

## Rozproszone systemy sterowania maszyn i urządzeń górniczych

dr inż. Krzysztof Stankiewicz  
dr inż. Dariusz Jasiulek  
mgr inż. Jerzy Jagoda  
mgr inż. Jerzy Jura  
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

### Streszczenie:

W artykule przedstawiono wybrane zagadnienia z zakresu zaawansowanych systemów sterowania mobilnych maszyn górniczych, z wykorzystaniem magistrali rozproszonej CAN, oraz perspektywy rozwoju systemów sterowania dedykowanych do pracy przestrzeni zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Jednym z kierunków rozwoju systemów jest wprowadzenie w sieciach bezprzewodowych czujników samozasilających, co umożliwia ich zastosowanie w miejscach, w których zastosowanie czujników konwencjonalnych jest utrudnione. Przedstawiono również zagadnienie inteligencji w samoorganizacji ścieżek transmisji danych (trasowanie, routing) w złożonej sieci sensorycznej.

Słowa kluczowe: monitoring, sieć sensoryczna, samoorganizacja, Internet rzeczy, czujnik samozasilający, CAN

Keywords: monitoring, sensor network, self-organization, Internet of Things, self-powered sensor, CAN

### Abstract:

Selected problems as regards advanced systems for control of mobile mining machines, which use the dispersed CAN bus, as well as views for a development of control systems for operation in areas threatened by methane and/or coal dust explosion hazard are presented. Implementation of self-powered sensors, which can be used in places where use of traditional sensors is difficult, to wireless networks is one of directions of development of such systems. Problem of intelligence in self-organization of data transmission routes (routing) in a complex sensor network is presented.

## 1. Wprowadzenie

W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG realizowane są między innymi prace mające na celu zaprojektowanie sieci bezprzewodowych, samoorganizujących i samozasilających czujników, umożliwiających szybką zmianę konfiguracji układu pomiarowego. System czujników bezprzewodowych może współpracować z istniejącymi systemami sterowania, jak np. z systemem KOGASTER, lub będzie stanowił samodzielne rozwiązanie. Istnieją na rynku systemy rozproszonych czujników np. ciśnienia, komunikujące się za pomocą sieci bezprzewodowych, zasilane z baterii [30, 31]. Występują jednak problemy związane z czasem pracy czujnika oraz częstotliwością przesyłania danych pomiarowych.

Stosowanie układów sterowania i monitorowania parametrów pracy maszyn w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego, uregulowane przepisami dyrektywy 2014/34/UE (ATEX), nakładają dodatkowe wymagania przez co ograniczają możliwości ich modyfikacji. Przeprowadzona analiza wykazuje, że istnieje wiele czynników przemawiających za zastosowaniem bezprzewodowych sieci sensorycznych:

- rozległe instalacje techniczne instalowane w kopalnianych wyrobiskach korytarzowych – np. przenośniki taśmowe odstawy urobku, o długości od kilkuset metrów do kilku kilometrów,
- zmiany konfiguracji sprzętowej maszyn i urządzeń w rejonach wydobywczych, wynikające z postępu prac górniczych,
- dążenie do automatyzacji procesów technologicznych wydobywania kopaliny.

Budowa samoorganizującej sieci czujników bezprzewodowych wymaga jednak opracowania alternatywnego sposobu zasilania jej komponentów, poprzez wykorzystanie energii dostępnej w ich otoczeniu, np. energii drgań mechanicznych, ciepłej [54], ruchu obrotowego czy promieniowania elektromagnetycznego.

Rozwój układów elektronicznych o niskim poborze energii, aplikacji energy harvesting oraz rozwój standardów radiowej transmisji danych umożliwiają obecnie zastosowanie czujników bezprzewodowych, zasilanych bateryjnie lub samozasilających się [29, 30].

Czujniki samozasilające się są coraz częściej stosowane w systemach wentylacji i klimatyzacji, monitorowaniu migracji zwierząt czy w systemach automatyki, jak również w układach monitorowania parametrów technicznych.

Jednym z obszarów badawczych i wdrożeniowych, w którym istnieją znaczące wyzwania techniczne, w odniesieniu do automatyzacji maszyn i procesów technologicznych oraz w odniesieniu do ochrony życia i zdrowia ludzi, jest komunikacja. Coraz szerzej w sterowaniu i w komunikacji maszyn jest stosowana sztuczna inteligencja. Ma ona miejsce również w górnictwie w zakresie monitorowania i diagnostyki zużycia podzespołów i części [6, 13, 23, 34] oraz systemów sterowania maszyn i systemów mechanizacyjnych [7, 17]. Przyszłościowa eksploatacja pokładów wymaga opracowywania systemów o coraz większej autonomii, tak aby rola człowieka została ograniczona głównie do nadzoru.

## 2. Czujniki samozasilające się

Czujniki samo zasilające, wyposażone w generatory, przetwarzają energię występującą w ich otoczeniu na energię elektryczną. W zależności od konstrukcji generatora, czujniki samozasilające mogą być zasilane energią pochodzącą ze światła, przepływu gazu, drgań mechanicznych, ruchu obrotowego lub pola promieniowania elektromagnetycznego. Do przetwarzania energii drgań mechanicznych stosowane są najczęściej generatory elektromagnetyczne lub piezoelektryczne. Generatory piezoelektryczne budowane są z materiału piezoelektrycznego - kryształu, na którego powierzchni, pod wpływem naprężeń mechanicznych, powstaje ładunek elektryczny. W zakresie materiałów piezoelektrycznych służących do budowy generatorów energii elektrycznej prowadzone są prace z zakresu analizy drgań elementów mechanicznych z materiałem piezoelektrycznym [15, 37, 40, 43].

