

Doświadczalna identyfikacja obciążenia napędów wysięgnikowego kombajnu chodnikowego podczas urabiania

Experimental identification of the load of the boom-type roadheader's drives during cutting proces



Dr hab. inż. Piotr Cheluszka, prof. PŚ*



Inż. Dawid Habryka**



Inż. Patryk Szolc**

Treść: Proces urabiania, zwłaszcza skał trudno urabialnych, wysięgnikowymi kombajnami chodnikowymi jest źródłem silnych obciążeń dynamicznych, nie tylko napędu głowic urabiających, ale również mechanizmów wychylania wysięgnika, na którego końcu głowice te są rozmieszczone. Zapewnienie odpowiednich proporcji pomiędzy wartościami parametrów siłowych mechanizmów wychylania wysięgnika oraz mocą napędu głowic urabiających i masą kombajnu ma kluczowe znaczenie z punktu widzenia skuteczności i efektywności urabiania czoła przodku drążonego wyrobiska korytarzowego w kopalniach podziemnych lub tuneli. W artykule przedstawiono wybrane wyniki badań doświadczalnych kombajnu chodnikowego R-130 (prod. Famur S.A.) w warunkach półprzemysłowych. Na podstawie charakterystyk dynamicznych zarejestrowanych podczas urabiania powierzchni bloku cementowo-piaskowego określone zostały relacje pomiędzy obciążeniem napędu głowic urabiających oraz mechanizmów wychylania wysięgnika. Zbadano wpływ technologii urabiania (rodzaju skrawu wykonywanego podczas przemieszczania głowic urabiających w ruchu roboczym) przy różnych skojarzeniach wartości parametrów procesu urabiania na obciążenie napędów kombajnu chodnikowego odpowiedzialnych za realizację tego procesu.

Abstract: The mining process, especially of hard rocks, using boom-type roadheaders is the source of strong dynamic loads not only for the drive of cutting heads, but also for boom swinging mechanisms, at the end of which these cutting heads are arranged. Ensuring appropriate proportions between the values of the force parameters of the boom swinging mechanisms and the power of cutting heads drive and the weight of the roadheader is of key importance from the point of view of efficiency and effectiveness of mining the heading face of the drilled roadways in the underground mine or tunnels. The article presents selected results of experimental investigations of the R-130 roadheader (manufactured by Famur S.A.) in laboratory conditions. On the basis of dynamic characteristics recorded during cutting of the cement-sand block surface, the relations between the load of the cutting heads drive and boom swinging mechanisms were determined. The influence of cutting technology (the type of cut performed during moving of cutting heads in a work movement) was examined with different associations of the values of cutting process parameters for the load of the roadheader's drives responsible for this process.

Słowa kluczowe:

kombajn chodnikowy, proces urabiania, obciążenie napędów kombajnu, badania doświadczalne, pomiary parametrów pracy

Keywords:

roadheader, cutting process, load of roadheader's drives, experimental tests, measurements of working parameters

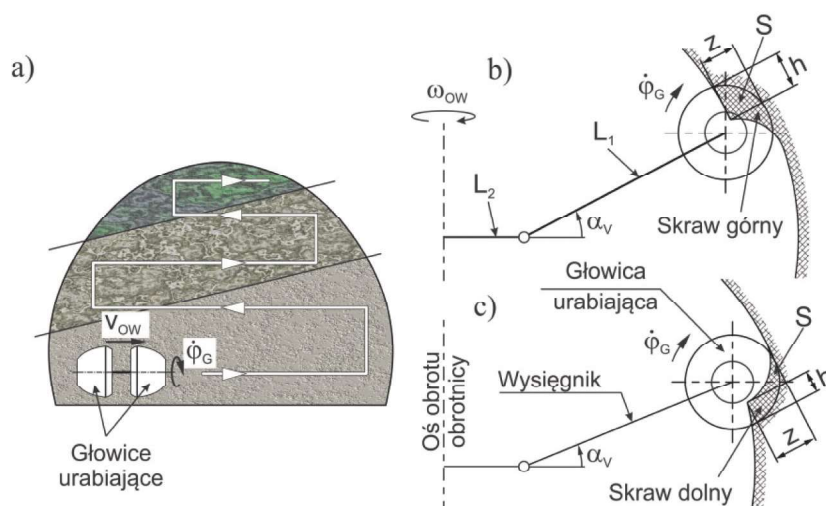
1. Wprowadzenie

Cechą charakterystyczną wysięgnikowych kombajnów chodnikowych jest to, iż wyposażone są one w jedną podłużną, bądź dwie poprzeczne głowice urabiające o małych wymiarach gabarytowych w stosunku do pola powierzchni czoła przodku drążonego przez nie wyrobiska korytarzowego lub tunelu. Głowice te umieszczone są na końcu ruchomego wysięgnika wychylanego w płaszczyźnie równoległej i prostopadłej do

spągu za pomocą mechanizmów o napędzie hydraulicznym. Dzięki temu przemieszczane one mogą być po powierzchni czoła przodku zgodnie z realizowaną technologią urabiania (Kotwica, Klich 2011). Sposób przemieszczania głowic urabiających podczas urabiania zależy w dużej mierze od budowy geologicznej górotworu, w którym wykonywane są tego rodzaju roboty górnicze (urabialności skał zalegających w obrębie czoła przodku, sposobu uławicenia oraz grubości warstw tworzących masyw skalny). Jednak w powszechnie stosowanej technologii urabiania powierzchni czoła przodku drążonego wyrobiska korytarzowego proces ten polega na wykonywaniu skrawów podczas przemieszczania głowic

* Politechnika Śląska, Gliwice, WGiG

** Politechnika Śląska, Gliwice, WGiG, student



Rys. 1. Tor ruchu poprzecznych głowic urabiających w klasycznej technologii urabiania powierzchni czoła przodku oraz parametry charakteryzujące proces urabiania (Cheluska, Sobota 2018): z – zabiór, h – wysokość skrawu, v_{OW} – prędkość przemieszczania głowic urabiających, $\dot{\phi}_G$ – prędkość kątowna głowic urabiających

Fig.1. The moving path of the transverse cutting heads in the typical technology of cutting the heading face surface and the parameters characterizing the cutting process (Cheluska, Sobota 2018): z – web of cut, h – cut height, v_{OW} – cutting heads movement speed, $\dot{\phi}_G$ – cutting heads angular speed

urabiających równolegle do spągu, od jednego do drugiego ościsła wyrobiska (Jonak 2009, Klich i in. 1999) (rys.1a). W obrębie danego ościsła głowice urabiające przemieszczane są w górę lub w dół, dzięki czemu może być wykonywany kolejny skraw (Cheluska, Sobota 2018). Proces urabiania skały realizowany jest na zasadzie skrawania za pomocą noży rozmieszczonych na głowicach urabiających (Jonak 2002). Głowice urabiające wprawiane są przy tym w ruch obrotowy przez napęd zabudowany w wysięgniku.

W trakcie realizacji procesu urabiania kombajn chodnikowy poddawany jest działaniu silnych obciążeń dynamicznych. Obciążenia te są skutkiem oddziaływania noży na urabianą caliznę i zależą od wielu czynników, do których zaliczyć należy przede wszystkim:

- własności mechaniczne urabianych skał,
- stereometrię głowic urabiających oraz zastosowanych noży,
- parametry procesu urabiania, takie jak (rys.1): zabiór z , wysokość skrawu h , prędkość kątowna głowic urabiających $\dot{\phi}_G$ oraz prędkość ich przemieszczania w ruchu roboczym (prędkość obwodowa wychylenia wysięgnika) v_{OW} .

O efektywności urabiania, zwłaszcza skał trudno urabiających, decydują z jednej strony cechy konstrukcyjne maszyny, z drugiej zaś – odpowiednia technologia urabiania, co jest równoznaczne z odpowiednim doбором toru ruchu głowic urabiających po powierzchni czoła przodku oraz wartości parametrów tego procesu. Stąd potrzeba wspomaganie komputerowo optymalizacji głowic urabiających dla określonych warunków pracy kombajnu chodnikowego oraz optymalizacji parametrów procesu urabiania (Cheluska 2016, Cheluska, Sobota 2018, Liu i in. 2012, Xiaohuo i in. 2012). Szczególnie istotne znaczenie, na etapie projektowania maszyny, ma odpowiednie skojarzenie wartości parametrów siłowych mechanizmów wychylenia wysięgnika z mocą napędu głowic urabiających. Nieprawidłowo dobrane proporcje pomiędzy parametrami mogą bowiem skutkować:

- niską wydajnością urabiania (mechanizm obrotu wysięgnika nie zapewnia możliwości uzyskania dużych prędkości przemieszczania głowic urabiających),

- niemożnością realizacji procesu urabiania w wyniku utykania napędu głowic urabiających, czy braku możliwości utrzymania zadanej wysokości skrawu.

Nie bez znaczenia jest przy tym zapewnienie odpowiedniej masy kombajnu dostosowanej do mocy napędu głowicy urabiającej oraz parametrów siłowych mechanizmów wychylenia wysięgnika, niezbędnej dla zachowania stateczności przez maszynę (Ergun 2017, Zong i in. 2018).

