Transport
przemysłowy i maszyny robocze

Cyfrowa rewolucja w transporcie przenośnikowym – taśma przenośnikowa 4.0

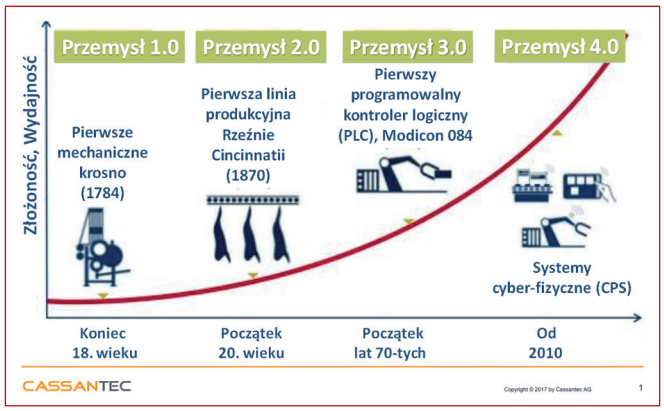
Digital Revolution in Belt Conveying – Conveyor Belt 4.0

Leszek Jurdziak, Ryszard Błażej, Mirosław Bajda

W okresie rewolucji cyfrowej, określanej mianem Przemysłu/Górnictwa 4.0, zwiększa się znaczenie informacji o pracy i stanie obiektów w systemach transportowych. Taśma przenośnikowa generuje do 60% kosztów transportu. Jej awaria pociąga za sobą nie tylko wysokie koszty naprawy, lecz również może spowodować wysokie straty produkcyjne, związane z długotrwałymi postojami awaryjnymi. Zastosowanie różnych sensorów monitorujących stan taśmy i połączeń umożliwia wskazanie optymalnych momentów wymian redukujących koszty użytkowania taśm, np. poprzez jej opłacalną regenerację. Bieżące monitorowanie pracy taśm zapobiega kosztownym awariom. Integracja danych z wielu źródeł pozwala nie tylko na racjonalną ekonomicznie gospodarkę taśmami w kopalni, lecz również może być wykorzystana do optymalizacji produkcji. Dane z systemów automatyki i wag pozwalają na stosowanie bardziej precyzyjnych miar trwałości taśm, jak np. efektywny czas pracy, liczba cykli i ilość przeniesionej masy. Informacje te mogą być wykorzystane do sterowania procesem mieszania urobku na taśmach w procesie ich transportu. Dla elektrowni ważne są bowiem nie tylko ilości przeniesionych mas węgla w danym okresie, ale również rozkład jakości węgla w czasie. Im więcej danych o procesie transportu jest zbieranych tym lepiej można je wykorzystać. Obecnie wiele cyfrowych danych o taśmach i połączeniach jest już w kopalniach dostępnych, na bieżąco rejestruje się też wiele danych o pracy systemów transportowych. Brakuje ich integracji i pełnego wykorzystania. Warto też rozważyć możliwość uzupełnienia już posiadanych danych o nowe informacje z nowych urządzeń i sensorów, np. z takich systemów, jak DiagBelt itp. Ich wizualizacja na ekranach synoptycznych lub wielkich monitorach w centrach kierowania ruchem (centrach dyspozytorskich, tzw. control rooms) wzbogaciłaby wiedzę o systemie transportowym. Wizja autonomicznego systemu przenośników taśmowych, realizującego zadania transportowe i sterującego jakością dostarczanego urobku w warstwie fizycznej i informatycznej wraz z zamówieniami prac serwisowych i wymian taśm przez internet, wcale nie musi być odległa w świetle polskich i niemieckich dokonań. Artykuł jest rozwinięciem wystąpienia autorów na X Międzynarodowym Kongresie Węgla Brunatnego w Bełchatowie z kwietnia br. [30].

Przemysł 4.0

Pojęcie Przemysł 4.0 oznacza czwartą z kolei rewolucję przemysłową, która dokonuje się właśnie na naszych oczach (rys. 1).



Rys. 1 Rewolucje przemysłowe na skali czasu wg firmy Cassantec [44]

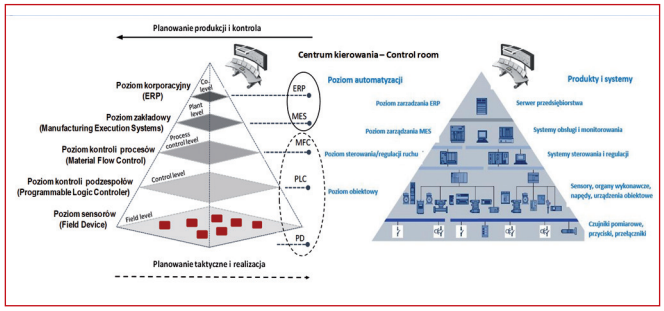
Na portalu [60] opisano je następująco:

- Przemysł 1.0 Mechanizacja – wynalezienie i wdrożenie mechanicznego sterowania (krzywek), a zwłaszcza silnika parowego wprowadziło produkcję w erę industrializacji.
- Przemysł 2.0 Elektryfikacja – elektryczność wyparła silniki parowe, zaś linie produkcyjne mogły seryjnie wytwarzać dużą ilość towarów. Pojawiły się pierwsze linie produkcyjne z przenośnikami, a informacje zaczęto zapisywać na perforowanych kartach.
- Przemysł 3.0 – Automatyzacja/Cyfryzacja – wydajne komputery i układy przetwarzania danych umożliwiły sterowanie maszynami za pomocą oprogramowania. Dzięki temu maszyny zyskały większą wydajność, precyzję i elastyczność, a proces cyfryzacji umożliwił osiągnięcie coraz wyższych stopni automatyzacji. Zaczęły powstawać systemy planowania i kontroli, których celem była koordynacja działań w obrębie produkcji.
- Przemysł 4.0 – Integracja inteligentnych maszyn i systemów w sieciach. Integracja ludzi oraz cyfrowo sterowanych maszyn z Internetem Rzeczy (przemysłowym) i technologiami informacyjnymi. Materiały produkowane lub wykorzystywane do produkcji można zawsze zidentyfikować, mają one także możliwość niezależnego komunikowania się między sobą. Przepływ informacji

jest realizowany w pionie: z poszczególnych komponentów do działu IT przedsiębiorstwa oraz z działu IT do komponentów. Drugi kierunek przepływu informacji jest realizowany w poziomie: pomiędzy maszynami zaangażowanymi w proces produkcji a systemem produkcyjnym przedsiębiorstwa. Wyróżnia się sześć zasad projektowania implementacji na potrzeby Przemysłu 4.0: interoperacyjność, wirtualizacja, decentralizacja, możliwości działania w czasie rzeczywistym, orientacja na zapewnienie usług i modułowość.

Termin Przemysł 4.0 wprowadzono w Niemczech na początku 2011 r., gdy stowarzyszenie przedstawicieli biznesu, polityki oraz uczelni akademickich zaczęło promować tę ideę jako podejście do wzmacniania konkurencyjności niemieckiego przemysłu wytwórczego. Niemiecki rząd federalny ogłosił, że Industrie 4.0 będzie integralną częścią „Strategii zaawansowanych technologii 2020 dla Niemiec", inicjatywy, mającej na celu zapewnienie przywództwa w zakresie innowacji technologicznych [25].

Trzecia rewolucja jest ciągle obecna, ale następuje jej płynna transformacja w erę Przemysłu 4.0, czasami nazywaną również Inteligentnym przemysłem (Smart industry) czy też erą Rewolucji cyfrowej (Digital revolution/ Digital factory).



Rys. 1 Koncepcja piramidy automatyzacji – ukoronowanie 3. rewolucji i podstawa rozwoju cyfrowego w erze Przemysłu 4.0 [6, 58]

Proces transformacji w różnych branżach i krajach zachodzi z różną prędkością w zależności od stopnia rozwoju gospodarki, nowoczesności przemysłu, zaawansowania technologicznego i nakładów na B+R. Pokażemy, na tle rozwiązań światowych, że w zakresie transportu przenośnikowego, a zwłaszcza taśm przenośnikowych nie wypadamy źle, choć warto kontynuować rozwój nowoczesnych i wasnych rozwiązań.

Górnictwo 4.0

Górnictwo 4.0 – to idea Przemysłu 4.0 przeniesiona na grunt górnictwa. Profesor Paschedag na konferencji Bergbau 4.0 w Aachen [49] opisał tę ideę następująco:

- Maszyny górnicze, urządzenia, czujniki i ludzie mogą się ze sobą łączyć i komunikować.
- Dane z sensorów zasilają systemy informatyczne cyfrowej kopalni, tworząc jej obraz VR.
- Systemy wsparcia technicznego pomagają górnikom, dostarczając zagregowane, wizualne i zrozumiałe informacje, by umożliwić szybkie podejmowanie decyzji w oparciu o fakty. Górnicy są fizycznie wspierani w trudnych, niewygodnych lub niebezpiecznych pracach.
- Systemy cyberfizyczne w górnictwie są w stanie samodzielnie podejmować decyzje i wykonywać swoją autonomiczną pracę. Jedynie wyjątkowo (tj. przy incydentach lub konfliktach docelowych) zadania są przekazywane człowiekowi.

Idee te można implementować do ciągłych systemów transportowych, a nawet wręcz do jednego z elementów systemów, czyli taśmy przenośnikowej.

Transport taśmowy 4.0

Współczesne rozwiązania techniczne pozwalają zdalnie sterować pracą ciągów przenośników z nowoczesnych centrów dyspozytorskich, do których trafia coraz więcej danych o pracy maszyn i urządzeń dzięki rosnącej liczbie montowanych sensorów. Wyzwaniem staje się inteligentne wykorzystanie ogromnych zbiorów danych (*big data analytics*), nazywanych także hurtowniami danych [47], by zapewnić osiągnięcie celów produkcyjnych przy jak najmniejszych kosztach, nie tylko pod względem ilości, lecz i jakości transportowanego urobku [34].

Centrum Kierowania Ruchem w KWB Bełchatów

W Centrum Kierowania Ruchem w PGE GiEK SA w Bełchatowie jest to już realizowane dla Pola Bełchatów i Pola Szczerców. System wydobywczy, zaprojektowany i wdrożony przez spółkę Merrid Controls [65] we współpracy z odpowiednimi służbami PGE GiEK Bełchatów, zapewnia kompleksowe monitorowanie pracy układu technologicznego obu odkrywek. W sposób ciągły nadzorowana jest praca 25 maszyn podstawowych i 180 przenośników, tworzących układy KTZ (koparka – taśmociąg – zwałowarka) w obu odkrywkach [65].

