

dr inż. LESZEK KASPRZYCZAK
mgr inż. PIOTR DZIERŻAK
mgr inż. DAMIAN NOWAK
mgr inż. ADAM PIASECKI
inż. PAWEŁ SZWEJKOWSKI
Instytut Technik Innowacyjnych EMAG

Czujniki parametrów atmosfery kopalnianej mobilnego robota inspekcyjnego

Sensors for measurement mining atmosphere parameters of mobile inspective robot

Omówiono budowę i funkcje układu pomiarowego robota górniczego przeznaczonego do pracy w strefie zagrożonej wybuchem. Opisano zasadę działania poszczególnych rodzajów czujników zastosowanych do detekcji gazów trujących i wybuchowych.

In the paper, build and functions of the measuring system of the mining robot for working in explosive hazardous zones were described. Moreover the principle of operations of the applied sensors for detection of explosive and toxic gases were discussed.

1. WPROWADZENIE

W wyrobiskach węgla kamiennego możliwe jest powstawanie gazowych mieszanin wybuchowych i toksycznych. W celu odizolowania niebezpiecznej strefy od pozostałej części kopalni buduje się tamy izolacyjne po stronie wlotowej i wylotowej danego rejonu. Na rys. 1 przedstawiono schemat otamowanego wyrobiska, w którym pozostały kosztowne maszyny górnicze, tj. kombajn, przenośniki, obudowy zmechanizowane.

W celu kontroli stężeń niebezpiecznych gazów dokonuje się pomiarów, przy użyciu uwięzionych w wyrobisku czujników lub przy pomocy analizy gazów zasysanych zza tam izolacyjnych. Niestety obie metody pomiarowe nie mogą dostatecznie dokładnie ocenić poziomu występującego zagrożenia.

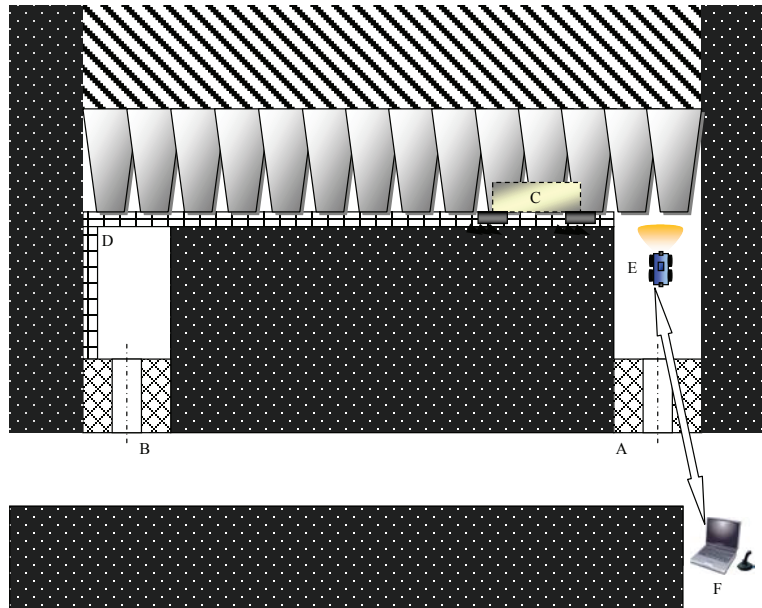
Aby umożliwić dokładny pomiar stężeń niebezpiecznych gazów w otamowanym wyrobisku Instytut EMAG wraz z Instytutem PIAP budują górniczy mobilny robot inspekcyjny przeznaczony do pracy w strefie zagrożonej wybuchem. Robot, w postaci pojazdu, wyposażony będzie w odpowiednie czujniki do pomiaru stężeń gazów, układ transmisji oraz układ

1. INTRODUCTION

In the hard coal excavations, toxic and explosive gas mixtures can exist. In order to isolate the hazardous zones from the remaining parts of a mine it is necessary to build isolated dams in the inlet and outlet sides. Fig. 1 shows the scheme of isolated excavation, where valuable mining machines were trapped, like a shearer, conveyor belts, powered roof supports.

In order to control gases concentrations the measurements are performed with the use of sensors which were also trapped in the isolated excavation or with the help of analysis of gases sucked in the neighbourhood of the dams. Unfortunately both methods cannot precisely evaluate the existing hazard.

So as to enable accurate measurements of dangerous gases in an isolated excavation, the Institute EMAG and Institute PIAP are building a mobile inspective mining robot for working in explosive hazardous zones. The robot, as a vehicle, will be equipped with the appropriate sensors for measuring gases concentrations, transmission system, control



*Rys. 1. Schemat otamowanego rejonu ściany monitorowanej robotem
 A/B – przeciwwybuchowa tama wlotowa/wylotowa z przepustem tamowym o średnicy 80 cm,
 C – kombajn, D – przenośniki, E – robot inspekcyjny, F – konsola operatora
 Fig. 1. Scheme of the isolated excavation monitored by the robot
 A/B – explosion-proof inlet/outlet dams with the 80 cm diameter sluice,
 C – shearer, D – conveyor belts, E – inspective robot, F – operator's console*

sterowania i wizualizacji stanu wyrobiska oraz składu mieszaniny gazowej. Urządzenie budowane jest w oparciu o technikę przeciwwybuchową.

Pierwszym z problemów do rozwiązania było określenie założeń funkcjonalnych i koncepcji rozwiązań technicznych robota, co wymagało sprecyzowania minimalnych gabarytów pokonywanych przeszkód stałych i wodnych, rozmiarów obrysu robota, zasięgu działania, analizowanych gazów i ekstremalnych warunków klimatycznych oraz doboru odpowiednich materiałów [1].

Dobór czujników parametrów atmosfery kopalnia-nej wraz analizą przepisów i norm dotyczących dokładności pomiarów oraz aspektów budowy przeciwwybuchowej omówiono w pracy [2]. Modele układów zasilania i komunikacji robota przedstawione zostały w pracy [3].

2. FUNKCJE POMIAROWE ROBOTA

Głównym zadaniem robota jest przesyłanie do operatora informacji na temat składu atmosfery wyrobiska. Transmitowane są wartości stężeń gazów:

- wybuchowego (metanu),
- trującego (tlenku węgla),
- i innych (dwutlenku węgla i tlenu).

and visualization systems. The device is built according to explosion-proof techniques.

