

Nowe rozwiązania inteligentnych maszyn dla górnictwa

Streszczenie

W artykule zaprezentowano przykładowe rozwiązania konstrukcyjne i organizacyjne opracowane w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG wykorzystujące metody i narzędzia objęte wspólną nazwą *Information Technology (IT)*. Przedstawiono przykładowe maszyny i urządzenia, których praca jest kontrolowana i nadzorowana przez zaawansowane systemy mechatroniczne, takie jak kombajn ścianowy KSW-800NE i przenośnik zgrzeblowy.

Summary

Examples of design and organizational solutions developed at the KOMAG Institute of Mining Technology, which use the *Information Technology (IT)* methods and tools, are given. Examples of machines and devices such as KSW-800NE longwall shearer and flight-bar conveyor, operation of which is controlled by advanced mechatronic systems, are presented.

Słowa kluczowe: *Information Technology (IT)*, *Predictive Maintenance*, kombajn ścianowy; przenośnik zgrzeblowy

Keywords: *Information Technology (IT)*, *Predictive Maintenance*, longwall shearer, flight-bar conveyor

1. Wprowadzenie

Rozwiązania konstrukcyjne i organizacyjne opracowane w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG w szerokim stopniu wykorzystują metody i narzędzia objęte wspólną nazwą *Information Technology (IT)*. Poprzez integrację składników mechanicznych, elektronicznych i informatycznych powstają rozwiązania o charakterze mechatronicznym. Nowe kierunki w rozwoju IT wyznacza obecnie Internet Rzeczy (ang. *Internet of Things, IoT*). Jego istotą jest połączenie w sieć inteligentnych urządzeń wyposażonych w czujniki i akulatory. Czujniki pozwalają inteligentnym obiektom zbierać informacje o parametrach pracy, natomiast akulatory umożliwiają sterowanie dzięki algorytmom przetwarzającym je.

Zmienia to podejście do projektowania, wytwarzania środków technicznych i sposobu eksploatacji. Zmiany w komunikacji człowiek – maszyna otwierają drogę do komunikacji maszyna – maszyna (M2M). Tworzone są nowe standardy wymiany danych, platformy sprzętowe, infrastruktury sieciowe, które prowadzą do optymalizacji wykorzystania zasobów materialnych i ludzkich. Znajduje to swoje odbicie w nowych relacjach pomiędzy wytwórcą i użytkownikiem. Wyrazem tego są nowe modele organizacyjne, oparte na krótszych łańcuchach logistycznych, dostarczających zindywidualizowane produkty i usługi. W obszarze utrzymania ruchu i obsługi serwisowej, dzięki danym zarejestrowanym przez czujniki zainstalowane na maszynach i przetwarzane przez algorytmy, możliwe staje się inteligentne sterowanie pracą maszyny. Ma ono na celu, oprócz zapewnienia poprawnych warunków pracy

maszyny, również zapobieganie awariom (*Preventive Maintenance*), oraz umożliwia predykcję awarii kontrolowanych zespołów (*Predictive Maintenance*). Tendencja ta nie omija również maszyn i urządzeń górniczych stosowanych zarówno na powierzchni, jak i pod ziemią. Należy oczekiwać, że wymagania użytkowników w coraz większym stopniu będą się zwracały w kierunku tej formy utrzymania ruchu, która według specjalistów może być kilkukrotnie tańsza, aniżeli planowe przeglądy i naprawy. Również w ITG KOMAG opracowywane są maszyny i urządzenia, których praca jest kontrolowana i nadzorowana przez zaawansowane systemy mechatroniczne. Przykładem jest kombajn ścianowy KSW-800NE opracowany w ramach projektu INERG oraz ścianowy przenośnik zgrzeblowy zrealizowany w ramach projektu ICON.

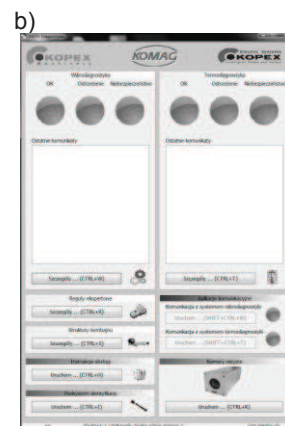
2. Kombajn ścianowy KSW-800NE

Kombajn ścianowy KSW-800NE (rys. 1) został opracowany w ramach projektu INERG przy współpracy z KOPEX Machinery S.A, oraz Elgór+Hansen S.A., [5]. Liderem projektu był Instytut KOMAG, a prace konsorcjum finansowane były w ramach programu IniTech. W toku prac nad projektem powstał System Diagnostyki, Identyfikacji Elementów Maszyny i Obserwacji Warunków Pracy, zgodnie ze strategią *Predictive Maintenance*. Składa się on z następujących podsystemów:

- wibrodiagnostyki,
- diagnostyki kombajnu za pomocą kamery termowizyjnej,
- Identyfikacji Elementów Maszyn,
- Interaktywnej Dokumentacji Techniczno-Ruchowej.



