymi przyspieszenia drgań wyodrębnionych podzespołów kombajnu w poszczególnych kierunkach oraz różny ich związek z drganiami obwodowymi wysięgnika. Wyjątkiem jest zależność względnych wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy w kierunku osi X_K (linia niebieska) oraz osi Y_K (linia czerwona). W tym bowiem przypadku, niezależnie od wartości skutecznej składowej przyspieszenia drgań wysięgnika $a_{W_{XK}}^{RMS}$, stosunek wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań obrotnicy i wysięgnika jest praktycznie stały. Dla skrawów górnych, względne wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy kształtowały się (rys. 13a, tabela 2):

- $a_{O_{XK}}^{RMS} / a_{W_{XK}}^{RMS}$ na poziomie 0,14,
- $a_{O_{YK}}^{RMS} / a_{W_{YK}}^{RMS}$ na poziomie 0,28,
- $a_{O_{ZK}}^{RMS} / a_{W_{ZK}}^{RMS}$ w zakresie od 0,13 do 0,36 (średnio 0,25).

Z kolei względne wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań kadłuba kombajnu przyjmowały wartości z przedziału:

- $a_{K_{XK}}^{RMS} / a_{W_{XK}}^{RMS}$ od 0,31 do 0,81 (średnio 0,52),
- $a_{O_{YK}}^{RMS} / a_{W_{YK}}^{RMS}$ od 0,59 do 1,1 (średnio 0,77),
- $a_{O_{ZK}}^{RMS} / a_{W_{ZK}}^{RMS}$ od 0,45 do 1,1 (średnio 0,68).



Rys. 13. Zależność względnych wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy i kadłuba kombajnu od wartości skutecznej przyspieszenia drgań wysięgnika w kierunku osi X_K dla: a) skrawów górnych, b) skrawów dolnych

Porównanie względnych wartości skutecznych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy i kadłuba dla skrawów górnych oraz skrawów dolnych

Tabela 2

	Skrawy górne	Skrawy dolne	SD/SG
1	2	3	4
$a_{O\ XK}^{RMS} / a_{W\ XK}^{RMS}$	0,14	0,20	1,43
$a_{O\ YK}^{RMS} / a_{W\ YK}^{RMS}$	0,28	0,31	1,11
$a_{O\ ZK}^{RMS} / a_{W\ ZK}^{RMS}$	0,25	0,16	0,64
$a_{K\ XK}^{RMS} / a_{W\ XK}^{RMS}$	0,52	0,40	0,77
$a_{K\ YK}^{RMS} / a_{W\ YK}^{RMS}$	0,77	0,63	0,82
$a_{K\ ZK}^{RMS} / a_{W\ ZK}^{RMS}$	0,68	0,43	0,63

Przeciętne wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań kadłuba kombajnu stanowią więc od 1/2 do 3/4 wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika. Z kolei, wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy nie przekraczają średnio 1/3 wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika.

Dla skrawów dolnych, cztery spośród sześciu wyznaczonych wartości przeciętnych rozpatrywanych ilorazów wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań były mniejsze (w granicach od 18 do 37%) od wartości uzyskanych dla skrawów górnych (tabela 2 – kol. 4). Intensywność drgań zwłaszcza kadłuba kombajnu podczas wykonywania skrawów dolnych była więc mniejsza w porównaniu do skrawów górnych (przyjmując taki sam dla obu rodzaju skrawów poziom drgań wysięgnika). Wyjątkiem były drgania części ruchomej obrotnicy w kierunku osi X_K i osi Y_K . Przeciętnie, względne wartości skuteczne składowych przyspieszenia drgań dla skrawów dolnych były tu odpowiednio o: 43% i 11% większe w stosunku do wartości uzyskanych dla skrawów górnych.

