

Rafał POLAK*

Adaptacja kluczowych miar efektywności strategii TPM w warunkach kopalni węgla kamiennego

Streszczenie: Podstawowe miary efektywności strategii TPM (ang. *Total Productive Maintenance*) mogą mieć potencjalnie zastosowanie w ocenie efektywności wykorzystania wyposażenia stosowanego w kopalniach węgla kamiennego. By to jednak było możliwe, niezbędne jest dopasowanie istniejących miar do specyficznych warunków cechujących działalność górnictwa.

W artykule zaproponowano podstawowe metody analizy danych oraz przeprowadzono adaptację zunifikowanych miar tworzących wskaźnik OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*). W drodze analizy statystycznej w sposób empiryczny określono korelacje i rozkłady prawdopodobieństwa zmiennych parametrów opisujących przebieg eksploatacji. Na bazie przyjętego modelu informacyjnego, opisującego przebieg procesów produkcji, dokonano przykładowej analizy przodków ścianowych. Szczegółowo opisano stosowane w tym celu metody analizy danych. Wstępnie zweryfikowano przydatność tego typu analiz oraz przedstawiono propozycje strukturalizacji danych dotyczących głównych kategorii strat produkcyjnych.

W wyniku realizacji pracy zaproponowano strukturę zgodną z modelem OLAP (ang. *OLAP cube*), umożliwiającą analizę danych za pośrednictwem narzędzi klasy BI (ang. *Business Intelligence*). Budowa jednolitego standardu informacyjnego w zakresie oceny efektywności wykorzystania podstawowych środków produkcji kopalń stanowi punkt wyjścia do budowy modelu, umożliwiającego dynamiczny szacunek kosztów cyklu życia tegoż wyposażenia.

Słowa kluczowe: efektywność pracy, analiza danych, maszyny górnicze, kompleks ścianowy, TPM, OEE, OLAP

Adaptation of key performance indicators of TPM strategy in underground coal mines

Abstract: Key performance indicators of TPM (*Total Productive Maintenance*) strategy may potentially be of use in evaluating the effectiveness of the primary equipment employed in underground coal mines. However, to make this possible, it is necessary to match the existing TPM measures to specific conditions which are characteristic for the mining industry.

* Mgr inż., Zakład Badań Rynku Surowcowego i Energetycznego, Instytut gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, Kraków, e-mail: polak@meeri.pl

This article proposes basic methods of data analysis and includes adaptation of unified measures constituting the OEE (Overall Equipment Effectiveness). Through the application of statistical analysis, the correlations and probability distributions of variable parameters describing the production process were determined. Analysis of example longwall systems was conducted based on the adopted information model describing the production processes. The article also describes the data analysis methods used for that purpose, and presents a structure model for the main categories of production losses. The study verified the usefulness of custom analysis.

As a result of this work, a structure compliant with the OLAP cube (allowing for data analysis using Business Intelligence tools) has been proposed. Building an information standard in assessing the effectiveness of primary production equipment is a starting point for the construction of a dynamic model which will allow the estimation of life cycle costs.

Key words: work efficiency, data analysis, mining machines, longwall system, TPM, OEE, OLAP

Wprowadzenie

Znamienny dla branży górniczej udział kosztów stałych oraz konieczność dysponowania rozbudowanym parkiem maszynowym, zobowiązuje funkcjonujące na rynku przedsiębiorstwa do realizacji ciągłej kampanii na rzecz wzrostu produktywności i redukcji kosztów prowadzonej działalności. W praktyce oznacza to utrzymanie wysokiej sprawności technicznej oraz wydajności produkcyjnej stosowanych w procesie produkcji maszyn i urządzeń górniczych. Osiągnięcie wymienionych celów wymaga bezwzględnej koncentracji na właściwym względem warunków eksploatacji, planów produkcyjnych i ponoszonych kosztów doborze środków produkcji oraz optymalizacji procesów ich użytkowania i obsługi.

Strategia TPM (ang. *Total Productive Maintenance*) to stosunkowo młoda, rozwijana od lat siedemdziesiątych ubiegłego wieku filozofia zarządzania. Angażuje ona służby utrzymania ruchu oraz operatorów w ciągły proces doskonalenia procesu produkcji poprzez prowadzone zespołowo działania, mające za zadanie maksymalizację potencjału produkcyjnego przedsiębiorstwa. Szczegółowo, ewolucja oraz obecne kierunki rozwoju strategii zostały opisane w literaturze (Nakajima 1984, 1989; Ahuja i Khamba 2008). Przedmiotem strategii TPM w odróżnieniu od TQM (ang. *Total Quality Management*) nie jest bezpośrednio jakość produktu, lecz wyposażenie – maszyny i urządzenia niezbędne do jego wytworzenia. Skoncentrowanie uwagi wokół procesu użytkowania i obsługi podstawowych środków produkcji, skutkuje w rezultacie zorientowaniem na przyczyny strat w zakresie efektywności wykorzystania posiadanych zdolności produkcyjnych. Strategia TPM często postrzegana jest na równi z *Lean Manufacturing*. Jej adaptacja bowiem, w pierwszej kolejności ukierunkowuje wszelkie działania na tworzenie wartości dodanej (produktu), co przekłada się na wypracowanie zysku dla przedsiębiorstwa. Realizacja produkcji zgodnie z filozofią TPM wymaga ciągłego doskonalenia i koncentracji na działaniach umożliwiających w dalszej perspektywie skuteczną prewencję, a więc zapobieganie wszelkim nieprawidłowościom w miejscu dotychczasowych działań, mających charakter korekcyjny. Jest to osiągalne za sprawą pełnego zaangażowania pracowników wszystkich szczebli w wielofunkcyjnych zespołach pracujących nad eliminacją zidentyfikowanych problemów na poziomie organizacji zadań produkcyjnych i obsługowych. Implementacja wymienionych wcześniej postulatów, podobnie jak całej filozofii, wymaga podejścia od góry do dołu (ang. *Top – down*). Kreowanie świadomości i zaangażowanie w proces ciągłego doskonalenia

powinno wobec tego rozpoczynać się od najwyższych szczebli zarządzania. Zarówno dla pracowników operacyjnych jak i kadry zarządczej ważną rolę odgrywać muszą mechanizmy oceny i afirmacji wyników w obszarze produkcji i efektywności pracy. Stanowią one powinny podstawowy element skutecznego systemu motywowania, ukierunkowanego na osiągnięcie zamierzonych efektów, a nie wyłącznie realizację samych działań.

W aspekcie pracy niezwykle istotne jest określenie miar oraz opracowanie metod analizy, które stanowiłyby wymierne wsparcie w ocenie efektywności wykorzystania podstawowych maszyn i urządzeń górniczych stosowanych w kopalniach węgla kamiennego. Miary te, umożliwiając powinny analizę wyników produkcyjnych w kontekście zunifikowanych miar efektywności pracy, co dawałoby możliwość m.in. sprawnego motywowania załóg produkcyjnych oraz budowę spójnego, kompleksowego zasobu wiedzy. W dalszej perspektywie, kluczowe miary efektywności stanowiąc powinny podstawę do określenia skali spodziewanych efektów związanych z realizacją różnorodnych działań optymalizacyjnych, poprzez dynamiczny szacunek kosztów cyklu życia wyposażenia oraz jednostkowych kosztów produkcji.

1. Analiza istotnych uwarunkowań i funkcjonalności bieżących systemów informacyjnych

Na przestrzeni ostatnich lat zaobserwować można ciągły rozwój techniki, a co za tym idzie wzrost kosztów wyposażenia wyrobisk (Przybyła 2009). Wraz ze wzrostem nakładów inwestycyjnych następuje wzrost kosztów odtworzenia zdolności produkcyjnych oraz kosztów utrzymania wyposażenia. Drastyczne spadki cen zbytu węgla i utrzymujące się wysokie koszty wydobycia w roku 2012 (Paszcza 2013), wymagają zwiększenia rentowności posiadanych aktywów i uziornienia kosztów operacyjnych. Wysoki udział kosztów stałych stanowi obecnie podstawową barierę efektywności górnictwa. Ich partycypacja w całkowitych kosztach produkcji jest zróżnicowana w poszczególnych kopalniach. Przeciętnie poziom kosztów stałych (w tym względnie stałych) szacowany jest na poziomie około 70%. Pokonanie tej bariery wymaga wzrostu koncentracji wydobycia, a więc modernizacji modelu kopalni, w tym optymalizacji jej kluczowych procesów, m.in. transportu załogi do przodka, zastosowania wysoko wydajnych i niezawodnych maszyn i urządzeń górniczych. Działania te wiążą się jednak z poniesieniem dodatkowych nakładów inwestycyjnych, na które znaczna część branży zwyczajnie nie może sobie pozwolić. Zmniejszenie jednostkowych kosztów produkcji w warunkach ograniczenia inwestycji, niezbędnych w celu odtworzenia zdolności produkcyjnych, wymaga więc podjęcia stanowczych kroków w zakresie poprawy efektywności wykorzystania posiadanego wyposażenia.

Cel ten możliwy jest do zrealizowania m.in. poprzez sprawnie działający system motywowania, premiujący efektywność zarówno w obszarze produkcji jak i bezpieczeństwa. Funkcjonowanie programów poprawy efektywności, systemu motywacyjnego, identyfikacja luk, zakłóceń i strat chronicznych występujących w procesie produkcji, nie są jednak możliwe bez skutecznych mechanizmów pomiaru efektywności.

