

## SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

# INFORMATICS NFORMATYKA ELECTRICA ENGINEERING

## AUTOMATION AUTOMATYKA

a nemise

## CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering





## SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL NO. 1 (529) 2017

TECHNOLOGICAL PROCESSES MECHANICS BUILDING AND EXPLOATATION OF MACHINES POWER ELECTRONICS AUTOMATION ROBOTICS APPLIED IT TELECOMMUNICATIONS SAFETY PROCESY TECHNOLOGICZNE

MECHANIKA BUDOWA I EKSPLOATACJA MASZYN ENERGOELEKTRONIKA AUTOMATYKA ROBOTYKA INFORMATYKA STOSOWANA

TELEKOMUNIKACJA

**BEZPIECZEŃSTWO** 

e-ISSN 2449-6421 ISSN 2450-7326



#### MINING – INFORMATICS, AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING Published since 1962

DOI: htttp://dx.doi.org/10.7494/miag

Chairman of the Scientific Board/Przewodniczący Rady Naukowej: Antoni Kalukiewicz, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Secretary of the Scientific Board/Sekretarz Rady Naukowej: *Krzysztof Krauze*, AGH University of Science and Technology, Kraków (Poland)

Members of the Scientific Board/ Członkowie Rady Naukowei: Darius Andriukatis, Kaunas University of Technology, Kaunas (Lithuania) Naj Aziz, University of Wollongong, Wollongong (Australia) Edward Chlebus, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland) George L. Danko, University of Nevada, Reno (USA) Krzysztof Filipowicz, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland) Jiří Fries, Technical University of Ostrava, Ostrava (Čzech Republic) Leonel Heradia, EAFIT University, Medellin (Columbia) Dou Lin-ming, China University of Mining and Technology, Xuzhou (China) Arkadiusz Mężyk, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland) Josph Molnar, University of Miskolc, Miskolc (Hungary) Jacek Paraszczak, Laval University, Quebec (Canada) Sorin Mihai Radu, University of Petrosani, Petrosani (Romania) Yuan Shujie, Anhui University of Science and Technology, Huainan (China) Marek Sikora, Institute of Innovative Technologies EMAG, Katowice (Poland) Radosław Zimroz, Wrocław University of Science and Technology, Wrocław (Poland)

Editorial staff/ Redakcja czasopisma: Editor in Chief/ Redaktor Naczelny – *Krzysztof Krauze* Deputy Editor in Chief/ Zastępca Redaktora Naczelnego – *Krzysztof Kotwica* Managing Editor/ Kierownik Redakcji – *Marcin Mazur* 

Associate editors/ Redaktorzy tematyczni: Waldemar Korzeniowski (technological processes/ procesy technologiczne) Łukasz Bołoz (mechanics/ mechanika) Jacek Feliks (building and exploitation of machines/ budowa i eksploatacja maszyn) Tomasz Siostrzonek (power electronics/ energoelektronika) Waldemar Rączka (automation/ automatyka) Tomasz Buratowski (robotics/ robotyka) Ryszard Klempka (applied IT/ informatyka stosowana) Elżbieta Bereś-Pawlik (telecommunications/ telekomunikacja) Tomasz Wydro (safety/ bezpieczeństwo)

Proofreading/ Redaktor językowy – Aleksandra Kozak Technical Editor/ Redaktor techniczny – Kamil Mucha Webmaster/ Redaktor strony internetowej – Paweł Mendyka

#### PUBLISHER

Publishing manager/ Redaktor Naczelny Wydawnictw AGH: Jan Sas

Linguistic Corrector/Korekta językowa: Kamila Zimnicka-Warchoł (Polish/ język polski), Bret Spainhour (English/ język angielski)

Desktop Publishing/ Skład komputerowy: Andre

Cover Design/ Projekt okładki i strony tytułowej: ROMEDIA-ART

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2017

ISSN 2449-6421 (online) ISSN 2450-7326 (printed)

*The electronic version of the journal is the primary one. Number of copies:* 70

Wydawnictwa AGH (AGH University of Science and Technology Press) al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków tel. 12 617 32 28, tel./faks 12 636 40 38 e-mail: redakcja@wydawnictwoagh.pl http://www.wydawnictwo.agh.edu.pl

#### Table of Contents/ Spis treści

Jerzy Mróz, Dariusz Felka, Adam Broja, Marcin Małachowski	
Devices for measuring ventilation parameters and methane concentration as well as concept of complex monitoring of methane hazard in longwall area	. 7
Urządzenia pomiarowe parametrów wentylacyjnych i stężenia metanu oraz koncepcja kompleksowego monitorowania zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej	49
Marian Hyla	
Diagnostics and monitoring of microprocessor-controlled excitation power supply unit for synchronous motors	. 19
Diagnostyka i monitorowanie pracy mikroprocesorowo sterowanego bloku zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego	61
Krzysztof Krauze, Łukasz Bołoz, Tomasz Wydro, Kamil Mucha	
Durability testing of tangential-rotary picks made of different materials	26
Badania trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów	68
Sergei Ivanowich Kuchuk-Yatsenko, Piotr Mikhailovich Rudenko, Valery Semionovich Gavrysh Alexandr Vladimirovich Didkovsky, Valentina Ivanovna Shvets , Evgeni Valentinovich Antipin Piotr Wojtas, Artur Kozłowski	
Real-time operational control in information management system for flash-butt welding of rails	35
Kontrola operacyjna w informacyjnym systemie zarządzania zgrzewaniem doczołowym szyn realizowana w czasie rzeczywistym	. 77
Sławomir Chmielarz, Tomasz Molenda, Piotr Szymała, Wojciech Korski	
Conditions for using digital isolators in intrinsically safe applications	43
Warunki stosowania izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych	85

No. 1 (529) 2017

#### ABSTRACTS

JERZY MRÓZ DARIUSZ FELKA ADAM BROJA MARCIN MAŁACHOWSKI

DEVICES FOR MEASURING VENTILATION PARAMETERS AND METHANE CONCENTRATION AS WELL AS CONCEPT OF COMPLEX MONITORING OF METHANE HAZARD IN LONGWALL AREA

This paper discusses the issue of the methane hazard occurring in the longwall areas of hard coal deep mines along with ways of overcoming this hazard. The authors describe devices for measuring the parameters of the underground environment in the exploitation area. Then, they present the results of tests to determine the methane hazard level in the longwall area. The parameters of ventilation-, absolute-, and criteria-methanebearing capacity are determined based on online measurements of ventilation and gas parameters. The presented results are the effects of the European project AVENTO (Advanced tools for monitoring ventilation and methane emission).

#### MARIAN HYLA

DIAGNOSTICS AND MONITORING OF MICROPROCESSOR-CONTROLLED EXCITATION POWER SUPPLY UNIT FOR SYNCHRONOUS MOTORS

This article presents a excitation power supply unit for synchronous motors with a microprocessor control system. The theoretical basics of reactive power regulation with a synchronous motor and influence of load on the permissible operating range are discussed. The possibilities of controlling the motor by a microprocessor system in the developed device during asynchronous start-up and synchronous operation are presented. The ability to monitor and record the status of the drive, which allows us to analyze the sequence of events in case of emergencies, is also presented. Dedicated software for diagnostic and service operation is demonstrated. The selected diagnostic functionality is also discussed.

KRZYSZTOF KRAUZE ŁUKASZ BOŁOZ TOMASZ WYDRO KAMIL MUCHA

### DURABILITY TESTING OF TANGENTIAL-ROTARY PICKS MADE OF DIFFERENT MATERIALS

This paper presents information on the current most-widely-used cutting heads; i.e., tangential-rotary picks. It describes their applications, design, methods for improving their durability, as well as problems related to their performance. The main body of the paper deals with the results of the durability testing of tangential-rotary picks made of different materials and hardfaced or machined in ways that lead to an increase in their durability. The picks selected for the tests were standard, commercially-available, and prototypical ones. The paper also presents a state-of-the-art laboratory test stand to research the cutting process or rotation drilling with the use of a single cutting tool or cutting drum (the property of the Department of Mining, Dressing, and Transport Machines of the AGH UST in Krakow).



#### STRESZCZENIA

JERZY MRÓZ DARIUSZ FELKA ADAM BROJA MARCIN MAŁACHOWSKI

URZĄDZENIA POMIAROWE PARAMETRÓW WENTYLACYJNYCH I STĘŻENIA METANU ORAZ KONCEPCJA KOMPLEKSOWEGO MONITOROWANIA ZAGROŻENIA METANOWEGO W REJONIE ŚCIANY WYDOBYWCZEJ

W artykule scharakteryzowano zagrożenia metanowe występujące w rejonach ścian wydobywczych kopalń głębinowych węgla kamiennego oraz podstawy ich zwalczania. Scharakteryzowano urządzenia pomiarowe stosowane do pomiaru parametrów środowiska podziemnego w rejonie eksploatacji. Przedstawiono wyniki badań dotyczących wyznaczania poziomu zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej. Wyznaczono parametry metanowości wentylacyjnej, bezwzględnej i kryterialnej na podstawie ciągłych pomiarów parametrów wentylacyjnych i gazowych. Zaprezentowane wyniki badań są efektem realizacji badawczego projektu europejskiego AVENTO (Zaawansowane narzędzia do kontroli wentylacji i emisji metanu).

MARIAN HYLA

#### DIAGNOSTYKA I MONITOROWANIE PRACY MIKROPROCESOROWO STEROWANEGO BLOKU ZASILANIA WZBUDZENIA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

W artykule przedstawiono blok zasilania wzbudzenia silników synchronicznych z mikroprocesorowym układem sterowania. Omówiono podstawy teoretyczne regulacji mocy biernej za pomocą silnika synchronicznego oraz wpływ obciążenia na dopuszczalny obszar pracy. Przedstawiono możliwości sterowania silnikiem przez system mikroprocesorowy opracowanego urządzenia podczas rozruchu asynchronicznego i pracy synchronicznej. Zaprezentowano możliwości monitorowania i rejestracji stanu pracy napędu pozwalające na analizę sekwencji zdarzeń w przypadku wystąpienia stanów awaryjnych. Przedstawiono dedykowane oprogramowanie diagnostyczno-serwisowe. Omówiono wybrane funkcje diagnostyczne.

KRZYSZTOF KRAUZE ŁUKASZ BOŁOZ TOMASZ WYDRO KAMIL MUCHA

## BADANIA TRWAŁOŚCI NOŻY STYCZNO-OBROTOWYCH WYKONANYCH Z RÓŻNYCH MATERIAŁÓW

W artykule zamieszczono informacje dotyczące noży stycznoobrotowych, które obecnie są najpowszechniej stosowanymi narzędziami urabiającymi. Opisano ich zastosowanie, budowę, sposoby zwiększania ich trwałości oraz problemy występujące podczas ich eksploatacji. Główną częścią artykułu są wyniki badań trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów bądź napawanych lub obrobionych w sposób zwiększający ich trwałość. Do badań wybrano noże wzorcowe, handlowe oraz noże prototypowe. Przedstawiono również specjalne nowoczesne stanowisko laboratoryjne do badania procesu urabiania przez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami, należące do Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie, na którym przedmiotowe badania zostały wykonywane. SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN PIOTR WOJTAS ARTUR KOZŁOWSKI

#### REAL-TIME OPERATIONAL CONTROL IN INFORMATION MANAGEMENT SYSTEM FOR FLASH-BUTT WELDING OF RAILS

Operational control of welding quality is the fundamental element of the entire rail manufacturing process. In practice, realtime systems are used for this purpose. This article features a new method that makes use of fuzzy logic to analyze the data from mechanical tests and from the ultrasound inspection of connections.

SŁAWOMIR CHMIELARZ TOMASZ MOLENDA PIOTR SZYMAŁA WOJCIECH KORSKI

#### CONDITIONS FOR USING DIGITAL ISOLATORS IN INTRINSICALLY SAFE APPLICATIONS

This article highlights the issues related to the use of the galvanic separation of digital circuits by employing modern digital isolators in intrinsically safe applications. The authors refer to the requirements of suitable standards and directives and present their interpretation. They also identified limitations related to the use of digital isolators in intrinsically safe circuits.

SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN PIOTR WOJTAS ARTUR KOZŁOWSKI

#### KONTROLA OPERACYJNA W INFORMACYJNYM SYSTEMIE ZARZĄDZANIA ZGRZEWANIEM DOCZOŁOWYM SZYN REALIZOWANA W CZASIE RZECZYWISTYM

Kontrola operacyjna jakości zgrzewania szyn jest zasadniczym elementem kontroli procesu technologicznego produkcji szyn. W praktyce do tego celu stosowane są systemy działające w czasie rzeczywistym. W artykule zaproponowano nową metodę, która stosuje logikę rozmytą do analizowania danych pochodzących z testów mechanicznych połączeń oraz inspekcji ultradźwiękowej połączeń.

SŁAWOMIR CHMIELARZ TOMASZ MOLENDA PIOTR SZYMAŁA WOJCIECH KORSKI

#### WARUNKI STOSOWANIA IZOLATORÓW CYFROWYCH W APLIKACJACH ISKROBEZPIECZNYCH

Artykuł przedstawia zagadnienia związane z zastosowaniem separacji galwanicznej obwodów cyfrowych realizowanej poprzez zastosowanie nowoczesnych izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych. Odniesiono się do wymagań odpowiednich norm i dyrektyw oraz przedstawiono ich interpretację. Określono ograniczenia związane ze stosowaniem izolatorów cyfrowych w obwodach iskrobezpiecznych.

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.7

JERZY MRÓZ DARIUSZ FELKA ADAM BROJA MARCIN MAŁACHOWSKI

## Devices for measuring ventilation parameters and methane concentration as well as concept of complex monitoring of methane hazard in longwall area

This paper discusses the issue of the methane hazard occurring in the longwall areas of hard coal deep mines along with ways of overcoming this hazard. The authors describe devices for measuring the parameters of the underground environment in the exploitation area. Then, they present the results of tests to determine the methane hazard level in the longwall area. The parameters of ventilation-, absolute-, and criteria-methane-bearing capacity are determined based on online measurements of ventilation and gas parameters. The presented results are the effects of the European project AVENTO (Advanced tools for monitoring ventilation and methane emission).

Key words: monitoring systems, measuring equipment, methane hazard, mine ventilation, coal mines

#### 1. INTRODUCTION

The basic sources of methane emission in mines are longwalls and excavation headings [1]. In order to determine the volume of the methane emitted, various methods have been developed. In the phase of design and exploitation, Polish mines use a method by the GIG Central Mining Institute – Experimental Coal Mine Barbara [2]. The method describes the rules for determining the acceptable content of methane in the excavations of exploited areas.

The online assessment is carried out on the basis of measurements made by methane-concentration monitoring systems and the signaled exceeded threshold (acceptable) values. The assessment depends on the knowledge and activities of the supervisor and does not take into account the impact of important source factors resulting from coal exploitation, ventilation, nor methane drainage. Thus, the supervisor's decisions and automatic shutdowns of energy take place after the hazard actually occurs. All deeper analyses of methane hazard are conducted by ventilation experts with relatively long delays resulting from the applied method of collecting data indispensable for the assessment. During the analysis, the impact of the following factors on methane hazard is discussed: coal breaking, methane streams in ventilation air and methane drainage pipelines, and changes of ventilation parameters (distribution of pressure and air flow in the area). Such analyses are carried out in 24-hour and weekly cycles.

The article features the results of research conducted in the Institute of Innovative Technologies EMAG. The objectives of the research were the following:

- better use of measurement data from the monitoring system in the calculations of ventilation parameters and gas disturbances when measured changes occur,
- checking the possibility of the complex online assessment of ventilation condition and methane hazard in the longwall area on the basis of the calculated criteria as well as the ventilationmethane-bearing and methane-drainage-bearing capacities.

#### 2. CHARACTERISTICS OF MEASURING EQUIPMENT

The systems for monitoring ventilation hazards in hard coal mines carry out measurements in three basic domains [3, 4]:

- methane hazard,
- fire hazard,
- selected parameters of the ventilation network.

The underground environment in the exploitation area is monitored by sensors that measure the following parameters: methane concentration, carbon oxide concentration, oxygen concentration, air flow velocity, temperature, barometric pressure, and other gases not required by regulations. These sensors work in different systems employed in the given mine (e.g., SMP, CST [12]).

The measurement system is composed of the following sensors:

- methane meters of different types that are independent underground measuring devices and connected directly to output circuits of the surface operating center,
- carbon oxide sensors,
- methane meters to be connected with the underground operating center,
- stationary oxygen meters,
- sensors for measuring air temperature and humidity,
- ultrasound stationary anemometers,
- differential pressure sensors for air stoppings and main fans.

In addition, the tests made use of mobile sensors for measuring the following ventilation air parameters:

- methane concentration,
- airflow velocity,
- absolute pressure.

It is particularly important to monitor the longwall areas, where the changes in excavations and rock mass are the fastest. Stationary measurements of methane in the working excavation, measurements of fire hazard, absolute pressure, temperature, humidity, and differential pressure will allow us to monitor online the measured quantities, calculate derivative parameters (such as methane bearing capacity), and react quickly to the hazard.

## 2.1. Sensors and devices for measuring ventilation parameters and methane concentration used in coal mines

Below, we present devices for measuring the ventilation parameters that are most-frequently used in Polish mines [12, 13]. We did not take into account devices for fire detection and air-quality measuring devices, such as oxygen meters, carbon oxide sensors, carbon dioxide sensors, or other gases (excluding methane measuring sensors).

- Sensors for measuring air temperature and humidity:

   Humidity measurement:
  - CW-1 humidity sensor, made by EMAG, powered from an underground station, humidity measurement rescaled to a voltage output of 0.4–2.0 V.
  - Temperature measurement:
    - CTG-2 rock mass temperature sensor, made by EMAG, powered from an underground station, temperature measurement rescaled to a voltage output of 0.4–2.0 V.
  - Humidity and temperature measurement:
    - DHT sensor for measuring humidity, temperature, and pressure with digital data transmission, made by EMAG-SERWIS,
    - CSHT-1 humidity and temperature sensor, made by Haso, co-operating mainly with a CST-40(A) telemetric switchboard in the range of data transmission,
    - CSHT-2 humidity and temperature sensor, made by Haso, co-operating with a CST-40(A) telemetric switchboard through an analogue CSA-1 switchboard,
    - SC-PS system sensors for the online measurement of temperature, air humidity, and absolute pressure, made by Carboautomatyka. These can work in three transmission standards: with a digital FSK signal, a voltage signal of 0.4–2 V or 1–5 V, and a frequency coded signal of 5–12 kHz,
    - TH intrinsically safe temperature and humidity sensor, made by Sevitel, with digital transmission through a KTM-1 converter,
    - MIC6410x relative humidity sensor with temperature measurement, made by Micon.

#### 2. Stationary anemometers:

- TX5922 stationary anemometer an ultrasound sensor for measuring airflow velocity, made by Trolex; it works on the principle of a vortex in a range of 0.5–30 m/s; distributed in Poland by Micon,
- AS-2 (AS-3) stationary anemometer, made by EMAG, powered from an underground station; it measures air velocity in a range of 0–15 m/s; rescaled to a voltage output of 0.4–2.0 V or current signal of 4–20 mA,

- AS-3ES anemometer for the online measurement of airflow velocity, powered by direct voltage of an intrinsically safe power supply device; it generates an output signal in the voltage standard; made by EMAG-SERWIS,
- AS-4ES anemometer for the online measurement of airflow velocity, powered from a surface station by means of a telephone line along which data transmission is conducted, made by EMAG-SERWIS,
- CSV-5 stationary anemometer for measuring air velocity and determining airflow direction by means of a thermal converter; it also measures air temperature and humidity; made by Haso,
- SAS-5 (SAT-1) stationary vane anemometer for the online measurement of airflow velocity, made by the Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences, frequency or voltage transmission in co-operation with an underground station,
- MPP stationary vane anemometer for the online measurement of airflow velocity, made by the Strata Mechanics Research Institute of the Polish Academy of Sciences, distributed by Carboautomatyka; it also measures ambient temperature.
- 3. Sensors for measuring underground atmospheric pressure:
  - BM-2 stationary intrinsically safe microprocessor barometer, made by EMAG, designed to co-operate with a surface central station, equipped with a backup battery,
  - THP-1 stationary sensor of air physical parameters, made by EMAG, designed to cooperate with a surface central station, equipped with a backup battery,
  - THP-2 stationary sensor of air physical parameters, made by EMAG-SERWIS on EMAG's license; it conducts precise measurements of absolute pressure, air temperature, and humidity,
  - DPT sensor, made by EMAG-SERWIS, for the online monitoring of air relative humidity, temperature, and pressure, powered from a surface station by means of a telephone line,
  - CSPA-2 sensor for measuring atmospheric pressure, humidity, and temperature, made by Haso, designed to measure absolute pressure, relative humidity, and temperature; it can cooperate with a CST-40(A) telemetric central switchboard through a CSA-1 or CSA-2 analogue switchboard; the sensor is powered by a 12 V intrinsically safe source.

