

Systemy wspomagające pracę kopalni odkrywkowej na przykładzie kopalni Sierra Gorda w Chile

Working support systems for surface mining on the example of Sierra Gorda mine in Chile



*Prof. dr hab. inż. Zbigniew Kasztelewicz**



*Dr inż. Maciej Zajęczkowski**



*Mgr inż. Mateusz Sikora**



*Dr inż. Przemysław Bodziony**



*Mgr inż. Krystian Simkiewicz***

Treść: W artykule przedstawiono przykłady systemów wspomagania pracy kopalni odkrywkowej, jakie wdrożono w jednej z najmłodszych i zarazem najnowocześniejszych kopalń rud miedzi w Chile, tj. w kopalni Sierra Gorda, której współwłaścicielem jest KGHM International Ltd. W artykule wybrano najważniejsze z nich z punktu widzenia możliwości zaimplementowania ich w górnictwie odkrywkowym w Polsce.

Abstract: This paper presents the examples of working support systems for surface mines, which have been implemented in one of the youngest and the most modern copper ore mine in Chile – Sierra Gorda co-owned by KGHM International Ltd. The most important systems have been presented from the point of view of the possibility of their implementation in Polish surface mines.

Słowa kluczowe:

górnictwo odkrywkowe rud miedzi, Sierra Gorda, automatyka w górnictwie, systemy dyspozytorskie, inteligentna kopalnia

Key words:

copper ore surface mining, Sierra Gorda, automatics in mining, dispatch systems, intelligent mine

*¹) AGH w Krakowie **²) Sierra Gorda SCM KGHM International

1. Wprowadzenie

Nowoczesna kopalnia odkrywkowa nie może istnieć bez wielu rozwiązań wspomagających jej zarządzanie. Systemy dyspozytorskie, systemy monitoringu maszyn czy systemy wsparcia operatorów to codzienność w zakładzie górniczym, dla którego bezpieczeństwo pracy oraz efektywna eksploatacja stanowią cele nadrzędne. Systemy te stosowane są obecnie głównie w dużych kopalniach odkrywkowych rud, jednak wraz z upływem czasu będą zapewne wdrażane w mniejszych kopalniach [2].

Kopalnia Sierra Gorda w Chile, jako jedna z najmłodszych kopalń odkrywkowych rud miedzi, jest przykładem na to, że nowoczesna inwestycja górnicza nie może funkcjonować bez zaawansowanych systemów wsparcia procesów wydobywczych na każdym etapie. Począwszy od budowy trójwymiarowego modelu złoża, wyrobiska odkrywkowego, poprzez planowanie i monitorowanie robót wiertniczo-strzałowych, pozycjonowanie i monitorowanie maszyn podstawowych, ich wskaźników produkcyjnych, stanu technicznego czy poprawy bezpieczeństwa pracy. W artykule przedstawiono wybrane systemy, które mogą znaleźć zastosowanie w polskich kopalniach odkrywkowych.

2. Technologia eksploatacji i układ maszynowy w kopalni Sierra Gorda

Kopalnia Sierra Gorda obecnie jest jedną z najmłodszych i najnowocześniejszych kopalń odkrywkowych rud miedzi w północnej części Chile. Złoże zostało udokumentowane w 2006 r., a pierwsze roboty udostępniające rozpoczęto w 2012 r. Obecnie kopalnia ta jest własnością KGHM International Ltd oraz Sumitomo Metal Mining i Sumitomo Corporation [4].

Proces wydobywczy polega na zastosowaniu technologii cyklicznej, a więc urabianiu za pomocą techniki strzałniczej, ładowaniu urobku po odstrzale za pomocą koparek nadsiębiernych i ładowarek kołowych oraz transporcie za pomocą wozideł sztywnoramowych.