Wykorzystanie „energy harvesting” umożliwia odzysk energii np. podczas przepływu ciepła [51, 54], czy generowanie energii elektrycznej pozyskiwanej z przetworników piezoelektrycznych podczas drgań maszyn [18, 19, 20, 40], zapewniając komunikację pomiędzy czujnikami bezprzewodowymi [47, 48].

Prace nad czujnikami bezprzewodowymi, niewymagającymi źródła zasilania, intensywnie są rozwijane w ostatnim dziesięcioleciu [18, 19, 20, 33, 37, 49, 53, 57].

Badania prowadzone są w trzech głównych kierunkach:

- organizacji komunikacji radiowej [14, 47],
- minimalizacji zużycia energii przez komponenty elektroniczne,
- zasilania [56].

Przykładowo prace z zakresu zasilania koncentrują się na opracowywaniu elementów do przechowywania energii (baterie, akumulatory, superkondensatory) oraz minigeneratorów zasilanych energią odnawialną lub energią traconą [15, 37, 40, 55, 56, 57].

W celu wykorzystania energii odnawialnej, stosowane są minigeneratory służące do przetwarzania energii słonecznej lub wiatrowej na prąd elektryczny.

Czujniki samozasilające komunikują się z urządzeniami nadrzędnymi za pomocą transmisji radiowej o niskim zużyciu energii (najczęściej jest to standard Bluetooth Low Energy). Moduły MKB-1 oraz MIS-1 [25] wyposażono w komunikację radiową, dzięki czemu możliwa jest integracja z czujnikami samozasilającymi. Moduły MKB-1 oraz MIS-1 posiadają zaimplementowany stos protokołu Bluetooth LE. Stos pozwala na obsługę protokołów warstwy fizycznej, łącza danych oraz umożliwia obsługę standardów połączenia między hostem a kontrolerem (SPI, USB albo UART) - jest to tzw. HCI (Host Controller Interface).

### 2.1. Źródła energii dostępne dla czujników samozasilających

Analizując źródła energii dostępne w podziemiach zakładów górniczych, możliwe do zastosowania w procesie zasilania czujników, można wskazać:

- **źródła energii mechanicznej:**
  - drgania maszyn,
  - przyspieszanie i opóźnianie części i podzespołów maszyn podczas wykonywania ruchów roboczych,
  - pulsacja mediów w układach hydraulicznych [11, 55],
  - przepływ gazów np. w lutniach lub w wyrobiskach górniczych,
- **źródła energii cieplnej** [32, 46, 50, 51]:
  - różnice wartości temperatury występującej na powierzchniach maszyn i urządzeń,
  - różnice wartości temperatury występującej pomiędzy ludzkim ciałem i atmosferą,
  - różnice wartości temperatury występującej pomiędzy atmosferą, górotworem i maszyną,
- **źródła energii elektromagnetycznej:**
  - silniki elektryczne, transformatory,
  - kable zasilające.

## 3. System sterowania i diagnostyki KOGASTER

Prowadzone prace rozwojowe zaowocowały opracowaniem modułów rozproszonego systemu sterowania o nazwie handlowej KOGASTER. Przeznaczony jest on do zastosowania w maszynach pracujących w trudnych warunkach, szczególnie w przestrzeniach, gdzie występuje zagrożenie atmosferą wybuchową i wymaga się stosowania bezpiecznych rozwiązań automatyki. System Sterowania KOGASTER opracowany w Instytucie Techniki Górniczej KOMAG jest produkowany przez P.H.U. Gabrypol Sp. J. Z. i R. Juszczyk [25]. System charakteryzuje się: otwartą strukturą, budową rozproszoną, kompatybilnością z przetwornikami i modułami różnych producentów, co umożliwia sterowanie różnymi maszynami. Otwarta struktura pozwala na łączenie elementów systemu KOGASTER z elementami (przetwornikami, czujnikami) innych producentów oraz stosowanie uniwersalnych programów do konfiguracji. Elementy systemu KOGASTER mogą być stosowane w maszynach z obwodami iskrobezpiecznymi i nieiskrobezpiecznymi.

System sterowania i diagnostyki KOGASTER, ciągle rozwijany, jest układem rozproszonym wykorzystującym magistralę CAN i protokół CANopen [9, 10]. Służy on do sterowania lokalnego w maszynach i urządzeniach górniczych [2, 3, 4, 29, 21, 22, 32]. Zastosowanie magistrali CAN i protokołu CANopen [9, 10] spowodowało, że jest to system otwarty. Charakterystycznymi cechami systemu sterowania KOGASTER są:

- rozproszona struktura [52];
- iskrobezpieczna, redundantna magistrala CAN [28];
- iskrobezpieczna budowa poszczególnych modułów [39];

Podstawowe moduły systemu KOGASTER to:

- PO-1 – Panel operatorski;
- MIS-1 – Moduł inteligentnego sterownika;
- KS-1 – Kasetta sterująca - sygnalizacyjna;
- MWW-1 – Moduł wejść – wyjść;
- MPP-1 – Moduł pomiaru prądu;
- MKB-1 – Moduł komunikacji Bluetooth;
- INK-2D – Inklinometr dwuosiowy.

Panel operatorski (rys. 1) jest zespołem automatyki przemysłowej, przystosowanym do działania w warunkach zagrożenia wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Składa się on z kolorowego wyświetlacza LCD o rozdzielczości 800x480 pixeli i przekątnej 7", modułu wejść i wyjść dwustanowych, modułu wejść analogowych oraz cyfrowych interfejsów takich jak CAN, Ethernet i USB. Panel umożliwia tworzenie redundantnych układów sterowania z wykorzystaniem magistrali CAN (dwa niezależne, izolowane galwanicznie interfejsy CAN). Redundancja obejmuje również układ zasilania (panel może być zasilany z dwóch niezależnych zasilaczy iskrobezpiecznych).



