

Radosław ZIMROZ^{1*}
Paweł STEFANIAK¹
Monika HARDYGÓRA¹

WYBRANE ZAGADNIENIA DIAGNOSTYKI PROCESÓW ROBOCZYCH I STANU TECHNICZNEGO ELEMENTÓW MASZYN GÓRNICZYCH

W artykule przedstawiono przykładowe możliwości adaptacji diagnostyki procesów roboczych i stanu technicznego do wspomagania zarządzania eksploatacją maszyn wykorzystywanych w polskich kopalniach surowców skalnych. Wieloletnie doświadczenia autorów, związane z rozwojem tego typu technologii w górnictwie węgla brunatnego i rud miedzi, okazały się zbieżne z problematyką maszyn górnictwa skalnego. Stąd też korzyści związanych z wdrożeniem tego typu rozwiązań należy upatrywać z punktu widzenia wzrostu wydajności kopalni, redukcji liczby nieplanowanych przestojów maszyn i ich napraw, bezpieczeństwa pracy itd.

1. WPROWADZENIE

Artykuł jest wprowadzeniem do problematyki monitorowania i diagnostyki procesów i stanu technicznego maszyn górniczych. Obecność tej tematyki w ostatnich latach staje się zauważalna w przemyśle górnictwym, zarówno górnictwa podziemnego, jak i odkrywkowego, w kopalniach węgla kamiennego/brunatnego, rud miedzi czy kruszyw naturalnych. Potrzeby gospodarki w zakresie surowców skalnych znacząco wzrosły w ostatnich latach, zatem zapewnienie efektywnych metod eksploatacji ukierunkowanych na wzrost dyspozycyjności maszyn górniczych wydaje się uzasadnionym kierunkiem. Niestety, poszukiwania prac traktujących o wdrożeniach systemów monitorująco-diagnostycznych w górnictwie skalnym nie dały zadawalających rezultatów zwłaszcza na poziomie krajowym. Taki wynik zmusza do refleksji. Czy górnictwo skalne nie potrzebuje tego typu rozwiązań? Czy może jednak jeszcze nie dojrzało (organizacyjnie, finansowo, itd.) do takich technologii? Procesy zachodzące w górnictwie rud miedzi czy węgla kamiennego i funkcje stosowanych maszyn są podobne (wiercenie, urabianie, transport cykliczny - oponowy lub ciągły - przenośnikowy, kruszenie itd.). Problemy znane

¹ KGHM CUPRUM sp. z o.o. Centrum Badawczo-Rozwojowe, Wrocław

* E-mail: radoslaw.zimroz@pwr.edu.pl

z górnictwa węglowego czy miedziowego sugerują, że podobnie powinno być również w górnictwie skalnym (trudne warunki środowiskowe, zmienne obciążenia). Mimo tego, piśmiennictwo dotyczące tej tematyki w Polsce jest znikome.

W artykule dokonano pobieżnego, z racji ograniczeń objętości artykułu, przeglądu najważniejszych rozwiązań diagnostycznych w przemyśle górniczym, analizując je jednocześnie w kontekście potencjalnych zastosowań w górnictwie skalnym. Znalezienie analogii pomiędzy górnictwem skalnym a miedziowym, czy węglowym wydaje się dość proste, co podkreśla się np. w pracy [15]. Niestety, w zakresie maszyn górniczych dla przemysłu skalnego, ostatnia znaleziona w Internecie praca, rozważająca problemy ich rozwoju w nieco szerszym kontekście, datowana jest na rok 2000 [12].

1.1. MOŻLIWOŚCI DIAGNOSTYKI STANU TECHNICZNEGO ELEMENTÓW MASZYN

Każda inwestycja realizowana w przedsiębiorstwie powinna być poprzedzona analizą opłacalności. W środowisku górniczym funkcjonuje opinia, że dopóki maszyna nie ulegnie awarii i system jej nie wykryje, środki zainwestowane w diagnostykę nie są dobrą inwestycją. Oczywiście, zalecane jest stosowanie metod diagnostycznych w przypadku kosztownych maszyn o znaczeniu strategicznym dla ciągu technologicznego, a inwestycje w diagnostykę powinny być poprzedzone analizą awaryjności maszyn itd. Współczesne metody diagnostyki potrafią jednak nie tylko zapobiegać awariom, ale wykrywają również uszkodzenia lub zmianę warunków współpracy (np. rozosiowanie) we wczesnych stadiach rozwoju i pozwalają znacznie wydłużyć czas życia maszyny. Przykładowo, dotychczas, na potrzeby górnictwa węgla brunatnego w kopalniach Konin, Turów czy Bełchatów z powodzeniem zastosowano systemy monitoringu elementów maszyn w układzie KTZ [1],[2],[3],[4],[5],[6]. Systemy te obejmowały nadzorem układy napędowe (silniki, przekładnie) koła czerpakowego, przenośników taśmowych, łożysk w silnikach, przekładniach i bębnach przenośnikowych. Dodatkowo, monitorowane są również elementy konstrukcyjne koparek i zwałowarek, a także system lin napinających [9]. W Kopalni Turów stosuje się również, opracowany przez zespół Politechniki Wrocławskiej, system nadzoru stacji napędowej przenośnika taśmowego, a także system do diagnostyki taśm z linkami stalowymi. W górnictwie rud miedzi, w kopalni Polkowice Sieroszowice, (*) wykorzystuje się innowacyjny system zarządzania przenośnikami taśmowymi Diag Manager (więcej o DM w dalszej części), który bazuje na diagnostyce drganiowej i termowizyjnej. (*do oceny stanu technicznego elementów układu napędowego przenośnika taśmowego).

