

BANERJEE SUMIT

Zwiększenie wydajności kombajnów chodnikowych urabiających liniowo stosowanych w podstawowym systemie eksploatacyjnym w Indiach – podejście oparte na niezawodności

Kombajny chodnikowe urabiające liniowo (CM) to stosowane na całym świecie maszyny, zdolne do wydajnego zwiększenia produkcji w kopalniach podziemnych w systemach filarowo-komorowych; w przyszłości będą one niezbędne do wzrostu produkcji. Jednak czynniki geologiczne i inne parametry górnicze w wielu kopalniach podziemnych nie zawsze pozwalają na osiągnięcie największej produktywności tych maszyn. W artykule przeprowadzono analizę wpływu wybranych parametrów górniczych, takich jak wymiary filaru, nachylenie złoża, liczba pasów i zastosowany sprzęt na wydajność w systemie produkcji opartym na kombajnie typu CM, i opracowano prognozę trendów. Wyniki przeprowadzonych badań umożliwiają określenie skutków awarii kombajnu typu CM i współpracujących z nim urządzeń i maszyn; czasy awarii kombajnu typu CM i związanych z nim urządzeń zostały oszacowane łącznie. W pracy uwzględniono wystąpienie prawdopodobieństwa tego typu awarii oraz ich wiarygodność.

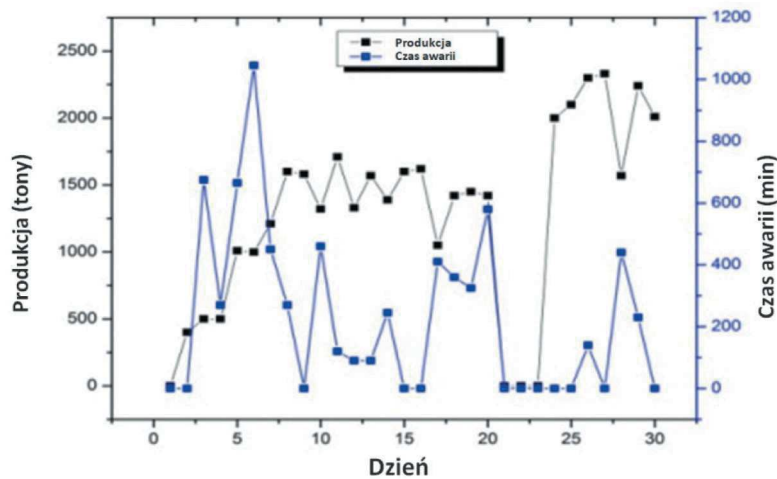
Przeprowadzone badania wskazują, że awarie przenośnika odstawczego najbardziej wpływają na wydajność kompleksu CM, a inne awarie wpływające w znacznym stopniu na produktywność to awarie elektryczne i hydrauliczne, awarie wozów odstawczych, problem z gromadzeniem urobku, problemy w procesie urabiania oraz przemieszczania maszyny. Analiza niezawodnościowa każdej grupy komponentów kompleksu CM umożliwi opracowanie harmonogramu konserwacji i prognozowanie częstotliwości inspekcji tych komponentów w celu zmniejszenia liczby awarii i zwiększenia ich dyspozycyjności.

Słowa kluczowe: kombajn chodnikowy urabiający liniowo, wymiar filaru, liczba pasów, niezawodność, procent awarii

1. WSTĘP

Zasoby węgla znajdujące się w pobliżu powierzchni są coraz bardziej wyczerpane, co w najbliższej przyszłości doprowadzi do konieczności wydobywania węgla z głębszych pokładów. Podziemne wydobywanie do tej pory jest jedyną ekonomiczną techniką eksploatacji węgla z pokładów zalegających na większej głębokości. Indie są jednym z pięciu największych producentów

węgla na świecie z produkcją 639,23 mln MG tego surowca w latach 2015–2016 [1], jednak taka wielkość wydobycia nie pozwala na eksport, a nawet na zaspokojenie rodzimego popytu. Oczekuje się, że zapotrzebowanie w Indiach na węgiel wzrośnie do 1373 mln MG w latach 2021–2022 [2]. W związku z tym Indie zaplanowały zwiększyć całkowitą produkcję węgla do co najmniej 1 mld MG do 2020 r. [3]. Plan ten wymaga zastosowania eksploatacji podziemnej w celu wydobycia węgla z głębszych pokładów.