Rys. 1. Widok kombajnu KSW-800NE [źródło: opracowanie własne]



Rys. 2. Stacja robocza KOMAG, na której zainstalowano System Diagnostyki, Identyfikacji Elementów Maszyny i Obserwacji Warunków Pracy (a), interfejs użytkownika warstwy programowej systemu (b) (źródło: [2])

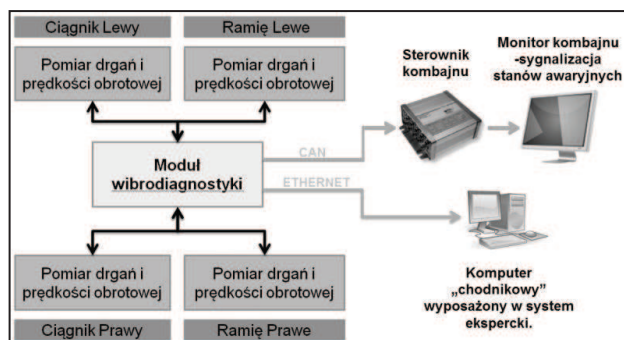
Podsystemy posiadają dwie warstwy: programową i sprzętową. Oprogramowanie podsystemów zainstalowane jest na stacji roboczej KOMAG umieszczonej w chodniku podścianowym, w pociągu aparaturowym. Stacja robocza przystosowana jest do pracy w podziemiach kopalń, rys. 2a. Interfejs użytkownika systemu pokazano na rys. 2b. Pozwala on na dostęp do warstwy programowej podsystemów.

Podsystem wibrodiagnostyki

Celem podsystemu wibrodiagnostyki jest detekcja uszkodzeń elementów przekładni zainstalowanych w ramionach kombajnu, w zmiennych warunkach eksploatacyjnych, na podstawie pozyskanych danych z czujników drgań rozmieszczonych na kombajnie [1].

Wnioskowanie diagnostyczne uwzględnia informacje dotyczące warunków eksploatacyjnych. Poza analizą sygnałów uzyskanych z czujników drgań (przyspieszeń),

podsystem wibrodiagnostyki wykorzystuje informacje o chwilowych wartościach obciążenia silnika organu urabiającego i napędu posuwu. Podsystem spełnia warunki iskrobezpieczeństwa. Strukturę podsystemu przedstawiono za pomocą schematu blokowego na rysunku 3.



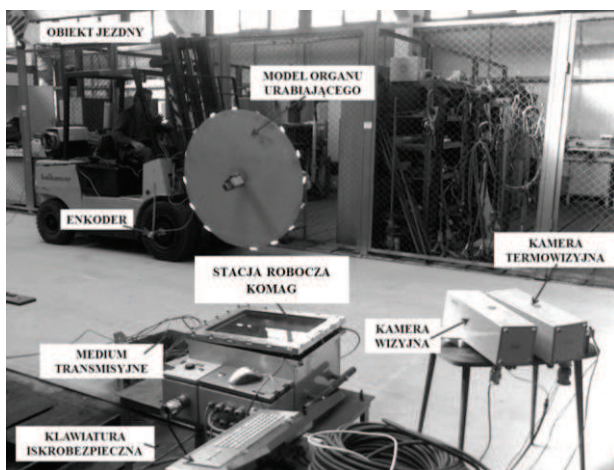
Rys. 3. Struktura modułu wibrodiagnostyki (źródło: [1])

Podstawową mierzoną wielkością jest przyspieszenie drgań. Na kadłubie kombajnu rozmieszczonych jest 12 czujników, które przesyłają sygnały kanałami pomiarowymi do stacji roboczej. Informacje o stanie przekładni uzyskiwane są na podstawie analizy parametrów sygnału odbieranego z czujników drgań; amplitudy mierzonego sygnału, jego obwiedni, oraz amplitudy poszczególnych składowych widma częstotliwościowego. Dane zapisywane są w postaci plików binarnych w zewnętrznej pamięci typu *pendrive*. Pojedynczy plik zawierający serię pomiarową, zapisywany przez moduł wibrodiagnostyki w pamięci zewnętrznej, zajmuje 7 MB pamięci. Rozmiar pamięci wystarcza na około 7 dni ciągłej rejestracji plików pomiarowych.