W tej samej kopalni realizowany jest projekt dotyczący systemu monitorowania taśmy przenośnikowej w celu zapobiegania wystąpieniu przecięć wzdłużnych. Obecnie, w KGHM Cuprum realizowane są prace dotyczące możliwości diagnostyki kruszarek, a także kombajnu chodnikowego. Badania diagnostyczne kruszarek były także tematem pracy [11]. W zakresie górnictwa węgla kamiennego, podejmowane były próby diagnozowania układów urabiających [16] oraz całego kombajnu ścianowego czy chodnikowego. Znane jest także rozwiązanie dotyczące monitorowania obudowy oraz ciągu przenośników [7],[8],[10].

Oczywiście, nie wszystkie rozwiązania dają się przenieść wprost do górnictwa skalnego. Wydaje się jednak celowe przeanalizowanie układu technologicznego i wskazanie kluczowych elementów ciągu, których bezawaryjna praca, ze względu na koszty, bezpieczeństwo itd., jest najistotniejsza.

1.2. DIAGNOSTYKA PROCESÓW ROBOCZYCH MASZYN

Monitorowanie i diagnozowanie procesów technologicznych jest istotne z wielu powodów. Jednym z ważniejszych, jest ocena efektywności i poprawności realizowanych procesów zarówno przez maszyny, jak i przez operatora. Nieprawidłowa praca maszyny może skutkować zwiększeniem energochłonności, przyspieszonym zużyciem, uszkodzeniem jej elementów, a nawet awarią całej maszyny, częstokroć do stanu całkowitej niezdatności. Automatyczna, obiektywna ocena efektywności jest ściśle związana z rozliczaniem kosztów pracy, a przede wszystkim z oceną osiągniętej wydajności produkcyjnej. Takie podejście ma ogromne znaczenie w przypadku dużej firmy wykorzystującej flotę maszyn, jak to ma miejsce np. w KGHM PM SA.

Obecnie, w zakresie monitorowania procesów roboczych, realizowany jest w KGHM PM SA projekt „Synapsa”. Zakres projektu obejmuje monitorowanie pracy maszyn wierząco-kotwiących, ładowarek oraz wozów odstawczych. Wyniki badań dotyczące diagnostyki maszyn i procesów roboczych, istotnych z punktu widzenia KGHM, można znaleźć także w pracach [13],[14].

Jak już wspomniano, obecnie w KGHM Cuprum realizowane są prace dotyczące możliwości diagnostyki procesu urabiania kombajnem chodnikowym. Wcześniejsze prace J. Jonaka [17] pokazują możliwości oceny zarówno procesu, jak i stanu technicznego organu skrawającego.

2. SYSTEMY MONITOROWANIA I DIAGNOSTYKI. KOMPUTEROWE WSPIERANIE ZARZĄDZANIEM EKSPLOATACJĄ W OPARCIU O STAN TECHNICZNY

Nadzór diagnostyczny może być realizowany w sposób okresowy lub ciągły. Na rynku jest dostępnych wiele urządzeń pomiarowych (pomiar temperatury, przyspieszenia, drgań), a nawet prostych przyrządów diagnostycznych. Jeśli w przedsiębiorstwie funkcjonuje kilka maszyn nie ma potrzeby inwestowania większych środków w sprzęt diagnostyczny. W przypadku maszyn o bardziej złożonej budowie, o znaczeniu strategicznym dla utrzymania produkcji, warto zainwestować w system ciągłego nadzoru diagnostycznego. Często systemy monitorowania utożsamiane są z systemami diagnostycznymi. System monitorowania rejestruje, przesyła i wizualizuje wartości parametrów. W przypadku wystąpienia zmiany stanu informuje o przekroczeniu wartości dopuszczalnej przez dany parametr. System diagnostyczny, czy diagnostyczno-prognostyczny daje znacznie większe możliwości, polegające na lokalizacji, identyfikacji uszkodzenia, a także estymacji tzw. resztkowego czasu życia maszyny, tzn. czasu do wystąpienia zużycia granicznego.