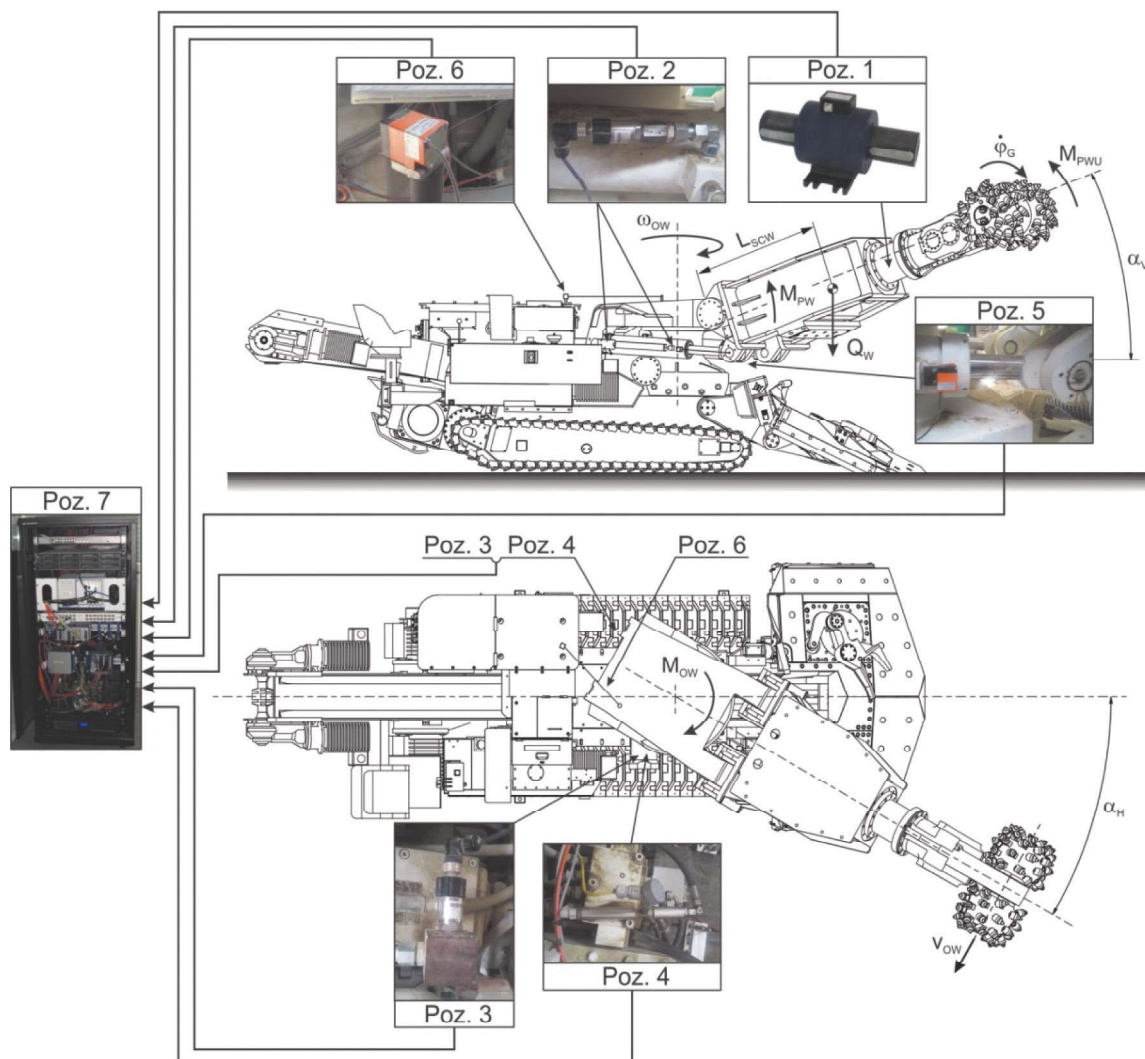
W niniejszym artykule zaprezentowano wybrane wyniki obszernych badań doświadczalnych wysięgnikowego kombajnu chodnikowego, zrealizowanych na stanowisku badawczym w warunkach półprzemysłowych (rys.2). Pomiary obciążeń dynamicznych w wytypowanych węzłach konstrukcyjnych oraz napędach tego kombajnu dokonane zostały podczas urabiania powierzchni bloku cementowo-piaskowego o odpowiednio dobranych własnościach mechanicznych. Warunki realizacji procesu urabiania odzwierciedlać miały bowiem rzeczywiste warunki pracy tego rodzaju maszyn w kopalniach podziemnych węgla kamiennego.

2. Badania doświadczalne

Obiektem badań był wysięgnikowy kombajn chodnikowy R-130 (Famur S.A.) o mocy silnika w układzie urabiania wynoszącej 132 kW i masie około 30 t. Dla potrzeb badawczych wyposażony on został w rozbudowany układ pomiarowo-rejestrujący (75 torów pomiarowych) (Cheluska i in. 2018). Dla potrzeb pomiaru obciążenia dynamicznego napędów kombajnu chodnikowego odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania wyposażony on został w (rys. 2):

- momentomierz 1811 RTT (BCM Sensor Technologies) – poz. 1,
- czujniki ciśnienia HDA 4400 (Hydac) – poz. 2 i 3,
- przepływomierze LC1/2X5/8-1,7-17-C-1MX-NPT-CE (Hoffler Flow Controls) – poz. 4.

Pomiar obciążenia dynamicznego napędu głowic urabiających podczas realizacji procesu urabiania (momentu obrotowego M i prędkości kątownej) zrealizowano za pomocą



Rys. 2. Obiekt badań – wysięgnikowy kombajn chodnikowy R-130 wyposażony w czujniki pomiarowe: 1 – momentomierz, 2, 3 – czujniki ciśnienia, 4 – przepływomierze, 5, 6 – czujniki linkowe, 7 – rejestrator danych
Fig.2. Research object – a R-130 boom-type roadheader equipped with measuring sensors: 1 – rotary torque transducer, 2, 3 – pressure sensors, 4 – flow rate sensors, 5, 6 – draw-wire encoders, 7 – data logger

momentomierza (tab.1) zabudowanego pomiędzy silnikiem napędowym i przekładnią zębatą. Zamontowany on został w cylindrycznej wstawce, łączącej kadłub przekładni zębatej w układzie urabiania z ramą wysięgnika. Czopy wału mo-

mentomierza połączone zostały z czopem wału silnika i wału wejściowego przekładni zębatej za pomocą dwóch sprzęgieł podatnych.

Tabela 1. Podstawowe dane techniczno-metrologiczne momentomierza 1811 RTT (prod. BCM Sensor Technologies)

Table 1. Basic technical-metrological data of the 1811 RTT rotary torque transducer (manufactured by BCM Sensor Technologies)

Parametr	Jednostka	Wartość
Zakres pomiarowy momentu obrotowego	Nm	± 2000
Klasa dokładności	%FS	0,5
Zakres prędkości obrotowej	obr/min	± 1500
Sygnal prędkości	impulsów/obrót	60
Sygnal wyjściowy	mA	$4 \div 20$
Temperatura pracy	$^{\circ}\text{C}$	$0 \div 50$
Czas reakcji	μs	100
Pobór prądu	mA	< 10
Napięcie zasilania	V	15
Masa	kg	~ 24

Tabela 3. Podstawowe dane techniczno-metrologiczne przepływomierza LC1/2X5/8–1.7–17–C–1MX–NPT–CE (prod. Hoffer Flow Controls)
Table 3. Basic technical and metrological data of the LC1/2X5/8–1.7–17–C–1MX–NPT–CE flow rate sensors (manufactured by Hoffer Flow Controls)

Parametr	Jednostka	Wartość
Zakres pomiarowy	dm ³ /min	6,4 ÷ 64
Ciśnienie pracy	MPa	~40
Ciśnienie niszczące	MPa	125
Stała K	impulsów/dm ³	1425
Liniowość	%	±1
Powtarzalność	%	±0,1
Maksymalna częstotliwość	Hz	1530
Sygnal wyjściowy	mA	4 ÷ 20
Temperatura pracy	°C	-100 ÷ +100
Masa	kg	~0,2

Ponieważ analizowany jest przebieg procesu urabiania w czasie wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża (w ruchu roboczym), mierzono natężenie przepływu cieczy hydraulicznej, którą zasilane były siłowniki mechanizmu obrotu wysięgnika. Wykorzystano w tym celu przepływomierze amerykańskiej firmy Hoffer Flow Controls (tab.3) zainstalowane na przewodach zasilających siłownik prawy i lewy. Na podstawie wielkości przepływu cieczy hydraulicznej określono przebieg prędkości kątowej wychylania wysięgnika ω_{OW} i dalej jego prędkości obwodowej v_{OW} . Prędkość ta wyrażona jest następującym wzorem (rys.3a):

$$v_{OW} = 1000 \cdot \omega_{OW} \cdot (L_1 \cdot \cos \alpha_V + L_2) = 1000 \cdot \frac{8 \cdot \dot{V}_{OW}}{\pi \cdot D_{OW}^2 \cdot D_P} \cdot (L_1 \cdot \cos \alpha_V + L_2); \quad [\text{mm/s}] \quad (2)$$

gdzie:

- \dot{V}_{OW} – natężenie przepływu cieczy hydraulicznej zasilającej siłownik mechanizmu obrotu wysięgnika: prawy – w przypadku wychylania wysięgnika w prawo lub lewy – w przypadku wychylania wysięgnika w lewo [m³/s],
- L_1, L_2 – odpowiednio: długość wysięgnika oraz odległość pomiędzy osią obrotu obrótnicy i osią obrotu wysięgnika [m] (patrz rys. 1 i 3).

Podczas wykonywania skrawów głowicami urabiającymi w ruchu roboczym (równoległe do podłoża), siłowniki podnoszenia wysięgnika nie są zasilane cieczą hydrauliczną. Ich zadaniem jest bowiem utrzymanie zadanej wartości kąta wychylania wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża α_V (rys.1, 2 i 3b), decydującej o wysokości wykonywanego skrawu h . Na podstawie zarejestrowanych wartości ciśnienia wyznaczono wartość momentu podnoszenia wysięgnika M_{PW} według wzoru (rys.3b):

$$M_{PW} = 1000 \cdot \left[\pi \cdot \frac{D_{PW}^2}{4} \cdot (p_{PWL}^{(P)} + p_{PWP}^{(P)}) - \pi \cdot \frac{D_{PW}^2 - d_{PW}^2}{4} \cdot (p_{PWL}^{(N)} + p_{PWP}^{(N)}) \right] \cdot R_{PW}; \quad [\text{kNm}] \quad (3)$$

przy czym ramię działania sił rozwijanych przez siłowniki hydrauliczne opisuje wzór:

$$R_{PW} = \frac{R_O \cdot R_W \cdot \sin(\varphi_O + \varphi_W - \alpha_V)}{\sqrt{R_O^2 + R_W^2 + 2 \cdot R_O \cdot R_W \cdot \cos(\varphi_O + \varphi_W - \alpha_V)}}; \quad [\text{m}] \quad (4)$$

gdzie:

- $p_{PWL}^{(P)}, p_{PWP}^{(P)}$ – ciśnienie w przestrzeni podtłokowej siłowników podnoszenia wysięgnika (odpowiednio: lewego i prawego) [MPa],
- $p_{PWL}^{(N)}, p_{PWP}^{(N)}$ – ciśnienie w przestrzeni nadtłokowej siłowników podnoszenia wysięgnika (odpowiednio: lewego i prawego) [MPa],
- D_{PW}, d_{PW} – średnica cylindra oraz tłocyska siłowników podnoszenia wysięgnika [m],
- R_O, R_W – długość ostoi i wahacza mechanizmu wychylania wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [m],
- φ_O, φ_W – kąty determinujące ustawienie ostoi i wahacza mechanizmu wychylania wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [st.],
- α_V – kąt wychylania wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [st.].

Moment podnoszenia wysięgnika rozwijany przez siłowniki hydrauliczne wynika z momentu od jego sił ciężkości oraz momentu sił od urabiania (Tian i in. 2018). Opisany jest on przy tym następującym wzorem:

$$M_{PW} = Q_W \cdot L_{SCW} \cdot \cos \alpha_V - M_{PWU}; \quad [\text{kNm}] \quad (5)$$

gdzie:

- Q_W – ciężar wysięgnika [kN],
- L_{SCW} – odległość środka ciężkości wysięgnika od jego osi obrotu w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [m],
- M_{PWU} – moment sił od urabiania, zredukowany na oś obrotu wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża [kNm].

