

## Badania systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego w wyrobisku doświadczalnym

dr inż. Sławomir Bartoszek  
mgr inż. Marcin Jura  
mgr inż. Jerzy Jagoda  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG  
inż. Krzysztof Libera  
mgr inż. Adam Słowiński  
FAMUR S.A.

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono wyniki badań modelu fizycznego systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego. Opracowany w ITG KOMAG system pozycjonowania, w odróżnieniu od innych tego typu rozwiązań, do wyznaczania położenia i orientacji kombajnu wykorzystuje zjawiska propagacji fal ultradźwiękowych oraz radiowych. Badania przeprowadzono w tunelu doświadczalnym, w oddziale REMAG należącym do FAMUR S.A. z wykorzystaniem rzeczywistego kombajnu chodnikowego. Badania miały na celu sprawdzenie poprawności działania systemu oraz jego dokładności, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

Słowa kluczowe: górnictwo, wyrobisko korytarzowe, kombajn chodnikowy, pozycjonowanie

Keywords: mining industry, roadway, roadheader, positioning

### Abstract:

Testing results of the positioning system of the roadheader's physical model are presented. Positioning system developed at ITG KOMAG unlike other solutions of this type, is based on the ultrasound and radio waves phenomenon. The tests have been performed in an experimental tunnel at REMAG, a subsidiary of FAMUR S.A., using a real roadheader. The objective of the test was to examine correct operation of the system and its accuracy in conditions comparable to real life conditions.

## 1. Wprowadzenie

Metoda drażenia wyrobisk korytarzowych w polskich kopalniach węgla kamiennego wykorzystuje mechaniczne urabianie za pomocą kombajnów chodnikowych. Dążenie do zwiększania konkurencyjności zakładów górniczych, wymaga doskonalenia procesu drażenia wyrobisk korytarzowych poprzez wprowadzanie nowoczesnych rozwiązań technicznych. Środkiem prowadzącym do zwiększenia efektywności drażenia wyrobisk korytarzowych za pomocą kombajnów chodnikowych jest automatyzacja tego procesu [6, 7, 8, 9, 10, 11].

Aktualny poziom automatyzacji prac związanych z drażeniem wyrobisk korytarzowych w Polsce jest wciąż niski. Większość robót, w tym sterowanie kombajnem chodnikowym czy zabezpieczenie wyrobiska obudową, wykonuje się ręcznie. Dąży się jednak do automatyzacji części procesu drażenia związanej z urabianiem kombajnem chodnikowym. Jednym z czynników, który umożliwia częściowo lub całkowicie autonomiczne sterowanie kombajnem chodnikowym jest jego pozycjonowanie, czyli wyznaczanie bieżącej pozycji maszyny w wyrobisku.

Ze względu na warunki środowiskowe, coraz częściej zdarzają się przypadki, kiedy obecność operatora kombajnu chodnikowego w obszarze przodka wyrobiska jest niemożliwa, np. ze względu na wyrzuty skał i gazów. Właściwe pozycjonowanie kombajnu wraz z systemem autonomicznego sterowania wpłynie na zwiększenie bezpieczeństwa pracy, poprzez wycofanie załogi, w tym operatora kombajnu w bezpieczne miejsce.

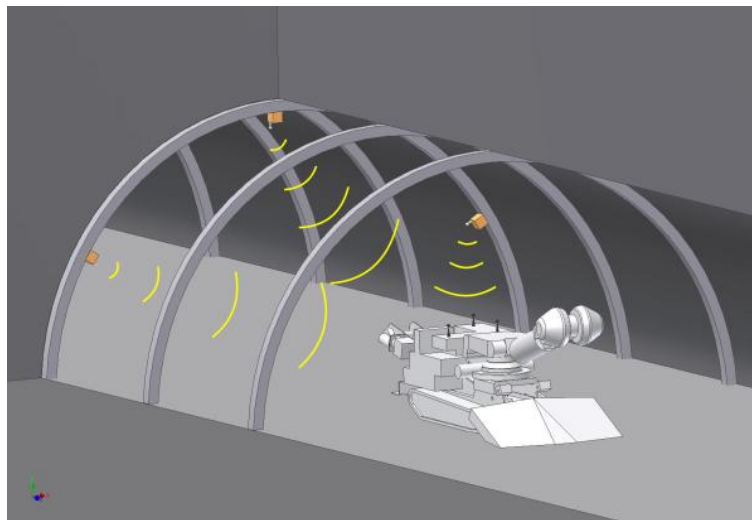
Zagadnienie pozycjonowania kombajnów chodnikowych podczas drażenia wyrobisk w kopalniach węgla kamiennego, nie zostało dotychczas dobrze rozwiązane. Systemy pozycjonowania kombajnów chodnikowych stosowane podczas drażenia tuneli, bazujące na

technice laserowej, ze względu na ograniczenia wynikające z przepisów (dyrektywy ATEX 2014/34/UE) oraz specyfikę środowiska kopalni węgla kamiennego, nie udało się wdrożyć. Również systemy wykorzystujące dalmierze laserowe nie sprawdziły się w praktyce, m.in. ze względu na konieczność montażu na ociosach wyrobiska dodatkowych ekranów odbijających promienie.