Skala wydobycia, wynosząca około 200 mln Mg urobione go materiału rocznie wymaga zastosowania jednych z największych maszyn tego typu. Obecnie kopalnia ma 5 koparek nadsiębiernych o pojemności 55 m³, 53 sztywnoramowe wozidła

Komatsu 930E-4 o ładowności 300 ton oraz 2 największe na świecie ładowarki LeTourneau LT 2350 o objętości łożki 40 m³. Oprócz tego w kopalni wykorzystuje się maszyny pomocnicze, takie jak spycharki gąsienicowe i kołowe, równiarki oraz wozy do polewania dróg technologicznych.

Podstawowy układ wydobywczy w kopalni Sierra Gorda pokazano na rys. 1.

Efektywne zarządzanie tak dużym parkiem maszynowym przy uwzględnieniu, że proces produkcji koncentratu miedziowego wymaga ścisłej kontroli parametrów jakościowych urobku, jest zadaniem bardzo skomplikowanym.

Urobek klasyfikowany jest jako nadkład lub ruda miedzi (różne rodzaje rudy tlenkowej i siarczkowej) z wyszczególnieniem jej podstawowych cech jakościowych oraz fizykomechanicznych. Punktami załadunku urobku są maszyny ładujące, natomiast jego wyładunek może nastąpić na trzech czynnych zwałowiskach zewnętrznych, czterech składowiskach rudy bądź bezpośrednio do leja zasypowego kruszarki.

3. Wybrane systemy wspomagające pracę kopalni odkrywkowej w kopalni Sierra Gorda

Duża różnorodność litologiczna górotworu wraz z liczbą przodków roboczych i miejsc wyładunku urobku powoduje, że podstawowy proces technologiczny w kopalni przyjmuje bardzo skomplikowaną postać. W celu efektywnego zarządzania tym procesem konieczne jest posiadanie sprawnego systemu dyspozytorskiego, który będzie uwzględniał bieżące warunki pracy w wyrobisku i na zwałowisku.

Poniżej przedstawiono systemy wdrożone w kopalni Sierra Gorda, które przyczyniają się do uzyskiwania wysokiej efektywności wydobycia rudy miedzi oraz stanowią przykład i wskazują kierunek, w którym będzie się rozwijać nowoczesne górnictwo w przyszłości.

3.1. Automatyczny system dyspozytorski

Efektywne zarządzanie dużą liczbą sprzętu technologicznego wymaga odpowiedniego systemu dyspozytorskiego.

Generalnie systemy dyspozytorskie można podzielić na: manualne, półautomatyczne i automatyczne [1].



Rys. 1. Koparka CAT7495 oraz wozidła Komatsu 930E-4 w kopalni Sierra Gorda [fot.: Z. Kasztelewicz]

Fig. 1. CAT7495 shovel excavator and Komatsu 930E-4 haul truck in Sierra Gorda mine

System manualny polega na otrzymywaniu przez operatorów maszyn górniczych dyspozycji pracy bezpośrednio od dyspozytora ruchu. Dyspozytor ten podejmuje decyzje na podstawie własnego osądu sytuacji, bez wspomagania systemów komputerowych. System taki ma ograniczoną skuteczność i może być stosowany w małych kopalniach, gdzie liczba pracujących maszyn nie przekracza około 10 sztuk.

W przypadku systemu półautomatycznego wszystkie decyzje również podejmuje dyspozytor, ale jest on już wspomagany przez odpowiednie systemy komputerowe, zaprogramowane tak, aby dostarczały dyspozytorowi niezbędnych informacji do dokonywania trafnych decyzji. Taki system umożliwia już zintegrowane raportowanie, przetwarzanie i archiwizowanie danych, które mogą być wykorzystywane do dokonywania bieżących analiz efektywności prowadzonego procesu produkcyjnego i znajduje zastosowanie głównie dla średnich kopalń.

W systemie automatycznym decyzje wydawane są na podstawie specjalnie opracowanych algorytmów, które kierują je bezpośrednio do koparek i wozideł, a polecenia wyświetlają się w kabinach operatorów maszyn. Zadaniem dyspozytora jest tylko monitorowanie całości operacji bądź dokonywanie zmian w wytycznych produkcyjnych, w zależności od zmieniających się warunków pracy na kopalni.