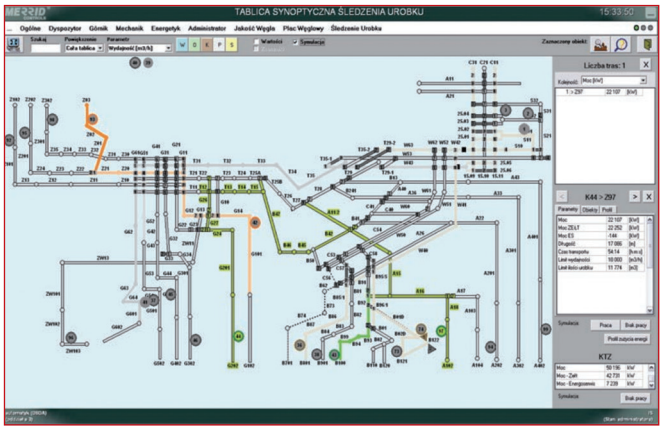
Oprócz bieżącej diagnostyki wszystkich obiektów, generowane są ostrzeżenia i alarmy. Na wielkoformatowej tablicy synoptycznej (5×3 m) animowana jest praca układów wydobywczo-transportowych (rys. 2).

Kolorem rozróżniany jest nadkład i węgiel, a intensywność koloru obrazuje stopień załadowania przenośnika.

Rys. 2 Centrum Kierowania Ruchem w PGE GiEK SA [69]

Intensywnością barw można obrazować także inne parametry, jak wydajność przenośnika na stacji napędowej lub jakość węgla (rys. 3).

Możliwe jest zdalne uruchamianie i zatrzymywanie oraz zabezpieczanie wszystkich ciągów i poszczególnych

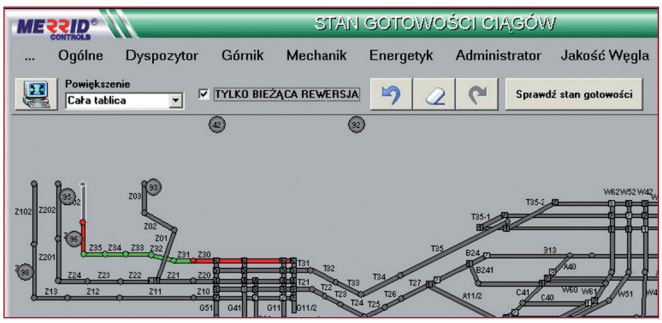


Rys. 3 Wizualizacja systemu przenośników z symulacją zużycia energii [41]

obiektów. Zadanie to ułatwia tzw. asystent uruchamiania ciągów. Podpowiada on odpowiednie kroki, aby zrealizować to zadanie [41].

Wysokie koszty transportu powodowane są w dużej mierze pracą nieobciążonych przenośników. Znaczne ograniczenie tego czasu można osiągnąć dzięki wdrożonemu mechanizmowi zatrzymywania ciągu rozkazem „stop ze zrzutem". Pozwala on minimalizować jałowy czas pracy przenośników (bez obciążenia), poprzez wyłączenie ich zaraz po zrzuceniu urobku. Jałowa praca przenośników ma również miejsce przy próbie uruchomienia ciągu technologicznego z niesprawnym przenośnikiem, co skutkuje pracą pozostałych przenośników w ciągu do momentu usunięcia usterki. Aby temu przeciwdziałać, konieczne jest sprawdzenie gotowości do uruchomienia wszystkich przenośników w ciągu. Obecnie „system wydobywczy" jest już wyposażony w moduł sprawdzania gotowości ciągu wraz z odpowiednią filtracją komunikatów. Wskazanie przez dyspozytora przenośnika automatycznie generuje rozkaz kasowania awarii i odświeża informacje o stanie wszystkich przenośników, wchodzących w skład danego ciągu [40]. Jest to prezentowane na tablicy synoptycznej (rys. 4).

Przenośniki gotowe do uruchomienia zaznaczone są na zielono, a pozostałe na czerwono. Dyspozytor otrzymuje



Rys. 4 Sygnalizacje gotowości przenośników na ekranie synoptycznym [40]

kompletny obraz stanu ciągu wraz z wyszczególnieniem usterek na każdym obiekcie, jeszcze przed jego uruchomieniem.

Skrócenie jałowego czasu pracy przenośników uzyskano również poprzez zmianę dotychczasowego sposobu uruchamiania nieobciążonych lub nie w pełni obciążonych ciągów przenośników. Dla nieobciążonych przenośników wprowadzono możliwość rozruchu odwrotnego, a dla pracujących z ograniczoną wydajnością możliwość rozruchu grupowego.

Rozruch odwrotny polega na uruchamianiu przenośników kolejno od koparki do zwałowarki wraz z pojawiającym się urobkiem – odwrotnie do tradycyjnie wymaganego sposobu uruchamiania wszystkich przenośników w ciągu [40].

Z uwagi na to, że na tablicy synoptycznej widać, w jakim stopniu załadowany jest przenośnik, możliwe stało się uruchamianie przenośników częściowo załadowanych urobkiem w trybie rozruchu grupowego. Ma on na celu przyspieszenie procesu uruchamiania. Wcześniej procedury zezwalały na uruchomienie kolejnych przenośników dopiero wtedy, gdy przenośniki odbierające miały prędkość bliską nominalnej. Przy rozruchu grupowym obniżono wartość prędkości taśmy przenośnika z 80% do 30% wartości znamionowej, przy którym wysyłany jest sygnał odblokowania do przenośnika nadającego. Dzięki temu uruchomienie ciągu skraca się o kilka minut [40].

Nowe rozwiązania ograniczyły czas pracy przenośników bez urobku, przynosząc wymierne korzyści finansowe. Wprowadzenie ich było możliwe, gdyż przenośniki wyposażone są w sterowniki PLC, połączone z nadrzędnym systemem wydobywczym i których oprogramowanie zapewnia kontrolę stanów i czasów pracy wszystkich przenośników [40].

Dodatkowo wizualizacja stanów pracy oraz zobrazowanie zbliżającego się urobku do węzła rozdzielczego, na którym należy wykonać rewersję, umożliwiło wyeliminowanie pracy obserwatora, który przekazywał te dane do centrum z terenu. Obecnie wszystkie czynności można wykonywać zdalnie bez angażowania dodatkowych osób.

Bardzo ważne funkcje oferuje Moduł Śledzenia Urobku. Na podstawie zbieranych informacji wydajności koparek, prędkości przenośników oraz nastawień punktów rewersji określa on ilość i jakość węgla na dowolnym obiekcie

Rys. 5 Pomierzone i obliczone dobowe i zmianowe parametry węgla trafiającego do elektrowni [41]

[41]. Pozwala to dyspozytorowi kontrolować na bieżąco zagregowane dane o przeniesionej masie nadkładu i węgla brunatnego (w Mg) oraz parametry chwilowe, takie jak wydajność (w m^3/h) i ilość urobku na przenośniku (w m^3) oraz skład węgla trafiającego do elektrowni (kaloryczność w kJ/kg, zawartość popiołu i siarki w %), a także sterować wydajnością koparek, tak by elektrownia otrzymała zmieszane paliwo o wymaganych parametrach. Zwiększa to efektywność produkcji energii elektrycznej w pełnym ciągu technologicznym, obejmującym kopalnię i elektrownię (zintegrowanym pionowo kompleksie górniczo-energetycznym [27]).

Funkcja śledzenia polega na obserwacji szeregu dyskretnych próbek generowanych na koparkach w trakcie eksploatacji. Tam przypisywane są im informacje wydobywcze (rodzaj urobku, wydajność, parametry węgla). Dane wejściowe obejmują: plan pracy koparki, odczyty z popiołomierzy na koparce, kontrolne wyniki badań laboratoryjnych i oceny wizualnej przodowego. Wygenerowane próbki są dalej przemieszczane na przenośnikach taśmowych z uwzględnieniem bieżącej konfiguracji i prędkości przenośników na ich trasie. Mogą być łączone i rozdzielane w punktach rozpływu i łączenia strug urobku. Ich parametry (kaloryczność, zawartość siarki i popiołu) obliczane jako średnia ważona w odniesieniu do ilości pochodzącej z pomiaru wydajności. Próbki, które dotarły do zwałowarki, ŁZKS-u (ładowarko-zwałowarki) lub do elektrowni są usuwane z pamięci serwerów i zapisywane do bazy danych dla potrzeb raportowych. Na tablicy synoptycznej można na bieżąco śledzić sytuację na obiektach układu KTZ i wyświetlać potrzebne informacje jakościowe (rys. 3). System generuje również specjalne znaczniki, sygnalizujące początek i koniec strugi urobku, zmianę parametrów urobku lub znaczniki indywidualne, wprowadzone w dowolnym miejscu, np. do śledzenia przemieszczania się zidentyfikowanych głazów czy fragmentów metalowych, stwarzających zagrożenie dla ciągłości pracy systemu transportowego [41].

Wynik w postaci dostaw węgla do elektrowni wraz uśrednionymi parametrami jakościowymi w ciągu ostatniej zmiany i dni prezentowane są na ekranie (rys. 5). Wartości obliczeniowe to dane z systemu śledzenia, a wartości pomiarowe to wyniki, uzyskane z urządzeń pomiarowych wag i popiołomierzy z przenośników dostarczających węgiel do elektrowni. Zestawienie obu wartości obok siebie, określenie granic dopuszczalnych minimum i maksimum oraz sygnalizacja kolorem czerwonym przekroczeń, daje pełen obraz nawęglania elektrowni.

Oprócz prezentowania danych historycznych jest też możliwa prognoza parametrów jakościowych z określonym wyprzedzeniem, uzależnionym od czasu dotarcia próbki do punktu docelowego lub węzła. Można z wyprzedzeniem zasygnalizować ilość urobku na przenośniku, wydajność oraz parametry węgla, który ma trafić do elektrowni. Dyspozytor ma więc nowoczesne narzędzie, ułatwiające podjęcie decyzji odnośnie do zmiany wydajności koparki lub skierowania dodatkowego strumienia węgla z ŁZKS-u w oparciu o dokonaną symulację. Możliwe jest więc aktywne sterowanie jakością węgla [41].

Prezentowane wyniki obliczeniowe i pomiarowe można później porównać z wartościami rzeczywistymi, uzyskanymi z próbek laboratoryjnych pobranych bezpośrednio ze zbiorników przykotłowych w elektrowni [41].