Kompleks ścianowy stanowi układ znajdujący się bezpośrednio na początku łańcucha produkcji; w zdecydowanej mierze determinuje on wyniki produkcyjne, stąd też w aspekcie badawczym rozważany być powinien jako podstawowy przedmiot uwagi. W kopalniach

funkcjonują różnorakie systemy i kanały informacyjne, umożliwiające ewidencję podstawowych informacji o jego pracy. W znacznej części kopalń istnieje problem integracji informacji ewidencjonowanych w poszczególnych obszarach informacyjnych, m.in. raportów o awariach, postępie eksploatacji, czasach pracy maszyn, warunkach górniczo-geologicznych. Wynika to po części ze sposobu bezpośredniego delegowania zakresu odpowiedzialności na poszczególne, słabo skomunikowane ze sobą działy. Często istnieje silna klasyfikacja informacji na istotne – wykorzystywane w ramach realizowanych cyklicznie procesów – oraz te, nad którymi nadzór nie został jednoznacznie i trwale sformalizowany lub obejmuje dłuższy horyzont czasowy wykorzystując inne źródło danych.

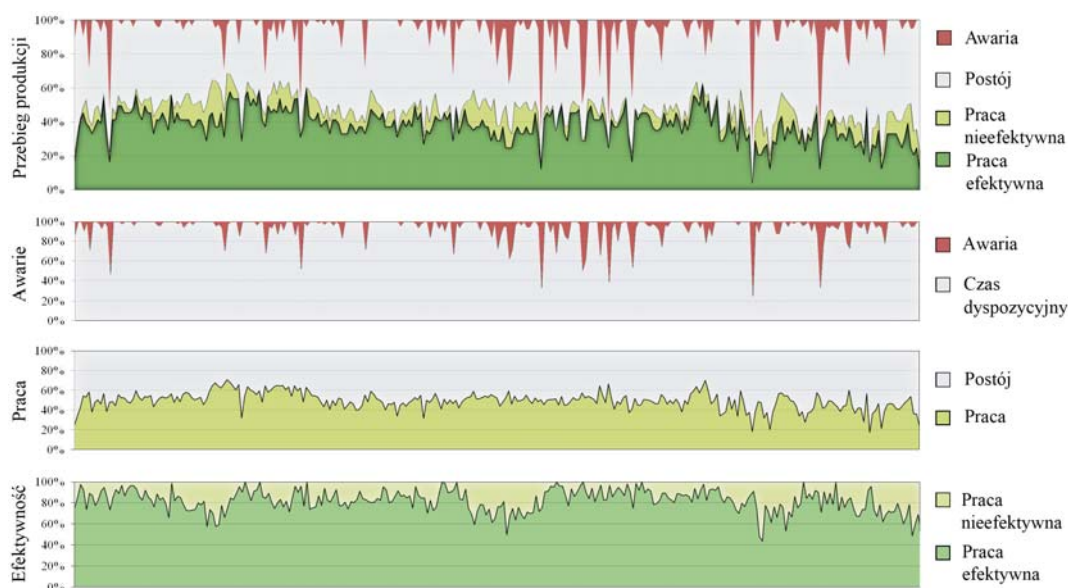
Sytuacja taka dotyczy m.in. raportów zmianowych z przodka ścianowego. Informacje te są zazwyczaj dostępne i wykorzystywane w sposób bieżący. W górnictwie węgla kamiennego brakuje jednak trwałych zasad i mechanizmów ich długookresowej analizy, skutkujących wypracowaniem jednolitego standardu informacyjnego. W rzeczywistości wiążące są wykonywane w znacznie dłuższym przedziale czasu odbiory, które stanowią znacznie bardziej wiarygodne źródło danych, pomimo że ich szczegółowość jest mocno ograniczona. Kontrola produkcji w krótszym horyzoncie czasowym najczęściej odbywa się co dobę na poziomie całego zakładu. Jest to informacja porównywalna i wiarygodna, jednak w żaden sposób nie umożliwia pomiaru efektywności, określenia poziomu strat oraz identyfikacji ich podstawowych przyczyn.

Istotnym wsparciem dla kadry zarządczej jest dostęp do systemów SCADA (ang. *Supervisory Control And Data Acquisition*). W odróżnieniu od rozwiązań klasy MES (ang. *Manufacturing Execution System*) systemy te umożliwiają śledzenie informacji w krótkim horyzoncie czasowym. Ponieważ wspomagają one kontrolę operacyjną, podstawowe wymagania względem ich funkcjonalności dotyczą wsparcia pracy dyspozytora w sposób *on-line* zarówno w zakresie utrzymania ruchu jak i kontroli parametrów bezpieczeństwa. W związku z czym nie posiadają one zintegrowanych narzędzi, umożliwiających analizę zgromadzonych danych w dłuższym przedziale czasu oraz z reguły cechują je ograniczenia w zakresie eksportu i opisu przechowywanych danych.

Wysoki udział kosztów stałych w całkowitych kosztach kopalni przemawia wprost za prezentacją kluczowych miar efektywności pracy kompleksów ścianowych w wymiarze czasowym. Biorąc przykład z najlepszych praktyk, zasadne wydaje się zastosowanie elementów stosowanej w branży produkcyjnej strategii TPM, a dokładnie zastosowanie wskaźnika równoważnego OEE (ang. *Overall Equipment Effectiveness*), który procentowo umiejscawia wszystkie miary efektywności na osi czasu. W ten sposób możliwa jest identyfikacja zarówno czasu tworzenia wartości dodanej (produkcji) jak i powstających w tym procesie strat. Podejście takie może być niezmiernie przydatne, mając na uwadze fakt, że w kopalni podziemnej czas niemalże wprost może być utożsamiany z ponoszonym kosztem.

Koncentracja na produktywności wyposażenia, znamienna dla strategii TPM, z pewnością znaleźć może zastosowanie w przypadku kopalń. Niemniej warunki charakteryzujące produkcję seryjną – w tym m.in. stacjonarność, znikoma ilość zmiennych losowych, ograniczony wpływ otoczenia – pozwalają na skrupulatne zaplanowanie i rozliczanie zadań produkcyjnych. W przypadku ruchomego układu produkcyjnego jakim jest kompleks ścianowy, pracującego w skrajnie nieprzyjazznych i niepewnych warunkach środowiskowych, procesy te są niezwykle utrudnione, a często wręcz niemożliwe. Stąd też harmonogramując lub rozliczając wydobywanie z poszczególnych ścian, za bezpieczny okres rozliczeniowy przyj-

muje się miesiąc. W krótszym horyzoncie następuje wzajemna koordynacja działań produkcyjnych w obrębie przodków ścianowych, celem osiągnięcia planowanych parametrów produkcji (w tym również jakości produktu handlowego) na poziomie całego zakładu. Planując lub rozliczając produkcję dla ściany, trudno jest egzekwować wykonanie normy, a nawet ją wyznaczyć na poziomie poszczególnych zmian roboczych. Ustalając za normę cząstkowe, proporcjonalne wartości wyliczone z planu miesięcznego, może się okazać, że w niektóre dni jej wykonanie wyniosło ponad 180%, a w inne zaledwie 11% (rys. 1). Dobowe wykorzystanie zdolności produkcyjnych maszyn górniczych charakteryzuje się bowiem dużą zmiennością w czasie.



Rys. 1. Przebieg produkcji dla przykładowego kompleksu ścianowego

Fig. 1. Production process for a sample longwall system

Obserwowany w górnictwie stopień wykorzystania czasu pobytu załogi w ścianie (TUD) zmienia się w zakresie od 30 do 90%, natomiast stopień wykorzystania proceduralnego (PUD) od 20 do 95% (Myszkowski i Paschedag 2008; Jaszczuk 2004, 2007). Różnice wynikają m.in. z sposobu organizacji produkcji, wystąpienia ograniczonych w czasie zakłóceń w postaci awarii, pogorszenia warunków górniczo-geologicznych, konieczności wykonania zaległych (cyklicznych) prac, które są niezbędne do realizacji dalszych zadań produkcyjnych.

Optymalizacja procesów zarządzania środkami produkcji w górnictwie z wykorzystaniem elementów filozofii TPM w pierwszej kolejności wymaga zdefiniowania systemu kontroli i miar efektywności wykorzystania potencjału produkcyjnego sprzętu. Trudno bowiem minimalizować straty pojawiające się w procesie produkcji bez właściwego i skutecznego systemu ich identyfikacji i oceny. Informacja z ruchu stanowiąca swoiste sprzężenie zwrotne stanowi podstawę oceny podjętych działań. Jej brak uniemożliwia całkowicie prowadzenie efektywnego zarządzania środkami produkcji. Aby móc kontrolować okres-

lone, kluczowe wskaźniki efektywności należy móc je mierzyć oraz obserwować ich zmiany w funkcji podjętych działań (cykl PDCA – ang. *Plan Do Check Act*).