The first and most important problem which had to be solved was determining the functional assumptions and the robot technical concepts solutions. In the paper [1] minimal dimensions of the robot were specified, as well as the dimensions of solid and water obstacles. Moreover the range of operation, kinds of analyzed gases, extreme climatic conditions and selection of appropriate materials were discussed.

Selection of sensors for measuring parameters of a mining atmosphere and the analysis of regulations and standards concerning the measurements accuracy and explosion-proof aspects were described in the article [2]. Models of the robot supply and communication systems were presented in the work [3].

2. ROBOT MEASURING FUNCTIONS

The main task of the robot is transmitting information regarding the composition of mining excavation atmosphere to an operator. Values of concentrations of the following gases are transmitted:

- explosive – methane,
- toxic – carbon monoxide,
- and others – carbon dioxide and oxygen.



Rys. 2. Model podwozia robota z położonym wysięgnikiem
Fig. 2. Model of the robot chassis with furlled jib

Ze względu na ograniczoną zawartość tlenu wynikającą z procesu inertyzowania rejonu, konieczne jest zastosowanie czujników opartych na takiej zasadzie pomiarowej, która nie wymaga w ogóle obecności tlenu lub bardzo niewielkiej jego ilości.

Ponadto robot wyposażony jest w czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności badanej mieszaniny gazowej. Zadaniem robota jest również transmitowanie obrazów z kamer, które umożliwiają zdalne kierowanie robotem oraz ocenę stanu wyrobiska.

Zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki [9] wymaga się pomiaru metanu jak najbliższej stropu. Na rys. 2 przedstawiono widok modelu podwozia robota ze złożonym wysięgnikiem w postaci rurki, poprzez który badana atmosfera zasysana jest do miernika gazów. Nie we wszystkich wyrobiskach wymagania tego rozporządzenia zostaną spełnione ze względu na ograniczone wymiary robota, który musi zmieścić się w przepuście tamowym o średnicy 80 cm.

W otamowanym rejonie panuje z reguły wysoka wilgotność (zwykle bliska 100%). Producenci deklarują zazwyczaj, że produkowane przez nich detektory mogą pracować przy wartościach wilgotności względnej do 95% bez kondensacji, ale w praktyce okazuje się, że żywotność i dokładność czujników bardzo się zmniejsza. W związku z tym opracowany został układ osuszania mieszaniny gazowej przed podaniem jej na czujniki gazów. Schemat blokowy przedstawiono na rys. 3.

W opracowanym układzie do obudowy urządzenia (U) atmosfera kopalniana (AK) jest zasysana poprzez wysięgnik za pomocą pompki gazu (PG). Mieszanina gazowa jest najpierw osuszana przy pomocy osuszacza (O). Następnie badany gaz podawany jest na czujniki pomiarowe (CP), po czym opuszcza obudowę urządzenia do otoczenia.

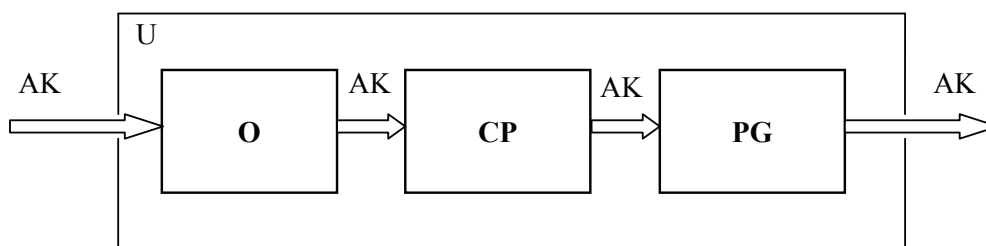
For the sake of limited oxygen content in the tested gas mixture which is due to the inertia process (with nitrogen) it is obligatory to apply sensors which do not need the presence of oxygen or they need very small amounts of it.

Moreover the robot is equipped with temperature and humidity sensors for measuring the tested gas mixture. The robot also has to transmit video from cameras to enable the operator to make an evaluation of excavation conditions and to control the robot remotely.

In accordance with the decree of the Ministry of Economy [9] it is obligatory to measure methane as close to the mine ceiling as possible. Fig. 2 presents a view of the robot chassis model with the furlled jib as a pipe, through which the tested atmosphere is sucked in to the gases meter. Not in all excavations the requirements of the decree will be fulfilled because the robot has limited dimensions as it has to fit in the dam sluices (diameter 80 cm).

In the isolated region there is high humidity usually close to 100%. Sensor manufacturers usually declare that their sensors can work at 95% RH without condensation, but in practice their life expectancy and accuracy decrease. In this connection drier system was elaborated which dries the tested gas mixture before introducing it to the sensors. The block scheme of the system is shown in Fig. 3.

In the elaborated equipment (E) the mining atmosphere (MA) is sucked in from the jib thanks to gas pump (GP). The gas mixture is at first dried in the dryer (D). Then the tested gas is introduced to the sensors (S) and leaves the equipment outside.



Rys. 3. Schemat blokowy układu pomiarowego stężeń gazów wybuchowych i trujących w niskotlenowych atmosferach kopalnianych o dużej wilgotności

Fig. 3. Block scheme of drier system for explosive and toxic gases in low-oxygen mining atmospheres with high humidity

W tabeli 1 podano zakresy pomiarowe czujników. Zastosowano czujniki na podczerwień (NDIR) do pomiaru metanu i dwutlenku węgla oraz elektrochemiczne do pomiaru tlenu i tlenku węgla. W kolejnych częściach pracy opisano zasady działania poszczególnych rodzajów czujników.

Tabela 1

Zakresy pomiarowe czujników robota

Badany gaz	Zakres pomiarowy
Metan CH ₄	0 ... 100%
Dwutlenek węgla CO ₂	0 ... 5%
Tlenek węgla CO	0 ... 1%
Tlen O ₂	0 ... 25%
Temperatura	-40 ... ~+120°C
Wilgotność	0 ... 100%

In table 1 measuring ranges of the robot sensors were given. The non-dispersive infrared sensors (NDIR) for measuring methane and carbon dioxide were applied. For detecting oxygen and carbon monoxide electrochemical sensors were used. In the next parts of the paper the principle of operations of the sensors were described.