Rys. 1. Panel operatorski PO-1 [29]

Interfejs USB zainstalowany wewnątrz obudowy umożliwia podłączanie pamięci pendrive PO-1/PN i służy do zapisu danych przetwarzanych przez układ sterowania. Może również pełnić rolę nośnika danych dla funkcji „data logger”.



Rys. 2 Moduł wejść-wyjść analogowych i cyfrowych MWW-1/1 oraz MWW-1/2 [29].

Kolejnym modułem systemu jest moduł wejść – wyjść analogowych i cyfrowych MWW-1, przeznaczony do współpracy z panelem operatorskim lub modułem MIS-1 w układach sterowania rozproszonego. Opracowano dwie wersje modułu (rys. 2). Pierwsza wykorzystuje złącze do połączenia z zewnętrznymi czujnikami i przetwornikami, co umożliwia szybką wymianę modułu lub odłączenie elementu współpracującego z nim. Druga pozwala na podłączenie czujników i przetworników do listew zaciskowych. Możliwe jest również zabudowanie łączników w lokalnym panelu sterującym. Przetworniki wielkości nieelektrycznych, takie jak: mostki tensometryczne, rezystory termometryczne, przetworniki wydłużenia, stosowane w układach sterowania, można podłączyć do wejść modułu. Moduły i podłączone przetworniki mogą być zasilane z jednego zasilacza iskrobezpiecznego. Wyjątkiem są wyjścia dwustanowe, wykonane jako niespolaryzowane styki przekaźników.

Moduł pozwala na podłączanie przetworników wielkości nieelektrycznych, zasilanych napięciem 12 V, posiadających następujące parametry wyjść analogowych:

- $0 \div 10$  V,  $0 \div 20$  mA lub  $4 \div 20$  mA;
- rezystory termometryczne PTC i NTC;

Można ponadto podłączyć:

- rezystory PT100/PT1000;
- pełny mostek tensometryczny (istnieje również możliwość podłączenia pół-mostka i ćwierć-mostka tensometrycznego);

Moduł wyposażony jest również w:

- 8 wejść dwustanowych (styki niespolaryzowane lub indukcyjne czujniki zbliżeniowe np. typu NAMUR);
- 4 wyjścia dwustanowe (styki niespolaryzowane zwierne).

Moduł posiada również cztery przekaźniki, których styki niespolaryzowane są wyprowadzone jako odizolowane obwody. Styki mogą być wykorzystane do włączania lampek sygnalizacyjnych i sygnałów dźwiękowych oraz sterowania górnymi wyłącznikami silnikowymi.

Programowanie modułu odbywa się poprzez magistralę CAN, zgodnie ze standardem CANOPEN DS301 [9] i DS401 [10]. Magistrala służy także do zmiany programu bazowego modułu, bez konieczności otwierania obudowy. Daje to dużą swobodę i elastyczność przy serwisowaniu modułu.

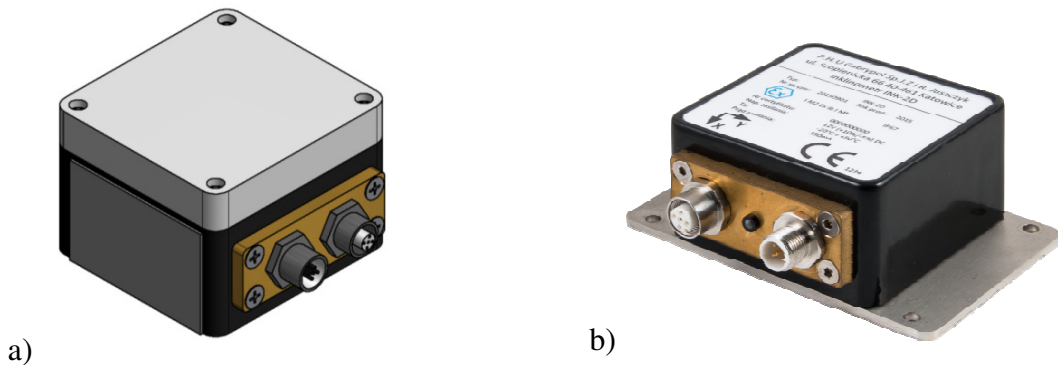
Moduł Inteligentnego Sterowania MIS-1 (rys. 3) jest uzupełnieniem systemu KOGASTER w zakresie małych i tanich systemów sterowania rozproszonego. Jest on wyposażony

w wyświetlacz graficzny monochromatyczny OLED o rozdzielczości 256x64, przyciski do nawigacji w menu, dwa niezależne interfejsy CAN, redundancję zasilania oraz moduł łączności BLUETOOTH. Moduł wyposażono ponadto w przyciski pozwalające na nawigację po menu. Posiada on dwustanowe wejścia i wyjścia do obsługi obwodów bezpieczeństwa i jest przewidziany do współpracy z modułami MWW-1, MPP-1, PO-1 oraz z przetwornikami i czujnikami z interfejsami CAN. Wyposażenie modułu MIS-1 w komunikację radiową pozwala na rozszerzenie funkcji systemu KOGASTER o obsługę pilotów zdalnego sterowania, np. w celu zdalnego sterowania otwieraniem i zamykaniem śluz oraz przesyłanie danych do systemów nadrzędnych.



