

Jarosław BRODNY, Sara ALSZER, Jolanta KRYSTEK, Sławomir DUDA
Politechnika Śląska

ANALIZA DOSTĘPNOŚCI WYBRANYCH MASZYN GÓRNICZYCH

Streszczenie. Podziemna eksploatacja węgla kamiennego charakteryzuje się dużą zmiennością warunków górniczo-geologicznych w jakich jest prowadzona. Dodatkowo, występująca na rynku węgla kamiennego duża konkurencja powoduje, iż konieczne staje się podejmowanie działań mających na celu ograniczenie kosztów jego produkcji, np. poprzez zwiększenie efektywności wykorzystania posiadanych maszyn. Temu celowi służy przedstawiona w artykule analiza dostępności wybranych maszyn górniczych przeprowadzona z wykorzystaniem modelu OEE, który stanowi narzędzie do ilościowej oceny strategii TPM. Badaniom poddano maszyny wchodzące w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, a podstawą analizy były dane rejestrowane przez system automatyki przemysłowej. Wykorzystując te dane określono dostępności badanych maszyn oraz strukturę rejestrowanych przerw w ich pracy. Uzyskane wyniki powinny stanowić istotne źródło informacji dla służb utrzymania ruchu oraz zarządzających zakładami górniczymi, niezbędnych dla poprawy ekonomicznej efektywności podziemnej eksploatacji złóż.

AVAILABILITY ANALYSIS OF SELECTED MINING MACHINERY

Summary. Underground extraction of coal is characterised by high variability of mining and geological conditions in which it is conducted. Additionally, a big competition, occurring on the coal market, causes that it is necessary to take action in order to reduce the cost of its production, for eg. by increasing the efficiency of utilisation machines. To meet this objective it should be proceed with analysis presented in this paper. The analysis concerns to availability of utilisation selected mining machinery, conducted using the model of OEE, which is a tool for quantitative estimate strategy TPM. In this article we considered the machines being part of the mechanized longwall complex and the basis of analysis was the data recording by the industrial automation system. Using this data set we evaluated the availability of studied machines and the structure of registered breaks in their work. The results should be an important source of information for maintenance staff and management of mining plants, needed to improve the economic efficiency of underground mining.

1. Wstęp

Proces podziemnej eksploatacji węgla kamiennego jest bardzo skomplikowany i charakteryzuje się dużą zmiennością warunków górniczo-geologicznych w jakich jest prowadzony. Globalizacja oraz rosnąca konkurencja w branży surowców energetycznych powoduje, iż krajowe przedsiębiorstwa górnicze, chcąc utrzymać się na rynku muszą podejmować działania, których jednym z celów jest pełniejsze wykorzystanie posiadanych zasobów. W szczególności dotyczy to wszelkiego typu maszyn i urządzeń.

Koncentracja wydobycia, polegająca na zmniejszeniu liczby ścian wydobywczych przy jednoczesnym zwiększeniu ich wydajności powoduje, iż działalność kopalni opiera się najczęściej na jednej lub dwóch pracujących ścianach wydobywczych. W takim układzie oczywistym jest, iż od sprawności i dobrej organizacji pracy w tych ścianach zależy efektywność całego przedsiębiorstwa górniczego. Jednym z czynników mających znaczący wpływ na efektywność jest optymalne wykorzystanie zdolności produkcyjnych posiadanych maszyn, co w sposób bezpośredni przekłada się na poprawę wydajności pracy i produktywności w tych przedsiębiorstwach. Przy podejmowaniu jakichkolwiek działań konieczne jest uwzględnienie specyfiki przedsiębiorstw górniczych, które należą do grupy zakładów otwartych znacznie różniących się od stacjonarnych przedsiębiorstw innych branż. W trakcie eksploatacji często dochodzi do zaburzeń procesu produkcyjnego, co generuje straty oraz powoduje wzrost kosztów wydobycia węgla. Przyczyną tych zakłóceń są zarówno czynniki technologiczne, jak i techniczno-organizacyjne [7].

