

KONRAD TRZOP

Zastosowanie układu pomiarowego rejestrującego parametry pracy obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem technologii MEMS

Stosowanie innowacyjnych technologii w procesie produkcji węgla kamiennego jest nieodzownym elementem budowania przedsiębiorstwa na miarę współczesnych czasów. Tempo zachodzących zmian środowiskowych i społecznych powoduje potrzebę ciągłego doskonalenia procesu produkcyjnego, którego najważniejszym elementem są maszyny i urządzenia. Wymagają one stałego monitorowania ich parametrów pracy w celu zapewnienia ciągłości produkcyjnej oraz bezpieczeństwa. Propozycją rozwiązania tego problemu jest układ pomiarowy rejestrujący parametry pracy obudowy zmechanizowanej, wykorzystujący technologię MEMS do pomiaru zmian nachylenia poprzecznego i podłużnego elementów oraz wysokości obudowy. Praca układu pozwala określić parametry pracy zmechanizowanej obudowy w ścianie wydobywczej. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania technologii MEMS w czujnikach układu pomiarowego oraz etapy badań zrealizowanych w celu przystosowania obudowy zmechanizowanej do wdrożenia przedstawionego rozwiązania w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: zmechanizowana obudowa ścianowa, efektywność, bezpieczeństwo, MES, MEMS, górnictwo podziemne

1. WPROWADZENIE

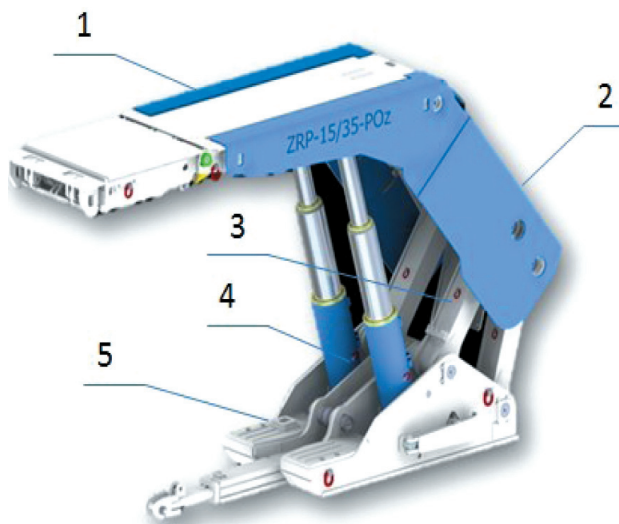
Rozwój innowacyjnych rozwiązań powoduje potrzebę prowadzenia badań w zakresie ich przystosowania do trudnych warunków branży wydobywczej [1, 2]. Realizacja badań w tym zakresie wymaga analiz dużych zbiorów danych oraz testów w warunkach rzeczywistych [3]. Niesprzyjające warunki geologiczno-górniczne stanowią duże wyzwanie dla środowiska inżynierskiego [4–6]. Obszarem, który wymaga ciągłego doskonalenia, jest park maszynowy [7]. W procesie urabiania węgla kamiennego kluczowym elementem jest kompleks ścianowy, który składa się z maszyny urabiającej, obudowy ścianowej oraz przenośnika ścianowego [7].

Obudowa zmechanizowana wchodzi w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, którego zadaniem jest bezpośrednio urabianie górotworu oraz przetransportowanie urobku ze strefy przodkowej.

Obudowy mają m.in. zabezpieczać przestrzeń roboczą, w której prowadzona jest eksploatacja, oraz wspomagać pracę całego kompleksu zmechanizowanego, co powoduje, że znaczenie każdej z nich dla całego systemu jest bardzo duże [8].

Występujące w procesie produkcji górniczej zagrożenia, w szczególności naturalne, sprawiają, że sekcje obudowy oraz cała obudowa muszą spełniać bardzo wysokie wymagania [8]. Jej współpraca z górotworem ma także wpływ na efektywność pracy pozostałych maszyn, w tym głównie urabiającej [8].