Rys. 1. Wielkość wydobywania i czas występujących awarii w kopalni wykorzystującej kombajn typu CM w ciągu miesiąca

W większości indyjskich podziemnych kopalni węgla kamiennego eksploatacja odbywa się na podstawie metody Borda i Pillara (odmiana metody filarowo-komorowej) z wykorzystaniem wiercenia, ładowania i strzelania do produkcji węgla oraz ładowarek i wozów odstawczych do jego ładowania i odstawy. Kilka instalacji największej spółki sektora publicznego produkującej węgiel w Indiach wykorzystuje do eksploatacji węgla chodnikowe kombajny urabiające liniowo – *Continuous Miner* (CM) i planuje nowe inwestycje oparte na tego typu maszynach; chodnikowe kombajny urabiające liniowo są znane z wysokiej wydajności w górnictwie podziemnym (rys. 1).

Produktywność kombajnów typu CM we wszystkich eksploatowanych instalacjach jest niska ze względu na niewystarczające wsparcie tych kombajnów przez urządzenia pomocnicze w dłuższym przedziale czasowym, stary układ wyrobisk w kopalniach, w wielu przypadkach niekorzystne warunki geologiczno-geologiczne itp. Roczna produkcja węgla na całym świecie wyniosła 3400 mln MG w 1977 r. [4] i osiągnęła 7861 mln MG w 2017 r. [5] wraz z wprowadzeniem zaawansowanych technologii i nowoczesnych rozwiązań maszyn.

Niniejszy artykuł przedstawia wyniki badań przeprowadzonych w dwóch kopalniach położonych we wschodniej części Indii, w których eksploatowano łącznie trzy kombajny typu CM. Pierwsza kopalnia (Mine-A) wykorzystywała dwa kombajny CM: jeden do prac przygotowawczych oznaczony CM-1, drugi do rozciągania oznaczony CM-2. Druga kopalnia (Mine-B) eksploatowała jeden kombajn typu CM do prac przygotowawczych.

2. METODOLOGIA BADAWCZA

Badanie przeprowadzono na około 120 zmianach roboczych dla każdego systemu wykorzystującego kombajn typu CM. Porównano w obu kopalniach wpływ faktycznych warunków geologicznych na ich pracę, jak również określono dopuszczalne wartości tych warunków. To, w jaki sposób zmienne warunki geologiczne wpływają na produktywność i wydajność zastosowanych maszyn i urządzeń, zostało szeroko wyjaśnione. Zostały zebrane dane dotyczące przestoju i czasu pracy systemów wykorzystujących kombajn CM oraz urządzenia pomocnicze, a średni czas między awariami (MTBF), średni czas naprawy (MTTR) i dostępność każdego systemu zostały obliczone na podstawie wiarygodnych danych uzyskanych z kopalni. Następujące wzory zostały użyte do obliczenia wyżej wymienionych czasów MTBF, MTTR oraz dostępności [6–8]:

$$MTBF = \frac{\text{Całkowity rzeczywisty czas pracy}}{\text{Łączna liczba awarii}} \quad (1)$$

$$MTTR = \frac{\text{Całkowity czas napraw}}{\text{Łączna liczba awarii}} \quad (2)$$

$$\text{Dostępność} = \frac{MTBF}{MTBF + MTTR} \quad (3)$$

Oceniono również odsetek awarii każdego z komponentów eksploatowanego systemu (podsystemu) w odniesieniu do całkowitego czasu awarii.

Następnie przeprowadzono test trendu i testy korelacji szeregowej dla każdego z systemów wykorzystujących kombajn typu CM oparte na analizie błędów przed dopasowaniem odpowiednich rozkładów prawdopodobieństwa; testy te weryfikują identyczną dystrybucję i niezależność zestawu danych. Klasyczne techniki statystyczne są przydatne dla niezależnego zbioru danych [8]. Następnie wybrano najlepszy rozkład prawdopodobieństwa, a przebieg wyników odnośnie do poszczególnych podsystemów przedstawiono graficznie. Analizę rozkładów prawdopodobieństwa przeprowadzono przy użyciu programu MATLAB 2013a. Jako najlepsze kryterium niezawodności użyto najlepszego dopasowania prawdopodobieństwa.

W niniejszym artykule rozważono trzy najmniej dyspozycyjne podsystemy każdego z systemów wykorzystujących kombajn typu CM i urządzenia pomocnicze. Pozostałe podsystemy mają pomijalny czas przestojów, aby mogły one wpłynąć na zmniejszenie produktywności systemu.