- 4. Sensors for measuring differential pressure:
  - CRC-4 (CRC-5, CRC-6) differential pressure sensor, made by EMAG, powered from an underground station, differential pressure measurement is rescaled to a voltage output of 0.4–2.0 V or adapted to frequency transmission,
  - Differential pressure meter MRC0250 to MRC7500, made by EMAG, powered from an underground station; differential pressure measurement is rescaled to a voltage output of 0.4–2.0 V,
  - DRC differential pressure sensor, made by EMAG-SERWIS, designed for the online monitoring of differential pressure in mines, powered from a surface station by means of a telephone line,
  - MIC1303 bi-stable differential pressure sensor, made by Micon, designed to monitor differential pressure between two measurement points,
  - SC-RC system sensors for the online measurement of differential pressure, made by Carboautomatyka; they can work in three transmission standards: with a digital signal FSK, a voltage signal of 0.4–2 V or 1–5 V, and a frequency coded signal of 5–12 kHz.
- 5. Stationary methane meters for online measurements:
  - Sensor of CMM-1 microprocessor methane meter, made by EMAG,
  - MM-1/V1 (MM-2) microprocessor methane meter, made by EMAG,
  - Sensor of CMW-1 high-concentration methane meter, made by EMAG,
  - TX3261, TX6321, and MIC6321 methane meters, made by Micon,
  - IMS-1 intrinsically safe stationary methane meter, made by Sevitel,
  - CSM-1 methane meter, version R, for measuring methane content in methane drainage pipelines in hard coal mines, made by Haso,
  - CSM-3i (CSM-3m) infrared sensor of methane concentration, made by Haso,
  - CSM-1 (CSM-3) pellistor methane concentration sensor, made by Haso,
  - SC-CH4/n, SC-CH4/s, and SC-CH4/IR system sensors for the online measurement of methane concentration in the air, made by Carboautomatyka,
  - SC-CH4/W +CWx-3 system sensor for the online measurement of methane concentration in methane drainage pipelines, made by Carboautomatyka.

- 6. Manual methane meters:
  - MPS-1R mobile signaling gas concentration sensor, made by Haso,
  - PMM-1 mobile methane meter, made by Sevitel.

The authors realize that they were not able to list all of the devices available on the market. The devices listed above for measuring ventilation parameters and methane concentration are most often used in the Polish hard coal mining industry.

#### 3. TESTS IN THE LONGWALL AREAS

## 3.1. Measuring devices used for tests in the mine

#### 3.1.1. MM-4 methane meter

The measurement of methane concentration was conducted by a standard device adapted in the majority of Polish hard coal mines. The MM-4 device (Fig. 1) has good metrological characteristics and a short response time. MM-4 makes use of the standard and most-common principle of methane concentration measurement based on thermal-catalytic converters called pellistors.



Fig. 1. MM-4 methane meter used for tests

#### 3.1.2. Stationary anemometer

The AS-3 anemometer (Fig. 2) has been designed for the online measurement of airflow velocity in headings, tunnels, and corridors. It cooperates with underground switchboards. It was developed in two versions:

- AS-3n with a voltage output,
- AS-3c with a current output.

Temporarily, the ultrasound method has been used to measure velocity. The AS-3 anemometer can be used on an *ad hoc* basis as a mobile device. It is powered from an intrinsically safe battery supply.



Fig. 2. AS-3 stationary anemometer

#### 3.1.3. THP-2 air physical parameters sensor

The THP-2 stationary air physical parameters sensor (Fig. 3) conducts precise measurements of absolute pressure, temperature, and air humidity. The structure of the sensor is based on a small-size, high-precision SETRA 278 converter and a semiconductor temperature and humidity detector with a digital output. The software of the sensor enables the multi-point correction of converting characteristic and cooperation with a surface station in a methane- and fire-protection system.

The THP-2 physical air parameter sensor has very good qualitative and quantitative metrological parameters. Based on its readings, it is possible to determine aerodynamic potential values.



Fig. 3. THP-2 air physical parameter sensor

## 3.1.4. Device for measuring methane drainage parameters

The ZCO integrated methane drainage sensor (Fig. 4) has been designed to measure the volume of the drained methane [9]. The sensor is installed next to the methane



Fig. 4. ZCO Integrated methane drainage sensor

drainage pipeline, and the medium is provided to the measurement chamber by pneumatic drains. The sensor measures the physical parameters (pressure, differential pressure on the measuring orifice, temperature) and concentration of methane in the pipeline. The sensor is manufactured in two versions: one for the SMP-NT system and the other for an independent system with transmission in compliance with the RS-485 interface and a separate intrinsically safe power supply.

Based on online measurements, the sensor software determines the volume of pure methane in the pipeline using one of the two implemented methods: the simplified or iterative methods. The methane volume-stream is calculated with respect to normal conditions ( $P_0 = 1013.25$  hPa,  $T_0 = 0$ °C).

#### 3.2. Longwall used for tests

In order to obtain data for the current analyses, there were some tests conducted in the excavations of the N-2 longwall in the Pniowek hard coal mine [10]. This is a longwall with high methane content (where methane drainage is carried out as well). N-2 is ventilated according to the Y-type ventilation system by means of a main fresh air stream coming along the N-2 heading and the auxiliary (refreshing) stream provided to the longwall exit along the N-3 heading.

The major objective of the tests carried out in the longwall area was to assess the possibility of applying:

- quantitative measurements for air and methane flow,
- a method of criteria-methane-bearing capacity to assess online the state of ventilation and methane hazard in the longwall area.

Article [14] presents the results of tests related to the calculations of the ventilation network during airflow changes, simulation of methane distribution from the place of raised methane concentration, and determination of methane-bearing capacity indicators in the longwall area.

In order to determine the values of parameters in each particular heading, the following devices were used: anemometers (heading N-2, heading N-3, rise gallery N-3, drift N-12a), methane meters (heading N-2, heading N-3, rise gallery N-3), pressure and differential pressure sensors (inclined drift N-1, heading N-3, heading N-4, heading N-4a, rise gallery N-3). Additionally, there was a sensor installed in the N-3 heading on the methane drainage pipeline for the online calculation of the values of a pure methane volumestream. The tests were conducted both with the use of extra sensors (methane, pressure) connected to the system and manual sensors. The distribution of sensors and measuring devices was performed in compliance with the regulations followed by the mine see Figure 5.

The test plan was as follows:

- installing measurement sensors at selected points of the longwall area,
- performing a passive experiment (observation and registration of parameters during normal operations of the longwall) and an active one (closing the T1 dam and opening it after several minutes),
- conducting measurements by manual and automatic velocity sensors working in the monitoring system.



Fig. 5. Distribution of sensors in the N-2 longwall area

#### 4. TESTS RESULTS ANALYSIS

#### 4.1. Ventilation-, absoluteand criteria-methane-bearing capacity

GIG's manual [2] describes the rules of longwall management under the condition of methane hazard. Methane-bearing capacity is the quantity that describes the methane hazard in a longwall area. It is calculated on the basis of manually measured values of methane concentration and airflow velocity (air volume streams). The measurements are conducted periodically by the mine personnel. In order to characterize methanebearing capacity in the longwall area, it is necessary to define the following terms:

- ventilation-methane-bearing capacity the balance of pure methane output for the area, the difference between the methane measured in the used air stream and the methane contained in the fresh air stream,
- absolute-methane-bearing capacity the total amount of methane emitted to the excavation (ventilation-methane-bearing capacity) and the methane drainage value,
- criteria-methane-bearing capacity maximum absolute-methane-bearing capacity at which the permissible methane concentration values in the used air stream are not exceeded.

Criteria-methane-bearing capacity allows for a complete assessment of the methane hazard in a longwall area based on measurements of the volume of methane coming to the longwall with inflow air (main and refreshing), the volume of methane coming from the longwall area with ventilation air, and the volume of methane drained away by the methane drainage system. The value of criteria-methane-bearing capacity is determined for longwalls classified in methane hazard categories II, III, or IV. For projected longwalls, the values of methane-bearing capacity refer to the predicted absolute methane-bearing capacity, while for the currently exploited longwalls – to the absolute-methanebearing capacity calculated on the basis of direct measurements.

The value of the criteria-methane-bearing capacity can be a condition to use methane drainage or other preventive measures that reduce the concentration of methane in the longwall area (e.g., air ducts) in the case of when the calculated value of criteria-methane-bearing capacity is smaller than the predicted or the real methane-bearing capacity occurring in the longwall area during exploitation.

The methane volume stream is calculated according to the following formula [2]:

$$V = \frac{C_m \cdot V_{PW}}{100} \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \tag{1}$$

The criteria value of the absolute-methane-bearing capacity  $V_{KR}$  without a refreshing the air current is:

$$V_{KR} = \frac{C_m \cdot V_s \cdot k}{100 \cdot n} - V_D \quad \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \tag{2}$$

For longwalls with refreshing air currents, the value of the criteria-methane-bearing capacity is calculated from the following dependency:

$$V_{KR} = \frac{C_m \cdot V_s \cdot k}{100 \cdot n} + \frac{V_p \left(\frac{C_m}{n} - C_p\right)}{100 - \frac{C_m}{n}} - V_D \quad \left[\frac{m^3}{\min}\right] (3)$$

In the case of the methane drainage process conducted in the longwall area, the calculated value of methanebearing capacity  $V_{KR}$  should be substituted to the following dependency:

$$V_{KR-O} = \frac{100 \cdot V_{KR}}{100 - E} \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \tag{4}$$

where the value of methane drainage E is determined from the following formula:

$$E = \frac{100 \cdot V_O}{V_O + V_W} \quad [\%] \tag{5}$$

Symbols in the formulas (1)–(5) above stand for the following:

- $C_m$  admissible methane content [%],
- $C_p$  methane concentration in refreshing air current [%],
- $V_P$  volume stream of refreshing air current [m<sup>3</sup>/min],
- $V_s$  air volume stream in the longwall [m<sup>3</sup>/min],
- $V_D$  methane volume stream coming to the longwall [m<sup>3</sup>/min],
- $V_O$  volume of methane drained away by the drainage process [m<sup>3</sup>/min],
- $V_W$  volume of methane emitted to the excavations [m<sup>3</sup>/min],
- $V_{PW}$  air volume stream in the excavation [m<sup>3</sup>/min],
  - *k* irregularity coefficient of air distribution in the longwall,
  - n irregularity coefficient of methane emission.

#### 4.2. Calculating ventilation parameters

Ventilation calculations were performed by the AERO2014 program [6, 15] developed by the Silesian University of Technology and the IFK company. The application is responsible for the management and balance of air distribution in the mine ventilation network. This enables the modeling of changes, creation of simulations, and documentation of network parameters. It cooperates with spatial and canonical schemes of the mine in the AutoCAD environment.

The AERO2014 program calculates air volume streams based on the values of aero-dynamical resistance of side roads entered to a numerical model. The calculations are based on the Cross method [11], which makes use of the iterative method of successive approximations to the calculation of the set air distribution in networks made of multiple meshes.

The computing program is composed of two modules:

- Module of Standard Data Input (AERO2014),
- Graphical module based on an AutoCAD application.

The AERO2014 window is divided into three tabs:

- nodes data about nodes within the mine structure,
- fans fan operating parameters, where each parameter has its editable characteristics; in addition, polynomial coefficients of the device's characteristics are calculated,
- side roads mathematical model of the mine ventilation network, describing the structure of ventilation connections between particular nodes.

The AERO2014 program enables operations in the supervision mode. Thus, it is possible to calculate the parameters of the ventilation network based on the readings of the measurement sensors. To achieve this, the following measurement devices are defined within the mine structure (along with their locations): pressure sensors [7] placed in nodes and air flow velocity sensors in side roads. Additionally, it is possible to define the gas sensors (e.g., methane meters). In order to perform the calculations, it is necessary to have a cross section of the side road at the place where the measurement is taken. A sample list of sensors entered to the AERO2014 program can be seen in Figure 6.

Wczytai z	ld	Oznaczenie Zefir	Nazwa czujnika	Тур	Zakres	Jednostka	Lokalizacja
	1		Nr kop.				Chod. N-2
	2	AS072	Nr kop.	AS	10	m/s	Chod. N-3
	3	BA13	Nr kop.	P	13000	Pa	Chod. N-2
	4	BA23	Nr kop.	P	13000	Pa	Chodnik N-3 z pochylnią N
Szukaj							

Fig. 6. Configuration window of sensors in the AERO2014 program

After all of the sensors have been defined, a function is invoked that controls the content in an XML file with the readings of previously defined devices. After having detected the file modification, AERO2014 calculates a new resistance value of the given side road as well as the values of air output in the whole mine. The new values are entered into the side road's structure. Thanks to the readings of pressure and air flow velocity values from the monitoring system, it is possible to dynamically calculate the resistance of the given side road and the distribution of air in the whole mine.

In addition, the program indicates emergency and alarm states in the gas sensors and, in the case of fire simulation, takes into account the devices' readings in the performed calculations.

## 4.3. Calculating current air and methane output in the longwall area

The methane-bearing capacity is calculated on the basis of averaged parameter values. However, serious methane hazard occurs when some parameters achieve extreme values (high methane concentration in the ventilation air, insufficient ventilation, and a low methane-drainage value at the same time). Calculating the current methane-bearing capacity, at the assumption that the irregularity coefficient of methane emission n=1 causes a situation where air volume and methane volume streams occur in the formulas.

The current criteria-methane-bearing capacity determines a safe methane volume stream, which develops



Fig. 7. Values of air output calculated on basis of air flows registered by anemometers: a) AS038; b) AS072; c) AS099

during cutting operations at changing conditions of ventilation, methane drainage, and methane content in the air flowing into the longwall. On the other hand, the current absolute-methane-bearing capacity is a total value of the methane volume stream calculated on the basis of measurement data of return air from the longwall and the methane drainage data.

In order to calculate the methane volume stream in the ventilation air of the longwall area, air velocity sensors and methane meters in the N-2 longwall were employed. In the N-2 headway, the AS038 anemometer and MM137 methane meter worked, and in the N-3 headway – the AS099 anemometer. Meanwhile, in the N-3 rise gallery, the measurements were registered by the AS072 anemometer and MM104 methane meter.

Based on the changing values of air flow velocity, air volume streams were calculated in the N-2 longwall area. The following cross sections of particular headings were used for the calculations:

- heading N-2 (anemometer AS038) 8.63 m<sup>2</sup>,
- heading N-3 (anemometer AS099)  $14.45 \text{ m}^2$ ,
- rise gallery N-3 (anemometer AS072 13.66 m<sup>2</sup>.

In addition, the value of coefficient k = 0.85 (determined in [2]) was assumed for the calculations. Figure 7 fea-

tures the determined values of air volume streams based on the registered values of air velocity in the N-2 longwall area.

The obtained average values of the air volume stream were compared with the calculations made by the AERO interface. These values are presented in Table 1.

#### Table 1

Average values of air output from measurements and AERO system as well as the conversion coefficient calculated on the basis of comparison

Name	Measured value of vol- ume stream [m <sup>3</sup> /min]	Value of volume stream calculated by AERO [m <sup>3</sup> /min]	Coeffi- cient	
Heading N-2	1169.85	1314	1.123	
Heading N-3	926.47	1566	1.690	
Rise gallery N-3	1496.45	2880	1.925	

Based on this comparison, conversion coefficients for each measurement stand were estimated. This showed the difference between the calculations made by the program and the real measurements (Tab. 1). Figure 8 features the values of pure methane output in the ventilation air (calculated on the basis of air output values) as well as the conversion coefficients and methane concentration percentage in the N-2 longwall area.



*Fig. 8. Values of pure methane output in ventilation air in: a) heading N-2; b) heading N-3; c) rise gallery N-3* 

#### 4.4. Methane-hazard assessment based on the comparison of methane volume stream in the air and admissible ventilation-methane-bearing capacity

The determined values of the pure methane volume stream allow us to calculate the ventilation-methanebearing capacity in the N-2 longwall area. Figure 9a presents the values of the ventilation-methane-bearing capacity in a given period.

In order to calculate the value of the criteria-methanebearing capacity, the following parameter values were utilized with the use of formula (3) determined in the design of the N-2 longwall [5]:

– admissible methane content  $C_m$  is 2%, while for the refreshing air stream – 1.5%,

- irregularity coefficient k of air distribution in the longwall is 0.85,
- average usable cross section of the longwall is  $10.58 \text{ m}^2$ ,
- irregularity coefficient n of methane distribution is 1.0 due to the online character of measurements and conversions based on the real output of air and methane,
- methane content  $C_p$  in the refreshing current of the air volume stream  $V_s$  in the longwall, refreshing air current volume stream  $V_p$ , and incoming methane volume stream  $V_D$ , converted on the basis of readings registered by measurement devices in the N-2 longwall area.

Due to the fact that methane drainage was applied in the N-2 longwall area, the criteria value of the methanebearing capacity is calculated with respect to the methane drainage process based on formula (4).



Fig. 9. Methane-bearing capacity in N-2 longwall area: a) ventilation methane bearing capacity; b) methane volume stream in methane drainage pipeline; c) absolute-methane-bearing capacity with marked level of criteria-methane-bearing capacity

The measurement of methane output in the methane drainage pipeline is carried out by the ZCO sensor [8] working in the N-3 headway. The value of the output is calculated by iteratively measuring the parameters of the gas mixture according to standard [19] or by applying the following formula:

$$V_{CH_4} = \% CH_4 \cdot 0,011 \cdot a \cdot E \cdot d^2 \sqrt{\frac{P \cdot h}{s \cdot T}} \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \quad (6)$$

where:

0.011 - numerical coefficient,

- a flow coefficient calculated on the basis of the measurement reducer module,
- E gas expansion coefficient,
- d reducer diameter [cm],
- P absolute pressure in the pipeline [mm Hg],
- h pressure drop on the measurement orifice [mm H<sub>2</sub>O],
- T absolute temperature of gas before the reducer [K],
- s relative density of gas [kg/m<sup>3</sup>],

 $%CH_4$  – methane concentration [%].

The measured methane volume stream in the methane drainage pipeline is presented in Figure 9b. In order to calculate the values of the absolute-methane-bearing capacity, the following were totaled: the readings of the ventilation-methane-bearing capacity and of the volume stream of methane drained away by the methane drainage pipelines. Figure 9c features the registered absolutemethane-bearing capacity as well as the marked level of the criteria-methane-bearing capacity with respect to the methane drainage of the N-2 longwall.

#### 5. CONCLUSIONS

The following tests were necessary to assess the methane hazard in the excavation longwall areas:

- measurements of methane concentration and ventilation parameters (pressure and airflow velocity),
- measurements of methane drainage parameters in the collector pipeline coming from the longwall (measured methane concentration, pressure drop on the measurement reducer, absolute pressure, and gas temperature – these parameters allow us to calculate the current pure methane volume stream).

The results of the conducted tests allowed us to determine and calculate the online methane hazard based on the online analysis of ventilation and criteriamethane-bearing capacity as well as the methane drainage efficiency, which makes use of the measurements taken from airflow velocity sensors and methane sensors. In addition, the tests enable us to calculate the methane volume stream from the methane drainage pipeline.

The measurements of airflow velocity for calculating volume streams in the longwall-gallery side roads of the ventilation network were carried out with the use of two methods:

- manual method in compliance with the mining measurement technology (continuous traverse method [4]),
- automatic method in the monitoring system (spot metering with respect to the air velocity distribution coefficient in the cross section of the excavation).

The values of airflow determined by means of different methods were significantly different in some cases. It will be necessary to work out the characteristics for different values of air velocity for typical spots of the ventilation network. Here, it will be very helpful to consult the results of projects conducted by research organizations [16–18].

The tests results are the base s to develop:

- the structure and functions of a monitoring system that would also perform selected ventilation and gas analyses,
- software performing the functions of the analyses.

#### References

- Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J.: Przewietrzanie kopalń, Śląskie Wydawnictwa Techniczne, Katowice 1995.
- [2] Krause E., Łukowicz K.: Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego, Instrukcja nr 17 GIG, Katowice – Mikołów 2004.
- [3] Miśkiewicz K., Wojaczek A., Wojtas P.: Systemy dyspozytorskie kopalń podziemnych i ich integracja. Wybrane problemy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [4] Roszczynialski W., Trutwin W., Wacławik J.: Kopalniane pomiary wentylacyjne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1999.
- [5] Documentation of longwall N-2 in seam 404/2 in Pniówek hard coal mine, Pawłowice 2013.
- [6] *AERO2014*: Information materials by IFK (Informatyczna Firma Konsultingowa).
- [7] Broja A., Felka D., Mróz J., Skierś P.: Badania czujników ciśnienia powietrza dla celu ciągłego monitorowania, EMTECH, Szczyrk 2014.