Współpracę pomiędzy modułem programowym, a składnikami sprzętowymi badano na zmontowanym kombajnie KSW-800NE, w warunkach hali montażowej. Działanie prototypu systemu poddano badaniom podczas prób ramion oraz ciągników na hamowni KOPEX Machinery S.A., a następnie podczas badań eksploatacyjnych całego kombajnu w kopalni Staszic-Murcki, Ruch Boże Dary, które wykazały poprawność działania maszyny.

Podsystem diagnostyki kombajnu za pomocą kamery termowizyjnej

Podsystem diagnostyki kombajnu z użyciem termowizji jest niezależnym podsystemem wspomagającym identyfikację zużytych noży skrawających organu urabiającego kombajnu [2]. Działanie podsystemu badano na stanowisku laboratoryjnym (rys. 4).

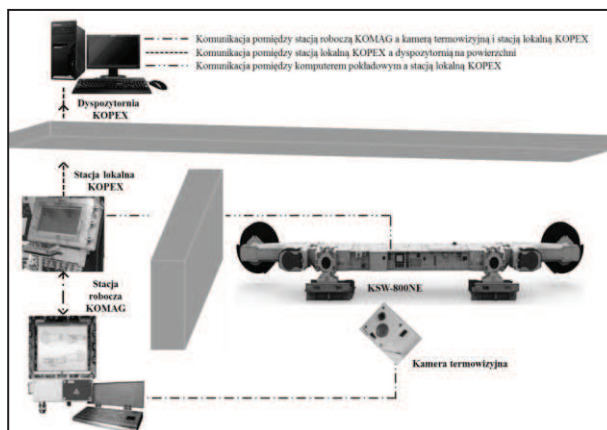


Rys. 4. Widok stanowiska laboratoryjnego do badania podsystemu diagnostyki termowizyjnej [źródło: opracowanie własne]

Na obwodzie obracającej się makiety organu urabiającego, w miejscach, gdzie w organach rzeczywistych mocowane są noże skrawające, umieszczono żarówki symulujące źródła ciepła. Encoder umieszczony na wózku symulującym kadłub kombajnu, obliczał przebytą drogę i wyzwał kamerę termowizyjną zawsze w tym samym sektorze organu

urabiającego. W ten sposób rejestrowano obraz zawsze tych samych noży skrawających. Uzyskany termogram analizowano z pomocą programu porównującego aktualne temperatury noży, z temperaturami uznanymi arbitralnie za objaw jego zużycia.

Konfigurację sprzętową systemu zainstalowanego w kombajnie KSW-800NE działającym w warunkach rzeczywistych pokazano na rysunku 5.

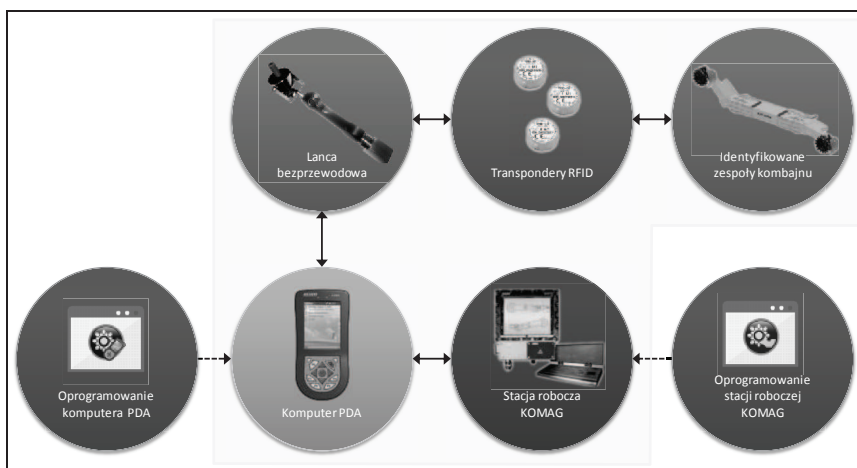


Rys. 5. Konfiguracja sprzętowa podsystemu diagnostyki kombajnu za pomocą kamery termowizyjnej (źródło: [2])

Encoder umieszczony jest w ciągniku kombajnu. Z komputera na powierzchni, w stacji lokalnej KOPEX ustawiane jest miejsce wyzwolenia kamery, jako moment czasowy minięcia przez środek kombajnu sekcji obudowy zmechanizowanej, o określonym numerze. Wówczas ze stacji KOPEX wysyłany jest sygnał do stacji roboczej KOMAG, wyzwalający kamerę. W celu stwierdzenia rzeczywistego stopnia zużycia noży, należy przeprowadzić osobne badania, które pozwolą na uzyskanie wzorców zużycia i zarejestrowanych dla nich temperatur. Dopiero te temperatury mogą stanowić wytyczną do oceny stopnia zużycia noży.