W przypadku dużej liczby maszyn, zwykle stosuje się informatyczne systemy wspomaganie zarządzania eksploatacją. Systemy informatyczne są wprowadzane do górnictwa od wielu lat. Obszary informatyzacji dotyczyły modułów księgowych, zakupów, magazynowych itd., a w niewielkim stopniu dotyczyły sfery technologicznej, produkcyjnej lub utrzymania ruchu. Systemy do zarządzania eksploatacją maszyn są ciągle tematem rozwojowym w górnictwie. Jak każda nowoczesna technologia, system do komputerowego wsparcia zarządzania eksploatacją zwykle jest drogi i skojarzony jest z minimalnym wymaganym progiem opłacalności stosowania takiego podejścia. Praktycznie, tylko duże koncerny mogą sobie pozwolić na takie wdrożenia. Dobrymi przykładami mogą być systemy zarządzania eksploatacją przenośników taśmowych (Diag Manager), czy aktualnie wdrażany system lokalizacji i monitoringu maszyn samojezdnych w KGHM Polska Miedź S.A. W tym ostatnim przypadku, zakres wymagań jest dużo szerszy niż tylko zarządzanie w rozumieniu utrzymania stanu technicznego maszyn.

3. PROBLEMY DIAGNOSTYKI STANU

Zagadnienia diagnostyki technicznej maszyn są rozwijane od kilku dekad. Mimo dynamicznego rozwoju, kluczowymi problemami we współczesnej diagnostyce są następujące zagadnienia:

- walidacja sygnałów,
- diagnostyka w zmiennych warunkach eksploatacyjnych,
- diagnostyka uszkodzeń w obecności zakłóceń, zwłaszcza o nie-Gaussowskim charakterze,
- diagnostyka uszkodzeń w obecności innych uszkodzeń,
- wnioskowanie diagnostyczne, zwłaszcza wyznaczanie progów decyzyjnych,
- prognozowanie stanu czyli estymacja czasu bezpiecznej eksploatacji.

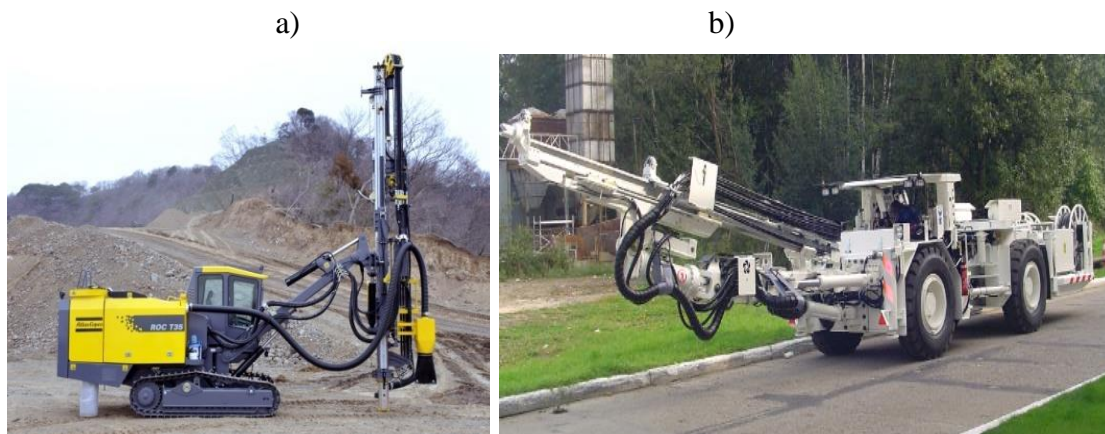
Problemy te *de facto* są dość uniwersalne i nie zależą ani od obiektu, ani od branży, która jest rozważana. Sektor górniczy znacznie je uwypukla. Wpływ na proces diagnozowania ma skomplikowana budowa maszyn, niekorzystne warunki środowiskowe (zapylenie, zakres temperatur, wilgotność), zmienność obciążeń i czynniki ludzkie. Rozwój metod diagnostycznych, procedur wykrywania uszkodzeń, reguł wnioskowania, procedur prognostycznych, a także urządzeń lub całych systemów monitorująco-diagnostycznych jest realizowany przez wiodące ośrodki w Polsce (Warszawa, Kraków, Poznań, Wrocław, Gliwice, Lublin,...), a także przez firmy świadczące usługi diagnostyczne.