2. Możliwości adaptacji kluczowych miar efektywności strategii TPM

Ponieważ w filozofii TPM główny przedmiot uwagi stanowi wyposażenie produkcyjne, podstawowe miary wykorzystania potencjału produkcyjnego stanowi wskaźnik całkowitej efektywności sprzętu – OEE oraz instalacji (zakładu) – OPE (ang. *Overall Plant Effectiveness*). Analiza podstawowych przyczyn strat ujętych we wskaźniku OEE umożliwia m.in. optymalny dobór programów obsługi sprzętu oraz doskonalenie procesów produkcyjnych (*kaizen*), co z kolei wpływa na wzrost całkowitej produktywności, a więc poprawę wskaźnika. Co istotne, uniwersalna budowa wskaźnika OEE umożliwia szeroko rozumiany *benchmarking* oddziałów wydobywczych, linii i układów produkcyjnych lub kopalń należących do grupy kapitałowej w dziedzinie różnorodnych działań związanych z produkcją. Nie bez znaczenia jest również możliwość odniesienia osiągniętych wyników do standardów i norm światowych, co w dalszej perspektywie skutkuje zobiektywowaną oceną, prowadzącą do adaptacji najlepszych praktyk na wzór liderów danej branży. Wielostopniowa budowa wskaźnika OEE umożliwia identyfikację poziomu głównych strat chronicznych, występujących w procesie produkcji. Wartość wskaźnika określa jak efektywnie wykorzystywany jest sprzęt oraz czas przeznaczony na produkcję.

Wskaźnik OEE obejmuje iloczyn trzech kluczowych miar: dostępności (ang. *Availability*), wydajności (ang. *Throughput Rate*) oraz jakości (ang. *Quality Rate*):

- Miara dostępności (ang. *Availability*) standardowo liczona jest jako stosunek czasu operacyjnego do harmonogramowego czasu pracy. Podstawowy wymiar strat dostępności stanowi czas nieplanowanego zatrzymania produkcji (ang. *Down-time Loss*).
- Miara wydajności określana jest poprzez odniesienie bieżącej wydajności do osiągalnej wydajności maksymalnej. Straty wydajności określane są jako utrata „prędkości” produkcji (ang. *Speed Loss*).
- Miara jakości obliczana jest na podstawie ilości wytworzonych produktów spełniających wymagania jakościowe w relacji do całkowitej produkcji. Straty związane z tym elementem opisywane są jako straty jakości (ang. *Quality Loss*).

Literatura krajowa i zagraniczna (Elevli 2010; Gustafson i in. 2011; Emery 1998; Burduk i Chlebus 2014) szeroko opisuje próby dopasowania elementów TPM do specyfiki górnictwa. Istnieje również szereg prac poświęconych zagadnieniom związanym z oceną efektywnego czasu pracy (Snopkowski 2009), efektywności cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych (Napieraj 2009).

Wartość wskaźnika OEE stanowi miarę wartości dodanej (ang. *Net Value Added*) utworzonej w harmonogramowym czasie pracy, który określony jest przez zapotrzebowanie na produkt (plany produkcyjne). Metodyka liczenia wskaźnika OEE nie uwzględnia zatem strat związanych z planowanymi przestojami. W przypadku górnictwa, supremacja kosztów stałych (m.in. utrzymanie wyrobisk, odwadnianie, przewietrzanie), mechanika górotworu oraz otoczenie wpływające na przyspieszone starzenie obiektów technicznych, przemawia za realizacją zadań produkcyjnych w sposób ciągły. Dni „czarne”, rozumiane jako dni z wydobyciem, stanowią podstawowy okres realizacji zadań produkcyjnych. Zwykle

obejmują one dwie do czterech zmian produkcyjnych i jedną konserwacyjną. Przydzielenie zadań dla zmian produkcyjnych jest elastyczne, plan pracy ulega bowiem zmianom w przypadku wystąpienia pewnych zdarzeń lub sytuacji, np. nieplanowany postój innej ściany, konieczność realizacji zaległych prac, wystąpienie trudnych warunków górniczych.

Proces wydobywania kopaliny w przodku ścianowym obejmuje zarówno postęp ściany jak i wykonywanie prac towarzyszących wydobywaniu. W trakcie czasu przeznaczony na produkcję realizowana jest m.in. bieżąca obsługa sprzętu (m.in. kontrola stanu technicznego, procedura uruchomienia) oraz szereg innych działań umożliwiających utrzymanie wyrobisk i zapewnienie ciągłości produkcji (m.in. wyrównywanie spągu, przebudowa lub likwidacja chodników przyścianowych, rabunek obudowy, przekładka przenośnika, kruszenie kęsów i udrażnianie dróg transportu, obryw i rozbijanie skał). Ze względów bezpieczeństwa bądź ograniczeń technologicznych wykonanie znacznej części prac wymaga zatrzymania produkcji. Czas realizacji prac oraz postoju określa rzeczywisty, dostępny czas, który może zostać przeznaczony na wydobywanie, stanowiący miarę gotowości technologiczno-organizacyjnej. Wymiar tego czasu nie podlega bezpośredniemu planowaniu, jego oszacowanie możliwe jest na poziomie kontroli operacyjnej. Równocześnie poza czasem awarii trudno jest jednoznacznie określić przyczynę zatrzymań produkcji. Szczegółowa ewidencja czasu realizowanych czynności i postojów innych niż awarie jest w praktyce niezwykle kłopotliwa.

Analizując wyłącznie czas pracy kombajnu, zauważyć można wyraźnie zmienną wydajność produkcji. Wynika to głównie z krótkich zatrzymań (m.in. trudności przy przedstawieniu obudowy, zmiana położenia ramion), start proceduralnych (m.in. wyrównanie końca ściany) oraz zmniejszenia postępu wynikającego z pogorszenia warunków górniczo-geologicznych (m.in. obecność skały pływającej, wydzielanie się metanu, zaciskanie obudowy zmechanizowanej).

Ostatecznie rozpatrywać można jakość realizowanej produkcji, gdzie za produkcję w pełni jakościową przyjąć można eksploatację w granicach pokładu. Poziom strat w takim układzie oznaczać powinien udział przybierki stropu i spągu wraz z opadem skał w całkowitej masie wydobytego urobku.

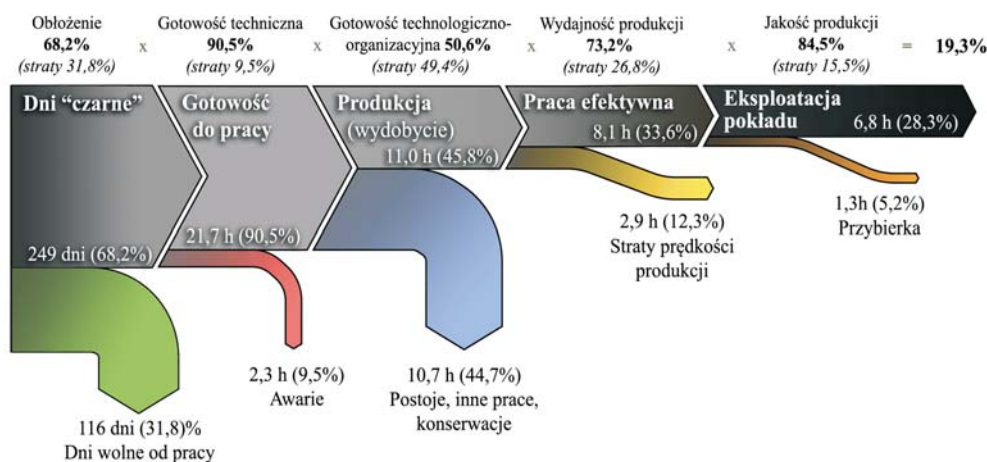
Wszystkie opisane składniki informacyjne są możliwe do pozyskania z obecnie funkcjonujących systemów informowania. Zasadniczo ich ewidencja sprowadza się do określenia: ile dni w analizowanym przedziale czasu stanowiły dni z produkcją oraz wyodrębnia wraz z określeniem udziału czasowego stanu: awarii, postoju i pracy. Składniki odwzorowujące wydajność i jakość produkcji oszacować można analizując parametry ścian, postęp i wagę wydobytego urobku w określonym czasie. Typową budowę wskaźnika OEE postanowiono zmodyfikować poprzez uwzględnienie obłożenia oraz wyszczególnienie informacji o awariach. Poszczególne elementy wskaźnika stanowią:

- obłożenie – miara planowanego wykorzystania dni kalendarzowych,
- gotowość techniczna – miara niezawodności i naprawialności, uwzględniająca czas awarii,
- gotowość technologiczno-organizacyjna – miara czasu postoju i realizacji innych prac,
- wydajność – miara drobnych zatrzymań i redukcji „prędkości” produkcji określana przez odniesienie do osiągalnej i wyznaczonej empirycznie wydajności maksymalnej (w artykule przyjęto średnią wartość wydajności produkcji dla 10% najlepszych wyników),
- jakość – miara tworzenia wartości dodanej (eksploatacja pokładu).

Na rysunku 2 za pomocą wykresu strumieniowego przedstawiono obliczony według przyjętej metodyki, zagregowany dla kilku ścian wskaźnik efektywności wykorzystania kompleksu ścianowego. Dane obejmują ściany z jednego zagłębienia, eksploatowane w ciągu ponad dwóch lat.

Zaproponowaną strukturę oraz kolejność poszczególnych poziomów strat określono poprzez przeprowadzenie oceny wpływu zmian poszczególnych miar efektywności, tj. weryfikację, czy zmniejszenie strat na poziomie n spowoduje względnie proporcjonalną zmianę czasu trwania stanów na poziomie $n + 1$. Pewne zastrzeżenia budzić może kolejność uwzględnienia gotowości technicznej i technologiczno-organizacyjnej. Przyjęty układ wynika zarówno ze sposobu ewidencjonowania czasu trwania awarii, jak również braku wyraźnej korelacji pomiędzy czasem produkcji a czasem awarii, rozpatrywanymi w dłuższej perspektywie.