Automatyczny system sam dokonuje wyboru, które wozidło powinno zostać załadowane przez daną koparkę oraz jaki powinien być punkt przeznaczenia tego urobku. Wykonuje się przy tym optymalizację czasów cykli z uwzględnieniem następujących priorytetów:

- minimalizowanie czasów postojów sprzętu technologicznego,
- minimalizowanie liczby sprzętu niezbędnego do wykonania danej czynności,
- maksymalizowanie ilości wydobywania urobku,
- dostosowywanie do wymaganych parametrów jakościowych kopaliny.

Punktem wyjścia dla automatycznego systemu dyspozytorskiego jest wiarygodny model blokowy złoża oraz warstw nadkładowych, który jest aktualizowany zarówno danymi pochodzącymi z otworów rozpoznawczych, jak i z wiertniczych otworów strzałowych. Kolejnym niezbędnym elementem są systemy telemetryczne zainstalowane na każdej maszynie pracującej w wyrobisku, na składowiskach i zwałowiskach.

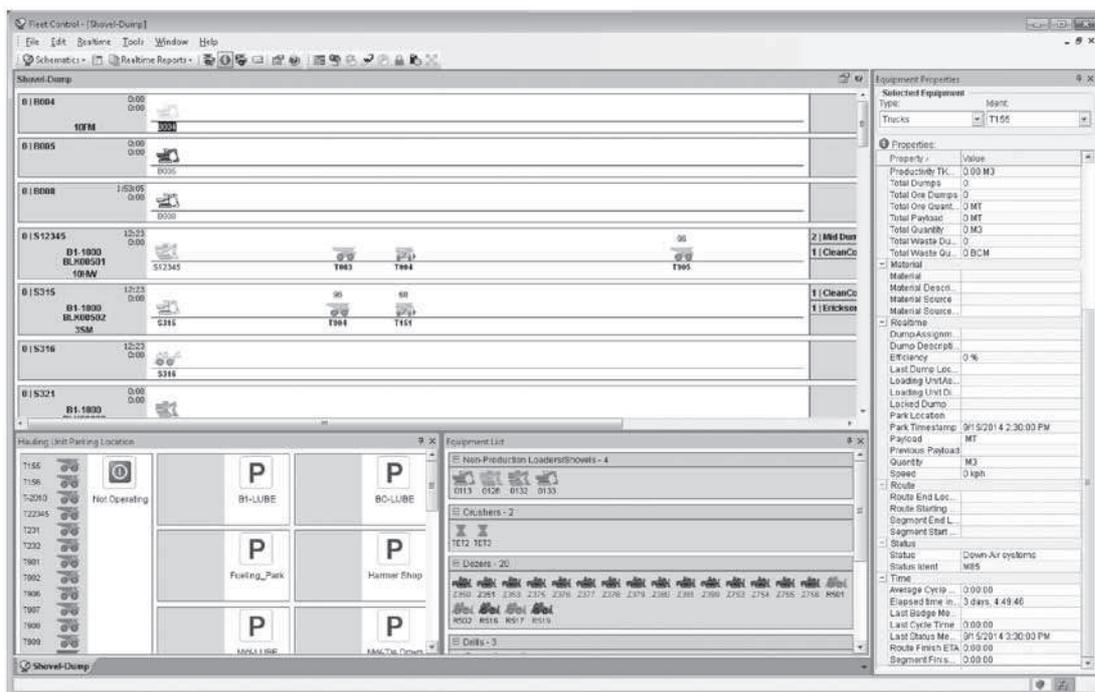
Systemy te, oprócz określania bieżącej pozycji danej koparki czy wozidła, monitorują stan techniczny tych maszyn, co z kolei stanowi dane wejściowe dla automatycznego systemu dyspozytorskiego. Ostatnim elementem jest trójwymiarowy model wyrobiska wraz z określeniem dróg, po których mogą poruszać się wozidła. Drogi te dzielone są na elementarne odcinki charakteryzujące różne ich parametry, np. drogi na pochylni, skrzyżowania, itp. W przypadku awarii jednej z koparek system automatycznie przekieruje współpracującą z nią wozidła do pracy z inną koparką lub do miejsca parkowania.