- [8] Broja A., Małachowski M., Felka D.: Monitorowanie parametrów odmetanowania w kontekście ich wpływu na wartości metanowości w rejonie ściany, Materials of EMTECH Conference "Zasilanie, telemetria i automatyka w przemyśle wydobywczym. Innowacyjność i bezpieczeństwo". Zakopane 2015.
- [9] Felka D., Broja A.: Pomiary parametrów do wyliczenia strumienia objętości metanu w rurociągach sieci odmetanowania, in: Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie: monografia, red. nauk. K. Krauze, Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego, Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH, Kraków 2014, pp. 72–82.
- [10] Documentation of European project AVENTO: "Zaawansowane narzędzia do kontroli wentylacji i emisji metanu", Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2014– 2015.
- [11] Cross H.: Analysis of flow in networks of conduits or conductors, "Engineering Experiment Station", Bulletin No. 286, University of Illinois 1936.
- [12] Catalogue cards and websites of the manufacturers of measurement devices and sensors: Instytut EMAG (www.ibemag.pl), SEVITEL sp. z o.o. (www.sevitel.pl), EMAG-SERWIS sp. z o.o. (www.emagserwis.pl), MICON sp. z o.o. (www.micon.pl), CARBOAUTOMATYKA S.A. (www.carbo.com.pl), HASO S.C. (haso.pl).
- [13] Cierpisz S., Miśkiewicz K., Wojaczek A.: Systemy gazometryczne w górnictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [14] Krzystanek Z., Mróz J., Trenczek S.: Zintegrowany system monitorowania i analizy zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2016, 1: 64–76.

- [15] Knapczyk J., Musioł D.: Wykorzystanie systemu Aero do podniesienia bezpieczeństwa w wyrobiskach górniczych poprzez monitoring wentylacyjny, in: Narzędzia informatyczne wspomagające prognozowanie i monitoring oraz szkolenia w zakresie zagrożeń występujących w kopalniach – teoria i praktyka, red. D. Musioł, P. Pierzyna, Instytut Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [16] Dziurzyński W., Wasilewski S.: Ocena zagrożenia metanowego w rejonie ściany na podstawie czujników gazometrii oraz symulacji komputerowej przepływu mieszaniny powietrza i metanu, "Przegląd Górniczy" 2012, 12: 28–34.
- [17] Wasilewski S.: Kontrola prędkości powietrza w wyrobiskach kopalni w systemach nadzoru dyspozytorskiego, "Przegląd Górniczy" 2013, 7: 1–13.
- [18] Wasilewski S.: Monitorowanie zakłóceń parametrów powietrza w systemach dyspozytorskiego nadzoru powstałych w wyniku krótkiego spięcia, "Przegląd Górniczy" 2015, 11: 33–43.
- [19] PN-EN ISO 5167-1:2005: Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Część 1: Zasady i wymagania ogólne.
  - JERZY MRÓZ, Ph.D., Eng. DARIUSZ FELKA, M.Sc., Eng. ADAM BROJA, M.Sc., Eng. MARCIN MAŁACHOWSKI, Ph.D., Eng. Institute of Innovative Technologies EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, Poland {J.Mroz, D.Felka, A.Broja, M.Malachowski}@ibemag.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.19

#### MARIAN HYLA

## Diagnostics and monitoring of microprocessor-controlled excitation power supply unit for synchronous motors

This article presents a excitation power supply unit for synchronous motors with a microprocessor control system. The theoretical basics of reactive power regulation with a synchronous motor and influence of load on the permissible operating range are discussed. The possibilities of controlling the motor by a microprocessor system in the developed device during asynchronous start-up and synchronous operation are presented. The ability to monitor and record the status of the drive, which allows us to analyze the sequence of events in case of emergencies, is also presented. Dedicated software for diagnostic and service operation is demonstrated. The selected diagnostic functionality is also discussed.

Key words: synchronous motor, excitation current control, reactive power controller, microprocessor control, remote control, monitoring

#### 1. INTRODUCTION

Large-power synchronous motors are used in industry to drive machines that do not require speed control. Typical applications are the main fan drives for ventilating the underground part of mines, compressors, and the converter drives of Ward Leonard motor control systems (which can still be found in some industrial applications).

One of the basic operational issues is the start-up process of the motor. For salient-pole synchronous motors, the direct asynchronous start-up or reactor start-up procedure is customarily realized. The startup procedure requires the proper sequence of actions according to the current state of the drive [3, 5, 9, 13, 21, 22]. An unsuccessful start-up can lead to fixing a motor work at sub-synchronous speed, long-term operation with current greater than the rated value, electromagnetic torque pulsation, and speed oscillation resulting in significant mechanical overload on the motor shaft and early wear of the bearings. After an unsuccessful start-up, another attempt to start the motor is possible after the motor shaft has stopped. Drives with a high factor of inertia could have time to wind down for up to several dozens of minutes. The inrush currents repeatedly exceed the rated values, resulting in the significant heating of the motor winding. For this reason, the number of start-up attempts within a specified time period should be limited.

Under-loaded synchronous motors are often used as adjustable reactive power compensators for the fundamental harmonic – locally and in systems with superior reactive power controllers [4, 6, 11, 12]. Reactive power regulation is achieved by changing the current in the field winding during synchronous operation [1, 8]. Synchronous operation is possible only within a limited range of the load angle. After exceeding the permissible load angle, the motor falls out of synchronism [2, 12, 18] and should be placed in emergency shutdown.

Active power P taken by the motor during synchronous operation is described by the following equation [2, 18]:

$$P = m \left( \frac{U_f E_w}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} U_f^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\vartheta) \right) (1)$$

where:

- m number of phases,
- $U_f$  phase-to-phase voltage;
- $X_d$  d-axis reactance,
- $X_q$  q-axis reactance,

$$\vartheta$$
 – load angle,

 $E_w$  – electromotive force induced in the winding of the stator.

Assuming the linearity of the magnetization characteristics, the electromotive force induced in the field winding is dependent on the excitation current and expressed by the following equation:

$$E_w = \frac{I_w}{k_w} \tag{2}$$

where:

- $I_w$  excitation current,
- $k_w$  constant value connected with the motor structure.

From Equations (1) and (2), it follows that the load angle of the motor is influenced by the value of active power (proportional to the load torque), value of the supply voltage, and value of the excitation current.

The currents in the *d* and *q* axes depend on load angle  $\vartheta$  and electromotive force  $E_w$ , which is related to the field current according to the following equations:

$$I_d = \frac{E_w - U_f \cos \vartheta}{X_d} \tag{3}$$

$$I_q = \frac{U_f \sin \vartheta}{X_q} \tag{4}$$

Stator current *I* of the machine can be determined from dependence

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \tag{5}$$

where active current  $I_P$  has value

$$I_P = \frac{P}{3U_f} \tag{6}$$

Reactive power Q of the motor can be written as

$$Q = \begin{cases} -3U_f \sqrt{I^2 - I_P^2} & \text{dla } \vartheta < \vartheta_0, \\ \\ 3U_f \sqrt{I^2 - I_P^2} & \text{dla } \vartheta \ge \vartheta_0, \end{cases}$$
(7)

where  $\vartheta_0$  – load angle while working with  $\cos \varphi = 1$ , assuming that the positive value of the reactive power means consumption of inductive power by the motor and the negative value means the return of inductive power to the grid (consumption of the capacitive reactive power). Figure 1 shows the typical characteristics of reactive power depending on the field current with the limitation due to the rated field current value.



Fig. 1. Dependence of reactive power on field current for different values of active power

The follow-up reactive power compensation realized by the synchronous motor can lead to changes in the load angle at an unchanged load torque. Figure 2 shows the typical characteristic of the load angle depending on the field current value.



*Fig. 2. Dependency of load angle on field current for different values of active power* 

As can be seen in Figure 2, it is possible to operate an under-loaded synchronous motor with a load angle greater than the nominal. However, exceeding the limit of static stability leads to its falling out of synchronous state and the switching off the drive by the protection units.

One of the most-commonly used characteristics describing the operation state of the synchronous motor are Mordey's curves (also called V-curves due to their form). These curves can be determined analytically upon the parameters available on the motor rated data plate and the values of the  $X_d$  and  $X_q$  synchronous reactances. Taking the correct values of  $X_d$  and  $X_q$ reactance to the calculation is necessary to properly determine the range of the field current according to the motor active power load, to provide stable operation in the synchronous state. Figure 3 shows the typical forms of Mordey's curves with marks signifying the allowable range of operation in the synchronous motor.



Fig. 3. Mordey's curves with allowable range of motor operation

In order to ensure stable operation in the synchronous state, the field current must be appropriately controlled, taking into account the influence of the load torque, supply voltage value, reactive power set value, and the stator and field current rated values, all the while maintaining the load angle into the allowable range [1, 2, 12, 15, 18].

#### 2. MICROPROCESSOR-CONTROLLED UNIT FOR SYNCHRONOUS MOTOR EXCITATION SUPPLY

Figure 4 shows a block diagram of the microprocessor-controlled excitation power supply unit designed to cooperate with 6 kV large-power synchronous motors with rated field currents up to 400 A [5, 8].

The device includes a thyristor rectifier and transistor switches to turn the start-up resistor on and off, supervised by the microprocessor system. The transistor switches allow for the flow of the bi-directional current induced in the excitation winding during motor start-up. A non-contact excitation circuit improves the reliability and durability of the system.

The software implemented in the microprocessor system allows for autonomous control of motor operation, including:

- start-up [8-10, 21, 22] (also for inrush choke),
- control of the circuit breakers in the 6 kV switching station supplying the motor,
- control of the thyristor rectifier in the excitation circuit,
- control synchronous state operation of the motor with the possibility of maintaining the set value of the field current or reactive power,
- control the field current forcing process,
- technology or emergency switch-off procedure with discharge of the excitation winding energy [10].

In addition, the device can be integrated with a superordinated reactive power compensation system, realizing step-less follow-up reactive power compensation during the synchronous state of motor operation [6].

Using the device to control the main fan drive of the underground ventilation system of mine introduces strict criteria for drive operation. Mining regulations require that, in addition to a working fan in each up-cast shaft, an auxiliary fan that can start working within ten minutes is required [19]. Failure of the main fan and a failed start-up of the auxiliary fan lead to a serious threat to the health and life of the underground crew. An interruption of at least 20 minutes results in stopping work and leading the personnel towards intake ventilation shafts or to ground level [19].



Fig. 4. Diagram of the motor control system: MS – synchronous motor; WT – thyristor exciter;
 μP – microprocessor system; PT – thyristor rectifier; UR – start-up system; W – circuit breaker;
 O – disconnector; WD – choke circuit breaker; DL – inrush choke

Therefore, it is important to determine the proper start-up parameters and limit the range of field current control during synchronous operation of the motor. The monitoring and diagnostics of the operation of the drive (both on-line and with the ability to browse archived data) are useful in case of possible malfunctions.

#### 3. DATA RECORDING AND MONITORING OPERATING STATUS OF THE DEVICE

The microprocessor system of the device records the measurement data of active and reactive power, stator supply voltage, stator current, and field current. Apart from that, it records all status or operating modes changes, changes of switches states in the 6 kV power supply switching station, the realization of additional procedures (e.g., field current forcing in case of supply voltage dips [7, 13]), the occurrence of alarm or emergency events detected by the software algorithms of the microprocessor system or by external protection devices. Recorded information is stored in non-volatile memory and can be used to analyze of the drive operation and possibly diagnose malfunctions. It is also possible to transfer the recorded information

to the external device in real time via the available communication interfaces.

One of the elements of the device's HMI is the LCD display, which allows for monitoring the status of operation of the drive. Current status information, alarm and emergency alerts, and waveforms of the recorded measured values are displayed. Figure 5 shows selected information displayed on the LCD of the device.

The microprocessor-controlled excitation power supply unit is equipped with a set of communication interfaces that cooperate with diagnostic-service software or external supervisor systems. Also available are MODBUS ASCII, and RTU interfaces [17] of RS-485 standard, USB interface [16], and an ethernet interface for TCP/IP communications [20] with user authentication and an IP address filtering system to establish a connection. The ethernet TCP/IP connection is available in client mode or server mode. In addition, an HTTP server [14] has been implemented in the device software for accessing basic information using a web browser with JavaScript support.

Figure 6 shows sample pages created by the HTTP server built into the microprocessor software. The content of the pages is automatically refreshed on a web browser every ten seconds.



Fig. 5. Monitoring of drive operation on the LCD of the device



Fig. 6. Monitoring of drive operation using web browser

#### 4. DIAGNOSTIC SOFTWARE

For a detailed analysis of the operation of the drive with the microprocessor-controller excitation unit, diagnostic and service software has been developed for the Windows system. The software enables the monitoring and controlling of the device via RS-485, USB, or ethernet TCP/IP interfaces.

Figure 7 shows the appearance of the software interface dedicated to diagnostics and servicing.



Fig. 7. Diagnostic and service software

One of the diagnostic functions is the ability to capture the events related to the drive operation, recorded into the non-volatile memory of the microprocessor system. Recording of this type of information into the device and the ability to browse it at any time are useful for analyzing the behavior of the drive in the event of unusual or unforeseen events related to the operation of the drive or the power supply system.

Figure 8 shows an example sequence of events read from the microprocessor system. Diagnostic software allows to view, search, sort, and filter the read information.

Nr	Data	Opis	Iw	(	I		U		
23	2016.04.28 23:03:48	Załączenie wyłącznika pola obejście	0.	A 00	406.	33 A	6.1	9 kV	
24	2016.04.28 23:02:38	Rozruch	0.	A 00	0.00	A	6.4	7 kV	
25	2016.04.28 23:02:38	Załączenie wyłącznika 6 kV	0.00 A		0.00 A		6.4	7 kV	
26	2016.04.28 02:11:08	Wyłączenie dmuchawy		Filtrowania		Chart/Chan		kV	
27	2016.04.28 01:30:01	Gotowość	Ш.	ridowanie		State Stop	D	kV	
28	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie wyłącznika pola obejście	R	Dane	× 1	Forsowanie	~	kV	
29	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie	45	No. and No.	- 1	Awarie		kV	
30	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie wyłącznika 6 kV	28	2.63 A	1	61a		kV	
31	2016.04.23 17:07:15	Koniec alarmu: Zabezpieczenie >> Iw	34	8.95 A	•	Alarmy		kV	
32	2016.04.23 17:07:12	Koniec alarmu: Zabezpieczenie >> I	45	8.42 A	295.	25 A	6.7	D kV	
33	2016.04.23 17:07:11	Alarm: Zabezpieczenie >> I	53	7.37 A	402.	11 A	6.7	7 kV	
34	2016.04.23 17:07:09	Alarm: Zabezpieczenie >> Iw	53	7.89 A	515.	64 A	6.8	4 kV	
35	2016.04.23 17:07:06	Stan synchroniczny	53	7.89 A	559.	93 A	6.8	4 kV	
36	2016.04.23 17:07:03	Forsowanie	0.	A 00	563.	A 60	6.1	B kV	
37	2016.04.23 17:07:01	Załączenie wyłącznika pola obejście	35	.26 A	404.	92 A	6.2	9 kV	
38	2016.04.23 17:05:50	Rozruch	0.	A 00	0.00	A	6.5	4 kV	
39	2016.04.23 17:05:50	Załączenie wyłącznika 6 kV	0.	A 00	0.00	A	6.5	4 kV	
40	2016.04.23 16:38:43	Gotowość	0.	00 A	0.00	A	6.3	RkV	



Diagnostic software enables the reading of the recorded waveforms and synchronization of measurements with the recorded event in a common window. Figure 9 shows the window for analyzing the drive operating condition. A typical waveform of the excitation current in the initial phase of motor start-up is caused by the use of a unidirectional LEM-type current converter and caused by the signal sampling period for the measurement procedure of the microprocessor system.



Fig. 9. Window for analysis of drive operating condition

In the bottom part of the status analysis window (area A), the measurement waveforms from the selected time interval are displayed (with additional information from the event logging system). Placing the mouse cursor in any position of the graph displays the measured values for the indicated time in Area B, a description of the drive operating state in Area C, and active alarms and failures in Area D. Area E of the window allows us to select an event from a list of registered events. Selecting an event from the list automatically scales and moves the graph in Area A to the appropriate time.

The analytical determination of the admissible operation range of the synchronic motor due to the admissible value of the load angle requires knowledge of synchronous reactances  $X_d$  and  $X_q$ . Measurement of Mordey's curves enables the verification of the values accepted for calculation and possible correction of the limit associated with the minimum admissible field current.

Figure 10 shows a diagnostic software window that allows us to plot V-curves based on a series of measurements recorded in the synchronous state of the motor. The software allows us to select the active power range for each of the plotted curves and adjust the number of samples for plotting the values by the moving average.



Fig. 10. Determination of Mordey's curves based on measurements of synchronous operation state

#### 5. SUMMARY

The presented microprocessor-controlled excitation power supply unit for synchronous motors with diagnostic and service software developed in co-operation with the author is one of the most up-to-date examples on the market. The use of this microprocessor-controlled device allows for the automation of the start-up of a synchronous motor, simplicity of operation, and reduction of drive failure. It also allows us to use the device in the automatic redundant systems in case of failure in the basic system.

Built-in communication interfaces allow for remotely controlling and monitoring the drive operation. The possibility of using a synchronous motor with the microprocessor-controller excitation system as an adjustable source of reactive power in a follow-up compensation system allows for the simple integration of the device with installed power quality assurance systems.

Diagnostic software with the ability to record drive operation parameters allows for an in-depth analysis of drive system behavior. Use of the presented software during the technological start-up of the device in the plant allows us to determine and diagnose the start-up parameters [5, 8–10] and the settings of the regulators and limitations parameters, ensuring the proper operation of the drive system.

The several-dozen implementations realized by the JJA Progress company (in co-operation with the author) into large-power synchronous motor drives, mainly mining ventilation fans systems, and the failure-free operation of the devices confirm the effectiveness of the solutions used and the usefulness of the developed diagnostic tools.

#### References

- Al-Hamrani M.M., Von Jouanne A., Wallace A.: Power factor correction in industrial facilities using adaptive excitation control of synchronous machines, Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada 2002: 148–154.
- Bajorek Z.: Teoria maszyn elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.
- [3] Campeanu A., Enache S., Vlad I., Liuba G., Augustinov L., Cautil I.: Simulation of asynchronous operation in high power salient pole synchronous machines, XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille 2012: 1823–1828.
- [4] Colak I., Bayindir R., Bay O.F.: Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor, "Energy Conversion and Management" 2003, 44: 2189–2204.
- [5] Technical and engineering documentation of exciter Progress POWER. ENEL-PC, Gliwice 2011.
- [6] Hyla M.: Automatic compensation of reactive power with a system for monitoring a 6 kV electrical power grid in mine, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 2: 5–10.
- [7] Hyla M.: Impact of voltage dips on the operations of a high-power synchronous motor with a reactive power controller, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2016, 2: 5–13.

- [8] Hyla M.: Power supply unit for the excitation of a synchronous motor with a reactive power regulator, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 1: 17–21.
- Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia, "Przegląd Elektrotechniczny" 2017, 4: 177–184.
- [10] Hyla M.: Wybrane aspekty sterowania tyrystorową wzbudnicą silnika synchronicznego, V Ogólnopolska Konferencja Naukowa Modelowanie i Symulacja MIS-5, Kościelisko 2008, pp. 345–348.
- [11] Igbinovia F.O., Fandi G., Švec J., Müller Z., Tlusty J.: Comparative review of reactive power compensation technologies, 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2015, pp. 2–7.
- [12] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [13] Kay J.A., Paes R.H., Seggewiss J.G., Ellis R.G.: Methods for the control of large medium-voltage motors: application considerations and guidelines, IEEE Transactions on Industry Applications 2000, 36, 6: 1688–1696.
- [14] Krishnamurthy B., Rexford J.: Web protocols and practice: HTTP/1.1, networking protocols, caching, and traffic measurement, Addison-Wesley Professional, Boston 2001.
- [15] Latek W.: Teoria maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1987.
- [16] Mielczarek W.: USB. Uniwersalny interfejs szeregowy, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2005.

- [17] Modicon MODBUS Protocol Reference Guide, Modicon Inc., USA 1993.
- [18] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa 1986.
- [19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach gómiczych (Dz.U. 2002, nr 139, poz. 1169; 2006, nr 124, poz. 863; 2010, nr 126, poz. 855).
- [20] Siyan K.S., Parker T.: TCP/IP. Księga eksperta, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2002.
- [21] Zalas P., Zawilak J.: Łagodzenie oraz skrócenie czasu procesu synchronizacji silników synchronicznych, "Elektrotechnika i Elektronika" 2006, 25, 2: 216–220.
- [22] Zalas P., Zawilak J.: Wpływ układu sterowania prądem wzbudzenia na proces synchronizacji silnika synchronicznego, "Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe" 2006, 75: 83–88.