3. ZMIENNE WPŁYWAJĄCE NA WYDOBYCIE W KOPALNIACH PODZIEMNYCH

Wielkość wydobywania w kopalniach podziemnych zależy od kilku zmiennych – parametrów górniczo-geologicznych, które mogą mieć znaczący wpływ na wydobywanie węgla. Zgodnie z Indyjskim Rozporządzeniem w sprawie Górniczych Kopalń Węgla (*Coal Mines Regulation*) z 1957 r. niektóre z tych parametrów mogą zawierać się w określonym zakresie ze względów bezpieczeństwa i wydajności. Poniżej opisano wybrane parametry [9].

3.1. Miąższość pokładu

Miaższość pokładu decyduje o ilości węgla w miejscu pracy systemu z kombajnem typu CM. Mniejsza wartość ma wpływ na niską produkcję węgla w przodku, przy ustalonej pozycji i pojedynczym przejściu organu urabiającego kombajnu typu CM. Powoduje to znaczne zmniejszenie produktywności kombajnu. Jednak zarówno mała, jak i bardzo duża miąższość pokładu nie sprzyja dobremu wykorzystaniu kombajnu, a zatem negatywnie wpływa na jego wydajność. Miąższość pokładu od 3,5 do 6,0 m jest optymalnym zakresem, aby uzyskać najlepszą wydajność kombaj-

nu typu CM, przy miąższości pokładu 2,5–4,6 m wydajność osiąga średnie rezultaty, a pokłady o miąższości mniejszej niż 2,0 m nie pozwalają na uzyskanie zadowalających wydajności [10].

3.2. Rozmiar filaru

Rozmiary filaru (jego szerokość i długość) w podziemnych kopalniach węgla zależą głównie od głębokości zalegania pokładu i innych czynników geologicznych. W systemach filarowo-komorowych o mniejszym wymiarze filara czas urabiania przodka może być krótszy, powodując częste przemieszczanie się kombajnu typu CM między przodkami. Natomiast w przypadku większych wymiarów filarów może to powodować znaczne opóźnienie w odstawie urobku. Dlatego dobór odpowiednich wymiarów filaru jest istotny zarówno z punktu widzenia bezpieczeństwa kopalni, jak i wymaganej wydajności. Wielkość filaru w zakresie od 20,0 m do 30,0 m jest optymalna do uzyskania najlepszych wyników wydobywania w kopalni w systemie filarowo-komorowym przy wykorzystaniu kombajnu typu CM, a wymiary filaru w zakresie od 30,0 m do 45,0 m pozwalają uzyskać umiarkowaną wydajność tego kombajnu [10].

3.3. Szerokość chodnika

Kombajny chodnikowe typu CM to duże maszyny, które można zabudować i eksploatować w ramach maksymalnej dopuszczalnej szerokości chodnika wynoszącej 4,8 m zgodnie z indyjskim rozporządzeniem w sprawie kopalń (*Coal Mines Regulation*). Typowy kombajn CM stosowany w badanych kopalniach ma organ urabiający o szerokości 3,6 m i wymaga większej szerokości chodnika w celu uzyskania wysokiej produktywności. W zależności od warunków górotworu maszyny te mogą pracować bezpiecznie i wydajnie przy większych szerokościach chodnika od 5 m do 6,6 m. W przypadku większych szerokości chodnika kombajn typu CM umożliwia uzyskanie większego wolumenu urobku w jednym przejściu głowicy urabiającej. W Indiach, zgodnie z rozporządzeniem w sprawie kopalń węgla z 1957 r., 4,8 m to maksymalna dopuszczalna szerokość chodnika, która pozwala na uzyskanie wysokich wydajności urabiania, przy szerokości chodnika 4,0 m wydajności te osiągają wartości umiarkowane, natomiast mniejsza szerokość chodnika nie jest w ogóle odpowiednia do pracy z wykorzystaniem kombajnów typu CM.