4. MOŻLIWOŚCI ZASTOSOWANIA DIAGNOSTYKI W GÓRNICTWIE SKALNYM

W poprzednich rozdziałach opisano krótko możliwości diagnostyki na przykładach konkretnych aplikacji w przemyśle górniczym węgla kamiennego, brunatnego, rud miedzi itd. Przedstawione przykłady uzasadniają konieczność implementacji systemów

monitorowania i diagnozowania obiektów technicznych dla wsparcia zarządzania procesem eksploatacji w sektorze górnictwa skalnego.

Kolejne rysunki (rys. 1-5) przedstawiają przykłady maszyny górnictwa skalnego, węglowego i miedziowego w różnych przykładach działalności górniczej. Wydaje się, że w przypadku maszyn wierzących, przeróbczych lub transportowych, zadania i problemy w górnictwie skalnym są praktycznie takie same.



Rys. 1. Wiertnice stosowane w górnictwie: skalnym (a), rudy miedzi (b) (źródło: <http://www.aziolarefin.nl/>)
Fig. 1. Drilling machines for (a) rock and (b) copper ore mining (source: <http://www.aziolarefin.nl/>)



Rys. 2. Kruszarki stosowane w górnictwie rud miedzi oraz w górnictwie skalnym (źródło: www.betotrans.pl/)
Fig. 2. Crushers using in copper ore and rock mining (source: www.betotrans.pl/)

Rysunki 6. i 7 przedstawiają przykładowe wyniki własnych badań i pomiarów drgań dla kruszarek (rys. 6) oraz zależność pomiędzy cechami diagnostycznymi, a prędkością obrotową dla przekładni zębatej dla krótkich przenośników taśmowych, stosowanych na zwałowarce. Przykłady te zostały dobrane celowo i pokazują jak silnie może wpływać zmiana warunków obciążenia na postać sygnału, a także ilustrują możliwy charakter zakłóceń (rys. 6d) sygnału informacyjnego.



Rys. 3. Wozidła i koparki stosowane w oponowym transporcie cyklicznym w górnictwie skalnym (źródło: www.nbi.com, <http://gornictwo.wnp.pl/>)

Fig. 3. Loaders and excavators using in cyclic, tire, transport in rock mining (source: www.nbi.com, <http://gornictwo.wnp.pl/>)



Rys. 4. Ładowarka i wóz odstawczy stosowane w oponowym transporcie cyklicznym w górnictwie rud miedzi (źródło: <http://www.kghmzanam.pl/>)

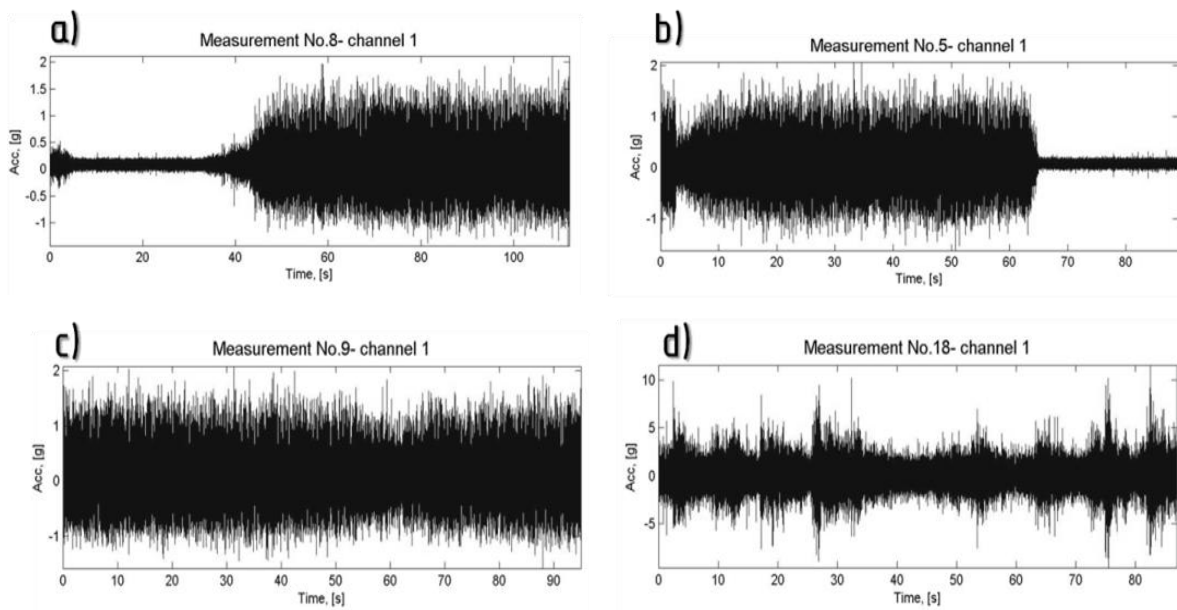
Fig. 4. Loader and minetruck using in cyclic, tire transport in copper ore mining (source: <http://www.kghmzanam.pl/>)