W celu określenia położenia głowic urabiających na powierzchni urabianego bloku cementowo-piaskowego monitorowano bieżące ustawienie wysięgnika w płaszczyźnie równoległej i prostopadłej do podłoża. Ustawienie to określone jest za pomocą kąta wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (α_H) i prostopadłej (α_V) do podłoża (rys. 3). Ustawienie wysięgnika mierzone było za pomocą dwóch czujników linkowych D5.3501.A111.000 (Kübler) – tab. 4. W przypadku mechanizmu podnoszenia wysięgnika czujnik linkowy mierzył bieżącą długość jednego z siłowników podnoszenia (rys. 2 – poz.5). Dla potrzeb pomiaru kąta obrotu wysięgnika α_H czujnik linkowy został natomiast zabudowany pomiędzy częścią ruchomą obrótnicy i kadłubem kombajnu (rys. 2 – poz. 6). Kąt wychylania wysięgnika

Tabela 4. Podstawowe dane techniczno-metrologiczne czujnika linkowego D5.3501.A111.000 (prod. Kübler)
Table 4. Basic technical and metrological data of the draw-wire encoders D5.3501.A111.000 (manufactured by Kübler)

Parametr	Jednostka	Wartość
Zakres pomiarowy	mm	1000
Rozdzielczość	mm	$\pm 0,15$
Siła wyciągnięcia linki	N	2
Maksymalna prędkość linki	m/s	0,8
Liniowość	%	$\pm 0,35$
Sygnal wyjściowy	mA	$4 \div 20$
Napięcie zasilania	V	$15 \div 28$
Temperatura pracy	$^{\circ}\text{C}$	$0 \div 50$
Masa	kg	$\sim 0,2$

jest proporcjonalny do długości linki rozwijanej ze szpulki wewnątrz czujnika.

Sygnaly prądowe z czujników pomiarowych, w standardzie 4.20 mA, doprowadzone zostały do rejestratora zbudowanego na bazie komputera pomiarowego PXIe1071 (National Instruments) wyposażonego w karty przetwarzające sygnaly pomiarowe (rys. 2 – poz. 7).

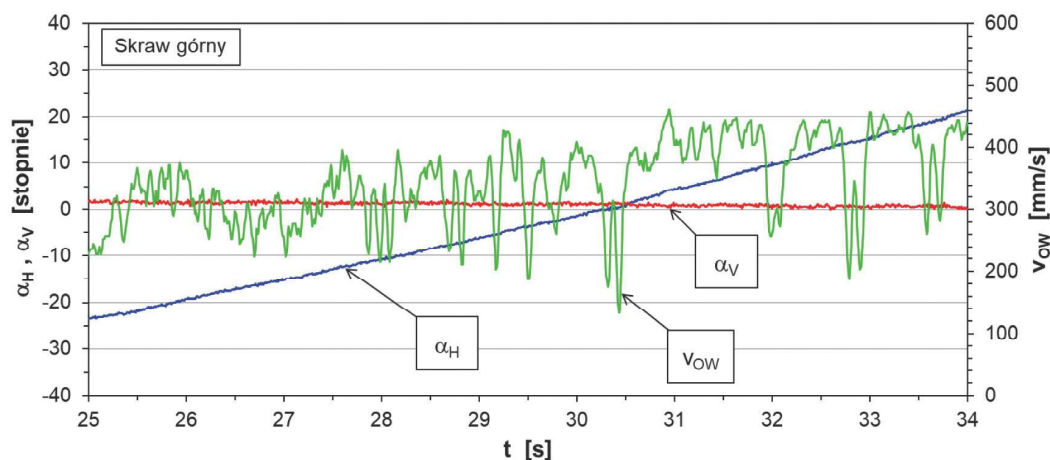
Pomiary obciążenia dynamicznego napędów kombajnu realizowano w trakcie wykonywania skrawów górnych (rys. 1b) i dolnych (rys. 1c) przy różnych wartościach parametrów tego procesu. Urabiany był blok cementowo-piaskowy zbudowany z pięciu warstw nachylonych poprzecznie w stosunku do podłoża pod kątem 10° o różnej wytrzymałości na ściskanie w zakresie od 33 do 69 MPa (Cheluszka i in. 2018).

3. Charakterystyki dynamiczne napędów wysięgnikowego kombajnu chodnikowego – wybrane przykłady

Na rysunkach od 4 do 6 pokazano charakterystyki procesu urabiania podczas wykonywania przykładowego skrawu górnego. Skraw ten, o wysokości $h=190$ mm, realizowany był z zabiorem $z=100$ mm. W rozpatrywanym 9-sekundowym interwale czasowym wysięgnik wychyłany był w prawo w zakresie kąta α_H od -23° do $+21^{\circ}$ (rys. 4). Dla położenia głowic urabiających odpowiadającego ustawieniu wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża pod kątem α_V wynoszącym około $+1,5^{\circ}$ urabiana była początkowo warstwa

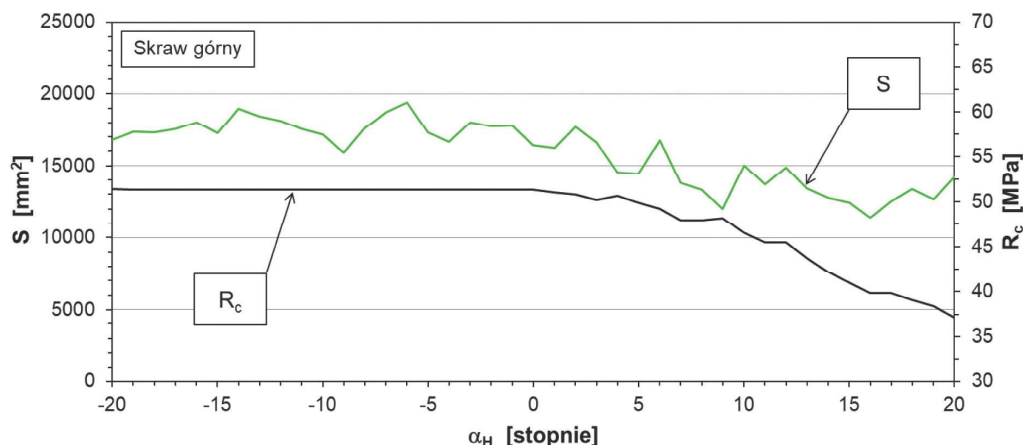
o wytrzymałości na ściskanie $R_c=51$ MPa. W drugiej części wykonywanego skrawu wytrzymałość na ściskanie urabianego materiału systematycznie jednak spadała dochodząc do 37 MPa (rys. 5). Wartość średnia na długości rozpatrywanego odcinka była przy tym równa 48 MPa. W miarę przemieszczania głowice urabiające wykonują skraw o przekroju wynikającym z zadanych wartości zabioru z oraz wysokości h . Na skutek zmiany zabioru w funkcji kąta α_H drgań wysięgnika oraz nierównoległości wykonywanego skrawu w stosunku do skrawu wcześniej wykonanego zmieniało się pole przekroju poprzecznego skrawu S . W omawianym przypadku wartość tego parametru na długości skrawu zmieniała się w granicach od 11 400 do 19 400 mm², a więc o 70% (rys.5). Wartości pola przekroju poprzecznego skrawów wyznaczono na podstawie skanów urabianej powierzchni przed i po wykonaniu rozpatrywanego skrawu.

Silnie dynamiczny charakter procesu urabiania sprawia, że nie jest możliwe utrzymanie stałej prędkości przemieszczania głowic urabiających po urabianej powierzchni. Wynika to z właściwości napędu hydraulicznego, w przypadku którego prędkość samoistnie dostosowuje się do obciążenia zewnętrznego. Drgania obwodowe wysięgnika prowadzą do pulsacji strumienia cieczy hydraulicznej podawanej do siłownika mechanizmu obrotu wysięgnika. Efektem tego jest pulsacja prędkości przemieszczania głowic urabiających (rys. 4 – linia zielona). W rozpatrywanym przypadku chwilowe wartości prędkości v_{OW} na badanym odcinku skrawu, zawierały się w granicach od 134 do nawet 460 mm/s (wartość średnia tej prędkości wyniosła tu 345 mm/s).



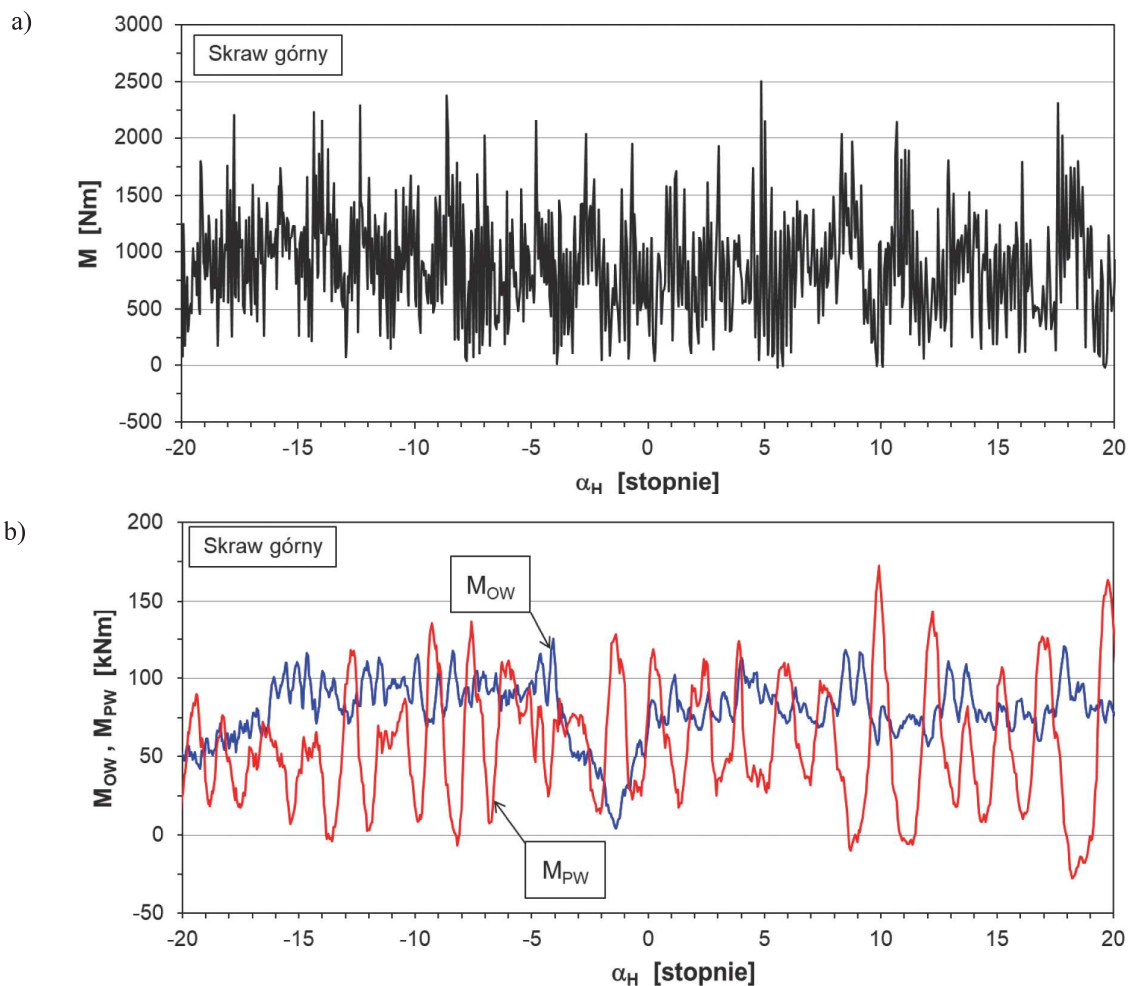
Rys. 4. Przebiegi czasowe kątów wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (α_H) i prostopadłej do podłoża (α_V) oraz przebieg prędkości wychylenia wysięgnika w ruchu roboczym podczas realizacji przykładowego skrawu górnego

