

RAJMUND MANN  
KAMIL CZERWIŃSKI  
KAMIL MATUSIK

## Analiza trajektorii ruchu noży i drgań głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego z wykorzystaniem kamer szybkich

*Do identyfikacji ruchu noży w procesie urabiania głowicą urabiającą kombajnu chodnikowego wykorzystano zestaw optyczny, którego głównymi elementami były kamery szybkie. W powiązaniu z programem TEMA Motion 3D przeznaczonym do analizy ruchu na podstawie zarejestrowanego obrazu na filmach umożliwiło to szczegółową analizę torów ruchu wysięgnika, głowic urabiających i noży na głowicach w trakcie skrawania. W artykule przedstawiono proces prowadzenia pomiarów oraz wyniki analizy porównawczej drgań wysięgnika i torów ruchu noży na głowicy urabiającej dla wybranych skrawów: progresywnego i degresywnego.*

Słowa kluczowe: kamera szybka, kombajn chodnikowy, głowica poprzeczna, skraw progresywny, skraw degresywny, drgania

### 1. WSTĘP

---

W przypadku urabiania głowicą wielonarządową określenie chwilowego położenia noży jest bardzo istotne dla powiązania ich trajektorii z siłami generowanymi podczas urabiania. Zależnie od prędkości obrotowej głowic urabiających i prędkości wychylania wysięgnika kolejne noże, wchodząc w strefę skrawania, mogą wykonywać nowe skrawy lub wpadać w bruzdy po poprzednich nożach [1], ponadto zmiany tych parametrów wpływają na kształt przekroju poprzecznego skrawów [2–6]. Analiza przebiegu obciążenia noży, potrzebna do weryfikacji modelu numerycznego kombajnu chodnikowego [7–10] oraz automatycznego sterowania parametrami tej maszyny podczas urabiania [11], wymaga identyfikacji rzeczywistych torów ruchu noży, na których mierzone są siły skrawania, docisku i boczna oraz identyfikacji drgań kombajnu chodnikowego, a zwłaszcza jego podzespołów układu urabiania. Wykorzystanie zewnętrznego (niezwiązanego z maszyną) układu optycznego kamer szybkich, za pomocą którego można z wystarczającą

dokładnością określić zmiany położenia głowic urabiających i noży na głowicach, stanowi metodę alternatywną dla pomiaru bezpośredniego [12]. Biorąc pod uwagę złożoną trajektorię ruchu poprzecznej głowicy urabiającej, na której noże w czasie urabiania poruszają się ruchem spiralnym po powierzchni torusa oraz na którą nakładają się drgania wysięgnika i całej maszyny, wykorzystanie optycznego układu pomiarowego do identyfikacji przemieszczeń wybranych punktów na wysięgniku i na głowicy urabiającej kombajnu chodnikowego okazało się dobrym rozwiązaniem.

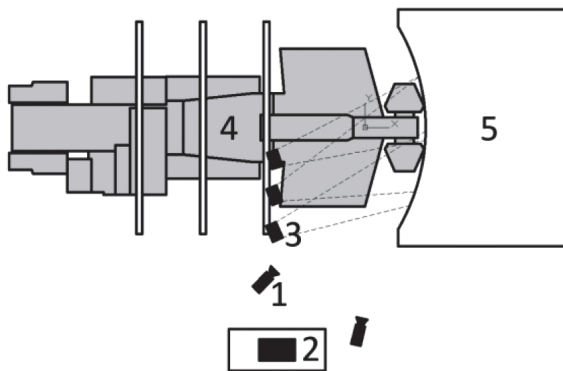
### 2. STANOWISKO BADAWCZE

---

Pomiary przeprowadzono na stanowisku badawczym [13] w Katedrze Mechanizacji i Robotyzacji Górniczej Wydziału Górniczego i Geologii Politechniki Śląskiej, zbudowanym w ramach projektu naukowo-badawczego „Sterowanie ruchem głowic urabiających kombajnu chodnikowego dla potrzeb obniżenia

energochłonności urabiania i obciążeń dynamicznych” dofinansowanego ze środków NCBiR.

W celu wykonania pomiarów optycznych określających ruch głowicy urabiającej stanowisko pomiarowe musiało zostać dodatkowo odpowiednio przygotowane (rys. 1). Jednym z podstawowych wymagań analizy obrazu jest sfilmowanie razem z poruszającym się obiektem stałych punktów odniesienia, względem których można zorientować układy współrzędnych w przestrzeni. Zastosowana do pomiarów technika wymagała, żeby punkty odniesienia znajdowały się na jednej płaszczyźnie. W warunkach stanowiska badawczego jedynym spełniającym te wymogi rozwiązaniem było zakotwiczenie do bloku betonowego płyty z odpowiednimi znacznikami – markerami typu *quadrant*. Płytę tę umieszczono powyżej planowanych do wykonania skrawów.



