

Nowoczesne technologie w inteligentnych maszynach do transportu materiałów i przewozu ludzi

Antoni Kozieł, Dariusz Prostański

1. Wprowadzenie

Dostarczanie towarów i surowców, często do odległych miejsc, to duże wyzwanie we wszystkich procesach przemysłowych. Również sprawny przewóz ludzi do miejsc pracy, wpływający na efektywność procesu produkcyjnego oraz zwiększający komfort ich przemieszczania, to istotny czynnik transportu.

Ogromne znaczenie transportu sprawia, że jest on ciągle doskonalony i unowocześniany. Przykładem może być motoryzacja [4]. Sprawdzają się futurystyczne przewidywania, że samochody staną się autonomiczne, a organizacja ruchu sprowadzi się do nadzorowania zainstalowanych systemów. Wszystko za sprawą nowoczesnych technologii, których głównym zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa i komfortu transportu ludzi. Montowane są czujniki parkowania informujące o niewidocznych przeszkodach, czujniki odległości między pojazdami umożliwiające regulację prędkości pojazdów, a w razie potrzeby dążące do zatrzymania ich bez udziału kierowcy.

Zastosowanie komputerów, bezprzewodowych sieci, nawigacji satelitarnej oraz systemów sterowania i monitorowania sprawi, że rola kierowców ograniczy się do włączenia i wyłączenia pojazdu oraz uzupełnienia źródła energii napędu pojazdu (spalinowego, elektrycznego lub z napędem wodorowym – już obecnie są dostarczane na rynek).

Nieuchronny postęp opracowywanych i wdrażanych technologii będzie związany z dynamicznym wzrostem mocy komputerów, rozwojem sztucznej inteligencji oraz teleinformatyki. Szczególnie teleinformatyka zmieni wytwarzanie i eksploatację produktów, w tym środków transportu. Połączenie maszyn i systemów cyberfizycznych umożliwi tworzenie inteligentnych sieci, które będzie można niezależnie kontrolować. Wdrażana będzie technologia Internetu rzeczy (IoT) oraz technologia M2M (*Machine to Machine* – komunikacja między maszynami).

Wymagać to będzie, oprócz zwiększenia mocy obliczeniowych komputerów, zapewnienia bezpieczeństwa gromadzonych danych.

Zbieranie i analiza danych telemetrycznych z maszyn i urządzeń, nie tylko przemysłowych, będą przebiegały zdecydowanie szybciej. Gromadzenie danych „w chmurze” i rozwiązania udostępniające, *as a service*, staną się powszechnie.

Autonomiczne maszyny będą charakteryzować się również umiejętnością rozwiązywania specjalistycznych problemów oraz komunikowania się ze sobą (bez udziału człowieka). Wirtualna rzeczywistość zostanie sprowadzona do poziomu rzeczywistości fizycznej. Wszystko po to, by zwiększyć szybkość

Streszczenie: Analiza cyklu życia produktów, w tym maszyn, wskazuje na stosowanie w coraz szerszym zakresie nowoczesnych technologii z zakresu informatyki, teletransmisji oraz robotyki. Dąży się do autonomicznego sterowania i automatyzacji realizowanych procesów oraz nadania systemom maszynowym cech mechatronicznych.

Inteligentne maszyny mogą oceniać warunki pracy na podstawie dostarczonych informacji i dostosować się do nich.

W artykule przedstawiono możliwości i przykłady zastosowań nowoczesnych technologii w maszynach do transportu materiałów i przewozu ludzi w górnictwie, projektowanych w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG.

STATE-OF-THE-ART TECHNOLOGIES IN INTELLIGENT MACHINES FOR TRANSPORTATION OF MATERIALS AND PEOPLE

Abstract: Analysis of life cycle of products, including machines, shows that state-of-the-art information, teletransmission and robotics technologies are more often used. Autonomous control and automation of realized processes as well as assigning the mechatronic features to machinery systems are planned.