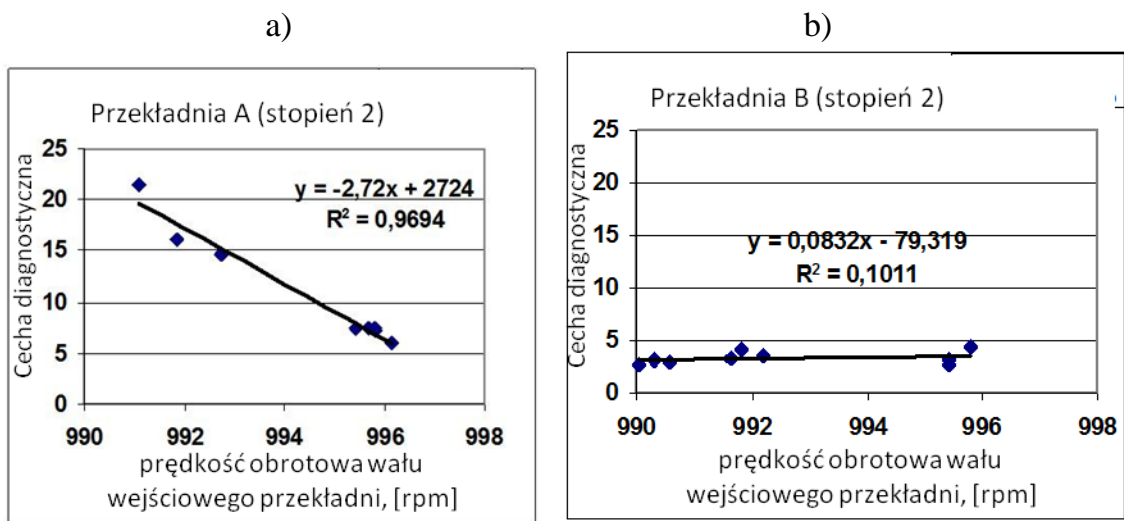
Rys. 5. Przenośnik taśmowy w górnictwie skalnym i węgla brunatnego

Fig. 5. Belt conveyor in rock and lignite mining

Rysunek 8 przedstawia koncepcję procedury pomiarowej oraz okno główne aplikacji przenośnego systemu pomiarowego, opracowanego przez autorów pracy na potrzeby diagnostyki przekładni zębatach przenośników taśmowych w górnictwie rud miedzi. System rejestruje prędkość obrotową oraz przyspieszenia drgań na 3 kanałach. Po zakończeniu rejestracji wyznacza kilka wskaźników informujących operatora o stanie technicznym. Ze względu na skalę problemu utrzymania układów napędowych (na jednym przenośniku może być od 1 do 4 napędów, przenośników w kopalni jest kilkadziesiąt), opracowano system bazodanowy w technologii GIS do wspomaganie zarządzania eksploatacją (rys. 9).

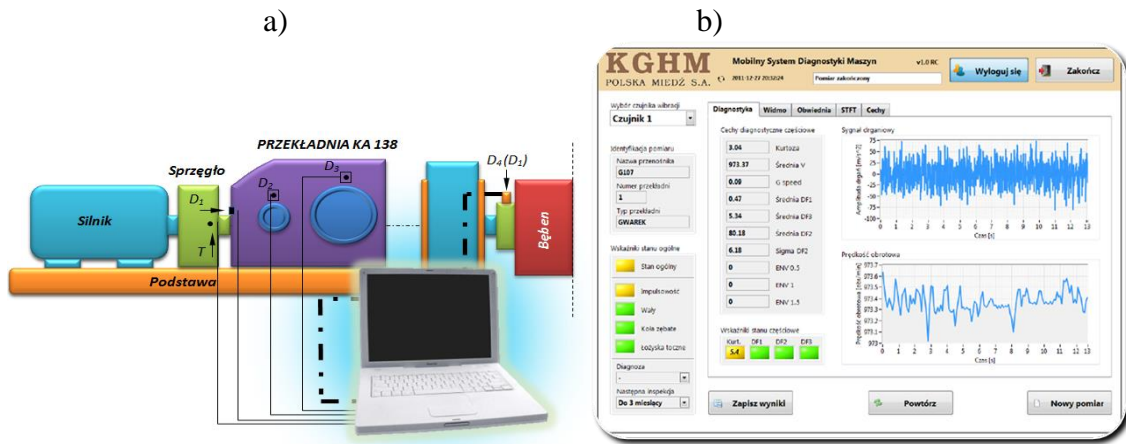


Rys. 6. Przykładowe zapisy rejestracji przyspieszeń drgań na korpusie łożyska kruszarki
 Fig. 6. Exemplary records of vibration accelerations on housing of crusher bearing