Table 1

Measuring ranges of the robot sensors

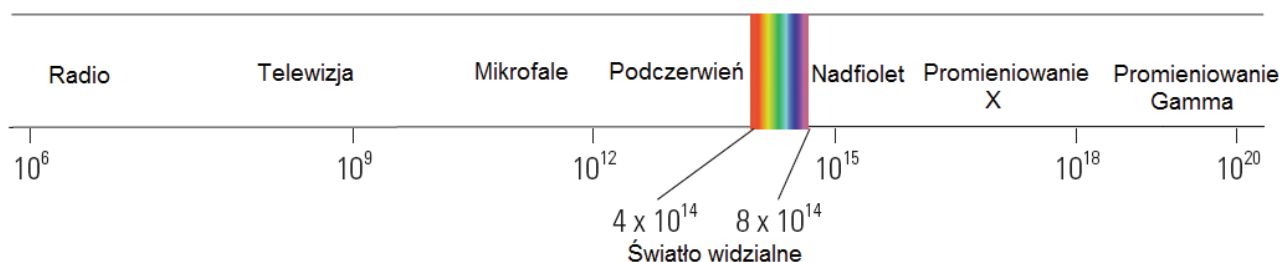
Tested gas	Measuring range
Methane CH ₄	0 ... 100%
Carbon dioxide CO ₂	0 ... 5%
Carbon monoxide CO	0 ... 1%
Oxygen O ₂	0 ... 25%
Temperature	-40 ... ~+120°C
Humidity	0 ... 100%

3. CZUJNIKI Z PROMIENIOWANIEM PODCZERWONYM

W czujnikach z promieniowaniem podczerwonym wykorzystuje się fragment promieniowania elektromagnetycznego. Całe widmo przedstawiono na rys. 4. Na rys. tym pokazano przedział dla światła widzialnego w zakresie długości fal od 0,38 do 0,75 μm [12]. Zakres promieniowania podczerwonego wykorzystywanego w czujnikach wynosi typowo od 3 do 5 μm . W paśmie tym znajdują się linie absorpcyjne istotnych gazów, a dla długości 4 μm nie ma żadnej linii absorpcyjnej, co wykorzystuje się jako sygnał odniesienia w czujniku odniesienia. Poza tym proste żarówki z włóknem emitują promieniowanie od 2 do 5 μm (w zależności od temperatury włókna i materiału obudowy żarówki). Ponadto w zakresie od 3 do 5 μm istnieje „okno wodne”, co oznacza, że para wodna nie pochłania promieniowania w tym paśmie i tym samym nie wpływa na wartość pomiarów [6,11,13].

3. INFRARED SENSORS

The infrared sensors use a fragment of electromagnetic radiation. The whole spectrum is presented in Fig. 4. For the visible light the range of waves length is between 0.38 to 0.75 μm [12]. The range of infrared radiation which is typically used in the sensors is between 3-5 μm . In this band there are absorption lines of many essential gases, and for 4 μm there is no absorption line which is used as a reference signal in a reference sensor. Besides simple bulbs with filaments emit radiation between 2 to 5 μm (depending on the filament temperature and bulb enclosure material). Moreover within the range 3-5 μm there is a “water window”, which means that water steam does not absorb radiation in this band and thereby does not influence the measurements values [6,11,13].



Rys. 4. Widmo promieniowania elektromagnetycznego [12]
 Fig.4. Spectrum of electromagnetic radiation [12]



Rys. 5. Wzrost amplitudy drgań międzyatomowych cząsteczki pary wodnej po pochłonięciu porcji promieniowania podczerwonego [12]
 Fig. 5. Increase of the amplitude of interatomic bonds vibrations of steam water after absorption the infrared radiation [12]

W tabeli 2 przedstawiono długości fal promieniowania podczerwonego wybranych gazów występujących w atmosferze kopalnianej. Producenci podają różniące się wartości, ponieważ linia absorpcyjna danego gazu z reguły nie jest pojedynczą wartością, lecz wąskim pasmem.

In table 2 lengths of waves of infrared radiation by gases typically occurred in mining atmospheres are presented. The sensors manufacturers give different values, because an absorption line of a gas is usually not a single value but a narrow band.

Tabela 2
Wartości linii absorpcyjnych wybranych gazów
[12-15]

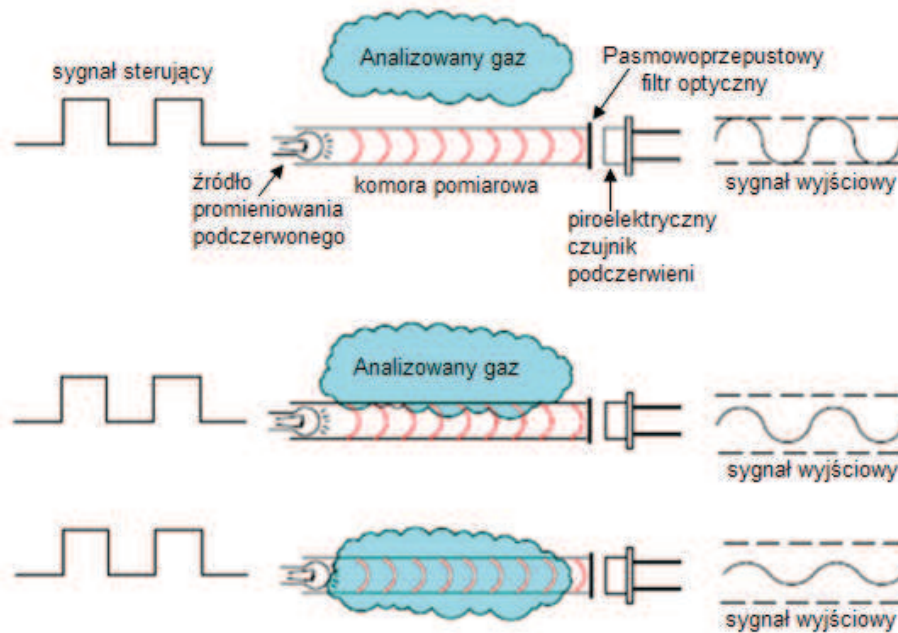
Gaz	Długość fali [μm]
Metan CH ₄	3,32 lub 3,4
Węglowodory C _x H _y	3,0 – 3,5
Dwutlenek węgla CO ₂	4,2 – 4,3
Tlenek węgla CO	4,6

Table 2
Values of absorption lines of selected gases
[12-15]

Gas	Wave length [μm]
Methane CH ₄	3,32 or 3,4
Hydrocarbons C _x H _y	3,0 – 3,5
Carbon dioxide CO ₂	4,2 – 4,3
Carbon monoxide CO	4,6

Gazy, których cząsteczki składają się z dwóch lub więcej odmiennych atomów, pochłaniają właściwą dla nich długość fali promieniowania podczerwonego (zgodną z ich częstotliwością drgań własnych). Zwiększa się wówczas amplituda drgań wiązań międzyatomowych cząsteczek, co objawia się wzrostem temperatury gazu (rys. 5). Natomiast inne gazy, tj. azot, tlen, wodór oraz gazy szlachetne nie mogą być wykrywane przy użyciu czujników na podczerwień.