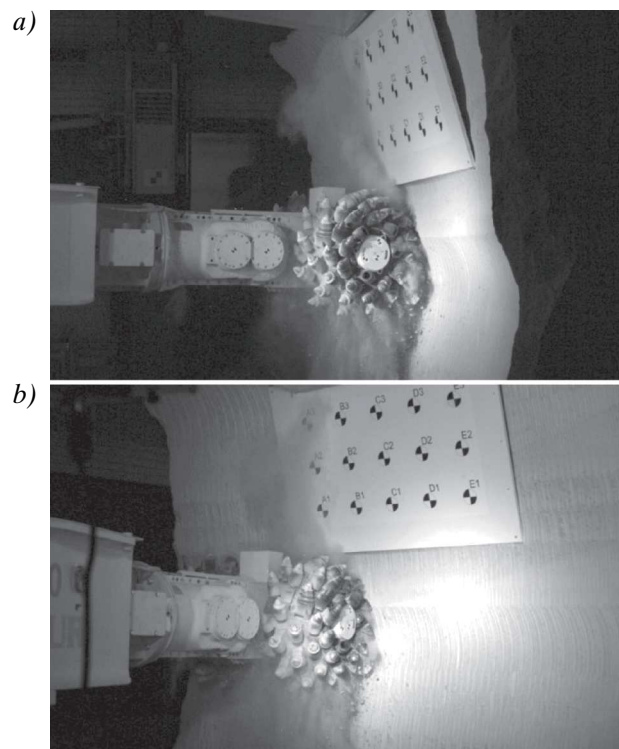
Rys. 1. Schemat rozmieszczenia elementów optycznego układu pomiarowego na stanowisku badawczym:  
1 – kamery, 2 – stanowisko sterowania kamerami,  
3 – oświetlenie, 4 – kombajn chodnikowy,  
5 – blok betonowy

Kolejnym warunkiem koniecznym do przeprowadzenia analizy ruchu obiektów w przestrzeni trójwymiarowej jest ich filmowanie jednocześnie z dwóch kamer zsynchronizowanych ze sobą czasowo, ustawionych względem filmowanych obiektów tak, żeby kąt pomiędzy osiami optycznymi kamer zawierał się w określonym dla tej techniki pomiarowej przedziale. Kamery zamontowane na statywach rozmieszczono więc możliwie najszerszej z boku stanowiska badawczego.

Równie istotne, jak rozmieszczenie kamer wokół stanowiska badawczego, było odpowiednie jego oświetlenie. Filmowanie z ultrakrótkimi czasami rejestracji poszczególnych klatek filmu wymaga bardzo silnego stałego (niepulsującego) światła. Do oświetlenia stanowiska wykorzystano specjalne panele oświet-

leniowe LED, które umieszczono na łukach obudowy chodnikowej, na stanowisku badawczym, kierując strumień światła z każdego z nich, tak aby koncentrowały się w miejscu wykonywania pomiarów. Zyskana w ten sposób moc świetlna pozwoliła na rejestrację filmów z częstotliwością 1000 Hz, przy czasie ekspozycji pojedynczej klatki filmu wynoszącym  $2 \times 10^{-5}$  s. Tak krótki czas ekspozycji wymagany był w celu uniknięcia smużenia (rozmycia spowodowanego ruchem filmowanych obiektów) na zarejestrowanym filmie.

Rozmieszczenie kamer na stanowisku badawczym i zastosowanie w nich odpowiednich obiektywów pozwoliło na kadrowanie obejmujące ten sam obszar dla obu kamer, w którym zawarte były: końcówka wysięgnika kombajnu, prawa głowica urabiająca, tablica ze znacznikami oraz miejsce urabiania w centralnej części przodka bloku betonowego na szerokości około 1,5 m (rys. 2).



Rys. 2. Widok filmowanego obszaru z kamer prawej (a) i lewej (b) na stanowisku badawczym podczas urabiania

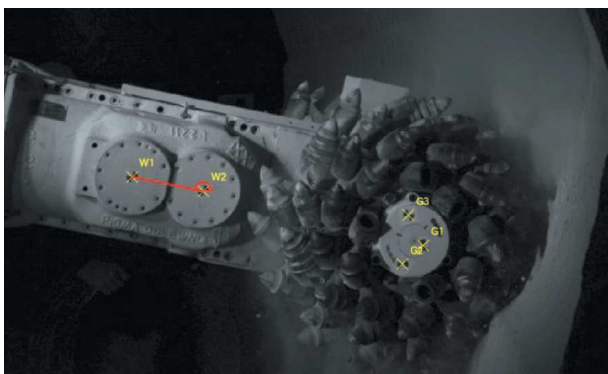
Identyfikacja ruchu głowicy urabiającej i wysięgnika wymagała zastosowania również na tych obiektach znaczników umożliwiających w późniejszej analizie jednoznaczne określanie zmian ich położenia. W celu określenia zmian położenia wysięgnika naklejono na nim dwa znaczniki na pokrywach kół zębatych przekładni redukcyjnej napędu głowic urabiających. Natomiast w celu określenia trajektorii ruchu głowicy

urabiającej, ze względu na to, że wykonuje ona również ruch obrotowy, naklejono trzy znaczniki na pokrywie bocznej głowicy.