Wystąpienie awarii jest nadrzędnym zdarzeniem losowym, jedynie w pewnym stopniu zależnym od procesów starzeniowych i innych czynników występujących wyłącznie podczas produkcji. Innymi słowy, całkowite zatrzymanie postępu ściany nie może być utożsamiane z osiągnięciem pełnej gotowości technicznej (wylimitowaniem awarii). Dodatkowo, za zastosowaniem przyjętego układu przemawia fakt, że poza czasem postojów i konserwacji, czas zatrzymań produkcji w celu realizacji wymaganych prac jest niemalże wprost uzależniony od postępów ściany, a więc przy stałej wydajności jest on proporcjonalny do czasu produkcji.



Rys. 2. Diagram strumieniowy przedstawiający bezpośrednie straty czasu produkcji

Fig. 2. Sankey's diagram showing the direct loss of production time

Należy pamiętać, że wzajemne porównanie przodków ścianowych ze względu na mocno zróżnicowany potencjał produkcyjny, powinno być zawsze wykonywane na bazie wielowymiarowych analiz, z uwzględnieniem wszystkich istotnych cech mogących wpłynąć na osiągnięte wyniki produkcyjne, m.in. miąższość pokładu, uciążliwość warunków, długość dróg transportowych.

3. Podstawowe statystyki charakteryzujące przebieg procesu eksploatacji

Optymalne planowanie produkcji w górnictwie stanowi nie lada wyzwanie z zakresu zarządzania ryzykiem, analizy kosztów oraz opłacalności nowych inwestycji w kontekście sytuacji na rynku. Podejmowanie decyzji w warunkach braku dostępu do pewnej informacji, jest niejako wpisane w charakter działalności górniczej. Dotyczy to zarówno warunków naturalnych, jak i parametrów eksploatacyjnych nowo zakupionych maszyn i urządzeń górniczych, takich jak dyspozycyjność, niezawodność, naprawialność, łączne koszty utrzymania i użytkowania.

Budowa trwałych i skutecznych mechanizmów analizy danych, pochodzących z przodka ścianowego, jest zatem niezmiernie istotna zarówno na poziomie bieżącej optymalizacji procesu produkcji, jak również zarządzania wiedzą. Uporządkowanie i usystematyzowanie informacji daje podstawę do empirycznego oszacowania kluczowych wskaźników efektywności planowanych ścian, jak również odgrywa istotną rolę na etapie wsparcia decyzyjnego.

W niniejszym rozdziale przedstawiono metody prezentacji i analizy danych na przykładzie przodków ścianowych z pojedynczego zagłębia o łącznym wybiegu wynoszącym ponad 10 km. W ramach przeprowadzonych badań przeanalizowano około 1000 dni produkcyjnych. Za pomocą bazy danych zestawiono i połączono podstawowe informacje dotyczące ścian z meldunkami o ich postępach, awariach oraz odczytami z czujników monitorowanych w systemach SCADA.

Tabela 1 prezentuje wyniki analizy danych zagregowanych w czasie na poziomie poszczególnych przodków (kompleksów) ścianowych. Rozpatrując dane zawarte w tabeli, zauważyć można znaczne różnice w średnim czasie awarii oraz wskaźniku MTBF dla poszczególnych kompleksów. Znacznym wahaniom podlega również względny czas produkcji, wynikający głównie ze sposobu organizacji zmian roboczych oraz pokonywanej przez załogę odległości do przodka. Jak zaobserwowano wahania wydajności jednostkowej powiązane są silnie z miąższością ściany oraz w ograniczonym stopniu zależą od jej długości. Obserwując niemalże stałą prędkość postępu ścian o zróżnicowanych gabarytach urabianej calizny węglowej, jest to w pełni uzasadnione.

W dalszej kolejności dokonano wzajemnej korelacji obliczonych uprzednio parametrów na poziomie poszczególnych dni produkcyjnych. Korelacje wykonano dla znormalizowanych wyników, charakteryzujących przebieg produkcji różnych ścian. Łącznie uwzględniono około 1000 obserwacji (dni produkcyjnych), wartość krytyczna R dla testu dwustronnego i $\alpha = 0,01$ wyniosła 0,082.

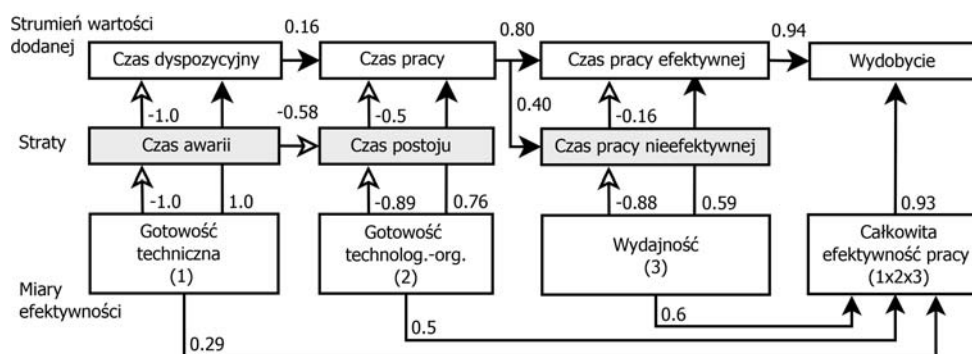
Poza oczywistymi związkami przyczynowo-skutkowymi (rys. 3) dostrzec można ujemną korelację pomiędzy dyspozycyjnością techniczną i technologiczno-organizacyjną ($r_s = -0,32$). Wytłumaczyć to można faktem, iż podczas wystąpienia awarii istnieje możliwość wykonania dodatkowych czynności, wymagających normalnie zatrzymania fedrunku. Podobnie w analizowanym zbiorze danych występuje dodatnia korelacja pomiędzy dyspozycyjnością techniczną a wydajnością produkcji ($r_s = 0,23$). Stąd też wysunąć można wniosek, że wystąpienie awarii chwilowo ogranicza zarówno czas wydobywania jak oddziałuje negatywnie na wydajność urabiania.

W dalszej kolejności analizie poddano rozkład zbioru obserwacji zanotowanych dla poszczególnych ścian. Trudno jednoznacznie przyporządkować typ rozkładu, jednak w zna-

TABELA 1. Wskaźniki statystyczne zagregowane na poziomie poszczególnych ścian

TABLE 1. Statistical indicators aggregated for each of the longwalls

Wyszczególnienie	Maks.	Min.	Średnia	Odchylenie standardowe	Wsp. zmienności
Średni czas awarii [h]	3,3	0,7	2,3	1,1	47,83%
Średni czas postoju [h]	15,7	8,7	10,7	2,8	26,17%
Średni czas pracy [h], w tym:	12,0	7,6	11,0	1,8	16,36%
Średni czas pracy efektywnej [h]	9,2	5,3	8,1	1,5	18,52%
Średni czas pracy nieefektywnej [h]	3,7	2,0	2,9	0,7	24,14%
MTTR [h]	3,3	1,6	2,7	0,7	25,93%
MTBF (dla czasu pracy kombajnu) [h]	18,1	9,6	13,2	3,5	26,52%
MTBF (dla czasu ogółem) [h]	55,3	17,2	20,7	15,8	76,33%
Postęp na godzinę pracy [m]	0,49	0,43	0,49	0,03	6,12%
Wydobycie na godzinę pracy (brutto) [Mg]	555,1	379,0	444,1	82,3	18,53%
Wydobycie dobowe w dni czarne (brutto) [Mg]	5 908,3	4 303,8	4 589,9	698,8	15,22%
Wykorzystanie czasu kalendarzowego [%]	69,6%	67,2%	68,2%	1,0%	1,47%
Gotowość techniczna (dyspozycyjność) [%]	97,3%	86,2%	90,5%	4,7%	5,19%
Gotowość technologiczno-organizacyjna [%]	57,8%	32,7%	50,6%	10,0%	19,76%
Prędkość (wydajność) produkcji [%]	82,2%	69,0%	73,2%	5,3%	7,24%
Jakość produkcji [%]	85,3%	83,6%	84,5%	0,6%	0,71%