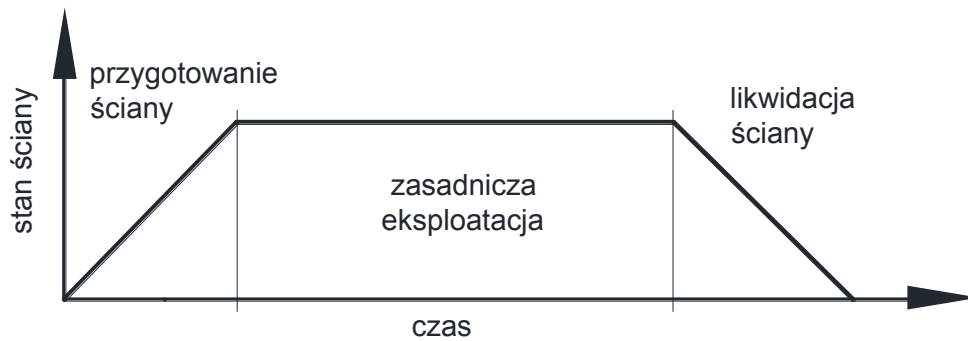
Proces produkcji węgla kamiennego obejmuje kilka etapów, z których najistotniejszym jest pozyskiwanie kopaliny użytecznej w fazie eksploatacji (rys. 1). Eksploatacja ta polega na mechanicznym odspajaniu od górotworu kopaliny użytecznej i odtransportowaniu jej ze strefy bezpośredniej eksploatacji. Obecnie ze względu na fakt, iż proces eksploatacji prowadzi się najczęściej systemem ścianowym (długie, łatwe do mechanizacji fronty eksploatacyjne), strefa ta nazywana jest strefą przodkową.

Przedstawiony na rysunku 1 uproszczony schemat procesu produkcji węgla obejmuje także transport poziomy urobku do strefy szybowej, z której z wykorzystaniem urządzeń do transportu pionowego, jest transportowany na powierzchnię. Następnie urobek kierowany jest do zakładu przerobczego, w którym po procesie wzbogacania otrzymujemy gotowy produkt w postaci węgla o określonych parametrach.



Rys. 1. Uproszczony schemat procesu produkcji węgla

Z procesem urabiania kopaliny ściśle związany jest cykl życia wyrobiska eksploatacyjnego (zwanego ścianą eksploatacyjną), który przedstawiono na rysunku 2.



Rys. 2. Cykl życia ściany eksploatacyjnej

Cykl ten obejmuje trzy fazy, a mianowicie przygotowanie ściany eksploatacyjnej (tzw. zbrojenie i rozruch), zasadniczą eksploatację oraz jej likwidację. Wszystkie te fazy mają znaczenie dla efektywności procesu eksploatacji, jednak o końcowym wyniku ekonomicznym w głównej mierze decyduje faza druga, w czasie której prowadzi się zasadniczą eksploatację kopaliny. Na prawidłowy przebieg tej fazy bardzo istotny wpływ mają wszelkiego typu urządzenia w tym maszyny górnicze biorące udział w procesie eksploatacji i transportu kopaliny oraz urządzenia zabezpieczające całą strefę eksploatacyjną (np. obudowa górnicza). Ich niezawodność, dostępność i wydajność w dużej mierze decydują o efektywności ekonomicznej eksploatacji całej ściany wydobywczej. W celu osiągnięcia jak najlepszych wyników konieczne jest podjęcie działań mających na celu optymalne wykorzystanie możliwości eksploatowanych maszyn poprzez np. odpowiedni ich dobór do warunków górniczo-geologicznych w jakich mają pracować, zapewnienie odpowiedniej obsługi konserwacyjnej, kontroli, itp. Narzędziem, które skutecznie stabilizuje pracę parku maszynowego zarazem optymalizując koszty jego eksploatacji jest pochodząca z Japonii metodologia kompleksowego zarządzania sprawnością maszyn i urządzeń TPM (ang. *Total Productive Maintenance*) [3, 5]. Aby podjąć skuteczne działania w tym zakresie konieczne jest prowadzenie badań i analiz mających na celu określenie rzeczywistego stopnia wykorzystania stosowanych maszyn na podstawie wiarygodnych informacji. Temu celowi mają służyć badania, których opis przedstawiono w niniejszym opracowaniu.

Dotychczas prowadzone w tym obszarze badania, opierały się tylko na analizach awaryjności maszyn górniczych opracowywanych na podstawie zapisów dokonywanych w rejestrach dyspozytorskich. Stosunkowo niska wiarygodność tych danych uniemożliwiała rzeczywiste określenie stopnia wykorzystania maszyn górniczych oraz identyfikację struktury i przyczyn przestojów występujących w czasie ich pracy.