Uwzględniając powyższe w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG opracowano system pozycjonowania kombajnu chodnikowego w przestrzeni wyrobiska korytarzowego, który w odróżnieniu od istniejących rozwiązań wykorzystuje zjawiska propagacji fal ultradźwiękowych oraz radiowych [1, 2, 3, 4]. W artykule przedstawiono wyniki badań modelu fizycznego systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego przeprowadzonych w tunelu doświadczalnym, w firmie FAMUR – oddział REMAG. Tunel wyposażony był w obudowę chodnikową typu ŁP oraz kombajn chodnikowy, który w trakcie badań przemieszczał się wzdłuż wyrobiska. Badania miały na celu sprawdzenie poprawności działania systemu oraz jego dokładności, w warunkach zbliżonych do rzeczywistych.

## 2. System pozycjonowania kombajnu chodnikowego

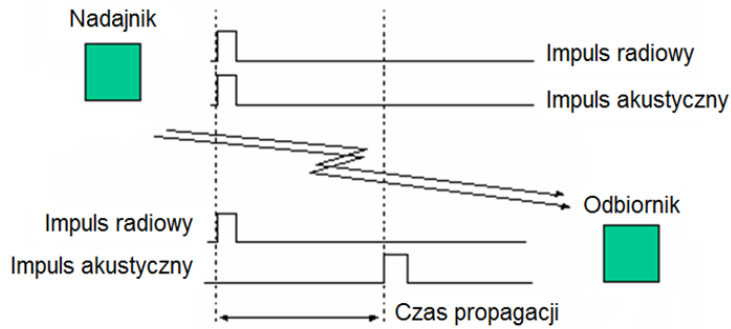
Ideę systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego, opracowanego w ITG KOMAG, przedstawiono na rysunku 1. Na ociosach, bądź stropie wyrobiska będą znajdować się co najmniej trzy nadajniki generujące fale radiowe i ultradźwiękowe. W docelowej formie nadajnik będzie bezprzewodowym, zintegrowanym urządzeniem, zawierającym: element generujący fale ultradźwiękowe, własne źródło zasilania, uchwyt magnetyczny umożliwiający montaż, układ sterujący oraz moduł komunikacji radiowej. Służby geodezyjne kopalni będą wyznaczać i wprowadzać do systemu współrzędne miejsc, w których instalowane będą nadajniki.



Rys. 1. Idea działania systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego w wyrobisku korytarzowym kopalni [2, 4]

Pozostałe elementy systemu będą zabudowane na kombajnie, tj.: moduł realizujący obliczenia, wyposażony w komunikację radiową, elementy odbierające fale ultradźwiękowe oraz inklinometr. Odpowiedni układ elementów odbiorczych na kombajnie wraz z inklinometrem umożliwią wyznaczenie położenia i orientacji kombajnu.

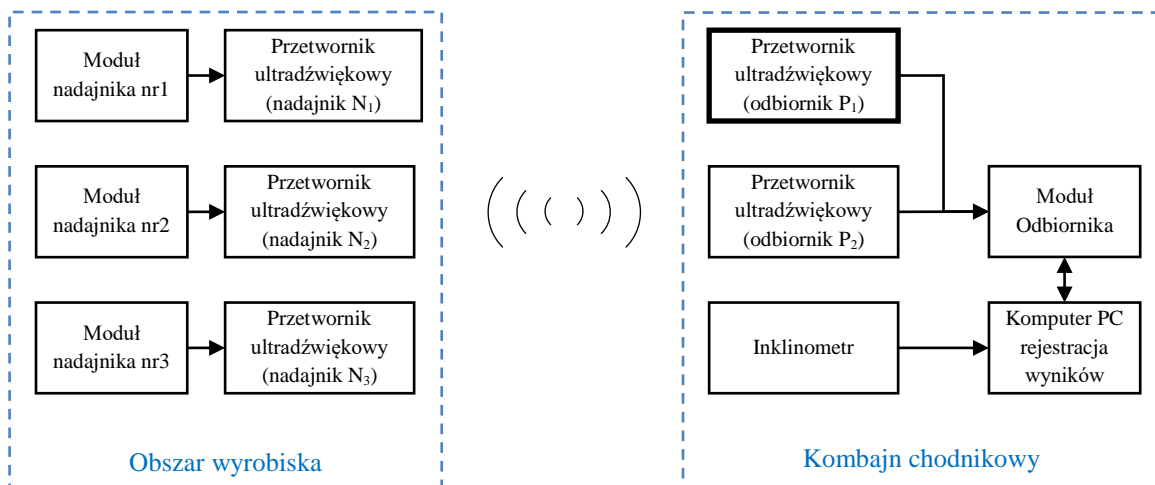
Algorytmy zaimplementowane w systemie, służące do wyznaczania położenia kombajnu, bazują na zasadzie trilateracji. Odległość maszyny od nadajników wyznaczana jest poprzez pomiar czasu propagacji fal ultradźwiękowych. Fale radiowe wykorzystano do przenoszenia sygnałów synchronizujących i do komunikacji. Sposób obliczania odległości poprzez pomiar czasu propagacji fal ultradźwiękowych przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Zasada obliczania odległości poprzez pomiar czasu propagacji fal ultradźwiękowych [2, 4]