Wydajność układów KTZ można pokazać w powiązaniu ze zużyciem energii elektrycznej. Do każdej próbki generowanej przez system śledzenia urobku dołączona jest informacja o zużyciu energii elektrycznej, koniecznej do wydobycia określonej masy próbki, jej transportu na zwałowisko lub do elektrowni. W próbce zawarta jest także informacja o koparce źródłowej, obliczane są koszty energii elektrycznej dla wydobycia i transportu węgla do elektrowni lub placu uśredniania, a nadkładu na zwałowisko. Jeżeli na pracujący przenośnik nie jest podany urobek, to w systemie śledzenia tworzone są próbki o zerowej objętości, zawierające jedynie informacje o zużyciu energii elektrycznej. Dzięki temu można dokładnie wyliczyć zużycie energii i jej koszty z podziałem na transport urobku i bieg jałowy przenośników bez urobku [41].

Przenośniki w kopalniach pochłaniają ok. 20% nakładów inwestycyjnych i operacyjnych. Konsumują ok. 40% coraz droższej energii elektrycznej zużywanej przez kopalnie. W ostatnich latach wiele zrobiono, by obniżyć zużycie energii, wprowadzając nowe konstrukcje krążników [43], taśmy energooszczędne [23] i napędy o zmiennej prędkości, dopasowujące ją do zmian obciążenia [54]. Aby obiektywnie porównać skuteczność proponowanych rozwiązań technicznych, niezbędne jest wprowadzenie analitycznych wskaźników ułatwiających to zadanie, np. wskaźników energochłonności przenośników [22, 39].

Ze względu na wysokie koszty taśm przenośnikowych i ich wpływ na niezawodność systemów transportowych w kopalniach, a zwłaszcza możliwość wywołania ich awarią długotrwałych postojów, powodujących straty w produkcji [9, 10], operatorzy w Centrum Kierowania Ruchem powinni również uzyskać informacje o stanie przenośników taśmowych, a zwłaszcza o stanie taśmy przenośnikowej. Kopalnie przechowują duże ilości danych o taśmach przenośnikowych, ale nie są one zintegrowane i przedstawione w sposób umożliwiający identyfikację potencjalnych zakłóceń i zagrożeń ciągłości ich działania, oprócz pojedynczych czujników rozcięcia taśmy.

Centrum Zarządzania Ruchem ZPMW w KWK Knurów-Szczygłowice

Podobne rozwiązanie funkcjonuje w KWK Knurów-Szczygłowice. Uruchomiono tam nowoczesne Centrum Zarządzania Ruchem Zakładu Przeróbki Mechanicznej Węgla.

Na tablicy złożonej z 8 monitorów (rys. 6) widać drogę, którą przebywa urobek od szybu, przez wzbogacanie, do załadunku. Wizualizowany jest ruch przenośników, widać stopień napełnienia zbiorników z produktami, wskazania wag i urządzeń kontrolujących jakość, napełniające się węglem wagony. W pomieszczeniu komunikacji znajdują się serwery danych zapisujące historiogramy pracy urządzeń, parametry jakościowe produkowanego węgla, począwszy od wejścia do zakładu, a skończywszy na załadunku. Serwery przetwarzają i archiwizują uzyskane dane, tworząc kopie bezpieczeństwa. W końcowej fazie przetwarzania danych przesyłają automatycznie wyniki

do systemów fakturowania i ekspedycji węgla. Transmisja danych odbywa się w zintegrowanych sieciach światłowodowych, z urządzeniami komunikacyjnymi ułożonymi w tzw. stos informatyczny.

Rys. 6 Nowoczesne centrum zarządzania produkcją w KWK Knurów-Szczygłowice [67]

Kolor zielony pokazuje prawidłową pracę urządzeń, a czerwony sygnalizuje powstanie awarii. Szarym kolorem oznaczone są urządzenie zatrzymane. Wskazanie urządzenia myszką pozwala odczytać parametry jego pracy, takie jak obciążenie i stan zabezpieczeń. Część urządzeń jest pogrupowana w ciągi liczące po kilkadziesiąt obiektów. Zaawansowany interfejs sterujący umożliwia ich zdalne uruchamianie i zatrzymywanie [67]. Centralne sterowanie procesami produkcyjnymi pozwala analizować wybrany fragment procesu i automatycznie go bilansować, a także prześledzić cały cykl technologiczny.

Nowoczesne rozwiązania zastosowane w Centrum Zarządzania Ruchem ZPMW (platforma Wonderware) daje możliwość przejrzystego monitorowania pracy maszyn oraz automatycznego gromadzenia danych produkcyjnych i szybki dostęp do wiarygodnych informacji. Pozwala to na szybką reakcję w przypadkach, mogących wpłynąć na zachwianie cyklu produkcyjnego. Praca urządzeń raportowana jest w formie arkuszy kalkulacyjnych Excel oraz plików Word wbudowanych w Platformę Systemową Wonderware. Dane do raportów, przebiegów pracy i zestawień przedstawione są w postaci wykresów i tabel ułatwiających analizę. Ponadto przemysłowa baza danych Wonderware Historian jest zintegrowana z pakietem Microsoft Office, co dodatkowo upraszcza tworzenie dokumentów i przetwarzanie wiadomości. W efekcie do obsługi centrum wystarczą zaledwie dwie osoby.

Głównym wykonawcą i integratorem systemu wykonanego „pod klucz" była firma Carboautomatyka S.A., a na etapie doboru elementów korzystano z pomocy ekspertów firmy ASTOR. System zarządzania produkcją węgla w ruchu Szczygłowice będzie nadal modernizowany. Zwiększenie udziału węgla koksowego w produkcji kopalni wymusza stosowanie coraz bardziej skomplikowanych układów wzbogacania, a także doskonalenie aparatury kontrolnej [57].

One Control Room w O/ZG Polkowice-Sieroszowice

W kopalniach rud miedzi KGHM Polska Miedź SA na ekranach synoptycznych wizualizowane są stany pracy przenośników i ich podzespołów (rys. 7), podobnie jak ma to miejsce w PGE GiEK SA O/KWB Bełchatów. Idea One Control Room [20] wdrożona w O/ZG Polkowice-Sieroszowice umożliwia centralne sterowanie procesem technologicznym i zapewnia stały monitoring zakładów górniczych. Pozwala szybciej i sprawniej dostarczać odpowiednie informacje, by podejmować optymalne decyzje z punktu widzenia produkcji i bezpieczeństwa pracowników. W jednym centrum zlokalizowano wszystkie służby dyspozytorów: górnicze, elektryczne i automatyki. Zapewnia to lepszy obieg komunikacji wewnętrznej. Przyspiesza to normalny tok pracy, ale jest szczególnie istotne w sytuacjach awaryjnych oraz podczas prowadzenia akcji ratowniczej [59].

Budynek dyspozytorni jest zasilany bezprzewodowo, a serwerownie mają szybki system transmisyjny. Przeprowadzona modernizacja systemów wizualizacji i sterowania oraz wykonana ich kompleksowa integracja wraz z prostym w obsłudze interfejsem dla dyspozytorów, jak i dla innych służb wykorzystujących dane maksymalnie ułatwiają im pracę. Systemy rejestracji i przetwarzania danych analizują informacje i szukają pośród nich zależności i wzorców wcześniej niemożliwych do identyfikacji. Obrazy z kamer zabudowanych w wyrobiskach dołowych umożliwiają natychmiastową weryfikację ich aktualnego stanu i podejmowanie właściwych decyzji. Koncepcja One Control Room to przede wszystkim podejścia do pozyskiwania, przetwarzania gromadzonych danych, możliwość zdalnej kontroli i sterowania procesem produkcyjnym oraz jego utrzymaniem. Możliwość proaktywnego podejścia do utrzymania systemów zapewniających ograniczenie kosztów eksploatacji systemów produkcyjnych.

Rys. 7 Centrum sterowania w ZG Polkowice-Sieroszowice (One control room) otwarte 10.03.17 [59]

Oprócz centralnej dyspozytorni równolegle wprowadzane są inne elementy, jak m.in. system raportowania (eRaport). Rozbudowywane są sieci światłowodowe, powstają na dole nowe stanowiska z komputerami oraz montowane są kolejne kamery na głównych przenośnikach. Szybko postępuje ich automatyzacja. Centralna dyspozytornia jest elementem budowy bezpiecznej i inteligentnej kopalni.

Zgromadzenie danych z licznych sensorów umożliwia zdalną diagnostykę predykcyjną podzespołów systemów maszynowych. Śledzona jest ilość przepływającego urobku na przenośnikach i stany zbiorników [50].

Ciągle nierozwiązana jest jednak sprawa śledzenia jakości rudy i predykcji składu nadawy dostarczanej do

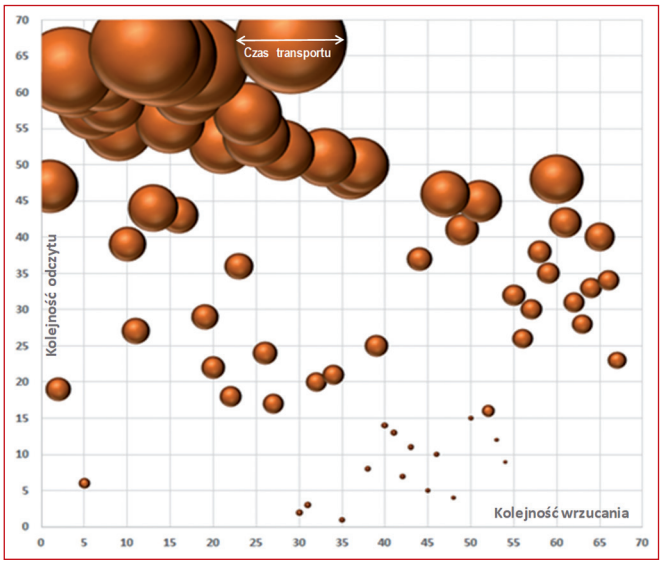
zakładów przeróbczych. Nie wystarczy bowiem zbieranie licznych prób bruzdowych i ich automatyczna analiza w pełni zautomatyzowanym laboratorium CBJ ani przygotowanie przestrzennego modelu jakości złoża [55], podobnie jak w KWB Bełchatów [52]. Odstrzelony i zmieszany urobek z wielu przodków (obejmujący pełną furtę eksploatacyjną) trafia w wielu miejscach na taśmy licznych przenośników oddziałowych, którymi transportowany jest do przenośników odstawy głównej wiozących urobek pod szyb. Liczba krat załadowczych, punktów łączenia i rozdziału strumieni rudy oraz przepływ rudy przez zbiorniki zapewniające jej retencję (na wypadek awarii oraz brak wydobycia w weekendy), ale również zmieniających kolejność jej przepływu, jest tak duża i złożona, że trudno jest przewidywać skład nadawy trafiającej do zakładów wzbogacania. Na Wydziale Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej zrealizowano międzynarodowy projekt DISIRE w ramach programu Horyzont 2020 [38]. Obecnie rezultaty eksperymentu z zastosowaniem e-peletów, niosących informacje o jakości rudy oraz wyniki symulacji rozpływu urobku w kopalni ze śledzeniem jego składu oraz kolejności osiągnięcia celu są sukcesywnie publikowane [33]. Interesujące jest, że rozwiązania zastosowane w module śledzenia urobku, obejmujące dyskretyzację strugi na niewielkie porcje, niosące informacje o masie i składzie urobku, bardzo przypominają rozwiązania przyjęte w modelach symulujących przepływ strugi rudy zbudowanych na potrzeby projektu DISIRE w programie FlexSim [32].