W opracowaniu jako podstawę do analizy dostępności wybranych maszyn górniczych przyjęto dane pozyskiwane z systemu automatyki przemysłowej. System ten, niezależnie od operatorów obsługujących te maszyny, rejestruje w sposób dyskretny szereg parametrów pracy maszyn. W oparciu o te dane przeprowadzono analizę efektywności wykorzystania zestawu maszyn górniczych wchodzących w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, przeznaczonego do bezpośredniego urabiania kaliny węglowej i transportu urobku ze strefy przodkowej. W skład tego kompleksu wchodzi także obudowa zmechanizowana stanowiąca podstawowe zabezpieczenie wyrobiska ścianowego oraz zestaw urządzeń niezbędnych

do prowadzenia eksploatacji. Badaniami objęto pracę kombajnu ścianowego, przenośników: ścianowego i podścianowego oraz kruszarki podścianowej. Na podstawie uzyskanych danych określono ich dostępność oraz strukturę rejestrowanych przerw w ich pracy. Badania przeprowadzono w oparciu o strategię kompleksowego zarządzania utrzymaniem ruchu – TPM wykorzystując założenia modelu efektywności całkowitej OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*), który stanowi narzędzie do ilościowej oceny tej strategii [1, 2, 3, 4].

2. Strategia TPM i model OEE

Jednym z obszarów, w którym istnieją możliwości skutecznego obniżenia kosztów produkcji górniczej jest efektywność wykorzystania posiadanych zasobów, a w szczególności maszyn górniczych. W ostatnich kilkunastu latach w polskim górnictwie podziemnym, dzięki dynamicznemu postępowi technicznemu projektuje się, wykonuje i eksploatuje coraz lepsze, a co za tym idzie także droższe maszyny. Wzrost możliwości technicznych tych, w wielu przypadkach bardzo nowoczesnych o wysokim stopniu niezawodności i wydajnych maszyn, nie zawsze idzie w parze z korzyściami wynikającymi z ich zastosowania [7, 8, 9].

Strategią, która z powodzeniem jest stosowana w stacjonarnych zakładach produkcyjnych do analizy efektywności wykorzystania wyposażenia jest strategia kompleksowego zarządzania utrzymaniem ruchu TPM (ang. *Total Productive Maintenance*) [1, 2]. Zgodnie z tą strategią poprawę efektywności ekonomicznej przedsiębiorstwa osiąga się poprzez zespół działań i czynności mających na celu utrzymanie maszyn, urządzeń i innych środków technicznych (zasobów odnawialnych) w stanie bezawaryjnym i bezusterkowym, dążenie do ograniczenia liczby awarii, nieplanowanych przestojów i braków. Strategia ta odwołuje się także do czynnika ludzkiego zakładając, że aby proces zwiększenia efektywności wykorzystania posiadanego sprzętu i maszyn był skuteczny, to musi obejmować także zmiany w postrzeganiu poszczególnych działań techniczno-organizacyjnych przez pracowników. Zasadne jest zatem podejmowanie działań mających na celu uświadomienie pracownikom, że ich odpowiednia wiedza, umiejętności, zaangażowanie, odpowiedzialność oraz świadomość ich roli w procesie utrzymania ruchu maszyn jest warunkiem koniecznym do osiągnięcia sukcesu w tym zakresie. Utożsamianie się pracowników z przedsiębiorstwem, w którym pracują jest jedną z podstaw tej strategii. Jej zastosowanie ma za zadanie ograniczyć awarie, nieplanowe przestoje w tym tzw. mikro przestoje oraz zwiększyć wydajność i poprawić jakość produkcji [3, 4, 5, 6].

Aby w przedsiębiorstwie skutecznie wprowadzić zmiany organizacyjno-techniczne, które mogą spowodować poprawę jego efektywności w zakresie wykorzystania posiadanych zasobów produkcyjnych, konieczne jest dokonanie analizy stanu wyjściowego. Narzędziem, które umożliwia przeprowadzenie takiej analizy i jednocześnie pozwala ilościowo ocenić skuteczność strategii TPM jest wskaźnik całkowitej efektywności wyposażenia OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*) [4, 6]. Wskaźnik ten jest wypadkową trzech wielkości składowych uwzględniających dostępność i wydajność badanej maszyny oraz jakości uzyskiwanego produktu. Wskaźniki składowe oraz wskaźnik całkowity wyznacza się z poniższych zależności:

$$OEE = D \cdot W \cdot J \quad (1)$$

gdzie:

D – dostępność,

W – wydajność,

J – jakość.

$$D = \frac{D_r}{D_o} \quad (2)$$

gdzie:

D_r – czas rzeczywistej pracy,

D_o – czas operacyjny.

$$W = \frac{W_r}{W_n} \quad (3)$$

gdzie:

W_r – wydajność rzeczywista,

W_n – wydajność normatywna.

$$J = \frac{J_a}{J_c} \quad (4)$$

gdzie:

J_a – produkcja akceptowalna,

J_c – produkcja całkowita.