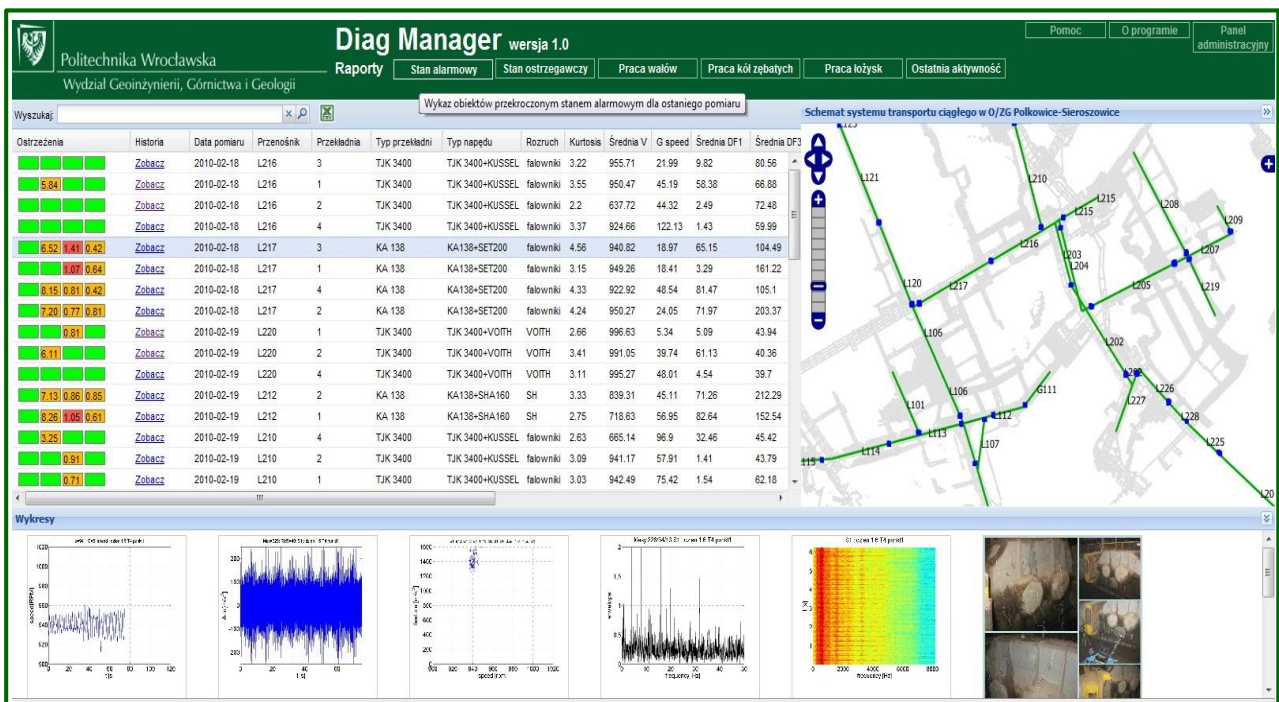


Rys. 7. Zależność wartości cech diagnostycznych od prędkości obrotowej dla przekładni zębatej w stanie:
 a) nieprawidłowym, b) prawidłowym (przenośnik taśmowy)
 Fig. 7. Dependence of diagnostic feature values and rotational speed for gearbox in (a) good and (b) bad condition
 (belt conveyor)

Okno główne programu zawiera tabelę (zestawiającą parametry identyfikujące dany układ napędowy, wartości cech diagnostycznych, datę pomiaru itd.), interaktywną mapę z siecią wyrobisk oraz przenośników taśmowych, a w dolnej części prezentowane są, na życzenie zwykle wykwalifikowanego użytkownika, wyniki analiz sygnałowych i fotografie stanu kół zębatych). Zaletą systemu jest dostęp do bazy przez przeglądarkę internetową, oraz dedykowane możliwości raportowania.