Rys. 3. Moduł Inteligentnego Sterownika MIS-1 [26]

Nowym modułem, rozszerzającym możliwości komunikacyjne systemu KOGASTER o transmisję bezprzewodową, jest Moduł Komunikacji Bezprzewodowej MKB-1 (rys. 4a). Moduł wyposażony jest w bezprzewodowy interfejs radiowy, pracujący z częstotliwości 2,4 GHz oraz cyfrową magistralę CAN. Podstawową funkcją modułu jest łączenie urządzeń wyposażonych w interfejs radiowy (np. pulpit, czy inny układ sterowania) z układem sterowania wykorzystującym magistralę CAN.

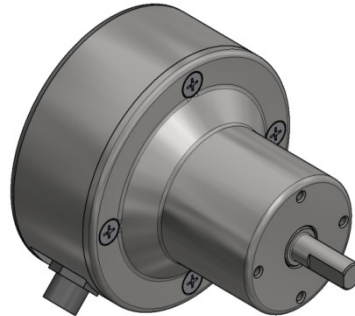


Rys. 4. Moduły systemu KOGASTER: a) Moduł Komunikacji Bezprzewodowej MKB-1 [10],  
b) Inklinometr INK-2D [27]

Pozwala on na łączenie dwóch segmentów sieci CAN i przesyłanie komunikatów między sieciami. W przypadku podłączenia pilota zdalnego sterowania, moduł pozwala na włączenie go jako węzła sieci, zgodnie ze standardem CANopen. W takim przypadku w magistrali CAN widoczne są dwa urządzenia: moduł MKB-1 i pilot.

Inklinometr INK-2D (rys. 4b) jest sensorem często wykorzystywany w układach sterowania maszyn mobilnych. Podstawową jego funkcją jest pomiar położenia przetwornika w odniesieniu do wektora siły ciężenia. Pomiar wykonywany jest w dwóch osiach. Obecnie prowadzone są prace nad rozbudową inklinometru o pomiar przyspieszeń w trzech osiach, żyroskop oraz magnetometr. Inklinometr jest wykonany z materiałów niemagnetycznych, dzięki czemu obudowa nie zniekształca pola magnetycznego.

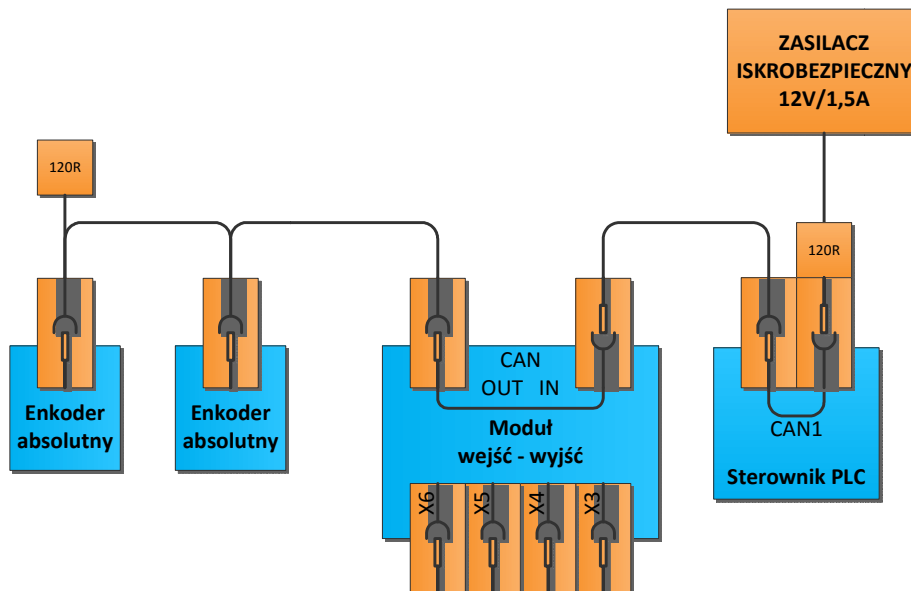
Kolejnym nowym sensorem systemu KOGASTER jest iskrobezpieczny, absolutny enkoder magnetyczny EM-1 (rys. 5). Służy on do pomiaru pozycji elementów mechanicznych maszyn. Enkoder magnetyczny jest odporny na drgania i udary mechaniczne, co umożliwia jego zabudowę w kombajnach ścianowych, chodnikowych oraz na maszynach mobilnych (np. ładowarkach, lokomotywach).



Rys. 5. Model 3D enkodera magnetycznego EM-1/4096 [25].