Do elementów podstawowych obudowy zmechanizowanej zaliczamy wszystkie części przenoszące obciążenia wywołane naciskiem skał stropowych. Elementami dodatkowymi nazywamy części nieprzenoszące obciążeń pochodzących z nacisku skał stropowych, lecz niezbędne do funkcjonowania obudowy [9]. Elementy podstawowe zostały zobrazowane na rysunku 1.



Rys. 1. Elementy konstrukcyjne obudowy zmechanizowanej:

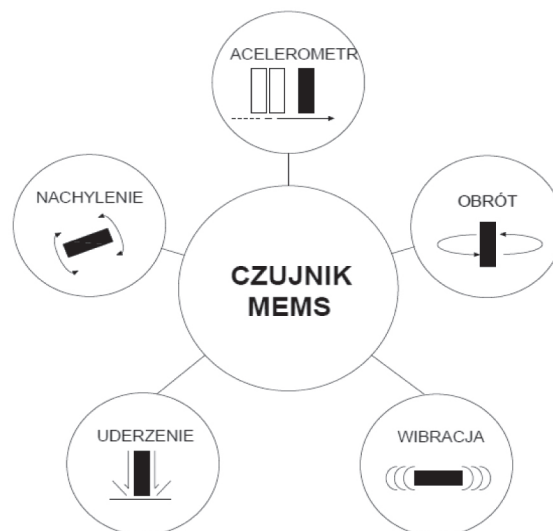
1 – stropnica, 2 – osłona odzawalowa, 3 – lemniskaty, 4 – stojaki hydrauliczne, 5 – spąglica

W celu poprawy bezpieczeństwa pracy i efektywności obudowy ścianowej konieczne jest zastosowanie ciągłego monitoringu jej parametrów pracy. Do wykonania tego zadania może posłużyć układ, który pozwoliłby na stały pomiar parametrów geometrycznych i ciśnienia [9].

Zastosowany układ pomiarowy wykorzystany w badaniach składał się ze zminiaturyzowanych urządzeń elektromechanicznych działających w technologii MEMS [9–11]. Jest ona stosowana w zaawansowanych maszynach i urządzeniach [10, 11]. Technologia MEMS ma charakter interdyscyplinarny, łączy w sobie obszary inżynieryjne, projektowe i produkcyjne [10–12] i jest wykorzystywana w inżynierii mechanicznej i materiałowej, chemii, elektrotechnice, inżynierii płynów i optyki, medycynie, komunikacji układów oraz kosmonautyce [10–12]. Zastosowanie tej technologii w różnego typu czujnikach umożliwia pomiar wibracji, uderzenia, pochylenia, przemieszczenia oraz obrotu (rys. 2) [10–12]. Pomiar odbywa się z wykorzystaniem składowej siły grawitacji g , która oddziałuje na obiekt na powierzchni. Urządzenia w technologii MEMS cechują się odpornością na wibracje, dużą niezawodnością, niskim zużyciem energii, mikroskopijną budową oraz niskimi kosztami produkcji [10–12].

Artykuł prezentuje wyniki badań modelowych, stanowiskowych oraz w warunkach rzeczywistych, których celem było określenie miejsc montażu czujników oraz osiągnięcie prawidłowej pracy układu. Układ pomiarowo-rejestrujący składał się z komputera wyposażonego w specjalistyczne oprogramowanie i czterech czujni-

ków. Zastosowane rozwiązanie umożliwiło pomiary kątów nachylenia elementów obudowy i jej wysokości w danej fazie pracy. Dzięki przeprowadzonym pomiarom oraz zebranych danym można było zobrazować cykl pracy zmechanizowanej obudowy ścianowej.