Przeprowadzony w kopalni eksperyment z regularnym wrzucaniem na taśmę inteligentnych peletów z zapisem miejsca pochodzenia rudy w gruncie rzeczy też jest materialną realizacją tego uniwersalnego pomysłu. Z oczywistych przyczyn komputer może porcje urobku (informacji o nim) generować znacznie częściej, niż jesteśmy w stanie wrzucać kolejne pelety (choćby z uwagi na fizyczne ograniczenia i koszty). Może też generować porcje bez urobku, w celu przeniesienia i gromadzenia informacji (np. o energii niezbędnej do pokonania oporów biegu jałowego przenośnika). Fizyczny pelet tego typu musiałby być aktywny, by można było w nim zdalnie zapisywać informacje o przebytych obiektach na trasie. Rozwiązanie takie byłoby znacznie droższe, gdyż każdy obiekt musiałby być wyposażony w bramki zdolne do dokonania takich zapisów. Rozwiązania symulacyjne są więc bardziej elastyczne i tańsze. Z tego względu są polecanym rozwiązaniem do śledzenia urobku zarówno w kopalniach odkrywkowych, jak i podziemnych.

Niestety problemy nastręcza możliwość retencji i zaburzeń kolejności przepływu urobku przez zbiorniki (rys. 8). Na osi X przedstawiono kolejność wrzucania peletów, a na osi Y kolejność odczytu. Wielkość baniek reprezentuje czas przejazdu. Jak widać, pelety wrzucane najwcześniej (do nr. 30) do czytnika dotarły najpóźniej, a czas przejazdu był najdłuższy. Najkrócej i najszybciej do czytnika dotarły niektóre pelety od nr. 30 do 53 (bańki wielkości punktów). Część z nich dotarła jednak później, choć wszystkie wcześniej, niż wskazywałby numer odpowiadający kolejności ich wrzucenia (wszystkie bańki znajdują się poniżej linii y=x). Zaburzenia w kolejności dotarcia spowodowane są retencją urobku podanego najwcześniej w zbiorniku przyszybowym, który zaczęto opróżniać dopiero z dużym opóźnieniem, co wpłynęło na czas dotarcia peletów do czytnika.

Problemy zaburzeń w kolejności dotarcia urobku spowodowane jego przejściem przez zbiorniki również można analizować metodami symulacyjnymi, np. przy użyciu metody elementów dyskretnych (DEM), pozwalającej na modelowanie poszczególnych brył urobku i ich interakcji ze sobą, z taśmą, elementami konstrukcji przenośników, przesypów i ścianami zbiornika. Wydział Geoinżynierii, Górnictwa i Geologii Politechniki Wrocławskiej dysponuje badawczą licencją programu EDEM i może prowadzić już takie analizy w pracach badawczo-rozwojowych.

Bez drobiazgowych analiz tego typu proste śledzenie wygenerowanych porcji urobku zachowujące kolejność



Rys. 8 Zaburzenia w kolejności przepływu peletów umieszczanych regularnie w strumieniu rudy w trakcie eksperymentu w jednej z kopalń rudy miedzi

generacji nie wyjaśniłoby zaobserwowanych zmian takiej kolejności. Zmniejszyłoby też dokładność szacowania średnich wartości parametrów jakościowych, bo zatrzymanie części urobku w zbiorniku powinno wyłączyć tę ilość urobku z obliczeń bieżącej średniej i włączyć ją w okresie po otwarciu zbiornika. W kopalni węgla brunatnego na trasie urobku nie ma takich zbiorników, co ułatwia śledzenie ilości i jakości oraz jej zmian na skutek łączenia strumieni z różnych źródeł. Zbiornik na placu składowym w elektrowni jest na końcu ciągu węglowego, więc łatwo jest wyznaczyć jego skład poprzez zsumowanie urobku w okresach składowania węgla na placu.

Taśma przenośnikowa 4.0

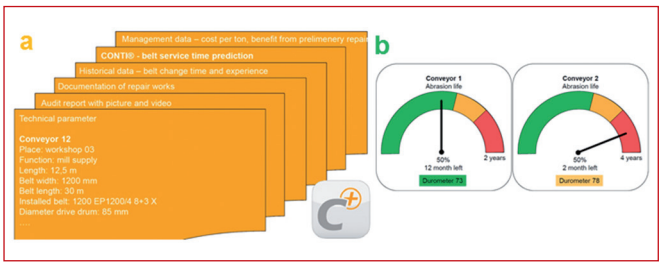
Taśmy przenośnikowe generują nawet do 60% wszystkich kosztów transportu. Kopalnie coraz częściej wynajmują firmy zewnętrzne (outsourcing) do prowadzenia gospodarki taśmami, podpisując wieloletnie umowy z firmami serwisowymi, przejmującymi odpowiedzialność za za-

pewnienie ciągłości transportu. Dzięki takiej polityce kopalnia nie musi utrzymywać własnych służb, a taśmami zajmują się specjaliści. Na serwisantów spada też odpowiedzialność za zapewnienie ciągłości transportu w kopalni.

Przykładem może być umowa pomiędzy RWE Power i REMA TipTop [62]. Umowę serwisową zawarto na 10 lat. Obejmuje on wsparcie na miejscu w kopalniach odkrywkowych w obszarze wydobycia węgla brunatnego w Nadrenii Północnej (wyrobiska Inden, Hambach i Garzweiler). Naprawy i konserwacja taśm z linkami stalowymi w systemie transportowym (obejmujące wulkanizację połączeń, naprawy taśm i ich regenerację dla wszystkich przenośników, koparek i zwałowarek) będą wykonywane przez 120 zatrudnionych na miejscu pracowników firmy serwisującej, oferującej pełną dyspozycyjność (24/7) pracowników z lokalnego oddziału firmy w Elsdorf-Desdorf. Ciągłe i bezproblemowe działanie systemów przenośników jest jednym z najważniejszych warunków niezawodnego wytwarzania energii i jej dostarczania do uprzemysłowionego regionu. Jeśli pętla taśmy przenośnika ulegnie awarii, transport w całym ciągu będzie zatrzymany. Dlatego ważne, aby identyfikować zagrożenia i zużycie taśm na bieżąco i planować okresy konserwacji, nim wystąpi awaria (zapewnienie obsług predykcyjnych w oparciu o stan taśm). Wszelkie uszkodzenia muszą zostać naprawione jak najszybciej, aby uniknąć dalszych kłopotów.

Nie da się wywiązać efektywnie z tych zadań, gdy długość użytkowanych przenośników sięga setek kilometrów (np. w RWE ok. 500 km, a w KWB Bełchatów ok. 160 km) bez monitorowania stanu taśm, planowania ich napraw oraz wymian z wykorzystaniem urządzeń diagnostycznych i techniki cyfrowej [7, 8, 11, 13-19, 63].

Na konferencji Bergbau 4.0 w Aachen [68] jeden z wiodących producentów taśm na świecie przedstawił kompleksowe rozwiązanie gromadzenia i przetwarzania danych o eksploatacji taśm i przechowywania ich w chmurze. Dostęp do nich na bieżąco mają użytkownicy i serwisanci poprzez internet, co ułatwia racjonalne zarządzanie taśmami, eliminuje postoje awaryjne i nadmierne zapasy taśm [48]. Wiąże jednak kopalnię z jednym dostawcą taśm, który jest też serwisantem taśm i umożliwia mu wgląd w dane eksploatacyjne, co nie zawsze zgodne jest z polityką ochrony danych wrażliwych w firmie. Naraża również kopalnię na poniesienie kosztów renty monopolowej, związanej z wyeliminowaniem mechanizmów konkurencji.

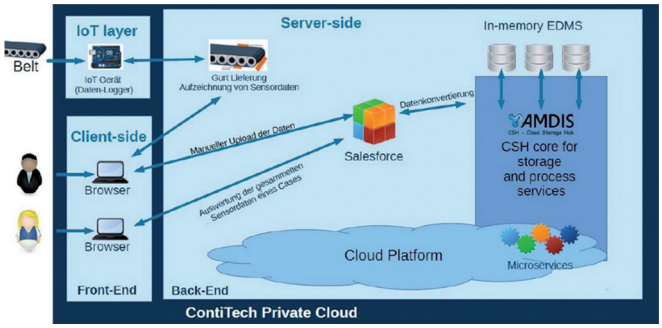


Rys. 9 System Conti + zawiera pełne spectrum danych o każdym przenośniku: a – parametry, zbiory, raporty; koszty itp.; b – mierniki pozostałego czasu pracy taśmy [48]

Prezentowany na konferencji system informacyjny [48] obejmował rozwiązania zbierania i przechowywania danych o przenośnikach i taśmach (rys. 9a).
System umożliwia:

- zwiększenie prędkości rejestracji danych,
- łatwą organizację i raportowanie danych o przenośnikach i taśmach,
- oszacowanie pozostałego czasu pracy taśm i danych dotyczących ich wymian (rys. 9b) oraz
- dostępność do danych w dowolnym czasie i miejscu, dzięki przetwarzaniu w chmurze i w sieci wszystkich zgromadzonych informacji (rys. 10).

