

Bezpieczeństwo eksploatacji ścian zawałowych w świetle danych z systemów monitoringu

Sylwester Rajwa
Zbigniew Lubosik
Marek Płonka

Safety of longwall mining with caving in the light of data from monitoring system

Streszczenie:

Obudowy zmechanizowane zwykle postrzega się jako urządzenia składające się głównie z części mechanicznej i hydraulicznej, natomiast pozostałe wyposażenie, głównie związane z elektroniką, traktowana jest często jako konieczne uzupełnienie systemu, zapewniające możliwość jego sterowania. Jednak rozwinięcie funkcjonalności związanych ściśle z najnowszą elektroniczną częścią wyposażenia kompleksów wydobywczych, głównie o możliwości pomiarowe i rejestracyjne, pozwala również na coraz częstsze stosowanie różnego rodzaju monitoringu, umożliwiającego obserwację pracy kompleksu wydobywczego w czasie rzeczywistym lub z niewielkim opóźnieniem czasowym, także sygnalizację stanów zagrożeń lub nieprawidłowości. Najbardziej zaawansowane systemy wyposażane są w funkcje analizujące zmiany monitorowanych parametrów, dla wypracowania ostrzeżeń o możliwych przyszłych zagrożeniach, by z wystarczającym wyprzedzeniem czasowym umożliwić reakcję operatora. Stworzenie takiego systemu predykcji wymaga zgromadzenia, a następnie przeanalizowania odpowiednio dużej i kompletnej bazy pomiarów i obserwacji, związanych przede wszystkim z różnymi utrudnieniami w prowadzeniu obudowy zmechanizowanej, a szczególnie z wydarzeniami stricte awaryjnymi, takimi jak np. obwały, stany zaciśnięcia sekcji itp. Odpowiednio opracowane zależności i wyniki analiz mogą optymalizować bezpieczeństwo pracy załogi, ograniczyć trudności w utrzymaniu stropu wyrobisk ścianowych i co za tym następuje pozytywnie wpłynąć na uzyskiwane wyniki ekonomiczne.

Słowa kluczowe: górnictwo, obudowa zmechanizowana, monitoring, podporność

Keywords: mining, shield support, monitoring, load bearing capacity

Abstract:

Shield supports are usually perceived as devices consisting mainly of mechanical and hydraulic parts, while other apparatus, mainly related to electronics, is often treated as a necessary supplement to the system which ensures its control. However, the development of features closely related to the latest electronic equipment in the mining complexes, mainly connected with measuring and registration possibilities, also allows for more and more frequent use of various types of monitoring. It enables observation of the operation of the mining complex in real time or with a slight time delay. What is more, it also enables signalling the operating states of the shield constituting specific threats or irregularities. The most advanced systems found abroad are equipped with functions analysing changes in specific monitored parameters to develop warnings about possible future threats to allow the operator to react with sufficient time in advance. Developing such a forecast system requires gathering and then analysing a sufficiently large and complete database of measurements and observations. These are primarily associated with various difficulties in operating a shield support, and especially with strictly emergency states, such as rock slides, shield clamping conditions, etc. The data from monitoring of shield support operation, through proper development of dependencies and analysis results, can optimize the safety of crew, reduce difficulties in maintaining the roof of longwall excavations and thus have a positive impact on the obtained economic results.

1. Wprowadzenie

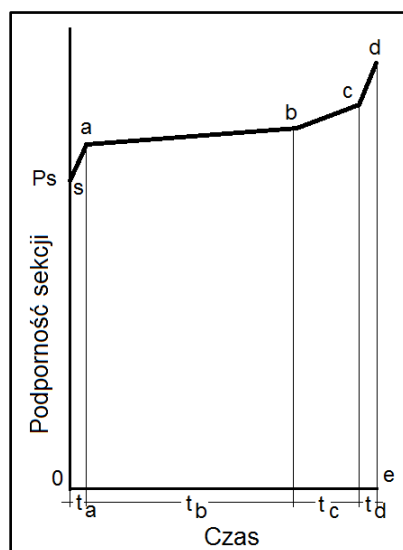
Zadaniem obudowy zmechanizowanej, określając w skrócie, jest jej współpraca ze stropem na skutek rozwijania odpowiedniej podporności i wpływ na utrzymywanie właściwej stateczności wyrobiska. Czynniki te są równocześnie zależne od konkretnych warunków geologiczno-górnictwowych charakteryzujących dane pole eksploatacyjne. Dobór konkretnego

typu obudowy zmechanizowanej wykonywany jest na ogół wcześniej, drogą wyliczeń analitycznych. W Polsce np. najczęściej stosowana jest w tym celu metoda obliczeniowa na podstawie teorii ugięcia warstw stropowych, opracowana przez A. Bilińskiego [1], nadal rozwijana w GIG (wyznaczanie wskaźnika nośności stropu „g”).