Fig.4. Time functions of boom deflection angles parallel (α_H) and perpendicular (α_V) to the floor and the course of boom deflection speed in the work mode during made of an exemplary upper cut



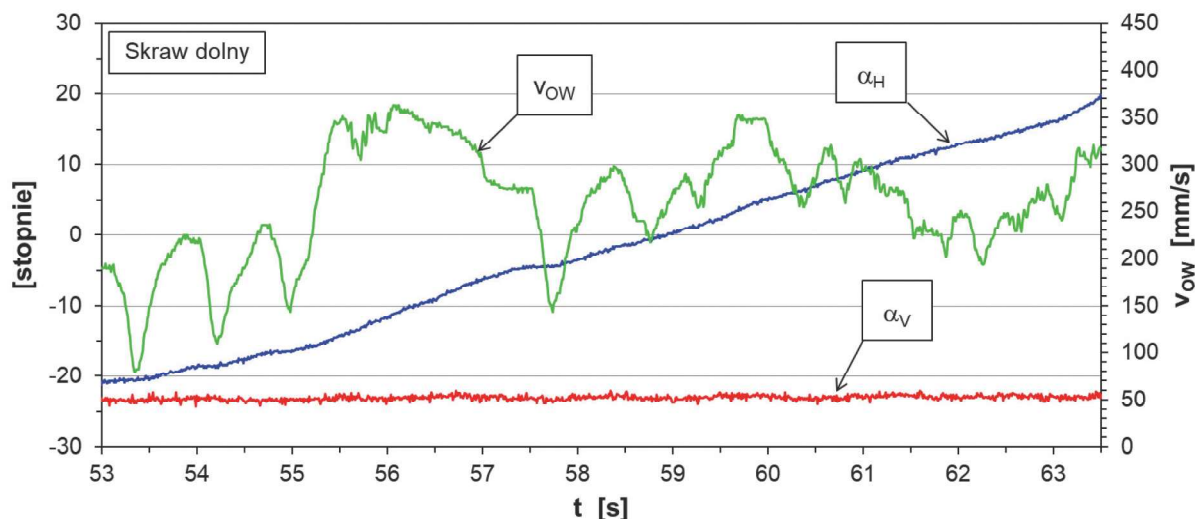
Rys. 5. Przebieg zmienności pola przekroju poprzecznego (S) oraz średniej wytrzymałości urabianego materiału na ściskanie (R_c) w funkcji kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża (α_H) dla rozpatrywanego skrawu górnego

Fig. 5. The course of variability of the cross-sectional area (S) and the average UCS of the material being cut (R_c) as a function of the deflection angle of the boom in the plane parallel to the floor (α_H) for the considered upper cut



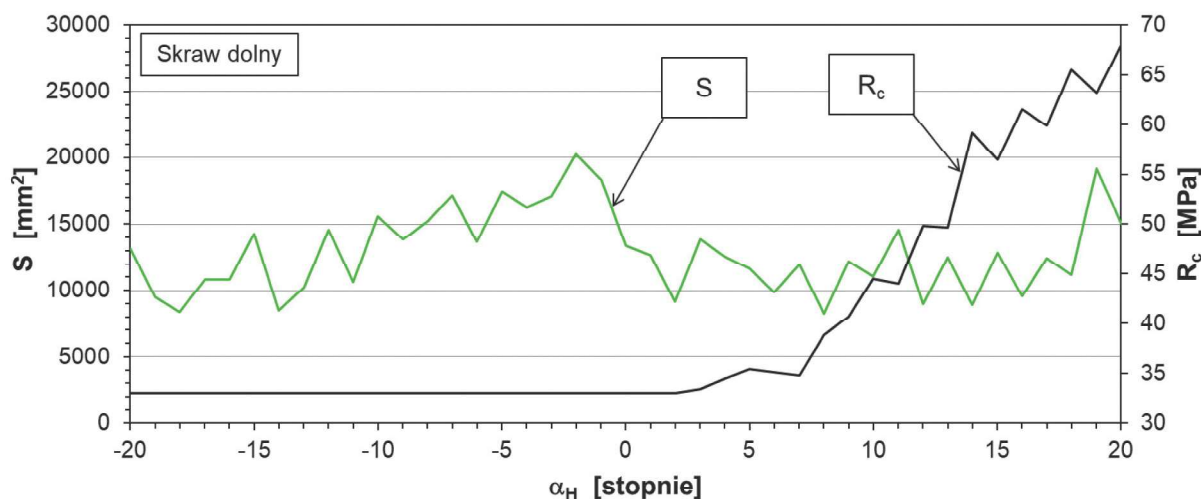
Rys. 6. Przebiegi obciążenia dynamicznego napędów kombajnu chodnikowego w funkcji kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża dla rozpatrywanego skrawu górnego: a) moment obrotowy na wale silnika w napędzie głowic urabiających (M), b) obciążenie mechanizmów wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (M_{OW}) i prostopadłej (M_{PW}) do podłoża

Fig. 6. Trends of the dynamic load of the roadheader's drives as a function of the deflection angle of the boom in the plane parallel to the floor (α_H) for the considered upper cut: a) torque on the motor shaft in the drive of the cutting heads (M), b) loading of the boom deflection mechanisms in the plane parallel (M_{OW}) and plane perpendicular (M_{PW}) to the floor



Rys. 7. Przebiegi czasowe kątów wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (α_H) i prostopadłej do podłoża (α_V) oraz przebieg prędkości wychylania wysięgnika w ruchu roboczym podczas realizacji przykładowego skrawu dolnego

Fig. 7. Time functions of boom deflection angles parallel (α_H) and perpendicular (α_V) to the floor and the course of boom deflection speed in the work mode during made of an exemplary lower cut



Rys. 8. Przebieg zmienności pola przekroju poprzecznego (S) oraz średniej wytrzymałości urabianego materiału na ściskanie (R_c) w funkcji kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża (α_H) dla rozpatrywanego skrawu dolnego

Fig. 8. The course of variability of the cross-sectional area (S) and the average UCS of the material being cut (R_c) as a function of the deflection angle of the boom in the plane parallel to the floor (α_H) for the considered lower cut

Obciążenie napędu głowic urabiających od urabiania cechuje się dużą zmiennością (rys. 6a). Podobnie, obciążenie zwłaszcza mechanizmu podnoszenia wysięgnika ma charakter silnie oscylacyjny. Dla rozpatrywanych warunków urabiania moment obrotowy na wale silnika w napędzie głowic urabiających M zmieniał się od wartości bliskich zeru do 2500 Nm, przy wartości średniej wynoszącej 873 Nm (rys. 6a). Moment obrotu wysięgnika M_{OW} zawierał się przy tym w granicach od 4 do 125 kNm (rys. 6b – linia niebieska), zaś wartość średnia tego obciążenia w analizowanym interwale czasowym kształtowała się na poziomie 80 kNm. Z kolei moment podnoszenia wysięgnika M_{PW} oscylował w zakresie od -28 do $+173$ kNm (linia czerwona), a wartość średnia obciążenia mechanizmu podnoszenia wysięgnika wyniosła $+57$ kNm.

Drugi przykład, pokazany na rysunkach od 7 do 9 przedstawia przebieg realizacji skrawu dolnego. W tym przypadku

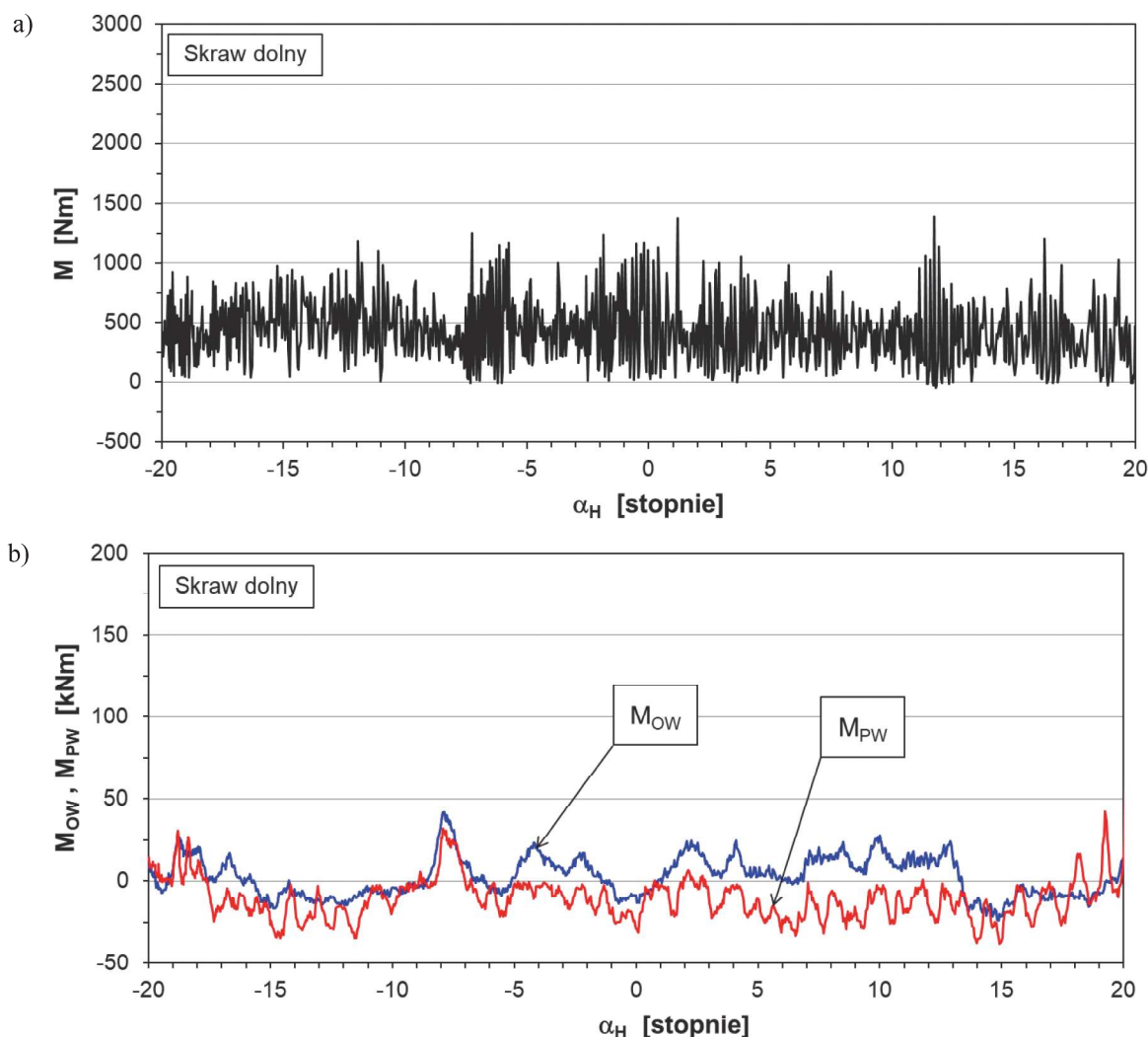
głowice urabiające przemieszczane były w prawo, w pobliżu podłoża. Kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do podłoża α_V wyniósł około -23° (rys. 7 – linia czerwona). Początkowo skraw ten był wykonywany w warstwie o wytrzymałości na ściskanie 33 MPa (rys. 8). W miarę jednak, jak głowice urabiające zbliżały się do prawej krawędzi urabianego bloku cementowo-piaskowego wytrzymałość na ściskanie urabianego materiału rosła, dochodząc do 68 MPa. Pomimo że w końcowej fazie urabiana była warstwa o dość dużej wytrzymałości na ściskanie, to wartość średnia tego parametru na długości rozpatrywanego odcinka skrawu wyniosła 39 MPa (była mniejsza o blisko 20% od wartości średniej wyznaczonej dla omawianego wcześniej skrawu górnego). W czasie 11 sekund pomiaru wysięgnik wychylił się równoległe do podłoża w zakresie kąta α_H od około -20° do $+20^\circ$ (rys. 7 – linia niebieska). Pole powierzchni przekroju