MARIAN HYLA, Ph.D., Eng. Faculty of Electrical Engineering Silesian University of Technology ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, Poland marian.hyla@polsl.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.26

KRZYSZTOF KRAUZE ŁUKASZ BOŁOZ TOMASZ WYDRO KAMIL MUCHA

### Durability testing of tangential-rotary picks made of different materials

This paper presents information on the current most-widely-used cutting heads; i.e., tangential-rotary picks. It describes their applications, design, methods for improving their durability, as well as problems related to their performance. The main body of the paper deals with the results of the durability testing of tangential-rotary picks made of different materials and hardfaced or machined in ways that lead to an increase in their durability. The picks selected for the tests were standard, commercially-available, and prototypical ones. The paper also presents a state-of-the-art laboratory test stand to research the cutting process or rotation drilling with the use of a single cutting tool or cutting drum (the property of the Department of Mining, Dressing, and Transport Machines of the AGH UST in Krakow).

Key words: mechanical mining, hard rocks, tangential – rotary pick, durability, tools wear, test stand

#### 1. INTRODUCTION

Tunneling excavation and longwall extraction are most frequently performed by means of mechanical mining methods, which involve the direct impact of a cutting tool or an assembly of cutting tools on rock. The most-widely-applied methods in mining operations are milling with longwall shearer loaders and plowing with coal plows, which are performed with the use of cutting tools (shearer picks and plow cutters) [1–3].

Currently, roadheaders, longwall shearer loaders and even vertical shaft mining machines are most commonly using tangential - rotary picks. Due to their increased durability, these picks have almost completely replaced the formerly used solutions; i.e., tangent picks and radial picks. They have had a significant influence on reducing the time necessary for their replacement as well as decreasing wear on the tool holders and cutting heads [3–5].

Tangential-rotary picks (which are fitted in cutting drums of longwall shearer loaders – Fig. 1a) are characterized by their significant body length ( $L_n \ge 80 \text{ mm}$ )

and slenderness. The pick edges of such picks are equipped with sintered carbide inserts with a cone angle of  $2\beta_u \ge 93^\circ$ . Also, the shaft inserted into the tool holder is longer and can be graded. The pick is protected against slipping out of the tool holder by means of different types of pins, rings, and bushings. The picks of roadheaders (Fig. 1b) are mounted in tool holders welded to the cutting head accommodated on the arm of this machine. Compared to the picks used in shearer loaders, they are shorter and less slender, and the carbide inserts used to manufacture their edges have larger cone angles [4–7].

The cutting process performed with tangentialrotary picks requires a tool to have a shape and dimensions enabling the edge that penetrates the rock to a depth of  $g_s$  to achieve proper astatic angles of cutting. What is particularly important is that the pick edge retains a positive angle of application  $\alpha_r$  [1, 8].

A pick mounted in a tool holder is part of the cutting head (Fig. 2); therefore, astatic angles of cutting  $\alpha_r$  and  $\gamma_r$  depend not only on the design parameters of the pick but also on cutting speed  $v_s$  and advance speed  $v_p$ . It can, therefore, be concluded that, for



Fig. 1. Tangential-rotary pick mounted on cutting head of: a) shearer loader; b) roadheader



Fig. 2. Parameters of tool holder setup and tangential-rotary pick adjustment on cutting head [6]

a cutting head having diameter  $D_s$ , cutting speed  $v_s$ , advance speed  $v_p$ , height of the tool holder  $H_u$ , and angle  $\delta_u$ , it is necessary to select a tangential-rotary pick of length  $L_n$  and pick edge angle  $2\beta_u$ . Then, the remaining design parameters will have to assume such values as to guarantee the most-favorable conditions of cutting. [8–10]. Thus, it is essential to choose such a design and kinematic parameters of the pick that the lowest-possible cutting resistances and maximum-possible durability of the pick are obtained as a result [1, 4, 10]. A cutting tool is an element that is in direct contact with the mined rock during extraction works. As a result of the mining process, the tool is subjected to excessive wear in the zone that is the interface between this tool and the extracted material. This leads to changes in the geometrical shape of the tool as well as a loss in its weight. Especially, a change in shape and loss in weight are factors that cause the carbide insert to fall out, which means a loss of cutting capacity. Mechanical damage to a tool resulting from incorrect operation or manufacturing flaws is another problem [3, 4, 10].

The proper choice of design and kinematic parameters along with the pick's manufacture technology and the type of materials used are those factors that condition the proper performance of picks. Thus, to improve the durability of rotary picks, intensive research aimed at the development of optimal materials for both the cutting edges and pick bodies is being carried out.

Currently, the cutting edges are most-commonly made of cemented carbide with cobalt content. However, the edges are made of other materials; e.g., cermet, ceramic sinters, or polycrystalline diamond [5, 7]. A cermet is a cemented carbide with titanium-based hard particles. The name "cermet" combines the words ceramic and metal. Originally, cermets were composites of TiC and nickel. Modern cermets are nickel-free and have a designed structure of titanium carbonitride Ti (C, N) core particles, a second hard phase of (Ti, Nb, W) (C, N) and a W-rich cobalt binder. In the group of ceramic sinters, we can name oxide ceramics are aluminum-oxide-based ( $Al_2O_3$ ) and nitride ceramics primarily containing silicon nitride ( $Si_3N_4$ ). In addition, a polycrystalline diamond (PCD) is a composite of diamond particles sintered together with a metallic binder. Diamond is the hardest and, therefore, the most-abrasion-resistant of all materials. As a cutting tool, it has good wear resistance, but it lacks chemical stability at high temperatures and dissolves easily in iron [5, 7, 11].

Then, a pick of high durability is obtained, assuming that the operational part of the pick protects the carbide insert against falling out at the same time. Therefore, numerous methods for reducing the wear rate of the pick body (and the resulting possibility of losing carbide inserts) are applied [3, 9].

Pick bodies are made of high-impact, high-wearresistant, and high-abrasive-resistant steels that can additionally undergo carburizing and thermal processing [7, 12]. In order to reduce wear, the conical surface of the pick is also protected by means of plating it with an abrasion-resistant layer performed by welding. Another method involves incorporating an additional cemented carbide ring on the heavy-duty section of the pick body (Fig. 3) [5, 10]. The abovementioned measures result in an increase in pick durability; however, this fact still needs to be confirmed by laboratory or performance tests.

The measurement of the wear rate of tangentialrotary picks is aimed at determining their durability. The measurements have to be made under identical conditions to make sure that the results are reliable, reproducible, and probabilistic. This will allow for the evaluation of the durability of the pick as well as the comparison of different picks. In industrial conditions, the durability of cutting picks is usually defined as a ratio of the number of replaced picks to the volume of extracted material. Most frequently, it is the number of worn picks necessary to obtain 1000 Mg or 1000  $\text{m}^3$  of extracted material. However, under laboratory conditions, the wear rate (durability) of the pick (or picks) is most-effectively determined on the basis of the loss in its (their) weight in relation to the volume of rock specimen extracted with this pick (these picks) [8–10].

This paper presents the results of research which aim was the above-mentioned measurement of the tangential-rotary picks wear, made of different materials. Standard, commercially available, and prototypical picks were compared. The tests were carried out at a special state-of-the-art laboratory stand for investigating the mining process performed by means of cutting or rotary drilling with single cutting tools and mining machinery units belonging to the Chair of Mining, Dressing and Transport Machines of the AGH in Krakow.

#### 2. SUBJECT OF RESEARCH

The tests were conducted for eight types of tangential-rotary picks made of different materials, all of which had been hardfaced or machined in order to improve their durability. Apart from the standard picks, all of these picks were prototypical ones (Fig. 4). The length of the operational part of all picks was 90 mm, and the edge angle was  $2\beta_u = 90^\circ$ . Seven of these different types were equipped with sintered carbide, while one type was reinforced with a ceramic insert. The tests were performed on the following picks:

 Standard picks, commercially available, with a sintered carbide insert \$\phi22 - 4\$ picks – marked as Commercial 22.



*Fig. 3. Methods for increasing durability of pick body: a) tangential-rotary pick with additional ring made of cemented carbide accommodated on attacking part; b) tangential-rotary pick with hard-faced layer welded on; c) radial pick with hard-faced layer welded on [3, 8]* 



Fig. 4. Selected picks intended for testing: a) Casted 22; b) Gold 25; c) Commercial 22; d) Silver 22; e) Hardfaced 25

- Standard picks, commercially available, with a cemented carbide insert φ25 – 4 picks – marked as Commercial 25 (Fig. 4c).
- Laser hardfaced picks with a sintered carbide insert \$\oplus22\$ (the Commercial 22 picks were used for laser hardfacing) – 4 picks – marked as Hardfaced 22.
- Laser hardfaced picks with a sintered carbide insert φ25 (the Commercial 25 picks were used for laser hardfacing) – 4 picks – marked as Hardfaced 25 (Fig. 4e).
- Titanium-nitride-coated picks with a sintered carbide insert \$\$\phi25\$ (the Commercial 25 picks were used for hardfacing) 4 picks marked as Gold 25 (Fig. 4b).
- Picks with the hardened body with a sintered carbide insert \$\$\phi25\$ (the Commercial 22 picks were used for hardfacing) 4 picks marked as Silver 22 (Fig. 4d).
- Casted picks with a sintered carbide insert \$22 (casted picks, no information on the material used) – 4 picks – marked as Casted 22 (Fig. 4a).
- Casted picks equipped with a ceramic insert instead of cemented carbide (no information on the material used) – 4 picks – marked as Ceramic.

#### 3. RESEARCH PLAN AND METHODOLOGY

To assess the durability of the picks provided for the tests, the wear rate defined as the total loss in weight of the picks in relation to the volume of the extracted material during the cutting test of an artificial rock sample [8, 9]. The assumed definition of the parameter that defines the durability of picks and the

requirements pertaining to testing their wear rate resulted in the approval of the following research plan:

- preparation of a cement-sand sample (cement, sand, aggregates, water) of the specified uniaxial compressive strength (empirically determined),
- preparation of a test disc with proper holders,
- preparation and marking of the picks intended for research and measuring their weight,
- mounting four tangential-rotary picks on the test disc,
- cutting by milling under laboratory conditions at constant advance and cutting speeds,
- dismantling the picks,
- measuring the weight of the picks after the cutting process,
- measuring the volume of the extracted material obtained due to the operation of the tested picks,
- calculating the C2 factor; i.e., the coefficient defining the wear rate of the picks.

The execution of the approved research plan and methodology necessitated defining (or assuming) the following important parameters related to the cutting process performed with the picks in question:

- cutting a cement-sand sample composed of cement, sand, and basaltic aggregate of a uniaxial compressive strength  $R_c = 22.65$  MPa and invariant mass  $\gamma_w = 2.18$  Mg/m<sup>3</sup>,
- advance speed:  $v_{pu} = 0.01 \text{ m/min}$ ,
- number of revolutions of the test disc: n = 42 rpm,
- length of the cut: 120 mm,
- web cut: 152 mm,
- outside diameter of the test disc: \$1863 mm.

Following the measurement of the weight of the picks and the volume of the cut material extracted

with these picks, it is possible to determine the factor characterizing the wear rate of the tested picks. The wear rate of the picks (durability) shall be determined by formula (1):

$$C2 = \frac{\Delta m}{m} \cdot \frac{V_w}{V_u} \quad [-] \tag{1}$$

where:

- C2 wear rate on the basis of weight,
- $\Delta m$  loss in weight during testing (in the body together with the pick edge) [g],
- m weight of the pick prior to testing [g],
- $V_w$  standard volume of the sample [m<sup>3</sup>],
- $V_u$  volume of the cut material obtained from the sample during testing [m<sup>3</sup>].

The standard volume of sample  $V_w$  is assumed arbitrarily. The volume of the sample obtained from cutting during test  $V_u$  is a calculated value and is determined on the basis of the measured web cut, diameter of the cutting head, and length of the cut [8].

The tests of all types of picks are performed in accordance with the approved methodology and research plan. The following should be noted: the lower the value of the C2 parameter, the lower the wear rate of the pick. In this case, it is especially recommended to carry out laboratory tests. Such tests have to be conducted on a specially prepared test stand meeting the requirements of the approved methodology [8].

#### 4. EXECUTION OF RESEARCH

Prior to testing, all of the picks were checked (in order to note any potential flaws), photographed, and weighed. Next, each set of picks underwent testing on the test stand.

#### 4.1. Test stand

Tests were performed on a laboratory test stand for investigating the rock-breaking process by cutting or drilling with single cutting tools or mining machinery units. This is used to perform comprehensive laboratory tests related to the widely-understood rockcutting process. This particular test stand allows us to perform the cutting process with a particular cutting head on an artificial or natural rock sample under laboratory conditions. The test stand consists of three main subassemblies (Fig. 5):

- drive assembly of the cutting head,
- sample mounting and driving assembly,
- measuring and control system.

The drive assembly of the cutting head is placed on a foundation; it is composed of a 250 kW AC induction motor (supply voltage  $3 \times 400$  V; rated speed 1487 rpm) that is DTC controlled and powered by an intermediate frequency inverter. The crankshaft torque is transmitted to the shaft of the cutting tool by means of a mechanical gearbox with a ratio of i = 28. Additionally, a torque-measuring shaft was mounted on the crankshaft. The configuration of the assembly enables the operation of the drive in two ranges: the-so called constant torque control (up to 50 rpm) and constant power control (up to 120 rpm). The drive assembly is equipped with a spline at the end on which the cutting tool is mounted.

A rock sample moves longitudinally and transversely in relation to the cutting tool. The longitudinal and transverse motion of the rock sample is forced by hydraulic cylinders, which allow for achieving a feed speed from 0 to 9.9 m/min, feed force up to 150 kN, longitudinal stroke up to 2.5 m, and transverse stroke up to 1.3 m. The length of the rock sample is 2.5 m, its width is 1.3 m, and its height is 2.5 m.

The test stand makes it possible to investigate cutting heads with a maximum diameter of 2.2 m and a maximum web cut of 1.0 m. The output obtained during the cutting process falls into a hopper moving on guides together with the specimen that is being cut. This solution allows for the uninterrupted disposal of the extracted material (during tests).

The control system and the system of controlling and registering particular values connected with the rock-breaking process are housed in a cab that restricts noise level and pollution. The control system was prepared on the basis of programmable logic controllers (PLCs). Haptic panels and a remote control are used for process visualization and control. The operator is able to change each of the process parameters and preview all of the current values of the registered (measured) quantities. The measuring assembly consists of sensors that allow us to determine the runs of the following:

- longitudinal feed speed,
- transverse feed advance,
- rated speed of the cutting head,
- torque of the cutting resistance,
- longitudinal forces,
- transverse forces.

Additionally, the test stand allows us to measure dust levels during testing and to perform grain-size distribution analyses of the extracted material.



*Fig. 5. Laboratory test stand to research cutting process or rotation drilling with use of single cutting tool or cutting head: a) operator ca; b) cement sample with its mounting and drive assembly and cutting head used for testing; c) drive assembly of cutting head* 

#### 4.2. Test procedure

The tests were conducted for eight sets of picks in accordance with the detailed research plan and approved methodology. Picks on the test disc formed a pick arrangement as shown in Figure 6. The picks were arranged around the perimeter and spaced at 90° intervals. Each set of picks was mounted in tool holders numbered from 1 to 4, which were incorporated on the disc. Figure 7 shows the picks mounted in the tool holders prepared for testing in particular test runs.

In Figure 8, selected picks after the cutting process are presented. Next, the picks were prepared for weight measurements; on the basis of the obtained values, the parameters defining the wear rate of particular types of picks were calculated in accordance with the assumed research plan and methodology.

#### 4.3. Analysis of the test results

The test results were analyzed on the basis of the measured values and given formulae. Then, they were compared in the so-called measurement record sheets. The table (an example of which is shown below - Table 1) is the principal part of the measurement record sheet. The measurement record sheet for each type of pick consists of two pages. The first page contains information pertaining to the researchers, research execution (date, parameters of the sample), tested picks (marking, weight prior to and following the measurements), volume of the cut sample, C2 parameter for each pick, and mean value. On the other page of the measurement record sheet, there are photographs of each pick taken after testing. Three photographs of each pick are taken, each time rotated by  $120^{\circ}$  in relation to the pick axis (Fig. 9).



Fig. 6. Scheme of applied pick arrangement with picks marked [8]



Fig. 7. Examples of tangential-rotary picks prepared for testing



Fig. 8. Selected picks after testing: a) Gold 25; b) Casted 22; c) Hardfaced 25

comparison of the results and entended a parameters for prens marine as commercial and														
	Pick Commerc	k cial 22	Before test	After test, $V_w = 5 \text{ m}^3$										
NT	No. Marking of pick	Marking Producer		Marking Producer	Marking Producer P		Pick weight	Pick weight	Decline	Photographs			<i>V<sub>u</sub></i> [m <sup>3</sup> ]	C2 [-]
No.		marking	<i>m</i> [g]	$m_p$ [g]	of pick weight $\Delta m = m - m_p$ [g]	0°	120°	240°						
1	1	-	1830.14	1809.69	20.45	1-I	1-II	1-III	0.0539	1.036				
2	2	-	1828.49	1795.85	32.64	2-I	2-II	2-III	0.0539	1.655				
3	3	-	1828.80	1792.85	35.95	3-I	3-II	3-III	0.0539	1.822				
4	4	-	1828.40	1793.48	34.92	4-I	4-II	4-III	0.0539	1.771				
The mean value of the parameter C2:								C2:	1.571					

 Table 1

 Comparison of test results and calculated parameters for picks marked as Commercial 22

1-I	2-I	3-I	4-I
Г 1-II	2-II	3-II	4-II
I-III	2-III	3-III	4-III

*Fig. 9. Photographs of pick marked as Commercial 22 after test made-up each time rotated by 120° in relation to pick axis* 

#### 5. DURABILITY ASSESSMENT OF THE TESTED PICKS

Eight cutting tests of the picks were carried out within the framework of wear rate (durability) tests of tangential-rotary picks. As a result of the conducted tests and on the basis of the respective calculations, an analysis of the obtained results was performed. Based on the analysis of the research findings, it can be concluded that the picks marked as Gold 25, Commercial 22, and Commercial 25 exhibited the lowest wear rates.

Below, the observations referring to the particular types of picks are presented:

- Commercial 22 and 25 (factory-manufactured picks) achieved a very good performance result,
- Hardfaced 22 and 25 despite the application of laser hardfacing, they exhibited a result which was slightly inferior to that of the factory-manufactured picks that had been used to produce them,
- Gold 25 achieved the best result, still the titanium nitride coating only slightly increased their abrasion resistance,
- Silver 22 despite the application of a special treatment to the body (the details of this process have not been disclosed), this achieved a result which was slightly inferior to that of the factorymanufactured picks that had been used to produce them,
- Casted 22 casted pick, rolled after molding to meet the desired dimensions; the pick's bodies broke after fitting them with the sintered carbide inserts, and the picks at Stands 2 and 3 were broken off during testing,
- Ceramic casted pick, rolled after molding to meet the desired dimensions, wore down extremely quickly despite the four-times smaller volume of the cut sample; the pick at Stand 2 chipped off, and the pick at Stand 3 broke at the holding part.

#### 6. CONCLUSION

As can be seen from this paper, there are numerous ways to improve the durability and decrease the wear rate of tangential-rotary picks. Currently, the most-commonly-used method that provides the best results is the hardfacing of the operational part with an abrasion-resistant layer. Nevertheless, as the conducted research indicates, it is not always the best solution. Moreover, it can be concluded that even the best protective coating will not serve its function if the pick or its cutting edge is manufactured with low-quality material.

Undoubtedly, further research aimed at improving the durability of picks should be recommended, as it has a significant influence on lowering operating costs and, consequently, prices of the mined raw materials.

#### References

- [1] Krauze K.: Urabianie skał kombajnami ścianowymi, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [2] Krauze K., Klempka R., Mucha K.: Computer aided design of cutting heads, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 4: 22–32.
- [3] Krauze K., Mucha K.: Zwiększenie odporności na zużycie ścierne noży kombajnowych, "Przegląd Górniczy" 2016, 1: 63–67.
- [4] Jonak J.: Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [5] Kotwica K.: Effect of selected working conditions of cutting picks on their wear during the mining of hard rocks, "Quarterly Mechanics and Control" 2010, 29, 3: 110–119.
- [6] Bołoz Ł.: Ocena obciążenia jednoorganowego kombajnu ścianowego na podstawie badań analitycznych [doctoral thesis], Kraków 2012.
- [7] Kotwica K., Gospodarczyk P.: *Hard Rock Mining with use of New Cutting Tools*, "Journal of Mining Sciences" 2003, 39, 4: 387–393.
- [8] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: Parametric factors for the tangential – rotary picks quality assessment, "Archives of Mining Sciences" 2015, 60, 1: 265–281.
- [9] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: Ocena jakości noży stycznoobrotowych na podstawie badań laboratoryjnych, "Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie: monografia 2012", Lędziny 2012.
- [10] Krauze K., Skowronek T., Mucha K.: Influence of the hard faced layer welded on tangential – rotary pick operational part on to its wear rate, "Archives of Mining Sciences" 2016, 61, 4: 779–792.
- [11] Sandvik Coromant: http://www.sandvik.coromant.com (access: 24.04.2017)
- [12] Kotwica K.: The influence of water assistance on the character and degree of wear of cutting tools applied in roadheaders, "Archives of Mining Sciences" 2011, 56, 3: 353–374.