Gases, with particles consisting of two or more different atoms, absorb appropriate infrared wave lengths which are compatible with their natural frequency vibrations. The amplitude of the interatomic bonds vibrations increases as well as the temperature of the particles (Fig. 5). However other gases like, nitrogen, oxygen and noble gases cannot be detected using this method.



Rys. 6. Zasada działania czujnika gazu wykorzystującego promieniowanie podczerwone [15]
 Fig. 6. Principle of operations of gas sensors with the IR radiation [15]

Zasadę działania czujnika gazu wykorzystującego zarówno jako źródło promieniowania i czujnik piroelektryczny przedstawiono na rys. 6. Sygnałem pobudzającym żarówkę jest fala prostokątna o częstotliwości od 1 do 10 Hz. Na wyjściu czujnika piroelektrycznego powstaje napięcie elektryczne o kształcie sinusoidy i o częstotliwości takiej, jak sygnał zasilający żarówkę. Wraz ze wzrostem stężenia gazu badanego, amplituda sygnału wyjściowego maleje według zależności wykładniczej opisanej prawem Beera-Lamberta [11,13].

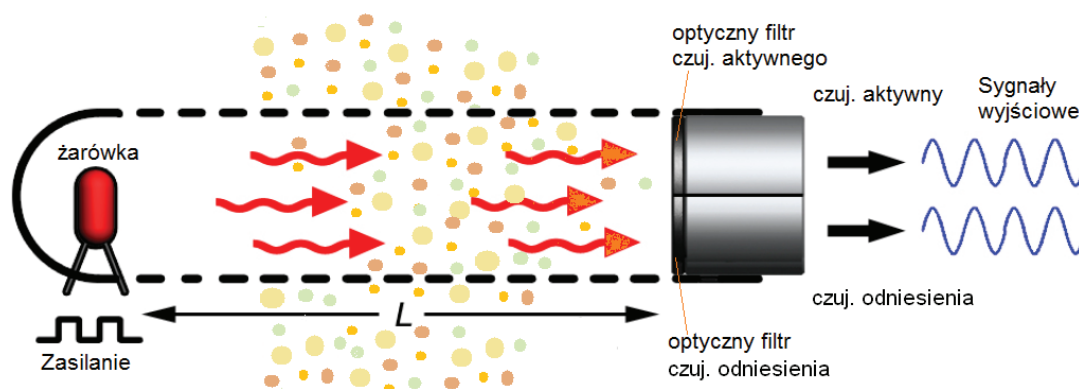
W czujnikach na podczerwień wykorzystuje się głównie dwie metody pomiarowe do wyznaczania stężenia gazu. Pierwsza metoda polega na tym, że temperatura cząsteczek gazu pochłaniających energię promieniowania rośnie – można więc wykorzystać dobrze znane termopary lub stopy termoelektryczne (termostopy). Drugą metodą jest pomiar promieniowania, które nie zostało pochłonięte przez cząsteczki, a które pada na czujnik promieniowania. Wykorzystuje się do tego celu m.in. czujniki piroelektryczne [5-8,10].

Piroelektryczność jest zdolnością pewnych materiałów do generowania chwilowego potencjału elektrycznego pod wpływem jego grzania lub chłodzenia. Potencjał elektryczny zanika po czasie relaksacji, dlatego promieniowanie padające powinno być zmienne. Stąd sygnał sterujący żarówki jest sygnałem okresowym prostokątnym. Materiały piroelektryczne podlegają również zjawisku piezoelektrycznemu, dlatego należy zabezpieczyć czujnik przed oddziaływaniem sił [11-15].

A principle of operation of gas sensors which uses a bulb as the radiation source and a pyroelectric detector is shown in Fig.6. The bulb is supplied by a rectangular signal with frequency between 1 to 10 Hz. At the pyroelectric detector output, sinusoidal voltage appears with the same frequency as the rectangular signal. When the concentration of the target gas increases, the amplitude of the output signal decreases, according to exponential expression described by the Beer-Lambert law [11,13].

In the infrared sensors two methods are typically used for determination of gas concentration. The first one depends on the increase of temperature of the gas particles which absorb the radiation energy, so it is possible to use well known thermocouples or thermopiles. The second method is the measurement of the radiation which was not absorbed by the gas particles so it falls on the pyroelectric detector [5-8,10].

Pyroelectricity is the ability of certain materials to generate a temporary electrical potential when they are heated or cooled. The electric potential disappears after a relaxation time, that is why the fallen radiation has to be changeable. Thus the bulb command signal is a period rectangular one. All pyroelectric materials are also piezoelectric ones, so it is necessary to protect sensors against forces [11-15].



Rys. 7. Konstrukcja czujnika gazu na podczerwień [13]
 Fig. 7. Structure of an IR gas sensor [13]

Na rys. 7 przedstawiono konstrukcję czujnika gazu na podczerwień z dwoma torami pomiarowymi. W torze aktywnym umieszczono optyczny filtr przepuszczający promieniowanie o długości fali dla danego gazu badanego, natomiast w torze odniesienia filtr przepuszczający promieniowanie o długości fali $4\ \mu\text{m}$.

Amplituda sygnału czujnika aktywnego maleje wraz ze wzrostem stężenia, ponieważ więcej energii zostaje pochłonięta przez cząsteczki gazu. Tor odniesienia ma za zadanie kompensowanie zmian parametrów źródła (starzenie się źródła), degradacji optyki, a także w pewnych granicach zmian temperaturowych. Czujnik odniesienia nie reaguje na gaz badany. Stężenie gazu wyznaczane jest na podstawie stosunku wartości międzyszczytowych obu sygnałów wyjściowych. W praktyce do obliczania stężenia wykorzystuje się bardziej skomplikowane równania, w których kompensuje się wpływ zmian temperaturowych, a czasami ciśnieniowych.

Czujniki gazu na podczerwień mają kilka istotnych zalet. W przeciwieństwie do czujników katalitycznych [4] są odporne na zatrucia, nie wymagają obecności tlenu, nie są skrośnie czułe na wodór, nie wypalają się przy wyższych stężeniach, mają dłuższą żywotność i nie wymagają częstych kalibracji. Z powodu emitowanego promieniowania ze źródła, temperatura detektora piroelektrycznego jest wyższa o $5\text{-}6^\circ\text{C}$ od temperatury otoczenia, co powoduje, że są odporniejsze na działanie wilgoci. Ich wadą jest dłuższy czas odpowiedzi, większy pobór mocy, bardziej skomplikowany układ elektroniczny oraz nieliniowa charakterystyka.