Rys. 2. Zdolności pomiarowe czujników MEMS [11]

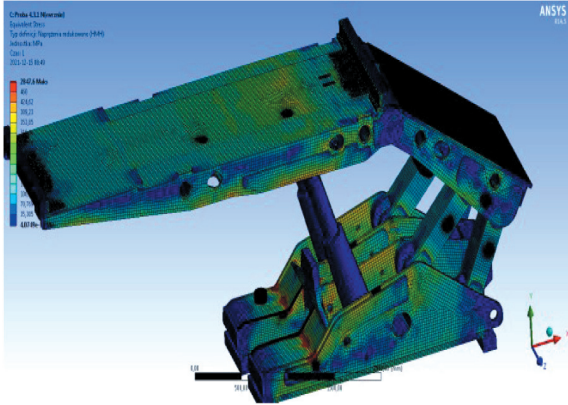
2. PRZEBIEG BADAŃ W ZAKRESIE ROZWOJU KONSTRUKCJI OBUDOWY ŚCIANOWEJ

Monitoring parametrów pracy obudowy zmechanizowanej stanowi wyzwanie dla inżynierów ze względu na trudne warunki pracy całego układu pomiarowego oraz cykl pracy obudowy związany z procesem urabiania węgla. Doskonalenie pracy układu pomiarowego wymaga długotrwałych badań i analiz danych pozyskiwanych na każdym z ich etapów. W celu dopracowania układu pomiarowego skupiono się na każdym jego elemencie, realizując badania modelowe, stanowiskowe oraz eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, ostatecznie podejmując próby wdrożenia do cyklu produkcyjnego.

2.1. Badania modelowe

Badania modelowe stanowiły pierwszą część podjętej analizy polegającej na wyznaczeniu miejsc montażu układu pomiarowego zaprojektowanego do stałego monitoringu parametrów pracy obudowy ścianowej [15]. W badaniach wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), która pozwoliła na wykonanie symulacji naprężeń rzeczywistych na elementach konstrukcyjnych obudowy. Pierwszy etap polegał na określeniu

parametrów geometrycznych projektowanej sekcji obudowy zmechanizowanej. Kolejno określono granice sprężystości i plastyczności konstrukcji, uwzględniając zadane warunki brzegowe. Następnym etapem było wyznaczenie obszaru obliczeniowego w postaci siatki obliczeniowej i wykonanie symulacji naprężeń zredukowanych. Na rysunku 3 zaprezentowano przykład takiej symulacji na sekcji obudowy zmechanizowanej.



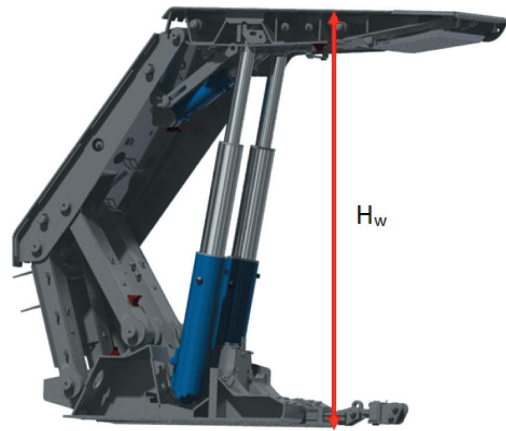
Rys. 3. Przykład symulacji badań modelowych nad obudową zmechanizowaną (metoda MES)

Wykonana symulacja przyczyniła się do wyznaczenia miejsc w konstrukcji najbardziej narażonych na zerwanie lub uplastycznienie w wyniku oddziaływania sił zewnętrznych w warunkach rzeczywistych. Takie obszary nie mogły być brane pod uwagę jako potencjalne miejsca montażu układu pomiarowego. Zrealizowane badania modelowe na etapie projektowania pozwoliły wykluczyć kolizje podstawowych elementów obudowy zmechanizowanej z układem pomiarowo-rejestrującym oraz wyznaczyć wstępne miejsca montażu urządzeń.