poprzecznego skrawu S , na długości analizowanego odcinka zawierało się przy tym w granicach od 8225 do 2270 mm² (rys. 8 – linia zielona). Mniejsza, w porównaniu do wcześniej omówionego skrawu górnego, wartość pola powierzchni skrawu wynikała z mniejszej o ponad połowę zadanej wysokości skrawu przy nieco mniejszym również zabiorze ($z=92$ mm, $h=85$ mm).

Podobnie jak w przypadku wcześniej omówionego skrawu górnego, również i tutaj widoczna była duża zmienność natężenia przepływu cieczy hydraulicznej zasilającej siłownik w mechanizmie obrotu wysięgnika, czego skutkiem była duża zmienność wyznaczonej na tej podstawie prędkości wychylania wysięgnika (rys. 7 – linia zielona). Widoczne są przy tym wyraźne oscylacje tej prędkości o relatywnie niskiej częstotliwości (okres drgań wynosi tu około 0,8 s, co odpowiada okresowi obrotu głowic urabiających przy ich prędkości kątowej wynoszącej $\dot{\varphi}_G=8,32$ rad/s). Prędkość przemieszczania głowic urabiających przy tym w granicach od 80 do 363 mm/s, zaś wartość średnia wyniosła 267 mm/s.

Obciążenie dynamiczne napędu głowic urabiających w omawianym przypadku było wyraźnie mniejsze w porównaniu do wcześniej prezentowanego skrawu górnego (rys. 9a). Wynikało to zarówno z jego mniejszego przekroju poprzecznego, jak i urabialności skrawanego materiału. Moment obrotowy M na wale silnika przyjmował wartości z przedziału -47 do $+1390$ Nm, zaś wartość średnia w badanym przedziale czasowym wyniosła 428 Nm. Zarówno wartość średnia, jak i amplituda tego obciążenia były zatem o połowę mniejsze w porównaniu do wartości tych parametrów charakteryzujących przebieg obciążenia napędu głowic urabiających podczas wykonywania omawianego wcześniej skrawu górnego.

Przebiegi obciążenia dynamicznego mechanizmów wychylania wysięgnika w trakcie wykonywania skrawu dolnego różnią się wyraźnie od uzyskanych dla skrawu górnego (por. rys. 6b i 9b). Moment obrotu wysięgnika M_{OW} w przypadku rozważanego skrawu dolnego zmieniał się w granicach od -24 do $+42$ kNm (rys. 9b – linia niebieska). Stopień obciążenia mechanizmu obrotu wysięgnika był zatem relatywnie niski.



Rys. 9. Przebiegi obciążenia dynamicznego napędów kombajnu chodnikowego w funkcji kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do podłoża dla rozpatrywanego skrawu dolnego: a) moment obrotowy na wale silnika w napędzie głowic urabiających (M), b) obciążenie mechanizmów wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej (M_{OW}) i prostopadłej (M_{PW}) do podłoża

Fig. 9. Trends of the dynamic load of the roadheader's drives as a function of the deflection angle of the boom in the plane parallel to the floor (α_H) for the considered lower cut: a) torque on the motor shaft in the drive of the cutting heads (M), b) loading of the boom deflection mechanisms in the plane parallel (M_{OW}) and plane perpendicular (M_{PW}) to the floor

Przyjmowało ono okresowo wartości ujemne (w zakresie kąta wychylenia wysięgnika α_H od -16° do -9° ; -6° do -5° ; $\pm 1^\circ$ oraz od $+13^\circ$ do $+19^\circ$). Wysięgnik był tu więc wprawiany w ruch przez głowice urabiające, zaś układ hydrauliczny ruch ten spowalniał, będąc czymś w rodzaju hamulca.

Również odmienny, w stosunku do skrawu górnego, był stan obciążenia mechanizmu podnoszenia wysięgnika, odpowiedzialnego za utrzymanie zadanej wartości kąta α_V (rys. 9b – linia czerwona). Moment podnoszenia wysięgnika M_{PW} w analizowanym interwale czasowym, zmieniał się w granicach od -38 do $+32$ kNm, zaś wartość średnia wyniosła -9 kNm. Obciążenie to było przy tym w zasadzie ujemne.

4. Analiza porównawcza obciążenia napędów wysięgnikowego kombajnu chodnikowego podczas wykonywania skrawów górnych i dolnych

Przedstawione w rozdz. 3 przykładowe charakterystyki procesu urabiania wskazują na to, iż stan obciążenia napędu głowic urabiających kombajnu chodnikowego oraz mechanizmów wychylania wysięgnika zależy nie tylko od własności mechanicznych urabianego ośrodka oraz parametrów, przy których realizowany jest proces urabiania, ale również od rodzaju wykonywanego skrawu (górnego/dolnego). W celu uchwycenia wpływu tego ostatniego z wymienionych czynników analizie poddano dziesięć skrawów wykonanych głowicami urabiającymi badanego kombajnu chodnikowego (pięć skrawów górnych oraz pięć skrawów dolnych). Skrawy te realizowane były podczas wychylania wysięgnika równoległe do podłoża w różnych warunkach – w caliznie o różnej urabialności, przy różnych wartościach parametrów procesu urabiania (zabiorze, wysokości skrawu, prędkości kątowej głowic urabiających oraz ich prędkości przemieszczania). Analizowano relacje pomiędzy uśrednionymi, w przedziałach czasowych odpowiadających przemieszczeniu kątowemu wysięgnika $\Delta\alpha_H=1^\circ$, wartościami: momentu obrotowego na

wale silnika w napędzie głowic urabiających M , momentu obrotu wysięgnika M_{OW} oraz momentu jego podnoszenia M_{PW} , uzyskanymi podczas wykonywania skrawów górnych oraz skrawów dolnych. Badane zbiory danych składały się z około 230 punktów pomiarowych, dla każdego rodzaju skrawów (po usunięciu punktów odstających). Testy statystyczne przeprowadzono w programie Statistica 13PL (Sokołowski 2010).

Zależność obciążenia mechanizmu obrotu wysięgnika od obciążenia napędu głowic urabiających pokazano na rysunku 10a (linia niebieska – dla skrawów górnych, linia czerwona – dla skrawów dolnych). Liniami przerywanymi zaznaczono przy tym przedziały ufności dla współczynnika ufności $P=0,95$. Dla analizowanych zbiorów danych, dwuwymiarowy rozkład badanych cech jest zbliżony do rozkładu normalnego, dokonano estymacji współczynnika korelacji oraz parametrów modelu regresji. Wyniki testów statystycznych relacji pomiędzy momentem obrotowym na wale silnika w napędzie głowic urabiających oraz momentem obrotu wysięgnika dla obu rodzajów skrawów zestawiono w tabeli 5. Jak widać, współczynnik korelacji liniowej r wyniósł odpowiednio: 0,62 – dla skrawów górnych oraz 0,38 – dla skrawów dolnych. W obu przypadkach jest on istotny statystycznie (korelacja jest istotna). Wartość prawdopodobieństwa testowego jest bowiem znacznie mniejsza od przyjętego poziomu istotności: $p < \alpha = 0,05$ (można zatem odrzucić hipotezę zerową mówiącą, że korelacja nie istnieje) (Maliński 2015). Potwierdza to możliwość wykorzystania modelu liniowego w opisie badanego związku, choć ze względu na rozproszenie punktów pomiarowych model ten wyjaśnia około 40% zmienności zmiennej zależnej – w przypadku skrawów górnych oraz jedynie 14% jej zmienności – w przypadku skrawów dolnych. Wartości statystyk oraz odpowiadające im wartości prawdopodobieństwa testowego wskazują dla obu rodzajów skrawów, że współczynnik kierunkowy prostej regresji jest istotny statystycznie ($p < \alpha$) – tab. 6. Ponieważ, w przypadku wyrazu wolnego prawdopodobieństwo testowe p jest dla obu rodzajów skrawów większe od $\alpha = 0,05$, nie ma

Tabela 5. Zestawienie wyników testu istotności korelacji pomiędzy obciążeniem napędu głowic urabiających oraz mechanizmów wychylania wysięgnika dla skrawów górnych i dolnych

Table 5. Comparison of the results of the correlation test between the load of the cutting heads' drive and boom deflection mechanisms for upper and lower cuts

Rodzaj skrawów	$M \rightarrow M_{OW}$				$M \rightarrow M_{PW}$			
	r	R^2	t	p	r	R^2	t	p
górne	0,62	0,38	11,6	<0,001	0,68	0,46	-13,4	<0,001
dolne	0,38	0,14	6,4	<0,001	0,84	0,71	-23,1	<0,001