### 3.1. Struktura rozproszonego układu sterowania

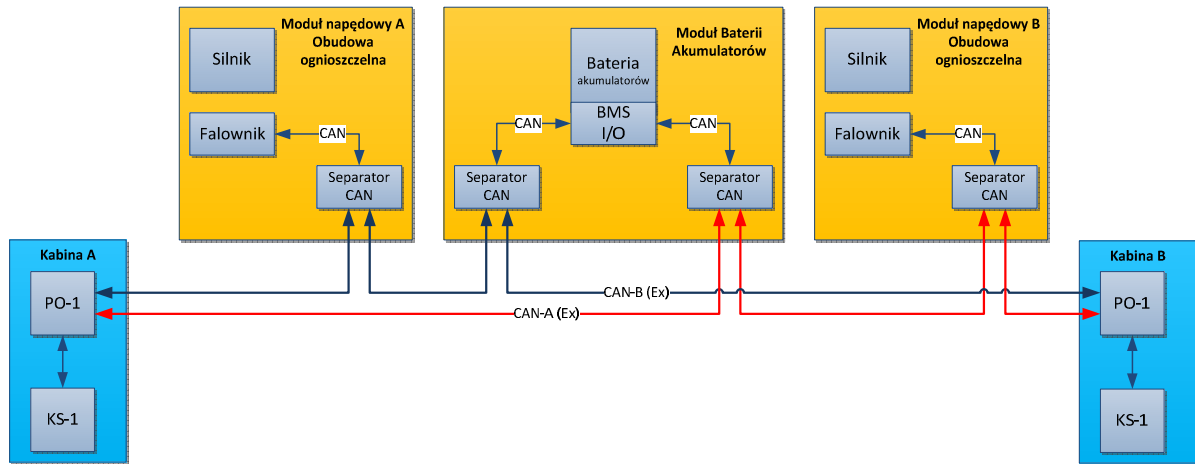
Konfiguracja rozproszonego układu sterowania składa się z modułów sterownika, wejść-wyjść, przetworników pomiarowych i elementów wykonawczych oraz interfejsu cyfrowego, połączonych cyfrową magistralą danych CAN. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zasilania i transmisji danych w jednej wiązce przewodów. Podstawowa konfiguracja składa się z czujników i przetworników podłączonych do modułu wejść-wyjść i sterownika PLC, zasilanych z zasilacza iskrobezpiecznego. W takim układzie nie występują: bufor oraz separatory sygnałów wejściowych i wyjściowych, podłączone do modułu wejść-wyjść. Schemat blokowy sterowania rozproszonego z wykorzystaniem pojedynczej magistrali CAN przedstawiono na rysunku 6.



Rys. 6. Schemat blokowy sterowania rozproszonego z wykorzystaniem pojedynczej magistrali CAN [24]

Niezawodność układu rozproszonego realizuje się poprzez redundancję magistrali CAN oraz dublowanie modułów i przetworników. Powoduje ona zwiększenie kosztów jednostkowych wytwarzania, ale pozwala na obniżenie kosztów wynikających

z ewentualnych przestojuw w przypadku wystąpienia awarii. Przykładem może być lokomotywa akumulatorowa wyposażona w dwa niezależne panele-sterowniki i dwa napędy, które przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Schemat blokowy układu sterowania lokomotywy, o strukturze rozproszonej z redundancją [24, 35]

Podstawowym elementem redundantnego układu sterowania są dwa moduły PO-1 zabudowane w kabinie A i B, które pełnią funkcję panelu operatorskiego i sterownika. Moduły są wyposażone w dwa interfejsy iskrobezpieczne CAN zapewniające izolację galwaniczną oraz możliwość zasilania z dwóch niezależnych iskrobezpiecznych zasilaczy.

Układy sterowania z redundancją pozwalają na zwiększenie liczby bezpiecznych stanów pracy.

## 4. Inteligentne sieci komunikacyjne

Zastosowanie inteligentnych protokołów komunikacyjnych jest szczególnie istotne w obliczu gwałtownego wzrostu liczby urządzeń zdolnych do komunikacji z człowiekiem lub z innymi urządzeniami, poprzez przewodowe i bezprzewodowe sieci komputerowe. W dobie Internetu Rzeczy szczególną rolę odgrywa sieć o topologii kraty, w której implementuje się protokoły umożliwiające transmisję danych Ad Hoc, a więc działające w oparciu o metodę komunikacji bezpośredniej między węzłami sieci, z pominięciem specjalizowanych urządzeń (punktów dostępu, przełączników, mostów, routerów) nadzorujących oraz umożliwiających przepływ informacji w sieciach klasycznych.

Urządzenia zdolne do nawiązania łączności samodzielnie inicjują algorytmy poszukujące ścieżek przepływu danych w sieci. Następnie po otrzymaniu zapytania lub w wyniku wewnętrznych algorytmów sterujących, transmitują dane. Ścieżki ich przesyłu są stale optymalizowane pod kątem parametrów opisujących wydajność transmisji, czy liczby skoków, jakie musi wykonać pakiet danych zanim trafi do adresata. Optymalizację ścieżek zapewniają inteligentne protokoły trasowania.

### 4.1. Protokoły trasowania w sieciach Ad Hoc

Protokoły trasowania zapewniają drogę pakietom danych transmitowanych z węzła źródłowego do węzła docelowego. Uwzględniając ograniczenia sieci Ad Hoc, realizacja tego zadania nie jest łatwa. Jednak dostępne są protokoły trasowania, które mogą być zaimplementowane w mobilnych sieciach Ad Hoc.



Istniejące rozwiązania można sklasyfikować jako [1, 5, 8, 12, 16, 36, 38, 42, 44]:

- **protokoły proaktywne** (ang. proactive) – w każdym węźle utrzymywane są ciągle możliwie najświeższe informacje na temat tras do pozostałych węzłów. Trasy przechowywane są w tablicach routingu, regularnie aktualizowanych;
- **protokoły reaktywne** (ang. reactive) – znane również jako protokoły trasowania na żądanie (on-demand). Jest to klasa protokołów, w których trasa wyznaczana jest w momencie, gdy węzeł źródłowy potrzebuje przesłać pakiety do określonego celu;
- **protokoły hybrydowe** (ang. hybrid) – łączą właściwości protokołów proaktywnych i reaktywnych. W większości protokołów z tej grupy działanie polega na podziale sieci na mniejsze fragmenty (węzły pamiętają tablice tras dla wydzielonych obszarów).