Ze strony firmowej dowiadujemy się [66], że niedawno uruchomione rozwiązanie w chmurze wspomaga proce-



Rys. 10 Automatyzacja przetwarzania danych o taśmach z wykorzystaniem sieci internet i chmury [48]

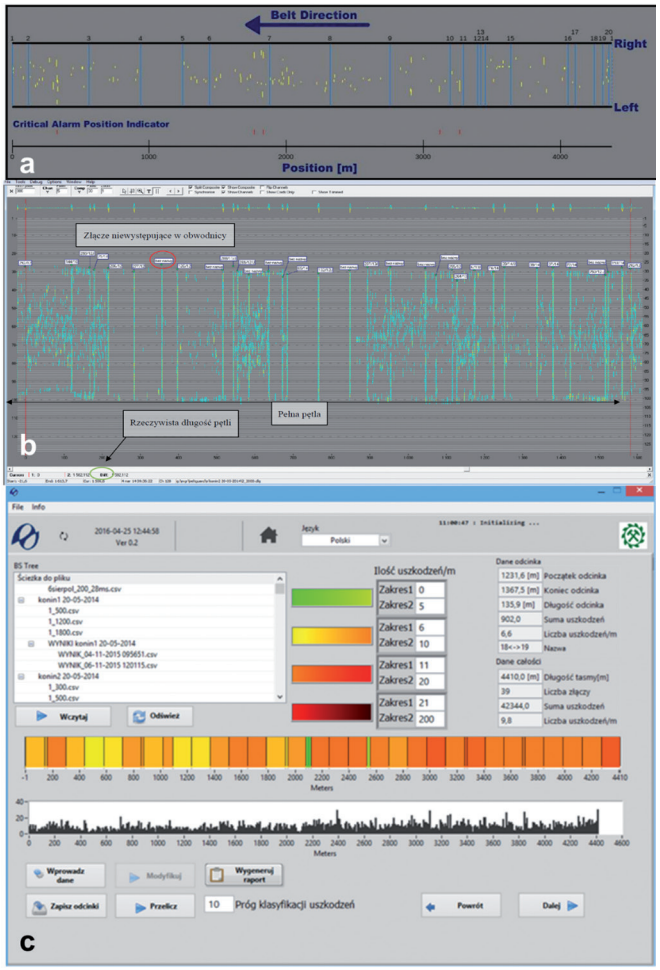
sy sprzedaży. Obsługuje 100 000 ofert rocznie. Platforma Conti Cloud (rys. 10) opiera się na rozwiązaniu SAP Cloud for Sales. Proces przetargowej sprzedaży taśm stał się ostatecznie motorem projektu. Przy ponad 100 000 zamówień rocznie niewielki wzrost wydajności i usprawnienie operacji przynosi znaczne oszczędności czasu i pieniędzy. Dwa najważniejsze cele to optymalizacja procesów wewnętrznych oraz szybsza adaptacja nowych obszarów biznesowych. Nie bez znaczenia są też korzyści klientów (użytkowników taśm) z wykorzystania baz danych o przenośnikach i taśmach, predykcyjnych obsług i wymian taśm. Wydatnie skraca się proces zamówień, co umożliwia dostawy taśm „just in time". W konsekwencji redukuje się koszty utrzymania potężnych magazynów taśm, które utrzymywane są na wypadek rozległych awarii. Dzięki temu zmniejszane są łączne koszty posiadania (*Total Costs of Ownership*) i straty produkcyjne z powodu zredukowanej liczby nieoczekiwanych postojów.

W Polsce komputerowo wspomaganą gospodarkę taśmami kopalnie węgla brunatnego wprowadziły już w połowie lat 80. (system Sufler w Turowie [31] i Taśma w Bełchatowie, [26, 35]). Diagnostykę taśm z linkami zastosowano w Turowie w 2000 r. [11]. Bazy danych o taśmach i przenośnikach użytkowane są w kopalniach KGHM Polska Miedź SA (system Diagmanager [53] i system informatyczny z AGH [37]). Prace te inicjowali i współtworzyli pracownicy Politechniki Wrocławskiej. To tu zmodernizowano system diagnostyczny HRDS dla KWB Turów [11] i opracowano system DiagBelt [63]. Warto, by ich wykorzystanie było znacznie szersze i bardziej

kompleksowe niż dotychczas. Korzyści z jego użytkowania dla kopalni odkrywkowej węgla brunatnego i firmy serwisowej przedstawiono w pracach [9-10, 28-29, 36].

Pożytki ze stosowania diagnostyki i systemów informatycznych dostrzegł również producent taśm z Niemiec. Wbudowane są one w rozwiązanie Conti +. Sposób obrazowania mapy uszkodzeń (rys. 11) jest podobny w różnych systemach o wysokiej rozdzielczości, np. Belt Guard, DiagBelt, Veyance oraz Contitech) [7]. Ważna jest łatwość identyfikacji lokalizacji uszkodzeń i ich rozległości oraz intensywności (np. gęstości uszkodzeń przypadających na 1 mb.). Kodowanie kolorami pozwala na natychmiastową ocenę stanu całej pętli, a histogram gęstości pokazuje niebezpieczne obszary koncentracji uszkodzeń (rys. 12).

W systemach magnetycznych [7] rejestrowane są zmiany pola magnetycznego wokół uszkodzeń stalowych linek,



Rys. 11 Mapa pętli taśmy pokazująca połączenia i uszkodzenia: a – system monitorowania Conti [48]; b – dane źródłowe dla systemu DiagBelt (obraz z systemu BeltGuard) [61]; c – dane przetworzone – obraz pętli taśmy z systemu DiagBelt wraz z histogramem gęstości uszkodzeń wzdłuż osi taśmy [63]

powstałe na skutek uderzenia brył transportowanego materiału (nadkładu, rudy, utworów trudno urabialnych itp.). Na świecie i w Polsce prowadzone od wielu lat są badania odporności taśm na przebicia [1, 3] i stan taśm określa wizualnie, metodami rtg lub z wykorzystaniem metod NDT [4, 21]. Zdiagnozowany stan taśmy w miejscach lokalnego zagęszczenia uszkodzeń, osłabiające jej wytrzymałość na zerwanie, wykorzystywany jest do określenia eksploatacyjnego współczynnika bezpieczeństwa [12, 24] oraz do określenia pozostałego czasu jej pracy [8]. Obciążenie przenośnika ma bowiem istotny wpływ na trwałość taśm .

W Polsce obecnie żaden z producentów taśm nie ma własnych rozwiązań diagnostycznych ani nie oferuje systemów wspomagających prowadzenie gospodarki taśmami. Własne rozwiązania informatyczne mają kopalnie węgla brunatnego (system Komputerowa Karta Taśmy w Turowie oraz system Taśma w Bełchatowie) oraz kopalnie rud miedzi.

Niezawodność przenośników i pętli taśm z połączeniami

Przy bardzo wysokich kosztach stałych w kopalniach odkrywkowych i podziemnych można obniżyć jednostkowe koszty wydobycia tony surowca poprzez pełne wykorzystanie czasu pracy kopalni. Każdy przestój zmniejsza wydobycie i zwiększa jednostkowy koszt wydobycia. Dla kopalń węgla kamiennego, balansujących na granicy rentowności przy niskich cenach tego paliwa, jest więc to kluczowa sprawa. Niezawodna praca systemów wydobywczych (zwłaszcza na kluczowych przenośnikach w upadowych zastępujących szyb, jak np. w KWK Marcel), brak przestojów awaryjnych (realizacja napraw bieżących i planowych wymian na zmianach nieroboczych i remontowych) to warunek konieczny dla zapewnienia opłacalnej produkcji. Właśnie dlatego w kopalni węgla brunatnego w Turowie w 2000 r. rozpoczęto korzystanie z urządzeń diagnostycznych. Najpierw korzystano z systemu EyeQ, a obecnie użytkowana jest jego zmodyfikowana wersja o nazwie HRDS (High Density Resolution System) z oprogramowaniem stanowiącym podstawę systemu DiagBelt [11]).

Z uwagi na koszty taśm przenośnikowych i zagrożenie postojami awaryjnymi dbałość o taśmy zaczęły wykazywać kopalnie podziemne węgla kamiennego. Przykładowo, w kopalni Marcel na przenośnikach odstawy głównej (w upadowej zastępującej szyb wydobywczy) taśmy są regularnie skanowane, by nie dopuścić do przestojów powodujących straty produkcyjne [45, 56]. Badania stanu taśm prowadzono również w kilku innych kopalniach [8, 45]. Niestety rozwijane w górnictwie węgla kamiennego systemy automatyki jak dotąd nie są integrowane z urządzeniami do diagnostyki taśm [42]. Zastosowanie taśm z linkami stalowymi w podziemnych kopalniach rud miedzi również umożliwiło wykorzystanie diagnostyki magnetycznej do badania stanu taśm. Skanowano je przy użyciu systemu LRM [64] i Diagbelt [63].

W kopalniach podziemnych częściej stosowane są taśmy tekstylne. Są one tańsze, lecz nie da badać się ich stanu metodami magnetycznymi. Można jednak korzystać z systemów wizyjnych, które mogą być wykorzystane do badań stanu okładek i obrzeży, ale również do badania

stanu połączeń mechanicznych i klejonych. Połączenia są najsłabszym ogniwem w pętli, stanowiącej strukturę szeregową z punktu widzenia niezawodności.

W USA Narodowe Centrum Inżynierii Robotyki (NREC) z Carnegie Mellon University zaprojektowało, zbudowało i przetestowało szybki system wizyjny do monitorowania stanu taśm przenośnikowych użytkowanych w podziemnych kopalniach węgla [70]. System ten jest w codziennym użytkowaniu w kopalniach węgla kamiennego obsługiwanych przez CONSOL Energy, Inc. System, nazwany Belt Vision, zawiera stanowisko komputerowe, które monitoruje i rejestruje obrazy cyfrowe uzyskane z kamer zamontowanych nad taśmą przenośnikową, w celu zapewnienia ciągłego obrazowanie pętli i połączeń odcinków taśm.

Rozejścia się połączeń i rozcięcia taśmy stanowią jedno z największych zagrożeń dla ciągłości pracy systemów taśmowych. Urządzenia diagnostyczne pozwalają na gospodarkę taśmami z wykorzystaniem obsług zapobiegawczych, a nie kosztownych napraw awaryjnych. Jedna minuta postoju awaryjnego, w celu zastąpienia zniszczonego połączenia mechanicznego, kosztuje ok. 1000 USD, a przywrócenie przenośnika do pracy zajmuje około 4 godzin. Awaria połączenia pod obciążeniem to ok. 240 tys. USD. Aby uniknąć takich sytuacji, urządzenie rejestruje wysokiej rozdzielczości obrazy połączeń podczas normalnej pracy i paski monitorujące, aby zidentyfikować rozchodzące się połączenia i wykonać niezbędne naprawy, zanim nastąpi kosztowna awaria i postój całego ciągu. W Polsce również wprowadzono monitorowanie długości połączeń poprzez analizę sygnałów od wbudowanych w taśmę magnesów [46].

Szacowane w firmie Consol Energy koszty awarii przenośników mogą być jeszcze wyższe. W odkrywkowej kopalni miedzi, należącej do głównego producenta, użytkowany jest przenośnik o długości ok. 8 km. Transportuje on rudę z kruszarki w wyrobisku do zakładu wzbogacania. Kopalnia w ciągu godziny wydobywa rudę zawierającą miedź i molibden o wartości około 320 000 USD. Mechaniczne awarie tego przenośnika taśmowego powodowały znaczne zakłócenia w produkcji kopalni. Wymiana jednego z elementów przeniesienia napędu przenośnika, jak np. skrzyni biegów, może spowodować ośmiogodzinny postój, kosztujący kopalnię ponad 2,5 mln dolarów utraconej produkcji [51].