Na tak przygotowanym stanowisku badawczym filmowano proces urabiania bloku betonowego w pięciosekundowych ujęciach. Był to maksymalny czas, na który pozwalała wbudowana pamięć kamer szybkich. Czas ten w zależności od ustalonej prędkości obrotowej głowicy pozwalał na rejestrację od trzech do pięciu pełnych obrotów głowicy urabiających.

### 3. PRZETWARZANIE DANYCH POMIAROWYCH

Analizę ruchu przeprowadzono, wykorzystując program TEMA Motion 3D. Polegała ona na określeniu położenia na zarejestrowanych obrazach, znaczników z tablicy kontrolnej, wysięgnika i głowicy urabiającej, wyznaczeniu wspólnego dla obu kamer przestrzennego układu współrzędnych, wyznaczeniu współczynników korekcji dystorsji obiektywów (w celu wyeliminowania krzywizny obrazów) i przesłedzeniu zmian położenia znaczników (rys. 3) na kolejnych klatkach zarejestrowanych filmów.

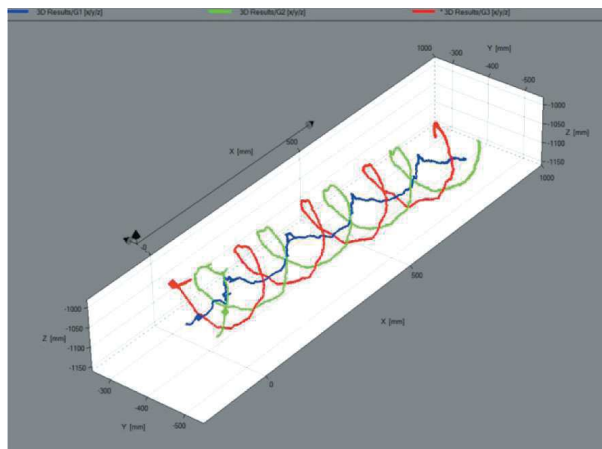


Rys. 3. Kadr z interfejsu programu do analizy obrazu TEMA Motion 3D – wirtualne punkty śledzenia na wysięgniku i głowicy

W wyniku przeprowadzonych operacji otrzymano współrzędne (x, y, z) znaczników na tablicy kontrolnej oraz na głowicy urabiającej (rys. 4) i wysięgniku, odwzorowujące ich kolejne położenia na torze, po którym się poruszały.

Wyznaczone w programie TEMA Motion 3D współrzędne punktów określające tor ruchu głowicy urabiającej zostały wyeksportowane do arkusza kalkulacyjnego, a następnie dopasowano do nich współrzędne punktów określających rozmieszczenie ostrzy

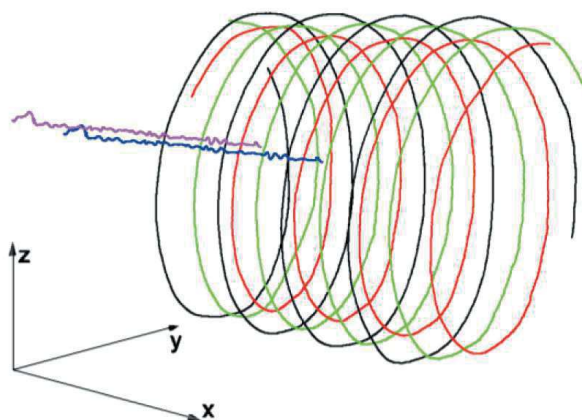
noży na wirtualnym modelu głowicy urabiającej, uzyskanym ze skanera 3D. Wzajemne powiązanie układów współrzędnych modelu głowicy urabiającej i toru ruchu głowicy urabiającej pozwoliło na określenie toru ruchu noży na głowicy urabiającej.



Rys. 4. Tory ruchu znaczników na głowicy urabiającej podczas wykonywania jednego ze skrawów

Ostatecznie wszystkie wyznaczone tory ruchu zorientowano w kartezjańskim układzie współrzędnych związanym z blokiem betonowym. Środek tego układu znajdował się w prawym dolnym rogu bloku. Oś y skierowana była w głąb bloku betonowego, natomiast płaszczyzna xz pokrywała się z płaszczyzną czoła bloku, w które głowice urabiające kombajnu były zawrębiane, przy czym oś z skierowana była pionowo.

Przykładowe tory ruchu znaczników na wysięgniku kombajnu oraz wyznaczone tory ruchu ostrzy trzech wybranych noży przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Tory ruchu znaczników na wysięgniku oraz ostrzy trzech noży na głowicy urabiającej podczas wykonywania jednego ze skrawów

W trakcie przeprowadzania analizy ruchu wysięgnika wyznaczono wartości błędów pomiarowych na

podstawie przebiegów czasowych zmierzonych położenia punktów W1 i W2 na wysięgniku oraz wyznaczonej odległości między nimi (rys. 6).