Podsystem Identyfikacji Elementów Maszyn

W podsystemie wykorzystano znane rozwiązanie, stosowane do identyfikacji sekcji obudów zmechanizowanych, transpondery RFID (ang. *Radio-Frequency Identification*), [2]. Na rysunku 6 przedstawiono konfigurację sprzętowo-programową podsystemu. Pasywne transpondery RFID rozmieszczono na ramionach kombajnu, zespole napędowo-hydraulicznym, module zasilającym, przekładniach bocznych i organach urabiających. Dane z transponderów odczytywano za pomocą lancy bezprzewodowej, a następnie rejestrowano i przetwarzano za pomocą oprogramowania zainstalowanego na stacji roboczej KOMAG i na przenośnych komputerach PDA (ang. *Personal Device Assistant*), dopuszczonych do pracy w atmosferze wybuchowej. Ewidencja zespołów i elementów kombajnu zwiększa ich dyspozycyjność dla służb serwisowych producenta.



Rys. 6. Struktura podsystemu identyfikacji części kombajnu ścianowego (źródło: [2])

Zastosowania podsystemu wykraczają poza zadania ewidencjonowania zespołów i części. Umożliwiają również m.in. dostęp do zasobów wiedzy wspomagających operacje utrzymania ruchu i serwisowania.

Podsystem Interaktywnej Dokumentacji Techniczno-Ruchowej

Podsystem Interaktywnej Dokumentacji Techniczno-Ruchowej wspomaga bezpośrednio operacje utrzymania ruchu i serwisowania kombajnu w warunkach panujących w podziemiach kopalni. Jest on dostępny na stacji roboczej KOMAG, na komputerze pokładowym kombajnu i na komputerach typu PDA. Interaktywna dokumentacja przedstawia kolejne kroki wykonywania operacji za pomocą ekranów zawierających opis tekstowy operacji i animację, która wizualizuje w jaki sposób należy ją wykonać [3].

Zasoby wiedzy zgromadzone w podsystemie służą także do wspomaganie szkoleń użytkowników kombajnu. Opracowana została koncepcja ruchomego stanowiska pozwalająca na prowadzenie szkoleń podczas montażu próbnego u producenta, lub bezpośrednio na stanowisku pracy pod ziemią [4]. Treści szkolenia przekazywane są za pomocą technologii rozszerzonej rzeczywistości (ang. *Augmented Reality*) na tle kombajnu, w miejscu wykonywania danej operacji (rys. 7).



Rys. 7. Wizualizacja za pomocą technologii rozszerzonej rzeczywistości kolejności wykonywania czynności demontażu (źródło: [3])