Zasadnym jest zatem stwierdzenie, że wskaźnik końcowy (OEE) pokazuje stopień wykorzystania czasu bazowego dla uzyskania pełnowartościowej produkcji. Bardzo istotne, przy wyznaczaniu wartości tego wskaźnika dla maszyny lub systemu produkcyjnego, ma także zidentyfikowanie przyczyn powodujących wystąpienie strat czasowych. Najistotniejszymi spośród tych przyczyn przedstawiono i omówiono w pracach [4, 6]:

Zgodnie z modelem efektywności całkowitej dla każdej z badanych maszyn oraz całego zestawu konieczne jest wyznaczenie wskaźników cząstkowych w obszarze dostępności i wydajności (wykorzystania), a także jakości produktu (węgla).

W prezentowanym przykładzie skoncentrowano się na pierwszym wskaźniku tego modelu, jakim jest wskaźnik dostępności badanych maszyn. W kolejnych etapach prowadzonych prac konieczne jest rozszerzenie tego obszaru również o pozostałe wskaźniki, w celu wyznaczenia wskaźnika efektywności całkowitej każdej z badanych maszyn oraz całego zestawu.

3. Charakterystyka badanego zestawu maszyn

Badany zestaw maszyn wchodzi w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, który wykorzystywany jest do podziemnej eksploatacji węgla systemem ścianowym. System ścianowy polega na urabianiu kopaliny użytecznej (w rozpatrywanym przypadku węgla kamiennego) przodkiem eksploatacyjnym, którego długość może wahać się od ok 60 m do ok 300 m. Tak długie wyrobisko eksploatacyjne (ściana eksploatacyjna) stwarza doskonałe możliwości mechanizacji

i automatyzacji procesu urabiania i transportu urobku. Na rysunku 3 przedstawiono widok wyrobiska ścianowego w trakcie prowadzonej eksploatacji [2].

Zestaw maszyn wchodzących w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, które ujęto w prezentowanej analizie objął kombajn ścianowy, przenośniki zgrzeblowy (ścianowy) i podścianowy (taśmowy) oraz kruszarkę przeznaczoną do kruszenia dużych kęsów urobku.

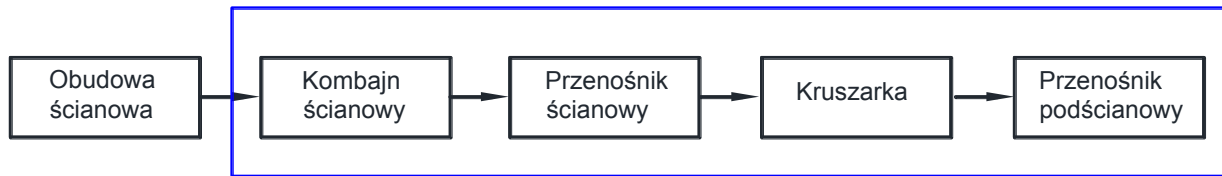


Rys. 3. Widok wyrobiska ścianowego z wyposażeniem w trakcie eksploatacji [2]

Podstawową maszyną wchodząca w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego jest kombajn ścianowy. Jego zadaniem jest urabianie calizny węglowej i ładowanie urobku na przenośnik zgrzeblowy (ścianowy). Kombajn ścianowy ma bardzo istotne znaczenie dla analizowanego systemu maszyn, gdyż jest pierwszym ogniwem w eksploatacyjnym ciągu technologicznym. Od jego niezawodności w znacznej mierze zależy efektywność analizowanego zestawu maszyn, a także efektywność całego procesu eksploatacyjnego. Urobiony przez kombajn urobek transportowany jest przez przenośnik zgrzeblowy (ścianowy) ze ściany eksploatacyjnej do chodnika podścianowego, a następnie przeładowywany na przenośnik podścianowy (najczęściej taśmowy), którym jest dalej transportowany poza strefę przodkową. W analizowanym zestawie maszyn, uwzględniono także kruszarkę, której zadaniem jest rozbijanie dużych kęsów urobku aby umożliwić ich dalszy transport. Niesprawność kruszarki może doprowadzić do zatrzymania eksploatacji na skutek zablokowania możliwości transportu urobku.