$$L_{w1w2} = \sqrt{(\Delta x_w)^2 + (\Delta y_w)^2 + (\Delta z_w)^2}$$

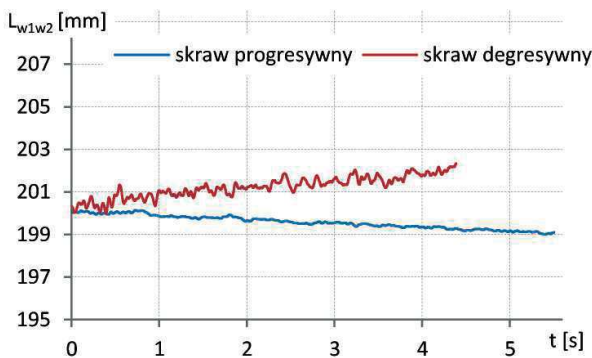
$$\Delta x_w = x_{w2} - x_{w1}$$

$$\Delta y_w = y_{w2} - y_{w1}$$

$$\Delta z_w = z_{w2} - z_{w1}$$
(1)

gdzie  $x_{w1}, x_{w2}, y_{w1}, y_{w2}, z_{w1}, z_{w2}$  – zmierzone współrzędne położenia punktów W1 i W2

Odległość między naklejonymi na korpus wysięgnika znacznikami wynosiła 200 mm. Odległość ta mierzona w trakcie ruchu wysięgnika układem optycznym kamer zmieniała się o 2 mm, co oznacza błąd pomiarowy rzędu 1%. Błędy te były spowodowane głównie zapyleniem, drganiami przenoszonymi się na konstrukcję budynku, w którym prowadzono pomiary, oraz nieprecyzyjnym wyznaczeniem korekty dystorsji obiektywów. Z uwagi na fakt, że położenie w przestrzeni głowicy urabiającej wyznaczone było analitycznie na podstawie położenia punktów W1 i W2, wyniki przedstawionej w artykule analizy obarczone są podobnym błędem.



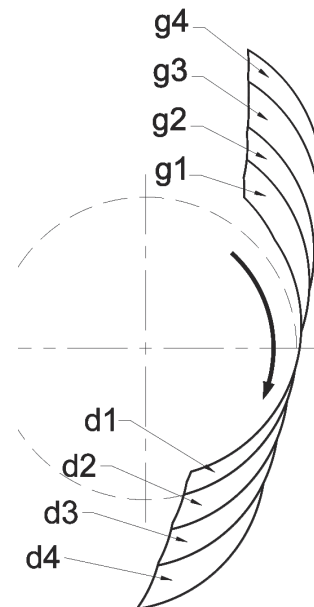
Rys. 6. Określenie wielkości błędu pomiarowego na podstawie odległości punktów W1 i W2

#### 4. TORY RUCHU NOŻY I DRGANIA WYSIĘGNIKA

W niniejszym rozdziale przedstawiono wybrane wyniki analizy drgań wysięgnika kombajnu i tory ruchu noży na głowicy urabiającej z dwóch rodzajów skrawów progresywnego i degresywnego, wykonanych przy prędkości obrotowej głowicy urabiającej 44,8 obr/min.

Skrawy progresywne to takie, w których głębokość skrawania stopniowo narasta – najczęściej począwszy od wartości zerowej. W przypadku kombajnu chodnikowego wyposażonego w głowice poprzeczne powstają one w trakcie urabiania czoła przodka poziomymi ruchami wysięgnika, wtedy gdy urabiana jest warstwa skały poniżej istniejącego wcześniej wyłomu (rys. 7). Ze względu na usytuowanie tych skrawów w stosunku do skrawu poprzedniego nazywa się je również skrawami dolnymi.

Z kolei skrawy degresywne to takie, w których nóż rozpoczyna skrawanie z pewną początkową głębokością, która jest najczęściej maksymalną głębokością skrawu, a następnie głębokość skrawu stopniowo maleje (rys. 7). Skrawy te powstają w wyniku podniesienia głowicy urabiającej i urabiania warstwy skały powyżej istniejącego wyłomu, dlatego są one inaczej nazywane skrawami górnymi.



Rys. 7. Kolejno wykonywane skrawy poprzecznymi głowicami kombajnu chodnikowego:  
d – dolne (progresywne), g – górne (degresywne)

W trakcie wychylania wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu noże osadzone na poprzecznej głowicy urabiającej poruszają się teoretycznie ruchem śrubowym po powierzchni torusów. Jednak ze względu na drgania wysięgnika spowodowane procesem urabiania tory te ulegają zaburzeniu, co skutkuje z kolei różnicami pomiędzy rzeczywistym a teoretycznym kształtem skrawów [14]. Na rysunku 8 przedstawiono wyznaczone rzeczywiste tory ruchu trzech noży w układzie współrzędnych związanym z głowicą urabiającą, gdzie oś  $x'$  pokrywa się z teoretyczną osią



obrotu głowicy. Czarnymi liniami przerywanymi przedstawiono na rysunku okręgi będące odzwierciedleniem teoretycznych torów ruchu wybranych noży. W przypadku przedstawionych torów ruchu noży odchylenia w kierunku osi  $y'$  są znacznie mniejsze niż odchylenia w kierunku osi  $z'$ .