Każde obliczenia analityczne doboru obudowy zmierza zawsze do obliczenia konkretnej wartości podporności obudowy wynikającej z jej parametrów konstrukcyjnych oraz przyjęcia gabarytów wyrobiska, mającego zasadniczy wpływ na wartość obciążenia górotworu. Aż do pojawienia się systemów skutecznego monitorowania parametrów pracy obudowy zmechanizowanej nie było równocześnie możliwości weryfikowania tych założeń z warunkami rzeczywistej eksploatacji. Realizowano jedynie wybrane wrywkowe pomiary kontrolne, które przeprowadzano sporadycznie, o skromnym zwykle zakresie, podczas okazyjnych akcji pomiarowych. Dopiero od kiedy elektroniczne pomiary parametrów procesu mogły być wykonywane przy okresie czasu rzędu sekund oraz dotyczyć wszystkich lub większości sekcji, można mówić o skutecznej obserwacji pracy zestawu obudowy zmechanizowanej.

Pomiary ciśnienia medium w przestrzeniach podtłokowych stojaków sekcji obudów zmechanizowanych względem czasu są obecnie głównym źródłem informacji określających rozwijaną podporność obudowy. Dla dokładnego wyznaczenia podporności sekcji niezbędne jest jeszcze wprowadzić określenie jej chwilowej geometrii, niemniej w praktyce jest ono bardzo rzadko realizowane ze względu na koszty i komplikacje techniczne związane z tym pomiarem. Koniecznym dla zrozumienia sposobu pracy obudowy jest przedstawienie cyklu pracy sekcji obudowy zmechanizowanej.

Najczęściej pomiary dotyczące ciśnienia w podtłokowych częściach stojaków i ich przebiegi odnosi się do wzorcowego przebiegu ciśnienia przedstawionego na rysunku 1.



Rys. 1. Przebieg zmian ciśnienia w stojakach podczas cyklu obudowy [2]

Odcinek $0 - s$ odpowiada okresowi rozparcia sekcji, po czym następuje wzrost podporności na odcinku $s - a$ powodowany wzrostem obciążenia na skutek rabowania sąsiedniej sekcji. Następnie rozpoczyna się dość stabilny i długi okres wzrostu ciśnienia górotworu na odcinku $a - b$. Odcinek $b - c$ przedstawia wpływ wzrastającego obciążenia, na skutek urabiania calizny

węglowej na wysokość sekcji, tym samym wzrostu rozpiętości wyrobiska. Natomiast szybko wzrastający odcinek *c - d* ukazuje wzrost ciśnienia związany z rabowaniem sąsiedniej sekcji. Odcinek *d - e* przedstawia gwałtowny spadek ciśnienia podczas rabowania.

W praktyce górniczej szybkości zmian, wartości ciśnień, czasy poszczególnych odcinków mogą podlegać dużym wahaniom, zależnym od wielu czynników natury geologicznej, górniczej i technicznej. Wg posiadanych dotychczasowych doświadczeń pomiarowych, wartości dla skrajnych punktów odcinka *s - a* są trudne do jednoznacznej identyfikacji/uzyskania, ze względu na bardzo zmienny kształt przebiegów ciśnienia podczas rozpierania sekcji w naszych kopalniach - na ogół ze względu na zbyt niskie ciśnienia rozpierania (niską podporność wstępną), spotykane najczęściej w przypadkach ręcznego rozpierania sekcji w ścianach kombajnowych. Natomiast w przypadkach ścian strugowych obudowa zmechanizowana prowadzona jest najczęściej automatycznie, a stosowane algorytmy przesuwania sekcji nie wymagają zawsze sekwencyjnego, kolejnego przesuwania sekcji, w związku z czym określone odcinki mogą podlegać zmianom w stosunku do prezentowanego, wzorcowego cyklu obudowy w ścianach kombajnowych.

Przedstawiony wzorcowy przebieg może być ponadto zmieniany i uzupełniany takimi zjawiskami jak np. okresami zadziałania zaworów roboczych rozpoczynanymi spadkami ciśnienia od poziomu maksymalnego (kolejne odcinki zmian zbliżone do „kształtu zębów piły”) lub szybkimi wzrostami ciśnienia na skutek dociążeń (zjawisk dynamicznych) ze strony górotworu, rozpoczynanymi nagłymi wzrostami ciśnienia. W przypadkach pojedynczych zjawisk np. łamania się warstw skalnych, zmiany odpowiadających im kształtów zmian ciśnienia będą miały też charakter jednorazowy, nieokresowy [3, 4].

Podstawową funkcją zaawansowanego systemu monitoringu jest więc możliwość zastosowania algorytmu skutecznej identyfikacji wszystkich cykli pracy sekcji (na podstawie zmian ciśnienia – lub np. hipotetycznej sprzętowej sygnalizacji początku i końca cyklu) zgodnie z przedstawionym schematem cyklu obudowy, oraz możliwych opisanych uzupełniających go zmian i modyfikacji. Na podstawie określonych na jego podstawie parametrów cykli (czasu i wartości) można dopiero budować algorytmy automatycznego rozpoznawania stanów awaryjnych i zagrożeń (przy przyjęciu odpowiednich wartości granicznych dopuszczalnych zmian). Kolejnym dopiero zagadnieniem, po analizie statystycznej zbiorów (możliwie licznych) takich zdarzeń, i powiązaniu ich z różnymi rodzajami występujących następnie podczas eksploatacji utrudnień, skonstruowanie systemu przewidywania zagrożeń [5, 6].