4. CZUJNIKI ELEKTROCHEMICZNE

Czujniki elektrochemiczne wykorzystują reakcje chemiczne do pomiaru stężenia badanego gazu. Ty-

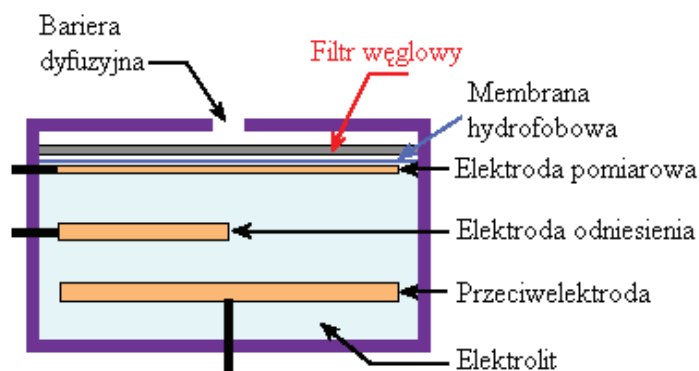
In Fig. 7 a structure of an IR gas sensor with two measuring channels is shown. In the active channel there is an optical filter which passes radiation with wave length as the wave length for target gas. In the reference channel the optical filter passes radiation with wave length $4\ \mu\text{m}$.

The signal amplitude of active sensor decreases together with increase of concentration because more energy is absorbed by the gas particles. The reference channel is used to compensate for changes in source intensity, optical degradation and temperature to some degree. The amplitude of this detector will not show any changes due to the effects of the target gas. The target gas concentration is calculated from the ratio of the two output peak to peak signals. In practice more complicated equations are used for measuring concentrations, which compensate the influence of temperature and sometimes pressure.

The IR sensors have some essential advantages. Unlike catalytic sensors [4] they are unaffected by poisoning, they do not require the presence of oxygen, they are not cross-sensitive for hydrogen, they do not burn-out if exposed to high gas concentrations, their life expectancy is longer and they require less recalibration. Due to emitting the radiation from the source, the pyroelectric detector temperature is higher at about $5\text{-}6^\circ\text{C}$ than an ambient temperature so they are more resistant to humidity. The main disadvantages of IR sensors are as follow: longer response time, higher supply power, more complicated electronic system and non-linear characteristics.

4. ELECTROCHEMICAL SENSORS

Electrochemical sensors use chemical reactions for measurement target gas concentrations. A typical



Rys. 8. Konstrukcja typowego czujnika elektrochemicznego [12]

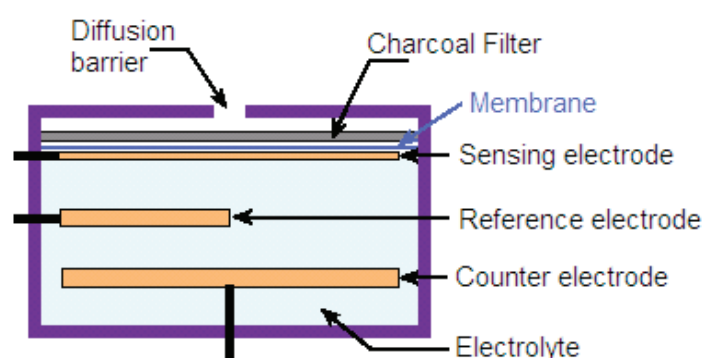


Fig. 8. Structure of a typical electrochemical sensor [12]

powy czujnik elektrochemiczny składa się z elektrody pomiarowej (roboczej) oraz przeciwelektrody oddzielonej elektrolitem. Gaz przechodzi najpierw przez barierę dyfuzyjną, filtr i membranę hydrofobową, po czym dochodzi do reakcji na elektrodzie pomiarowej (rys. 8).

Badany gaz reaguje z powierzchnią elektrody roboczej podlegając utlenianiu lub redukcji. Katalizatorem jest odpowiedni materiał elektrody specyficzny dla badanego gazu. Poprzez zewnętrzny rezystor łączący elektrodę pomiarową z przeciwelektrodą przepływa prąd proporcjonalny do stężenia gazu. Ze względu na zasadę działania czujniki elektrochemiczne zwane są również miniaturowymi ogniwami paliwowymi [10,12,13,16].

Wymaga się aby potencjał elektrody roboczej był stały i stabilny. W rzeczywistości napięcie elektrody pomiarowej zależy od reakcji zachodzących w czujniku. Z tego powodu następuje pogorszenie parametrów metrologicznych. W celu eliminacji tego zjawiska do elektrody pomiarowej podłącza się stabilne napięcie, a obok wprowadza się dodatkową elektrodę odniesienia. Jest ona umieszczona w bliskiej odległości elektrody roboczej. Dzięki temu na elektrodzie pomiarowej utrzymywane jest stabilne napięcie odniesienia. Żaden prąd nie płynie między elektrodami odniesienia i pomiarową.

electrochemical sensor consists of sensing electrode (working) and counter electrode which are separated by an electrolyte (Fig. 8). At first a gas passes through the diffusion barrier, charcoal filter and hydrophobic membrane and then the reaction on sensing electrode begins.

The target gas reacts at the surface of the working electrode involving either an oxidation or reduction reactions. These mechanisms are catalyzed by the electrode materials specifically selected for the tested gas. Through an external resistor which connects working and counter electrodes proportional to the concentration electrical current flows. Because of the principle of operation electrochemical sensors are also described as micro fuel cells [10,12,13,16].

It is required to have a stable and constant potential at the working electrode. In reality the sensing electrode potential does not remain constant due to the continuous electrochemical processes. That is why the metrological parameters deteriorate. In order to improve the performance of the sensor, a reference electrode is introduced between the sensing and counter electrodes, and to the working electrode, a fixed stable constant potential is applied. No current flows between the sensing and reference electrodes.

Membrana hydrofobowa zapewnia ochronę przed dostępem wilgoci i zabezpiecza czujnik przed wysychaniem i wyciekami elektrolitu. Ponadto umożliwia doprowadzenie określonej ilości gazu do elektrod. Wykonana jest zazwyczaj z teflonowej porowatej folii.