#### 4.2. Koncepcja samoorganizującej struktury komunikacyjnej w sieci sensorycznej

W KOMAG-u prowadzono również prace nad samoorganizującą się strukturą komunikacyjną, nazwaną w skrócie SSKIR [45, 47, 48]. Bazuje ona na technice sztucznej inteligencji nazywanej inteligencją roju, będącą bezpośrednią implementacją zjawisk i zachowań obserwowanych w przyrodzie wśród organizmów żyjących w licznych grupach. Zachowania te można w pewnym zakresie przełożyć na działanie protokołów trasowania. Opracowane przez człowieka struktury systemowe (niezależnie od faktycznej implementacji), korzystające z algorytmów roju, odznaczają się znacznymi możliwościami adaptacyjnymi i wysoką niezawodnością działania. W 1987 r. na konferencji SIGGRAPH programista Craig Reynolds, w artykule „Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model”, zaproponował trzy podstawowe zasady samoorganizacji bazujące na obserwacjach grup zwierząt, mianowicie [41]:

- **rozdzielność** – sterowanie zapobiegające lokalnym zgrupowaniom jednostek. Rozdzielność zapobiega kumulowaniu struktur sprzętowych lub decyzyjnych;
- **spójność** – działanie w kierunku uśrednionego zachowania lokalnej grupy jednostek;
- **wyrównywanie** – działanie w kierunku uśrednionego celu lokalnej grupy; wyrównywanie zapewnia jednostce możliwość dostosowania swojego działania do innych jednostek z jego lokalnej grupy.

W oparciu o powyższe zasady utworzono system komunikacyjny składający się z sieci sensorów, w którym trasowanie przebiega zgodnie z algorytmem roju. Poszczególne sensory, tworzące sieć, są niezależne i wyposażone w elektroniczny układ pomiarowy oraz transmisyjny MTU (Measuring and Transmitting Unit). W celu utworzenia i optymalizacji ścieżek transmisyjnych, w strukturze komunikacyjnej, zaproponowano algorytm klasy SA (Swarm Algorithm), bazujący na zachowaniu roju, w którym poszczególne pakiety danych, przekazywane przez węzeł sieci MTU, zostają oznaczone przez współczynnik jakościowy WP, określający priorytet transmisyjny, odnoszący się do skuteczności transmisji danych do głównych stacji odbiorczo-nadawczych. Współczynnik ten może przyjąć wartość zgodną z jedną z metryk łącza lub ścieżki [5, 8], a więc bazującą na czasie propagacji danych, prędkości transmisji i liczbie skoków transmitowanych pakietów danych pomiarowych.

W celu dynamicznego działania systemu każdemu pakietowi danych należy przypisać następujące reguły wynikające bezpośrednio z opisu zjawisk odnoszących się do rojów:

- I. pakiet dopasowuje swoją prędkość transmisji do pakietów poruszających się w ścieżkach o wyższym współczynniku WP,
- II. pakiet korzysta ze ścieżki równoległej do trasy optymalnej (o najwyższej znanej wartości WP), jeśli jej współczynnik WP mniejsza wartość,

- III. pakiet wykorzystuje ścieżkę bardziej optymalną (o wyższej znanej wartości WP), jeśli współczynnik WP trasy bieżącej spada,
- IV. pakiet unika prób transmisji przez węzły, które oznaczone zostały jako uszkodzone,
- V. pakiet może porzucić obecną ścieżkę, jeśli została odnaleziona główna stacja nadawczo-odbiorcza.

Dane o charakterze lokalnym, niezbędne do realizacji działań wynikających z powyższych reguł, są analizowane i przechowywane w węzłach sieci. Nie istnieje przy tym potrzeba tworzenia nadrzędnej tablicy routingu. Zastosowanie reguł powoduje, że grupa MTU tworząca łącze transmisyjne, samoczynnie wytwarza strukturę niezawodnych ścieżek transmisyjnych, ignorując przy tym jednostki, które uległy awarii.

## 5. Podsumowanie

Systemy sterowania i monitoringu, zdolne do adaptacji i uczenia się, są coraz szerzej stosowane w praktyce przemysłowej. Techniki Internetu Rzeczy (IoT) oraz komunikacji bezpośredniej Maszyna do Maszyny (M2M - Machine to Machine) coraz mocniej wpływają na strukturę i funkcjonalność systemów sterowania stosowanych w maszynach, kształtując przy tym ideę Przemysłu 4.0 (Industry 4.0). Systemy sterowania zgodne z IoT wykorzystują inteligentne sieci komunikacyjne, często o dużym stopniu komplikacji, łącząc poszczególne podzespoły, moduły, elementy wykonawcze i sensory.

Na rynku pojawia się coraz więcej rozwiązań urządzeń „energy harvesting”. Jest to możliwe dzięki wprowadzaniu na rynek układów elektronicznych o niskim zapotrzebowaniu na energię. W artykule przedstawiono możliwości wykorzystania energii pochodzącej z różnych źródeł do zasilania bezprzewodowych czujników samoorganizujących i samozasilających. Zasilanie możliwe jest między innymi poprzez wykorzystanie energii drgań mechanicznych, ruchu obrotowego oraz ciepła.

Przykładem sterownika o architekturze rozproszonej jest system sterowania KOGASTER, który jest ciągle doskonalony i rozwijany, zgodnie z potrzebami użytkowników. Zastosowanie magistrali CAN i protokołu CANopen uczyniło z niego system otwarty. Zastosowanie w systemie KOGASTER urządzeń iskrobezpiecznych umożliwia jego wykorzystanie do sterowania maszynami i urządzeniami pracującymi w strefach, w których występuje zagrożenie wybuchem gazu kopalnianego i pyłu węglowego. Modułowa budowa systemu nie ogranicza rozwoju jego funkcji.

Możliwość integracji bezprzewodowych czujników samozasilających w systemie sterowania KOGASTER poszerza możliwości jego zastosowania szczególnie tam, gdzie nie stosuje się systemów przewodowych oraz w miejscach, gdzie wymagane są sieci czujników samoobsługowych (brak możliwości wymiany baterii).