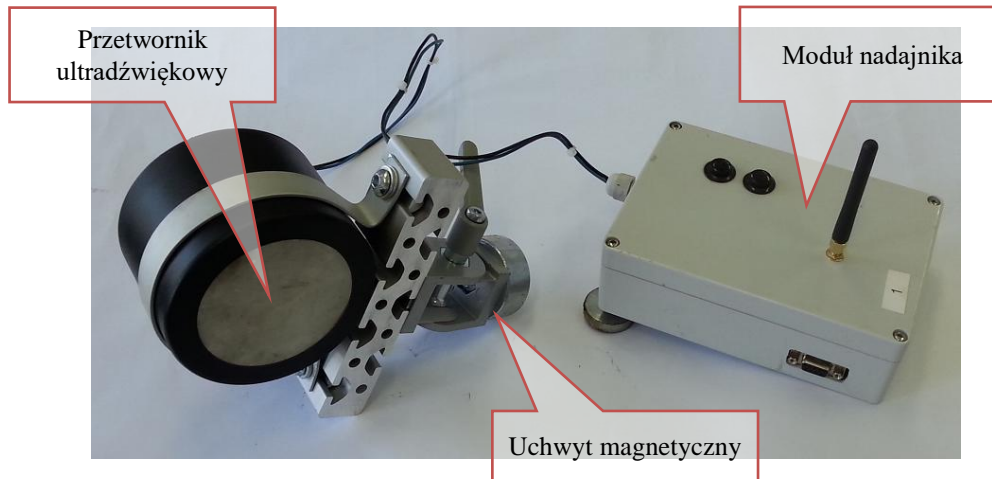
### 3. Model fizyczny systemu pozycjonowania

Struktura modelu systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego, będącego przedmiotem badań, została przedstawiona na rysunku 3.

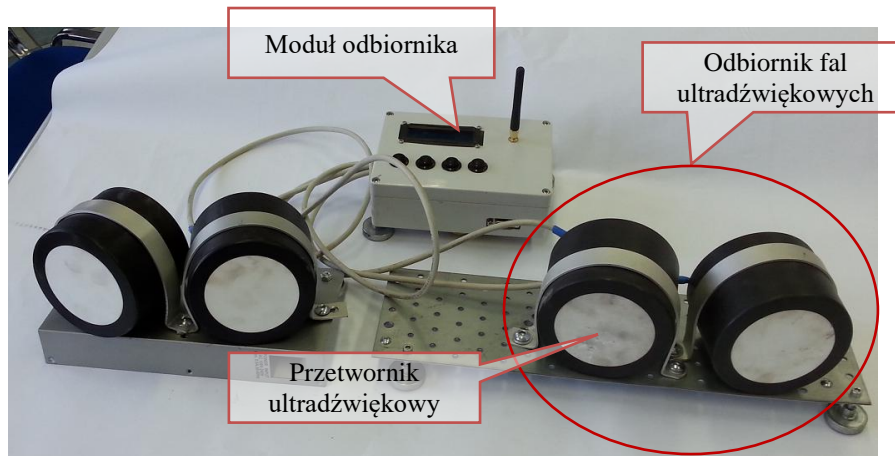


Rys. 3. Struktura modelu systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego [5]

Model systemu składał się z trzech nadajników (rys. 4) zainstalowanych na łukach obudowy chodnikowej oraz z modułu odbiornika, zainstalowanego na kombajnie, z dwoma odbiornikami fal ultradźwiękowych (rys. 5). Odbiornikiem był pojedynczy lub podwójny przetwornik ultradźwiękowy.



Rys. 4. Nadajnik systemu pozycjonowania kombajnu chodnikowego [5]

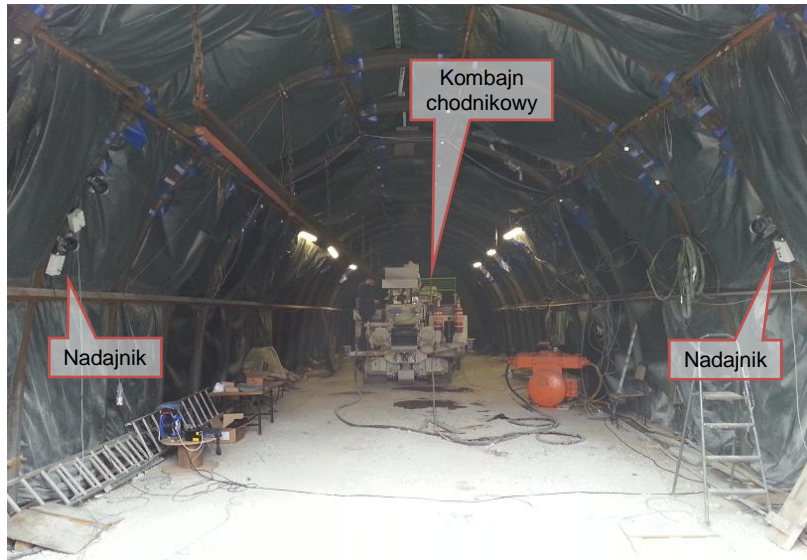


Rys. 5. Część modelu systemu związana z odbiorem fal ultradźwiękowych, instalowana na kombajnie chodnikowym [5]

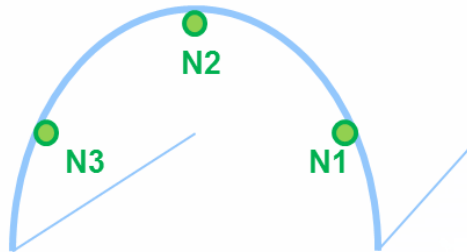
Na kombajnie dodatkowo znajdował się inklinometr dwuosiowy INK-2D oraz komputer rejestrujący wyniki pomiarów. Moduł odbiornika posiada 3 kanały pomiarowe (w wersji zastosowanej w badaniach do jego wejścia podpięto dwa odbiorniki, każdy złożony z dwóch przetworników ultradźwiękowych). Każdy kanał obok układów filtracji posiada regulowane wzmocnienie na 3-stopniowym poziomie: 20, 40 i 60 dB. Podczas badań wykorzystano przetworniki ultradźwiękowe pracujące z częstotliwością 30 kHz.