Od 2012 r. w kopalni Sierra Gorda z powodzeniem pracuje automatyczny system dyspozytorski firmy Wenco International Mining Systems Inc®.

Do największych zalet tego systemu należy zaliczyć:

- wizualizację bieżącej pozycji każdej maszyny technologicznej (koparek, ładowarek, wozideł, spycharek, równiarek oraz wozów do polewania dróg),
- bezpośrednie przekazywanie poleceń do operatorów maszyn z uwzględnieniem bieżącej sytuacji na kopalni,
- możliwość uwzględniania nowych dróg transportowych lub dodawanie objazdów,
- motywowanie operatorów poprzez stałą kontrolę osiągniętych przez nich wskaźników produkcyjnych,
- monitorowanie na bieżąco stanu technicznego maszyn,
- raportowanie i analizowanie bieżących wydajności wszystkich maszyn,
- możliwość komunikacji dyspozytora z operatorami poprzez wiadomości tekstowe wyświetlane w kabinie operatorów,
- aktualizacja danych między tymi zebranymi na maszynach a tymi w systemie dyspozytorskim,
- analizowanie danych historycznych w celu predykcji pewnych sytuacji i wyciągania wniosków na przyszłość,
- aktualizowanie harmonogramów wydobywania z uwzględnieniem bieżących warunków eksploatacyjnych sprzętu, osiągniętych czasów lub odgórnych manualnych preferencji,
- możliwość przeprowadzania szeregu symulacji w procesie wydobywczym w tle bez zmiany bieżącej operacji,
- możliwość odtworzenia wszystkich czynności wykonywanych w przeszłości [7].

Na rysunku 2 pokazano widok panelu dyspozytorskiego z programu Wenco Fleet Control®



Rys. 2. Zrzut ekranu programu Wenco Fleet Control® [7]

Fig. 2. Printscreen of Wenco Fleet Control® system

3.2. System wsparcia pracy operatora koparki

Osiągnięcie dużej wydajności pracy maszyn urabiających zależy przede wszystkim od operatorów tych maszyn. W tym celu w kopalni zainstalowano również specjalny system wsparcia pracy operatora koparki, który umożliwi mu bieżącą kontrolę wykonywanych czynności wraz ze wskazaniem dokonywania niezbędnych korekt.

Odbywa się to poprzez wizualizację położenia maszyny, jej wysięgnika oraz samej łyżki. Ponadto wskazywana jest odległość do zaplanowanych docelowych granic zabierki, rodzaju urabianego urobku (informacja z modelu blokowego) itp. Dzięki zastosowaniu technologii HPGPS dokładność pomiarów wynosi do kilku centymetrów, dzięki czemu można osiągać zaplanowane przez technologa górniczego granice zabierek.

Wyrobyśka odkrywkowe rud miedzi charakteryzują się bardzo dużymi generalnymi nachyleniami zboczy, sięgającymi $50\div 60^\circ$ oraz znacznymi głębokościami dochodzącymi do 1000 m, co powoduje konieczność precyzyjnego kształtowania

skarp i pól w zboczu w celu zachowania bezpieczeństwa geotechnicznego wyrobiska.