2.2. Badania stanowiskowe

Badania stanowiskowe zostały zrealizowane z użyciem zaprojektowanego do tego celu układu pomiarowego. Wybrano sekcję obudowy zmechanizowanej, która podczas badań w warunkach rzeczywistych stanowiła maszynę zabudowaną w wyrobisku ścianowym. Czujniki stanowiące układ pomiarowy rozmieszczono według wytycznych sformułowanych na etapie symulacji komputerowych. Zostały one zainstalowane na podstawowych elementach sekcji obudowy zmechanizowanej, tj. na stropnicy, spągnicy, osłonie odzawałowej i lemniskatach. Celem prowadzonych badań było uzyskanie danych niezbędnych do wyznaczenia wysokości pracy obudowy (rys. 4)

w zmiennych fazach jej pracy oraz potwierdzenie prawidłowej pracy układu pomiarowego. Wykonane pomiary były na bieżąco porównywane z pomiarami ręcznymi w celu ich weryfikacji (rys. 5).

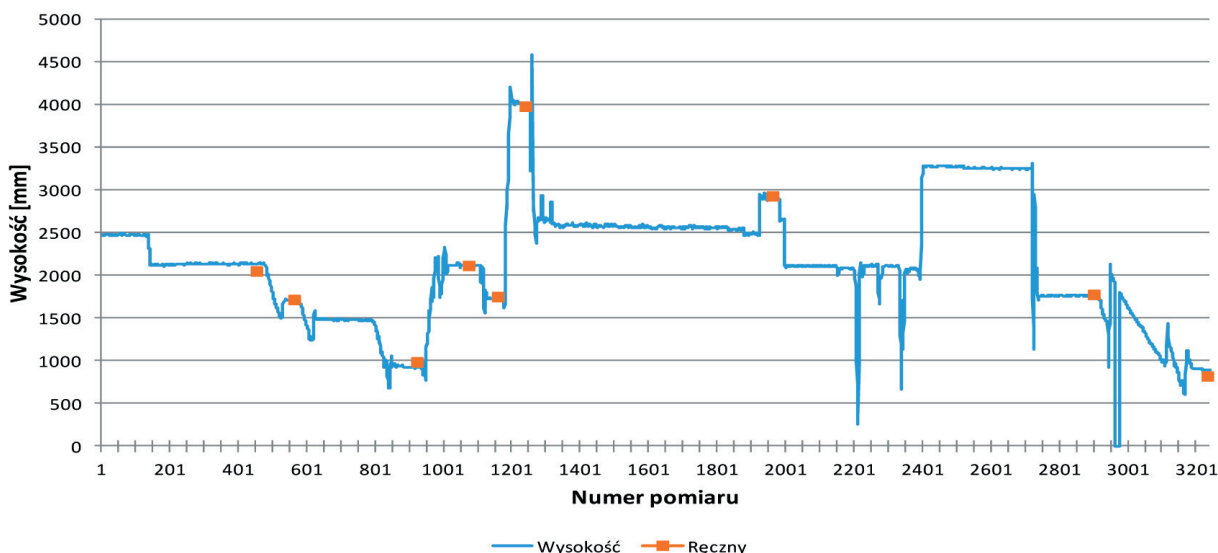


Rys. 4. Pomiar wysokości pracy obudowy zmechanizowanej



Rys. 5. Ręczny pomiar wysokości pracy obudowy zmechanizowanej

Na rysunku 6 oraz w tabeli 1 zaprezentowano zmiany wysokości pracy obudowy wynikające ze sposobu sterowania nią podczas badań stanowiskowych. Dzięki tym danym oraz porównaniu pomiarów ręcznych z danymi uzyskanymi z układu pomiarowego określono błąd pomiarowy. Zakres błędów w czasie badań stanowiskowych wahał się w granicach 4–10 cm. Dodatkowo sposób sterowania obudową przetestowano w warunkach rzeczywistych z zainstalowanym układem pomiarowym, co wykazało brak kolizji z jej podstawowymi i dodatkowymi elementami konstrukcyjnymi. Potwierdzono tym samym analizy przeprowadzone na podstawie symulacji komputerowych [15].