#### 4. Stanowisko badawcze

Badania realizowano w tunelu doświadczalnym, na terenie REMAG-u (rys. 6). Tunel symulował górnicze wyrobisko korytarzowe. Na kombajnie chodnikowym zamontowano odbiorniki, a na łuku obudowy ŁP12 nadajniki systemu pozycjonowania według schematu przedstawionego na rysunku 7.

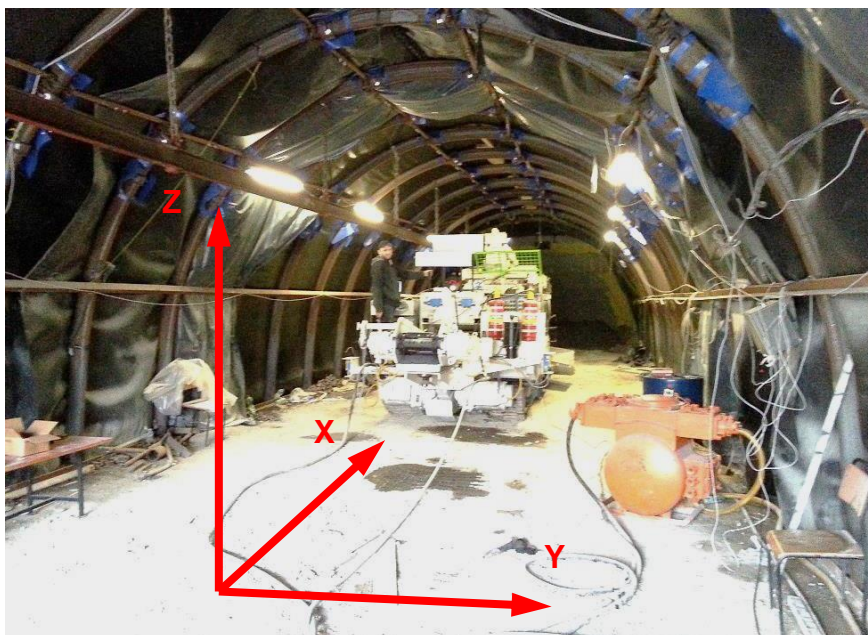


Rys. 6. Tunel doświadczalny z zainstalowanym modelem systemu pozycjonowania [5]



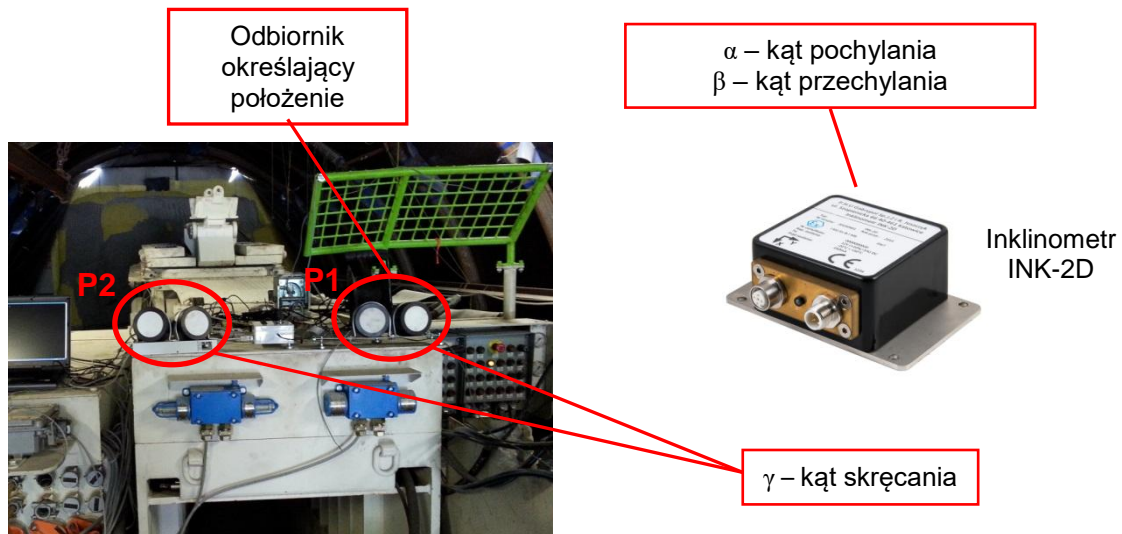
Rys. 7. Rozmieszczenie nadajników na łuku obudowy tunelu doświadczalnego [5]

Współrzędne nadajników (wyrażone w [m]) były następujące:  $N1 = (0; 2,7; 2,25)$ ,  $N2 = (0; 0; 4)$ ,  $N3 = (0; -2,75; 2,3)$ . W trakcie badań przyjęto układ współrzędnych odniesienia zgodnie z rysunkiem 8.



Rys. 8. Położenie osi XYZ układu współrzędnych odniesienia w tunelu [5]

Na podstawie pomiarów czasu propagacji fal ultradźwiękowych wyznaczano pozycję kombajnu (położenie oraz orientację). Elementy pomiarowe wykorzystywane do tego celu, zabudowane na kombajnie, przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Elementy zabudowane na kombajnie służące do wyznaczenia położenia i orientacji [5]

Do wyznaczenia położenia kombajnu służył odbiornik P1. Orientację kombajnu wyznaczano za pomocą trzech kątów:

- $\alpha$  – kąt pochylania,
- $\beta$  – kąt przechylenia,
- $\gamma$  – kąt skręcania.