3. Przenośnik zgrzeblowy opracowany w projekcie ICON

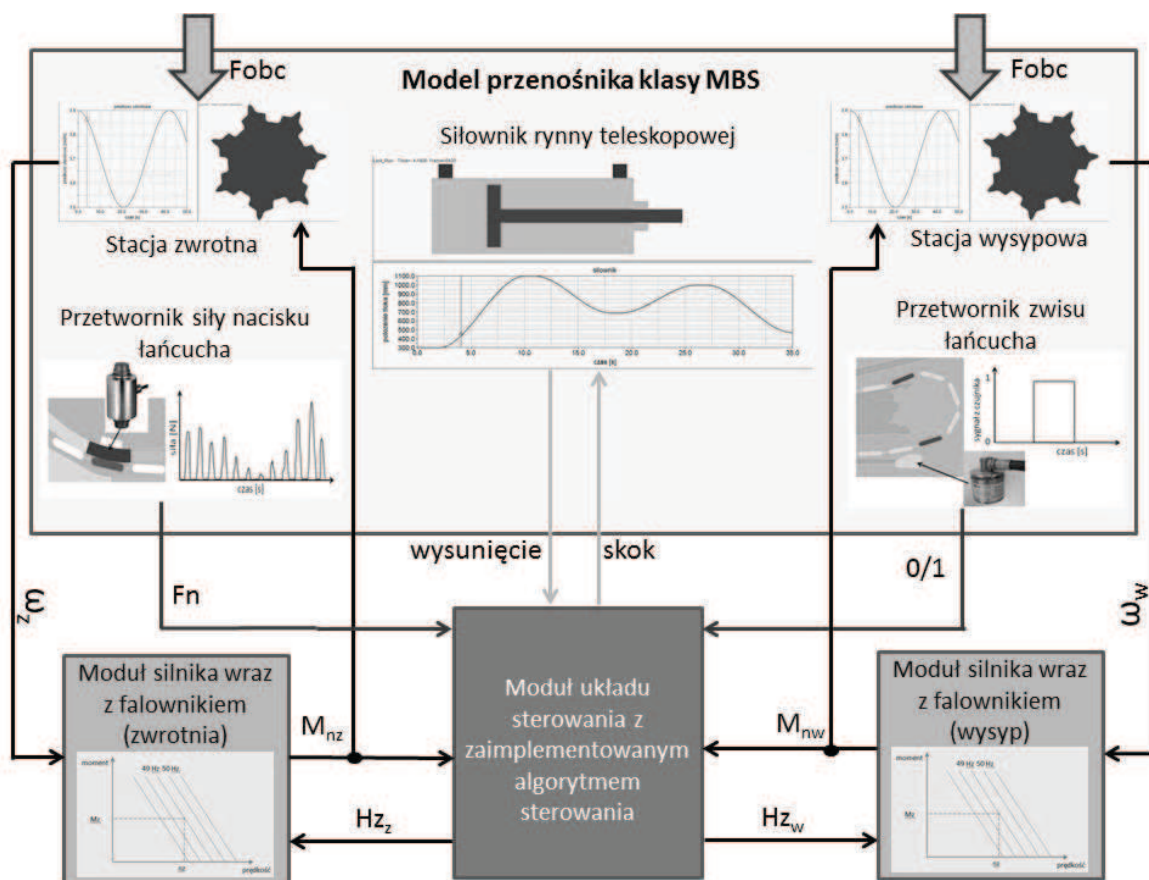
W ramach projektu ICON, realizowanego wspólnie z Politechniką Śląską, KOPEX Machinery S.A. oraz firmą Elgór Hansen S.A. opracowano zgrzeblowy przenośnik ścianowy. Jego zasadniczą innowacją jest nadążny układ sterowania, kontrolujący i regulujący obciążenia napędów oraz napięcie łańcucha zgrzeblowego. Projektowanie mechatronicznego układu sterowania przenośnika wspomagane było zastosowaniem innowacyjnej metody wirtualnego prototypowania maszyn i urządzeń. Zmienne w czasie ładowanie urobku na przenośniku zgrzeblowym wpływa na dynamiczne zmiany obciążenia jego silników napędowych oraz napięcia łańcucha zgrzeblowego. Właściwości sprężyste łańcucha zgrzeblowego, w połączeniu z nierównomiernym obciążeniem urobkiem jego górnej nitki doprowadzają do nadmiernego jego luzowania się lub nadmiernego napięcia. Stany takie zagrażają wystąpieniem awarii przenośnika i nieplanowanym postojem ściany wydobywczej. W ramach projektu opracowano koncepcję sterowania wybranymi parametrami pracy przenośnika zgrzeblowego, w celu optymalnego wykorzystania zainstalowanej mocy napędów oraz utrzymania właściwego napięcia łańcucha zgrzeblowego. W tym celu opracowano algorytm sterowania parametrami pracy przenośnika, uwzględniający różne nachylenia ściany węglowej. Wspomaganie procesu projektowania i weryfikację poprawności pracy algorytmu przeprowadzono z zastosowaniem modelu przenośnika opracowanego przy zastosowaniu oprogramowania do analizy kinematyki i dynamiki układów brył sztywnych (MSC.ADAMS) oraz oprogramowania MatLab/SIUMULINK. Pozwoliło to na wydatne skrócenie czasu badań stanowiskowych i obniżenie kosztów prowadzenia testów na stanowisku badawczym. Algorytm ma za zadanie wyeliminowanie negatywnych skutków pracy przenośnika, co powinno zmniejszyć awaryjność i wydłużyć jego żywotność. Ponieważ efekt luzowania łańcucha jest związany

z mocami generowanymi na napędach, zdecydowano na powiązanie w algorytmie funkcji napinania łańcucha oraz funkcji wyrównywania obciążeń. Podstawowe informacje o parametrach pracy przenośnika przekazywane do układu sterowania są następujące:

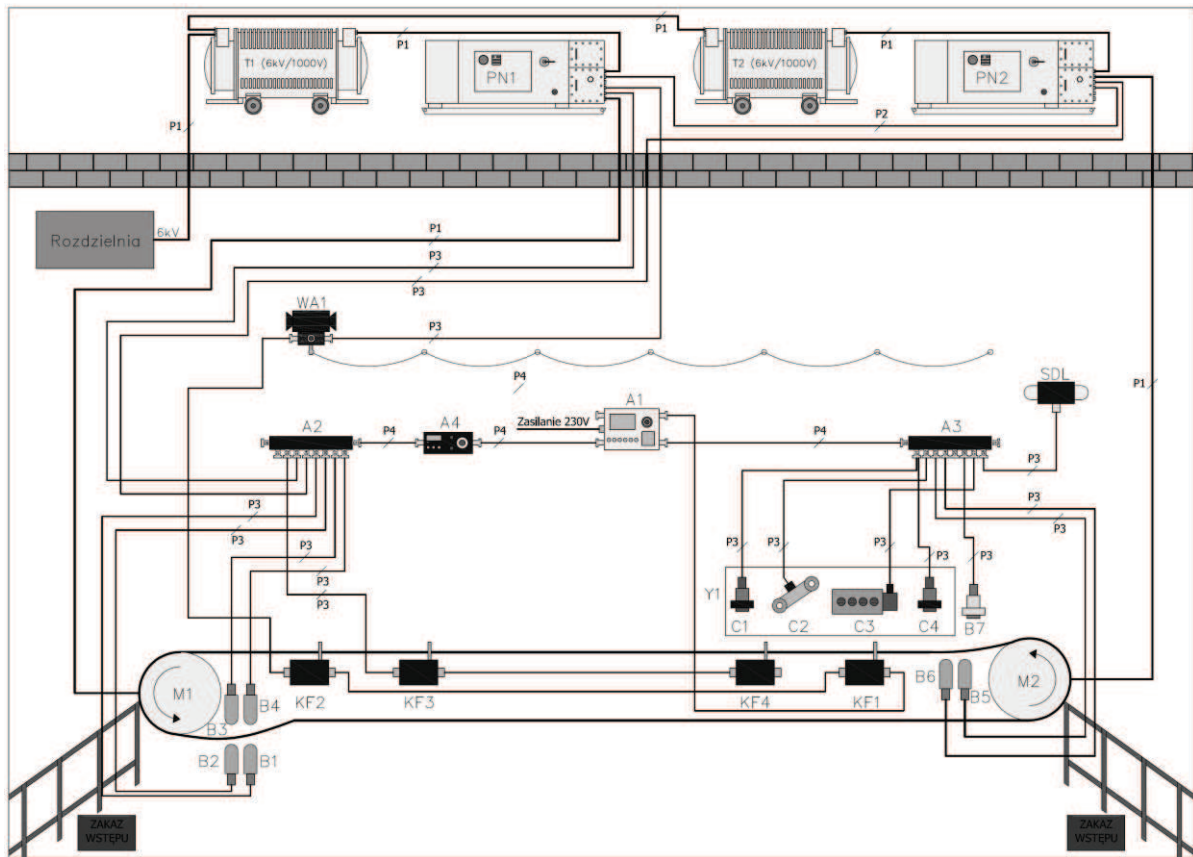
- wartości mocy (P_1 i P_2) na silniku każdego z napędów, kwalifikowane na poziomie sterownika nadrzędnego jako iloraz P_1/P_2 do jednej z trzech kategorii A, B lub C, przy czym przedziały dla tych kategorii są ściśle określone dla konkretnego wykonania przenośnika i nachylenia podłużnego w ścianie,
- wartość „F” siły w łańcuchu schodzącym z napędu zwrotnego, kwalifikowana na poziomie sterownika do jednej z trzech kategorii: dopuszczalna „F1”, średnia (warunkowo dopuszczalna) „F2”, zbyt duża „F3”, przy czym przedziały tych sił również są ściśle określone dla konkretnego przenośnika oraz nachylenia na jakim pracuje,
- informacja 0 lub 1 informująca o tym czy na napędzie wysypowym jest zwis łańcucha „0” czy brak zwisu łańcucha „1”.