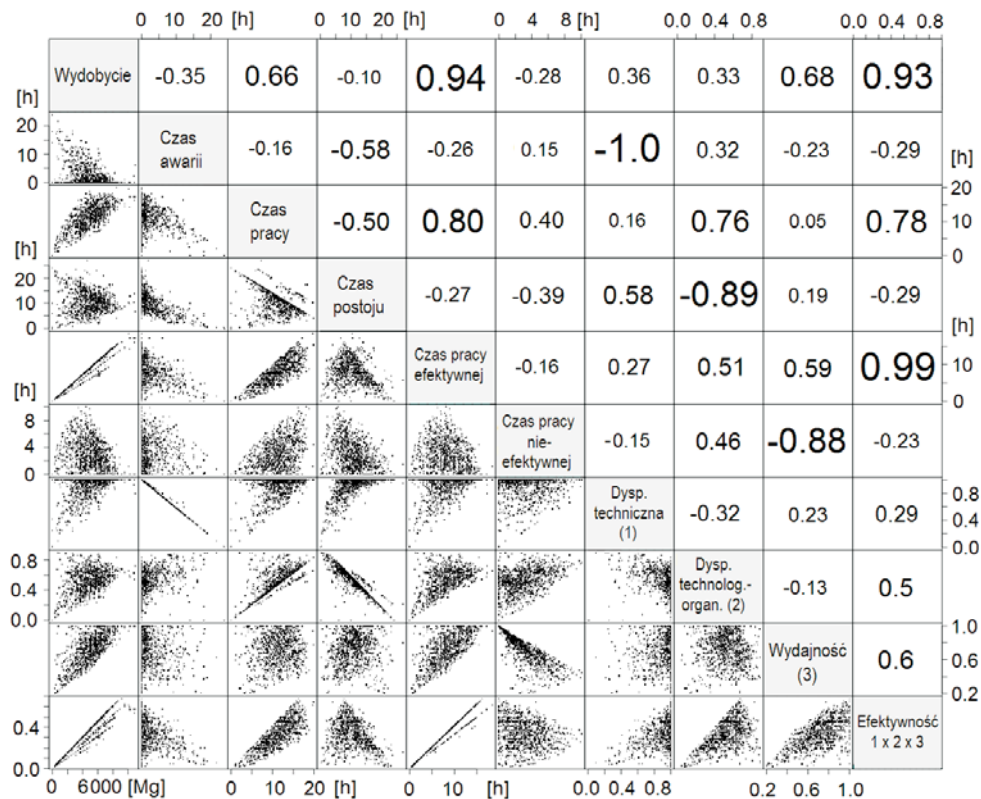
Rys. 3. Podstawowe związki przyczynowo-skutkowe i odpowiadające im korelacje

Fig. 3. Basic cause-effect relationships and the corresponding correlations

cznej części przypadków kształt rozkładu zbliżony jest do normalnego lub logarytmicznie normalnego. Rozkład logarytmicznie normalny, nierzadko możliwy jest do zaobserwowania w analizie obciążeń górniczych przenośników taśmowych. Przy stałej prędkości taśmy, pomijając opory własne, parametr ten w sposób liniowy zmienia się w funkcji ilości urobku, a więc stanowi równorzędną miarę poziomu produkcji.

TABELA 2. Współczynniki korelacji rangowej poszczególnych parametrów

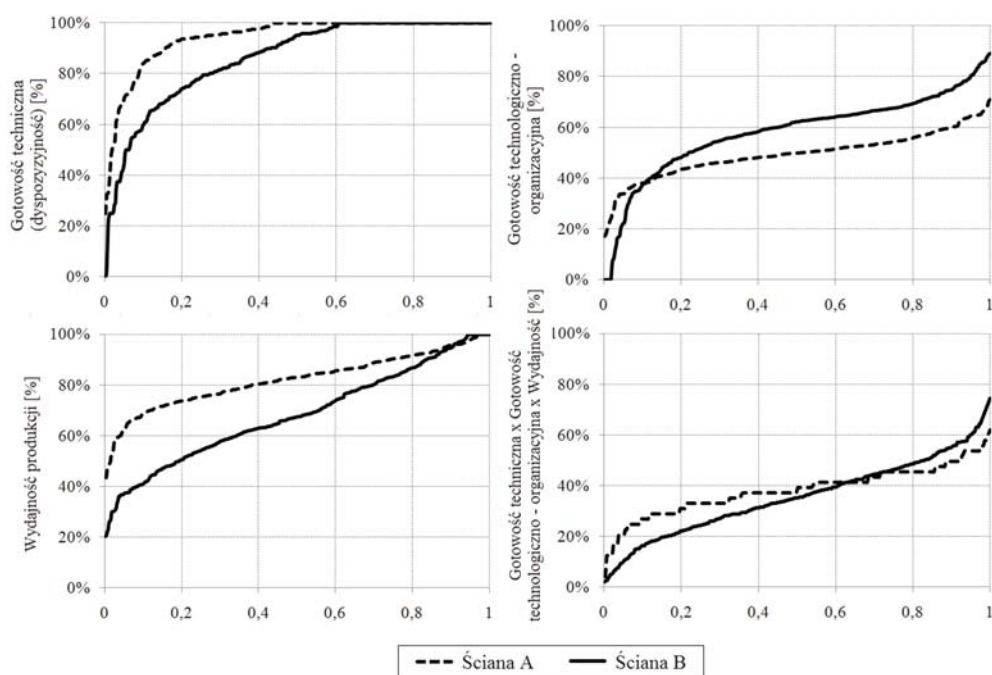
TABLE 2. Rank correlation coefficients of individual parameters



Na rysunku 4 i 5 zamieszczono wykresy uporządkowane bezwzględnych i względnych miar efektywności, sporządzone dla dwóch skrajnie różniących się przodków ścianowych. W pierwszym przypadku zamieszczono poziomy wydobywania i czasy trwania poszczególnych stanów, w drugim względne stopnie obliczania wskaźnika efektywności wykorzystania wyposażenia. Kształt rozkładów na rysunkach 4 i 5 jest zbliżony, tym niemniej zauważyć można pewne charakterystyczne przesunięcia i przeskalowania.

Porównując miary względne i bezwzględne zauważyć można bezpośredni wpływ parametrów i warunków prowadzenia ściany na uzyskiwane wyniki produkcyjne. Pomimo niemal identycznej średniej wartości wskaźnika wykorzystania sprzętu kompleksu ścianowy A ma istotnie lepsze wyniki produkcyjne od kompleksu B. Wynika to w zdecydowanej mierze z większej miąższości pokładu i mniejszej uciążliwości warunków górniczo-geologicznych, co w praktyce umożliwia osiągnięcie i utrzymanie wyższej wydajności produkcji. W tym miejscu zaznaczyć należy, że znajomość opisanych czynników jest potrzebna zarówno w celu identyfikacji i uwzględnienia prawidłowości, jak również jest konieczna do przeprowadzenia pełnego oraz wiarygodnego szacunku efektywności ekonomicznej przyszłych przedsięwzięć.

Skuteczny system informacyjny winien zatem realizować procesy ewidencji i wielowymiarowej strukturalizacji gromadzonych danych (np. zgodnie z wielowymiarowym mo-



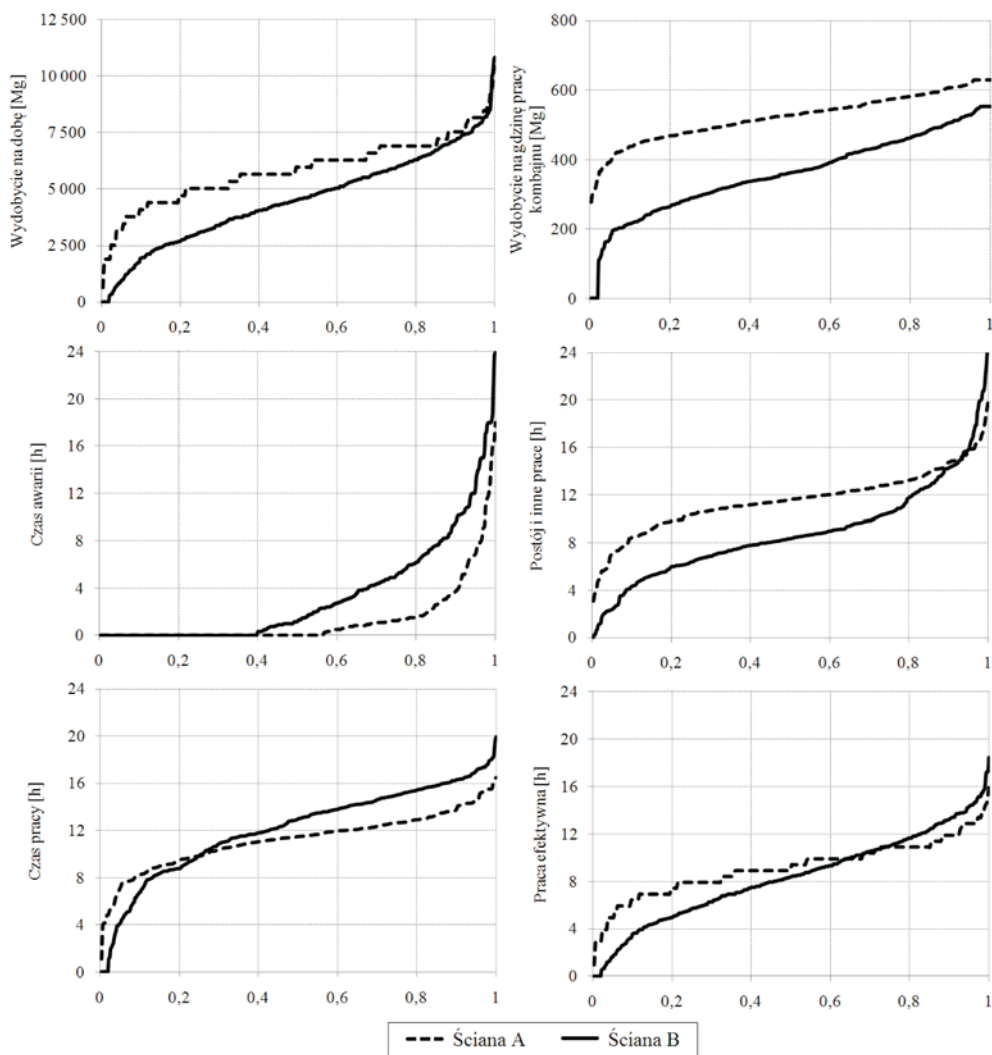
Rys. 4. Wykres uporządkowany względnych miar efektywności sporządzony dla dwóch różnych przodków ścianowych (oś X przedstawia udział w całkowitej liczbie zmian produkcyjnych)

Fig. 4. Sort in order diagram of relative performance measures drawn up for two different longwalls (X-axis shows the share of the total number of production shifts)

delem OLAP). Analiza kompleksowych baz danych daje bowiem potencjalne możliwości ujawnienia szeregu pozornie ukrytych informacji. Tworzenie tego typu zasobów wiedzy umożliwić powinno opracowanie systemów eksperckich, bazujących na doświadczeniach kopalni zanotowanych w ściśle określonych warunkach otoczenia, przy określonym systemie organizacji produkcji, zastosowanej technologii oraz doborze wyposażenia. Praktyczny przykład wykorzystania metod odkrywania wiedzy w dziedzinie doboru wyposażenia kompleksów ścianowych przedstawiony został w literaturze (Brzywczy 2009).