Kąty  $\alpha$  i  $\beta$  mierzono za pomocą inklinometru INK-2D opracowanego w ITG KOMAG. Kąt  $\gamma$  obliczono na podstawie wzajemnego ułożenia odbiorników P1 i P2. Do obliczenia miary kąta  $\gamma$  konieczne było wyznaczenie współrzędnych odbiorników P1 i P2.

## 5. Przebieg badań

Badania rozpoczęto od umieszczenia na kombajnie pojedynczego odbiornika, w celu:

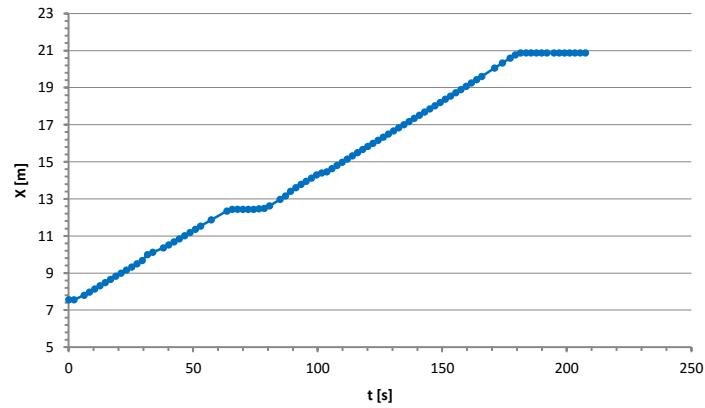
- sprawdzenia zakresu działania,
- kalibracji toru pomiarowego i działania systemu,
- regulacji parametrów komunikacji radiowej celem osiągnięcia niezawodnej komunikacji,
- eliminacji zakłóceń, które pojawiały się w chwili zwiększenia czułości odbiornika (zwiększono wzmacnienie kanału pomiarowego do 60 dB),
- sprawdzenia dokładności określania położenia, w całej długości tunelu.

Następnie system kalibrowano i rozbudowywano o kolejne elementy tak, aby przyjął on ostateczną postać przedstawioną na rysunku 9. Wyniki pomiarów rejestrowano na komputerze przenośnym (laptopie), który połączono z modułem odbiornika systemu pozycjonowania za pomocą interfejsu szeregowego. Dane pomiarowe zapisywano w formie plików tekstowych.

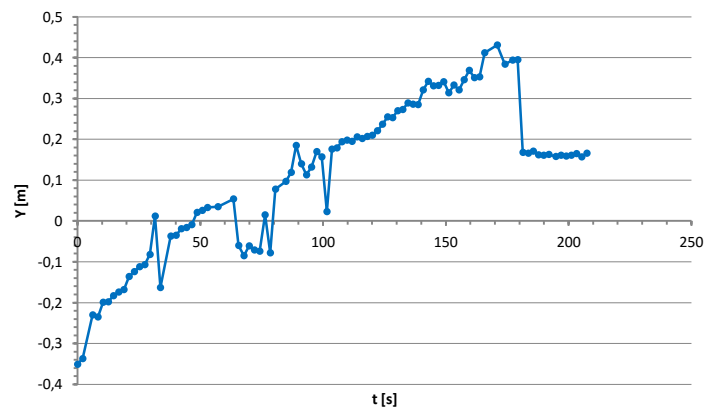
Przykładowe wyniki badań przedstawiono w postaci wykresów na rysunkach 10 i 11. Wartości każdej współrzędnej rejestrowanego położenia kombajnu przedstawiono na

osobnym wykresie. Dodatkowo na rysunkach 10d i 11d przedstawiono wartości kątów opisujących orientację kombajnu. Rysunek 10 reprezentuje przejazd kombajnu w głąb wyrobiska, natomiast rysunek 11 jego powrót.

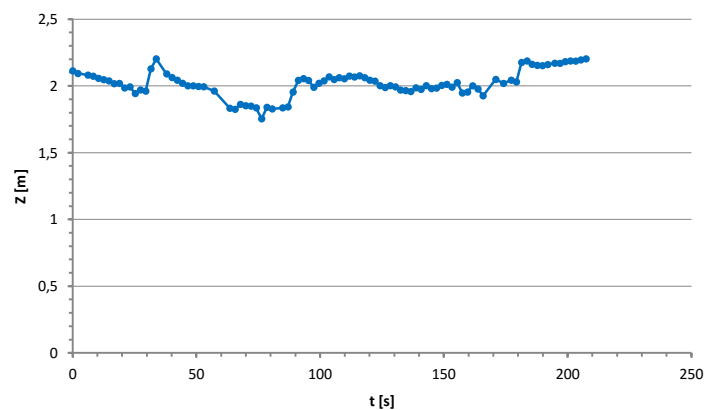
a)