Filtr instalowany jest w celu eliminacji czułości skrośnej na inne gazy. Wykonany jest zwykle z węgla aktywowanego, który blokuje dostęp większości związków chemicznych z wyjątkiem tlenu węgla i wodoru. Poprzez właściwe dobranie filtru czujnik jest bardziej selektywny.

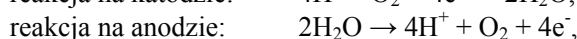
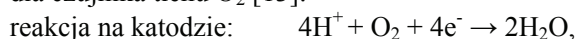
Elektrody wykonane są najczęściej z materiałów szlachetnych, takich jak platyna lub złoto. Każda elektroda może być wykonana z innego materiału, co zapewnia odpowiednie reakcje chemiczne z gazem badanym.

Elektrolit umożliwia przenoszenie jonów pomiędzy elektrodami.

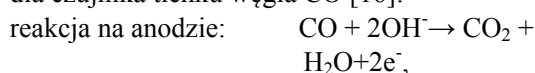
Parametry czujników elektrochemicznych w tym czułość, selektywność, czas odpowiedzi oraz czas życia są różne w zależności od przyjętej budowy. Na przykład czujnik o dużej czułości posiada słabszą barierę dyfuzyjną, ale z tego powodu elektrolit łatwiej odparowuje na zewnątrz. W związku z tym czujniki o większej czułości charakteryzują się krótszym czasem życia wynikającym z parowania elektrolitu [12].

Typowymi reakcjami są:

– dla czujnika tlenu O_2 [13]:



– dla czujnika tlenu węgla CO [16]:



Jak widać z zachodzących reakcji dla czujnika tlenu węgla, potrzebuje on niewielkich ilości tlenu do poprawnego działania. Niewystarczająca ilość tlenu powoduje znaczące skrócenie czasu życia czujnika, nawet do kilku godzin. Natomiast czujniki tlenu uzupełniają wodę poprzez pochłanianie jej w postaci pary wodnej z otoczenia. Temperatura jest czynnikiem, który ma znaczący wpływ na dokładność pomiarów. Należy ją więc kompensować [12,13,16].

Najlepszą selektywność posiadają czujniki do pomiaru tlenu. Czujniki te mają także stosunkowo długi czas życia. Czas życia czujników wynosi typowo od jednego do trzech lat. Zależy on przy tym od takich parametrów, jak ilość mierzonego gazu, temperatura, ciśnienie oraz wilgotność. Najistotniejszą zaletą czujników elektrochemicznych jest ich znikomy pobór energii elektrycznej, a w przypadku czujników dwuelektrodowych brak zasilania.

The **hydrophobic membrane** enables a protection against humidity and prevents the sensor from drying out as well as leaking the liquid electrolyte. Moreover it allows enough gas molecules to reach the working electrode. The membrane is made of thin, porosity Teflon.

The **filter** is installed in order to eliminate cross-sensitivity for unwanted gases. It is usually made of activated charcoal, which filters out most chemical compounds except carbon monoxide and hydrogen gases. By correctly selecting the filter, the sensor is more selective.

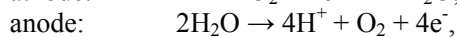
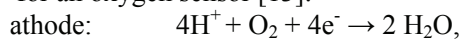
The **electrodes** are usually made of noble metals such as gold or platinum. Every electrode can be made of different material, which enables suitable chemical reactions with a target gas.

The **electrolyte** allows carrying the ionic charge across the electrodes.

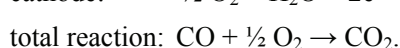
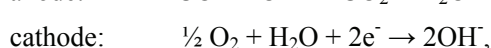
Parameters of electrochemical sensors like sensitivity, selectivity, response time and lifetime are different and depend on the sensor structure. For instance a sensor with big sensitivity has a worse diffusion barrier but the electrolyte evaporates more easily. Thus sensors with bigger sensitivity have a shorter lifetime [12].

Typical chemical reactions for measurement of oxygen and carbon monoxide are as follows:

– for an oxygen sensor [13]:



– for a carbon monoxide sensor [16]:



As we can see from the above reactions, the carbon monoxide sensor needs small amounts of oxygen for correct functioning. Too low an amount of oxygen causes significant shortening of sensor life (even to several hours). The oxygen sensor fills up with water thanks to absorption of steam water from an ambient environment. Temperature is a factor which has a big influence for measurement accuracy. So it is necessary to compensate it [12,13,16].

Oxygen sensors have the best selectivity. Moreover these sensors also have a relatively long lifetime. Usually the life is between 1 to 3 years and is depended on the amount of measured gas, temperature, pressure and humidity. The most essential advantage of the electrochemical sensors is low power consumption and in the case of two electrodes sensors lack any energy supply at all.

5. STEROWNIK MIERNIKA

Układem sterującym pracą modułu miernika gazów robota inspekcyjnego jest 8-bitowy mikrokontroler jednokładowy. Posiada on 128 kB wewnętrznej pamięci programu oraz 8 kB RAM. Ponadto charakteryzuje się dużą szybkością działania (do 100 MIPS) przy niewielkim poborze mocy oraz bogatymi peryferiami analogowymi i cyfrowymi. Oprogramowanie sterujące pracą miernika gazów robota napisane zostało w języku C. Mikrokontroler miernika gazów robota odpowiedzialny jest za następujące funkcje:

- dwukierunkową asynchroniczną komunikację szeregową z jednostką nadrzędną,
- dwukierunkową synchroniczną komunikację szeregową z zewnętrznym przetwornikiem analogowo-cyfrowym,
- obsługę dwóch synchronicznych magistral szeregowych komunikujących się z dwoma czujnikami wilgotności i temperatury,
- pomiary stężeń: CH₄, O₂, CO₂, CO, H, T, strumienia przepływu,
- kontrolę pracy pompki gazu,
- diagnostykę, np. niezgodność poziomów napięć zasilających detektory, wykrywanie błędów w komunikacji, awarie detektorów pomiarowych itp.

Pomiary analogowe są realizowane na zewnętrznym 12-bitowym, 12-kanałowym przetworniku AC. Przetwornik posiada swoje wewnętrzne dokładne napięcie odniesienia oraz charakteryzuje się dużą szybkością przetwarzania i bardzo małym poborem mocy. Mikrokontroler komunikuje się z przetwornikiem za pośrednictwem magistrali I2C. Za pomocą wewnętrznego przetwornika AC mikrokontrolera, dla celów diagnostycznych zrealizowano pomiary napięć zasilających poszczególne detektory.