Na rysunku 8 zilustrowano schemat przepływu sygnałów z czujników zainstalowanych na przenośniku oraz modułów silnikowych i modułu sterowania.

Układ sterowania, w oparciu o informacje dotyczące wartości mocy (P_1 , P_2), generowanych przez napędy, siłę „F” w łańcuchu na napędzie zwrotnym, informację o wystąpieniu zwisu łańcucha (0) lub brak zwisu (1) na napędzie wysypowym, może rozpoznawać konkretnie zdefiniowany stan pracy przenośnika. Przez stan pracy rozumie się zespół parametrów pracy przenośnika dotyczących łańcucha zgrzeblowego oraz jego napędów. Łańcuch może pracować z różnymi zmiennymi stanami napięcia, wzdłuż trasy przenośnika. Nie ma możliwości monitorowania sił w łańcuchu w każdym miejscu przenośnika, ale istnieje możliwość monitorowania siły na zejściu z gwiazdy napędowej napędu zwrotnego oraz identyfikowania stanu luzowania lub nieluzowania łańcucha na zejściu z gwiazdy napędowej napędu wysypowego. Bez zastosowania układu regulacji moce na poszczególnych napędach mogą się znacznie różnić i przykładowo jeden z napędów może pracować powyżej mocy nominalnej, podczas gdy moc drugiego napędu może być niewykorzystana. Tylko jeden ze zdefiniowanych stanów pracy będzie stanem poprawnej pracy, natomiast pozostałe stany jako niewłaściwe, będą wymagały interwencji układu sterowania. Stany niewłaściwe zostały sklasyfikowane w kolejności, według wzrastającego stopnia nieprawidłowości pracy.



Rys. 8. Schemat przepływu sygnałów pomiędzy komponentami modelu obliczeniowego [źródło: opracowanie własne]



Rys. 9. Schemat ideowy stanowiska badań przenośnika zgrzeblowego
[źródło: opracowanie własne]

Po etapie wirtualnego prototypowania wykonano doświadczalny przenośnik o długości 100 m oraz dedykowany dla niego układ zasilania, sterowania i zadawania obciążenia. Schemat ideowy stanowiska badań przedstawiono na rysunku 9.

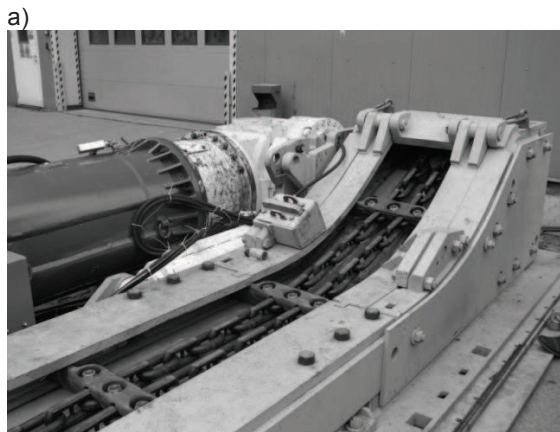
Do zasilania silników wykorzystano dwa przekształtniki częstotliwości typu PNO-340 o mocy znamionowej 500 kW i napięciu znamionowym 1000 V. Źródłem zasilania każdego z przekształtników była górnicza stacja transformatorowa 6/1 kV o mocy 400 kVA. Na konstrukcji przenośnika zainstalowano urządzenia systemu sterowania: sterownik nadrzędny A1, sterowniki lokalne A2 i A3, czujniki magnetyczne wykrywające obecność zgrzebel w przygotowanych w tym celu gniazdach, wyposażonych w mechanizmy regulacji strefy czułości, zespół przetwornika tensometrycznego siły umieszczony na specjalnie przygotowanym fragmencie ślizgu, w rejonie napędu zwrotnego.

Czujniki i urządzenia wykonawcze podłączono do odpowiednich wejść/wyjść sterowników lokalnych A2 i A3. Sterowanie przenośnika zgrzeblowego odbywało się za pomocą sterownika nadrzędnego A1 oraz ww. sterowników lokalnych A2, A3. Do sterownika A2 podłączono czujniki magnetyczne oraz wyłączniki krańcowe. Do sterownika A3 podłączono przetwornik ciśnienia (C1), przetwornik pomiaru długości wysuwu

siłownika na napędzie zwrotnym (C2), rozdzielacz elektrohydrauliczny (C3), zawór elektrohydrauliczny (C4), czujniki magnetyczne (B5, B6), czujnik nacisku (B7) oraz sygnalizator świetlny (SDL). Sterowniki A2 i A3 przekazywały dane z czujników do sterownika nadrzędnego A1, odpowiedzialnego za pracę przenośnika.