Ponieważ poszczególne skrawy wykonywane były w warstwach o różnej wytrzymałości na ściskanie, przy różnych wartościach parametrów procesu urabiania, drgania kombajnu chodnikowego generowane tym procesem cechowały się różną intensywnością. Dla potrzeb porównania intensywności drgań podczas wykonywania skrawów górnych oraz skrawów dolnych dla różnych warunków realizacji procesu urabiania wprowadzono wskaźnik intensywności drgań W_A^{RMS} . Za miarę intensywności drgań kombajnu przyjęto wartość skuteczną przyspieszenia drgań wysięgnika odniesioną do iloczynu wytrzymałości na ściskanie urabianej calizny oraz pola przekroju poprzecznego skrawów:

$$W_A^{RMS} = \frac{RMS}{R_c^m \cdot S^m} \quad [(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}]$$

gdzie:

RMS – wartość skuteczna składowej przyspieszenia drgań wysięgnika odpowiednio w kierunku osi X_K , Y_K lub Z_K przyjętego układu odniesienia, m/s^2 ,

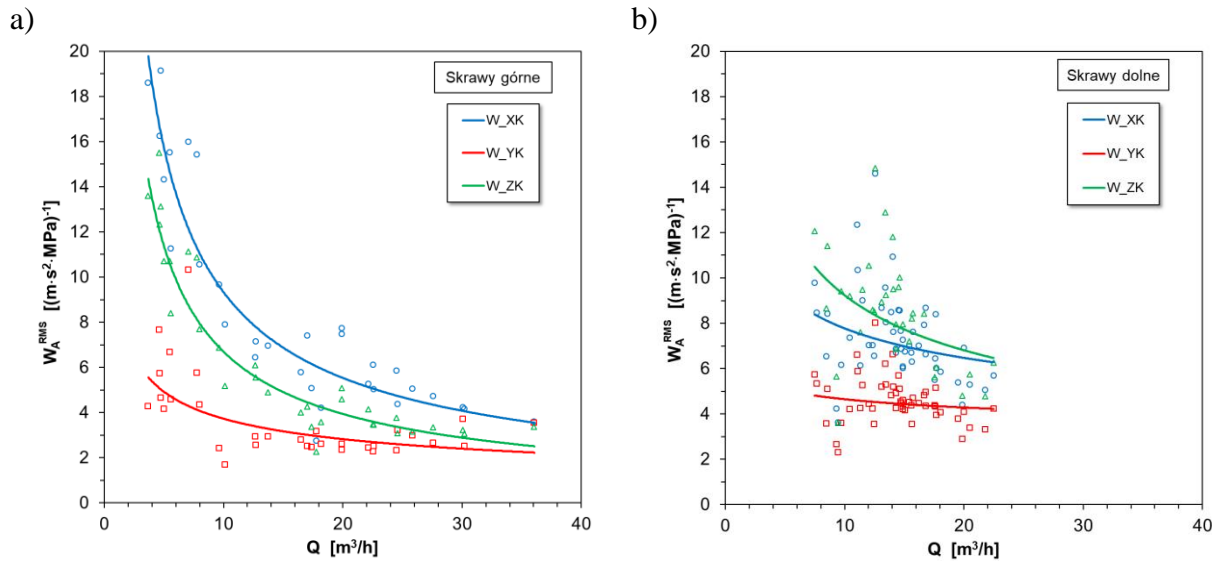
R_c^m – wartość średnia wytrzymałości urabianej calizny na ściskanie na długości analizowanego odcinka skrawu wykonanego głowicami urabiającymi, MPa,

S^m – wartość średnia pola powierzchni przekroju poprzecznego skrawu na długości rozpatrywanego odcinka skrawu, m^2 .

Zarówno dla skrawów górnych, jak i dolnych zależność wskaźnika intensywności drgań W_A^{RMS} od wydajności urabiania jest aproksymacyjnie hiperboliczna (rys. 14). Ze wzrostem wydajności procesu urabiania realizowanego w danych warunkach maleje zatem intensywność drgań. Hiperboliczny charakter tej zależności wskazuje na to, iż szczególnie duże drgania odpowiadają niskim wydajnościom urabiania. Jest to zwłaszcza widoczne w przypadku skrawów górnych. Pomimo jednak, że wydajności urabiania uzyskane dla analizowanych skrawów dolnych zawierały się w znacznie węższym zakresie niż dla skrawów górnych, efekt ten jest tu również widoczny. Gdy wydajność urabiania $Q > 15 m^3/h$, wartości analizowanych wskaźników dla obu rodzajów skrawu są relatywnie niskie (linie trendu odwzorowujące badane zależności są w tym zakresie wydajności urabiania dość płaskie). Dla skrawów górnych największą intensywnością cechowały się drgania wysięgnika w kierunku osi X_K (rys. 14a – linia niebieska). W uzyskanym dla analizowanych skrawów górnych zakresie wydajności urabiania, to jest od 3,7 do 36 m^3/h , wskaźnik intensywności drgań wysięgnika W_A^{RMS} w kierunku osi X_K zawierał się w granicach od 2,8 do 20,2 $(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}$ – punkty w kolorze niebieskim. Nieco mniejsze wartości przyjmował ten wskaźnik w przypadku drgań wysięgnika w kierunku osi Z_K (linia zielona na rys. 14a). Zawierały się one bowiem w przedziale od 2,2 do 15,5 $(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}$. Najmniejsze wartości wskaźnika intensywności drgań uzyskano natomiast dla drgań w kierunku osi Y_K (rys. 14a – linia czerwona). Zawierały się one bowiem w zakresie od 1,7 do 11,5 $(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}$.