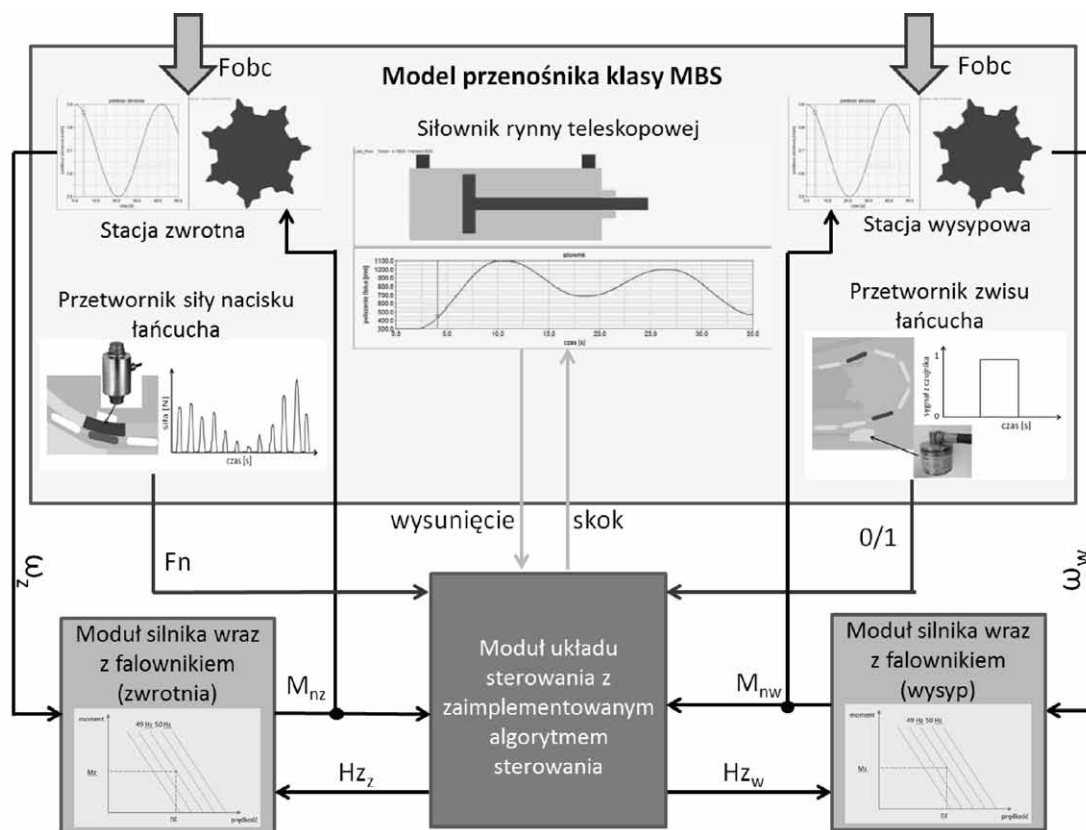
Intelligent machines can assess the surrounding conditions on the basis of received information and adapt to them.

Possibilities and examples of use of state-of-the-art technologies in machines for transportation of materials and people in the mining industry, which are designed at the KOMAG Institute of Mining Technology, are given.

realizacji funkcji maszyn i sprawnie zarządzać cyklem życia produktów (PLM – *Product Lifecycle Management*), jak również wspierać proces optymalizacji decyzji zarządczych.

2. Możliwości rozwoju inteligentnych maszyn do transportu materiałów i przewozu ludzi

Sterowanie napędami maszyn, w tym transportowych, jest podstawowym elementem automatyzacji procesów przemysłowych. Rozwój inteligentnych maszyn zmierza do poprawy



Rys. 1. Model obliczeniowy układu sterowania przenośnika zgrzeblowego [9]

konfiguracji układów sterowania. Umożliwia to zastosowanie systemów mechatronicznych o wysokim stopniu integracji, często z zastosowaniem nieinwazyjnych metod pomiarowych czy komputerów wizyjnych [5]. Już obecnie stosowane są układy wbudowane (*embedded*), realizujące zaawansowane funkcje sterowania i monitoringu, jak również oprogramowanie LabVIEW oraz NLabVIEW, wchodzące w skład modułowych architektur sterowania napędami, opartych na konfigurowanych i gotowych do zastosowania urządzeniach. Również technologie trójwymiarowe, umożliwiające widzenie stereoskopowe, czy triangulacja laserowa mogą być wykorzystane do obrazowania trójwymiarowego w transporcie (systemy trójwymiarowej wizualizacji tras).