Systemy wcześniejsze, charakteryzujące się mniejszą częstotliwością pomiarów ciśnienia, są mniej użyteczne dla rozpoznawania zagrożeń, niemniej również można uzyskać na ich podstawie szereg interesujących informacji.

2. Przykład monitorowania zagrożeń z wykorzystaniem systemów o mniejszej częstotliwości wykonywania pomiarów

Ścianę A prowadzono na głębokości od około 440 m do 530 m, gdzie pokład charakteryzował się miąższością brutto od 3,3 do 5,3 m, a jego nachylenie wahało się od 15° do 25°. W stropie pokładu występowała warstwa łupku z węglem o miąższości do 0,3 m, a następnie cienka warstwa węgla oraz ilowca i ilowca zapiaszczonego. Powyżej zalegał pakiet warstw mułowcowo-piaskowcowych o grubości (7 ÷ 17) m.

Spąg pokładu stanowiła warstwa łupku z węglem oraz zalegającego poniżej iłowca. Niemniej jednak, z uwagi na dużą zmienność miąższości pokładu na wybiegu ściany prowadzono ją po spodku węglowym.

Wytrzymałość na ściskanie (R_c), zarówno węgla w pokładzie, jak i skał otaczających pokład cechowała znaczna zmienność.

Wytrzymałości na ściskanie R_c węgla pokładu oraz skał otaczających zawierały się w zakresach:

- węgiel pokładu (7,1 ÷ 10,0) MPa,
- strop pokładu
 - badania laboratoryjne (37,1 ÷ 56,8) MPa,
 - badania polowe (0,0 ÷ 65,4) MPa,
- spąg pokładu (22,8 ÷ 31,4) MPa.

W analizowanym polu ścianowym spodziewano się zaburzeń w zaleganiu pokładu i skał otaczających, posiadających charakter zarówno sedymentacyjny jak i tektoniczny, powodujących zmiany miąższości pokładu oraz zmiany stateczności skał stropowych. Utrudnienia w utrzymaniu stropu występowały także lokalnie, co wiązało się z zaleganiem w stropie bezpośrednim cienkiej warstwy skał skłonnej do opadania po odsłonięciu. Stwierdzono ponadto, że powyżej pokładu prowadzono liczne eksploatacje, które także miały istotny wpływ na warunki stropowe.

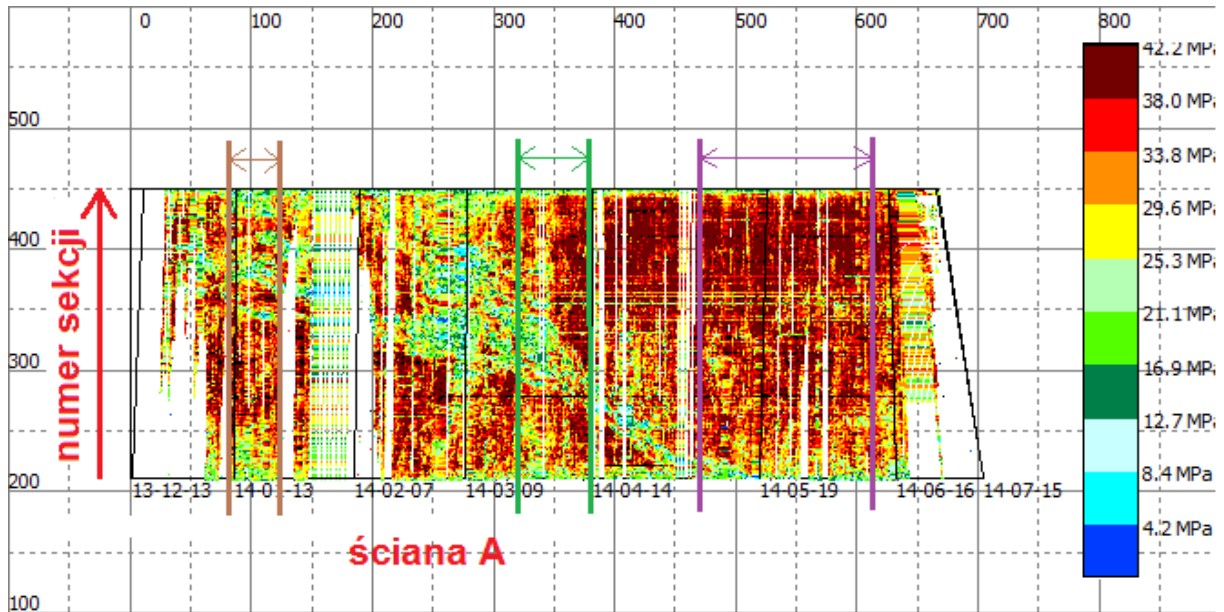
Ściana A prowadzona była systemem podłużnym z zawałem skał stropowych, na wybiegu około 670 m. Długość ściany wynosiła do 250 m.