Rys. 6. Rozkład pomiarów pochodzących z badanego układu i pomiarów ręcznych wysokości sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej na stanowisku badawczym

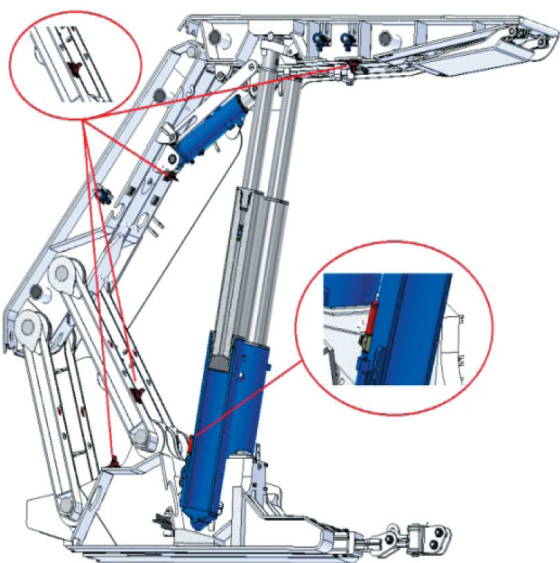
Tabela 1

Zestawienie pomiarów z badań stanowiskowych

Rodzaj pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9
System [mm]	2137,89	1715,61	927,29	2131,12	1722,03	3987,04	2906,37	1768,74	883,83
Ręczny [mm]	2235,89	1761,61	1004,29	2193,12	1780,03	4039,04	2973,37	1811,74	967,83
Różnica [mm]	98	46	77	62	58	52	67	43	84

2.3. Badania eksperymentalne

Badania modelowe wykonane metodą elementów skończonych (MES) oraz badania stanowiskowe po-



Rys. 7. Rozmieszczenie czujników na stanowisku badawczym w warunkach rzeczywistych

zwoliły na początkowym etapie wykluczyć kolizje poszczególnych elementów obudowy zmechanizowanej z zabudowanymi czujnikami oraz wyeliminowały potencjalne miejsca montażu czujników, które były najbardziej narażone na oddziaływanie sił zewnętrznych. Opracowane wytyczne zostały użyte do stworzenia stanowiska badawczego i praktycznego wykorzystania całego układu. Rozmieszczenie czujników w warunkach rzeczywistych zaprezentowano na rysunku 7.

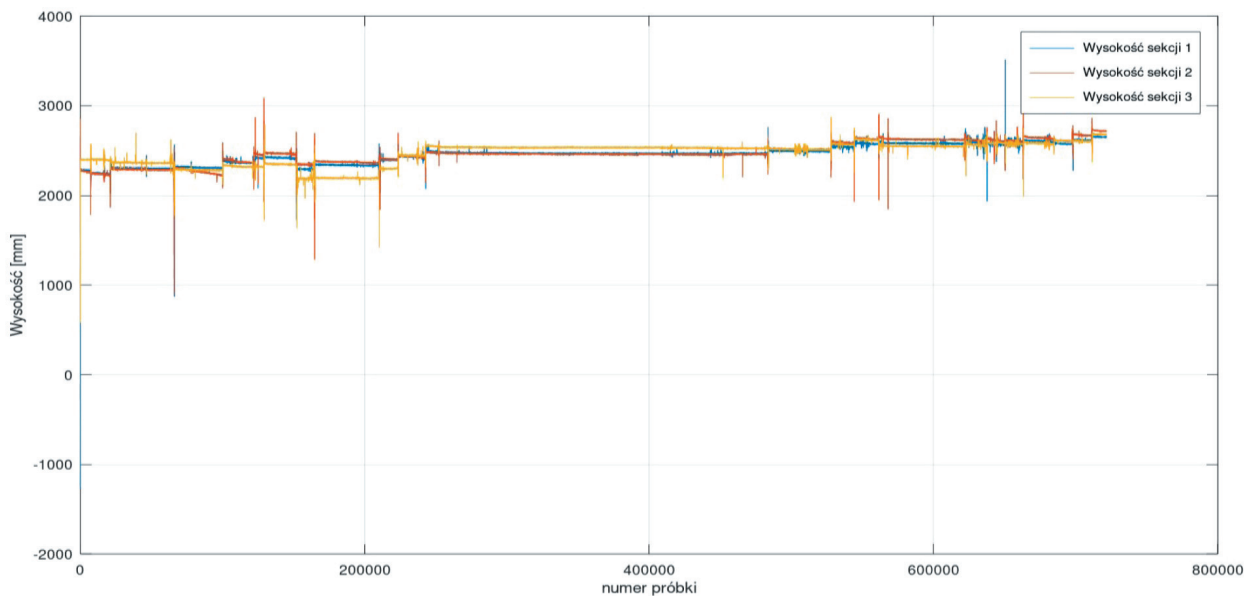
W celu uzyskania dodatkowych danych o parametrach pracy sekcji w wyrobisku ścianowym wyposażono układ pomiarowy w czujnik ciśnienia pracy stojaka hydraulicznego. Pomiar ten dodatkowo dostarczył informacji o parametrach obciążenia obudowy, które mogą wpływać na wysokości jej pracy. Miejsce i sposób zabudowy miało kluczowy wpływ na wzorcowanie układu pomiarowo-rejestrującego. Prawidłową orientację czujnika uzyskano dzięki zastosowaniu innowacyjnych uchwytów montażowych, które zostały tak zabudowane, aby sposób orientacji kłosa czujnika