Sterownik miernika zapewnia odpowiednie warunki pracy detektorów na podczerwień. Żarówki wymagają napięcia zasilania w kształcie fali prostokątnej o wypełnieniu 50% i częstotliwością 4 Hz. Na wyjściu detektora jest wówczas sygnał sinusoidalny (rys. 6) o amplitudzie zależnej od stężenia mierzonego gazu. Stężenie gazu wyznacza się na podstawie pomiaru wartości szczytowych napięcia wyjściowego. Niezbędnym było więc zastosowanie przetwornika AC o krótkim czasie konwersji. Jednoczesne zasilanie żarówek obu czujników podczerwieni powodowało wahania prądu pobieranego przez cały miernik gazów. W celu wyeliminowania tego efektu prostokątne napięcie zasilania żarówek przesunięto w fazie o 180°.

5. THE CONTROLLER OF THE GASES METER

The control circuit of the inspective robot gases meter is 8-bit microcontroller. It has 128 kB internal programme memory and 8 kB RAM. It is characterized by high speed up to 100 MIPS and low power consumption as well as rich analogue and digital peripheral devices. The software controlling the gases meter was created in C language. The robot gases meter microcontroller has following functions:

- Bidirectional asynchronous serial communication with primary unit,
- Bidirectional synchronous serial communication with external analogue-digital converter,
- Interaction with 2 synchronous serial buses, which communicate with 2 humidity and temperature sensors,
- Measurements of concentrations of CH₄, O₂, CO₂, CO, H, T and flow rate,
- Gas pump control,
- Diagnosis, like non-compatible voltage levels of sensors supply, transmission error detection, sensors failures and others.

The analogue measurements are realized in external 12-bit, 12-channels AD converter. The converter has its own internal accurate reference voltage and is characterized by high speed conversion and low power consumption. The microcontroller communicates with the converter through the I2C bus. The internal AD converter of the microcontroller measures supply voltages of the sensors for diagnosis.

The microcontroller of the gases meter ensures appropriate conditions for infrared sensors. The bulbs are supplied with rectangular signal with duty cycle 50% and frequency 4 Hz. At the output of pyroelectric detectors there are sinusoidal signals with amplitudes proportional to concentrations of target gases (see Fig. 6). The measured concentration is proportional to the ratio of peak to peak values of the active and reference sensors so high speed convertor is required. Simultaneous supplying of bulbs of all sensors caused fluctuations of supplying current. In order to eliminate this phenomena the rectangular signals before introducing to bulbs are shifted in phase with 180°.

Pomiędzy konsolą operatora a miernikiem gazu robota zrealizowano dwukierunkową komunikację. Stacja nadrzędna (konsola) pełni tutaj rolę „master’a” a miernik gazu „slave’a”. Master wymusza komunikację poprzez zapytania, na które slave odpowiada. Charakterystyka protokołu komunikacyjnego jest następująca:

0× FE	0× 01	Ad res	Ilość	Dane	CRC L	CRC H	0× 03	0× F0
----------	----------	-----------	-------	------	-------	-------	----------	----------

gdzie:

- 0×FE, – znaczniki początku ramki komunikacyjnej,
- 0×01
- Adres – adres dla czujnika gazów,
- Ilość – ilość bajtów w polu „Dane”,
- Dane – tablica danych (np. typ czujnika, wartości pomiarowe, statusy itp.),
- CRC L – młodszy bajt sumy kontrolnej,
- CRC H – starszy bajt sumy kontrolnej,
- 0×03, – znaczniki końca ramki komunikacyjnej.
- 0×F0

W celu zabezpieczenia danych przed błędami w protokole zastosowano sumę kontrolną CRC16.

Poza czujnikami do pomiarów temperatury i wilgotności pozostałe detektory wymagają okresowych kalibracji. Proces kalibracji detektorów wchodzących w skład miernika gazów został zrealizowany za pomocą aplikacji zainstalowanej na konsoli operatora. W aplikacji zainstalowanej na konsoli sterującej możliwy jest podgląd aktualnych danych pomiarowych i statusowych miernika gazów.

6. PODSUMOWANIE

Omówione funkcje metrologiczne wyczerpują podstawowe zadania przewidziane dla mobilnego robota górniczego przeznaczonego do monitorowania niebezpiecznych stref w kopalniach węgla kamiennego. Oprócz wymagań metrologicznych, zwłaszcza zachowania dokładności pomiarów, podzespoły robota muszą spełnić przepisy i normy dotyczące budowy przeciwwybuchowej.

W mierniku gazów robota zastosowano detektory wykonane w oparciu o najnowocześniejsze rozwiązania światowe w dziedzinie pomiarów. Ponadto dla minimalizacji gabarytów i masy, zarówno miernik gazów robota, jak i jego inne podzespoły elektroniczne, wykonano z wykorzystaniem elementów do montażu powierzchniowego.

Between the operator’s console and the robot gases meter the bidirectional communication was realized. The primary unit (console) fulfils a role of “master” and the gases meter a role of “slave”. The master forces the communication via questions and the slave answers. The protocol structure is as follows:

0× FE	0× 01	Ad- ress	Quan- tity	Da- -ta	CRC L	CRC H	0× 03	0× F0
----------	----------	-------------	---------------	------------	-------	-------	----------	----------

where:

- 0×FE, – markers of the beginning of the communication frame,
- 0×01
- Address – address for the gases meter,
- Quantity – number of bytes in the „Data” field,
- Dane – data table (e.g. sensor type, measurements, statuses etc.),
- CRC L – LSB of control sum,
- CRC H – MSB of control sum,
- 0×03, – markers of the end of the communication frame.
- 0×F0

In order to protect the data against errors, CRC16 control sum was applied in the protocol.

Except the temperature and humidity sensors, the remaining sensors require periodic recalibrations. The calibration process is realized by a software programme which is installed at the operator console. In this programme it is possible to view the present measurements and statuses of the gases meter.

6. SUMMARY

The discussed functions describe the basic tasks which were assumed for the mobile inspective robot for monitoring hazardous zones in hard coal mines. Apart from the metrological requirements, specially accuracy of the measurements, the robot subassemblies have to fulfil regulations and standards concerning explosion-proof construction.

In the gases meter of the robot the most modern state of the art detectors were applied. In order to minimize dimensions and weight of the gases meter as well as other electronic subassemblies, SMD technology elements were used.