Duże możliwości stwarzają technologie oparte na logice rozmytej, stosowane przy „braku wszystkich danych”. Z kolei sieci neuronowe mogą służyć do aproksymacji i interpolacji, rozpoznawania i klasyfikacji wzorców oraz do identyfikacji, predykcji i sterowania maszynami. Istotne, szczególnie ze względów bezpieczeństwa, stają się systemy wykrywania obecności człowieka w otoczeniu maszyny z ruchomym osprzętem, technologiami optoelektroniki i RFID [5], jak również na podstawie analizy zdjęć satelitarnych lub pozyskanych z dronów.

Technologie stosowane do niedawna jedynie w dziedzinie wojskowości znajdują coraz szersze zastosowania w pojazdach transportu komunikacyjnego i przemysłowego.

Zmienia się także oświetlenie pojazdów, wpływając na bezpieczeństwo transportu. Tradycyjne żarówki są zastępowane przez nowoczesne diody LED – trwałe, szybciej uzyskujące

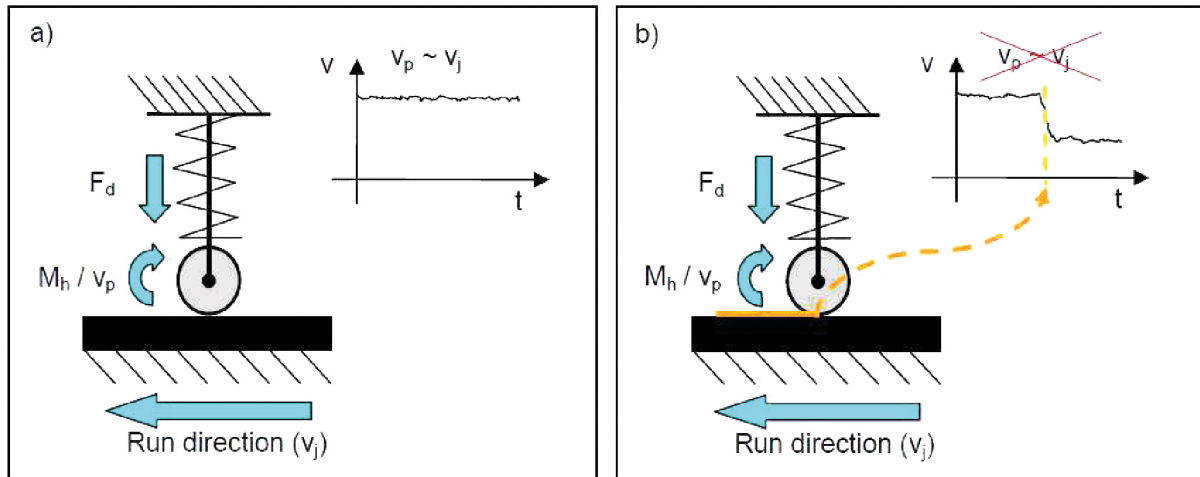
maksymalny poziom jasności i o mniejszym zużyciu energii. Również wyświetlanie informacji na szybie kabiny operatora pojazdu, tzw. *Head-up Display* umożliwia operatorom pojazdu zwiększenie bezpieczeństwa podczas jazdy. Problemem do rozwiązania pozostaje dobór ostrości wyświetlanych na szybie informacji w taki sposób, aby nie rozpraszać operatora pojazdu podczas jazdy. Stosowane już obecnie technologie napędów elektrycznych z zastosowaniem akumulatorów z bateriami litowo-jonowymi, czy układów hybrydowych z rekuperacją energii, wpływa na ograniczenie emisji toksycznych spalin do środowiska.

Zawieszenia z hydraulicznymi amortyzatorami, sterowanymi komputerowo, to kolejne możliwości stosowania nowoczesnych technologii w pojazdach transportowych.

Nie ulega wątpliwości, że w układach sterowania i monitoringu środków transportu będzie pojawiać się coraz więcej elektroniki i oprogramowania. Możliwe będzie szybkie zbieranie danych o wartościach prędkości, współrzędnych położenia oraz przebiegu pojazdów na trasach, jak również monitorowanie wielu innych parametrów. Komputery staną się inteligentne i w połączeniu z internetem i „chmurą” służyć będą przekazywaniu informacji za pomocą zdalnych serwerów.

Wdrażane będą również systemy samoorganizacji systemów komunikacyjnych.