W ścianie A kopalnia zastosowała sekcje obudowy zmechanizowanej o wysokości roboczej do 4,4 m. Obudowa ta stanowiła konstrukcję podporowo-osłonową opartą o czworobok przegubowy z lemniskatowym układem stabilizacji stropnicy.

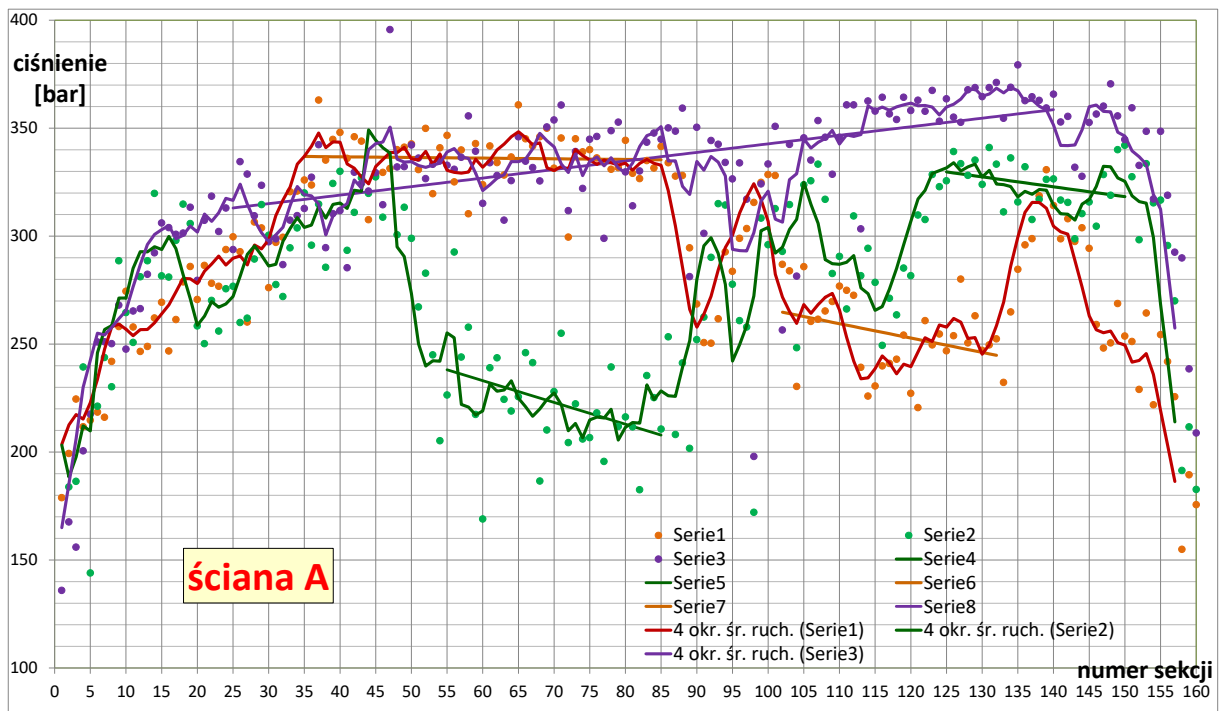
System pomiarowy umożliwiał wykonywanie pomiarów ciśnienia z dokładnością do 1 MPa z częstotliwością 1 minuty w każdym ze stojaków wszystkich sekcji obudowy zmechanizowanej. Podczas rabowania sekcji pomiarów nie wykonywano. Parametry układu pozwalały więc na prowadzenie pomiarów ciśnienia w przestrzeniach podtłokowych stojaków w warunkach w zasadzie wyłącznie statycznych. Pomiarów ciśnienia objęły zakresem ilościowym 160 sekcji podczas 208 dni pomiarowych.

Zmierzone wartości ciśnień w przestrzeniach podtłokowych stojaków odniesiono do obszaru pola ściany, co przedstawiono na rysunku 2. Na wykresie pojedynczy barwny punkt swoim rozmiarem odpowiada szerokości sekcji na długości wybiegu 1 m. Do lokalizacji położenia sekcji posłużono się danymi z uśrednionych postępów miesięcznych na mapach kopalnianych.

W miejscach wystąpienia maksymalnych ciśnień można było spodziewać się maksymalnych obciążeń ze strony górotworu podczas eksploatacji (którym poddana została obudowa zmechanizowana), pod warunkiem zachowania takiej samej wysokości pracy sekcji i rozmiaru wyrobiska. Zmienność ciśnień w polu ścianowym ilustrują rysunki 2 i 3.



Rys. 2. Wartości maksymalne ciśnień w polu ściany A z wyznaczonymi fragmentami wybiegu



Rys. 3. Uśrednione wartości maksymalne ciśnień na długości ściany A na wyznaczonych fragmentach wybiegu

Dla trzech fragmentów wybiegu ściany A, na których zaobserwowano istotną zmienność ciśnień na długości ściany, zaznaczonych i ograniczonych na rysunku 2 liniami w kolorach: brązowym, zielonym i fioletowym, wyliczono średnie ciśnienie dla każdej sekcji i przedstawiono na rysunku 3 w postaci barwnych punktów. Krzywymi w tych samych barwach wykreślono średnie ruchome obliczane dla czterech sąsiadujących sekcji. Natomiast krótszymi odcinkami, określonymi z obliczeń regresji liniowej, zaznaczono dodatkowo fragmenty długości ściany charakterystyczne ze względu na poziomy ciśnien.