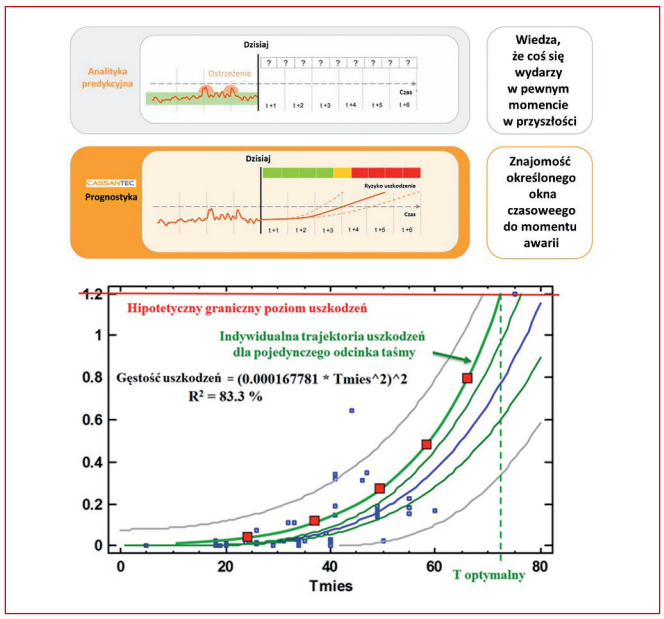
W zakresie podniesienia niezawodności napędów przenośników uczyniono już wiele. Da się bowiem zdalnie diagnozować poszczególne elementy (silniki, przekładnie, sprzęgła) i całe układy napędowe. W czasie rzeczywistym rejestruje się dane o pracy przenośników i ich obciążeniach (dane z czujników stanów pracy i wag). Rośnie liczba sensorów rejestrujących drgania różnych elementów i ich temperaturę oraz inne parametry pracy, pozwalające oceniać ich stan i przewidywać ich awarie (rys. 12, u góry).

Niestety najmniej rozpoznanym obiektem jest pętla złożona z odcinków taśm wraz z połączeniami stanowiącymi najsłabsze ogniwo szeregowo połączonych elementów. Pomimo rejestracji efektywnego czasu pracy przenośników i przeniesionej masy (nadkładu i/lub węgla) odcinkom taśm i połączeniom w bazach danych nie są one na bieżąco przypisywane. W efekcie pracownicy w kopalniach lub w firmach serwisowych korzystają z najbardziej niedokładnej miary ich trwałości, jakim jest czas kalendarzowy. Różne obciążenia przenośników i ich prędkości oraz nierównomierny stopień wykorzystania nie pozwalają na wypracowanie jednolitej polityki. Trwałość taśm jest bowiem funkcją wielu zmiennych i najlepszą miarą byłyby efektywne cykle obiegów odcinka lub połączeń wokół trasy przenośnika (mogące być łatwo odniesione do cykli badań zmęczeniowych w laboratoriach [2]) lub przeniesiona masa urobku.

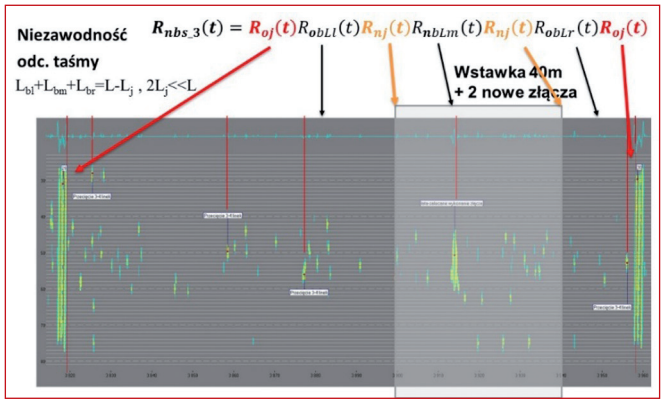
Brak monitorowania stanu taśm i połączeń nie pozwala prognozować optymalnych momentów wymian predykcyjnych w oparciu o pozostały czas pracy (lub inną rezydualną miarę trwałości) do osiągnięcia stanu kwalifikującego taśmę do wymiany (np. w celu zapewnienia opłacalnej jej regeneracji) (rys. 12 na dole) [29]. Konieczne jest też opracowanie dobrych podstaw teoretycznych [14], które mogą być wykorzystane w modelach symulacyjnych do szacowania zapotrzebowania na taśmy i koszty różnych polityk wymian w tym wymian taśm, w celu prowadzenia opłacalnej regeneracji [5, 9-10, 28-29]. W warunkach rzeczywistych lepiej jednak prowadzić wymiany w oparciu o zidentyfikowany przy użyciu metod NDT stan taśmy [8, 13]. Ważne jest też nowe spojrzenie na regenerację taśm, która może być potraktowana jak doskonały przykład *circular economy*. Kosztowny rdzeń taśmy z linkami stalowymi może być bowiem wykorzystany dwu- i trzykrotnie, dzięki jedno- lub dwukrotnej regeneracji, o ile przyczepność linek po kolejnych wulkanizacjach nie spadnie poniżej wymaganej wielkości. Opłacalność tej polityki w dużej mierze zależy od jakości użytych materiałów do produkcji taśm. Zaostrzająca się konkurencja o dostawy taśm do kopalń doprowadza do spadku cen taśm (sprzedaż po kosztach krańcowych ich produkcji), co może prowadzić do skorzystania z tańszych substytutów do produkcji, a to odbije się na jakości. Ważne jest więc, by użytkownicy badali wszystkie dostarczane taśmy, bo oszczędność przy ich zakupie może oznaczać skrócenie ich trwałości i straty spowodowane postojami awaryjnymi.

W zamkniętej pętli taśm na przenośniku najsłabszym ogniwem są połączenia poszczególnych odcinków. Wynika to z mniejszej ich wytrzymałości w porównaniu z taśmami w caliźnie. Dotyczy to zwłaszcza połączeń klejonych i mechanicznych, co odbija się na kosztach [5].

Połączenia taśm (stanowiące najsłabsze ogniwo w pętli z uwagi na niższą wytrzymałość na zerwanie) mogą być monitorowane przy użyciu urządzeń diagnostycznych, takich jak system DiagBelt [63]. Jego moduł magnetyczny doskonale nadaje się do monitorowania taśm St, a moduł wizyjny do monitorowania połączeń taśm tekstylnych. Złącza taśm tekstylnych po niewielkiej modyfikacji, polegającej na osadzeniu w nich dobranych znaczników magnetycznych, mogą być też monitorowane przy użyciu modułu magnetycznego. Może też on służyć do oceny stanu taśm po badaniach ich odporności na przebicia. Ocenie mogą podlegać zarówno linki w rdzeniu (rys. 13), jak i brekery z linek stalowych w taśmie tekstylnej [4].

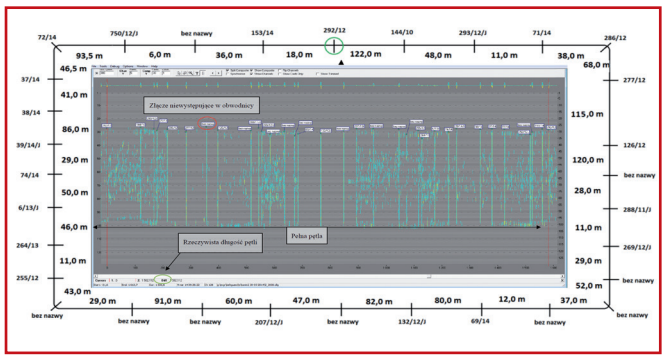


Rys. 12 Korzyści z prognostyki stanów pracy wg firmy Cassantec [44] (u góry) oraz prognoza tempa zmian gęstości uszkodzeń w oparciu o indywidualne trajektorie uszkodzeń generowane dla wszystkich odcinków taśm w pętli [8, 13] (na dole)



Rys. 13 Obraz uszkodzeń odcinka taśmy z systemu DiagBelt z analizą niezawodności odcinka taśmy po dokonaniu wstawki nowej taśmy o długości 40 m

Wdrożenie diagnostyki taśm może takim sytuacjom zapobiec. Diagnostykę warto wdrożyć nie tylko tam, gdzie gospodarkę prowadzi się szczególnie starannie, by jeszcze lepiej wykorzystać wiedzę o stanie taśm. Badania można rozpocząć w dowolnym momencie, a pierwsze skanowanie pętli taśm może posłużyć do dokładnej inwentaryzacji wszystkich odcinków i połączeń (do ich policzenia i zmierzenia) oraz określenia ich aktualnego stanu (rys. 14). Dzięki takiej inwentaryzacji łatwo i szybko można rozpocząć racjonalną gospodarkę taśmami, bo nawet jeśli do tej pory nie prowadzono jej starannie, to po badaniu łatwo można zacząć prowadzić ją prawidłowo.



Rys. 14 Inwentaryzacja pętli taśm systemem DiagBelt w jednej z kopalń węgla brunatnego. Zidentyfikowano stan 32 odcinków i połączeń oraz obliczono ich długości

Podsumowanie

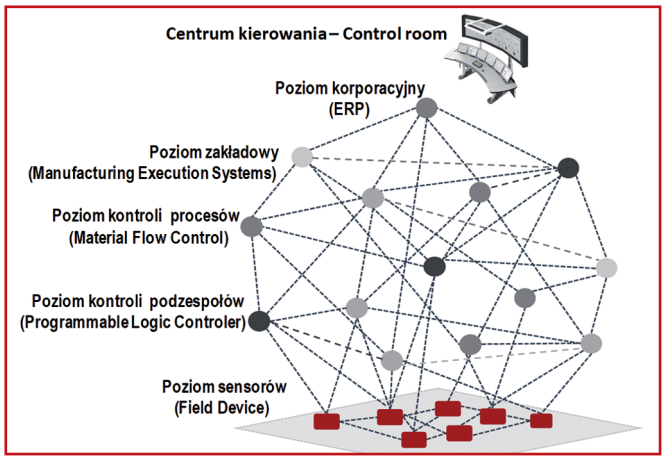
Systemy przenośników taśmowych stosowane w kopalniach już dzisiaj mogą i w niektórych miejscach są w pełni zautomatyzowane i mogą być sterowane z centrów dyspozytorskich. Poszczególne podzespoły mechaniczne, a zwłaszcza napędy, są już monitorowane i dane z licznych sensorów monitorujących ich stan są już zbierane on-line w celach diagnostycznych i do predykcyjnego planowania napraw i wymian podzespołów i ich części. Co więcej, w kopalniach węgla brunatnego na bieżąco można już sterować jakością dostarczanego do elektrowni paliwa poprzez dobór wydajności koparek węglowych na różnych piętrach kopalni i jego zmieszanie w łącznej strudze węgla na zbiorczych przenośnikach. Przenośniki są więc inteligentne, bo nie tylko wiedzą, ile urobku wiozą (dzięki odczytom z wag i urządzeń mierzących objętość strugi urobku na taśmie), lecz również znają jego skład (dzięki skanerom i identyfikacji jakości urobku w zabierce w miejscu położenia koła koparki wyposażonego w GPS).