Wdrażaniu nowoczesnych technologii i inteligentnych rozwiązań maszyn i urządzeń w górnictwie nie sprzyjają agresywne warunki panujące w tym środowisku (wilgoć, zapylenie, zasolenie, wybuchowa atmosfera gazów).



Rys. 2. Zachowanie detektora stanu nawierzchni dla ruchu koła pomiarowego: a) po czystej nawierzchni szyny; b) po powierzchni o obniżonym współczynniku tarcia [6]

Są to wyzwania dla projektantów i badaczy maszyn. Postęp technologiczny sprawia jednak, że następuje automatyzacja procesów transportowych.

Tworzone i wdrażane innowacyjne rozwiązania projektowe i badawcze w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, dedykowane dla górnictwa, w coraz szerszym zakresie wykorzystują techniki i technologie wymienione w niniejszym rozdziale.

3. Przykłady inteligentnych rozwiązań maszyn do transportu materiałów i przewozu ludzi

Na przestrzeni ostatnich lat w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG wykonano szereg prac koncepcyjnych i projektowych, które zaowocowały pojawieniem się w przemyśle górnictwa nowoczesnych i inteligentnych rozwiązań w środkach i systemach transportu.

W ramach projektu ICON [9] zaproponowano ograniczenie dynamicznych zmian obciążeń silników napędowych oraz sił w łańcuchu przenośnika zgrzeblowego, wynikających ze zróżnicowanego stopnia jego załadowania, w trakcie urabiania kombajnem ścianowym. Zmienne obciążenie łańcuchów zgrzeblowych powoduje częste awarie przenośnika i zatrzymanie procesu produkcyjnego. Opracowano rozwiązanie mechatronicznego systemu sterowania parametrami pracy przenośnika zgrzeblowego celem właściwego wykorzystania zainstalowanej mocy jego napędów i zapewnienia odpowiedniej siły napięcia łańcucha. Do testowania układu sterowania przenośnika (rys. 1) wykorzystano narzędzia wirtualnego prototypowania, z zastosowaniem metody kinematyki i dynamiki układów wielocłonowych MBS (ang. *Multi-body Systems*). Model przenośnika poddano symulacji komputerowej wykorzystującej oprogramowanie MSC.ADAMS, służące do analizy kinematyki i dynamiki układów brył sztywnych oraz oprogramowanie MatLab/Simulink do cyfrowego przetwarzania sygnałów [9]. Testy algorytmu sterowania umożliwiły jego przetestowanie przed wdrożeniem na maszynie.

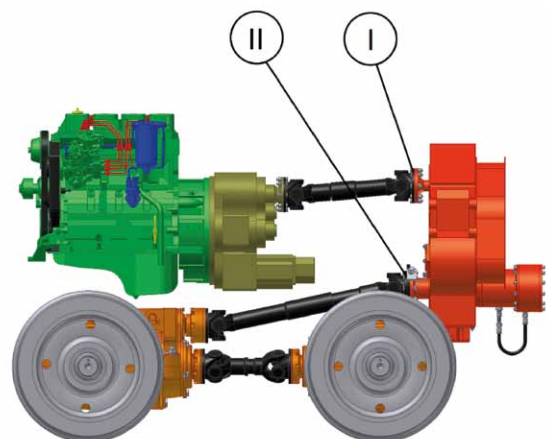
Dla transportu przenośnikowego opracowano koncepcję samoorganizującej się struktury komunikacyjnej, bazującej na

sztucznej inteligencji roju, wzorującej się na zjawiskach obserwowanych wśród organizmów żyjących w licznych grupach [10].