4. Mechanizmy analizy miar efektywności wykorzystania kompleksów ścianowych

Pewne problemy natury poznawczej ze względu na wpływ czynników losowych stwarza analiza szeregów czasowych oraz pełna identyfikacja korelacji, szczególnie tych nieliniowych lub niemonotonicznych. W przypadku badania wzajemnej zależności parametrów, czynniki losowe i wielorakie powiązania zaburzają wartość wskaźników korelacji liniowej i rangowej. Stosując test Kołmogorowa–Smirnowa dla dystrybuant w poszczególnych kwartylach badanej cechy, w znaczącym stopniu możliwe jest identyfikacja zależności. Niemniej, w przypadku analizy szeregów czasowych, rozwiązanie problemu wymaga opr-



Rys. 5. Wykres uporządkowany poziomu wydobycia i udziału poszczególnych czasów sporządzone dla dwóch różnych przodków ścianowych (oś X przedstawia udział w całkowitej liczbie zmian produkcyjnych)

Fig. 5. Set in order diagram of production levels and participation of each time drawn up for two completely different longwall systems (X-axis shows the share of the total number of production shifts)

cowania skutecznego rozwiązania w zakresie m.in. eliminacji lokalnych wahań parametrów, charakteryzujących przebieg procesu produkcji.

Analizując dane posłużono się następującą procedurą, wspomagającą ocenę korelacji i okresowych trendów w szeregach czasowych:

1. Próbkę opisaną miarami przypisaną dla danego okresu czasu (zmiany, doby) uszeregowano według wybranej cechy (w przypadku analizy szeregów czasowych – czasu).

2. Wybrane zostały dwa parametry, które następnie poddano sumowaniu, w efekcie czego uzyskano przebieg skumulowany zmiennej Y i X. Gdzie X dobrano jako parametr teoretycznie proporcjonalny do analizowanej wartości Y, np. (czas gotowości technicznej – czas produkcji; łączny czas zmian produkcyjnych – postęp, czas pracy kombajnu – wydobycie).
3. Umieszczone na płaszczyźnie punkty aproksymowano metodą lokalnej aproksymacji ważonymi najmniejszymi kwadratami MWLS (ang. *Moving Weighted Least Squares*) przy dobranym empirycznie stopniu wielomianu, liczbie węzłów w gwieździe i parametrach wygładzania.
4. Przeprowadzono różniczkowanie otrzymanej krzywej.
5. Otrzymane wartości i/lub odchylenia od prostej proporcjonalnej zaprezentowano na wykresie, przy czym na osi X umieszczone zostały kolejne numery próbek, wynikające z uszeregowania przeprowadzonego w pkt. 1 (dla szeregów czasowych – jednostka czasu).

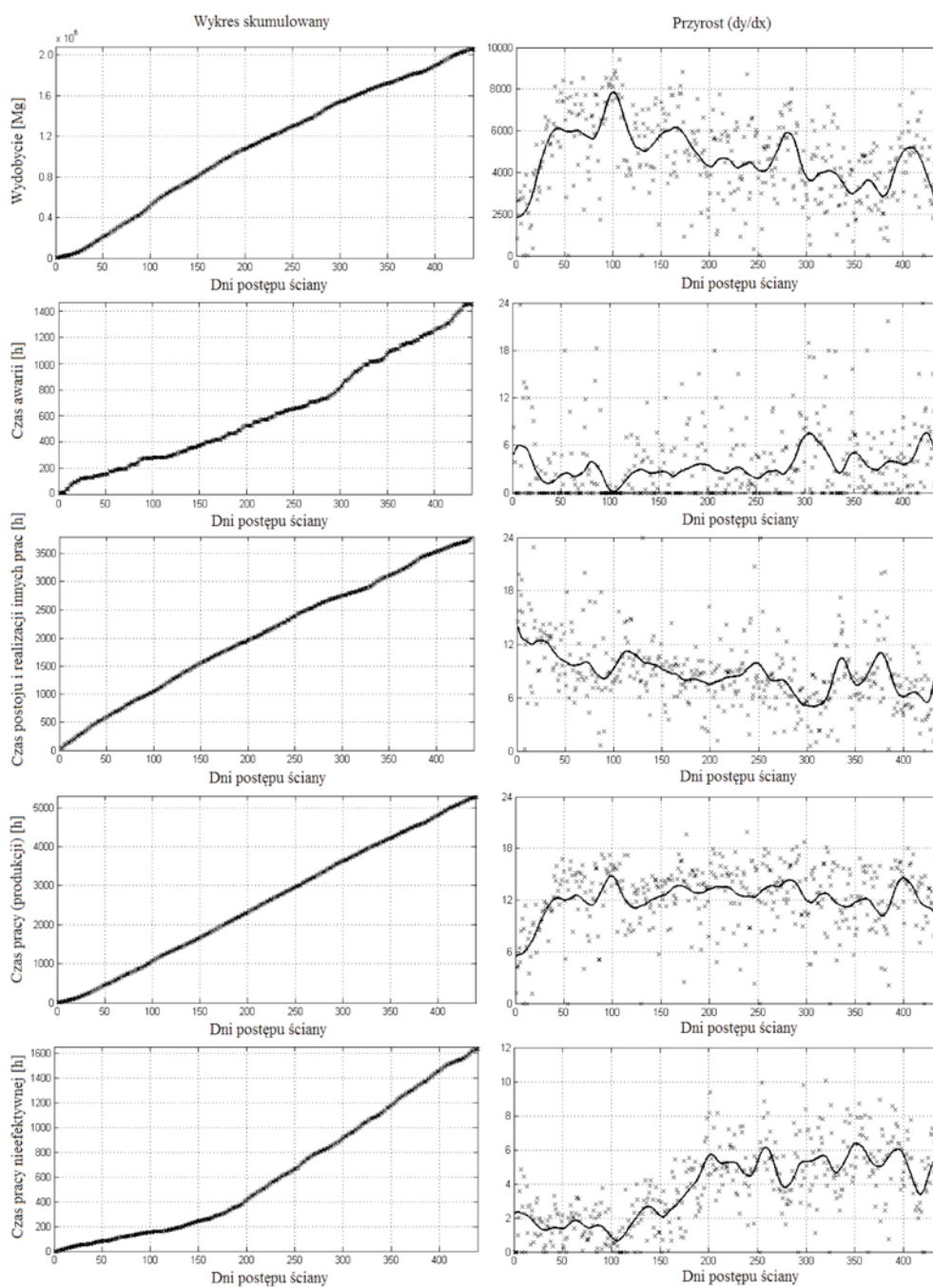
W celu identyfikacji wzajemnych zależności, opisana metoda służyła do oceny kształtu dystrybuanty, uporządkowanej uprzednio według wartości wybranego parametru. Korelacje niemonotoniczne, możliwe były do uchwycenia na wykresie pochodnej, natomiast test na zgodność przeprowadzany był na wykresie skumulowanym w odniesieniu do prostej proporcjonalnej.

Stosując aproksymację MWLS wyeliminowano istotne ograniczenia (okresowość, problemy przy krawędziach) domyślnie stosowanej w podobnych przypadkach średniej ruchomej. Stosując wykres skumulowany, zapewniono prosty i przejrzysty sposób weryfikacji przebiegu krzywej aproksymującej kolejne próbki oraz zapewniono zgodność sum całkowitych. Przez wprowadzenie parametru X domyślnie proporcjonalnego do Y – wykluczono potrzebę stosowania dodatkowych przekształceń analizowanej wartości w przypadku wystąpienia więcej niż jednej korelacji. Działanie metody pozwoliło na uwzględnienie lokalnych zakłóceń i wahań przy jednoczesnym zwiększeniu czytelności przebiegu procesów produkcji.

Na rysunku 6, stosując opisaną uprzednio metodę, wyznaczono przebieg podstawowych parametrów efektywnościowych, w tym wydobycia dobowego brutto. Rysunek 7 przedstawia podstawowe miary efektywności, służące do wyznaczenia ogólnego wskaźnika wykorzystania wyposażenia, sporządzone dla tego samego przedziału czasu i ściany z zastosowaniem tożsamej metody.