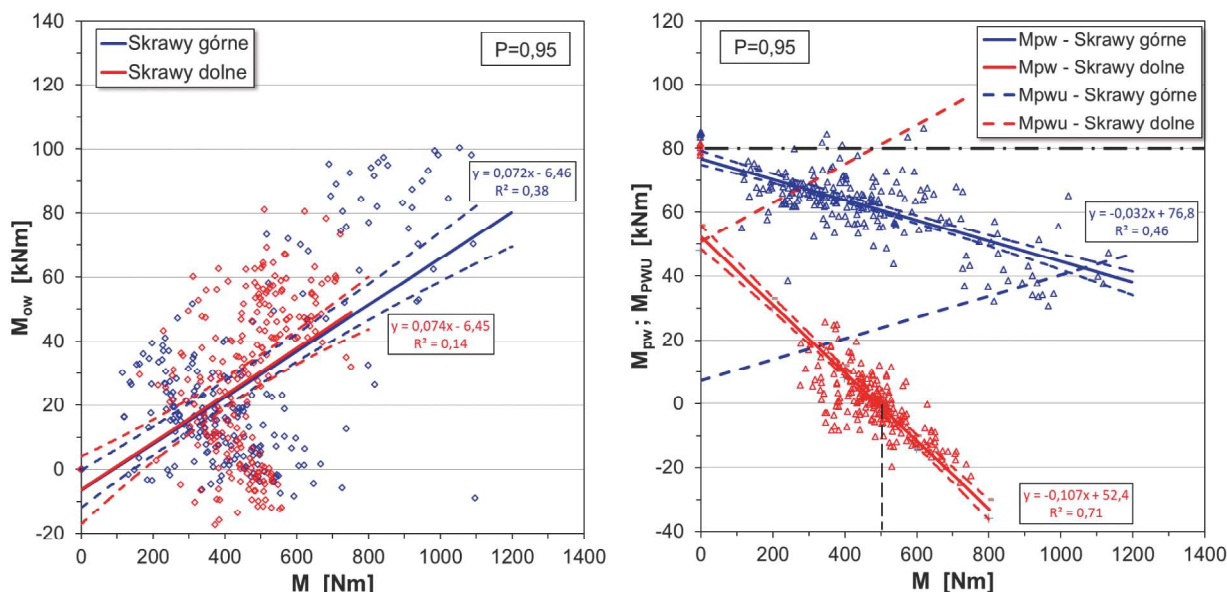
Oznaczenia: r – współczynnik korelacji, R^2 – współczynnik determinacji, t – wartość statystyki testowej, p – prawdopodobieństwo testowe

Tabela 6. Zestawienie wyników estymacji parametrów modelu regresji opisującej zależność obciążenia mechanizmów wychylania wysięgnika od momentu na wale silnika w napędzie głowic urabiających

Table 6. Comparison of the estimation parameters of the regression model parameters describing the dependence of the load on the boom deflection mechanisms from the moment on the motor shaft in the cutting heads' drive

Rodzaj skrawów	F	S_e	p	b_0	S_{b_0}	p	b_1	S_{b_1}	p
Model regresji liniowej: $M_{OW} = b_0 + b_1 \times M$ [kNm]									
górne	135,5	23,1	<0,001	-6,46	3,29	0,051	0,072	0,006	<0,001
dolne	40,7	22,8	<0,001	-6,45	5,49	0,242	0,074	0,012	<0,001
Model regresji liniowej: $M_{PW} = b_0 + b_1 \times M$ [kNm]									
górne	179,4	8,0	<0,001	76,8	1,21	<0,001	-0,032	0,002	<0,001
dolne	533,5	8,3	<0,001	52,4	2,25	<0,001	-0,107	0,005	<0,001

Oznaczenia: F – wartość statystyki testowej, S_e – błąd standardowy estymacji, b_0 i b_1 – współczynniki równania regresji, S_{b_0} i S_{b_1} – średni błąd szacunku wartości współczynniki równania regresji, p – prawdopodobieństwo testowe, M – moment na wale silnika w napędzie głowic urabiających [Nm]



Rys. 10. Zależność: a) momentu obrotu wysięgnika, b) momentu podnoszenia wysięgnika od obciążenia napędu głowic urabiających dla skrawów górnych oraz skrawów dolnych

Fig.10. Dependence of: a) the moment of rotation of the boom, b) the lifting moment of the boom from the load of the cutting heads' drive for upper cuts and lower cuts

zatem podstaw do odrzucenia hipotezy zerowej (wyraz wolny równania regresji liniowej nie różni się istotnie od zera) (Stanisz 2007). Jest to uzasadnione, gdyż zerowej wartości obciążenia napędu głowic urabiających towarzyszy zerowe obciążenie mechanizmu obrotu wysięgnika (zakładając, że badany obiekt jest w spoczynku lub pomijając opory ruchu na biegu luzem).

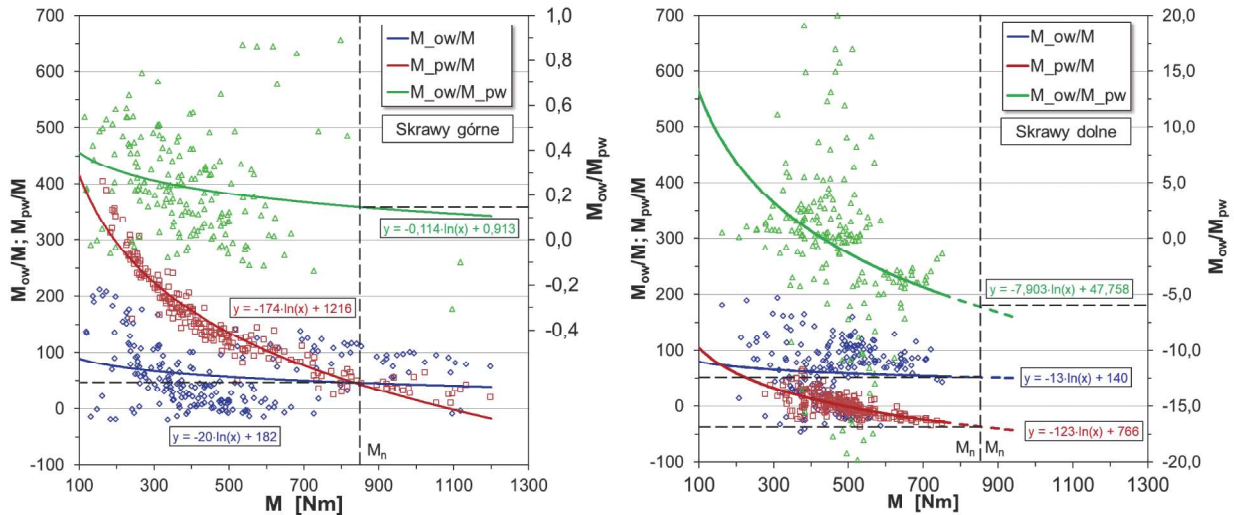
Linie trendu odwzorowujące zależności momentu obrotu wysięgnika od momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających dla obu rodzajów skrawów się pokrywają. Obciążenie obu mechanizmów wynika bowiem z rzutowania sił działających na noże, będących w kontakcie z urabianą calizną na odpowiednie płaszczyzny (Tian i in. 2018).

Odmienne charakter, do przedstawionego wyżej, ma zależność momentu podnoszenia wysięgnika od momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających (rys.10b – linie ciągłe). Zarówno w przypadku skrawów górnych (kolor niebieski), jak i dolnych (kolor czerwony) obciążenie mechanizmu podnoszenia wysięgnika M_{pw} maleje ze wzrostem momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających M . Regresja liniowa w dobrym stopniu opisuje przy tym tę zależność. Współczynniki korelacji liniowej świadczą przy tym o silnej współzależności rozpatrywanych wielkości ($r=-0,68$ – dla skrawów górnych oraz $r=-0,84$ – dla skrawów dolnych) – tab.5. Współczynniki te są przy tym istotne statystycznie (dla obu rodzajów skrawów wartość prawdopodobieństwa testowego jest dużo mniejsza od przyjętego poziomu istotności: $p \ll \alpha = 0,05$, co daje podstawy do odrzucenia hipotezy zerowej testu istotności współczynnika korelacji, zakładającej brak korelacji pomiędzy rozpatrywanymi wielkościami). Wartości statystyk testowych oraz odpowiadające im wartości prawdopodobieństwa testowego wskazują na istotność statystyczną związku liniowego. Zarówno współczynniki kierunkowe, jak i wyrazy wolne równań regresji dla obu rodzajów skrawu mają istotne statystyczne wartości różne od zera ($p \ll \alpha = 0,05$) – tab.6. Istotnie różna od zera wartość wyrazu wolnego wynika z tego, że mechanizm podnoszenia wysięgnika nawet w przypadku, gdy

kombajn jest w spoczynku (nie urabia) obciążony jest od sił ciężkości wysięgnika (kształtuje się ono na poziomie około 80 kNm – linia punktowa). Zbudowany model regresji objaśnia niecałe 50% zmienności momentu M_{pw} – dla skrawów górnych oraz aż 70% zmienności tego obciążenia w przypadku skrawów dolnych.

W trakcie wykonywania skrawów górnych, w całym zakresie obciążenia napędu głowic urabiających podczas urabiania, to jest od około 100 do 1300 Nm, wartości momentu podnoszenia wysięgnika M_{pw} były dodatnie (linia ciągła niebieska). Głowice urabiające dociskane musiały być zatem przez siłowniki mechanizmu wychylania wysięgnika do urabianej calizny (w górę). Dla skrawów dolnych z kolei, linia odwzorowująca przebieg badanej zależności położona jest wyraźnie poniżej linii odwzorowującej tę zależność dla skrawów górnych (linia ciągła czerwona). Obciążenie mechanizmu podnoszenia wysięgnika zmieniało przy tym zwrot na przeciwny. Dla wartości momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających większych od 500 Nm moment podnoszenia wysięgnika był ujemny. W zakresie obciążenia napędu głowic urabiających mniejszych od tej wartości siłowniki podnoszenia wysięgnika były ściskane, natomiast przy większym obciążeniu – rozciągane. W przypadku, gdy $M=500$ Nm, doszło do równowagi sił od urabiania oraz sił ciężkości wysięgnika.

Korzystając ze wzoru (5), znając masę wysięgnika oraz położenie jego środka ciężkości, wyznaczono wartości momentu sił od urabiania działającego na wysięgnik M_{pwu} . Spadek wartości momentu podnoszenia wysięgnika, a w przypadku skrawów dolnych – nawet zmiana jego zwrotu na przeciwny wynikała ze wzrostu momentu sił od urabiania działającego na wysięgnik M_{pwu} w miarę zwiększania się obciążenia napędu głowic urabiających M (linie przerywane na rys. 10b). Dla obu rodzajów skrawów (górne/dolne), moment M_{pwu} miał zwrot przeciwny do zwrotu momentu od sił ciężkości wysięgnika. W przypadku skrawów dolnych moment sił od urabiania (linia przerywana czerwona) osiągał przy tym wyraźnie większe wartości, przewyższając nawet wartość momentu sił ciężkości wysięgnika (linia punktowa).



Rys. 11. Przebieg zależności wskaźnika obciążenia względnego mechanizmów wychylania wysięgnika od obciążenia napędu głowic urabiających dla: a) skrawów górnych, b) skrawów dolnych

Fig. 11. The course of dependence of the relative load ratio of the boom deflection mechanisms from the load of the cutting heads' drive for: a) upper cuts, b) lower cuts

Interesującym zagadnieniem jest określenie proporcji pomiędzy obciążeniem mechanizmów wychylania wysięgnika i obciążeniem napędu głowic urabiających podczas urabiania. W tym celu wyznaczono wartości wskaźników obciążenia względnego napędów kombajnu chodnikowego odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania jako iloraz (rys. 11):

- momentu obrotu wysięgnika do momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających M_{ow}/M ,
- momentu podnoszenia wysięgnika do momentu obrotowego na wale silnika w napędzie głowic urabiających M_{pw}/M oraz
- momentu obrotu wysięgnika do momentu jego podnoszenia M_{ow}/M_{pw}

dla wszystkich analizowanych skrawów. W celu sprowadzenia tych wskaźników do wielkości bezwymiarowych wartości wszystkich trzech momentów sił wyrażone zostały w Nm.