Przewiduje się, że spełnienie przez przyrząd pomiarowy wymagań budowy przeciwybuchowej nie będzie stanowić problemu, natomiast spełnienie wytycznych dotyczących dokładności metrologicznych może okazać się trudne do zrealizowania. Będzie to spowodowane brakiem możliwości wykonania kalibracji w otamowanym rejonie. Na dokładność realizowanych pomiarów poważny wpływ będą miały również bardzo trudne warunki środowiskowe – atmosfery niskotlenowe, wysoka wilgotność oraz temperatura.

It is expected that the explosion-proof regulations will be easily fulfilled. However the guidelines concerning the metrological accuracy can be difficult to obtain. It is due to the fact that the robot will be utilized in isolated excavations and recalibrations will be available very rarely. For measurement accuracy the influence of environmental factors, will have a big impact, i.e. low-oxygen atmospheres, high humidity and temperature.

Literatura

1. *Kasprzyczak L., Trenczek S., Borkowicz Z., Cader M.*: Założenia funkcjonalne i koncepcje rozwiązań technicznych mobilnego robota inspekcyjnego przeznaczonego do pracy w strefie zagrożonej wybuchem, Materiały konferencyjne EMTECH 2009 „Zasilanie, informatyka i automatyka w przemyśle wydobywczym – Innowacyjność i bezpieczeństwo”, Ossa 10-13 maja 2009, ss. 99-105.
2. *Kasprzyczak L., Krzykawski D., Mirek G.*: Pomiary stężeń trujących i wybuchowych gazów przy użyciu mobilnego robota górniczego w atmosferach niskotlenowych o dużej wilgotności, Materiały konferencyjne EMTECH 2009 „Zasilanie, informatyka i automatyka w przemyśle wydobywczym – Innowacyjność i bezpieczeństwo”, Ossa 10-13 maja 2009, ss. 115-121.
3. *Kasprzyczak L., Mirek G., Szwejkowski P., Trenczek S.*: Zasilanie i komunikacja górniczego mobilnego robota inspekcyjnego, Materiały XXXVII Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN "Telekomunikacja i Systemy Bezpieczeństwa w Górnictwie", Szczyrk 30.09-2.10.2009, ss. 115-124.
4. *Kasprzyczak L., Cuber J., Maślankiewicz G.*: Katalityczne i termokonduktometryczne czujniki stężenia metanu – zasada działania, wymagania i badania, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 12/454, 2008, ss. 32-39.
5. *Lang S.*: Pyroelectricity: from ancient curiosity to modern imaging tool. *Physics Today*, Vol. 58, Issue 8, 2005, pp. 31-36.
6. *Nowak D., Gralewski K., Maślankiewicz G.*: Badanie nowej generacji komórek opartych na detektorach NDIR do pomiaru metanu i dwutlenku węgla, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 10/2009, s. 5-10.
7. *Passia H., Pawlak J., Piasecki S.*: Lasery w górnictwie. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1978.
8. *Piotrowski J., Rogalski A.*: Półprzewodnikowe detektory podczerwieni. WNT, Warszawa 1985.
9. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. Dz. U. Nr 139, poz. 1169 z późn. zm.
10. *Utikal J.*: Systemy telekomunikacyjne w górnictwie. Wyd. Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice 1998.
11. www.wikipedia.org
12. www.intlsensor.com
13. www.e2v.com
14. www.citytech.com
15. www.dynamet.com
16. www.figaro.co.jp

Recenzent: dr inż. Stanisław Trenczek

Literature

1. *Kasprzyczak L., Trenczek S., Borkowicz Z., Cader M.*: Założenia funkcjonalne i koncepcje rozwiązań technicznych mobilnego robota inspekcyjnego przeznaczonego do pracy w strefie zagrożonej wybuchem, Materiały konferencyjne EMTECH 2009 „Zasilanie, informatyka i automatyka w przemyśle wydobywczym – Innowacyjność i bezpieczeństwo”, Ossa 10-13 maja 2009, ss. 99-105.
2. *Kasprzyczak L., Krzykawski D., Mirek G.*: Pomiary stężeń trujących i wybuchowych gazów przy użyciu mobilnego robota górniczego w atmosferach niskotlenowych o dużej wilgotności, Materiały konferencyjne EMTECH 2009 „Zasilanie, informatyka i automatyka w przemyśle wydobywczym – Innowacyjność i bezpieczeństwo”, Ossa 10-13 maja 2009, ss. 115-121.
3. *Kasprzyczak L., Mirek G., Szwejkowski P., Trenczek S.*: Zasilanie i komunikacja górniczego mobilnego robota inspekcyjnego, Materiały XXXVII Konferencji Sekcji Cybernetyki w Górnictwie KG PAN "Telekomunikacja i Systemy Bezpieczeństwa w Górnictwie", Szczyrk 30.09-2.10.2009, ss. 115-124.
4. *Kasprzyczak L., Cuber J., Maślankiewicz G.*: Katalityczne i termokonduktometryczne czujniki stężenia metanu – zasada działania, wymagania i badania, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 12/454, 2008, ss. 32-39.
5. *Lang S.*: Pyroelectricity: from ancient curiosity to modern imaging tool. *Physics Today*, Vol. 58, Issue 8, 2005, pp.31-36.
6. *Nowak D., Gralewski K., Maślankiewicz G.*: Badanie nowej generacji komórek opartych na detektorach NDIR do pomiaru metanu i dwutlenku węgla, *Mechanizacja i Automatykacja Górnictwa*, 10/2009, s. 5-10.
7. *Passia H., Pawlak J., Piasecki S.*: Lasery w górnictwie. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1978.
8. *Piotrowski J., Rogalski A.*: Półprzewodnikowe detektory podczerwieni. WNT, Warszawa 1985.
9. Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. Dz. U. Nr 139, poz. 1169 z późn. zm.
10. *Utikal J.*: Systemy telekomunikacyjne w górnictwie. Wyd. Zarząd Główny Stowarzyszenia Inżynierów i Techników Górnictwa, Katowice 1998.
11. www.wikipedia.org
12. www.intlsensor.com
13. www.e2v.com
14. www.citytech.com
15. www.dynamet.com
16. www.figaro.co.jp

ДАТЧИКИ ПАРАМЕТРОВ ГОРНОЙ АТМОСФЕРЫ МОБИЛЬНОГО ИНСПЕКЦИОННОГО РОБОТА

Описано строение и функции измерительной системы горного робота, предназначенного для работы в зоне с опасностью взрыва. Описан принцип работы отдельных типов датчиков, примененных в детектировании отравляющих и взрывчатых газов.