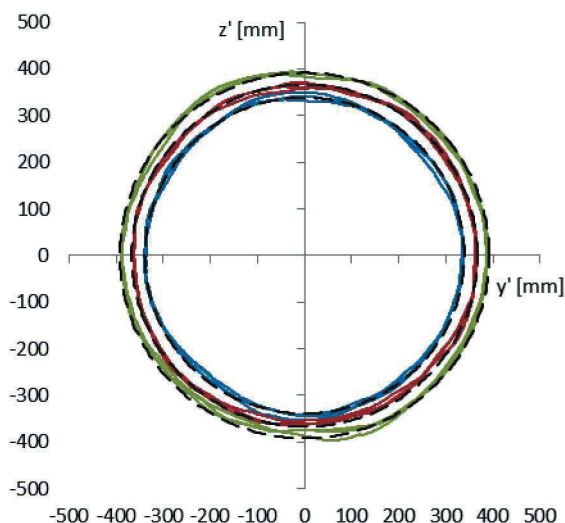
$$\begin{aligned} z'_i &= z_i - z_{gt} \\ y'_i &= y_i \cdot \cos \alpha_{Hr} + x_i \cdot \sin \alpha_{Hr} - y_{gt} \end{aligned} \quad (2)$$

gdzie:

$x_i, y_i, z_i$  – wyznaczone współrzędne ostrza  $i$ -tego noża w przyjętym głównym układzie współrzędnych,

$y_{gt}, z_{gt}$  – teoretyczne współrzędne położenia głowicy urabiającej wynikające z zadanych parametrów ustawienia i ruchu wysięgnika,

$\alpha_{Hr}$  – rzeczywisty kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu.



Rys. 8. Odchylenia rzeczywistych torów ruchu noży od torów teoretycznych spowodowane drganiami głowicy, przedstawione w płaszczyźnie prostopadłej do osi obrotu głowicy

Określenie wielkości drgań wysięgnika i osadzonej na nim głowicy urabiającej na podstawie torów ruchu noży jest utrudnione ze względu na ich ruch obrotowy względem osi obrotu głowicy. Dlatego analizę drgań głowicy przeprowadzono, wykorzystując punkty odniesienia umieszczone na korpusie wysięgnika.

Na przypadkowe położenie głowicy urabiającej względem jej teoretycznego położenia wpływają drgania całego korpusu maszyny oraz drgania wysięgnika względem korpusu (chwilowe zmiany kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyznach prostopadłej i równoległej do spągu).

Wielkość kadru na filmach pozwoliła na określenie zarówno drgań kątowych wysięgnika, jak i przypadkowych drgań głowicy urabiającej podczas procesu urabiania.

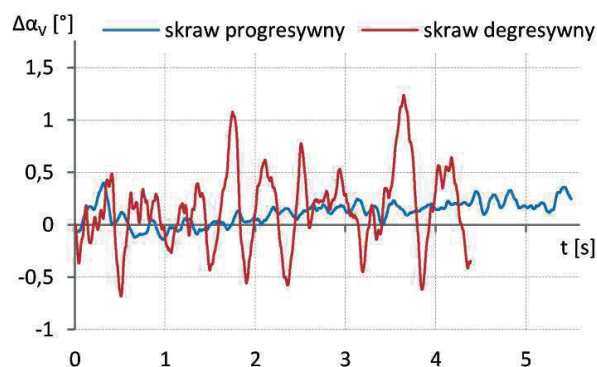
Wykonywanie przedstawionego w artykule skrawu progresywnego odbywało się przy teoretycznie ustalonym kącie wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu  $\alpha_V = -12,78^\circ$ , a skrawu degresywnego przy kącie  $\alpha_V = -2,08^\circ$ . W celu bezpośredniego porównania intensywności drgań wysięgnika wartości te potraktowano jako punkt odniesienia równy  $0^\circ$  (rys. 9).

$$\Delta\alpha_V = \alpha_{Vr} - \alpha_{Vt} \quad (3)$$

gdzie:

$\alpha_{Vr}$  – rzeczywisty kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu,

$\alpha_{Vt}$  – teoretyczny (ustalony) kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu.

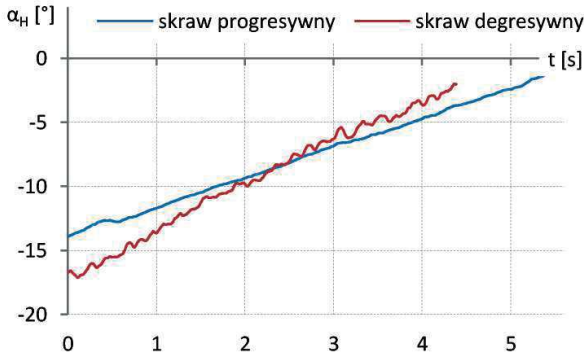


Rys. 9. Przebieg zmian kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu względem ustawienia teoretycznego

Jak wynika z przedstawionych przebiegów, amplituda przemieszczeń kątowych wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu podczas wykonywania skrawu degresywnego była nawet 3,5 razy większa niż przy skrawie progresywnym. Dla skrawu degresywnego dochodziła do  $1,7^\circ$ , podczas gdy dla skrawu progresywnego do  $0,5^\circ$ . Przemieszczenia wysięgnika o kąt  $\alpha_V$  wywołane drganiami znacząco wpływają na rzeczywiste położenie głowicy urabiającej. Zmiana kąta  $\alpha_V$  o  $1^\circ$ , w analizowanym typie kombajnu chodnikowego, powoduje przemieszczenie głowicy w płaszczyźnie prostopadłej do spągu o 54 mm.