KRZYSZTOF KRAUZE, Prof. ŁUKASZ BOŁOZ, Ph.D., Eng. TOMASZ WYDRO, Ph.D., Eng. KAMIL MUCHA, M.Sc., Eng. Faculty of Mechanical Engineering and Robotics AGH University of Science and Technology al. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland {krauze, boloz, wydro, kmucha}@agh.edu.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.35

SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN PIOTR WOJTAS ARTUR KOZŁOWSKI

## Real-time operational control in information management system for flash-butt welding of rails

Operational control of welding quality is the fundamental element of the entire rail manufacturing process. In practice, real-time systems are used for this purpose. This article features a new method that makes use of fuzzy logic to analyze the data from mechanical tests and from the ultrasound inspection of connections.

Key words: fuzzy logic, welding, operational control

#### 1. INTRODUCTION

Monitoring a product manufacturing process consists of input, operational, and acceptance control. Input control is the control of a product that reaches the consumer and is intended for use in manufacturing. The materials used for a product's manufacture have to be inspected. Operational control is the control of a product or process that is carried out during the execution of certain operations or after their completion. Acceptance inspection is the control of finished products. As a result of acceptance inspection, a decision is made on the product's conformity with the standard and suitability requirements and, ultimately, upon delivery to the consumer. The result of acceptance control is used to identify the shortcomings of the process that were not identified during operational control and to make any necessary changes.

Flash-butt welding is a multi-variable process in which one can distinguish different stages and changes of voltage, current, displacement, velocity, resistance, and energy (Fig. 1). To obtain maximum information on the nature and course of the flash-butt welding process and to study its characteristics, a constant registering of these parameters is performed at the stage of working out the flash-butt welding technology [1]. This information was used by developers to improve the process of welding but did not serve as a normative-document quality assessment. Experimentally, the welding quality dependencies were identified by changes in some welding parameters and the direct influence of these parameters on the structure change of the joint. As a result, information about the variation of any parameters may be used for a quantitative assessment of this impact.



Fig. 1. Recording process of flash-butt welding of rails on K1000 machine.  $U_1$  and  $I_1$  – voltage and welding current at input of welding transformer; L – number of movements of welded parts (melted metal sample value and upset)
The quality of welded joints is determined by the tolerance deviations of the main parameters, which are written in the technical conditions (TC) for welded products (Tab. 1). Thus, it has become possible to carry out operational control of the registration process to compare these parameters in real time for the immediate determination of output parameters of the tolerance specifications and to reduce the probability of producing a low-quality welded whip as a whole [1].

#### Table 1

Tolerances on deviation of basic flash-butt welding parameters on mobile machines such as K900, K920, K922 (P65, UIC60 rails), and on stationary machine K1000 (P50, P65, P75, UIC60 rails)

Welding settings	Parameter values
Upset pressure [MPa]	9–12
Upset speed on idling [mm/s]	not less than 20 / 30
Melting speed [mm/s]	0.065–0.20 / 0.07–0.20
Speed on melting finish [mm/s]	0.7–2.5
Input voltage of the welding transformer [V]:	
<ul> <li>the first and third periods</li> <li>second period</li> </ul>	355–440 250–360
Allowance for melting [mm]	9–18
Allowance for upset [mm]	11.5–17 / 12–18

#### 2. JOINT INSPECTION

Acceptance inspection of welded joints is carried out according to the ultrasonic inspection of joints and mechanical testing of rail samples (periodically during the welding whip) for compliance with the specifications (breaking load on rail foot at least 1400 kN at a deflection of at least 30 mm in accordance with Ukrainian standards and, respectively, 1600 kN and 20 mm in accordance with EU standards). These acceptance tests can also be used to correct the specified tolerances.

The main disadvantage of such a mode of tolerance control is that it does not take into account the following:

- the importance of the influence of individual parameters and their combinations to estimate the quality of the joint,
- the distribution of the process parameters within the tolerance,
- the blurring of the tolerance limits.

Given these, to estimate the quality conditions of weld joint specification (testing the joint breaking force and flexure value), a control algorithm based on fuzzy logic was developed. Due to the complexity of the flashbutt welding process, it was not possible to develop an analytical, statistical, or any other numerical model. The conclusion on the quality of the welded joint with a certain level of probability is based on logical rules that are made up in the study of technological features of flash-butt welding.

Here are some of these [1, 2]:

- The higher the self-regulation, the higher the melting stability.
- The higher the melting stability, the lower the destruction intensity of the welding contacts.
- The lower the short-circuit impedance of welding machine  $Z_{sc}$ , the higher the self-regulation (higher melting stability), and melting voltage  $U_{me}$  may be decreased.

The temperature field in the welded product can be determined by the ratio of the energy released Q and of the melted metal sample value L (Tab. 2).

On the basis of these and similar rules, the "fuzzy" logic quality estimation rules of welded joints were developed.

To account for the blurring of the boundaries of permissible deviations of the parameters, conversion value deviations of the process parameters were used in accordance with the existing specification tolerances to a dimensionless quantity - the degree of compliance of its value according to the parameter specifications in TC. These transformation functions (which may be of different shapes) were presented in the form of a trapezium (Fig. 2). Thus, in the middle of this tolerance  $X_{av} \pm \Delta X$ , where  $X_{av}$  – average value and  $\Delta X = 1/6(X_{max} - X_{min})$ , the membership function of the parameter specifications is equal to 1; then, within the tolerance limits, it decreases linearly to zero. Logical dependencies on the qualitative effect of the parameters of flash-butt welding were constructed on the basis of technology conclusions that take into account both the relative impact on the process and the location of the parameters in the tolerance zone.

Thus, welding quality assessment is carried out by an analysis of the parameters at three stages of the process: 1) melting of metal samples – the formation of a temperature field at the ends of welded products; 2) final stage of metal sample melting – providing a protective environment in the spark gap; and 3) upset – forming compounds in the solid phase. The result is determined by the degree of truth (or reliability) matching options at these stages of the specification tolerances and, consequently, the probability of obtaining a welded joint that corresponds to TC.

# Evaluation of temperature field, depending on reproduction errors of given energy Q and melted metal sample value L; TF – temperature fields (oh – overheating, lh – low heating)

Table 2

TF	Large negative error LSmall negative error L		Normal L	Small positive error L	Large positive error <i>L</i>	
Large negative error $Q$	Bad TF	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	
Small negative error $Q$	Bad <i>TF</i> (oh)	Normal TF	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	
Normal <i>Q</i>	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Normal TF	Bad <i>TF</i> (lh)	Bad <i>TF</i> (lh)	
Small positive error $Q$	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Normal TF	Bad <i>TF</i> (lh)	
Large positive error $Q$	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Bad <i>TF</i> (oh)	Normal TF	



Fig. 2. Fuzzy conversion function of flash-butt welding parameters to control quality of welded joints

Further, these logical expressions have been converted by the known rules to a form that is convenient for implementation on a computer. Apart from clarifying the tolerance, the developed quality control algorithm can be updated according to the results of comparing its evaluation of data acceptance control via the adaptive fuzzy system algorithms and fuzzy neural network [4–7].

#### 3. MANAGEMENT SYSTEM

Information about the process parameters and opinion on their compliance with the requirements of TC (in the form of a protocol on joint welding) constitute the core data of the process. These records are kept at all times during the operations of welded joints in railway lines and include significantly large amounts of information. Along with the product acceptance certificate, this information can be used to detect disturbances that impact the welding process but are not subject to direct measurement methods. Such methods of information processing (the so-called data mining) are used for the detection of previously unknown data, non--trivial, practically useful, and affordable, interpreting the knowledge necessary for decision-making in the various spheres of human activities (Wikipedia: https:// pl.wikipedia.org/wiki/Eksploracja danych).

Using the known methods of statistical data processing on joints collected for specific periods of time on the same machine, a rail welding factory, or industry in general help us optimize the operating conditions of welding machines and production management of the welded rails.

For this purpose, a two-level information management system has been developed by the Paton Electric Welding Institute (Fig. 3) in cooperation with the Institute of Innovative Technologies (EMAG) from Katowice, Poland. On the lower level, the direct digital control system uses the traditional quality control of welded joints for the «instantaneous» response to the occurrence of marriage and prevents its further spread.

Further information about the welded joints is transmitted from the welding machine of the rail welding factories to the upper level – a diagnostic center. This diagnostic center carries out statistical processing of welding rail protocols to detect disturbances that are difficult to control by direct measurements. For example: poor performance of the auxiliary operations of rail preparation before welding; deviation from the physicochemical properties of metal rails; poor technological operation compliance of service personnel; and poor production conditions.

Apart from direct digital control of the welding process, existing local control systems have the following functions:

- welded joint quality forecasting for more-advanced algorithms with the possibility of using qualified professionals in special cases;
- monitoring the technical condition of the welding equipment and developing recommendations and maintenance planning;
- identification and recognition of emergency situations for immediate intervention in the process;
- identification of systematic deviations and trends in the welding process parameters, which may lead to a deterioration in the quality of performance of the welded joints, development of recommendations for adjusting the welding parameters.



Fig. 3. Block diagram of two-level information management system

For the flash-butt welding of rails on stationary and mobile welding machines, the following factors can lead to deviations in the production process and, as a consequence, to a violation of the quality of the welded joints [1, 2]:

- poor performance of auxiliary operations on the rails before welding preparation, such as end preparation, cleaning the surface of the rails, or operations in the field of current supply and treatment of joints after welding – machining the rail surface when deburring;
- deterioration of the technical condition of the welding equipment, such as increasing the welding machine circuit resistance;
- 3) defects in the rail steel-base metal;
- poor adherence to technological operations welder (alignment of rails before welding);
- 5) unsatisfactory conditions of production; for example, undesirable changes of supply voltage;
- 6) an unfavorable combination of process parameters, even when these parameters are within tolerance limits; for example, lowering the supply voltage and increasing the circuit resistance in the welding machine.

In order to identify the described perturbations, welding joint protocol arrays are processed with the use of statistical methods as well as grouped according to relevant characteristics (Tab. 3). During welding, the following information (Fig. 4) is generated in real time:

- 1) Index of the quality of the welded joint (probability of conformity with its requirement specification) is calculated after welding joints on the measured values of welding process parameters  $x_1 \dots x_{12}$  using the control algorithm based on "fuzzy" logic [4–7]. The data on the welding machine number, names of the welder, master engineer, and the team to implement auxiliary operations (preparation of rails before welding and processing of joints after welding) are put in arrays.
- 2) Cracks, lack of fusion, dull spots, etc. are checked according to ultrasonic inspection for each welded joint. This data is recorded in the inspection database. Visually, the machining quality of the welded joint after deburring is also checked. Information about the presence of the above-mentioned defects as well as the possibility of a defective processing interface is immediately available to the welder and foreman. The defective joint is cut. These functions are performed outside the control of the system. Inspection data is entered manually.
- 3) At the beginning, middle, and end of the working day, some specimens of welded rails are tested mechanically. Test data of  $L_{de}$  deflection and breaking force  $F_b$  are compared with predetermined values.

No.	Violation cause of rail flash-butt welding technological process	Parameter identification	Sample size	Parameter arrays	Parameter effects
1	Auxiliary operations to prepare the rail before welding and after processing a welded joint	$Z_{sc}$ , visual data processing after welding the joints	1–2 working days	Watch master name + Welding factory	Methods and equipment
2	Technical condition of welding equipment	$T_w, U_1, U_2, V_{me}, V_f, V_{up}, L_o, L_{up}, Z_{sc}$	1/3–1 month	Machine number	Maintenance, repair
3	Physico-chemical properties of metal rails	$L_{de}, F_b$ , data inspection	Immediately upon detection or 1 working day	Lot number, mark of the rail, machine number	Correction of welding mode
4	Welders' technological operations	$T_w$ , T between the welding, $Z_{sc}$ , delay	Immediately upon detection or 1 working day	Welder's name	Methods (manufacturing instructions)
5	Process control for welding samples and ultrasonic inspection	$L_{de}, F_b$ , ultrasonic inspection data	1 working day	Welder's name, Radiographer's name	Methods and equipment
6	Production conditions	$U_1, U_2, V_{me}, V_f, V_{up}$	1–2 months	Welding factory	Stabilization of $U_{ps}$ or $T_{oil}$
7	Unfavorable combination of process parameters	Fuzzy control and monitoring	Immediately upon detection or 1 working day	Number of whip	Correction of welding mode

 Table 3

 Identifying violation causes of rail flash-butt welding technological process

If the obtained values are lower than specified, additional samples are welded and tested to identify the authenticity of an unacceptable deviation. Upon confirmation of an unacceptable deviation of the process, an adjustment of welding is carried out. The obtained data is used to adjust the model welding quality control.



Fig. 4. Control algorithm of rail welding process. Operations in bold-rimmed boxes are carried out in an automated mode

In the offline mode, the following information is generated:

 To check the technical condition of the welding machine, the data of the same type of rails welded on the same machine is combined into an array of the welding machine technical condition (protocol). The reaction time (and, accordingly, the averaging time) can be significant – from one to several working days. Obviously, emergency repair information is supplied immediately.

To control the production conditions, statistical evaluations of welding on the same type of welding machines and in the same factory are combined in the data array. The stability of the power supply voltage is determined by voltage  $U_1$ ,  $U_2$ . The stability of the hydraulic drive (which is related to the ambient temperature and its effect on the properties of the hydraulic fluid) is determined by velocity  $V_{me}$ ,  $V_f$ ,  $V_{up}$ . The comparison of these estimates at different welding factories can serve as a basis for deciding on the improvement of production conditions.

The averages and RMS of the welding parameters were used in the statistical analysis of the distribution of random values of the welding process parameters. To compare various parameters, these values were further presented in relative units – the so-called accuracy ratios  $K_a$  and reference  $K_r$  [3]:

$$K_a = 6 \cdot S/\delta; \quad K_r = (X_a - X_i)/\delta$$

where:

- $S, X_a$  RMS and average of parameter distribution of the welding process,
  - $\delta$  the tolerance in the setting,
  - $X_o$  the middle of the tolerance or the specified value.

To analyze the variance, it should be considered that some of the monitored parameters (e.g.,  $L_{me}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $P_o$ ,  $T_{upI}$ ) are set directly in the management system, and that errors in their operation are associated with the equipment and (in particular) the control systems.

However, other parameters  $(V_{me}, T_w, V_f, V_{up})$  are set indirectly. Errors of these parameters are related both to the state of the welding equipment and the progress of the process.

As an example, the system will consider the data at a ratio of accuracy of  $K_a$  for 12 welding machines in 4 welding factories with about 30,000 welded joints.

Indirect setting of the parameters (Fig. 6) shows that three machines (10, 11, 12) express a sharp contrast in terms of the welding-time data. These machines belong to welding factories and, of course, have been expected to show a total deviation in the characteristics of this welding businesses. An additional analysis directly in the factory has revealed differences in the applied technologies of preparing the ends of rails welded prior to welding as compared to the other welding companies.

The value of the  $K_a$  ratio for the parameters grouped by welding factories revealed that hydraulic power stations in different welding plants (parameter *Po*) are different as far as their technical conditions are concerned – additional verification of this technical condition is required (Fig. 6).



Fig. 5. The coefficients of accuracy  $K_a$  of parameters  $V_{me}$ ,  $V_f$ ,  $V_{up}$ ,  $T_w$ , grouped by machines



Fig. 6. Coefficients of accuracy parameters  $K_a$ , grouped by welding factory

It is obvious that, in addition to technical issues, the algorithm involves organizational issues of the production of welded tracks and not only must be updated on the experimental operation management system but primarily aligned with the direction of the service track facilities.

#### 4. CONCLUSIONS

The quality control of welded joints is carried out according to the operational control, ultrasonic inspection, and mechanical testing of technological samples. Fuzzy logic is the basis for improving the reliability of operational control as the main means of preventing the connections in a real-time control algorithm. The control algorithm of fuzzy logic is specified according to the mechanical tests of joints and ultrasonic inspection.

A two-level information management system was developed, and a statistical analysis of the results of tolerance control of the quality of the rail joints was performed. The results revealed new opportunities for improving the quality of welded joint stability.

#### References

- [1] Kuchuk-Yatsenko S.I.: Kontaktnaya stykovaya svarkaoplavleniyem, Naukova dumka, Kiyev 1992.
- [2] Gel'man A.S.: Osnovy svarki davleniyem, Mashinostroyeniye, Moskva 1970.
- [3] Pustyl'nik Ye.I.: Statisticheskiye metody analiza iobrabotki nablyudeniy, Nauka, Moskva 1968.
- [4] Kruglov V.V., Dli M.I.: Intellektual'nyye informatsionnyye sistemy: komp'yuternaya podderzhka sistem nechetkoy logiki i nechetkogo vyvoda, Fizmatlit, Moskva 2002.
- [5] Terano T., Asai K., Sueno M.: Applied Fuzzy Systems, AP Professional, London 1994.
- [6] Kosko B.: Fuzzy Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River 1997.

- [7] Wang L.X.: A course in fuzzy systems and control, Prentice-Hall, Upper Saddle River 1997.
- [8] Wojtas P., Kozłowski A.: Innowacyjne rozwiązania CNP EMAG, Sympozjum SEMAG: Elektroenergetyka i automatyka w przemyśle wydobywczym, Szklarska Poręba 2013.

SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, Kazimir Malevich St 11, Kiev, 03680, Ukraine office@paton.kiev.ua

> PIOTR WOJTAS, Ph.D., Eng. KZESO MACHINERY Ltd. of Poland ul. Karoliny 4, 40-186 Katowice, Poland piotr:wojtas@kzeso.pl

ARTUR KOZŁOWSKI, Ph.D., Eng. Institute of Innovative Technologies EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, Poland A.Kozłowski@ibemag.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.43

SŁAWOMIR CHMIELARZ TOMASZ MOLENDA PIOTR SZYMAŁA WOJCIECH KORSKI

# Conditions for using digital isolators in intrinsically safe applications

This article highlights the issues related to the use of the galvanic separation of digital circuits by employing modern digital isolators in intrinsically safe applications. The authors refer to the requirements of suitable standards and directives and present their interpretation. They also identified limitations related to the use of digital isolators in intrinsically safe circuits.

Key words: galvanic separation, digital isolators, intrinsically safe applications

#### 1. INTRODUCTION

Among the components for performing the galvanic separation of digital transmission signals, a new group was launched into the market quite recently (after the year 2000); i.e., components functioning on the basis of capacitive or inductive coupling. Here, an important innovation was integrating the input/output interfaces of typical logical level CMOS together with circuits cooperating with coupling element, and the coupling element itself, in one component package. The crucial advantages of these components are their small size and high operating speed at a relatively low demand for energy (as compared with other galvanic separation methods). Two companies are precursors and leaders in the development of such components: Analog Devices, offering separators in the iCoupler® technology [1] that makes use of inductive coupling; and Texas Instruments - offering separators in the ISO technology [2] that makes use of capacitive coupling. The use of separating components in intrinsically safe applications is conditioned by certain requirements contained in relevant standards. The application of measures allowing us to fulfill these requirements in the case of the described components implies their work in atypical conditions. This results in a partial degradation of their functionality (particularly their maximal work speed), depending on the degree of deviation from nominal conditions [3].

### 2. REQUIREMENTS OF STANDARDS AND DIRECTIVES

The requirements of the following legal acts have to be fulfilled in the case of the solutions of intrinsically safe separators which separate fast intrinsically safe interfaces and operate in areas with explosion hazards:

Directive 2014/34/EU of the European Parliament and of the Council of 26 February 2014 on the harmonization of the laws of the Member States relating to equipment and protective systems intended for use in potentially explosive atmospheres, valid since 20 April 2016.

Standards of explosion-proof design:

- PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03 Explosive atmospheres Part 0: Equipment General requirements [4].
- PN-EN 60079-11:2012 Explosive atmospheres Part 11: Equipment protection by intrinsic safety "[5].
- 3. PN-EN 60079-25:2011 + AC:2014-08 *Explosive* atmospheres – Part 25: Intrinsically safe electrical systems [6].

The basis to use digital isolators in intrinsically safe circuits is Clause 8.9 *Galvanically separating components* of the standard PN-EN 60079-11:2012:

# 8.9.1. General

"An infallible isolating component conforming to the following shall be considered as not being capable of failing to a short-circuit across the infallible separation."

#### and

Clause 8.9.3 Isolating components between separate intrinsically safe circuits

"Isolating components shall be considered to provide infallible separation of separate intrinsically safe circuits if the following conditions are satisfied:

- a) the rating of the device shall be according to 7.1 (with the exceptions given in that clause still being applicable) unless it can be shown that the circuits connected to these terminals cannot invalidate the infallible separation of the device. Protective techniques (such as those indicated in 8.9.2) may be necessary to avoid exceeding the rating of the isolating component;
- b) the device shall comply with the dielectric strength requirements in accordance with 6.3.13. The manufacturer's insulation test voltage for the infallible separation of the component under test shall be not less than the test voltage required by 6.3.13."