3.4. Nachylenie wyrobiska

Szybkość przemieszczania i wydajność maszyn do odstawy urobku zostaje drastycznie zmniejszona wraz ze wzrostem nachylenia wyrobiska; wpływa to niekorzystnie na czas cyklu maszyn odstawczych i zakłóca ich sumaryczną produktywność. Nachylenie wyrobiska nie większe niż 1–10° jest optymalne dla systemu produkcji opartego na kombajnach typu CM [10], nachylenie 1–8° wpływa na mniejszą wydajność maszyn odstawczych, a tym samym zmniejsza ogólną wydajność systemu produkcyjnego opartego na kombajnach typu CM, podczas gdy nachylenie 1–5° lub wyższe poważnie wpływa na obniżenie wydajności systemu. Wartości omawianych powyżej parametrów w badanych kopalniach przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1
Warunki górniczo-geologiczne w kopalniach w czasie badań

| Kopalnia | Liczba pokładów eksploatowanych CM | Miąższość pokładu [m] | Wymiary filara [m] | Szerokość chodnika [m] | Nachylenie |
|----------|------------------------------------|-----------------------|--------------------|------------------------|------------|
| Mine-A | 2 | 4,05,0 | 32 × 32 | 6,0 | 1–16 |
| Mine-B | 1 | 4,75 | 34 × 34 | 6,0 | 1–15 |

4. WYNIK BADAŃ I Dyskusja

W przeprowadzonych badaniach system eksploatacyjny wykorzystujący kombajn typu CM został zasadniczo podzielony na kilka podsystemów; niektóre z nich stanowią integralną część kombajnu, a inne są ważne z uwagi na ogólną wydajność badanego systemu. Dlatego awaria lub przestój któregośkolwiek z tych podsystemów zakłóca produktywność całego systemu opartego na kombajnie typu CM. Są to następujące podsystemy: układ zasilania elektrycznego kombajnu CM i urządzeń pomocniczych, układ napędowy kombajnu CM, układ ładowania urobku, głowica urabiająca, systemy hydrauliczne, podawarka, przenośnik kombajnu CM i system odstawy urobku z przodka. Procent przestojów spowodowanych przez dowolny z podsystemów w porównaniu z całkowitym czasem przestoju i dostępnością każdego podsystemu przedstawiono w tabeli 2.

Zgodnie z zamieszczonymi wynikami można stwierdzić, że przenośnik odstawy kopalnianej głównej, przenośnik kombajnu CM oraz podsystemy elektryczne mają najniższą dostępność sprzętu w przypadku instalacji wykorzystującej kombajn oznaczony CM-1, instalacji wykorzystującej kombajn oznaczony jako CM-2. Podobnie najmniejszą dostępność mają przenośniki odstawy głównej, układ instalacji elektrycznej

Tabela 2
Procent całkowitego czasu przestoju i dostępności wszystkich powiązanych podsystemów CM

| Nazwa podsystemu | CM-1 Mine-A | | CM-2 Mine-A | | CM Mine-B | |
|------------------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|-----------------------------|----------------|
| | Czas przestoju / ogółem [%] | Dostępność [%] | Czas przestoju / ogółem [%] | Dostępność [%] | Czas przestoju / ogółem [%] | Dostępność [%] |
| Zasilanie elektryczne | 3,69 | 98,53 | 8,34 | 95,77 | 32,18 | 93,85 |
| Głowica urabiająca | 0,34 | 99,87 | 1,280 | 99,35 | 0,88 | 99,83 |
| Ładowanie urobku | 0,96 | 99,62 | 7,55 | 96,17 | 6,04 | 98,85 |
| Układ napędowy | 3,27 | 98,70 | 1,90 | 99,04 | 0 | 100 |
| Hydraulika | 1,30 | 99,48 | 2,01 | 98,98 | 2,34 | 99,55 |
| Podwozie | 0,08 | 99,50 | 0,13 | 99,93 | 0,7 | 99,87 |
| Wóz odstawczy | 2,16 | 99,14 | 5,19 | 97,36 | 8,79 | 98,32 |
| Konserwacja | 4,09 | 99,30 | 13,09 | 93,36 | 3,34 | 99,36 |
| Przenośnik | 76,57 | 69,56 | 55,02 | 72,96 | 41,50 | 92,07 |
| Podajnik | 0,93 | 99,63 | 0,18 | 99,91 | 1,41 | 99,73 |
| Przenośnik kombajnu CM | 6,62 | 97,37 | 5,32 | 97,30 | 2,81 | 99,46 |

oraz układ ładowania urobku. W przypadku kombajnu z kopalni Mine-B podsystemy o najmniejszej dostępności to: przenośniki odstawy głównej, układ instalacji elektrycznej i wozy odstawcze.