Jak dotąd na ekranach synoptycznych i monitorach w polskich centrach sterowania ruchem kopalń nie pojawiają się informacje o stanie taśm przenośnikowych oprócz sytuacji awarii typu rozcięcie taśmy z pojedynczych sensorów. Taśmy stanowią do 60% kosztów transportu, a ich awarie mogą spowodować kosztowne przestoje. Straty produkcyjne spowodowane koniecznością awaryjnych wymian połączeń i uszkodzonej taśmy (np. po jej rozcięciu) mogą sięgać milionów dolarów. Stan taśm i połączeń oraz ich praca powinny być więc ściśle monitorowane, by zapobiec rozwinięciu się awarii, na bieżąco naprawiać pojawiajce się uszkodzenia i z wyprzedzeniem wymieniać zużyte fragmenty taśm i zagrożone rozejściem połączenia. Urządzenia diagnostyczne i rozwiązania informatyczne mające cechy rozwiązań 4.0 są już dostępne na rynku. Są też dostępne krajowe, modułowe urządzenia diagnostyczne (por. system DiagBelt), które są już 4.0 ready. Warto je wdrożyć i zintegrować z innymi systemami automatyki przenośników, by w pełni zabezpieczyć niezawodną pracę systemów transportowych. Przy wysokich kosztach stałych w kopalni można osiągnąć niskie koszty jednostkowe wydobycia jedynie przy pełnym wykorzystaniu mocy produkcyjnych, a to oznacza, że wydobycie powinno się realizować bez zbędnych przerw i przestojów. Może to zapewnić cyfrowa rewolucja, określona jako Transport taśmowy 4.0 i Taśma przenośnikowa 4.0.

W rozwiązaniach 4.0 piramida automatyzacji nie będzie już ściśle zhierarchizowana (rys. 1), lecz poszczególne elementy/obiekty/systemy będą się ze sobą komunikowały, bez konieczności oczekiwania na decyzję centrum. Przepływ informacji nie będzie więc realizowany wyłącznie w pionie: z poszczególnych komponentów do działu IT przedsiębiorstwa oraz z działu IT do komponentów. Drugi kierunek przepływu informacji będzie realizowany w poziomie: pomiędzy maszynami zaangażowanymi w proces produkcji, a systemem produkcyjnym przedsiębiorstwa. Widać też połączenia pomiędzy różnymi poziomami (rys. 15). Jeśli do zapewnienia sprawnego funkcjonowania transportu wystarczy, by określone elementy/podzespoły się skomunikowały i podjęły inteligentne działanie, to aktywne angażowanie centrum nie musi być konieczne.

Kompleksowa integracja cyfrowa oznacza zdolny w czasie rzeczywistym, spójny, w razie potrzeby dwukierunkowy przepływ danych i informacji pomiędzy wszystkimi zaangażowanymi, heterarchicznymi, zdyscyplinowanymi systemami technologicznymi w ramach inteligentnej fabryki, w celu zapewnienia planowania, kontroli i realizacji procesów logistycznych produkcji. Ta transformacja umożliwia wzajemne połączenie poziomów strategicznych, taktycznych i operacyjnych pod względem całkowitej integracji pionowej (rys. 15) [6].

Inteligentny system przenośnikowy sam będzie rozpoznawał ładunek do przeniesienia, automatyczne będzie ładował go i rozładowywał, będzie realizował transport autonomicznie, negocjował zlecenia transportowe, uwzględniając nie tylko harmonogram masowy/objętościowy, lecz również wymogi jakościowe. Cały system będzie się samoorganizował, by zrealizować zadania w terminie [6].



Rys. 15 Nowa przestrzenna forma automatyzacji, w której poszczególne elementy i obiekty komunikują się w celu realizacji celu angażowania centrum za każdym razem [za 6]

Oprócz fizycznej realizacji transportu, w sferze informatycznej będzie toczył się jego wirtualny odpowiednik, a wszelkie dane o przenoszonym ładunku będą aktualizowały rekordy odcinków taśm i połączeń odpowiednimi danymi o jego masie i objętości, wykonanych cyklach obiegów pętli wokół przenośnika, zużytej energii itp. Zbierane on-line dane z licznych sensorów pozwolą na bezproblemową realizację zadań transportowych, a wszelkie pojawiające się nieprawidłowości będą usuwane na najbliższym postoju planowym nim stworzą realne zagrożenia. Naprawy taśm, połączenia będą realizowały roboty na specjalnych stanowiskach, a zapotrzebowanie na materiały będzie generował system IT na podstawie przewidywanych napraw i wymian. Serwisanci i kontrolerzy na monitorach/okularach będą mogli zobaczyć stan rdzenia taśmy nałożony na obraz VR taśmy (rzeczywistość rozszerzoną), tak by móc skontrolować pracę robotów lub samemu przeprowadzić nietypowe działania nieodpowiednie dla maszyn.

Abstract

In the era of the digital revolution known as Industry/Mining 4.0, the importance of information about the operation and condition of individual objects in transport systems is growing. Conveyor belt creates up to 60% of transport costs. Its damage entails not only high repair costs, but also production huge losses associated with long emergency stops. The use of different sensors monitoring the condition of the belt and their joints allows to determine the optimal replacement times lowering the cost of belt operation, eg. through cost-effective belt recondition. On-line belt monitoring helps prevent costly failures. The integration of data from many sources allows not only for an economically viable conveyor belt management in the mine, but it can also be used to optimize production. Data from automation systems and from scales allow for more precise belt durability measures such as effective time of operation, number of cycles and weight of transported mass. They can also be used to control the coal mixing process on belts during conveying. For the power plant, not only the amount of coal supplied during the shift is important, but also the distribution of coal quality over time. The more data is collected about the transportation process, the better it can be used. Currently, mines possess many digital data about belts and their joints, many data are collected on a regular basis about the transport system operation. Their integration and full use are missing. It is also worth considering the possibility of enriching your data with new information from new devices and sensors e.g. such as DiagBelt system etc.. Their visualization on mimic screens or large monitors in control rooms could enhance the knowledge about transportation system. The vision of an autonomous system of conveyor belts performing transport tasks and controlling. the quality of delivered materials in the physical and IT layer together with orders for services and repairs and replacements of belt segments ordered over the Internet does not have to be distant in the light of Polish and German achievements. The paper is an extension of the authors' presentation at the 10th International Brown Coal Congress in Bełchatów in April this year [30].

Literatura

[1] Ambriško L., Taraba V., Szabo S., Leco M.: Belt Damage Aspect to Impact Loading, Applied Mechanics and Materials, vol. 683, 2014, s. 102-107.

[2] Bajda M., Błażej R., Jurdziak L.: Impact of Selected Parameters on the Fatigue Strength of Splices on Multiply Textile Conveyor Belts. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 44 052021, 2016.
[3] Bajda M., Błażej R., Jurdziak L.: A new tool in belts resistance to puncture research, Mining Science, vol. 23, 2016, s. 173-182.
[4] Bajda M., Błażej R., Jurdziak L.: Condition monitoring of textile belts in the light of research results of their resistance to punctures investigations, 16th SGEM, Science and Technologies in Geology, Exploration and Mining, vol. II, 2016, s. 165-172.
[5] Bajda M., Błażej R., Jurdziak L., Hardygóra M.: Wpływ różnic trwałości połączeń wulkanizowanych i klejonych na koszty eksploatacji taśm przenośnikowych w kopalni podziemnej, Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN, 2017, nr 99, s. 71-88.
[6] Bartodziej M.: The Concept Industry 4.0. An Empirical Analysis of Technologies and Applications in Production Logistics, Springer, 2017, s. 150.
[7] Błażej R., Review of the newest NDT equipment for conveyor belt diagnostics, Diagnostyka (Diagnostics), 4(64), 2012, s. 21-24.
[8] Błażej R., Domański A., Jurdziak L., Martyna M.: Prognozy zmian stanu rdzenia taśm typu ST na podstawie czasu pracy odcinków taśm i długości przenośnika, Mining Science, 2014, vol. 21(2), s. 5-14.
[9] Błażej R., Jurdziak L.: Korzyści z diagnostyki taśm przenośnikowych w świetle stochastycznego charakteru procesu ich degradacji, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, nr 3, 2016. s. 38-48.
[10] Błażej R., Jurdziak L.: Condition-Based Conveyor Belt Replacement Strategy in Lignite Mines with Random Belt Deterioration. IOP Conf. Ser.: Earth Environ. Sci. 95(4), 2017, 042051.
[11] Błażej R., Jurdziak L., Hardygóra M., Zimroz R., Bujak C., Salata R., Domański A., Kurp Ł.: Diagnostyka taśm przenośnikowych z linkami stalowymi – System HRDS i jego wdrożenie, Mining Science, vol. 21(2), 2014, s. 15-24.
[12] Błażej R., Jurdziak L., Kawalec W.: Eksploatacyjny współczynnik bezpieczeństwa taśm przenośnikowych z linkami stalowymi, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, nr 3, 2014, s. 14-19.
[13] Błażej R., Jurdziak L., Kawalec W.: Condition Monitoring of Conveyor Belts as a Tool for Proper Selection of Their Replacement Time, Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Applied Condition Monitoring, vol. 4, 2015, s. 483-494.
[14] Błażej R., Jurdziak L., Kawalec W.: Why Weibull distribution can be used to describe belt segment and belt loop operating time and why it is not enough to use it to predict remaining belt life?, Lecture Notes in Engineering and Computer Science, vol. 2217, 2015, s. 557-561.
[15] Błażej R., Jurdziak L., Kawalec W., Operational Safety of Steel-Cord Conveyor Belts Under Non-stationary Loadings. Advances in Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, Applied Condition Monitoring, Springer, vol. 4, 2016, s. 473-481.
[16] Błażej R., Jurdziak L., Kirjanów A., Kozłowski T.: Evaluation of the quality of steel cord belt splices based on belt condition examination using magnetic techniques, Diagnostyka, 16(3) 2015, s. 59-64.
[17] Błażej R., Jurdziak L., Kirjanów A., Kozłowski T.: Core damages increase assessment in the conveyor belt with steel cords, Diagnostyka (Diagnostics), 18(3), 2017, s. 93-98.
[18] Błażej R., Jurdziak L., Kirjanów A., Kozłowski T.: A device for measuring conveyor belt thickness and for evaluating the changes in belt transverse and longitudinal profile, Diagnostyka, vol. 18, no. 4, 2017, s. 97-102.
[19] Błażej R., Jurdziak L., Kozłowski T, Kirjanów A.: The use of magnetic sensors in monitoring the condition of the core in steel cord conveyor belts – tests of the measuring probe and the design of the DiagBelt system, Measurement (London), vol. 123, 2018. s. 48-53.
[20] Borkowski L.: One Control Room krokiem milowym na drodze do proaktywnego zarządzania kopalnią Polkowice-Sieroszowice, Referat na Szkole Eksploatacji Podziemnej, 2017.
[21] Fedorko G., Molnar V., Ferkova Z., Peterka P., Kresak J., Tomaskova M.: Possibilities of failure analysis for steel cord conveyor belts using knowledge obtained from non-destructive testing of steel ropes, Engineering Failure Analysis, 67, September, 2016, s. 33-45.
[22] Gładysiewicz L., Migdał W.: Współczynniki energochłonności przenośników taśmowych, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 4 (38)/2017, s. 5-10.
[23] Hardygóra M., Bajda M., Gładysiewicz L.: Wpływ parametrów mieszanek gumowych na energochłonność transportu przenośnikowego, Transport Przemysłowy, nr 3, 2007.
[24] Harrison A.: Safety factor calculations for high-strength inclined belts based on NDT signal analysis. Int. Coal Handling and Util. Conf, Sydney, 19-21 June, 1990.
[25] Hermann M., Pentek T, Otto B.: Design Principles for Industrie 4.0 Scenarios. 49th Hawaii International Conference on System Sciences (HICSS) 5-8.01.16. 2016.
[26] Jurdziak L.: Gospodarka taśmami przenośnikowymi w kopalniach – stan obecny i perspektywy, Górnictwo Odkrywkowe, 40(5/6), 1998, s. 63-81.
[27] Jurdziak L.: Analiza ekonomiczna funkcjonowania kopalni węgla brunatnego i elektrowni z wykorzystaniem modelu bilateralnego monopolu, metod optymalizacji kopalń odkrywkowych i teorii gier, Wrocław, Oficyna Wydawnicza PWr, 307, s. 2007.
[28] Jurdziak L., Błażej R.: Polityka wymiany taśm przenośnikowych z uwzględnieniem ich regeneracji – korzyści z wykorzystania diagnostyki stanu, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, nr 2, 2016, s. 6-13.
[29] Jurdziak L., Błażej R.: Economic analysis of steel cord conveyor belts replacement strategy in order to undertake profitable refurbishment of worn out belts. 17th Int. Multidisciplinary Scientific GeoConference SGEM 2017, Conf. Proc., ISBN 978-619-7105-00-1/ISSN 1314-2704, s. 283-290, DOI: 10.5593/sgem2017/13/S03.036.
[30] Jurdziak L., Błażej R., Bajda M.: 2018. Monitorowanie stanu taśm i połączeń szansą na zwiększenie niezawodności pracy transportu ciągłego w kopalniach, Monografia Węgiel brunatny - dziś i w przyszłości, AGH, s.161-170.
[31] Jurdziak L., Kawalec W.: Komputerowo wspomagana gospodarka taśmami w KWB Turów, Górnictwo Odkrywkowe 3-4, 1990.