Dla „brązowego” fragmentu wybiegu, średnia zmienność poziomów zmierzonych ciśnień pomiędzy grupami sekcji $35 \div 85$ a $102 \div 132$ osiąga około 81 bar (odpowiednio 336 bar i 255 bar), natomiast dla „zielonego” fragmentu wybiegu, średnia zmienność poziomów zmierzonych ciśnień pomiędzy grupami sekcji $55 \div 85$ a $125 \div 150$ osiąga około 101 bar (odpowiednio 223 bar i 324 bar). Na fioletowym fragmencie wybiegu, w grupie sekcji $25 \div 140$ przeciętne ciśnienie wzrasta praktycznie równomiernie od około 313 bar do 359 bar.

Tak prowadzona analiza podczas monitoringu może umożliwiać wyznaczanie rejonów zmiennych obciążeń górotworu, powodowanych zróżnicowanymi warunkami stropowymi.

Można ponadto zauważyć, że generalnie na końcówkach ściany występują niższe wartości ciśnień w odniesieniu do centralnej części ściany. Zjawisko występowania większych obciążeń w centralnej części ściany jest reprezentowane w wielu teoriach i potwierdzone na drodze pomiarów.

3. Przykłady monitorowania zagrożeń z wykorzystaniem identyfikacji pomiarowych w ścianach kombajnowych

Ściana B prowadzona była z zawałem stropu w pokładzie o głębokości zalegania maksymalnie około 845 m, przy nachyleniu warstw od około 16° do 30° . Nad pokładem zalegały głównie iłowce, lokalnie występowały bezpośrednio w stropie skały mułowcowe lub piaskowce. Spąg stanowił iłowiec.

Według uzyskanych danych (ściana prowadzona była po spodku węglowym), wytrzymałości R_c węgla pokładu oraz skał otaczających, wynosiły:

- węgiel pokładu 14,9 MPa,
- naturalny strop pokładu (21,8 \div 33,8) MPa,
- spąg (spodek węglowy) 14,9 MPa.

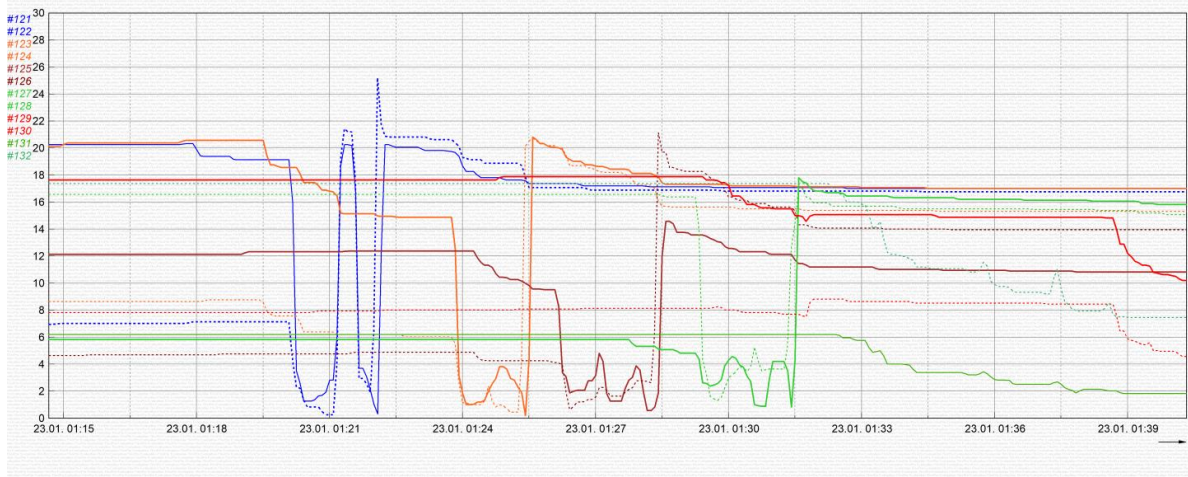
W polu eksploatacyjnym ściany B, w odległości do 160 m nad pokładem oraz poniżej, do głębokości 60 m, jak dotychczas eksploatacji nie prowadzono.

Ścianę B prowadzono z zawałem stropu, z maksymalną wysokością (2,8 \div 3,0) m, w jednostronnym sąsiedztwie zrobów. Wybieg ściany 2 osiągnął około 470 m, a jej długość wynosiła około (190 \div 210) m.

W ścianie B zastosowano obudowę zmechanizowaną o wysokości roboczej do 4,5 m.