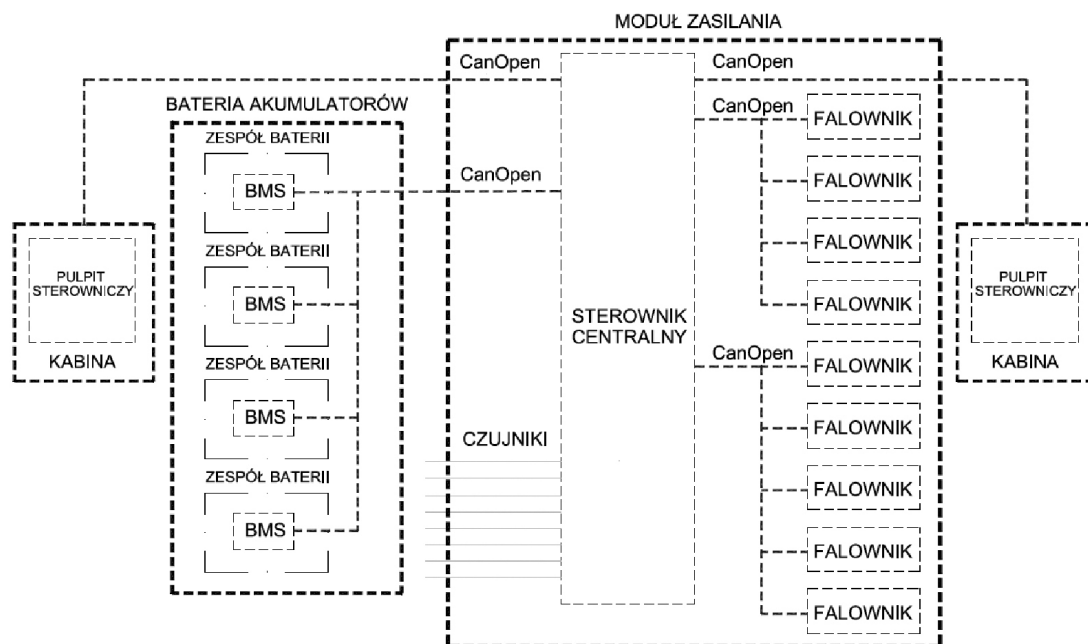
Koncepcja zakłada możliwość zabudowy w każdym krążniku przenośnika taśmowego układu elektronicznego MTU (*Monitoring and Transmission Unit*), który będzie realizował pomiary temperatury, prędkości obrotowej oraz zapewni bezprzewodową transmisję o krótkim zasięgu. Ze względu na konieczność wykonania układu sterowania w wykonaniu iskrobezpiecznym, należało rozwiązać problem jego zasilania. Przyjęto, że w tym celu będzie wykorzystana energia ruchu obrotowego krążnika.

W pracy dotyczącej doboru siły hamowania i zapobiegania poślizgowi kół lokomotywy spągowej analizowano układ „koło – szyna” za pomocą opracowanego modelu numerycznego oraz badań laboratoryjnych (rys. 2) [6].

Zbudowano stanowiska badawcze, na których sprawdzono funkcjonalność detektora stanu nawierzchni do określenia sprzężenia ciernego pomiędzy kołem śledzącym a szyną i służące do identyfikacji poślizgu w zależności od dobranej siły docisku koła do szyny i siły hamowania.



Rys. 3. Proponowane miejsca pomiaru momentu w układzie napędowym lokomotywy [2]



Rys. 4. Schemat blokowy nadzrędnego układu sterowania ciągnika [8]

Sygnaly z detektora, poprzez układ sterowania, mogą regulować siłę hamowania i zapobiegać utracie przyczepności koła z szyną. Przewiduje się wykorzystanie tego rozwiązania w kopalnianych lokomotywach spągowych.

W pracy [2] zaproponowano identyfikację obciążenia układu napędowego poprzez pomiar momentu obrotowego w układzie napędowym w celu oceny:

- stopnia wykorzystania zainstalowanej mocy maszyny;
- przeciążenia układu napędowego;
- stanów niepożądanych – np. poślizgu w fazie ruszania.

Miejsca pomiaru momentu w układzie napędowym pojazdu przedstawiono na rys. 3.

Spodziewane jest uzyskanie zmniejszenia zużycia paliwa oraz wydłużenie czasu eksploatacji układu napędowego.

Innowacyjnym rozwiązaniem wdrożonym do górnictwa jest kolej podwieszona z napędem akumulatorowym GAD-1, wyposażona w nowoczesny system sterowania, zasilania i przekształcania energii [8].

W ciągniku GAD-1 zastosowano ogniwa akumulatorów nowej generacji, bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi oraz układ sterowania i rekuperacji energii.

Bateria akumulatorów zasilająca wózki napędowe oraz silnik pompy hydraulicznej dostarcza energię, uzyskaną w wyniku hamowania, do modułu zasilania, w którym poprzez falownik uzyskuje się napięcie 3-fazowe o regulowanej częstotliwości i amplitudzie [1].