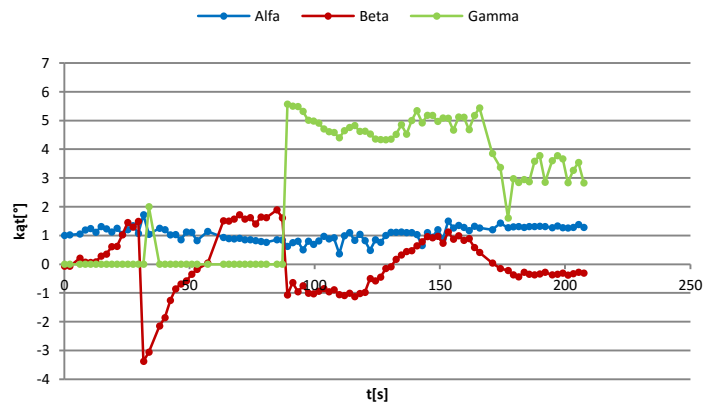
b)



c)

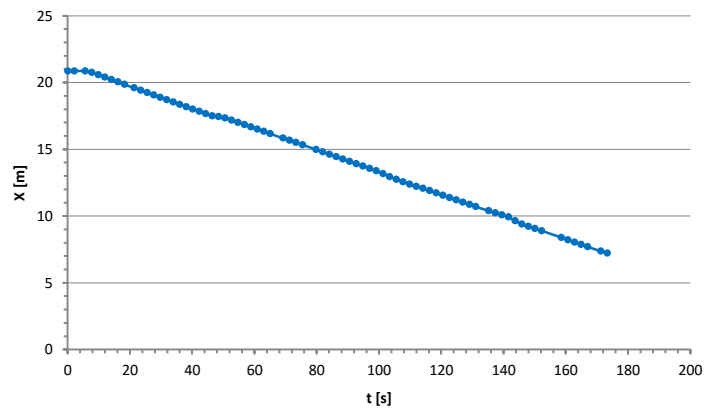


d)

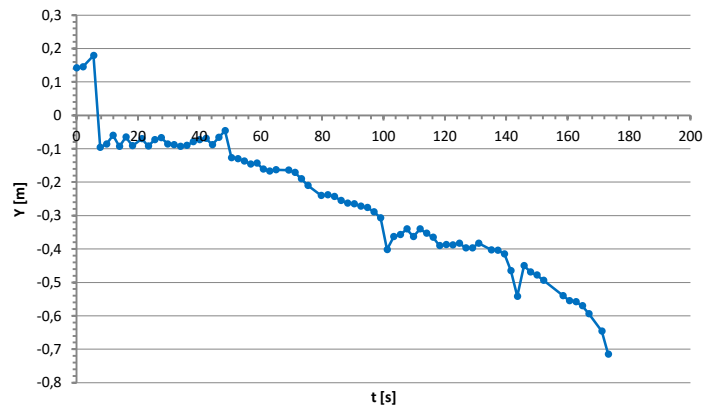


Rys. 10. Przebiegi wartości zarejestrowanych podczas jazdy kombajnu w głąb wyrobiska przedstawiające: a) współrzędną X położenia, b) współrzędną Y położenia, c) współrzędną Z położenia, d) kąty opisujące orientację kombajnu [5]

a)

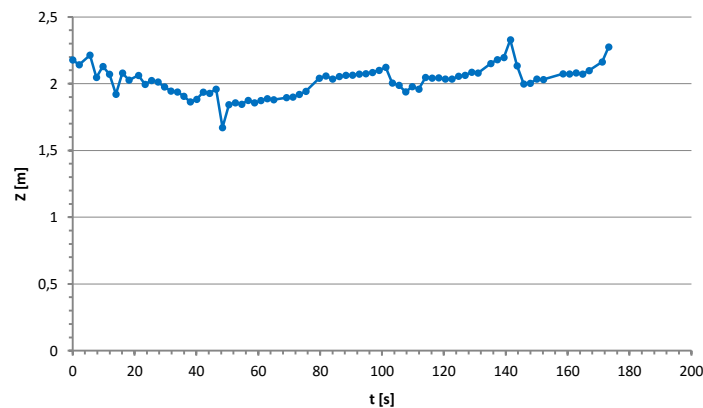


b)

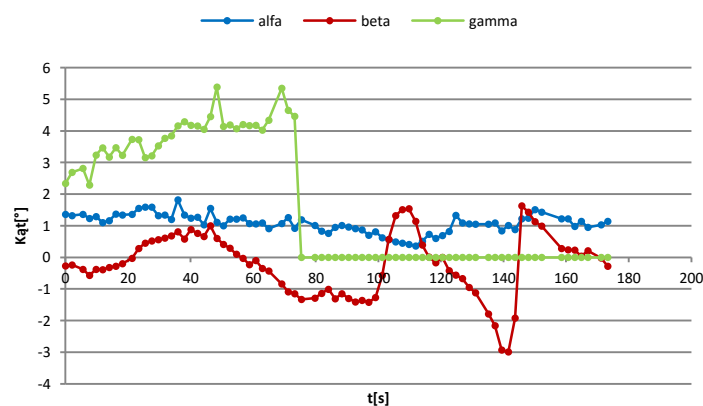




c)



d)



Rys. 11. Przebiegi wartości zarejestrowanych podczas jazdy powrotnej kombajnu przedstawiające: a) współrzędną X położenia, b) współrzędną Y położenia, c) współrzędną Z położenia, d) kąty opisujące orientację kombajnu [5]

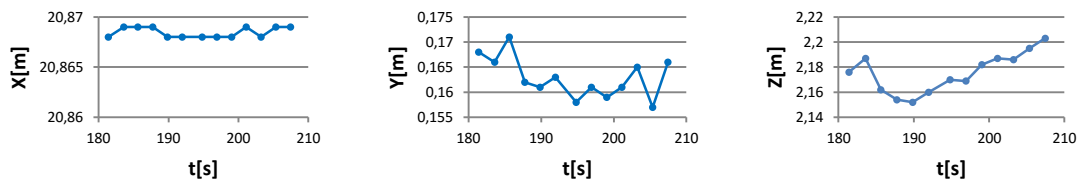
W każdym z przejazdów system wskazywał położenie na całej trasie przejazdu, przy czym minimalna odległość od nadajników wynosiła ok. 7 m. Przy mniejszych odległościach system nie odbierał sygnałów ze wszystkich nadajników jednocześnie, co wynikało z ich ustawienia oraz ograniczonego kąta emisji fal.