był zgodny z wytycznymi określonymi na etapie badań stanowiskowych. Przykład montażu czujnika z uchwytem zaprezentowano na rysunku 8.

Badania w warunkach rzeczywistych dostarczyły dużych zbiorów danych, które zostały poddane analizie w celu określenia wytycznych dla systemu monitoringu. Na etapie badań eksperymentalnych określono parametry pracy trzech sekcji obudowy, wyznaczając wysokości ich pracy (rys. 9). Uzyskane dane potwierdziły prawidłową pracę układu pomiarowego. Kolejny etap polegał na wykorzystaniu układu pomiarowego do ciągłego monitoringu parametrów pracy obudowy ścianowej z możliwością transmisji danych do stanowiska wizualizacji zlokalizowanego w wyrobisku podścianowym oraz przesyłu danych na powierzchnię [9].



Rys. 8. Montaż czujnika w warunkach rzeczywistych z wykorzystaniem uchwytów



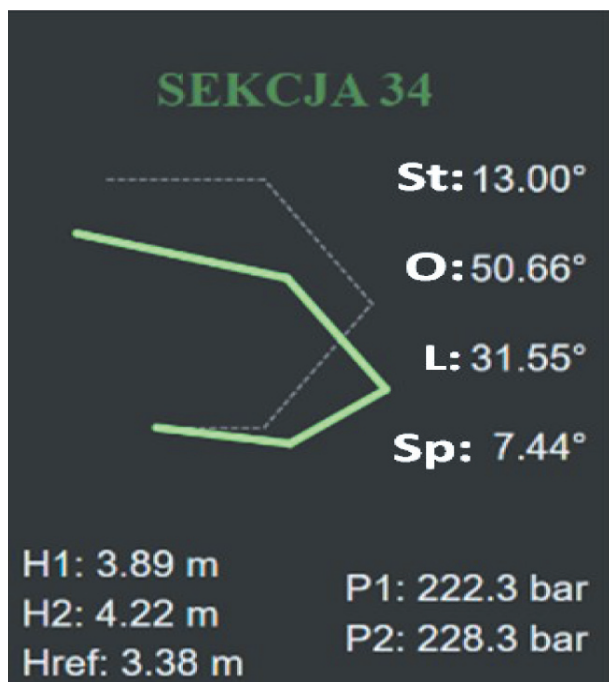
Rys. 9. Widok rozkładu wysokości w sekcjach zmechanizowanej obudowy ścianowej

3. PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA

Układ pomiarowy został zainstalowany w warunkach dołowych w ścianie wydobywczej w pokładzie 510 o miąższości od 8,8 m do 10,8 m. Warstwy w tym rejonie zapadają pod kątem około 6° w kierunku południowo-zachodnim. Monitoringiem objęto 5 sekcji w wyrobisku ścianowym, z których trzy z nich zostały wyposażone w zestaw czujników zabudowanych obok siebie. Kolejne czujniki umieszczono w odległości 25 i 35 sekcji w kierunku napędu zwrotnego przenośnika ścianowego.

W wyrobisku podścianowym zlokalizowano komputer dołowy do bieżącej wizualizacji danych pozy-

skiwanych z sekcji. Monitorowano parametry geometryczne sekcji: nachylenie poprzeczne i podłużne podstawowych elementów obudowy, wysokość oraz ciśnienie. Wizualizacje przedstawiono na rysunku 10, gdzie zaprezentowano parametry pracy jednej z monitorowanych sekcji. Połączenie i komunikacja czujników w sekcjach odbywały się bezprzewodowo. Ze stanowiska dołowego zlokalizowanego w wyrobisku dane były transmitowane do serwerowni na powierzchni. Wykonane badania stanowiły pierwsze testy układu pomiarowego wykorzystującego komunikację bezprzewodową pomiędzy 5 sekcjami i współpracę stanowiska dołowego z serwerownią na powierzchni.



Rys. 10. Wizualizacja parametrów pracy obudowy w warunkach rzeczywistych

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych pomiarów geometrii obudowy zmechanizowanej (nachyleń poprzecznych i podłużnych, wysokości) możemy określić zmiany zachodzące w wysokości prowadzonej ściany oraz nachylenie podstawowych elementów obudowy. Trudne warunki wymuszają na użytkowniku zastosowanie w sekcjach obudowy zmechanizowanej dodatkowego wyposażenia w celu zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności pracy w wyrobisku ścianowym. Prowadzenie wydobywania w wyrobisku o zmiennym nachyleniu znacznie wpływa na sprawne ładowanie urobku oraz zwiększa zużycie mocy przez silnik organu i posuwu. Narastające nachylenie w wyrobisku ścianowym wymusza zmiany w sposobie obsługi maszyn, prowadzenia eksploatacji oraz zarządzania załogą. Poprawa warunków pracy i stały nadzór nad tymi czynnikami jest możliwy dzięki ciągłemu pomiarowi zachodzących zmian w nachyleniu maszyn i urządzeń. Wykorzystując do tego systemy monitorowania geometrii obudowy, dajemy sobie szansę na zmniejszenie liczby awarii całego kompleksu ścianowego, zniwelowanie skutków niekontrolowanego opadu skał stropowych, zachowanie parametrów geometrycznych wyrobiska oraz utrzymywanie stałego nadzoru nad pracą obudowy z każdego miejsca. Bieżące monitoro-

wanie zmian geometrycznych obudowy zachodzących podczas procesu urabiania pozwoli:

- zapewnić stateczność stropu;
- utrzymać zakładane parametry geometryczne wyrobisk;
- zwiększyć konkurencyjność na rynku wydobywczym;
- zwiększyć bezpieczeństwo;
- ograniczyć ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych związanych z opadem skał stropowych;
- poprawić jakość przechowywania dużych zbiorów danych oraz ich analizy;
- zwiększyć efektywność kontroli i nadzoru nad pracownikami;
- wcześniej wykrywać awarie oraz im zapobiegać;
- określić nachylenie i wysokość sekcji w danej fazie pracy;
- zwiększyć efektywność pracy całego kompleksu ścianowego.