Przenośnik do badań na stanowisku prób (rys. 10) był wyposażony w dwie jednostki napędowe z dwubiegowymi silnikami indukcyjnymi o mocy 315 kW i znamionowym napięciu pracy 1000 V każdy. Przenośnik obciążano za pomocą specjalnego zespołu sań kombajnowych, wyposażonych w dwa ciągniki hydrauliczne sprzężone kołami trakowymi z drabinką posuwu na przenośniku. Sanie sprzęgnięto mechanicznie z łańcuchem zgrzeblowym przenośnika. Ruch łańcucha realizowano wahadłowo: jazdę testową zespołu obciążającego, od napędu zwrotnego do napędu wysypowego, z włączonym algorytmem regulacji, a następnie powrót do napędu zwrotnego. Dla oceny działania algorytmów regulacji korzystne było wydłużenie czasu jazdy testowej, co udało się osiągnąć stosując wolny bieg obu silników.

W czasie testów wszystkie urządzenia automatyki i zasilania działały prawidłowo, co pozwoliło na zaferowanie przenośnika finalnemu odbiorcy. Pierwszy egzemplarz przenośnika został wdrożony w KWK Marcel.



Rys. 10. Przenośnik na stanowisku prób:

a) napęd zwrotny z układem pomiaru siły w łańcuchu, b) widok trasy przenośnika [źródło: opracowanie własne]

4. Podsumowanie

W ramach realizowanych projektów opracowano skuteczne sposoby gromadzenia informacji o stanie maszyny za pomocą czujników. Uwzględnione zostały przy tym ograniczenia związane z eksploatacją pod ziemią: wymagania iskrobezpieczności, zasilania i przesyłu informacji. Przedstawione rozwiązania maszyn z zaawansowanymi technologicznie, inteligentnymi systemami diagnostyki i sterowania stwarzają przesłanki do wprowadzenia w praktyce strategii *Preventive* i *Predictive Maintenance*. W zakresie przenośnika zgrzeblowego opracowano skuteczny, automatyczny system sterowania rozdziałem mocy napędów, w oparciu o monitorowanie siły w łańcuchu na napędzie zwrotnym i detekcję luzowania na napędzie wysypowym, co jest przykładem *Preventive Maintenance*, ograniczającego możliwość wystąpienia awarii. Ewentualne nieuniknione awarie będą odpowiednio wcześniej sygnalizowane dzięki *Predictive Maintenance*. Dalsze prace będą się koncentrować na rozwijaniu reguł wnioskowania, co uzależnione jest od zebrania odpowiednich zbiorów danych. W tym zakresie prowadzona będzie ścisła współpraca z producentami maszyn i urzędów górniczych.

Literatura

1. System wibrodiagnostyki - opis prototypu. R-G-1940.03.E.03CY1 Wydanie 3. ITG KOMAG, Gliwice 2013 (materiały nie publikowane).
2. Sprawozdanie z badań eksploatacyjnych podsystemu diagnostyki kombajnu za pomocą termowizji. W11.286-03.08.02CY6 Wydanie 1. ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały nie publikowane).
3. Opracowanie dokumentacji użytkownika maszyny wydobywczej. Opracowanie interaktywnej dokumentacji techniczno-ruchowej (IDTR). G-1940AY (W11.286AY) wydanie 3. ITG KOMAG, Gliwice 2014 (materiały nie publikowane).
4. Winkler T., Jaszczyk Ł., Michałak D.: ICT based mobile training facility supporting safety shaping in the Mining Industry. W: Proceedings of the 6th International Conference Towards Safety Through Advanced Solutions, Sopot, 11-14 September 2012.
5. Szewerda K.: Wirtualne prototypowanie w tworzeniu algorytmu sterowania przenośnikiem zgrzeblowym. W: Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - Niezawodność, KOMTECH 2014, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2014 s. 195-206.
6. Raport końcowy z realizacji projektu w ramach Przedsięwzięcia "IniTech". ITG KOMAG, Gliwice 2015 (materiały nie publikowane).
7. Raport końcowy z fazy badawczej (fazy A) projektu w ramach Programu INNOTECH „Ścianowy przenośnik zgrzeblowy z innowacyjnym systemem regulacji parametrów pracy napędów”, Gliwice 2014 (materiały nie publikowane).

Artykuł wpłynął do redakcji w lipcu 2015 r.