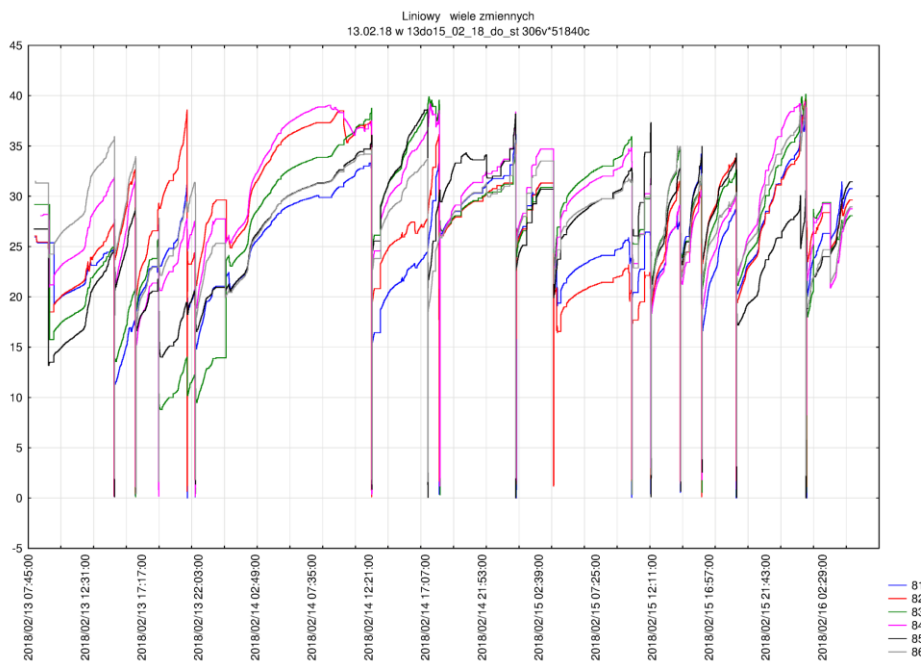
System pomiarowy umożliwiał wykonywanie pomiarów ciśnienia z dokładnością do 1 MPa z częstością do 5 s w każdym ze stojaków wszystkich sekcji obudowy zmechanizowanej. Pomiar ciśnienia objęły zakresem ilościowym 135 sekcji. Parametry systemu pomiarowego umożliwiały już śledzenie cykli obudowy z większą częstotliwością (co 5 s), jednak nadal niezidentyfikowane mogły być zdarzenia przebiegające krócej, trwające poniżej 5 sekund.

Zarejestrowano podczas rozruchu i na początku biegu ściany przebiegi wskazujące na obniżanie się ciśnienia po rozparciu sekcji, jak na rysunku 4, występowały także opady warstw stropowych.



Rys. 4. Przykładowe przebiegi obniżających się ciśnień w ścianie B (źródło FAMUR)

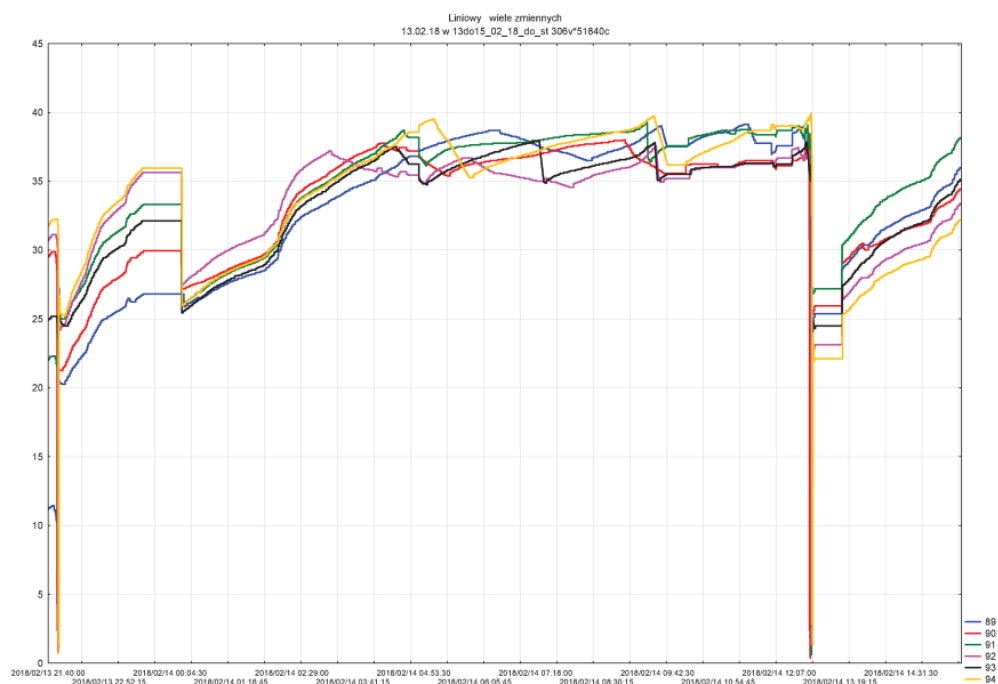
Został przeprowadzony zjazd pracowników do wyrobiska ściany B celem oceny sytuacji, przeprowadzono kolejne analizy związane z następnymi przebiegami ciśnień. Przyczynami trudności okazały się komplikacje związane z niedokończonym rozruchem ściany oraz występujące niestaranności podczas rozpierania sekcji. Na dalszych fragmentach wybiegu ściany oraz przy starannym prowadzeniu przekładki i rozpierania sekcji cykle obudowy uzyskały poprawną postać, jak przedstawiono to na rysunku 5.