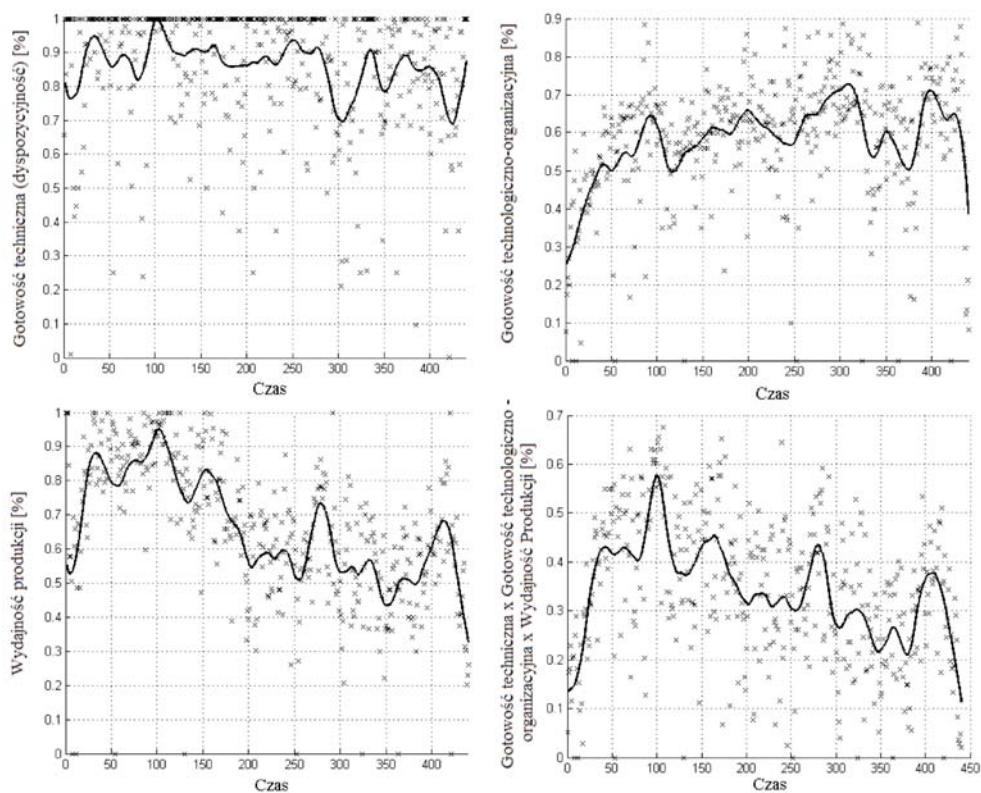
Spadek jednostkowej wydajności produkcji zauważyć można obserwując wzrost nieefektywnego czasu pracy (rys. 6) jak i spadek wydajności produkcji (rys. 7). W tym konkretnym przypadku czynnik ten stanowi podstawową przyczynę ograniczenia dobowego wydobycia. Zmienność tę w funkcji czasu zobrazowano za pomocą wykresu 3D, zamieszczonego na rysunku 8. Do aproksymacji płaszczyzny wykorzystano ponownie metodę MWLS.

Analizując poszczególne przedziały czasu, zauważyć można ścisłą korelację wydobycia oraz czasu pracy, co przy ograniczonym wpływie strat wydajności jest uzasadnione. Możliwe do zaobserwowania jest również całkiem wyraźne zmniejszenie wydajności produkcji dla krótszych czasów pracy kombajnu. Zależność tę tłumaczyć można zwiększonym udziałem stałych strat proceduralnych, które kompensowane są przy dłuższym czasie produkcji, co przekłada się w rezultacie na jednostkowy wzrost wydajności. W ograniczonym zakresie stanowić to również może konsekwencję awarii, których wystąpienie ogranicza zarówno czas jak i wydajność produkcji (rys. 2).



Rys. 6. Wyniki zastosowania procedury przetwarzania danych dla poziomu wydobywania i udziału poszczególnych czasów przykładowego przodka ścianowego

Fig. 6. The results of the data processing procedures for the level of production and the contribution of each time in the example longwall system



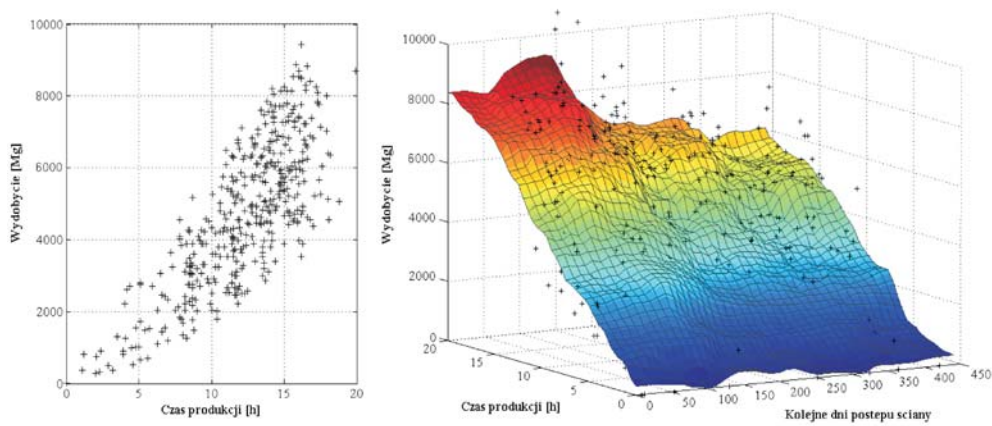
Rys. 7. Podstawowe miary efektywności przykładowego przodka ścianowego (opracowanie własne)

Fig. 7. Key performance indicators for the example longwall system

Opisana procedura pozwoliła na zupełnie wiarygodne wyliczenie wpływu poziomu wydobywania na liczebność i całkowity czas trwania awarii. Jak ustalono na bazie dostępnych danych, zmniejszenie poziomu wydobywania może ograniczyć awaryjność, lecz wyłącznie w wymiarze czasu. Przeliczając czas awarii na postęp ściany lub wydobywanie, względny wskaźnik gotowości technicznej ulega znacznemu pogorszeniu (rys 9).

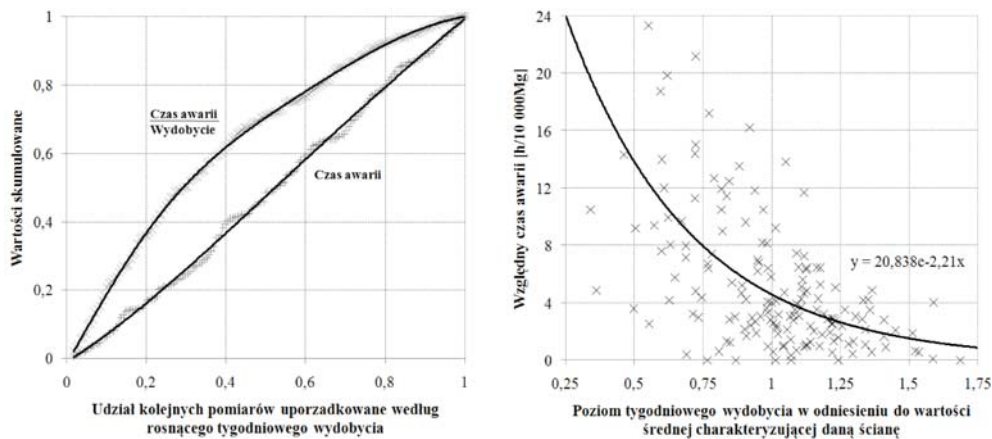
Wykonując analizę zastosowano tygodniowy okres agregacji danych. Ze względu na fakt, że wydobywanie jest parametrem wtórnym w stosunku do dyspozycyjności (gotowości technicznej), jego wartość zanotowana w krótszym okresie agregacji może być w sposób bezpośredni ograniczona przez wystąpienie awarii. W konsekwencji prowadzić by to mogło do wysunięcia zupełnie odwrotnych wniosków. Istotne jest zatem, aby analizując korelację określić horyzont czasowy zjawisk oraz wzajemne oddziaływanie wyodrębnionych stanów układu w przypadku wystąpienia zdarzeń losowych bądź innych zaburzeń w krótszych okresach dekretacji danych.

Łącznie w ramach badań przeanalizowano ponad 850 awarii kompleksów zmechanizowanych. Dane te oprócz obliczeń wymiaru czasowego posłużyły do określenia rozkładów średniego czasu do awarii – MTBF (ang. *Mean Time Between Failures*) oraz średniego czasu do odzyskania zdolności (naprawy) – MTTR (ang. *Mean Time To Repair*) (rys. 10).