Wyznaczano wszystkie trzy kąty opisujące orientację (rys. 10d i 11d). Jednak kąt skręcania  $\gamma$ , wyznaczony na podstawie wzajemnego ustawienia odbiorników P1 i P2, przyjmował poprawne wartości tylko w części trasy przejazdu kombajnu. Przyczyną był niewłaściwie skonfigurowany filtr pasmowo-przepustowy w kanale pomiarowym, do którego podłączono odbiornik P2. Po wyeliminowaniu problemu, czułość obu kanałów pomiarowych (odbiornika P1 i P2) była taka sama. Dodatkowo zwiększono moc sygnałów (fal ultradźwiękowych) generowanych przez nadajniki.

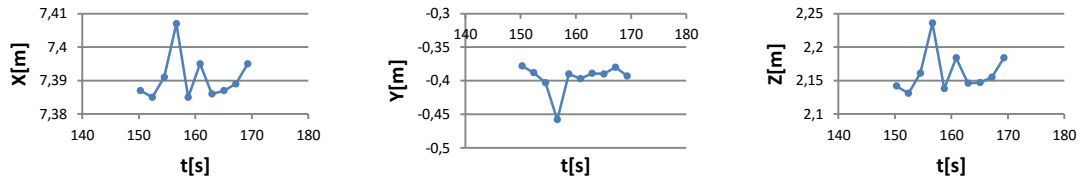
## 6. Określenie dokładności wskazań systemu

W celu określenia dokładności wskazań systemu (przedstawienia rozrzutu wyrażonego za pomocą rozstępu – różnicy pomiędzy największą i najmniejszą wartością), na rysunku 12 przedstawiono losowo wybrane wartości współrzędnych położenia kombajnu, rejestrowane w trakcie jego postoju.

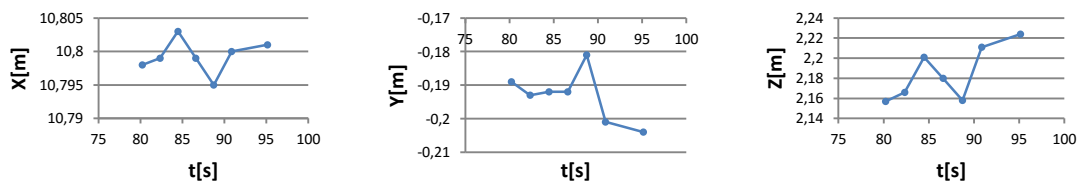
a)



b)



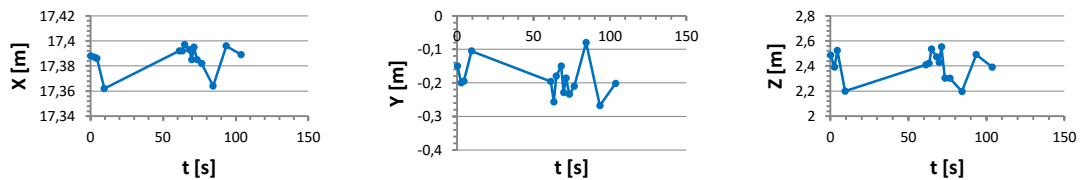
c)



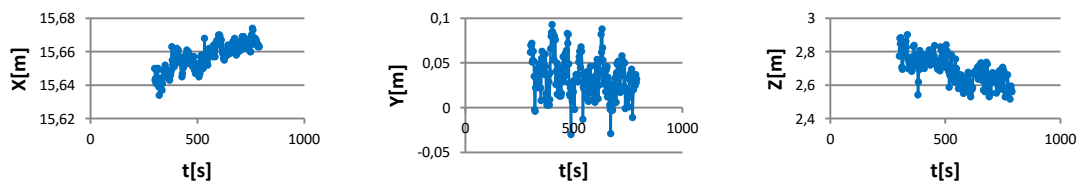
Rys. 12. Wartości współrzędnych położenia mierzone w trakcie postoju kombajnu, w odległości od nadajników wynoszącej: a) ok. 20,87 m, b) ok. 7,39 m, c) ok. 10,8 m [5]

Na rysunku 13 zamieszczono wartości współrzędnych położenia kombajnu rejestrowane w trakcie jego postoju, lecz tym razem wybrano najgorsze przypadki, czyli serie pomiarowe charakteryzujące się największym rozrzutem wartości.

a)



b)



Rys. 13. Wartości współrzędnych położenia mierzone w trakcie postoju kombajnu, w odległości od nadajników wynoszącej: a) ok. 17,39 m b) ok. 15,6 m [5]

W przypadku przebiegów z rysunku 12 maksymalny rozrzut wartości (wyrażony za pomocą rozstępu) poszczególnych współrzędnych wynosił odpowiednio:

- X: 0,022 m,
- Y: 0,08 m,
- Z: 0,11 m.