Analizy niezawodności trzech podsystemów o najmniejszej dostępności dla każdego z badanych kombajnów typu CM przedstawiono w treści niniejszego artykułu. W pierwszej kolejności przedstawiono graficznie zależność pomiędzy łączną liczbą awarii i skumulowanym czasem między awariami, aby zaobserwować trend. Jeżeli uzyskana zależność jest prawie liniowa, oznacza to brak tendencji w zakresie awaryjności [8]. Następnie został naniesiony na wykres czas między awariami dla i -tej oraz $i-1$ awarii w celu sprawdzenia jakiegokolwiek korelacji między nimi. Jeśli nie zaobserwowano określonego trendu na wykresie, a dane są rozproszone, oznacza to, że są one wolne od jakiegokolwiek korelacji [8].

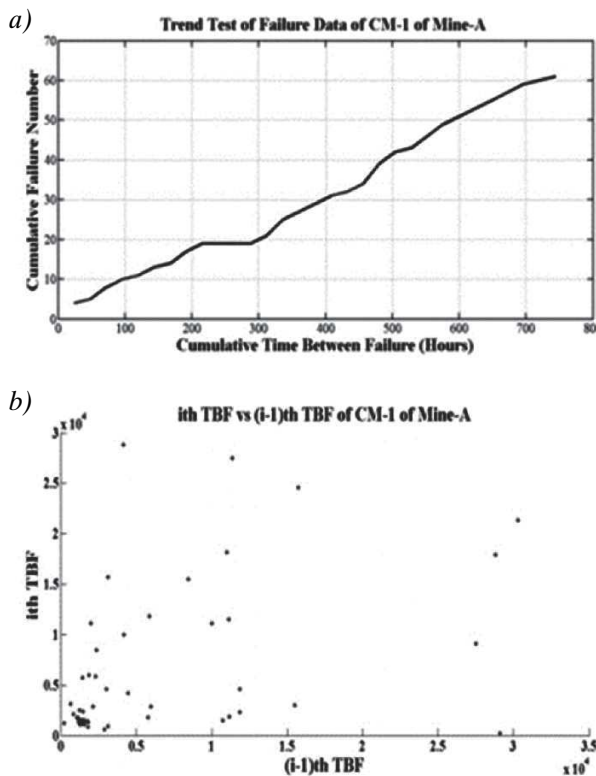
4.1. Istotność statystyczna i relacja matematyczna

Zgodnie z powyższym do otrzymanych danych dopasowano odpowiednie rozkłady prawdopodobieństwa w celu określenia niezawodności poszczególnych podsystemów. W analizie niezawodności systemów naprawialnych stosuje się ogólnie trzy typy rozkładów prawdopodobieństwa: dystrybucję Weibulla, dystrybucję lognormalną i dystrybucję wykładniczą. Dokładność dopasowania mierzono testem *chi-Square*. Dane dotyczące awarii odnoszące się do poszczególnych podsystemów zostały dopasowane do odpowiednich rozkładów, a otrzymana niezawodność została przedstawiona graficznie na rysunku 2.

Rysunek 2a przedstawia wyniki testu trendu (LHS) i seryjnego testu korelacji dla kombajnu oznaczonego CM-1 z kopalni Mine-A. Test trendu to wykres liniowy pomiędzy łączną liczbą awarii i skumulowanym czasem między nimi [8]. Test korelacji szeregowej (RHS) przedstawiający zależności czasowe między awariami dla i -tej oraz $i-1$ awarii (rys. 2b) jest wykresem rozproszonym [6, 8].

Wykres testu trendu (LHS) pokazuje trend liniowy, dlatego nie można określić trendu dla otrzymanych wyników dotyczących awarii. Test korelacji szeregowej (RHS) również nie wykazuje określonego trendu na wykresie rozproszonym; nie ma żadnej korelacji. Oznacza to brak jakiegokolwiek trendu i korelacji sze-

regowej w przypadku danych o awariach systemu z kombajnem oznaczonym jako CM-1 z kopalni Mine-A.