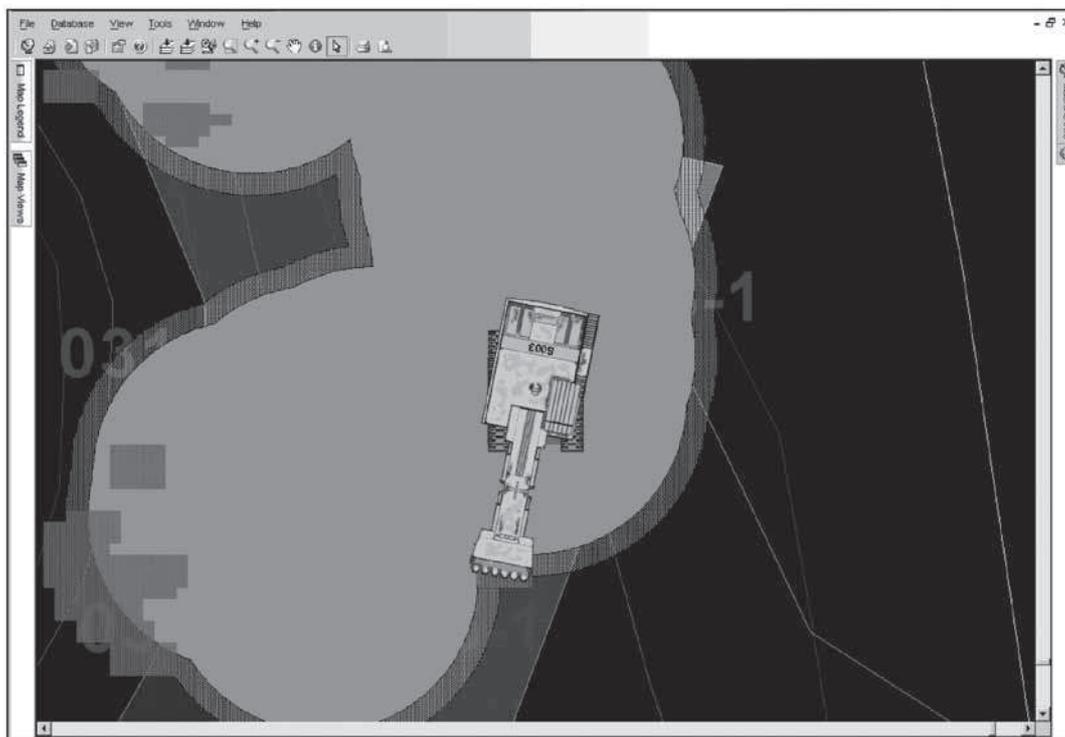
Wysoka precyzja pozycjonowania łyżki umożliwia także dokładne wybieranie urobku w przodku i jego uśrednianie. System ten ułatwia również pracę operatorom w warunkach słabej widoczności.

W kopalni Sierra Gorda w tym celu zainstalowano program Wenco Bench Manager®.

Na rysunku 3 pokazano widok panelu dyspozytorskiego z programu Wenco Bench Manager®.

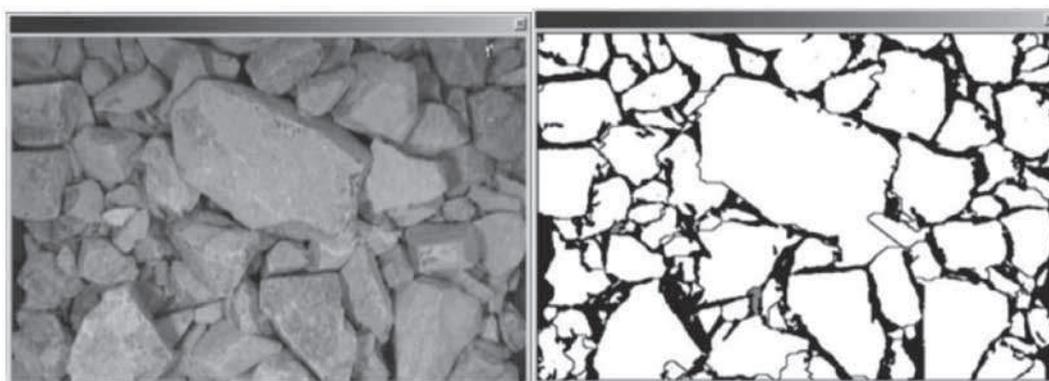
3.3. Stały monitoring stopnia rozdrobnienia urobku