Wybór takiego zestawu maszyn do analizy wynika także z faktu, iż prowadzone w kopalniach analizy ilościowe awaryjności maszyn i urządzeń wskazują, że największy ich udział jest po stronie maszyny urabiającej i przenośników [1, 8]. Można więc przyjąć, że maszyny wchodzące w skład kompleksu ścianowego wraz z przenośnikiem podścianowym oraz kruszarką mają największy wpływ na efektywność całego procesu wydobywczego.

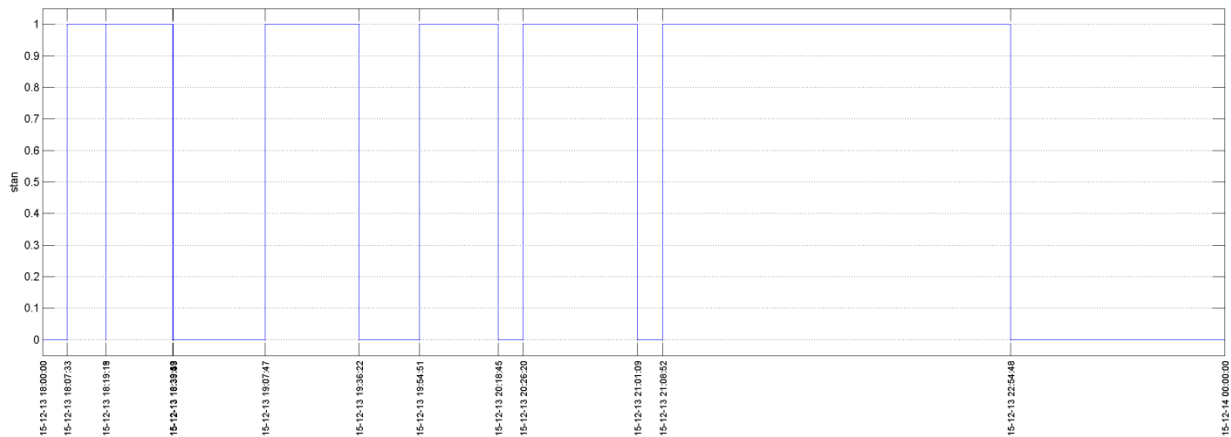
Z niezawodnościowego punktu widzenia badany zestaw maszyn stanowi system o strukturze szeregowej co oznacza, iż funkcjonuje on poprawnie, gdy wszystkie jego elementy składowe są sprawne (rys. 4).



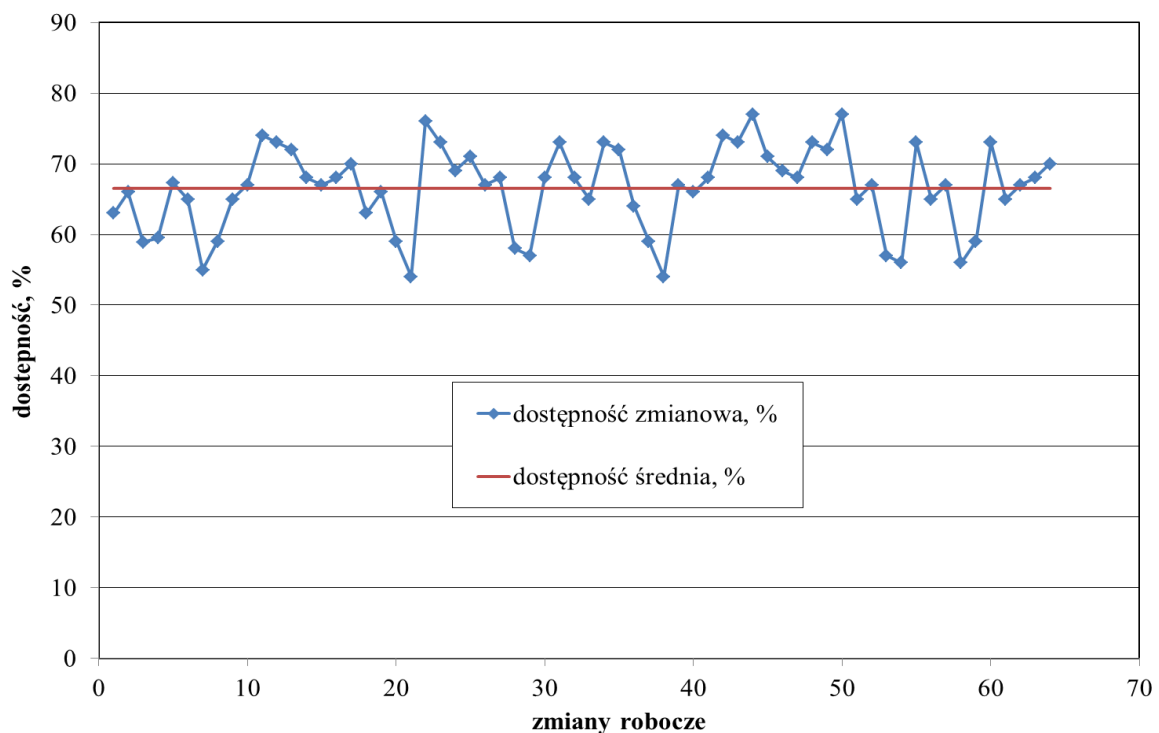
Rys. 4. Schemat struktury niezawodnościowej badanego systemu