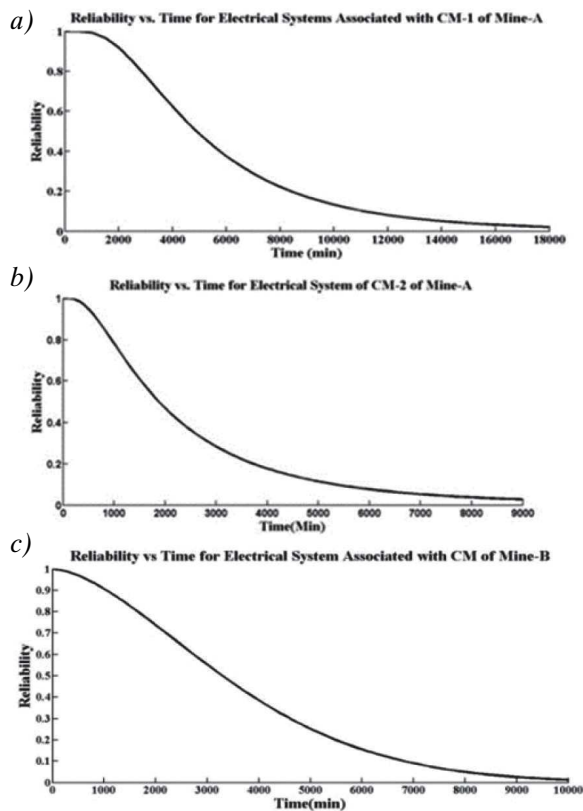


Rys. 2. Wykres testu trendu (LHS) (a) i testu korelacji szeregowej (RHS) (b) dla kombajnu oznaczonego CM-1 z kopalni Mine-A

Podobne testy przeprowadzono również z wykorzystaniem innych danych dotyczących awarii dwóch pozostałych systemów z kombajnem oznaczonym jako CM-2 z kopalni Mine-A i kombajnem z kopalni Mine-B. Uzyskano podobne wyniki. Następnie zestawy danych przeanalizowano przy użyciu zgodnych rozkładów prawdopodobieństwa w celu określenia ich niezawodności.

Na rysunku 3 przedstawiono wykresy niezawodności podsystemów elektrycznych zasilających kombajny oraz urządzenia pomocnicze, ponieważ stwierdzono, że podsystem elektryczny wszystkich trzech badanych kombajnów typu CM charakteryzuje się niską dostępnością.

Podobne badanie przeprowadzono również w przypadku dwóch pozostałych podsystemów o niskiej dostępności dla każdego z badanych kombajnów typu CM. Początkowo niezawodność każdego podsystemu wynosiła 100%, a z czasem pracy zaczęła spadać. Z analizy wynika, że system w kopalni Mine-A z kombajnem oznaczonym CM-1 wykazuje najniższą



Rys. 3. Niezawodność podsystemów elektrycznych zasilających kombajny: CM-1 (a) i CM-2 (b) z kopalni Mine-A oraz kombajn z kopalni Mine-B (c)

niezawodność w przypadku przenośnika odstawy głównej; osiągnięcie 50% niezawodności w ciągu zaledwie 1500–1600 minut, a układ elektryczny i przenośnik kombajnu osiąga 50% niezawodności kolejno po 4500–4600 i 7200–7300 minutach pracy. Podobne zależności zaobserwowano również w przypadku przenośnika odstawy głównej związanego z systemem w kopalni Mine-A z kombajnem oznaczonym CM-2, podczas gdy układ elektryczny tego kombajnu osiągnął 50% niezawodności po 2000–2200 minutach pracy, a układ ładowania urobku osiągnął 50% niezawodności po 7500–7700 minutach pracy. Przenośnik odstawy głównej systemu z kopalni Mine-B uzyskał lepszy wynik, osiągając 50% niezawodności po 3500–3800 minutach pracy, w przypadku układu elektrycznego osiągnięcie 50% niezawodności zajęło 3300–3500 minut, niezawodność wozów odstawczych osiągnęła 50% po 6000–6500 minut pracy.

Wyniki analizy statystycznej kombajnu oznaczonego CM-2 i systemu z kopalni Mine-A i systemu oraz kombajnu z kopalni Mine-B przedstawiono w tabeli 3. Można zauważyć, że podsystemy hydrauliczne i przenośniki odstawy głównej w przypadku obydwu badanych kombajnów CM wykazywały znaczące różnice podczas pracy w danych warunkach.