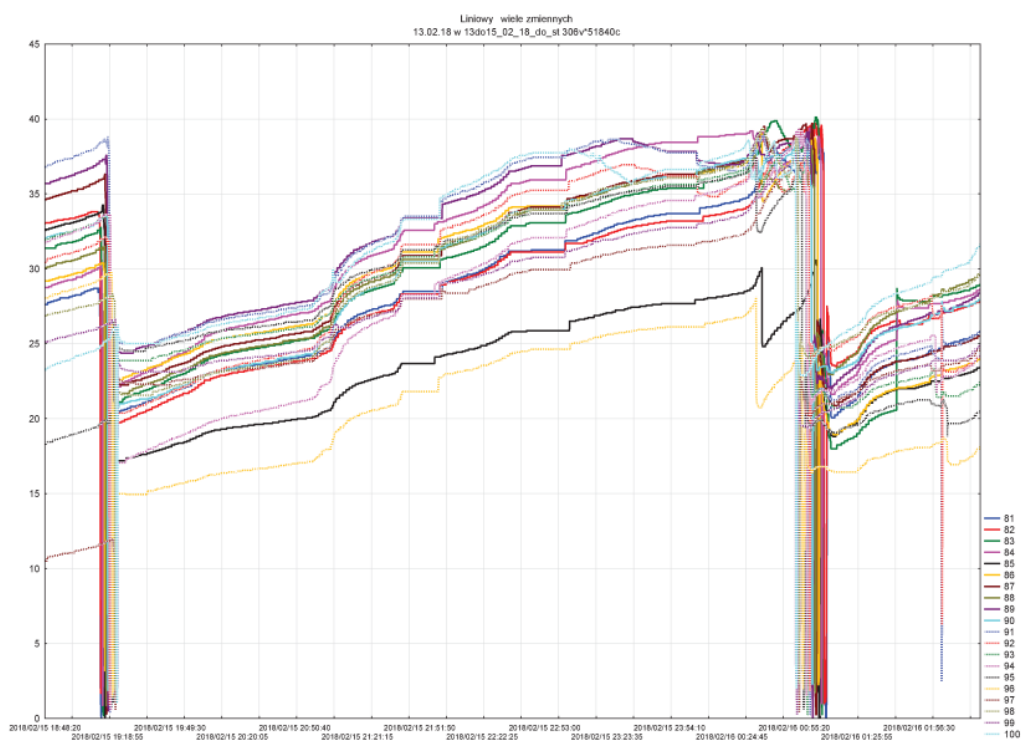
Rys. 5. Przykładowe poprawne przebiegi ciśnień w ścianie B po fazie rozruchu ściany

Podczas obserwacji ciśnień w stojakach sekcji można było lokalnie zauważyć okresy zadziałania zaworów roboczych wynikające z warunków stropowych, co przedstawiono na rysunku 6, w postaci przebiegów ciśnienia o kształcie „piły”, przed rabowaniem. Innym identyfikowanym zjawiskiem były grupy sekcji z rosnącym lub zmniejszającym się kolejno ciśnieniem. Prawdopodobną przyczyną sekwencyjnych zmian ciśnienia były różnice

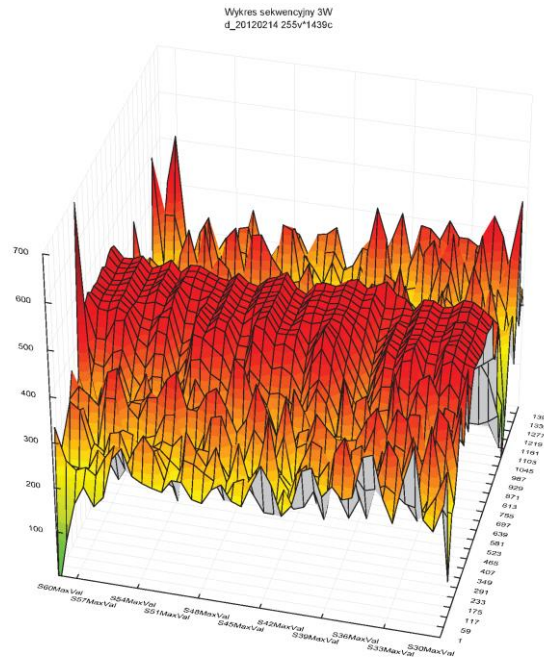
obciążenia łamiących się warstw piaskowców w stropie bezpośrednim, jak pokazano na rysunku 7.