W najgorszych przypadkach, co dotyczy przebiegów z rysunku 13, maksymalny rozrzut poszczególnych współrzędnych wynosił:

- X: 0,04 m,
- Y: 0,2 m,
- Z: 0,4 m.

W wybranych lokalizacjach kombajnu porównywano wskazania systemu z wartościami współrzędnych położenia mierzonych manualnie. Ze względów technicznych możliwe było sprawdzenie tylko dwóch współrzędnych: X i Y. Współrzędną X mierzono za pomocą dalmierza laserowego, natomiast współrzędną Y sprawdzano przez pomiar odległości do bocznych części obudowy chodnikowej. W trakcie pomiarów kombajn nie poruszał się. Wyniki porównania przedstawiono w tabeli 1.

Porównanie wskazań systemu z pomiarami manualnymi [5]

Tabela 1

Lp.	Wartość oczekiwana (zmierzona przyrządem ręcznym)			Wartość wyznaczona przez system			Błąd bezwzględny	
	X [m]	Y [m]	Z [m]	X [m]	Y [m]	Z [m]	$\Delta X$ [m]	$\Delta Y$ [m]
1	7,37	-0,37	-	7,39	-0,55	2,15	0,02	0,18
2	10,76	-0,12	-	10,80	-0,25	2,20	0,04	0,13
3	12,40	0,05	-	12,43	-0,10	1,85	0,03	0,15
4	20,81	0,36	-	20,87	0,16	2,18	0,06	0,20

## 7. Podsumowanie

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że system wyznacza położenie kombajnu z określoną dokładnością (współrzędną X z dokładnością kilku centymetrów, a Y z dokładnością kilkunastu centymetrów). Dokładności wyznaczania współrzędnej Z nie określono ze względu na brak odpowiedniego przyrządu pomiarowego. Rozrzut (rozstęp) wartości serii pomiarowych zmierzonych podczas postoju kombajnu, w najgorszym przypadku wynosił odpowiednio X: 0,04 m, Y: 0,2 m, Z: 0,4 m. Największą dokładnością charakteryzowały się wartości współrzędnej X. Osiągany zakres pomiarowy systemu wynosił około  $7 \div 21$  m (odległość 21 m była maksymalną na jaką mógł się oddalić kombajn).

Wyznaczano również kąty opisujące orientację. Kąt pochylania i przechyłania odczytywano z inklinometru, natomiast kąt skręcania wyznaczano na podstawie wzajemnego położenia odbiorników P1 i P2. Ze względu na małą czułość kanału odbiornika P2, system wskazywał poprawne wartości kąta skręcania tylko w niewielkiej części toru jazdy kombajnu. Ostatecznie problem wyeliminowano, co potwierdziły testy laboratoryjne. Zmodyfikowany system zostanie przetestowany w kolejnym etapie badań. W dalszych badaniach planuje się również testy podczas urabiania bloku betonowego (podczas zapylenia). Planuje się również sprawdzenie działania systemu podczas symulacji przeszkód znajdujących się w rzeczywistym wyrobisku tj. np. elementów instalacji wentylacyjnej.

## Literatura

- [1] Bartoszek S.: Pozycjonowanie kombajnu chodnikowego w wyrobisku korytarzowym. Maszyny Górnicze 2016 nr 1 s. 22-35, ISSN 0209-3693

- [2] Bartoszek S.: System pozycjonowania maszyn mobilnych w wyrobiskach korytarzowych. Praca wewnętrzna ITG KOMAG, Gliwice 2012 - 2015 (materiały niepublikowane)
- [3] Bartoszek S.: Metoda pozycjonowania górniczych maszyn mobilnych w wyrobiskach korytarzowych. W: Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo – efektywność – niezawodność. KOMTECH 2012, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012 s. 387-399
- [4] Bartoszek S.: Metoda pozycjonowania kombajnu chodnikowego w wyrobisku korytarzowym. Praca doktorska, Politechnika Śląska, Gliwice, 2017
- [5] Bartoszek S. i inni: System pozycjonowania kombajnu chodnikowego. Praca wewnętrzna ITG KOMAG, Gliwice 2016 (materiały niepublikowane)
- [6] Bertignoll H.: The right road: a clear path. World Coal 2014 nr 6 s. 35-36
- [7] Jasiulek D., Świder J.: Mechatronic systems in mining roadheaders – examples of solutions. Pomiary Automatyka Robotyka 2013 nr 1. ISSN 1427-9126, Indeks 339512.
- [8] Jasiulek D., Kozieł A., Stankiewicz K., Bartoszek S.: Inteligentne systemy sterowania maszyn górniczych dla kopalni przyszłości. Napędy i Sterowanie. 2011 nr 7/8 (147/148) s. 100-103
- [9] Jasiulek D., Stankiewicz K., Świder J.: An adaptive control system of roadheader with intelligent modelling of mechanical features of mined rock. Journal of KONES Powertrain and Transport, Vol. 18, No. 2 2011
- [10] Jonak J.: Analiza możliwości automatyzacji procesów drążenia kombajnami niepełnoprzekrojowymi. Masz. Gór. 2003 nr 93 s. 20-22
- [11] Kargl H., Gimpel M., Haubmann H., Preimesberger T.: Development of an automatic cutting cycle for part face mining machines. W: Materiały na konferencję: "Mineral Resources and Mine Development", RWTH Aachen, May 26th and 27th, 2010 s. 379-391