Tabela 3

Wyniki testu istotności danych TBF (czas między awariami) w przypadku kombajnu CM-2 z kopalni Mine-A i kombajnu z kopalni Mine-B

| Nazwa podsystemu | Kombajn/ kopalnia | Średnia | Min. | Maks. | test Pearsona |
|-----------------------|-------------------|---------|---------|---------|---------------|
| Zasilanie elektryczne | CM-2 Mine-A | 2520,3 | 385,0 | 8585,0 | NS |
| | CM Mine-B | 3682,5 | 580,0 | 7200,0 | |
| Głowica urabiająca | CM-2 Mine-A | 27217,5 | 25995,0 | 28440,0 | NS |
| | CM Mine-B | 30240,0 | 30240,0 | 30240,0 | |
| Ładowanie urobku | CM-2 Mine-A | 6255,0 | 1285,0 | 19455,0 | NS |
| | CM Mine-B | 21840,0 | 480,0 | 43200,0 | |
| Hydraulika | CM-2 Mine-A | 5917,6 | 545,0 | 23645,0 | S |
| | CM Mine-B | 18267,5 | 13495,0 | 23040,0 | |
| Podwozie | CM-2 Mine-A | 18820,0 | 18820,0 | 18820,0 | NS |
| | CM Mine-B | 21600,0 | 21600,0 | 21600,0 | |
| Wóz odstawczy | CM-2 Mine-A | 3407,7 | 510,0 | 11735,0 | NS |
| | CM Mine-B | 7554,0 | 1880,0 | 20550,0 | |
| Podajnik | CM-2 Mine-A | 7150,0 | 4940,0 | 9360,0 | NS |
| | CM Mine-B | 8640,0 | 8640,0 | 8640,0 | |
| Przenośnik | CM-2 Mine-A | 1937,7 | 525,0 | 5400,0 | S |
| | CM Mine-B | 3648,5 | 765,0 | 9265,0 | |

NS = nieistotny ($>0,05$), S = istotny ($<0,05$)

5. KONSERWACJA I PRZEGLĄDY KOMBAJNÓW TYPU CM ORAZ URZĄDZEŃ POMOCNICZYCH

Przeprowadzone badania wykazały znaczne zmniejszenie produktywności systemów eksploatacyjnych opartych na kombajnach typu CM z powodu przestoju sprzętu. Wymaga to ustalenia właściwego harmonogramu konserwacji profilaktycznej podsystemów o niskiej niezawodności w takich systemach. Konserwacja prewencyjna powinna być przeprowadzana przed następną prognozowaną awarią.

5.1. Przenośnik odstawy głównej

Przenośniki odstawy głównej muszą być sprawdzane codziennie co najmniej raz pod kątem jakichkolwiek nieprawidłowości.

Konserwacja prewencyjna obejmuje kontrolę rolek tocznych, bębnow napędowych i napinających, kontrolę hałasu silnika i przekładni zębatych oraz smarowanie wszystkich ruchomych części i łożysk zgodnie z wytycznymi producenta [11]. Należy opracować odpowiedni strategiczny program konserwacji wszystkich posiadanych przenośników.

5.2. Kombajny chodnikowe urabiające liniowo

Operatorzy powinni być zobligowani do sprawdzenia stanu maszyny przed rozpoczęciem i po zakończeniu jej pracy. Ogólna kontrola obejmuje sprawdzenie układów hydraulicznych, takich jak cylindry, pod kątem ewentualnych wycieków, sprawdzenie organu urabiającego pod względem wystąpienia nieprawidłowości (stan narzędzi urabiających), kontrola układu załadunkowego i kontrola systemów sterowania [12–13].

5.3. Systemy elektryczne

Podczas badania stwierdzono, że istotny był także rodzaj awarii elektrycznej powodującej przerwanie zasilania w przypadku pracy maszyn systemu eksploatacyjnego. Ważna jest regularna kontrola stanu transformatora zasilającego, skrzynki aparatury elektrycznej i kabli zasilających. Przenoszenie kabla zasilającego kombajn podczas przejazdu wozów odstawczych powinno odbywać się z należytą starannością.

6. WNIOSKI

Niezawodność i dostępność sprzętu oznaczają niezawodność i produktywność całego systemu produkcyjnego. Analiza niezawodności systemów filarowo-komorowych stosowanych w Indiach w podziemnych zakładach górniczych i wykorzystujących kombajny typu CM wykazuje, że można spodziewać się w przyszłości znacznej poprawy funkcjonowania takich systemów, szczególnie wprowadzając nowe rozwiązania maszyn.