W trakcie urabiania poziomymi warstwami kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie prostopadłej do spągu  $\alpha_V$  pozostaje teoretycznie bez zmian, natomiast kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej

do spągu  $\alpha_H$  zmienia się, co jest wynikiem ruchu obrotnicy kombajnu. W przedstawionych przypadkach urabiania wysięgnik był wychylany w płaszczyźnie równoległej do spągu z prędkością kątową wynoszącą średnio dla skrawu degresywnego  $\omega_H = 0,06$  rad/s, a dla skrawu progresywnego  $\omega_H = 0,04$  rad/s (rys. 10).



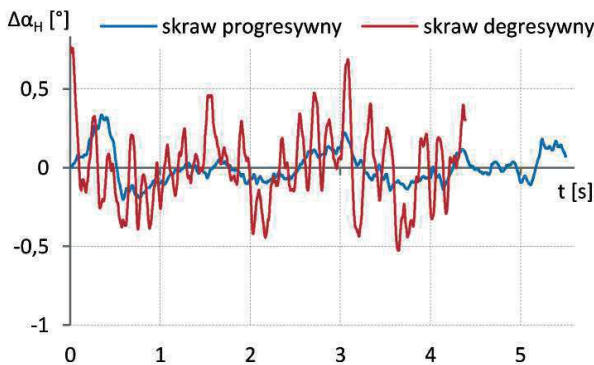
Rys. 10. Przebieg kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu

W celu analizy zmian (drgań) kąta wychylenia  $\alpha_H$  teoretyczne chwilowe wartości tego kąta wynikające z ruchu obrotnicy potraktowano jako punkty odniesienia i przypisano im wartość  $0^\circ$  (rys. 11).

$$\Delta\alpha_H = \alpha_{Hr} - \alpha_{Ht} \quad (4)$$

gdzie:

- $\alpha_{Hr}$  – rzeczywisty kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu,
- $\alpha_{Ht}$  – teoretyczny kąt wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu.



Rys. 11. Przebieg zmian kąta wychylenia wysięgnika w płaszczyźnie równoległej do spągu względem chwilowego położenia teoretycznego

W przypadku skrawu degresywnego amplituda zmian kąta wychylenia  $\alpha_H$  dochodziła do  $1,2^\circ$ , a w przypadku skrawu progresywnego do  $0,5^\circ$ . Podobnie jak przy drganiach w płaszczyźnie pionowej również w przypadku drgań w płaszczyźnie poziomej zmiany kąta

wychylenia  $\alpha_H$  w skrawie degresywnym były znacznie większe niż w skrawie progresywnym. Różnica ta była prawie 2,5-krotna. Istotny z punktu widzenia prowadzenia głowicy jest fakt, że zmiana kąta wychylenia  $\alpha_H$  o  $1^\circ$  w zastosowanym w badaniach kombajnie chodnikowym powoduje przemieszczenie głowicy w płaszczyźnie równoległej do spągu od 56,5 mm do 66,8 mm, w zależności od przyjętej wartości kąta  $\alpha_V$ .

Drgania kątowe wysięgnika przedstawione na rysunkach 9 i 11 wpływają zasadniczo na rzeczywiste położenie głowicy urabiającej w przestrzeni, w stosunku do położenia teoretycznego.

Wypadkowe, chwilowe przemieszczenia głowicy urabiającej rozpatrzono osobno względem każdej z osi głównego kartezjańskiego układu współrzędnych związanej z urabianym blokiem betonowym.

$$\Delta x = x_{gr} - x_{gt}$$

$$\Delta y = y_{gr} - y_{gt} \quad (5)$$

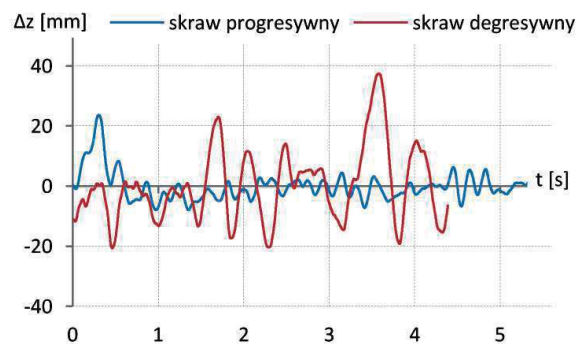
$$\Delta z = z_{gr} - z_{gt}$$

gdzie:

$x_{gr}, y_{gr}, z_{gr}$  – rzeczywiste współrzędne położenia głowicy urabiającej,