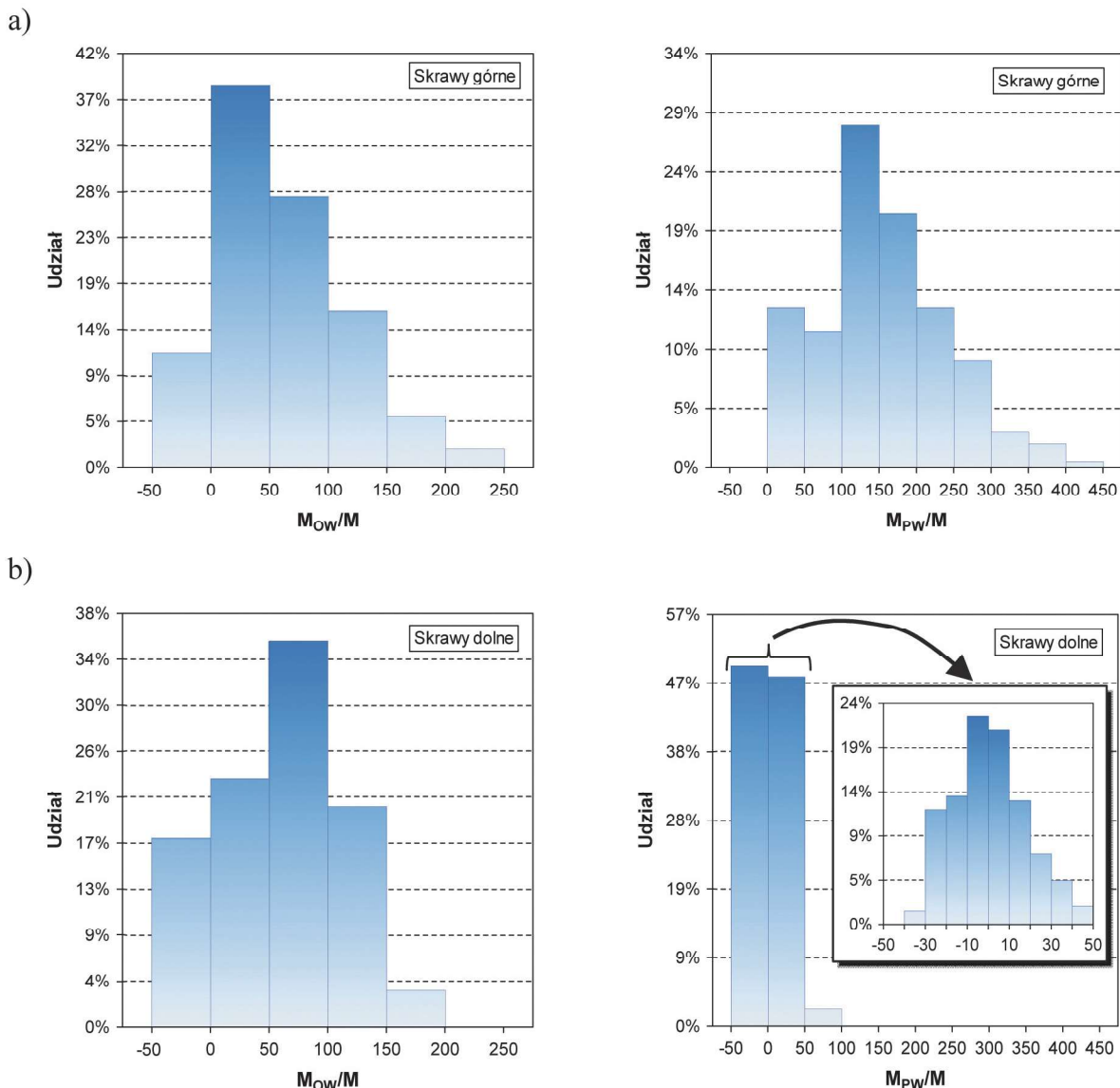
W przypadku skrawów górnych, obciążenie względne mechanizmów wychylania wysięgnika maleje ze wzrostem obciążenia napędu głowic urabiających (rys. 11a – linie w kolorze niebieskim i czerwonym). Duża zmienność uśrednionych wartości obciążenia napędów kombajnu chodnikowego odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania sprawia, że wskaźniki obciążenia: M_{ow}/M oraz M_{pw}/M przyjmują wartości w szerokim zakresie, bo od -19 do 212 – w pierwszym przypadku oraz od 10 do nawet 404 – w drugim przypadku. Podczas realizacji skrawów górnych w różnych warunkach, moment obrotu wysięgnika był przeciętnie około 60 razy większy od wartości momentu obrotowego rozwijanego przez silnik w napędzie głowic urabiających, natomiast moment podnoszenia wysięgnika – był 155 –razy większy od wartości obciążenia silnika w układzie urabiania. Stosunek momentu obrotu wysięgnika do momentu jego podnoszenia (M_{ow}/M_{pw}) zawierał się natomiast w granicach od $-0,3$ do $+0,9$ (linia zielona na rys. 11a). Dla skrawów górnych, wartość momentu obrotu wysięgnika kształtowała się przeciętnie na poziomie 25% wartości momentu podnoszenia wysięgnika. Zależność wszystkich trzech wskaźników obciążenia od obciążenia napędu głowic urabiających jest aproksymacyjnie hiperboliczna.

Charakter zależności obciążenia względnego napędów kombajnu chodnikowego odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania od obciążenia jego układu urabiania dla

skrawów dolnych jest podobny do charakteru tych zależności uzyskanych dla skrawów górnych (rys. 11b). Inny jest jednak zakres zmienności wartości tych wskaźników oraz ich wartości średnie. Dotyczy to zwłaszcza obciążenia mechanizmu podnoszenia wysięgnika. Obciążenie jednostkowe przyjmowało tu wartości z następujących przedziałów: $M_{ow}/M \in \langle -47; 194 \rangle$, $M_{pw}/M \in \langle -37; 65 \rangle$, zaś $M_{ow}/M_{pw} \in \langle -89; 28 \rangle$. Wysokie wartości wskaźnika obciążenia względnego M_{ow}/M_{pw} występujące w otoczeniu wartości momentu obrotowego na wale silnika $M \approx 500$ Nm wynikają z tego, iż moment podnoszenia wysięgnika osiągał wartości bliskie zero. Wartości średnie tych wskaźników wyniosły przy tym odpowiednio: 60 ; 2 i $-0,6$. Jedynie wskaźnik obciążenia względnego mechanizmu obrotu wysięgnika dla obu rodzajów skrawu (górny/dolny) kształtował się na jednakowym poziomie średnim. Odmienny sposób obciążenia mechanizmu podnoszenia wysięgnika, w przypadku skrawu dolnego i skrawu górnego sprawił, że wartości średnie względnego obciążenia tego mechanizmu (M_{pw}/M) różnią się blisko 90 –krotnie. W efekcie również, zdecydowanie inna jest proporcja pomiędzy średnim obciążeniem mechanizmu obrotu i mechanizmu podnoszenia wysięgnika (M_{ow}/M_{pw}) dla skrawów górnych i skrawów dolnych (odpowiednio: $0,25$ i $-0,6$).

Na rysunku 12 porównano rozkłady wskaźników obciążenia względnego mechanizmów wychylania wysięgnika dla obu rodzajów skrawów. W przypadku skrawów górnych, dominowały wartości wskaźnika M_{ow}/M nieprzekraczające 50 (ich udział wyniósł blisko 40% – rys. 12a). Dla około $2/3$ analizowanego zbioru danych nie przekraczał on przy tym 100 . W przypadku skrawów dolnych przedział o największym udziale przesunięty jest w stronę większych wartości (rys. 12b). Ponad $1/3$ badanego zbioru wartości tego wskaźnika zawierała się bowiem w granicach od 50 do 100 .

Rozkład obciążenia względnego mechanizmu podnoszenia wysięgnika (M_{pw}/M) wyraźnie różnił się dla skrawów górnych i dolnych. W przypadku skrawów górnych, największy udział miały wartości z przedziału od 100 do 150 (28%). Natomiast dla skrawów dolnych 95% przypadków mieścił się w paśmie ± 50 . Największy udział (około 40%) miały przy tym wartości z przedziału od -10 do $+10$.



Rys. 12. Histogramy rozkładu wskaźników obciążenia względnego mechanizmów wychyłania wysięgnika dla skrawów górnych (a) oraz skrawów dolnych (b)

Fig. 12. The course of dependence of the relative load ratio of the boom deflection mechanisms from the load of the cutting heads' drive for: a) upper cuts, b) lower cuts

Tabela 7. Prognozowane wartości wskaźników obciążenia względnego napędów kombajnu podczas urabiania odpowiadające nominalnemu obciążeniu napędu głowic urabiających ($M_n=851$ Nm) dla skrawów górnych i skrawów dolnych

Table 7. Forecast values of relative load indices of road-header's drives during cutting corresponding to the nominal load of the cutting heads' drive ($M_n = 851$ Nm) for upper and lower cuts

Wskaźnik obciążenia	Rodzaj skrawów	
	górne	dolne
M_{OW}/M	50	50
M_{PW}/M	50	-30
M_{OW}/M_{PW}	0,15	-6

Na podstawie równań linii trendu pokazanych na rys.11 dokonano predykcji wartości obciążenia mechanizmu obrotu wysięgnika oraz mechanizmu podnoszenia wysięgnika,

odpowiadającego znamionowemu punktowi pracy silnika elektrycznego w układzie urabiania (wartości nominalnej momentu obrotowego na wale zastosowanego w badanym kombajnie silnika elektrycznego: $M=M_n=851$ Nm). Wartości wskaźników obciążenia względnego mechanizmów wychyłania wysięgnika, obrazujących proporcje ich obciążenia podczas urabiania przy obciążeniu znamionowym napędu głowic urabiających, zestawiono w tabeli 7. Obciążenie mechanizmu podnoszenia ma tu różny znak w zależności od rodzaju wykonywanego skrawu. Oznacza to, iż siłowniki podnoszenia wysięgnika obciążone są w różny sposób (przestrzeń pod lub nadłokowa). To sprawia, że przy tej samej, co do wartości, sile w cylindrach tych siłowników panują różne ciśnienia, wynikające z proporcji powierzchni czynnych tłoka po obu jego stronach (w przypadku badanego kombajnu chodnikowego stosunek pola powierzchni czynnej tłoków od strony przestrzeni podłokowej do ich pola powierzchni czynnej od strony przestrzeni nadłokowej wyniósł 1,4). Odpowiada to w przybliżeniu stosunkowi wartości wskaźników obciążenia

względny mechanizmu podnoszenia wysięgnika podczas wykonywania skrawów górnych (wartość dodatnia – obciążenie przestrzeni podtłokowej siłowników podnoszenia wysięgnika) oraz podczas wykonywania skrawów dolnych (wartość ujemna – obciążenie przestrzeni nadłokowej tych siłowników) dla znamionowego poziomu obciążenia napędu głowic urabiających. Stosunek ten wyniósł bowiem 1,7.