Kopalnia Sierra Gorda przerabia około 110 tys. ton rudy miedzi na dobę. Tak duża wydajność zakładu przerobczego wymaga efektywnego procesu kruszenia nadawy. Jednym z najistotniejszych parametrów decydujących o efektywności pracy tego zakładu jest stopień rozdrobnienia urobku. W celu jego kontroli w kopalni zastosowano System Split Engineering®. Pozwala on analizować jakość odstrzelone-



Rys. 3. Zrzut ekranu programu Wenco Bench Manager® [7]

Fig. 3. Printscreen of Wenco Bench Manager® system



Rys. 4. Widok z kamery systemu Split® zdjęcia przed i po obróbce graficznej [6]

Fig. 4. Camera view of Split® system. Photographs before and after graphics edition

go urobku (pod kątem fragmentacji) w sposób ciągły już na przodku eksploatacyjnym. Kamery służące do tego celu zainstalowane są na kabynie operatora koparki jednonaczyniowej. Wykonują one zdjęcia, które automatycznie poddawane są obróbce przez odpowiedni program. Dane są wysyłane za pomocą sieci internetowej i aktualizowane na bieżąco w bazie danych. Jej efektem jest wykres składu ziarnowego urobku oraz P80 [6].

Na rysunku 4. pokazano widok z kamery systemu Split® przed i po obróbce graficznej.

Wyniki te służą przede wszystkim do identyfikacji brył nadwymiarowych oraz oceny poprawności wykonanych robót strzałowych w całym usypie. Pozwalają także na wyciąganie wniosków i wprowadzanie zmian w technologii urabiania z wykorzystaniem materiałów wybuchowych np. zmiany gęstości siatki otworów, ilości i rodzaju MW w otworze itp. Pozwala to uzyskiwać zakładany stopień rozdrobnienia urobku, a tym samym efektywny załadunek i kruszenie nadawy.

3.4. Monitoring stanu zębów koparek i ładowarek

Wielkość rocznego wydobycia urobku powoduje intensywne zużycie zębów naczyń roboczych koparek nadsiębiernych i ładowarek kołowych. Ich nadmierne zużycie, a szczególnie ich utrata wpływa na znaczne obniżenie wydajności eksploatacyjnej maszyn, a także – w przypadku dostania się zęba do kruszarki, na nieplanowane postoje remontowe w zakładzie przerobczym. W celu monitorowania i szybkiej diagnostyki stanu zębów kopalnia Sierra Gorda zastosowała system ToothMetrics®.

System ten wyposażony jest w kamerę zamocowaną na wysięgniku koparki jednonaczyniowej lub w przedniej części ramy nośnej ładowarki kołowej. Zęby koparki/ładowarki wyposażone są w sensor do śledzenia ich lokalizacji. Po założeniu zębów na łyżkę, system jest kalibrowany za pomocą odpowiedniego programu i kamery oraz wysyła informacje do operatora o jego obecności i od tej chwili monitoruje jego status w czasie rzeczywistym [5].

System wyróżnia trzy statusy zęba (status pracy normalnej, status ostrzegawczy – możliwość utraty zęba, oraz potwierdzenie utraty zęba). Ostatni z nich, oprócz informacji

wizualnej, sygnalizowany jest także sygnałem dźwiękowym. Ponadto określane są: wielkość zębów, stopień zużycia oraz profil zużycia.

Wszystkie informacje przekazywane są w czasie rzeczywistym zarówno do operatora maszyny ładującej, jak do systemu dyspozytorskiego kopalni.

Analiza stopnia zużycia zębów pozwala na precyzyjne wyznaczenie długości życia zęba i dokonywanie planowanych wymian, zapobiegając sytuacji utraty zębów. Jest to bardzo ważne z punktu widzenia pracy kruszarki pierwszego stopnia, gdyż urwany ząb może spowodować jej uszkodzenie i zatrzymanie pracy całego zakładu przerobczego.

Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe widoki z kamery narzędzia ToothMetrics® z trzema stanami pracy zębów koparki.