Rys. 8. Zależność czasu produkcji (pracy kombajnu) i wydajności w kolejnych dniach postępu ściany

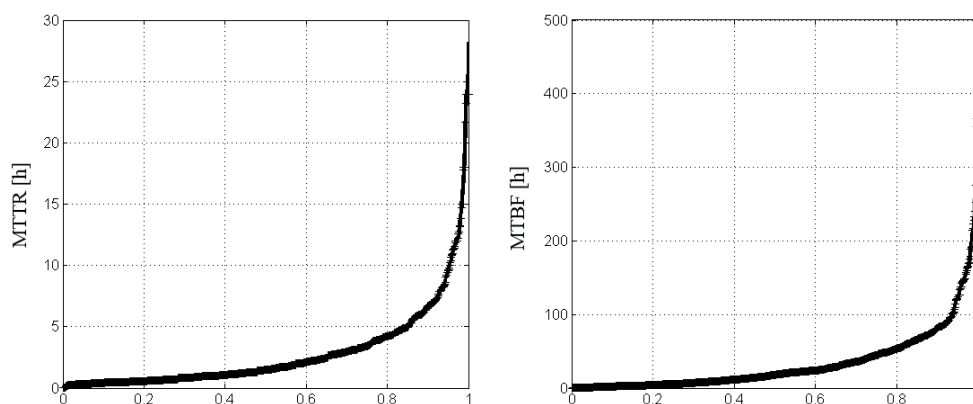
Fig. 8. The dependence of production time (of work combine) and performance on consecutive days of production



Rys. 9. Zależność względnego czasu awarii (przeliczonego na wydobyte) w funkcji poziomu wydobycia

Fig. 9. The dependence of the relative time of failure (converted into mining) as a function of the level of production

Dokonując podstawowej analizy danych, zauważyć można wprost konieczność rozpatrywania poszczególnych miar w co najmniej dwóch wymiarach: czasu i postępu ściany. Analiza awarii w funkcji czasu i postępu, przy ograniczeniu poziomu wydobycia, pozwala na wyciągnięcie zupełnie odmiennych wniosków względem istniejących zależności. Realizacja znacznej części prac, wystąpienie trudnych warunków górniczo-geologicznych oraz ponoszone koszty, w istotnym stopniu uwarunkowane są bowiem postępem ściany. Traktując ścianę jako przedsięwzięcie zasadne jest zatem, aby zmienność poszczególnych miar efektywności rozpatrywać zarówno w funkcji czasu jak i stopnia jego realizacji, zdefiniowanego przez bieżący postęp eksploatacji.



Rys. 10. Wykres uporządkowany podstawowych wskaźników niezawodności i naprawialności – średniego czasu pomiędzy awariami – MTBF i średniego czasu do naprawy – MTTR (oś X przedstawia udział w całkowitej liczbie zmian produkcyjnych)

Fig. 10. Set in order diagram of basic indicators of reliability and maintainability – Mean Time Between Failures – MTBF and Mean Time To Repair – MTTR (X-axis shows the share of the total number of production shifts)

Podsumowanie

W artykule zaproponowano przykładowe metody analizy oraz prezentacji danych ewidencjonowanych w systemach informacyjnych przedsiębiorstw górniczych. Opracowanie standardów informacyjnych w tym zakresie z pewnością pozwoli w przyszłości na przeprowadzenie znacznie bardziej skomplikowanych analiz, w tym z zastosowaniem zaawansowanych technik eksploracji i drażenia danych (ang. *Data Mining*). Pełna eliminacja luki informacyjnej wynikającej z różnicy pomiędzy bieżącym poziomem informacyjnym a poziomem wymaganym do prawidłowej identyfikacji problemów, jak ustalono wymaga zastosowania wielokryterialnych metod analizy gromadzonych danych (architektury hurtowni danych).

Analizując bieżący system raportowania, stwierdzono konieczność usystematyzowania gromadzonych danych poprzez ich właściwą strukturalizację. Przykładowo, w odniesieniu do opisów awarii uzasadnione wydaje się wprowadzenie dwóch poziomów przypisań do konkretnych elementów wyposażenia przodków ścianowych, m.in. kombajn–układ sterowania, przenośnik ścianowy–napęd. W dalszej kolejności przydatne wydaje się dodanie dwóch poziomów opisu zdarzenia np. zadziałanie blokady – przekroczenie temperatury oraz konieczność przypisania jej właściwej kategorii, m.in. górnicza, hydrauliczna, mechaniczna, elektryczna.

W wyniku przeprowadzonej analizy danych określono podstawowy zakres informacyjny zgodny z modelem OLAP. W zakresie faktów (miar) wyszczególniono podstawowe elementy:

- wykonana praca: postęp, wydobywanie, liczba cykli, wychód surowego węgla,

- profil geologiczny calizny: przerosty, przybierka (głębokość, masa),
- czas trwania stanów: planowany postój, awaria (ze szczegółowym podziałem na kategorie i rodzaj), postój i inne prace, praca nieefektywna, praca efektywna,
- miary efektywności (obliczane w sposób automatyczny): obłożenie, gotowość techniczna, gotowość technologiczno-organizacyjna, efektywność (prędkość) produkcji, jakość,
- ocena uciążliwość warunków (wg stosownej procedury),
- czas i zakres wykonywanych prac dodatkowych (wg stosownej procedury),
- ograniczenie produkcji (iloczyn czasu wystąpienia i stopnia ograniczenia).

Jako podstawowe cechy (wymiary) kostki zdefiniowano:

- czas: rok, miesiąc, dzień, dzień tygodnia, okres dekretacji,
- ściana: nazwa, pokład, poziom, oddział, wybieg, długość, miąższość, zagrożenia pyłowe i metanowe, gabaryty chodników, warunki spągowe i stropowe, pofałdowanie pokładu, zaburzenia pokładu (uskoki), przerosty, nachylenie ściany, warunki prowadzenia (np. ściana zamykająca), twardość węgla, rodzaj węgla, uzysk węgla handlowego, średnia kaloryczność, postęp od pocz. eksploatacji,
- organizacja: dzień z produkcją (t/n), liczba zmian, czas trwania zmian, liczba zmian produkcyjnych, czas trwania zmian produkcyjnych, długość dróg transportowych, transport załogi (długość drogi pokonywanej pieszo), numer załogi, liczba pracowników,
- wyposażenie: technologia urabiania, producent i typ wyposażenia, prędkość i głębokość urabiania, rodzaj sterowania.

Większość opisanych danych jest dostępna w istniejących systemach informacyjnych i podlega ewidencji. Przykładowo, rejestrując ręcznie czas awarii oraz w pełni zdalnie czas pracy kombajnu, czas postoju może być wyliczany automatycznie na podstawie ilości i czasu trwania zmian roboczych. Podobnie identyfikacja warunków geologicznych w przyszłości powinna być możliwa za pośrednictwem cyfrowych modeli złoża i systemów wspomagających profilowanie. Synergia danych możliwa będzie w obie strony, ponieważ sam proces harmonogramowania będzie mógł uwzględniać empirycznie potwierdzone wskaźniki osiągalnego poziomu wydobycia w poszczególnych pokładach i warunkach eksploatacji.

Odrębne zagadnienie stanowi ekonomiczna ocena efektywności pracy wyposażenia, a więc uzupełnienie opisanych struktur o koszty prowadzonej działalności. Uwzględnienie wydatków na poziomie poszczególnych jednostek dekretacji, takich jak dzień lub zmiana robocza, wymaga bowiem zastosowania specjalnego podejścia. Wynika to z potrzeby eliminacji naturalnych rozbieżności będących efektem sposobu dekretacji kosztów, w odniesieniu do faktycznych miejsc i okresu ich powstawania. Zagadnienie to stanowić będzie przedmiot kolejnego artykułu poświęconego tej tematyce, obejmującego zagadnienie dynamicznego szacunku kosztów cyklu życia podstawowych środków produkcji.

Artykuł ten jest efektem realizacji pracy statutowej: Zastosowanie strategii TPM oraz analizy kosztów cyklu życia obiektów energomechanicznych w optymalizacji procesów zarządzania podstawowymi środkami produkcji kopalń

Literatura

- Ahuja, I.P.S. i Khamba, J.S. 2008. Total productive maintenance: literature review and directions. *International Journal of Quality&Reliability Management* Vol. 25 No. 7.
- Burduk, A. i Chlebus, T. 2014. Zastosowanie elementów Total Productive Maintenance w Komorze Maszyn Ciężkich w kopalni miedzi. Materiały XXIII Szkoły Eksploatacji Podziemnej.
- Brzychczy, E. 2009. Analiza wyposażenia przodków ścianowych na podstawie reguł asocjacyjnych. *Wiadomości Górnicze* 3.
- Elevli, S. i Elevli, B. 2010. Performance Measurement of Mining Equipments by Utilizing OEE. *Acta Montanistica Slovaca* t. 15, nr 2.
- Emery, J.C. 1998. Improving coal mining production performance through the application of Total Production Management. COAL98 Conference Wollongong.
- Gustafson, A., Schunnesson, H., Galar, D. i Mkemai, R. 2011. TPM framework for underground mobile mining equipment; A case study. 20th International Symposium on Mine Planning and Equipment Selection.
- Jaszczuk, M. 2004. Czynniki techniczno-organizacyjne determinujące wykorzystanie przodka ścianowego. *Maszyny Górnicze* 4.
- Jaszczuk, M. 2007. Operational productivity of shearer loaders. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa* 8.
- Myszkowski, M. i Paschedag, U. 2008. Longwall Extraction of Medium Thickness Coal Seams. www.bucyrus.com/resources_prdf.htm.
- Nakajima, S. 1984. Introduction to TPM. Productivity Press.
- Nakajima, S. 1989. TPM Development Program. Productivity Press.
- Napieraj, A. 2009. Koncepcja efektywności cyklu produkcyjnego realizowanego w przodkach ścianowych kopalń węgla kamiennego. *Przegląd Górniczy* 9.
- Paszcza, H. 2013. *Raport na temat górnictwa węgla kamiennego w Polsce w roku 2012*. XXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej.
- Przybyła, H. 2009. Ryzyko zakłócenia procesu wydobycia w warunkach ścian o wysokiej koncentracji produkcji. *Przegląd Górniczy* 9.
- Snopkowski, R. 2009. Próba oceny wpływu niestabilności efektywnego czasu pracy w ścianie na uzyskane wydobycie na podstawie badań modelowych. *Przegląd Górniczy* 9.