Generowana podczas hamowania silnikami energia elektryczna oddawana jest do baterii akumulatorów (układ sterowania zabezpiecza akumulatory przed ich przeładowaniem).

W Instytucie KOMAG opracowano również układ sterowania ciągnika nowej generacji (rys. 4), o strukturze rozproszonej, połączonej szeregowo za pomocą cyfrowej magistrali CAN (*Controller Area Network*) [8]. Charakteryzuje się ona dużą nie-

zawodnością i odpornością na zakłócenia poprzez transmisję danych w postaci napięciowego sygnału różnicowego oraz sprzętowej obsłudze protokołu i kontroli błędów.

W układzie zaimplementowano protokół komunikacyjny CanOpen, unifikujący magistralę, co umożliwi łącznie podzespołów różnych producentów oraz przyłączenie aplikacji do diagnozowania i konfigurowania magistrali CAN.

Zarządzanie rozdziałem mocy, w różnych fazach ruchu i w warunkach zmiennego stanu naładowania baterii, zrealizowano poprzez zastosowanie wektorowych technik sterowania oraz odpowiedni dobór urządzeń, o oczekiwanych parametrach działania, wchodzących w skład układu zarządzania energią ciągnika. Algorytm bezpieczeństwa opracowano dla maszyny przeznaczonej do zastosowania w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i pyłu węglowego.

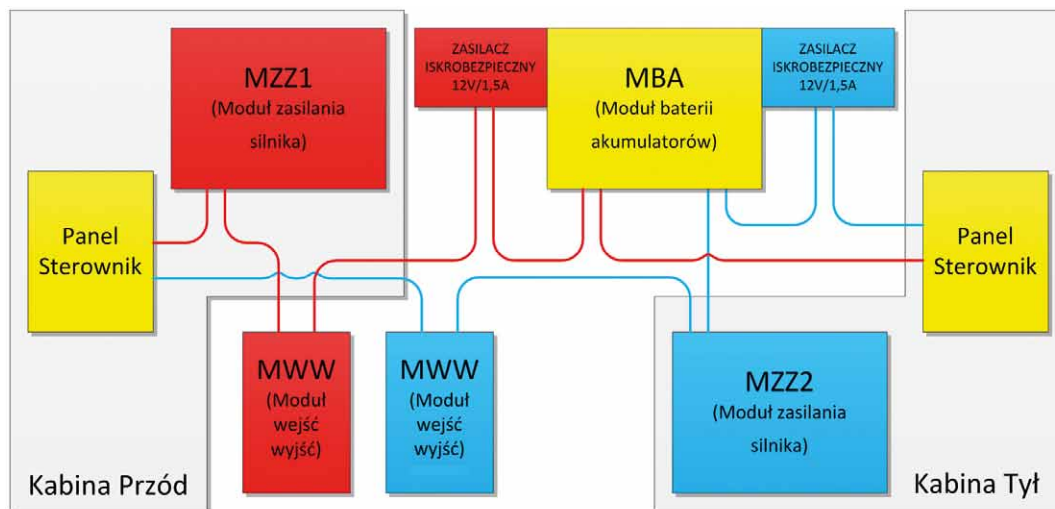
Jak już wspomniano, nowe i modernizowane napędy górniczych lokomotyw akumulatorowych coraz częściej wyposażane są w bezszczotkowe silniki synchroniczne z magnesami trwałymi. W ramach współpracy ITG KOMAG z BOBRME KOMEL zaprojektowano i wykonano silniki: PMPg-250L, SMwsd 200S-4 oraz MwsPA132M6.

Ich właściwości elektromechaniczne, w odniesieniu do dotychczas stosowanych klasycznych silników indukcyjnych i silników prądu stałego, są zdecydowanie lepsze.

Podjęto także prace dotyczące układu sterowania rozproszonego maszyn górniczych. Opracowano system sterowania KOGASTER [3], posiadający strukturę rozproszoną z magistralą CAN, w wersji iskrobezpiecznej.

Wykonano go z wykorzystaniem obwodów iskrobezpiecznych umożliwiających połączenie z układami sterowania napędów maszyn górniczych, umieszczonych w skrzyniach ognioszczelnych.

System składa się z kilku modułów, takich jak: sterownik,



Rys. 5. Schemat blokowy sterowania rozproszonego z redundancją lokomotywy akumulatorowej [3]

panel sterownika, moduł wejść – wyjść, oraz przetworników pomiarowych i elementów wykonawczych. Moduły układu sterowania połączono cyfrową magistralą danych CAN.