4. Wyznaczanie dostępności badanego zestawu maszyn

Podstawą wyznaczenia wskaźników dostępności każdej z badanych maszyn były dane rejestrowane w systemie *zero-jedynkowym*. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowy czasowy przebieg stanu pracy kombajnu ścianowego w ciągu jednej zmiany roboczej (trwającej 360 minut).



Rys. 5. Czasowy przebieg pracy kombajnu ścianowego w ciągu jednej zmiany roboczej

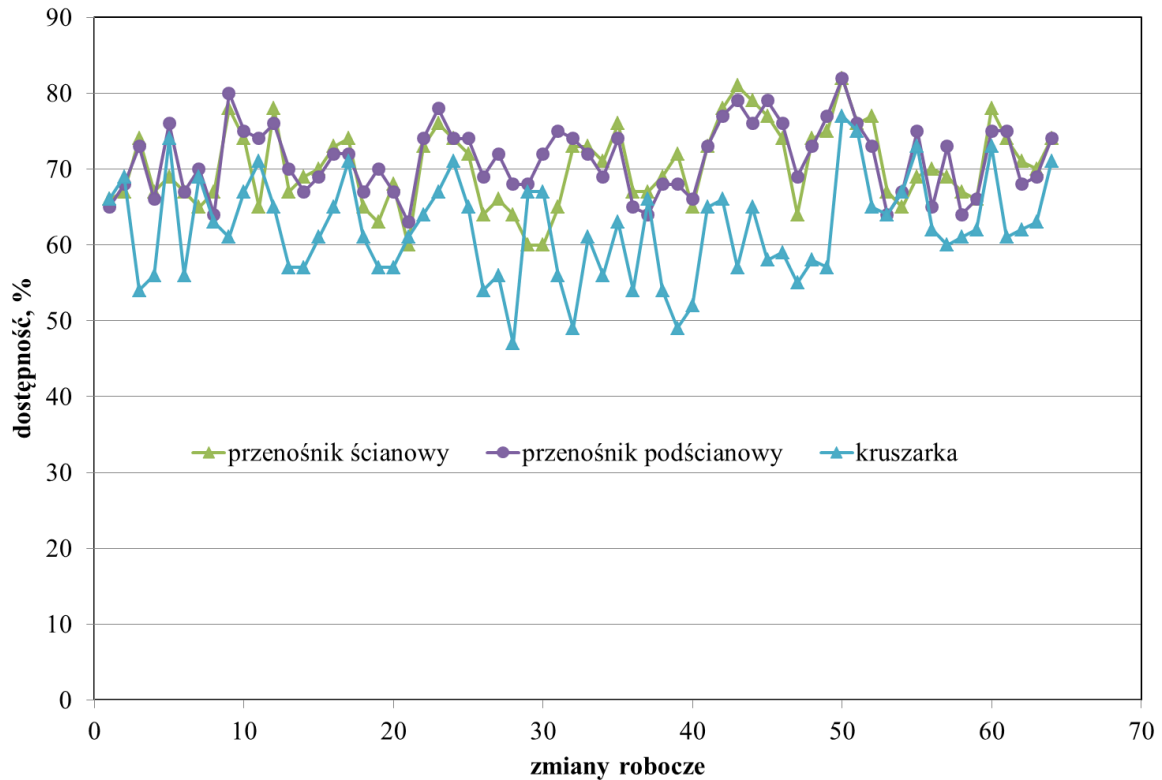


Rys. 6. Wyznaczone wartości wskaźnika dostępności kombajnu ścianowego

Dla analizowanej zmiany roboczej rzeczywisty czas pracy kombajnu wyniósł 13590 sekund, a przestoje wyniosły 8010 sekund. Dla tej zmiany wskaźnik dostępności wyniósł więc 58,9%.