An important reference of Clause 8.9.3 is Clause 6.3.13 of the same standard: *Dielectric strength requirement*:

"The insulation between an intrinsically safe circuit and the frame of the electrical equipment or parts which may be earthed shall be capable of complying with the test described in 10.3 at an r.m.s. a.c. test voltage of twice the voltage of the intrinsically safe circuit or 500 V r.m.s. whichever is the greater. When the circuit does not satisfy this requirement, the apparatus shall be marked with the symbol "X" and the documentation shall indicate the necessary information regarding the correct installation. (...)

Where breakdown between separate intrinsically safe circuits could produce an unsafe condition, the insulation between these circuits shall be capable of withstanding an r.m.s. test voltage of 2 U, with a minimum of 500 V r.m.s., where U is the sum of the r.m.s. values of the voltages of the circuits under consideration."

Isolators in the *i*Coupler® and ISO technologies have a high dielectric strength whose values are included in the catalog cards of the isolator's basic versions and are presented in Table 1. The isolators manufactured according to these technologies have a test voltage not less than in the basic versions and fulfill the abovementioned requirements.

Table 1Dielectric strength of isolators [7, 8]

Manufacturer/ Technology	Analog Devices/ <i>i</i> Coupler®	Texas Instruments/ ISO
System	ADuM 1100	ISO 721
Safety and confirmation of compliance	VIORM = = 560 V peak 2500 V rms for 1 minute no breakdowns acc. to UL 1577 Basic insulation 4000 V peak	VIORM = = 560 V peak 2500 V rms for 1 minute no breakdowns acc. to UL 1577 Basic insulation 4000 V peak

It is important to note that, contrary to Clause 8.9.3 (which refers to components isolating different intrinsically safe circuits in Clause 8.9.2), *Isolating components between intrinsically safe and non-intrinsically safe circuits*, states:

"Isolating components shall comply with the following:

a) The requirements of Table 5 shall also apply to the isolating element except that for inside sealed devices;
e.g., opto-couplers, Column 5, 6, and 7 shall not apply. If Table F.1 is applied, Column 2 shall not apply."

Based on the above requirements in the standards, it is possible to use digital isolators for galvanic separation between intrinsically safe circuits.

The validity of the above interpretation of requirements is confirmed by the staff of ATEX-notified entities who positively evaluated documentations of devices applying digital isolators.

#### 3. LIMITATIONS OF ISOLATOR PARAMETERS

The datasheets of digital isolators *i*Coupler® by Analog Devices and ISO by Texas Instruments contain limitations as far as the particular component operations are concerned that condition their proper application:

- 1) power dissipated in the package,
- 2) or supply current of the primary and secondary sides,
- and current in the transmission line of the isolator of the primary and secondary sides,
- 4) supply voltage, input voltage, output voltage.



Fig. 1. Diagram of circuit of four-channel isolator ADuM141 in intrinsically safe application

Figure 1 features a sample system that fulfills the above limitations for the intrinsically safe application for Analog Devices separators (analogical interpretation can be presented for Texas Instruments separators).

In the circuit, there are two alternative ways to limit the dissipated power (supply current) depending on the place of their application by using resistors Rz s1 (Rz s2). The maximal total power dissipated in isolator  $P_{\text{max}}IC(T_a)$  with respect to ambient temperature is:

$$P_{\max}IC(T_a) = P_{\max}s1(T_a) + P_{\max}s2(T_a)$$

where:

 $P_{\max}s1(T_a)$  – power supplied to the isolator from the primary side,

 $P_{\text{max}}s2(T_a)$  – power supplied to the isolator from the secondary side.

On the primary side, the power supplied to the circuit is:

$$P_{\max}s1(T_a) = \frac{Uz^2[DZ(s1)]_{\max}}{4 \cdot Rz(s1)_{\min}} + \sum_{i=n}^{i=1} \frac{Ui_{\max}^2(s1)}{4 \cdot Rch_n(s1)_{\min}}$$

where:

- $Uz[DZ(s1)]_{max}$  maximal supply voltage of the primary side,
  - $Rz(s1)_{min}$  minimal series resistance of the supply of the primary side,
  - $Ui_{max}(s1)$  maximal input voltage on the *n*-th channel of the isolator of the primary side,

$$Rch_n(s1)_{min}$$
 – minimal series resistance of the   
*n*-th channel of the isolator.

Analogically, on the secondary side the power supplied to the circuit is:

$$P_{\max}s2(T_a) = \frac{Uz^2[DZ(s2)]_{\max}}{4 \cdot Rz(s2)_{\min}} + \sum_{i=n}^{i=1} \frac{Ui_{\max}^2(s2)}{4 \cdot Rch_n(s2)_{\min}}$$

where:

- *Uz*[*DZ*(*s*2)]<sub>max</sub> maximal supply voltage of the secondary side,
  - $Rz(s2)_{\min}$  minimal series resistance of the supply of the secondary side,
  - $Ui_{\max}(s2)$  maximal input voltage on the *n*-th channel of the isolator of the secondary side,
- $Rch_n(s2)_{\min}$  minimal series resistance of the *n*-th channel of the isolator of the secondary side.

# 3.1. Limitation of maximal total power dissipated in the isolator package

The maximal total power dissipated in isolator  $P_{\text{max}}IC(T_a)$  with respect to ambient temperature  $(T_a)$  should not exceed (Fig. 2).



Fig. 2. Thermal Derating Curve for RW-16 Wide Body [SOIC\_W] Package, Dependence of Safety Limiting Values with Ambient Temperature per DIN V VDE V 0884-10 based on example of four-channel isolator ADuM14x [9]

For  $T_a \leq 25^{\circ}$ C,

$$P_{\max}IC(T_a) = P_{TPD_{\max}}$$

For  $25^{\circ}$ C <  $T_a \le 150^{\circ}$ C from a linear equation based on the characteristic two points for this case (150°C, 0 W; 25°C, 2.78 W).

$$P_{\max}IC(T_a) = \frac{(P_{TPD_Tj\max} - P_{TPD_max}) \cdot (Ta - Tj_{TPD_max}) + P_{TPD_max} \cdot (Tj_{\max} - Tj_{TPD_max})}{Tj_{\max} - Tj_{TPD_max}}$$

where:

- $P_{TPD_Tjmax}$  maximal power that can be dissipated at maximal temperature of the junction (typically, 0 mW),
  - $P_{TPD_{max}}$  maximal power that can be dissipated at room temperature (typically, 25°C),
    - Ta assumed work temperature,
- $Tj_{TPD\_max}$  maximal temperature of the junction at which the maximal power can be dissipated (typically, 25°C),

 $Tj_{max}$  – maximal temperature of the junction (typically, 150°C).

# 3.2. Limitation of maximal supply current of the primary and secondary side



Fig. 3. Thermal Derating Curve, Dependence of Safety-Limiting Values with Case Temperature per DIN V VDE V 0884-10 based on example of three-channel isolator ADuM130x [10]

Analogically to item 3.1, the value of the supply current of each side is determined from a linear equation based on two characteristic points with respect to ambient temperature. This value is a safe boundary value. The critical value of the package temperature is the temperature of the junction.

# 3.3. Limitation of maximal current in the isolator transmission line of the primary and secondary side

The value of the limited maximal current in the isolator transmission line of the proper side  $(I_{o1}, I_{o2})$  should be referred to the dependence of safety boundary values on temperature.

Parametr	Rating
Storage Temperature (T <sub>ST</sub> )	−65°C to +150°C
Ambient Operating Temperature $(T_A)^1$	–40°C to +105°C
Ambient Operating Temperature $(T_A)^2$	–40°C to +125°C
Supply Voltages $(V_{DD1}, V_{DD2})^3$	-0.5 V to +7.0 V
Input Voltage ( $V_{IA}$ , $V_{IB}$ , $V_{IC}$ , $V_{E1}$ , $V_{E2}$ ) <sup>3, 4</sup>	-0.5 V to V <sub>DDI</sub> +0.5 V
Output Voltage $(V_{OA}, V_{OB}, V_{OC})^{3, 4}$	-0.5 V to V <sub>DDO</sub> +0.5 V
Average Output Current per Pin <sup>5</sup>	
Side 1 ( <i>I</i> <sub>01</sub> )	-23 mA to +23 mA
Side 2 ( <i>I</i> <sub><i>o</i>2</sub> )	–30 mA to +30 mA
Common-Mode Transients <sup>6</sup>	−100 kV/μs to +100 kV/μs

Fig. 4. Sample definitions of safety boundary values  $(I_{ol}, I_{o2})$ ; limitation of current in a transmission line to a safe value based on example of three-channel isolator ADuM130x [10]

The maximal current in the transmission channel of the primary side in isolator  $I_{max}ch_s 1(T_a)$  with respect to ambient temperature  $(T_a)$  should not exceed:

For 
$$T_a \leq 25^{\circ}$$
C,  $I_{max}ch_s 1(T_a) = I_{o1}$ \_max

For  $25^{\circ}$ C <  $T_a \le 150^{\circ}$ C from a linear equation based on two points.

$$I_{\max}ch_s 1(T_a) = \frac{(I_{o1}_{Tj}\max - I_{o1}_{max}) \cdot (Ta - Tj_{o1}_{max}) + I_{o1}_{max} \cdot (Tj_{max} - Tj_{o1}_{max})}{Tj_{max} - Tj_{o1}_{max}}$$

where:

- $I_{o1}$   $T_{i}$  max maximal current that can flow at maximal temperature of the junction (typically, 0 mA),
  - $I_{o1}$  maximal current that can flow at room temperature (typically, 25°C),

Ta – assumed work temperature,

- $Tj_{o1 \text{ max}}$  maximal temperature of the package at which the maximal current can flow (typically, 25°C),
  - $Tj_{max}$  maximal temperature of the junction (typically, 150°C).

Then, it is possible to determine the minimal series resistance on the *n*-th channel  $Rch_n(s1)_{min}$ ; for example, for the primary side (s1):

$$Rch_n(s1)_{\min} = \frac{Ui_{\max}(s1)}{I_{\max}ch_s1(T_a)}$$

where:

 $Ui_{max}(s1)$  – maximal input voltage on the *n*-th channel of the isolator of the primary side,

nel of the isolator.

 $I_{\max}ch_s 1(T_a)$  – maximal current in the *n*-th chan-

Analogical dependencies are relevant for the secondary side of the isolator.

The necessity to use series resistances that limit the current and power in the transmission lines results in functional limitations. These resistances, together with the input capacitancies of the isolators and circuits co-operating with the isolators, create low-pass filters which distort the transmitted signals and limit the maximal speed values or have a negative impact on the time dependencies between the transmitted signals.

# 3.4. Limiting power supply of the isolator sides, limiting input and output voltage

The datasheets of digital isolators define the maximal supply voltage values and maximal voltage values on the transmission lines of each side. In intrinsically safe applications in circuits without input voltage limiters, it is necessary to formally limit the voltage to values below 6.0 V for circuits in the ISO technology and below 7.0 V for circuits in the *i*Coupler® technology. In the case of the power supply in a typical intrinsically safe application, the applied security measures are parallel voltage limiters composed of 5% Zener diodes.

The maximal voltage results from the voltage of the Zener diode (with 5 % tolerance) from the given type series of diodes, which ensures that the values defined in the datasheets are not exceeded. The maximal voltage for the *i*Coupler® technology is 7.0 V in intrinsically safe application Ui = 6.51 V, Uo = 6.51 V.

The maximal supply voltage for the ISO technology is 6.0 V in intrinsically safe application Ui = 5.88 V, Uo = 5.88 V.

The datasheets of digital isolators define the maximal input and output voltage values of each side. These voltages cannot exceed the value established with respect to the supply voltage of the given side of the isolator.

Extra limitation of voltage on the isolator inputs/outputs is not required when only the circuit supplied by the same limiter as the isolator itself is connected to the inputs/outputs of the given side and when it is possible to prove that the input/output voltage will not be greater than the isolator supply voltage in any case. Otherwise, it will be necessary to ensure that the value of the input/ output voltage will not exceed the value defined in the datasheet. This can be done, for example, by using parallel voltage limiters in the form of infallible diodes connected between the input/output lines and the isolator supply in a way that would ensure the infallibility of these connections (Dp s1 diodes of the primary side and Dp s2 diodes of the secondary side in Fig. 1).

Experiences show that it is possible to use diode voltage limiters on input/output lines; however, with a significant limitation of maximal transmission speed as compared to catalog data (to 2 Mbps in the case of circuits made in the *i*Coupler® technology and to 3.675 Mbps in the case of circuits made in the ISO technology). For solutions with diode voltage limiters on transmission lines, the admissible vales of voltage before the limiters will depend on the circuit topology, value of the elements, and parameters of diodes used in the limiters.

#### 4. CONCLUSIONS

In comparison to alternative solutions in the galvanic separation of digital signals, integrated isolators allow to perform the separation at a relatively low demand for energy with respect to the offered transmission speed and the number of separated channels. The use of such isolators in intrinsically safe applications to separate particular intrinsically safe circuits is possible, provided that standard requirements are fulfilled. However, the measures and circuit solutions applied for this purpose partly limit their functionality and separation parameters with respect to catalog definitions. In spite of these disadvantages, integrated isolators are used particularly for local separation of fast interfaces with a high number of transmission lines.

#### References

 Scott W.: iCoupler®, Digital Isolators Protect RS-232, RS-485, and CAN Buses in Industrial, Instrumentation and Computer Applications, "Analog Dialogue" 39–10, October 2005, [online:] http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/

39-10/iCoupler.pdf [access 18.11.2015].

- [2] Kugelstadt T.: Industrial data-acquisition interfaces with digital isolators, "Analog Applications Journal" 3Q 2011 [online:] http://www.ti.com/lit/an/slyt426/slyt426.pdf [access 18.11.2015].
- [3] Chmielarz S., Molenda T.: Modern technologies of galvanic separation of digital signals and their possible applications in intrinsically safe devices, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 3: 59–67.

- [4] PN-EN 60079-0:2013-03 + A11:2014-03: Atmosfery wybuchowe - Część 0: Urządzenia - Podstawowe wymagania.
- [5] PN-EN 60079-11:2012: Atmosfery wybuchowe Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i".
- [6] PN-EN 60079-25:2011 + AC:2014-08: Atmosfery wybuchowe – Część 25: Systemy iskrobezpieczne.
- [7] Analog Devices Inc.: Data Sheet iCoupler Digital Isolator ADuM1100: rev. K 2015, [online:] http://www.analog.com/ media/en/technical-documentation/data-sheets/ADUM1100.pdf [access 18.11.2015].
- [8] Texas Instruments: Data Sheet ISO72x Single Channel High-Speed Digital Isolators ISO721, ISO721M, ISO722, ISO722M SLLS629L – January 2006 – Revised October 2015, [online:] http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso722.pdf [access 18.11.2015].
- [9] Analog Devices Inc.: Data Sheet 3.0 kV RMS / 3.75 kV RMS Quad Digital Isolators ADuM140D/ADuM140E ADuM141D/ ADuM141E/ADuM142D/ADuM142E rev. M 2016, [online:] http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/ data-sheets/ADuM140D\_140E\_141D\_141E\_142D\_142E.pdf [access 29.08.2016].
- [10] Analog Devices Inc.: Data Sheet Triple-Channel Digital Isolators ADuM1300/ADuM1301 rev. K 2015, [online:] http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/ data-sheets/ADuM1300\_1301.pdf [access 18.11.2015].

SŁAWOMIR CHMIELARZ, Ph.D., Eng. TOMASZ MOLENDA, Ph.D., Eng. PIOTR SZYMAŁA, Ph.D., Eng. WOJCIECH KORSKI, Ph.D., Eng. Institute of Innovative Technologies EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice, Poland {S.Chmielarz, T.Molenda, P.Szymala, W.Korski}@ibemag.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.49

JERZY MRÓZ DARIUSZ FELKA ADAM BROJA MARCIN MAŁACHOWSKI

# Urządzenia pomiarowe parametrów wentylacyjnych i stężenia metanu oraz koncepcja kompleksowego monitorowania zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej

W artykule scharakteryzowano zagrożenia metanowe występujące w rejonach ścian wydobywczych kopalń głębinowych węgla kamiennego oraz podstawy ich zwalczania. Scharakteryzowano urządzenia pomiarowe stosowane do pomiaru parametrów środowiska podziemnego w rejonie eksploatacji. Przedstawiono wyniki badań dotyczących wyznaczania poziomu zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej. Wyznaczono parametry metanowości wentylacyjnej, bezwzględnej i kryterialnej na podstawie ciągłych pomiarów parametrów wentylacyjnych i gazowych. Zaprezentowane wyniki badań są efektem realizacji badawczego projektu europejskiego AVENTO (Zaawansowane narzędzia do kontroli wentylacji i emisji metanu).

Słowa kluczowe: systemy monitorowania, urządzenia pomiarowe, zagrożenie metanowe, wentylacja kopalń, kopalnie wegla

### 1. WSTĘP

Podstawowymi źródłami metanu w kopalniach są ściany wydobywcze oraz drążone wyrobiska chodnikowe [1]. W celu określenia ilości wydzielającego się metanu zostały opracowane różnorodne metody. W polskim górnictwie w czasie projektowania i eksploatacji stosowana jest metoda opracowana przez Główny Instytut Górnictwa – Kopalnię Doświadczalną Barbara [2], opisująca zasady określania dopuszczalnej zawartości metanu w wyrobiskach rejonów eksploatacyjnych.

Bieżąca ocena prowadzona jest na podstawie pomiarów dokonywanych przez systemy monitoringu stężeń metanu oraz sygnalizowanych przekroczeń wartości progowych (dopuszczalnych). Zależy ona od wiedzy oraz aktywności dyspozytora i nie uwzględnia wpływu na zagrożenie metanowe istotnych źródłowych czynników wynikających z eksploatacji węgla, przewietrzania oraz odmetanowania. Podjęte przez dyspozytora decyzje oraz wyłączenia automatyczne energii następują więc w momencie, kiedy zagrożenie już powstało. Wszelkie głębsze analizy zagrożenia metanowego opracowane są przez specjalistów wentylacji ze stosunkowo dużym opóźnieniem wynikającym ze sposobu zbierania danych niezbędnych dla oceny. Podczas analizy rozważane są wpływy na zagrożenie metanowe takich czynników, jak urabianie węgla, strumienie metanu w powietrzu wentylacyjnym i rurociągu odmetanowania oraz zmiany parametrów wentylacyjnych (rozkład ciśnień i przepływu powietrza w rejonie). Analizy takie prowadzone są w cyklach dobowych i tygodniowych.

W artykule przedstawiono wyniki prac prowadzonych w Instytucie Technik Innowacyjnych EMAG, których celem było:

 szersze wykorzystanie danych pomiarowych z systemu monitoringu do bieżących obliczeń parametrów wentylacyjnych i zaburzeń gazowych w przypadku występowania zmierzonych zmian,  zbadanie możliwości oceny kompleksowej online stanu wentylacji i zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej na podstawie obliczanych metanowości (kryterialnej, wentylacyjnej i odmetanowania).

# 2. CHARAKTERYSTYKA URZĄDZEŃ POMIAROWYCH

Systemy monitorowania zagrożeń wentylacyjnych w kopalniach węgla kamiennego realizują pomiary w trzech podstawowych dziedzinach [3, 4]:

- zagrożenia metanowego,
- zagrożenia pożarowego,
- wybranych parametrów sieci wentylacyjnej.

Do pomiaru środowiska podziemnego w rejonie eksploatacji używane są następujące czujniki: temperatury, ciśnienia barometrycznego, prędkości przepływu powietrza oraz koncentracji metanu pracujących w systemie stosowanym w danej kopalni (np. SMP, CST [12]).

Czujniki wchodzące w skład systemu pomiarowego to:

- metanomierze różnych typów, które stanowią samodzielne dołowe urządzenia pomiarowe i są podłączone bezpośrednio do obwodów wyjściowych centrali powierzchniowej,
- metanomierze do podłączenia z centralką dołową,
- tlenomierze stacjonarne,
- czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza,
- ultradźwiękowe anemometry stacjonarne,
- czujniki różnicy ciśnień dla tam oraz dla wentylatorów głównych.

W badaniach wykorzystano również przenośne czujniki parametrów powietrza wentylacyjnego:

- prędkości przepływu powietrza,
- ciśnienia bezwzględnego,
- stężenia metanu.

Szczególnie istotne jest monitorowanie rejonów ścian wydobywczych, gdzie zachodzą najszybsze zmiany w wyrobiskach oraz górotworze. Stacjonarne pomiary metanu w wyrobisku roboczym ściany, ciśnienia bezwzględnego, temperatury i wilgotności oraz różnic ciśnień pozwolą na ciągłe monitorowanie mierzonych wielkości oraz obliczania parametrów pochodnych (jak metanowość) i szybkie reagowanie na zagrożenie.