Dla analizowanych skrawów dolnych wydajność urabiania Q mieściła się w zakresie od 7,5 do 22,5 m^3/h (rys. 14b). Wartości wskaźnika W_A^{RMS} wyznaczone dla drgań w kierunku osi X_K i Z_K zawierały się odpowiednio w granicach: od 3,6 do 14,6 $(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}$ oraz od 3,6 do 14,8 $(m \cdot s^2 \cdot MPa)^{-1}$. Pomimo, że rozstęp wartości obu wskaźników jest bardzo podobny, to ich rozkład sprawił, że linia trendu badanej zależności w przypadku drgań w kierunku osi Z_K (linia zielona) położona jest wyżej linii odwzorowującej tę zależność dla drgań w kierunku osi X_K (linia niebieska). Podobnie jak dla skrawów górnych, również i tutaj najniżej położona jest linia trendu odwzorowująca zależność wskaźnika intensywności drgań w kierunku osi Y_K od

wydajności procesu urabiania (linia czerwona). Wskaźnik ten przyjmował bowiem wartości z przedziału od 2,3 do 8 $(\text{m}\cdot\text{s}^2\cdot\text{MPa})^{-1}$.



Rys. 14. Porównanie wskaźnika intensywności drgań W_A^{RMS} dla: a) skrawów górnych, b) skrawów dolnych

5. Podsumowanie

Poznanie wielkości i charakteru rzeczywistych drgań w węzłach konstrukcyjnych kombajnu chodnikowego podczas urabiania jest źródłem cennej wiedzy leżącej u podstaw projektowania nowych rozwiązań konstrukcyjnych, doskonalenia już istniejących kombajnów chodnikowych oraz optymalizacji technologii urabiania, zwłaszcza skał trudno urabialnych, w celu zapewnienia wysokiej niezawodności tego rodzaju maszyn górniczych oraz skuteczności ich działania. Charakterystyki dynamiczne w postaci sygnału drganiowego zarejestrowanego podczas badań doświadczalnych realizowanych na stanowiskach badawczych w naturalnej skali geometrycznej, czy w trakcie badań w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych kombajnu chodnikowego są niezwykle pomocne we wnioskowaniu w zakresie możliwości redukcji intensywności drgań generowanych procesem roboczym, istotnej nie tylko z punktu widzenia trwałości maszyny, lecz również w aspekcie ergonomii pracy operatora, czy oddziaływania kombajnu na otoczenie.

Przedstawiona w niniejszym artykule analiza wyników pomiarów drgań wysięgnikowego kombajnu chodnikowego wskazuje na to, iż najbardziej intensywnym drganiom poddawany jest wysięgnik. Wynika to przede wszystkim z tego, iż podlega on bezpośrednio działaniu sił od urabiania, wymuszających drgania maszyny. Na intensywność drgań wpływają cechy konstrukcyjne kombajnu, a zwłaszcza sposób podparcia wysięgnika, sposób łożyskowania części ruchomej obrotnicy, rozłożenie masy i położenie środka ciężkości oraz własności dynamiczne maszyny i jej napędów. Nie bez znaczenia są też własności mechaniczne urabianego ośrodka skalnego. Drgania, zwłaszcza wysięgnika, mają przy tym istotny wpływ na przebieg urabiania, gdyż są one przyczyną periodycznych zmian wartości jego parametrów.