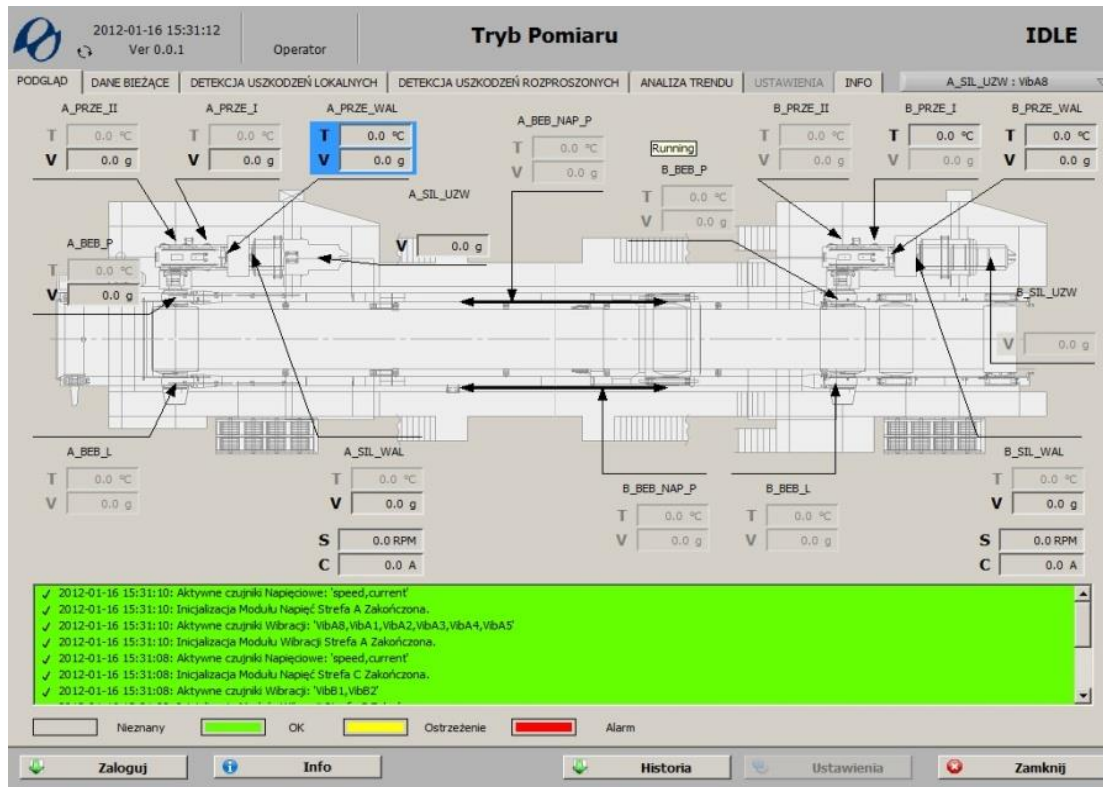
Rys. 8. Przenośny rejestrator danych diagnostycznych opracowany dla KGHM PM S.A.: a) koncepcja pomiaru, b) aplikacja do akwizycji danych
 Fig. 8. Portable data recorder of diagnostic data developed for KGHM PM. S.A.: a) idea of measurement, b) application for data acquisition



Rys. 9. Komputerowy system Diag Manager do zarządzania eksploatacją przenośników taśmowych
 Fig. 9. Computerized system – Diag Manager for maintenance of belt conveyors

Prezentowane na rys. 8 i 9 rozwiązania zostały opracowane przez autorów pracy na potrzeby okresowej kontroli elementów układów napędowych.

W szczególnych przypadkach istnieje konieczność opracowania systemu diagnostyki układów napędowych pracującego w trybie ciągłym. Rysunek 10 prezentuje główne okno aplikacji systemu monitorująco-diagnostycznego, opracowanego przez autorów dla KWB Turów.



Rys. 10. System ciągłej diagnostyki elementów stacji napędowej przenośnika taśmowego w GKİESA o/KWB Turów
 Fig. 10. Continuous diagnostics system of drive station's elements of belt conveyor in GKİESA o/KWB Turów

5. PODSUMOWANIE

W pracy omówiono wybrane przykłady wdrożeń metod i systemów monitorująco-diagnostycznych w przemyśle górniczym. Celem pracy było pokazanie możliwości współczesnej diagnostyki oraz wykazanie dużego potencjału w zakresie wdrażania diagnostyki w górnictwie surowców skalnych. Dzięki stosowaniu metod diagnostyki zarówno stanu technicznego elementów maszyn, jak i procesów roboczych realizowanych przez te maszyny, możliwe jest zwiększenie efektywności produkcji, poprawienie bezpieczeństwa pracy (mniej nieplanowanych postojów, awarii, napraw) i lepsza organizacja produkcji.

Doświadczenia z wdrożeń tego typu systemów w górnictwie rud miedzi, węgla brunatnego czy kamiennego wskazują na korzyści, wynikające z takich inwestycji.