## Literatura

- [1] Arabshahi P., Gray A., Kassabalidis I., Das A., Narayanan S., Sharkawi M., El Marks R. J. Adaptive routing in wireless communication networks using swarm intelligence. AIAA 19th Annual Satellite Communications System Conference Toulouse. France 2001: 1-9.
- [2] Bartoszek S., Jagoda J., Jura J.: System diagnostyczny ładowarki bocznie wysypującej bazujący na iskrobezpiecznej magistrali CAN. Szybkobieżne Pojazdy Gąsienicowe (32) nr 1, Ośrodek Badawczo – Rozwojowy Urządzeń Mechanicznych

- OBRUM sp. z o.o., Gliwice 2013.
- [3] Bartoszek S.: Metoda pozycjonowania górniczych maszyn mobilnych w wyrobiskach korytarzowych. Monografia KOMTECH 2012, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012 s. 387-399.
- [4] Bartoszek S., Jagoda J., Jura J., Latos M.: Systemy wbudowane w zespołach sterowania, diagnostyki oraz wizualizacji dla górnictwa. Monografia KOMTECH 2014, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2014, ISBN 978-83-60708-83-5
- [5] Basagni S., Conti M., Giordano S., Stojmenovic I. Mobile Ad Hoc Networking. IEEE Press. New Jersey 2004.
- [6] Batko W., Borkowski B., Głocki K. Application of database systems in machine diagnostic monitoring. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2008; 1: 7-10.
- [7] Bombor J. Sztuczna inteligencja w kopalni Pniówek! Górnicy niepotrzebni? [http://www.dziennikzachodni.pl/arttykul/586769,sztuczna-inteligencja-w-kopalni-pniowek-gornicy-niepotrzebni,id,t.html#czytaj\\_dalej](http://www.dziennikzachodni.pl/arttykul/586769,sztuczna-inteligencja-w-kopalni-pniowek-gornicy-niepotrzebni,id,t.html#czytaj_dalej) . *Dziennik Zachodni – Western Journal* 2012; 95: 4.
- [8] Boukerche A. Algorithms and Protocols for Wireless and Mobile Ad Hoc Networks. Wiley. Ottawa 2009.
- [9] CAN in Automation (CiA) 301 “CANopen application layer and communication profile”
- [10] CAN in Automation (CiA) 401 “Device profile for generic I/O modules”
- [11] Cunefare K. A., Skow E. A., Erturk A., Savor J., Verma N., Cacan M. R.: Energy harvesting from hydraulic pressure fluctuations. *Smart Materials and Structures* 22 (2013) 025036 (10pp).
- [12] Feeney L.M. A Taxonomy for Routing Protocols in Mobile Ad Hoc Networks. SICS. Technical Report T99/07. Kista 1999.
- [13] Gładysiewicz L., Król R., Bukowski J. Tests of conveyor resistance to motion. *Eksploracja i Niezawodność – Maintenance and Reliability* 2011; 3: 17-25.
- [14] Gong T., Tuson A.L.: Particle swarm optimization for quadratic assignment problems - a formal analysis approach. *International Journal of Computational Intelligence Research*, 4, 2008, 177-185.
- [15] Gilbert J. M., Balouchi F.: Comparison of Energy Harvesting Systems for Wireless Sensor Networks. *International Journal of Automation and Computing* 05(4), October 2008, 334-347.
- [16] Ilyas M. The Handbook of Ad Hoc Wireless Networks. Florida Atlantic University. Florida 2003.
- [17] Jasiulek D., Rogala-Rojek J., Stankiewicz K.: The applicability of artificial intelligence techniques in control and diagnostics of mining machinery. Monograph. KOMTECH Conference. ITG KOMAG 2011: 45-54.
- [18] Jasiulek D., Stankiewicz K., Jagoda J.: Możliwości zastosowania czujników samozasilających się przeznaczonych do pracy w podziemiach kopalń. *Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa*. Nr 8(519), pp. 73-80 (2013)
- [19] Jasiulek D.: Alternatywne źródła zasilania czujników stosowanych w górnictwie. ITG KOMAG Gliwice (2012) (not published)
- [20] Jasiulek D.: “Propozycje zastosowania czujników samozasilających się w przemyśle wydobywczym” *Przegląd Górniczy* vol. 1/2014