Układ pomiarowy stanowi jedno z narzędzi do doskonalenia autonomicznych kompleksów ścianowych. Dane udostępniane przez czujniki pomiarowe mogą być wykorzystane przez systemy sterowania obudową zmechanizowaną do wizualizacji ściany w zaawansowanych automatycznie kompleksach ścianowych. Pozwoli to na automatyczne sterowanie postępowaniem obudowy zgodnie z rozpoznaniem i zakładanym kształtem wyrobiska ścianowego. Zastosowany układ pomiarowy umożliwi ciągły dostęp do danych na temat parametrów pracy obudowy bez konieczności ingerencji pracowników oraz dostosowanie tych parametrów do warunków zewnętrznych.

W artykule zaprezentowano etapy przeprowadzonych badań, których celem było dostosowanie układu pomiarowego i konstrukcji obudowy zmechanizowanej do pracy, a tym samym uzyskanie kompatybilności konstrukcji z układem pomiarowym. Bez przeprowadzonych długotrwałych badań w zakresie wyznaczenia miejsca i sposobu montażu czujników układu pomiarowego uzyskane dane byłyby obciążone znacznym błędem.

Literatura

- [1] Szurgacz D.: *Zmechanizowana obudowa ścianowa w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [2] Prostański D.: *Empirical Models of Zones Protecting Against Coal Dust Explosion*. Archives of Mining Sciences 2017, 62, 611–619.
- [3] Korbiel T., Stepień B., Batko W., Pawlik P., Blaut J.: *Recognition of the 24-hour Noise Exposure of a Human*. Archives of Acoustics 2017, 42, 601–607.

- [4] Burdzik R.: *Impact and Assessment of Suspension Stiffness on Vibration Propagation into Vehicle*. Sensors 2023, 23, 1930.
- [5] Hebda-Sobkowicz J., Gola S., Zimroz R., Wyłomańska A.: *Identification and Statistical Analysis of Impulse-Like Patterns of Carbon Monoxide Variation in Deep Underground Mines Associated with the Blasting Procedure*. Sensors 2019, 19, 2757.
- [6] Kawalec W., Błazej R., Konieczna M., Król R.: *Laboratory Tests on e-pellets effectiveness for ore tracking*. Mining Sciences 2018, 25, 7–18.
- [7] Krauze K., Klempka R., Mucha K., Wydro T.: *Computer-aided selection of the stabilizing system parameters of the mobile transport and assembly manipulator in mining excavations*. Archives of Mining Sciences 2023, 68, 3–18.
- [8] Rajwa S., Janoszek T., Prusek, S.: *Influence of canopy ratio of powered roof support on longwall working stability – A case study*. International Journal of Mining Science and Technology 2019, 29, 591–598.
- [9] Trzop K., Szurgacz D.: *Optimal geometry of the powered roof support's operation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2024, 1295(1), 012005.
- [10] Łuczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M.: *Sensing Tilt with MEMS Accelerometers*. IEEE Sensors Journal 2006, 6(6), 1669–1675.
- [11] Łuczak S.: *Pomiar odchylenia od pionu z użyciem akcelerometrów MEMS*. Pomiary Automatyka Robotyka 2008, 7–8, 14–16.
- [12] Analog Devices: *Using an accelerometer for inclination sensing*. AN-1057 Application Note 2010, 1–8.
- [13] Xu R., Zhou S., Li W. J.: *MEMS Accelerometer Based Non-specific-User Hand Gesture Recognition*. IEEE Sensors Journal 2012, 12, 5.
- [14] Wang H., Xiong D., Duan Y., Liu J., Zhao X.: *Advances in vibration analysis and modelling of large rotating mechanical equipment in mining arena: A review*. AIP Advances 2023, 13, 110702.
- [15] Szurgacz D., Trzop K., Gil J., Zhironkin S., Pokorný J., Gonddek H.: *Numerical Study for Determining the Strength Limits of a Powered Longwall Support*. Processes 2022, 10, 527.

mgr inż. Konrad TRZOP
Polska Grupa Górnicza S.A.
Oddział KWK Ruda Ruch Bielszowice
ul. Halembaska 160, 41-711 Ruda Śląska
konrad.trzop.kt@gmail.com