5. Podsumowanie

Przedstawione w artykule wyniki badań stanowiskowych procesu urabiania wysięgnikowym kombajnem chodnikowym calizny wykonanej z mas cementowo-piaskowych o zróżnicowanej urabialności wskazują wyraźnie na to, iż o poziomie obciążenia dynamicznego napędów kombajnu chodnikowego, odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania, decydują nie tylko własności mechaniczne urabianego materiału, parametry, przy których proces ten jest realizowany, lecz również rodzaj wykonywanego skrawu (górnego/dolnego). Jak należało się spodziewać, obciążenie mechanizmów wychylania wysięgnika oraz obciążenie napędu głowic urabiających są ze sobą skorelowane. Wynika to z fizycznej istoty procesu urabiania oraz układu sił działających na układ urabiania kombajnu (napęd głowic urabiających, wysięgnik oraz mechanizm jego wychylania).

Na podstawie analizy obciążenia zarejestrowanego podczas wykonywania skrawów przy różnych parametrach procesu urabiania, w caliznie o różnej wytrzymałości na ściskanie wyznaczono relacje pomiędzy obciążeniem mechanizmu obrotu wysięgnika, mechanizmu jego podnoszenia oraz obciążeniem napędu głowic urabiających. Ze względu na silnie dynamiczny charakter procesu urabiania, nawet uśrednione, w określonym interwale czasowym, skojarzenia wartości: momentu obrotu wysięgnika, momentu podnoszenia wysięgnika oraz momentu obrotowego na wale silnika w układzie urabiania cechują się dużym rozproszeniem. Korelacja pomiędzy obciążeniem poszczególnych napędów kombajnu odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania jest jednak statystycznie istotna.

Jak wykazały przeprowadzone badania, rodzaj skrawu (górnego/dolnego) szczególnie istotnie wpływa na obciążenie mechanizmu podnoszenia wysięgnika. Okazuje się jednak, że w obu przypadkach składowa tego obciążenia pochodząca od urabiania ma jednakowy zwrot (siły te starają się przemieścić głowice urabiające w górę). Moment ten kompensują w pewnym stopniu siły ciężkości wysięgnika. Stopień tej kompensacji zależy przy tym od rodzaju skrawu – w przypadku skrawów górnych jest on znacznie mniejszy niż w przypadku skrawów dolnych. W efekcie, podczas wykonywania skrawów dolnych, po przekroczeniu pewnej wartości obciążenia głowic urabiających (tu: 500 Nm), moment sił działający na mechanizm podnoszenia wysięgnika zmienia zwrot.

Dla badanego kombajnu chodnikowego (R–130) wyznaczono proporcje pomiędzy obciążeniem mechanizmów wychylania wysięgnika i obciążeniem napędu głowic urabiających. Jak stwierdzono, rodzaj skrawu (górnego/dolnego) nie wpływa na wartość wskaźnika obciążenia względnego M_{OW}/M . W przypadku obciążenia mechanizmu podnoszenia wysięgnika rodzaj skrawu ma z kolei bardzo duży wpływ. Dla nominalnego obciążenia napędu głowic urabiających wartość bezwzględna wskaźnika M_{PW}/M , podczas wykonywania skrawów górnych była o około 70% większa w porównaniu do wartości tego wskaźnika uzyskanej dla skrawów dolnych. Podczas wykonywania skrawów górnych przy nominalnym obciążeniu napędu głowic urabiających, moment obrotu wysięgnika stanowił 15% momentu jego podnoszenia. Z kolei

podczas wykonywania skrawów dolnych – moment obrotu wysięgnika był 6-krotnie większy od momentu podnoszenia wysięgnika.

Przeprowadzone w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, zakrojone na szeroką skalę badania doświadczalne wysięgnikowego kombajnu chodnikowego R–130 dostarczają wiedzy o rzeczywistym obciążeniu dynamicznym istotnych węzłów konstrukcyjnych tego rodzaju maszyn roboczych oraz jej napędów, odpowiedzialnych za realizację procesu roboczego. Zaprezentowane wybrane wyniki tych badań wskazują na to, iż proporcje pomiędzy obciążeniem mechanizmów odpowiedzialnych za realizację procesu urabiania zależą od wielu czynników, w tym technologii urabiania powierzchni czoła przodku. Dobór odpowiedniego skojarzenia parametrów siłowych kombajnu chodnikowego o określonej wielkości jest dlatego zagadnieniem niezwykle ważnym, wymagającym prowadzenia szerokiej analizy w zakresie obciążenia kombajnu chodnikowego dla różnych warunków realizacji procesu urabiania. Analizy teoretyczne (badania numeryczne) powinny być przy tym wsparte wynikami badań eksperymentalnych prowadzonych na rzeczywistych obiektach. Stanowią one źródło wiedzy tworzącej podstawę dla prawidłowej konfiguracji wartości parametrów technicznych kombajnu chodnikowego w celu zapewnienia wysokiej skuteczności jego działania.

Podziękowanie

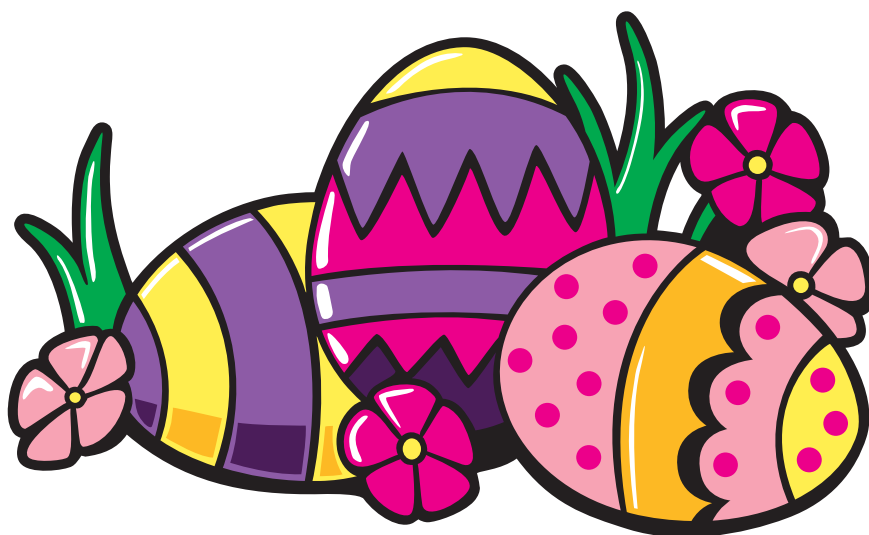
Praca zrealizowana w ramach projektu pt.: „Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych” dofinansowanego ze środków Narodowego Centrum Badań i Rozwoju w ramach Programu Badań Stosowanych (umowa nr PBS3/B/2/15/2015).

Literatura

- CHELUSZKA P. 2016 – Computer-Aided Manufacturing of Working Units for High-Performance Mining Machines. In “Computer-aided Technologies – Applications in Engineering and Medicine”, Udroui R. (ed.), InTech, DOI: 10.5772/65039.
- CHELUSZKA P., DOLIPSKI M., GIZA T. 2017 – Diagnosing the hydraulic system of the roadheader boom lifting and rotation mechanism. *Technicka Diagnostyka*, Vol. 26, No. 1, pp. 55–65.
- CHELUSZKA P., SOBOTA P. 2018 – Automatic control of working process parameters as a condition for robotisation of mining machines. In *Proceedings of 23rd International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics*, 27–30 August, Międzyzdroje, pp. 211–216.
- CHELUSZKA P., SOBOTA P., GLUSZEK G. 2018 – Porównanie charakterystyk energetycznych urabiania kombajnem chodnikowym z głowicami poprzecznymi o zróżnicowanej konstrukcji. „Przeгляд Горничы” nr 3, s. 59–70.
- ERGUN O.A. 2017 – Stability Analysis of Roadheaders. In *Proceedings of the 3rd World Congress on Mechanical, Chemical and Material Engineering (MCM’17)*, Rome, Italy, June 8–10, pp. 152-1 – 152-7.
- JONAK J. 2002 – Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi. Wyd. Naukowe Śląsk, Katowice.
- JONAK J. 2009 – Dobór parametrów eksploatacyjnych maszyny roboczej do lokalnych warunków jej pracy. *MOTROL – Motoryzacja i Energetyka Rolnictwa 11C*, s. 77–85.
- KLICH A. (red.) 1999 – Maszyny i urządzenia dla inżynierii budownictwa podziemnego. *Wyrobiska korytarzowe i szybowe w górnictwie*. Wyd. Naukowe Śląsk, Katowice.
- KOTWICKA K., KLICHA. 2011 – Maszyny i urządzenia do drążenia wyrobisk korytarzowych i tunelowych. Wyd. ITG Komag, Gliwice.
- LIU G., MU D., DUAN S., SONG D. 2012 – Design Parameters Optimization

- of Cutting Head of Cantilever Roadheader Based on Genetic Algorithm. *Applied Mechanics and Materials*, Vols. 215–216, pp 193-196, doi:10.4028/www.scientific.net/AMM.215-216.193.
- MALIŃSKI M. 2015 – Wybrane zagadnienia statystyki matematycznej w Excelu i pakiecie Statistica. Wyd. Politechniki Śląskiej, Gliwice.
- SOKOŁOWSKI A. 2010 – Estymacja i testowanie hipotez. W: *Statistica w badaniach naukowych i nauczaniu statystyki*. StatSoft, Kraków, s. 25–60.
- STANISZ A. 2007 – Przystępny kurs statystyki z zastosowaniem STATISTIVA PL na przykładach medycyny. Tom 2. Modele liniowe i nieliniowe. StatSoft, Kraków.
- TIAN J., WANG S., WU M. 2018 – Kinematic Models and Simulations for Trajectory Planning in the Cutting of Spatially-Arbitrary Crosssections by a Robotic Roadheader. *Tunnelling and Underground Space Technology*, Vol. 78, August, pp. 115–123, DOI: 10.1016/j.tust.2018.03.032.
- XIAOHUO L., ZHISEN L., DAN W., YEJIAN L. 2012 – Parameter Optimization Design of Hard Rock Roadheader Cutting Head Based on PSO. In: *Proceedings of The 2nd International Conference on Computer Application and System Modeling (2012)*, Cochin, India, 20–22 October, pp. 677–680.
- ZONG K., ZHANG P., WANG P., FU S., LI Y., ZHANG M., WU M. 2018 – Multifactor Analysis of Roadheader's Body Pose Responses during the Horizontal Cutting Process. *Shock and Vibration*, Vol. 2018, Article ID 2387408, 18 pages, <https://doi.org/10.1155/2018/2387408>.

Artykuł wpłynął do redakcji – luty 2019
Artykuł akceptowano do druku – marzec 2019



Ciepłych i udanych Świąt Wielkanocnych
oraz wszelkiej pomyślności i radości
w życiu zawodowym i prywatnym
życzy
Komitet Redakcyjny