- [21] Jonak J., Prostański D., Jasiulek D., Rogala-Rojek J., Puchała B.: Koncepcja adaptacyjnego układu sterowania w kombajnach chodnikowych REMAG SA. Problemy bezpieczeństwa w budowie i eksploatacji maszyn i urządzeń górnictwa podziemnego. Monografia pod redakcją Krzysztofa Krauze, Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego sp. z o.o., Łędziny 2010 s. 115-123.
- [22] Jonak J., Rogala-Rojek J.: System doradczy wspomagający operatora kombajnu chodnikowego. Prace Naukowe - Monografie KOMAG nr 38, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2012.
- [23] Jonak J., Gajewski J.: Operating diagnostics and monitoring issues of selected mining belt conveyers. . Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2006; 4: 74-78.
- [24] Jura J. i inni: „Iskrobezpieczny system sterowania maszyn górniczych bazujących na magistrali CAN i protokole CANopen.” Praca statutowa E/BM-12398, ITG KOMAG 2010-2013, (praca niepublikowana),
- [25] Jura J.: „Iskrobezpieczny system sterowania maszyn górniczych bazujących na magistrali CAN i protokole CANopen.” Sprawozdania z realizacji prac statutowych ITG KOMAG 2010-2015, (prace niepublikowane).
- [26] Jura J.: „Instrukcja Obsługi Moduł Inteligentnego Sterownika MIS-1” Praca statutowa. ITG KOMAG 2015rok (praca niepublikowana).
- [27] Jura J.: „Instrukcja Obsługi Inklinometru INK-2D” Praca statutowa. ITG KOMAG 2015rok (praca niepublikowana).
- [28] Karta katalogowa: BOSCH GmbH: CAN Specification ver 2.0, 1991
- [29] Karta katalogowa systemu KOGASTER <http://www.gabrypol.com/>
- [30] Karta katalogowa Elgór-Hansen EH-PressCater system [www.elgorhansen.com](http://www.elgorhansen.com)
- [31] Karta katalogowa Famur FAMAC RSPC system [www.famur.com.pl](http://www.famur.com.pl)
- [32] Latos M., Bartoszek S., Rogala-Rojek J.: Diagnostics of underground mining machinery. Proceedings of the 19th International Conference on Methods and Models in Automation and Robotics (MMAR), Międzyzdroje, 2014, s. 782-787.
- [33] Latos M., Stankiewicz K.: Studies on the effectiveness of noise protection for an enclosed industrial area using global active noise reduction systems. Low Frequency Noise, Vibration and Active Control Journal, 2015, vol. 34, nr 1, s. 9-20 2.
- [34] Legutko S.: Development trends in machines operation maintenance. Eksploatacja i Niezawodność – Maintenance and Reliability 2009; 2: 8-16.
- [35] Lokomotywa z napędem akumulatorowym przeznaczona do eksploatacji w atmosferze potencjalnie wybuchowej. Projekt celowy ROW-III-235/2012.
- [36] Misra S., Misra S. C., Woungang I. Guide to Wireless Ad Hoc Networks. Springer-Verlag. London 2009.
- [37] Mitcheson P.D., Rao G.K., Green T.C.: Energy Harvesting From Human and Machine Motion for Wireless Electronic Devices. Vol 96. No. 9, September 2008. Proceedings of the IEEE.
- [38] Mohapatra P., Krishnamurthy S. V. Ad Hoc networks (Technologies and Protocols). Springer 2005.
- [39] PN-EN 60079-11 Atmosfery wybuchowe: Część 11: „Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa i”
- [40] Radkowski S., Lubikowski K., Piątek A.: Vibration Energy Harvesting in the

- Transportation System: a Review. *Diagnostyka - Applied Structural Health, Usage and Condition Monitoring* 4(64)/2012.
- [41] Reynolds C. W. *Flocks, Herds, and Schools: A Distributed Behavioral Model*. SIGGRAPH. Anaheim 1987.
- [42] Sarkar S. K., Basavaraju T. G., Puttamadappa C. *Ad Hoc Mobile Wireless Networks. Principles, Protocols, and Applications*. Second edition. CRC Press. Taylor & Francis Group. Boca Raton 2012.
- [43] Sazonov E., Li H., Curry D., Pillay P.: Self-Powered Sensors for Monitoring of Highway Bridges. *IEEE Sensors Journal*, Vol. 9, NO. 11, November 2009
- [44] Słoczyński J. *Untypical routing algorithms*. Master's thesis. Lodz University of Technology 2004.
- [45] Stankiewicz K. The concept of self-organization method of complex communication system in the mining implementation. *Monograph. KOMTECH Conference. ITG KOMAG 2012: 329-337*.
- [46] Stankiewicz K., Woszczyński M.: *Metody odzyskiwania i przetwarzania energii cieplnej*. *Maszyny Górnicze* nr 1, pp. 39-46 (2010)
- [47] Stankiewicz K. Model of self-organizing, complex communication system. *Modelowanie Inżynierskie – Modelling In Engineering 2014; 51: 94-99*.
- [48] Stankiewicz K. Self-organization of network structure based on swarm algorithms. *Problemy Eksploatacji – Maintenance Problems 2014; 2: 5-14*.
- [49] Sudevalayam S., Kulkarni P.: *Energy Harvesting Sensor Nodes: Survey and Implications*. *IEEE Communications Surveys & Tutorials*, vol. 13, no. 3, third quarter 2011.
- [50] Świder J., Woszczyński M.: *Zastosowanie układu rekuperacji energii w silniku spalinowym maszyny górniczej*. *Prace Naukowe - Monografie KOMAG nr 43*, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2014 s. 1-106; 6,69 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-82-8
- [51] Świder J., Woszczyński M.: *Use of the System for Energy Recuperation and Control in Diesel Machines*. *Machine Dynamics Research 2014, Vol. 38, No 1*
- [52] Tanenbaum A.S., Stehen M.V.: *Systemy rozproszone. Zasady i paradygmaty*. *Klasyka informatyki*. WN-T, Warszawa 2006.
- [53] Wischke M., Masur M., Kröner M., Woias P.: *Vibration harvesting in traffic tunnels to power wireless sensor nodes*. *Smart Materials and Structures* Volume 20 Number 8. 2011.
- [54] Woszczyński M., Świder J.: *Use of the System for Energy Recuperation and Control in Diesel Machines*. *Machine Dynamics Research, 2014, Vol. 38, No 1*
- [55] Wang Z. L.: *Self-Powered Nanosensors and Nanosystems*. *Advanced Materials*. Volume 24, Issue 2, pages 280–285, January 10, 2011.
- [56] Vullers R.J.M., van Schaijk R., Doms I., C. Van Hoof, R. Mertens: *Micropower energy harvesting*. *Solid-State Electronics* 53 (2009) 684–693
- [57] Zhu D., Beeby S.P., Tudor M. J., Harris N. R.: *A credit card sized self powered smart sensor node*. *Sensors and Actuators A: Physical*. Volume 169, Issue 2, October 2011, Pages 317–325