LITERATURA

- [1] AUGUSTYNOWICZ J., DUDEK D., DUDEK K., FIGIEL A., 2007, *Prognozowanie okresu bezpiecznej eksploatacji maszyn górniczych: rozważania o degradacji obiektu*, Górnictwo i Geoinżynieria, 31/2, 55–66.
- [2] BARTELMUS W., ZIMROZ R., 2005, *Diagnostyka uszkodzeń na podstawie sygnału drgań w maszynach górniczych*, Górnictwo Odkrywkowe, 47/4–5, 22–31.

- [3] BARTELMUS W., ZIMROZ R., 2007, *Diagnostyka układów napędowych maszyn górnictwa odkrywkowego*, Górnictwo Odkrywkowe, 49/5–6, 13–23.
- [4] LUFT M., DUDZIŃSKI M., 2003, *Nowoczesne systemy monitoringu maszyn górnictwa odkrywkowego*, Górnictwo Odkrywkowe, 45/4–5, 118–120.
- [5] SAWICKI W., ZIMROZ R., KRÓL R., DYK S., 2007, *Badania diagnostyczne układów napędowych przenośników taśmowych w warunkach kopalni podziemnej miedzi*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Studia i Materiały, 118/33, 107–120.
- [6] BARTELMUS W., ZIMROZ R., SAWICKI W., MANIAK M., WOŹNIAK Z., FURMANIAK K., 2007, *Wybrane zagadnienia diagnostyki wielostopniowej przekładni zębatej ze stopniem planetarnym w układzie napędowym koparki kołowej*, Górnictwo i Geoinżynieria, 31/2, 75–86.
- [7] CHRÓSZCZ B., GWIAZDZIŃSKI P., KĘPSKI P., 2010, *Nowoczesna diagnostyka napędów maszyn górniczych w KWK Wieczorek w oparciu o system, FAMAC VIBRO* Napędy i Sterowanie, 12/7–8, 94–96.
- [8] KĘPSKI P., BARSZCZ T., 2012, *Validation of vibration signals for diagnostics of mining machinery*, Diagnostyka, 4/64, 25–30.
- [9] GIBIEC M., 2011, *Data mining w systemie monitorowania pracy kombajnów górniczych*, Wiadomości Górnicze, 62/7–8, 398–405.
- [10] HANSEL J., 2012, *Polska metodyka badań magnetycznych lin stalowych*, Problemy Eksploatacji, 3, 91–107.
- [11] SZYMAŃSKI Z., 2010, *Badania diagnostyczne i niezawodnościowe układów napędowych maszyn górniczych*, Wiadomości Górnicze, 61/5, 307–314.
- [12] FOBER S., LUTYŃSKI A., 2002, *Pomiary drgań i hałasów w diagnostyce technicznej maszyn i urządzeń przerobczych*, Zeszyty Naukowe. Górnictwo / Politechnika Śląska, 255, 429–439.
- [13] BĘBEN A., 2000, *Kierunki rozwoju maszynowego urabiania w górnictwie odkrywkowym skalnym*, Prace Naukowe Instytutu Górnictwa Politechniki Wrocławskiej. Konferencje, 91/28, 11–35.
- [14] OKRENT K., 2011, *Trendy rozwojowe systemów sterowania we współczesnych samojezdnych maszynach górniczych wierzących i kotwiących*, Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze, 2, 4–56.
- [15] KOLLEK W., MAĆKOWIAK Z., SIWULSKI T., 2012, *Analiza możliwości zastosowania monitoringu procesu wiercenia w kopalniach KGHM Polska Miedź S.A.*, Napędy i Sterowanie, 14/7–8, 100–103.
- [16] GZYL W., 2000, *Wykorzystanie zmodernizowanych kombajnów chodnikowych poza kopalniami węgla kamiennego*, Maszyny Górnicze, 18/4, 61–64.
- [17] JONAK J., JEDLIŃSKI Ł., GAJEWSKI J., 2010, *Analysis of the mining torque signal with Continuous Wavelet Transform*, Mechanics and Control, 29/4, 169–173.

SELECTED ISSUES FOR DIAGNOSTICS OF OPERATING PROCESSES AND TECHNICAL CONDITION OF MINING MACHINERY ELEMENTS

In the paper review of diagnostic methods and systems operating In mining industry is discussed In the context of technology transfer to mining rock materials and natural aggregates. Briefly benefits of both condition as well as processes monitoring in mining machines operation are highlighted. Practical examples from lignite, hard coal and copper ore mining companies are recalled. Similarities between drilling, haulage (using conveyor or trucks), etc in mining of different types of materials are underlined. It is claimed that due to increased needs related to mining of raw materials, natural aggregates etc, companies should invest in monitoring and management systems to be more effective.

Keywords: *diagnostics, monitoring system, mining machinery, rock mining*