Rys. 6. Przykładowe przebiegi ciśnień podczas działania zaworów roboczych w ścianie B



Rys. 7. Przykładowe przebiegi zmniejszających się sekwencyjnie ciśnień w ścianie B



Rys. 10. Wykres przestrzenny ciśnienia w ścianie D

Zauważyć można nie tylko znacznie bardziej równomierny rozkład ciśnienia pomiędzy sąsiednimi sekcjami, ale także zdecydowanie wyższy generalnie poziom ciśnień. Różnice ciśnień w niewielkim stopniu można tłumaczyć nieco innymi warunkami wytrzymałościowymi i parametrami stosowanych typów obudowy, niemniej trudno je było dokładnie oszacować ze względu na brak wyraźnie udokumentowanych danych związanych m. in. z chwilową wysokością eksploatacji w obu ścianach. Wydaje się jednak, że główną przyczyną utrudnień w ścianie C było bardzo duże zróżnicowanie utrzymywanych ciśnień (a tym samym podporności) pomiędzy sąsiadującymi sekcjami, przy przeciętnie dość niskim ich średnim poziomie liczonym wzdłuż długości ściany.

5. Podsumowanie

Na podstawie przedstawionych przykładów i analiz można sformułować następujące uwagi:

1. Zakres sygnalizacji możliwych utrudnień związany jest ściśle z możliwościami technicznymi i stosowanym oprogramowaniem systemu monitoringu.
2. Jednak każdy stosowany poprawnie system monitoringu dostarczyć może cennych informacji na temat prowadzonego procesu wydobywczego.
3. Za pomocą zwykłych obserwacji poziomów mierzonych ciśnień można wyeliminować łatwo podstawowe trudności związane z np. niedostatecznym rozparciem sekcji przy przekładce sekcji lub brakiem szczelności stojaków.
4. Sygnalizacja stanów pracy o większym poziomie złożoności wymaga już określenia zestawu wartości granicznych dla mierzonych parametrów, potrzebnych do zainicjowania konkretnych ostrzeżeń. Odpowiedzialne ich wyznaczenie wymaga zgromadzenia odpowiedniej bazy danych pomiarowych i obserwacyjnych oraz przeprowadzenie odpowiedniej analizy zmierzającej do ich identyfikacji.
5. Można zaobserwować naturalną chęć nie dzielenia się wiedzą o swoich trudnościach, występujących w czasie eksploatacji ścianowej, niemniej w ten sposób ograniczamy

wyraźnie zakres analizy takich stanów. Czy możliwym jest jednak osiągnięcie innego sposobu myślenia i postępowania, by wiedza na temat możliwych do sygnalizowania zagrożeń stała się wartością dominującą?

6. Monitoring obudowy zmechanizowanej oraz właściwa analiza danych dostarczyć mogą wiele pożytecznych informacji poprawiających bezpieczeństwo pracy oraz efektywność procesu wydobywczego.

Podziękowania

W artykule wykorzystano wyniki prac wykonanych w ramach realizacji pracy statutowej finansowanej przez MNiSW: „Opracowanie zestawu metod i wskaźników obliczeniowych służących do oceny jakości i poprawności pracy obudowy zmechanizowanej w ścianie, na podstawie wskazań systemów monitoringu” (Symbol komputerowy pracy w GIG nr 11122018 - 152).

Literatura

- [1] Biliński A.: Metoda doboru obudowy ścianowych wyrobisk wybierkowych i chodnikowych do warunków pola eksploatacyjnego. CMG KOMAG 2005, Gliwice.
- [2] Peng S. S.: Longwall Mining. Syd S. Peng publisher, 2006, pp. 183-190.
- [3] Płonka M. + Zespół (11): Rozkład obciążenia obudowy zmechanizowanej w ścianie zawałowej i jego powiązania z prognozą utrzymania stropu. Dokumentacja z realizacji projektu badawczego własnego, dokumentacja GIG nr 04040316-152, niepublikowana, 2009r.
- [4] Płonka M. + Zespół (11): Charakterystyka podporności obudowy zmechanizowanej w niskiej ścianie kombajnowej w porównaniu do ściany strugowej, Praca statutowa GIG o symbolu: 11130122-152, niepublikowana, 2012 r.
- [5] Płonka M., Rajwa S.: Assessment of Powered Support Loadings in Plow and Shearer Longwalls in Regard to the Pressure Measurements in Props. International Mining Forum 2011. 24-26 November 2011 – Bogdanka, Poland. A Balkema Book. CRC Press, © 2011 Taylor & Francis Group, London, UK, pp. 221-232.
- [6] Płonka M., Rajwa S., Lubosik Z.: Ocena pracy obudowy zmechanizowanej na podstawie danych z systemów monitoringu i postępu sekcji. Przegląd Górniczy 2017, nr 4, s. 25÷33.

*Niniejsza praca jest przedrukiem artykułu, który ukazał się w języku angielskim, w **Materialach konferencyjnych IMTech – Innovative Mining Technologies***

(<https://iopscience.iop.org/issue/1757-899X/679/1>)

*dr inż. Sylwester Rajwa
srajwa@gig.eu*

*dr inż. Zbigniew Lubosik
zlubosik@gig.eu*

*dr inż. Marek Płonka
mponka@gig.eu*

*Główny Instytut Górnictwa
Pl. Gwarków 1, 40-166 Katowice*