[32] Jurdziak L., Kawalec W., Król R.: Application of Flexsim in the DISIRE project, Studies & Proceedings of the Polish Association for Knowledge Management, 2017, t. 84, s. 87-96.
[33] Jurdziak L., Kawalec W., Król R.: Study on tracking the mined ore compound with the use of process analytic technology tags, Advances in Intelligent Systems in Production Engineering and Maintenance – ISPEM 2017, Springer, 2018, s. 418-427.
[34] Jurdziak L., Król R., Kawalec W.: Variation of ore grade transported by belt conveyors to processing plants, Physicochemical Problems of Mineral Processing, vol. 53 (1), 2017, s. 656-669.
[35] Jurdziak L., Stolarczyk R., Zawadzka B., 2001: Nowe narzędzia do komputerowego wspomagania zarządzania eksploatacją taśm, Transport Przemysłowy, nr 2, 2002, s. 10-14.
[36] Jurdziak L., Zimroz R.: Dlaczego diagnostyka maszyn się opłaca i ile można na tym zaoszczędzić?, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej, nr 106, Studia i Materiały 30, 2004, s.139-150.
[37] Kacprzak M., Kulinowski P., Wędrychowicz D.: Informatyczny system zarządzania procesem eksploatacji górniczych przenośników taśmowych, Eksploatacja i Niezawodność, 2(50), 2011. s. 81-93.
[38] Kawalec W., Krol R., Zimroz R., Jurdziak L., Jach M., Pilut R.: Project DISIRE (H2020) – an idea of annotating of ore with sensors in KGHM Polish Copper S.A. underground cop-per ore mines. MEC2016. E3S Web of Conferences 8, 01058, 2016.
[39] Kawalec W., Woźniak D.: Energy efficiency of the bottom cover of a conveyor belt – the first step to the new classification of belts (in Polish), Mining Science, 21(2), 2014, s. 47-60.
[40] Kołodziejczak M., Hertel L.: Sposób sterowania rozruchem ciągu przenośników, minimalizujący czas pracy przenośników nieobciążonych, Górnictwo i Geoinżynieria, 35(3/1), 2011, s. 169-173.
[41] Kopertowski A., Kołodziejczak M.: Praktyczne aspekty wykorzystania funkcji śledzenia urobku na układach KTZ w systemie wydobywczym KWB Bełchatów, Węgiel Brunatny, 3(96), 2016. s. 15-20.
[42] Kozielski M., Sikora M., Wróbel L.: DISESOR – Decision support system for mining industry. Proceedings of the FedCSIS 2015 conf., Art. No.: 2015 F168, s. 67-74.
[43] Król R., Kisielewski W.: Research of loading carrying idlers used in belt conveyor – practical applications, Diagnostyka (Diagnostics), 15(1), 2014, s. 67-74.
[44] Kuznetsov M.: Combining expert knowledge and advanced data analytics for Predictive Maintenance. Smart Mining Conference Forum Bergbau 4.0, Aachen, 14-15.11.2017.
[44] Kwaśniewski J., The use of monitoring to improve the reliability and endurance of continuous coal handling systems, Arch. Min. Sci., vol. 56 (2011), no. 4, s. 651-664.
[45] Mazurkiewicz D.: Komputerowy system monitorowania stanu złączy taśm przenośnikowych, Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa, r. 44, nr 4, 2006, s. 14-22.
[46] Migdał W.: Wykorzystanie systemów automatyki przemysłowej do oceny energochłonności transportu ciągłego urobku w kopalni odkrywkowej, Politechnika Wrocławska, Praca doktorska (niepubl.), 2018.
[47] Neumann T.: Conveyor Belt Group. Mining 4.0 – Our Digital Journey. Smart Mining Conference Forum Bergbau 4.0, Aachen, 14-15.11.2017.
[48] Paschedag U.: Mining 4.0 – New Challenges to International Cooperation, Smart Mining Conference Forum Bergbau 4.0, Aachen, 14-15.11.2017.
[49] Sawicki R., Mazur K., Borkowski L.: KGHM Polska Miedź S.A., Automatyzacja odstawy urobku w O/ZG Polkowice-Sieroszowice, KGHM Polska Miedź S.A., Referat wygłoszony na Polskim Kongresie Górniczym, Kraków 20.11.2017.
[50] Schools T.: Condition Monitoring of Critical Mining Conveyors. Engineering & Mining Journal, March 2015..
[51] Silarska E., Frankowski R., Kapusta J.: Gospodarka złożem Bełchatów z wykorzystaniem geologicznych modeli komputerowych, Górnictwo i Geoinżynieria, r. 35, z.3, 2011, s. 317-329.
[52] Stefaniak P., Zimroz R., Król R., Górniak-Zimroz J., Bartelmus W., Hardygora M.: Some Remarks on Using Condition Monitoring for Spatially Distributed Mechanical System Belt Conveyor Network in Underground Mine – A Case Study, Condition Monitoring of Machinery in Non-Stationary Operations, 4, 2011, s. 497-507, 10.1007/978-3-642-28768-8.
[53] Szymański J.: Przenośniki węglowe o regulowanej prędkości taśmy. aspekty techniczne i ekonomiczne, Górnictwo i Geoinżynieria, 33(2), 2009, s. 427-438.
[54] Twardowski M.: KGHM Polska Miedź S.A., Trzeci wymiar geologii złoża rud miedzi, Referat wygłoszony na Szkole Eksploatacji Podziemnej, Kraków 26.02.2018.
[55] http://glowny-mechanik.pl/2017/04/07/diagnostyka--przenosnikow-tasmowych/
[56] http://gornicza.com.pl/aktualnosc/4026/kopalnia-monitorowana
[57] http://jmmetrology.eu/piramida-automatyzacji/
[58] http://polkowice.com.pl/2017/03/13/one-control-room-w-kopalni-polkowice-sieroszowice/
[59] http://przemysl-40.pl/index.php/2017/03/22/czym-jest--przemysl-4-0/
[60] http://www.beltscan.com
[61] http://www.bulk-solids-handling.com/?q=topics/conveying-transportation/mechanical-belt-conveyor-systems/rema-tip-top-wins-conveyor
[62] http://www.diagbelt.pwr.edu.pl/index.php/pl
[63] http://www.lrm-nde.com/reference.html
[64] http://www.merrid.com.pl/pl/oferta/systemy/system--wydobywczy
[65] https://news.sap.com/germany/contitech-100-000-angebote-pro-jahr-nun-aus-der-cloud/
[66] https://www.astor.com.pl/o-nas/artykuly/technologia/9722-nowoczesne-centrum-zarzadzania-produkcja-w-zakladzie-przerobki-mechanicznej-wegla-oddzialu-kwk-knurow-szczyglowice.html
[67] https://www.bergbau-vier-punkt-null.com/agenda/
[68] https://www.merrid.com.pl/pl/portfolio/realizacja-3/
[69] https://www.nrec.ri.cmu.edu/solutions/mining/other--mining-projects/belt-inspection.html

Publikacja finansowana ze środków projektu PBS III ścieżka A pt. „Złącza wieloprzekładkowych taśm przenośnikowych o zwiększonej trwałości eksploatacyjnej" umowa nr PBS3/A2/17/2015.

dr hab. inż. Leszek Jurdziak, prof. PWr
dr inż. Ryszard Błażej
dr inż. Mirosław Bajda
Politechnika Wrocławska

View publication stats