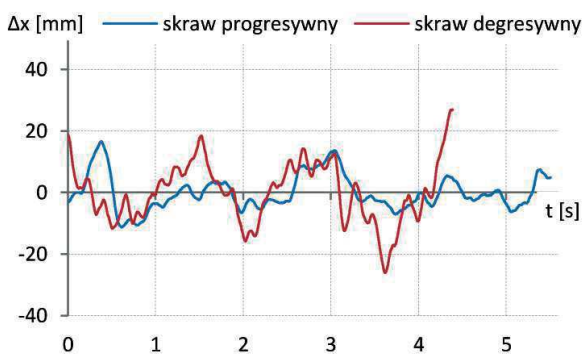
$x_{gt}, y_{gt}, z_{gt}$  – teoretyczne współrzędne położenia głowicy urabiającej wynikające z zadanych parametrów ustawienia i ruchu wysięgnika.

Największe przemieszczenia położenia głowicy urabiającej zaobserwowano dla skrawu degresywnego wzdłuż kierunku pionowego – osi z (rys. 12). Amplituda tych przemieszczeń dochodziła do 58 mm. Dla tego samego kierunku, amplituda przemieszczeń, w przypadku skrawu progresywnego, wynosiła maksymalnie 30 mm, przy czym w zarejestrowanym przebiegu miało to miejsce tylko na jego początku (0,3 s pomiaru), a następnie amplituda przemieszczeń utrzymywała się na poziomie 15 mm.



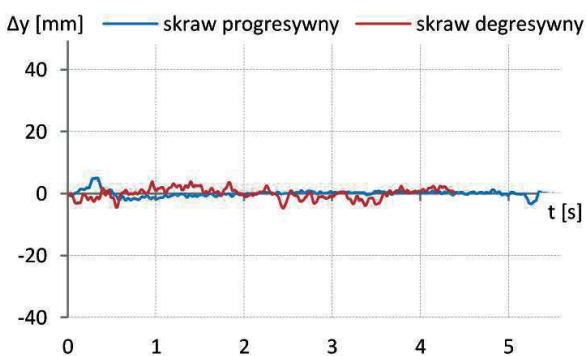
Rys. 12. Przebieg zmian położenia głowicy wzdłuż osi z prostopadłej do spągu względem chwilowego położenia teoretycznego

Inaczej przedstawiały się zmiany położenia głowicy wzdłuż osi x. Zarówno w przypadku skrawu progresywnego, jak i degresywnego odchylenia głowicy od położenia teoretycznego były znaczące (rys. 13). W pierwszym przypadku zakres zmian dochodził do 30 mm, w drugim do 50 mm. W przypadkach tych okres głównych zmian położenia głowicy wzdłuż osi x był podobny i równy w przybliżeniu okresowi obrotu głowicy urabiającej.



Rys. 13. Przebieg zmian położenia głowicy wzdłuż osi x równoległej do spągu i prostopadłej do osi kombajnu względem chwilowego położenia teoretycznego

Najmniejsze przemieszczenia zarówno w przypadku skrawu progresywnego, jak i degresywnego odnotowano w kierunku osi y, czyli wzdłuż osi podłużnej kombajnu (rys. 14).



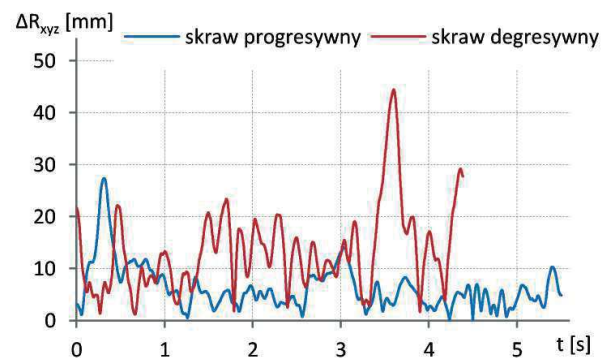
Rys. 14. Przebieg zmian położenia głowicy wzdłuż osi y równoległej do spągu oraz do osi kombajnu względem chwilowego położenia teoretycznego

Całkowite odchylenie położenia rzeczywistego głowicy urabiającej od położenia teoretycznego wynika z sumy wektorów przemieszczeń względem poszczególnych osi układu współrzędnych.

$$\Delta R_{xyz} = \sqrt{\Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2} \quad (6)$$

Na rysunku 15 porównano je dla skrawu progresywnego i degresywnego.

W pierwszym przypadku największe odchylenie położenia głowicy od położenia teoretycznego wynosiło 27 mm, ale przeciętnie nie przekraczało 10 mm. W drugim przypadku, dla skrawu degresywnego, maksymalne odchylenie położenia głowicy wynosiło 45 mm przy przeciętnych odchyleniach utrzymujących się na poziomie 20 mm.