System pozwala na osiągnięcie wysokiego stopnia niezawodności poprzez wykorzystanie modułu sterownika w układach rozproszonych z redundancją magistrali CAN oraz z dublowaniem modułów i przetworników. Jest to uzasadnione szczególnie w maszynach o wymaganej dużej niezależności działania. Przykładowe zastosowanie systemu dla lokomotywy akumulatorowej, wyposażonej w dwa niezależne panele-sterowniki oraz dwa niezależne napędy, przedstawiono na rys. 5.

Układ sterowania z redundancją zasilania zwiększa liczbę stanów awaryjnych, przy których maszyna może bezpiecznie funkcjonować. Daje to możliwość ograniczenia strat wynikających z przestojów spowodowanych ewentualnymi awariami. Ewentualną naprawę można przesunąć na dogodny moment, a wybrane funkcje sterowania mogą być zachowane pomimo awarii jednego z elementów systemu.

4. Podsumowanie

Inteligentne systemy stosowane w maszynach i urządzeniach do transportu materiałów i przewozu ludzi w górnictwie wspomagają procesy produkcyjne. Są one coraz powszechniej stosowane dzięki rozwojowi informatyki i dostępności urządzeń umożliwiających ich budowę.

Zastosowanie inteligentnych i nowoczesnych rozwiązań w maszynach i urządzeniach transportowych jest uwarunkowane spełnieniem wymagań ochrony przed występującymi zagrożeniami, a szczególnie spełnieniem dyrektywy ATEX zgodnie z wymaganiami iskrobezpieczeństwa w przestrzeniach zagrożonych wybuchem [11].

Instytut Techniki Górniczej KOMAG prowadzi szereg prac zmierzających do opracowania nowych inteligentnych rozwiązań, dedykowanych dla systemów maszynowych w kopalniach. Opracowane rozwiązania są wytwarzane przez licznych producentów maszyn i urządzeń górniczych i wdrażane w polskich i zagranicznych kopalniach.

Literatura

- [1] BUDZYŃSKI Z.: *Innowacyjne rozwiązania elektrycznych układów napędowych maszyn górniczych*. „Maszyny Górnicze” 2/2013.
- [2] DOBRZANIECKI P.: *Propozycja wykorzystania momentomierza do analizy układu napędowego lokomotywy typu LDS-100k-EMA*. „Maszyny Górnicze” 4/2014.
- [3] JURA J. I IN.: *Innowacyjny system sterowania KOGASTER*. „Napędy i Sterowanie” 7–8/2014.
- [4] KOZIEŁ A.: *Inteligentne systemy maszyn górniczych*. „Maszyny Górnicze” 2/2011.
- [5] KOZIEŁ A., JASIULEK D., STANKIEWICZ K., BARTOSZEK S.: *Inteligentne systemy mechatroniczne w maszynach górniczych*. „Napędy i Sterowanie” 2/2012.
- [6] BAIER A., NIEDWOROK A.: *Numerical Modeling of the Phenomena of Frictional Coupling Between Wheel and Rail to Describe and Verify the Operation of Surface Condition Detektor*. „Solid State Phenomena” 220–221/2015, pp. 251–256, Trans Tech Publications, Switzerland, 2015.
- [7] POLNIK B.: *Silnik PMSM jako nowoczesny napęd w górniczych systemach transportowych*. „Maszyny Elektryczne” 1/2012.
- [8] SKUPIEŃ K. I IN.: *GAD-1 – nowe rozwiązanie górniczej kolejki podwieszanej z napędem akumulatorowym*. Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2013.
- [9] SZEWERDA K.: *Wirtualne prototypowanie w tworzeniu algorytmu sterowania przenośnikiem zgrzeblowym*. KOMTECH 2014.
- [10] STANKIEWICZ K.: *Metoda samoorganizacji roju w monitorowaniu i sterowaniu urządzeń w warunkach wyrobisk podziemnych*. „Maszyny Górnicze” 4/2011.
- [11] Dyrektywa 94/9/WE (ATEX) dotycząca urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do stosowania w przestrzeniach zagrożonych wybuchem.

dr inż. Antoni Kozieł, dr inż. Dariusz Prostański

artykuł recenzowany