3.5. Wspomaganie obsługi wiertnic

Aby uzyskać żądaną zdolność wydobywczą, w kopalnia Sierra Gorda wykonuje około 170 do 180 tys. metrów otworów strzałowych na miesiąc. Zadanie to realizowane jest przez 11 wiertnic, które wiercą otwory produkcyjne o średnicy 10 5/8 cala oraz 12 1/4 cala. Aby maksymalnie wykorzystać potencjał maszyn wiertniczych kopalnia wykorzystuje system wspomaganie obsługi wiertnic firmy Flanders®.

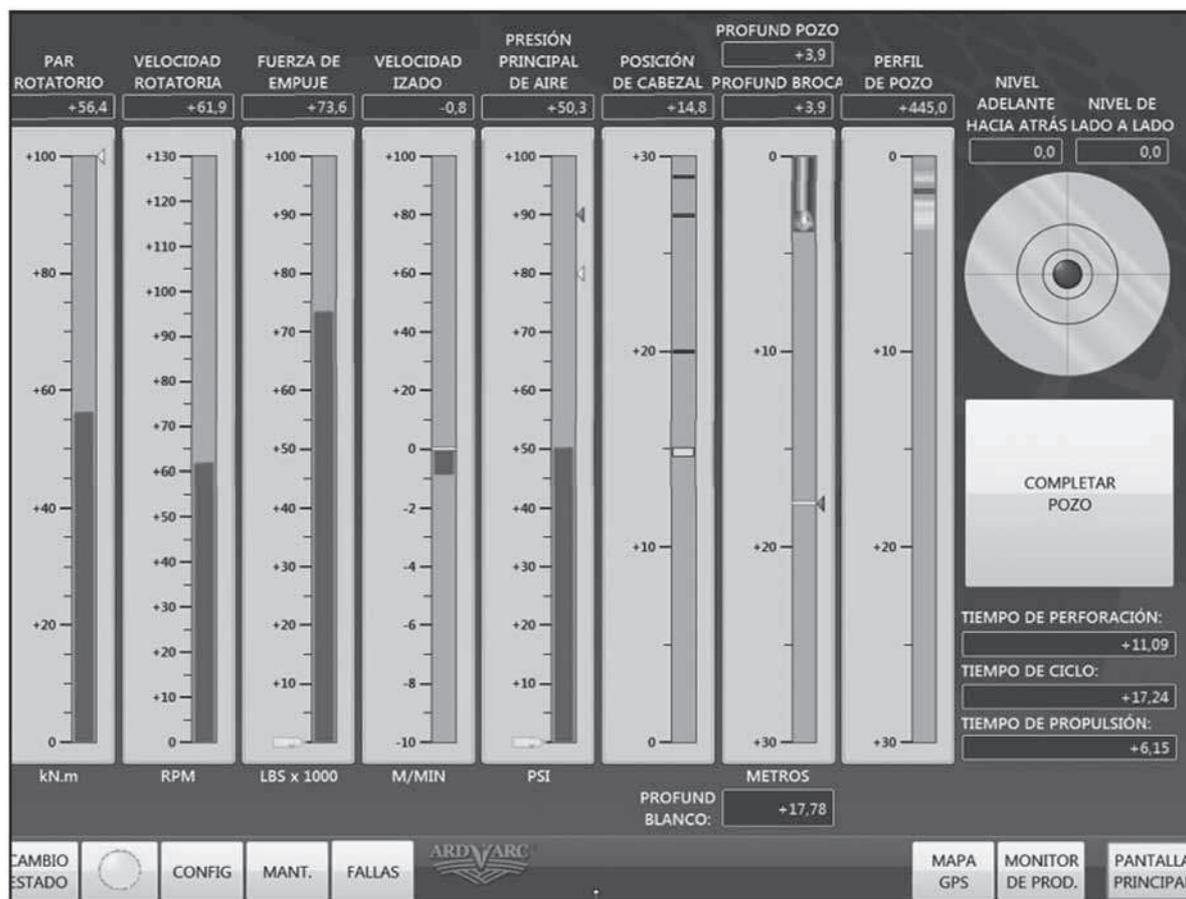
Dzięki temu systemowi wszystkie wiertnice mogą pracować w systemie półautomatycznym, a w niedalekiej przyszłości zakłada się ich pełną automatyzację. System pozycjonuje wiertnicę według zadanej siatki otworów strzałowych w oparciu o cyfrową mapę otworów, pobieraną na bieżąco z bazy danych oraz prowadzi stały monitoring parametrów pracy wiertnicy [3].