Rys. 15. Przebieg zmian odchylenia położenia rzeczywistego głowicy od położenia teoretycznego

## 5. PODSUMOWANIE

Zidentyfikowane w trakcie badań drgania wsięgnika i głowicy urabiającej są znaczące i nie można ich pominąć w procesie modelowania kombajnu chodnikowego lub automatycznego sterowania parametrami układu urabiania kombajnu w trakcie urabiania. Tym bardziej, że zarejestrowane odchylenia położenia głowicy urabiającej od zadanego położenia teoretycznego są często większe niż głębokość skrawania noży na głowicy, przez co noże urabiające tracą kontakt z urabianą skałą lub głębokość skrawania wzrasta ponad wartość teoretyczną. Silne drgania głowicy urabiającej powodują zatem istotny wzrost dynamiki pracy całego kombajnu chodnikowego.

Zastosowanie kamer szybkich do pomiaru drgań lub określenia torów ruchu obiektów jest dość powszechne w technice, lecz w branży górniczej stanowi nowatorskie rozwiązanie. Głównymi przeszkodami do stosowania optycznych układów pomiarowych są: duże zapylenie, brak wystarczającej przestrzeni wokół badanych obiektów i niewystarczające natężenie światła. Jednak w warunkach laboratoryjnych, jakimi dysponuje Katedra Mechanizacji i Robotyzacji Górnictwa Politechniki Śląskiej, udało się pokonać te przeszkody, a optyczny układ pomiarowy z kamerami

szybkimi okazał się cennym narzędziem służącym do identyfikacji ruchu i drgań podzespołów badanej maszyny.

#### Podziękowania

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).

#### Literatura

- [1] Huang H., Lecampion B., Detournay E.: *Discrete element modeling of tool-rock interaction I: Rock cutting*, „International Journal for Numerical and Analytical Methods in Geomechanics” 2013, 37: 1913–1929.
- [2] Cheluszka P., Mann R., Głuszek G.: *Determination of the real shape of grooves formed when cutting the rock with conical picks of roadheaders*, „Technicka Diagnostyka” 2017, 1: 66–74.
- [3] Cheluszka P.: *Modelling of the geometry of cuts for purpose of the computer simulation of a point-attack picks cutting process*, „Technicka Diagnostyka” 2015, 1: 66–74.
- [4] Dolipski M., Cheluszka P., Sobota P., Bujnowska A.: *Komputerowe badania wpływu parametrów ruchowych głowic urabiających na obciążenie układu urabiania kombajnu chodnikowego*, III Międzynarodowy Kongres Górnictwa Rud Miedzi.
- [5] Sobota P.: *The impact of the roadheader boom settings and pics position on the cutting depth*, „Technicka Diagnostyka” 2015, 1: 249–257.
- [6] Xueyi L., Binbing H., Chaochao L., Shoubo J.: *Dynamics Analysis on Roadheader Cutting Head Based on LS-DYNA*, „Journal of Convergence Information Technology” 2012, 7: 333–340.
- [7] Cheluszka P., Gawlik J.: *Computer modelling of roadheader's body vibration generated by the working process*, XXVII Symposium „Vibrations in physical systems”, Poznań – Będlewo, 9–13.05.2016.
- [8] Kui-Dong G., Chang-Long D., Song-Yong L.: *An empirical mathematic model of drums cutting torque*, „Journal of Theoretical and Applied Information Technology” 2012, 46, 2: 785–789.
- [9] Tiryaki B., Ayhan M., Hekimoglu O.Z.: *A new computer program for cutting head design of roadheaders and drum shearers*, 17th International Mining Congress and Exhibition of Turkey – IMCET 2001: 655–662.
- [10] Xiang Ping Tang, Duan Yi Wang.: *Predication of rock cutting force of conical pick base on RBF Neural Network*, „Applied Mechanics and Materials” 2014: 501–504.
- [11] Cheluszka P., Remiorz E., Gawlik J.: *Simulation investigations of road-header dynamics for automatic control of cutting process*, 17th International Multidisciplinary Scientific Geconference SGEM 2017, 16, 13: 805–815.
- [12] Cheluszka P., Mann R., Sobota P., Głuszek G.: *The innovative system for measuring the dynamic loads of conical picks on the cutting head of the roadheader*, „Technicka Diagnostyka” 2016, 1: 53–61.
- [13] Cheluszka P., Głuszek G., Giza T., Mann R., Remiorz E., Sobota P.: *Charakterystyka układu pomiarowego do badań dynamiki kombajnu chodnikowego*, Konferencja „Górnictwo Zrównoważonego Rozwoju 2015”, Gliwice 25.11.2015.
- [14] Cheluszka P.: *Identyfikacja geometrii skrawów wykonywanych głowicami poprzecznymi wysięgnikowego kombajnu chodnikowego na podstawie digitalizacji urobionej powierzchni*, w: Kotwica K. (red. nauk.), *Problemy eksploatacji i zarządzania w górnictwie*, Kraków 2017: 95–105.

dr inż. RAJMUND MANN  
Wydział Górnictwa i Geologii  
Politechnika Śląska  
ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice  
Rajmund.Mann@polsl.pl

mgr inż. KAMIL CZERWINSKI  
mgr inż. KAMIL MATUSIK  
Alstom Konstal S.A.

ul. Metalowców 9, 41-500 Chorzów  
{kamil.czerwinski-ext, kamil.matusik-ext}  
@alstomgroup.com