# 2.1. Przegląd czujników i urządzeń pomiarowych parametrów wentylacyjnych i stężenia metanu stosowanych w kopalniach

Poniżej przedstawiono najczęściej stosowane w polskich kopalniach węglowych urządzenia do pomiarów parametrów wentylacyjnych [12, 13]. W wykazie nie brano pod uwagę urządzeń do wykrywania pożarów oraz jakości atmosfery, takich jak: tlenomierze, czujniki tlenku węgla, dwutlenku węgla czy innych gazów, z wyjątkiem pomiaru metanu.

- 1. Czujniki do pomiaru temperatury i wilgotności powietrza.
  - Pomiar wilgotności:
    - czujnik wilgotności CW-1 produkcji EMAG, zasilany ze stacji dołowej, pomiar wilgotności przeskalowany na wyjście napięciowe 0,4–2,0 V.
  - Pomiar temperatury:
    - czujnik temperatury górotworu CTG-2 produkcji EMAG, zasilany ze stacji dołowej, pomiar temperatury przeskalowany na wyjście napięciowe 0,4–2,0 V.
  - Pomiar wilgotności i temperatury:
    - czujnik wilgotności, temperatury i ciśnienia z cyfrową transmisją danych DHT produkcji EMAG-SERWIS,
    - czujnik wilgotności i temperatury CSHT-1 produkcji Haso, współpracujący głównie z centralą telemetryczną typu CST-40(A) w zakresie transmisji i przekazywania danych,
    - czujnik wilgotności i temperatury CSHT-2 produkcji Haso, współpracujący z centralą telemetryczną typu CST-40(A) poprzez centralkę analogową CSA-1,
    - systemowe czujniki typu SC-PS, przeznaczone do ciągłego pomiaru temperatury, wilgotności powietrza i ciśnienia bezwzględnego produkcji Carboautomatyka, posiadają możliwość pracy w trzech standardach transmisji (z sygnałem cyfrowym FSK, napięciowym 0,4–2 V lub 1–5 V, kodowanym częstotliwościowo 5–12 kHz),
    - iskrobezpieczny czujnik temperatury i wilgotności TH produkcji Sevitel z transmisją cyfrową poprzez konwerter KTM-1,
    - czujnik wilgotności względnej MIC6410x wraz z pomiarem temperatury produkcji Micon.
- 2. Anemometry stacjonarne:
  - anemometr stacjonarny TX5922 ultradźwiękowy czujnik prędkości przepływu powietrza firmy TROLEX w zakresie 0,5–30 m/s działający na zasadzie *vortex*, polski dystrybutor firma Micon,

- anemometr stacjonarny AS-2 (AS-3) produkcji EMAG, zasilany ze stacji dołowej, pomiar prędkości powietrza w zakresie 0–15 m/s przeskalowany na wyjście napięciowe 0,4–2,0 V lub sygnał prądowy 4–20 mA,
- anemometr AS-3ES do ciągłego pomiaru prędkości przepływu powietrza, zasilany jest napięciem stałym zasilacza iskrobezpiecznego, generuje sygnał wyjściowy w standardzie napięciowym, produkcji EMAG-SERWIS,
- anemometr AS-4ES do ciągłego pomiaru prędkości przepływu powietrza, zasilany jest ze stacji powierzchniowej za pomocą linii telefonicznej, po której odbywa się transmisja danych, urządzenie produkcji EMAG-SERWIS,
- anemometr CSV-5 jest przyrządem stacjonarnym służącym do pomiaru prędkości i określenia kierunku przepływu powietrza za pomocą przetwornika termicznego, urządzenie dodatkowo mierzy temperaturę i wilgotność powietrza, produkcji Haso,
- stacjonarny anemometr skrzydełkowy SAS-5 (SAT-1) do ciągłego pomiaru prędkości przepływu powietrza, produkcji Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, transmisja częstotliwościowa lub napięciowa do współpracy ze stacją dołową,
- stacjonarny anemometr skrzydełkowy MPP do ciągłego pomiaru prędkości przepływu powietrza, produkcji Instytutu Mechaniki Górotworu PAN, dystrybucja Carboautomatyka, anemometr mierzy także temperaturę otoczenia.
- Czujniki do pomiaru ciśnienia atmosferycznego pod ziemią:
  - stacjonarny iskrobezpieczny barometr mikroprocesorowy BM-2 produkcji EMAG, przeznaczony do współpracy z centralą powierzchniową, posiadający akumulator podtrzymujący działanie urządzenia,
  - stacjonarny czujnik parametrów fizycznych powietrza THP-1 produkcji EMAG, przeznaczony do współpracy z centralą powierzchniową, posiadający akumulator podtrzymujący działanie,
  - stacjonarny czujnik parametrów fizycznych powietrza THP-2 produkcji EMAG-SERWIS na licencji EMAG, dokonuje precyzyjnych pomiarów ciśnienia bezwzględnego, temperatury oraz wilgotności powietrza,
  - czujnik DPT produkcji EMAG-SERWIS, przeznaczony do ciągłego monitorowania wilgotności względnej i temperatury powietrza oraz ciśnienia atmosferycznego, zasilany ze stacji powierzchniowej za pomocą linii telefonicznej,

- czujnik ciśnienia atmosferycznego, wilgotności i temperatury CSPA-2 produkcji Haso, przeznaczony do pomiaru ciśnienia bezwzględnego oraz wilgotności względnej, temperatury, współpracować może z centralą telemetryczną typu CST-40(A) poprzez centralkę analogową CSA-1 lub CSA-2; czujnik zasilany jest ze źródła iskrobezpiecznego o napięciu 12 V.
- 4. Czujniki pomiaru różnicy ciśnień:
  - czujnik różnicy ciśnień CRC-4 (CRC-5, CRC-6) produkcji EMAG, zasilany ze stacji dołowej, pomiar różnicy ciśnień przeskalowany na wyjście napięciowe 0,4–2,0 V lub przystosowany do transmisji częstotliwościowej,
  - miernik różnicy ciśnień MRC0250 do MRC7500 produkcji EMAG, zasilany ze stacji dołowej, pomiar różnicy ciśnień przeskalowany na wyjście napięciowe 0,4–2,0 V,
  - czujnik różnicy ciśnień DRC produkcji EMAG--SERWIS, zaprojektowany do ciągłego monitorowania różnicy ciśnień w kopalniach, zasilany jest ze stacji naziemnej za pomocą linii telefonicznej,
  - dwustanowy czujnik różnicy ciśnień MIC1303 produkcji MICON, służy do kontroli różnicy ciśnień pomiędzy dwoma punktami pomiarowymi,
  - systemowe czujniki typu SC-RC przeznaczone do ciągłego pomiaru różnicy ciśnienia produkcji Carboautomatyka, mają możliwość pracy w trzech standardach transmisji (z sygnałem cyfrowym FSK, napięciowym 0,4–2 V lub 1–5 V, kodowanym częstotliwościowo 5–12 kHz).
- 5. Metanomierze stacjonarne do pomiarów ciągłych:
  - czujnik metanomierza mikroprocesorowego CMM-1 produkcji EMAG,
  - metanomierz mikroprocesorowy MM-1/V1 (MM-2) produkcji EMAG,
  - czujnik metanomierza wysokich stężeń CMW-1 produkcji EMAG,
  - metanomierze serii TX3261, TX6321 i MIC6321 produkcji Micon,
  - iskrobezpieczny metanomierz stacjonarny IMS-1 produkcji Sevitel,
  - metanomierz CSM-1 wersja R do pomiaru zawartości metanu w rurociągach odmetanowania w kopalniach węgla kamiennego produkcji Haso,
  - infraredowy czujnik stężenia metanu CSM-3i (CSM-3m) produkcji Haso,
  - pellistorowy czujnik stężenia metanu CSM-1 (CSM-3) produkcji Haso,
  - systemowe czujniki typu SC-CH4/n, SC-CH4/s, SC-CH4/IR przeznaczone do ciągłego pomiaru stężenia metanu w powietrzu produkcji Carboautomatyka,

- systemowe czujniki typu SC-CH4/W +CWx-3 przeznaczone do ciągłego pomiaru stężenia metanu w rurociągach odmetanowania produkcji Carboautomatyka.
- 6. Metanomierze ręczne:
  - przenośny sygnalizacyjny czujnik stężenia gazu MPS-1R produkcji Haso,
  - metanomierz przenośny PMM-1 produkcji Sevitel.

Autorzy zdają sobie sprawę, że w artykule nie zostały wymienione wszystkie urządzenia dostępne na rynku. Przedstawione urządzenia do pomiaru parametrów wentylacyjnych oraz stężenia metanu są najczęściej stosowane w polskim górnictwie węgla kamiennego.

# 3. BADANIA W REJONIE ŚCIAN WYDOBYWCZYCH

# 3.1. Urządzenia pomiarowe wykorzystane podczas badań w kopalni

#### 3.1.1. Metanomierz MM-4

Do pomiaru metanu wykorzystano standardowe urządzenie pracujące w większości polskich kopalń węgla kamiennego. Przyrząd typu MM-4 (rys. 1) charakteryzuje się dobrymi własnościami metrologicznymi i krótkim czasem odpowiedzi. Metanomierz MM-4 wykorzystuje klasyczną i najbardziej rozpowszechnioną zasadę pomiaru stężenia metanu z zastosowaniem przetworników termokatalitycznych zwanych pelistorami.



*Rys. 1. Metanomierz MM-4 wykorzystywany w badaniach* 

#### 3.1.2. Anemometr stacjonarny

Anemometr AS-3 (rys. 2) przeznaczony jest do ciągłego pomiaru prędkości przepływu powietrza w chodnikach kopalnianych, tunelach, korytarzach. Współpracuje z centralami dołowymi. Opracowany został w dwóch wersjach:

- w wersji AS-3n (z wyjściem napięciowym),
- w wersji AS-3c (z wyjściem prądowym).

Do pomiaru prędkości wykorzystano czasową metodę ultradźwiękową. Anemometr AS-3 może być użyty także doraźnie jako urządzenie przenośne, zasilany z iskrobezpiecznego zasilacza akumulatorowego.



Rys. 2. Anemometr stacjonarny typu AS-3

# 3.1.3. Czujnik parametrów fizycznych powietrza THP-2

Stacjonarny czujnik parametrów fizycznych powietrza THP-2 (rys. 3) dokonuje precyzyjnych pomiarów ciśnienia bezwzględnego, temperatury oraz wilgotności powietrza. Konstrukcję czujnika oparto na małogabarytowym przetworniku ciśnienia SETRA 278 o wysokiej dokładności oraz półprzewodnikowym detektorze temperatury i wilgotności z wyjściem cyfrowym. Oprogramowanie czujnika umożliwia wielopunktową korekcję charakterystyki przetwarzania oraz współpracę z centralą powierzchniową w systemie metanowo-pożarowym.

Czujnik parametrów fizycznych powietrza typu THP-2 charakteryzuje się bardzo dobrymi jakościowymi i ilościowymi parametrami metrologicznymi. Na podstawie wskazań czujnika możliwe jest wyznaczanie potencjałów aerodynamicznych.



Rys. 3. Czujnik parametrów fizycznych powietrza typu THP-2



Rys. 4. Zintegrowany czujnik odmetanowania typu ZCO

# 3.1.4. Urządzenie do pomiarów parametrów odmetanowania

Zintegrowany czujnik odmetanowania typu ZCO (rys. 4) służy do pomiaru ilości ujmowanego metanu [9]. Montowany jest obok rurociągu odmetanowania i przewodami pneumatycznymi podawane jest medium do komory pomiarowej. Wykonuje pomiary parametrów fizycznych (ciśnienie, różnica ciśnień na kryzie, temperatura) i koncentracji metanu w rurociągu. Produkowany jest w dwóch wersjach: dla systemu SMP-NT oraz niezależnego systemu z transmisją zgodną z interfejsem RS-485 i osobnym iskrobezpiecznym zasilaniem.

Na podstawie wykonywanych na bieżąco pomiarów oprogramowanie czujnika wyznacza ilość czystego metanu w rurociągu, wykorzystując jedną z dwóch zaimplementowanych metod: uproszczoną lub iteracyjną. Wydatek metanu wyliczany jest w odniesieniu do warunków normalnych ( $P_0 = 1013,25$  hPa,  $T_0 = 0$ °C).

# 3.2. Ściana wydobywcza wykorzystana do badań

Dla uzyskania danych do bieżących analiz przeprowadzono badania w wyrobiskach ściany wydobywczej N-2 w KWK Pniówek [10]. Jest to ściana o wysokiej metanowości, w której prowadzone jest również odmetanowanie. Ściana N-2 przewietrza się sposobem na Y za pomocą głównego strumienia świeżego powietrza doprowadzanego chodnikiem N-2 i pomocniczego (doświeżającego) strumienia podawanego do punktu wylotowego ściany chodnikiem N-3.

Głównym celem badań w rejonie ściany wydobywczej była wstępna ocena możliwości:

- pomiarów ilościowych dla przepływów powietrza i metanu,
- zastosowania metody metanowości kryterialnej do oceny online stanu wentylacji i zagrożenia metanowego w rejonie ściany.

W artykule [14] przedstawiono wyniki badań dotyczące obliczania sieci wentylacyjnej przy zmianach przepływu powietrza, symulacji rozpływu metanu od miejsca podwyższonego stężenia oraz wyznaczania wskaźników metanowości rejonu ściany.

Do wyznaczenia wartości parametrów w poszczególnych chodnikach wykorzystano m.in. anemometry (chodnik N-2, chodnik N-3, dowierzchnia N-3, przekop N-12a), metanomierze (chodnik N-2, chodnik N-3, dowierzchnia N-3), czujniki ciśnienia i różnicy ciśnień (pochylnia N-1, chodnik N-3, chodnik N-4, chodnik N-4a, dowierzchnia N-3). Dodatkowo w chodniku N-3, na rurociągu odmetanowania, zabudowano czujnik wyliczający online wartości wydatku czystego metanu. Badania były prowadzone zarówno z wykorzystaniem czujników dodatkowych (metan, ciśnienie) podłączonych do systemu, jak i ręcznych. Rozmieszczenie czujników i urządzeń pomiarowych zostało przeprowadzone zgodnie z przepisami stosowanymi przez kopalnię i przedstawione na rysunku 5.



Rys. 5. Sposób rozmieszczenia czujników w rejonie ściany wydobywczej N-2 w KWK Pniówek

Plan badań przedstawiał się następująco:

- zainstalowanie czujników pomiarowych w wybranych punktach rejonu ściany,
- wykonanie eksperymentu biernego (obserwacja i rejestracja parametrów podczas normalnej pracy ściany) oraz eksperymentu czynnego (polegającego na zamknięciu i po kilkunastu minutach otwarciu tamy T1),
- wykonywanie pomiarów przez czujniki prędkości przepływu ręczne i automatyczne, pracujące w systemie monitorowania.

# 4. ANALIZA WYNIKÓW BADAŃ

# 4.1. Metanowość wentylacyjna, bezwzględna i kryterialna

W instrukcji GIG [2] opisano zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego. Wielkością opisującą zagrożenie metanowe w rejonie ściany jest jego metanowość. Obliczana jest ona na podstawie ręcznie zmierzonych wartości stężenia metanu oraz prędkości przepływu powietrza (wydatków powietrza), wykonywanych okresowo przez służby kopalniane. Do scharakteryzowania metanowości w rejonie ściany wydobywczej należy zdefiniować następujące pojęcia:

- metanowość wentylacyjna bilans wydatku czystego metanu dla rejonu, różnica pomiędzy metanem zmierzonym w prądzie powietrza zużytego a metanem zawartym w prądzie powietrza świeżego,
- metanowość bezwzględna suma wydatku wydzielającego się metanu do wyrobisk (metanowość wentylacyjna) oraz wielkości odmetanowania,
- metanowość kryterialna określa maksymalną metanowość bezwzględną, przy której nie nastąpi przekroczenie dopuszczalnych stężeń w prądzie powietrza zużytego.

Metanowość kryterialna pozwala na całkowitą ocenę zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej na podstawie pomiarów metanu dopływającego do ściany z powietrzem dopływowym (głównym i doświeżającym), metanu wypływającego z rejonu ściany z powietrzem wentylacyjnym oraz metanu odprowadzanego systemem odmetanowania. Wartość metanowości kryterialnej określa się dla ścian zaliczanych do II, III lub IV kategorii zagrożenia metanowego. W przypadku ścian projektowanych wartości metanowości odnosi się do prognozowanej metanowości bezwzględnej, natomiast w przypadku ścian w ruchu – do metanowości bezwzględnej, obliczanej na podstawie pomiarów bezpośrednich.

Wartość kryterialnej metanowości bezwzględnej może stanowić warunek koniecznego zastosowania odmetanowania lub innych środków obniżających wydzielanie się metanu do wyrobisk (np. lutniociągi) w przypadku, gdy obliczona wartość metanowości kryterialnej jest mniejsza niż prognozowana lub rzeczywista metanowość występująca podczas wydobycia w rejonie ściany wydobywczej.

Strumień objętości metanu oblicza się według wzoru [2]:

$$V = \frac{C_m \cdot V_{PW}}{100} \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \tag{1}$$

Kryterialna wartość metanowości bezwzględnej  $V_{KR}$  bez doświeżającego prądu powietrza wynosi:

$$V_{KR} = \frac{C_m \cdot V_s \cdot k}{100 \cdot n} - V_D \quad \left[\frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}}\right] \tag{2}$$

Dla ścian posiadających doświeżający prąd powietrza wartość metanowości kryterialnej wyznacza się z następującej zależności:

$$V_{KR} = \frac{C_m \cdot V_s \cdot k}{100 \cdot n} + \frac{V_p \left(\frac{C_m}{n} - C_p\right)}{100 - \frac{C_m}{n}} - V_D \quad \left[\frac{m^3}{\min}\right] \quad (3)$$

W przypadku prowadzonego w rejonie ściany odmetanowania, obliczoną wartość metanowości  $V_{KR}$ należy podstawić do poniższej zależności:

$$V_{KR-O} = \frac{100 \cdot V_{KR}}{100 - E} \left[ \frac{\mathrm{m}^3}{\mathrm{min}} \right] \tag{4}$$

gdzie efektywność odmetanowania *E* wyznacza się ze wzoru:

$$E = \frac{100 \cdot V_O}{V_O + V_W} \quad [\%] \tag{5}$$

Oznaczenia – wzory (1)–(5):

- $C_m$  dopuszczalna zawartość metanu [%],
- $C_p$  stężenie metanu w prądzie doświeżającym [%],
- $V_P$  wydatek doświeżającego prądu powietrza [m<sup>3</sup>/min],
- $V_s$  wydatek powietrza w ścianie [m<sup>3</sup>/min],
- $V_D$  wydatek metanu dopływającego do ściany [m<sup>3</sup>/min],
- $V_O$  ilość metanu ujętego przez odmetanowanie [m<sup>3</sup>/min],
- $V_W$  ilość metanu wydzielającego się do wyrobisk [m<sup>3</sup>/min],
- $V_{PW}$  wydatek powietrza w wyrobisku [m<sup>3</sup>/min],
  - k współczynnik nierównomierności rozkładu powietrza w ścianie,
  - *n* współczynnik nierównomierności wydzielania metanu.

#### 4.2. Obliczenia parametrów wentylacyjnych

Do obliczeń wentylacyjnych wykorzystano program AERO2014 [6, 15] opracowany przez Politechnikę Śląską i firmę IFK. Aplikacja zarządza, rozlicza i bilansuje rozpływ powietrza w kopalnianej sieci wentylacyjnej. Umożliwia modelowanie zmian, przeprowadzanie symulacji, a także dokumentowanie parametrów sieci. Współpracuje ze schematami przestrzennymi i kanonicznymi kopalni w środowisku AutoCAD.

Program AERO2014 oblicza objętościowe wydatki powietrza na podstawie wprowadzonych do modelu numerycznego wartości oporów aerodynamicznych bocznic. Obliczenia oparte są na metodzie Crossa [11] – iteracyjnym wyznaczaniu kolejnych przybliżeń do obliczenia ustalonego rozpływu powietrza w sieciach złożonych z wielu oczek.

Program obliczeniowy składa się z dwóch modułów:

- Programu Standardowego Wprowadzania Danych (program AERO2014),
- Modułu Graficznego opartego na aplikacji typu AutoCAD.

Okno programu AERO2014 podzielone jest funkcjonalnie trzema następującymi zakładkami:

- węzły dane o wprowadzonych do struktury kopalni węzłach,
- wentylatory parametry pracy wentylatorów, gdzie każdy z nich ma swoją edytowalną charakterystykę, wyliczane są także współczynniki wielomianu charakterystyki urządzenia,
- bocznice matematyczny model sieci wentylacyjnej kopalni opisujący strukturę połączeń wentylacyjnych pomiędzy poszczególnymi węzłami.