Na rysunku 6 przedstawiono obliczone wartości wskaźnika dostępności badanego kombajnu ścianowego dla 64 zmian roboczych wraz z zaznaczoną wartością średnią tego wskaźnika dla badanego okresu.

W analogiczny sposób wyznaczono wartości wskaźników dostępności dla pozostałych maszyn badanego zestawu (rys. 7).



Rys. 7. Wartości wskaźników dostępności dla maszyn badanego zestawu

Na podstawie przeprowadzonych obliczeń wyznaczono także wartości średnie, maksymalne i minimalne wyznaczonych wskaźników (tabela 1).

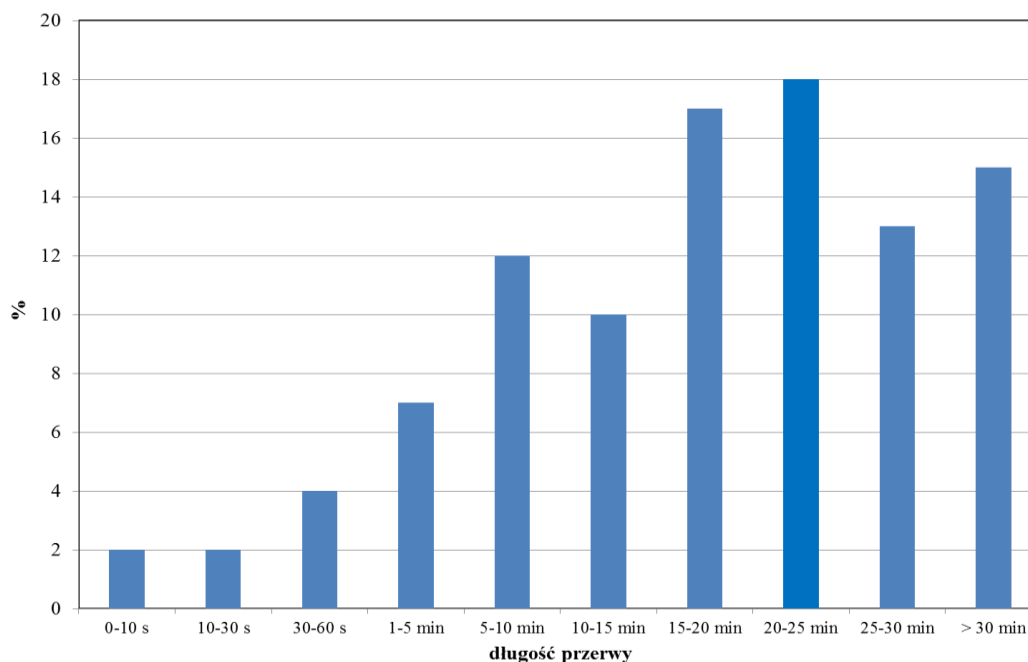
Tabela 1

Wyznaczone wartości wskaźników dostępności

Maszyna	Średnia wartość wskaźnika dostępności, %	Maksymalna dobową wartość wskaźnika dostępności, %	Minimalna dobową wartość wskaźnika dostępności, %
Kombajn	66,63 ±5,97	77,36	54,21
Przenośnik ścianowy	70,36 ±5,27	82,45	60,34
Przenośnik podścianowy	71,25 ±4,61	82,65	63,53
Kruszarka	62,06 ±6,65	77,43	49,45
Cały zestaw	67,55 ±6,72	82,65	49,45

Analizując uzyskane wyniki można stwierdzić, iż wyznaczone wartości wskaźników dostępności badanych maszyn są niskie. Średnia ich wartość dla żadnej z badanych maszyn nie przekroczyła 75%, a więc wartości uważanej powszechnie jako dolną akceptowalną granicę.

Wyznaczone przebiegi umożliwiły także określenie struktury przerw w czasie pracy poszczególnych maszyn. Na rysunku 8 przedstawiono zestawienie tych przerw dla badanego kombajnu, obejmujące wszystkie 64 zmiany robocze. Procentowy udział poszczególnych przerw (podzielonych na dziesięć kategorii) odniesiono do całkowitego czasu przerw w badanym okresie.



Rys. 8. Struktura przerw kombajnu ścianowego

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, iż największy procentowy udział w całkowitym czasie przerw w pracy tego kombajnu mają przerwy, których czas trwania mieści się w granicach od 20 do 25 minut (stanowią 18% wszystkich czasów przerw). Przedstawiony wykres jednoznacznie wskazuje, iż najistotniejsze znaczenie dla pracy tej maszyny mają przerwy powyżej 5 minut, stanowiące ok 85 % wszystkich zarejestrowanych przerw.