W niniejszej pracy dokonano analizy niezawodności i dostępności trzech kombajnów typu CM pracujących w dwóch kopalniach i zauważono, że program przeglądów i konserwacji tych maszyn i urządzeń pomocniczych musi być zaprojektowany w sposób strategiczny, aby zwiększyć ich wydajność i poprawić stosunek zwrotu z inwestycji. Wszystkie podsystemy systemów filarowo-komorowych wykorzystujących kombajny typu CM wymagają uwagi podczas ich kontroli i konserwacji. Jednakże niezawodność przenośników odstawy głównej kopalni i instalacji elektrycznej jest kluczowa dla zapewnienia niezawodności całego systemu i wymaga zdecydowanie większej uwagi w aspekcie ich przeglądów i konserwacji. Kryteria niezawodności można wykorzystać do zaprojektowania strategicznego harmonogramu przeglądów i konserwacji, aby zapobiec awariom, zwiększyć dyspozycyjność i produktywność newralgicznych podsystemów.

7. PODSUMOWANIE

Artykuł opisuje wpływ czynników geologicznych i przestoju systemu wykorzystującego kombajny typu CM na wydajność procesu podziemnej eksploatacji węgla. Określono dyspozycyjność różnych podsystemów wchodzących w skład systemów filarowo-komorowych wykorzystujących kombajny typu CM. Następnie zastosowano najkorzystniejsze rozkłady prawdopodobieństwa w celu określenia niezawodności trzech najbardziej awaryjnych podsystemów dla każdego z badanych systemów eksploatacyjnych. Zaproponowano opracowanie planu konserwacji i przeglądów w celu zwiększenia produktywności tych systemów.

Podziękowania

Autor dziękuje urzędnikom Eastern Coalfields Limited za udzielenie zgody na badania i ich ciągłe wsparcie, a także profesorowi Inżynierii Górniczej w IEST, Shibpur w Indiach Netay C. Deyowi za jego cenne spostrzeżenia, sugestie i wsparcie.

Literatura

- [1] *Annual Coal Report 2016-17*, Chapter 6, Ministry of Coal Government of India, http://coal.nic.in/sites/upload_files/coal/files/coalupload/chap6AnnualReport1617en.pdf [14.07.2017].
- [2] *The Indian coal sector: Challenges and future outlook*, Indian Chamber of Commerce, <https://www.pwc.in/assets/pdfs/industries/power-mining/icc-coal-report.pdf> [14.07.2017].
- [3] *Bridging the gap Increasing coal production and sector augmentation*, Indian Chamber of Commerce, <https://www.pwc.in/assets/pdfs/publications/2016/icc-pwc-coal-report-june.pdf> [14.07.2017].
- [4] Griffith E.D., Clarke A.W.: *World coal production*, „Scientific American” 1979, 240, 1: 38–47.
- [5] *World energy resources Coal 2016*, World Energy Council, https://www.worldenergy.org/wpcontent/uploads/2017/03/WEResources_Coal_2016.pdf [13.12.2017].
- [6] Rahimdel M.J., Hosienie S.H., Ataei M., Khalokakaei R.: *The reliability and maintainability analysis of pneumatic system of rotary drilling machines*, „Journal of The Institution of Engineers (India): Series D” 2013, 94, 2: 105–111.
- [7] Rohani H., Roosta A.K.: *Calculating Total System Availability*, Information Services Organization KLM-Air France, Amsterdam 2014.
- [8] Vagenas N., Runciman N., Clément S.R.: *A methodology for maintenance analysis of mining equipment*, „International Journal of Surface Mining, Reclamation and Environment” 1997, 11: 33–40.
- [9] Raghavan V., Ariff S., Kumar P.P.: *Optimum Utilisation of Continuous Miner for Improving Production in Underground Coal Mines*, „International Journal of Scientific and Research Publications” 2014, 4, 10: 374.
- [10] Modi J., Bharti S., Kant R.: *Applicability of Continuous Miner in Room and Pillar Mining System: Higher Production and Productivity with Safety*, International Conference on Deep Excavation, Energy Resource and Production, Kharagpur 2017.
- [11] *Lubrication and maintenance check list*, Automated Conveyor, INC, http://www.automatedconveyors.com/acrobat/maintenance_schedule.pdf [18.07.2017].
- [12] De Clercq F.J.: *Maintenance planning and optimal replacement of sub-assemblies for Continuous Miners*, Published as a domain property of University of Pretoria, Pretoria 2009.
- [13] *Safety and Maintenance Checklist*, Caterpillar, <http://s7d2.scene7.com/is/content/Caterpillar/C10868548> [18.07.2017].

BANERJEE SUMIT

*Department of Mining Engineering
Indian Institute of Engineering Science
and Technology, Shibpur
Howrah – 711103, West Bengal, India
sumit.banerjee92@yahoo.com*