Jak wykazała przeprowadzona analiza, drgania wysięgnika w trzech wzajemnie prostopadłych kierunkach są ze sobą skorelowane. Miarą intensywności tych drgań są

wartości skuteczne składowych jego przyspieszenia. W badanym zakresie zmienności wartości skutecznych składowych przyspieszenia drgań wysięgnika zależność tą dobrze opisuje model liniowy. Rodzaj skrawu: górny/dolny wpływa wyraźnie na intensywność drgań, zwłaszcza poprzecznych wysięgnika. Pomimo większej intensywności tych drgań, dla skrawów dolnych, względne wartości skuteczne przyspieszenia drgań części ruchomej obrotnicy i kadłuba kombajnu były mniejsze w porównaniu do skrawów górnych. Wyjątkiem były drgania części ruchomej obrotnicy w kierunku osi X_K i Y_K . Redukcję intensywności drgań wysięgnika można uzyskać poprzez aktywne sterowanie siłownikami mechanizmów wychylania wysięgnika. Rozwiązanie takie jest stosowane w niektórych wysięgnikowych kombajnach chodnikowych, na przykład w kombajnie MR 620 firmy Sandvik [15].

Z punktu widzenia redukcji intensywności drgań nadwozia wysięgnikowego kombajnu chodnikowego korzystne jest zapewnienie możliwie dużej wydajności procesu urabiania. Osiągnięte to może być poprzez odpowiednie sterowanie parametrami procesu urabiania, w wyniku programowej zmiany ich wartości w funkcji obciążenia kombajnu od urabiania. Realizacja tego zadania jest jednak możliwa wyłącznie w wyniku zastosowania układu automatycznego sterowania procesem urabiania [6, 12]. Jest to istotny etap na drodze do robotyzacji tego rodzaju maszyn górniczych.

Literatura

- [1] Cheluszka P.: The anti-resonance criterion in selecting pick systems for fully operational cutting machinery used in mining. *Archives of Mining Sciences* 62(2017), 4, p. 775–793, DOI: 10.1515/amsc-2017-0054
- [2] Cheluszka P.: Identyfikacja geometrii skrawów wykonywanych głowicami poprzecznymi wysięgnikowego kombajnu chodnikowego na podstawie digitalizacji urabianej powierzchni. Rozdz. w monografii „Problemy eksploatacji i zarządzania w górnictwie”, Kraków 2017, s. 95–105.
- [3] Cheluszka P., Gawlik J.: Computer modelling of roadheader’s body vibration generated by the working process. *Vibrations in Physical Systems*, vol. 27, 2016, p. 67–74.
- [4] Cheluszka P., Mann R.: Vibration identification of the roadheader cutting head using high-speed cameras. 3rd International Conference of Computational Methods in Engineering Science – CMES’18, Kazimierz Dolny 22–24 November 2018, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925203018>
- [5] Cheluszka P., Sobota P., Głuszek G.: Porównanie charakterystyk energetycznych urabiania kombajnem chodnikowym z głowicami poprzecznymi o zróżnicowanej konstrukcji. *Przegląd Górniczy* Nr 3/2018, s. 59–70.
- [6] Cheluszka P., Sobota P., Głuszek G.: Studies of the behaviour of the automatic control system of roadheader cutting heads movement. 3rd International Conference of Computational Methods in Engineering Science – CMES’18, Kazimierz Dolny 22–24 November 2018, DOI: <https://doi.org/10.1051/mateconf/201925209002>
- [7] Copur H., Bilgin N., Tuncdemir H., Balci C.: A set of indices based on indentation tests for assessment of rock cutting performance and rock properties. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 103, Nov. 2003, p. 589–599.
- [8] Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P.: Numerical Tests of Roadheader’s Boom Vibrations. *Vibrations in Physical Systems*, vol. 26, 2014, p. 65–72.