Dodatkowo parametry dotyczące postępu wiercenia otworów strzałowych pozwalają na uszczegółowienie danych dotyczących twardości skał i tworzenie map warunków prowadzenia robót strzałowych, które z kolei służą do tworzenia prognoz efektywności odstrzału i uzyskanej fragmentacji urobku.

Na rysunku 6 pokazano zrzut ekranu panelu sterowniczego wiertnicy z programu Flanders®.



Rys. 5 Przykładowe widoki z kamery narzędzia ToothMetrics® z trzema stanami pracy zębów koparki [5]
Fig. 5. Example of ToothMetrics® system camera views which show three operating status of shovel teeth



Rys. 6. Zrzut ekranu panelu sterowniczego wiertnicy z programu Flanders®
Fig. 6. Printscreen of drill rig steering panel of Flanders® system

4. Podsumowanie

Zaprezentowane w artykule systemy wsparcia pracy kopalni odkrywkowej pokazują, jak szybki postęp technologiczny dokonuje się w branży górnictwa odkrywkowego. Wydaje się, że etap bieżącego monitoringu podstawowych parametrów technicznych maszyn wraz z ich telemetrycznym przesyłem do jednostek centralnego zarządzania, a także określanie podstawowych parametrów pracy układu technologicznego, czy też samo pozycjonowanie maszyn stają się codziennością.

Jak pokazuje przykład kopalni Sierra Gorda, kolejnym etapem rozwoju omawianych systemów jest ich całkowita autonomiczność, a więc samodzielne podejmowanie kluczowych decyzji, co do sposobu prowadzenia robót górniczych (np. które wozidło powinno być załadowane przez daną koparkę, aby uzyskać maksymalną efektywność tego procesu), co oznacza pełną automatyzację maszyn górniczych.

Należy jednak pamiętać, że wdrażanie tych systemów automatycznego zarządzania nie może wyeliminować całkowicie człowieka z procesu decyzyjnego. Zmienia się jednak jego rola, z wykonawcy na obserwatora i kontrolera poprawności realizowanych prowadzonych procesów technologicznych na kopalni. Ogranicza się ona do ingerencji w sytuacjach krytycznych, których autonomiczny system nie jest w stanie przewidzieć [8].

Tym samym można stwierdzić, że górnictwo odkrywkowe wchodzi w erę „inteligentnej kopalni”.

Praca zrealizowana w ramach badań statutowych nr 11.11.100.597

Literatura:

1. Design and Implementation of a Semi-automated Truck/Shovel Dispatching SystemY. LIZOTTE*, E. BONA TES* and A. LECLERC**, *Machniak Ł., Borcz A.*: Rola i zastosowanie nowoczesnych systemów dyspozytorskich w odkrywkowych kopalniach surowców skalnych, *Przeгляд Górnicy*, t. 69 nr 12, 2013.
2. <http://www.flandersinc.com/2013/02/flanders-debuts-ardvarc-4-0/> www.kghm.com/
3. <http://kghm.com/pl/biznes/wydobycie-i-wzbogacanie-sx-ew/sierra-gorda>
4. <http://www.motionmetrics.com/shovels/www.spliteng.com>
5. <http://www.spliteng.com/products/split-online-systems/>
6. <http://www.wencomine.com/fleet-management/system/>
7. *Widzyk-Capehart E., McDonald A.*: Rope shovel productivity improvements – site trials experimental design.