5. Wnioski

Jednym z obszarów, w którym istnieją możliwości skutecznej redukcji kosztów przedsiębiorstw górniczych jest sfera obejmująca dobór i wykorzystanie wszelkiego typu urządzeń technicznych, a w szczególności maszyn górniczych. Aby działania podejmowane w tym zakresie były skuteczne, konieczne jest pozyskanie odpowiedniej wiedzy na temat stopnia wykorzystania posiadanych, przez te przedsiębiorstwa zasobów technicznych.

Zaprezentowana w opracowaniu metodyka wyznaczania wskaźnika efektywności wykorzystania maszyn górniczych, oparta o dane pozyskiwane z automatyki przemysłowej, powinna stanowić istotne źródło wiedzy niezbędnej do oceny stanu ich pracy. Wnioski wynikające z analizy wyznaczonych wskaźników, a w szczególności z ich

zmienności odniesionej do podejmowanych działań, powinny stanowić podstawę decyzji podejmowanych przez odpowiednie służby przedsiębiorstwa w celu optymalizacji wykorzystania tych maszyn. W prezentowanym przypadku, podstawowym źródłem informacji, na podstawie których wyznaczono wskaźniki dostępności badanych maszyn były dane pozyskane z systemu automatyki przemysłowej. Gwarantowało to ich wiarygodność (eliminując niedokładności rejestracji prowadzonej przez dyspozytorów) oraz możliwość rejestracji w czasie rzeczywistym wszelkiego typu przestoju. Dla identyfikacji przyczyn rejestrowanych przestoju, zwłaszcza nieplanowanych, konieczne jest jednak posiłkowanie się także informacjami przekazywanymi przez dyspozytorów tych maszyn, lecz w tym zakresie należy podjąć dodatkowe działania (w postaci szkoleń) zwiększające świadomość pracowniczą. Wykorzystanie obu tych źródeł informacji powinno gwarantować pozyskanie wiarygodnych informacji o stanie badanych maszyn, istotnych dla służb nadzorujących ich eksploatację.

Przedstawione w opracowaniu wyniki badań jednoznacznie wskazują, iż w zakresie dostępności wykorzystania badanych maszyn górniczych istnieją spore rezerwy, a wartości wyznaczonych wskaźników są niezadowalające. W celu poprawy tej sytuacji zasadnym wydaje się dalsze prowadzenie badań oraz pełniejsze zdiagnozowanie przyczyn powodujących tak niskie wartości tych wskaźników.

Niniejszy artykuł jest wynikiem realizacji projektu badawczego nr PBS3/B6/25/2015 pt. „Wykorzystanie metody efektywności całkowitej dla poprawy efektywności pracy maszynowych kompleksów ścianowych w procesie eksploatacji węgla kamiennego”, realizowanego w latach 2015-2017 i finansowanego przez NCBiR.

LITERATURA

1. Czerwiński S., Biały W.: Wykorzystanie doraźnej diagnostyki w ocenie stanu technicznego maszyn i urządzeń górniczych. Systemy wspomaganie w inżynierii produkcji. Wspomaganie zarządzania systemami produkcyjnymi. Monografia, Gliwice, Wydawnictwo PA NOVA, 2013, s. 42-55.
2. Einicke G.A. i inni: Longwall Mininig Automation. An Application of Minimum-Variance Smoothing. IEEE Control Systems Magazine, nr 6, 2008.
3. Ljunberg Ö.: Measurement of overall equipment effectiveness as a basis for TPM activities. International Journal of Operations & Production Management, Vol. 18 Iss: 5, 1998, p.495-507.
4. Mazurek W.: Wskaźnik OEE – Teoria i praktyka. Wydanie II 2014 Neuron.
5. Nakajima S.: Introduction to TPM: Total Productive Maintenance.(Translation). Productivity Press, Inc., 129. 1988.
6. OEE dla operatorów. Całkowita efektywność wyposażenia, ProdPress, Wrocław 2009.
7. Przybyła H.: Ryzyko zakłócenia procesu wydobywania w warunkach ścian o wysokiej koncentracji produkcji. Przegląd Górniczy 9, 2009, s. 103-106.
8. Skotnicka-Zasadzień B.: Zastosowanie inżynierii jakości i niezawodności do analizy awaryjności obiektów technicznych na przykładzie maszyn i urządzeń górniczych. Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Monografia nr 542, Gliwice 2014.