- [9] Gajewski J., Podgórski J., Jonak J., Szkudlarek Z.: Numerical simulation of brittle rock loosening during mining process. *Computational Materials Science*, vol. 43, iss. 1, July 2008, p. 115–118, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.commatsci.2007.07.044>
- [10] Gao Kuidong, Du Changlong, Jiang Hongxiang, Liu Songyong: A theoretical model for predicting the Peak Cutting Force of conical picks. *Frattura ed Integrità Strutturale*, 27, 2014, p. 43–52; DOI: 10.3221/IGF-ESIS.27.06
- [11] Goktan R.M., Gunes N.: A semi-empirical approach to cutting force prediction for point-attack picks. *The Journal of The South African Institute of Mining and Metallurgy*, vol. 105, April 2005, p. 257–263.
- [12] Jasiulek D., Świder J.: Mechatronic systems in mining roadheaders – examples of solutions, *PAR magazine*, no. 1, 2013, pp. 121–127.
- [13] Jaszczuk M., Cheluszka P., Mann R.: Komputerowe wspomaganie doboru cech konstrukcyjnych kombajnu ścianowego. Monografia. Gliwice: Wyd. Politechniki Śląskiej. Gliwice, 2016.
- [14] Jonak J., Podgórski J.: Mathematical Model and Results of Rock Cutting Modeling. *Journal of Mining Science*, November 2001, vol. 37, iss. 6, p. 615–618, DOI: <https://doi.org/10.1023/A:101603480>
- [15] Kotwica K., Klich A.: Maszyny i urządzenia do drążenia wyrobisk korytarzowych i tunelowych. Wyd. ITG KOMAG, Gliwice, 2011.
- [16] Maliński M.: Wybrane zagadnienia statystyki matematycznej w Excelu i pakiecie Statistica. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice, 2015.
- [17] Minjun Zhang, Fuyan Lyu, Xiushan Tang, Yang Yang, Xiaodong Ji, Miao Wu: Analysis of Vibration of Roadheader Rotary Table Based on Finite Element Method and Data from Underground Coalmine. *Shock and Vibration*, vol. 2018, Article ID 4396520, pp. 10, DOI: <https://doi.org/10.1155/2018/4396520>
- [18] Okubo S., Nishimatsu Y.: Fundamental Study on Vibration of Roadheader. *Journal of the Mining and Metallurgical Institute of Japan*, vol. 104, iss. 1210, 1988, p. 891–896, DOI: https://doi.org/10.2473/shigentosozai1953.104.1210_891
- [19] Prokopenko S., Li A., Kurzina I., Sushko A.: Improved Operating Performance of Mining Machine Picks. VII International Scientific Practical Conference “Innovative Technologies in Engineering”, IOP Conf. Series: Materials Science and Engineering 142, 2016, 012115, DOI:10.1088/1757-899X/142/1/012115
- [20] Rånman, K.-E.: A model describing rock cutting with conical picks. *Rock Mechanics and Rock Engineering*, vol. 18, no. 2, 1985, p. 131–140.
- [21] Rostami J., Ozdemir L., Neil D.M.: Roadheaders performance optimization for mining and civil construction. *Proceedings of 13th Annual Technical Conference*. Las Vegas, 18–21 April 1994, pp. 8.
- [22] Sikora W. (red.): Określenie sił i energochłonności urabiania nożami stożkowymi. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice 2000.
- [23] Stanisław A.: Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTICA PL na przykładach z medycyny. Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe. StatSoft, Kraków, 2007.
- [24] Vašek J., Pinka J.: Research into the ‘Critical State’ of Rock Cutting Tools. *Archives of Mining Sciences* vol. 51, iss. 3, 2006, p. 355–369.

- [25] Xiaohui Liu, Songyong Liu, Lie Li, Xinxia Cui: Experiment on Conical Pick Cutting Rock Material Assisted with Front and Rear Water Jet. *Advances in Materials Science and Engineering* 2015, Article ID 506579, pp. 9, DOI: 10.1155/2015/506579
- [26] Xuefeng Li, Shibo Wang, Shirong Ge, Reza Malekian, Zhixiong Li: Numerical simulation of rock fragmentation during cutting by conical picks under confining pressure. *Comptes Rendus Mécanique* vol. 345, iss. 12, 2017, p. 890–902, DOI: <https://doi.org/10.1016/j.crme.2017.09.004>
- [27] Zi Xian Yang, Xiao Dong Ji, Hai Jiang, Yu Long Hu, Miao Wu: Test and research on vibration characteristics of EBH300(A) roadheader. *Applied Mechanics and Materials*, vol. 487, 2014, p. 352–356, DOI: <https://doi.org/10.4028/www.scientific.net/AMM.487.352>
- [28] <https://www.hansfordsensors.com/pl/urzadzenia/akcelerometry-przemyslowe/ac/ac-standard-akcelerometry-ac-z-gornym-wyjsciem/> (dostęp 12.11.2018).
- [29] <http://www.ni.com/> (dostęp 10.05.2016).

dr hab. inż. Piotr Cheluszka, prof. PŚ
piotr.cheluszka@polsl.pl
Politechnika Śląska
Wydział Górnictwa i Geologii
Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa
ul. Akademicka 2, 44-100 Gliwice

mgr inż. Dawid Plaszczyńska
Węglokoks Kraj KWK Bobrek-Piekary Ruch Bobrek
ul. Konstytucji 76, 41-905 Bytom

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)