Program AERO2014 umożliwia pracę w trybie dyspozytorskim. Dzięki temu możliwe jest obliczanie parametrów sieci wentylacyjnej na podstawie wskazań czujników pomiarowych. W tym celu w strukturze kopalni definiuje się urządzenia pomiarowe wraz z ich umiejscowieniem: czujniki ciśnienia [7] umieszczone w węzłach oraz czujniki prędkości przepływu powietrza w bocznicach. Możliwe jest także zdefiniowanie czujników gazowych (np. metanomierzy). Do obliczeń wymagany jest także przekrój bocznicy w miejscu pomiaru. Przykładową listę czujników wczytaną w programie AERO2014 przedstawiono na rysunku 6.

Po zdefiniowaniu wszystkich czujników uruchamia się funkcję kontrolującą zawartość w pliku *xml* ze wskazaniami zdefiniowanych wcześniej urządzeń. Po wykryciu modyfikacji pliku program AERO2014 wylicza nową wartość oporu danej bocznicy oraz oblicza wartości wydatków powietrza w całej kopalni. Nowe wartości zostają wpisane do struktury bocznic. Dzięki odczytom wartości ciśnienia i prędkości przepływu powietrza z systemu monitorowania możliwe jest dynamiczne wyliczanie oporu danej bocznicy wraz z obliczeniem rozpływu powietrza w całej kopalni.

Program sygnalizuje dodatkowo stany ostrzegawcze i alarmowe czujników gazowych, a w przypadku symulacji pożaru uwzględnia wskazania urządzeń w obliczeniach.

# 4.3. Obliczanie bieżących wydatków powietrza i metanu w rejonie ściany

Metanowość obliczana jest na podstawie wartości parametrów uśrednionych. Poważne zagrożenie metanowe występuje jednak podczas osiągnięcia przez niektóre parametry wartości ekstremalnych (wystąpienie jednocześnie wysokich stężeń metanu w powietrzu wentylacyjnym oraz niewystarczającego przewietrzania i niskiej efektywności odmetanowania). Obliczanie metanowości bieżącej przy przyjęciu współczynnika nierównomierności wydzielania metanu n = 1powoduje, że we wzorach operujemy wydatkami powietrza i metanu.

Bieżąca metanowość kryterialna określa bezpieczny wydatek metanu powstający podczas urabiania przy zmieniających się warunkach przewietrzania, odmetanowania i zawartości metanu w powietrzu dopływającym do ściany. Natomiast bieżąca metanowość bezwzględna to wydatek sumaryczny metanu obliczany na podstawie danych pomiarowych powietrza wylotowego ze ściany i odmetanowania.

Do obliczania wydatku metanu w powietrzu wentylacyjnym rejonu ściany wykorzystano czujniki prędkości powietrza i metanomierze znajdujące się w rejonie ściany N-2. W chodniku N-2 pracował anemometr AS038 oraz metanomierz MM137, w chodniku N-3 anemometr AS099, natomiast w dowierzchni N-3 pomiary rejestrowane były przez anemometr AS072 oraz metanomierz MM104.

Na podstawie przebiegów wartości prędkości przepływu obliczono wydatki powietrza w rejonie ściany N-2. Do obliczeń wykorzystano następujące przekroje poszczególnych chodników:

- chodnik N-2 (anemometr AS038) 8,63 m<sup>2</sup>,
- chodnik N-3 (anemometr AS099) 14,45 m<sup>2</sup>,
- dowierzchnia N-3 (anemometr AS072 13,66 m<sup>2</sup>.

Do obliczeń przyjęto także wartość określonego w [2] współczynnika k = 0.85, określającego nierównomierność rozkładu prędkości powietrza w ścianie.

Wontaiz	Id	Oznaczenie Zefir	Nazwa czujnika	Тур	Zakres	Jednostka	Lokalizacja
Westing a	1	AS038	Nr kop.	AS	10	m/s	Chod. N-2
Wczytaj z         Id         Oznaczenie         Nazwa czujnka         Typ         Zakres           1         AS038         Nr kop.         AS         10           2         AS072         Nr kop.         AS         10           3         BA13         Nr kop.         P         13000           4         BA23         Nr kop.         P         13000	m/s	Chod. N-3					
	3	BA13	Nr kop.	P	13000	Pa	Chod. N-2
	4	BA23	Nr kop.	P	13000	Pa	Chodnik N-3 z pochylnią N
Filtr Oznacz. =							

Rys. 6. Okno konfiguracyjne czujników w programie AERO2014



Rys. 7. Wartości wydatków powietrza obliczone na podstawie przebiegów przepływu powietrza zarejestrowanych przez anemometry: a) AS038; b) AS072; c) AS099

Na rysunku 7 przedstawiono wyznaczone wartości wydatków powietrza na podstawie zarejestrowanych przebiegów prędkości powietrza w rejonie ściany N-2.

Otrzymane średnie wartości wydatku powietrza porównano z obliczeniami interfejsu AERO, co przedstawiono w tabeli 1.

Na podstawie tego porównania oszacowano współczynniki przeliczeniowe dla każdego ze stanowisk pomiarowych, wskazujące na różnicę obliczeń programu i rzeczywistych pomiarów (tab. 1). Na rysunku 8 przedstawiono wartości wydatków czystego metanu w powietrzu wentylacyjnym, obliczone na podstawie wydatków powietrza, współczynników przeliczeniowych oraz procentowego stężenia metanu w rejonie ściany N-2.

### Tabela 1

Zestawienie średnich wartości wydatków powietrza
otrzymanych z pomiarów, systemu AERO
oraz obliczony na podstawie porównania
współczynnik przeliczeniowy

Nazwa	Wartość zmierzona wydatku [m <sup>3</sup> /min]	Wartość wydatku AERO [m <sup>3</sup> /min]	Współ- czynnik
Chodnik N-2	1169,85	1314	1,123
Chodnik N-3	926,47	1566	1,690
Dowierzchnia N-3	1496,45	2880	1,925



Rys. 8. Wartości wydatków czystego metanu w powietrzu wentylacyjnym w: a) chodniku N-2; b) chodniku N-3; c) dowierzchni N-3

# 4.4. Ocena zagrożenia metanowego na podstawie porównania wydatku metanu w powietrzu metanowością wentylacyjną z dopuszczalną

Wyznaczone wartości wydatków czystego metanu pozwalają na obliczenie metanowości wentylacyjnej w rejonie ściany N-2. Na rysunku 9a przedstawiono przebieg wartości metanowości wentylacyjnej w badanym okresie.

Do obliczenia wartości metanowości kryterialnej, z wykorzystaniem wzoru (3) przyjęto następujące parametry określone w projekcie ściany N-2 [5]:

- dopuszczalna zawartość metanu C<sub>m</sub> wynosi 2%, a dla odświeżającego prądu powietrza 1,5%,
- współczynnik nierówności rozkładu powietrza w ścianie k wynosi 0,85,

- średni przekrój użyteczny ściany wynosi 10,58 m<sup>2</sup>
- współczynnik nierówności wydzielania metanu n wynosi 1,0 ze względu na ciągły charakter pomiarów i przeliczeń na podstawie realnych wydatków powietrza i metanu,
- zawartość metanu w prądzie doświeżającym  $C_p$ , wydatek powietrza w ścianie  $V_s$ , wydatek doświeżającego prądu powietrza  $V_p$  oraz wydatek metanu dopływającego do ściany  $V_D$  przeliczane na podstawie wskazań zainstalowanych w rejonie ściany N-2 przyrządów pomiarowych.

Ze względu na zastosowanie w rejonie ściany N-2 odmetanowania wartość kryterialną metanowości wylicza się z uwzględnieniem tego procesu na podstawie wzoru (4). Pomiaru wydatku metanu w rurociągu odmetanowania dokonuje czujnik ZCO [8] pracujący w chodniku N-3. Wartość wydatku wyliczana jest na



*Rys.* 9. Metanowość w rejonie ściany N-2: a) metanowość wentylacyjna; b) wydatek metanu w rurociągu odmetanowania; c) metanowość bezwzględna z zaznaczonym poziomem metanowości kryterialnej

podstawie pomiarów parametrów mieszaniny gazu iteracyjnie według normy [19] lub ze wzoru:

$$V_{CH_4} = \% CH_4 \cdot 0,011 \cdot a \cdot E \cdot d^2 \sqrt{\frac{P \cdot h}{s \cdot T}} \left[\frac{m^3}{\min}\right]$$
(6)

gdzie:

- 0,011 współczynnik liczbowy,
  - a współczynnik przepływu wyliczany na podstawie modułu zwężki pomiarowej,
  - E współczynnik ekspansji gazu,
  - d średnica otworu zwężki [cm],
  - P ciśnienie absolutne w rurociągu [mm Hg],
  - h spadek ciśnienia na kryzie pomiarowej [mm H<sub>2</sub>O],
  - T temperatura bezwzględna gazu przed zwężką [K],
  - s względna gęstość gazu [kg/m<sup>3</sup>],

%CH<sub>4</sub>- stężenie metanu [%].

Zmierzony wydatek metanu w rurociągu odmetanowania przedstawiono na rysunku 9b. W celu wyliczenia wartości metanowości bezwzględnej zsumowano wskazania metanowości wentylacyjnej oraz wydatku metanu odprowadzanego rurociągami odmetanowania. Na rysunku 9c przedstawiono zarejestrowaną metanowość bezwzględną. Na rysunku zaznaczono także poziom metanowości kryterialnej z uwzględnieniem odmetanowania ściany N-2.

#### 5. PODSUMOWANIE

W celu oceny zagrożenia metanowego w rejonach ścian wydobywczych prowadzone były następujące badania:

 pomiary stężeń metanu oraz parametrów wentylacyjnych (ciśnienie i prędkość przepływu powietrza),  pomiary parametrów odmetanowania w rurociągu zbiorczym ze ściany (mierzone stężenie metanu, spadek ciśnienia gazu na zwężce pomiarowej, ciśnienie bezwzględne oraz temperatura gazu, które pozwalają na obliczanie aktualnego wydatku przepływu czystego metanu).

Przeprowadzone badania dały wyniki pozwalające na określanie i obliczanie zagrożenia metanowego online na podstawie bieżąco analizowanej metanowości wentylacyjnej i kryterialnej oraz efektywności odmetanowania wykorzystującej pomiary z czujników prędkości przepływu powietrza, stężenia metanu oraz wydatku metanu z rurociągu odmetanowania.

Pomiary prędkości przepływu powietrza dla obliczania wydatków w bocznicach przyścianowych sieci wentylacyjnej przeprowadzane były dwiema metodami:

- metodą ręczną zgodnie z górniczą techniką pomiarową (metoda trawersu ciągłego [4]),
- automatyczną w systemie monitorowania (dokonano pomiaru punktowego przy uwzględnieniu współczynnika rozkładu prędkości powietrza w przekroju wyrobiska).

Wyznaczone różnymi metodami wartości przepływów powietrza w niektórych przypadkach znacznie się różniły. Konieczne będą prace nad opracowaniem charakterystyk dla różnych prędkości powietrza dla typowych miejsc sieci wentylacyjnej. Przy takich pracach pomocne będą również wyniki prac publikowanych przez jednostki badawcze [16–18].

Wyniki badań stanowią podstawę do opracowania:

- struktury i funkcji systemu monitorowania realizującego również wybrane analizy wentylacyjno--gazowe,
- oprogramowania realizującego funkcje analiz.

#### Literatura

- Pawiński J., Roszkowski J., Strzemiński J.: Przewietrzanie kopalń, Śląskie Wydawnictwa Techniczne, Katowice 1995.
- [2] Krause E., Łukowicz K.: Zasady prowadzenia ścian w warunkach zagrożenia metanowego, Instrukcja nr 17 GIG, Katowice – Mikołów 2004.
- [3] Miśkiewicz K., Wojaczek A., Wojtas P.: Systemy dyspozytorskie kopalń podziemnych i ich integracja. Wybrane problemy, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2011.
- [4] Roszczynialski W., Trutwin W., Wacławik J.: Kopalniane pomiary wentylacyjne, Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1999.
- [5] Dokumentacja ściany N-2 w pokładzie 404/2 w KWK Pniówek, Pawłowice 2013.
- [6] AERO2014: Materiały informacyjne Informatycznej Firmy Konsultingowej.

- [7] Broja A., Felka D., Mróz J., Skierś P.: Badania czujników ciśnienia powietrza dla celu ciągłego monitorowania, Konferencja Naukowo-Techniczna EMTECH, Szczyrk 2014.
- [8] Broja A., Małachowski M., Felka D.: Monitorowanie parametrów odmetanowania w kontekście ich wpływu na wartości metanowości w rejonie ściany, Materiały Konferencji Naukowo-Szkoleniowej "Zasilanie, telemetria i automatyka w przemyśle wydobywczym. Innowacyjność i bezpieczeństwo". EMTECH, Zakopane 2015.
- [9] Felka D., Broja A.: Pomiary parametrów do wyliczenia strumienia objętości metanu w rurociągach sieci odmetanowania, w: Mechanizacja, automatyzacja i robotyzacja w górnictwie: monografia, red. nauk. K. Krauze, Centrum Badań i Dozoru Górnictwa Podziemnego, Katedra Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH, Kraków 2014, s. 72–82.
- [10] Dokumentacja projektu europejskiego AVENTO: "Zaawansowane narzędzia do kontroli wentylacji i emisji metanu", Instytut Technik Innowacyjnych EMAG, Katowice 2014–2015.
- [11] Cross H.: Analysis of flow in networks of conduits or conductors, "Engineering Experiment Station", Bulletin No. 286, University of Illinois 1936.
- [12] Karty katalogowe oraz strony internetowe producentów urządzeń i czujników pomiarowych: Instytut EMAG (www.ibemag.pl), SEVITEL sp. z o.o. (www.sevitel.pl), EMAG-SERWIS sp. z o.o. (www.emagserwis.pl), MICON sp. z o.o. (www.micon.pl), CARBOAUTOMATYKA S.A. (www.carbo.com.pl), HASO S.C. (haso.pl).
- [13] Cierpisz S., Miśkiewicz K., Wojaczek A.: Systemy gazometryczne w górnictwie, Wydawnictwo Politechniki Śląskiej, Gliwice 2007.
- [14] Krzystanek Z., Mróz J., Trenczek S.: Zintegrowany system monitorowania i analizy zagrożenia metanowego w rejonie ściany wydobywczej, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2016, 1: 64–76.
- [15] Knapczyk J., Musioł D.: Wykorzystanie systemu Aero do podniesienia bezpieczeństwa w wyrobiskach górniczych poprzez monitoring wentylacyjny, w: Narzędzia informatyczne wspomagające prognozowanie i monitoring oraz szkolenia w zakresie zagrożeń występujących w kopalniach – teoria i praktyka, red. D. Musioł, P. Pierzyna, Instytut Eksploatacji Złóż Politechniki Śląskiej, Gliwice 2015.
- [16] Dziurzyński W., Wasilewski S.: Ocena zagrożenia metanowego w rejonie ściany na podstawie czujników gazometrii oraz symulacji komputerowej przepływu mieszaniny powietrza i metanu, "Przegląd Górniczy" 2012, 12: 28–34.
- [17] Wasilewski S.: Kontrola prędkości powietrza w wyrobiskach kopalni w systemach nadzoru dyspozytorskiego, "Przegląd Górniczy" 2013, 7: 1–13.
- [18] Wasilewski S.: Monitorowanie zakłóceń parametrów powietrza w systemach dyspozytorskiego nadzoru powstałych w wyniku krótkiego spięcia, "Przegląd Górniczy" 2015, 11: 33–43.
- [19] PN-EN ISO 5167-1:2005: Pomiary strumienia płynu za pomocą zwężek pomiarowych wbudowanych w całkowicie wypełnione rurociągi o przekroju kołowym. Część 1: Zasady i wymagania ogólne.

dr inż. JERZY MRÓZ mgr inż. DARIUSZ FELKA mgr inż. ADAM BROJA dr inż. MARCIN MAŁACHOWSKI Instytut Technik Innowacyjnych EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice {J.Mroz, D.Felka, A.Broja, M.Malachowski}@ibemag.pl MARIAN HYLA

# Diagnostyka i monitorowanie pracy mikroprocesorowo sterowanego bloku zasilania wzbudzenia silnika synchronicznego

W artykule przedstawiono blok zasilania wzbudzenia silników synchronicznych z mikroprocesorowym układem sterowania. Omówiono podstawy teoretyczne regulacji mocy biernej za pomocą silnika synchronicznego oraz wpływ obciążenia na dopuszczalny obszar pracy. Przedstawiono możliwości sterowania silnikiem przez system mikroprocesorowy opracowanego urządzenia podczas rozruchu asynchronicznego i pracy synchronicznej. Zaprezentowano możliwości monitorowania i rejestracji stanu pracy napędu pozwalające na analizę sekwencji zdarzeń w przypadku wystąpienia stanów awaryjnych. Przedstawiono dedykowane oprogramowanie diagnostyczno-serwisowe. Omówiono wybrane funkcje diagnostyczne.

Słowa kluczowe: silnik synchroniczny, sterowanie prądem wzbudzenia, regulator mocy biernej, sterowanie mikroprocesorowe, zdalne sterowanie i monitorowanie

### 1. WSTEP

Silniki synchroniczne dużej mocy wykorzystuje się w przemyśle do napędu urządzeń niewymagających regulacji prędkości obrotowej. Typowym zastosowaniem są napędy wentylatorów głównych przewietrzania kopalń głębinowych, napędy sprężarek czy wciąż jeszcze obecne w przemyśle napędy przetwornic układów Leonarda.

Jednym z podstawowych zagadnień eksploatacyjnych jest rozruch silnika. W przypadku silników jawnobiegunowych wykonuje się go zazwyczaj jako rozruch asynchroniczny bezpośredni lub z dławikiem rozruchowym. Procedura rozruchowa wymaga odpowiedniej sekwencji działań zgodnie z aktualnym stanem napędu [3, 5, 9, 13, 21, 22]. Nieudana procedura rozruchu może doprowadzić do utknięcia silnika na prędkości podsynchronicznej, długotrwałej pracy z prądem większym od znamionowego, pulsacją momentu elektromagnetycznego i oscylacji prędkości obrotowej skutkujących znacznymi przeciążeniami mechanicznymi na wale silnika i przyspieszonym zużyciem łożysk. Po nieskutecznym rozruchu kolejna próba możliwa jest po zatrzymaniu wału silnika. W układach napędowych o dużych momentach bezwładności czasy wybiegu mogą wynosić kilkanaście, a nawet kilkadziesiąt minut. Prądy rozruchowe kilkukrotnie przekraczają wartości prądów znamionowych, powodując znaczne nagrzewanie uzwojeń silnika. Z tego względu należy ograniczyć liczbę prób rozruchu w określonym przedziale czasu.

Niedociążone silniki synchroniczne często wykorzystuje się jako regulowane kompensatory mocy biernej podstawowej harmonicznej, zarówno lokalnie, jak i w układach z nadrzędnym zadawaniem mocy biernej [4, 6, 11, 12]. Regulacja mocy biernej odbywa się poprzez zmianę prądu w uzwojeniu wzbudzenia silnika podczas pracy synchronicznej [1, 8]. Praca synchroniczna możliwa jest tylko w ograniczonym zakresie kąta mocy. Po przekroczeniu dopuszczalnego kąta mocy silnik wypada z synchronizmu [2, 12, 18] i powinien zostać wyłączony awaryjnie.

Moc czynna P pobierana przez silnik w stanie pracy synchronicznej opisana jest zależnością [2, 18]

$$P = m \left( \frac{U_f E_w}{X_d} \sin \vartheta + \frac{1}{2} U_f^2 \left( \frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin(2\vartheta) \right) (1)$$

gdzie:

m – liczba faz,  $U_f$  – napięcie fazowe,

 $X'_d$  – reaktancja rozproszenia w osi d,

 $X_q^a$  – reaktancja rozproszenia w osi q,  $\vartheta$  – kąt mocy,

 $E_w$  – siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wzbudzenia.

Przy założeniu liniowości charakterystyki magnesowania siła elektromotoryczna indukowana w uzwojeniu wzbudzenia zależna jest od prądu wzbudzenia, zgodnie z równaniem:

$$E_w = \frac{I_w}{k_w} \tag{2}$$

gdzie:

 $I_w$  – prąd wzbudzenia,

 $k_{\scriptscriptstyle W}\,$ – stała związana z konstrukcją silnika.

Z zależności (1) i (2) wynika, że wpływ na kąt mocy ma obciążenie silnika mocą czynną (proporcjonalną do momentu obciążenia), wartość napięcia zasilania oraz wartość prądu wzbudzenia.

Prądy w osiach *d* i *q* zależne są od kąta mocy  $\vartheta$  oraz siły elektromotorycznej  $E_w$  związanej z prądem wzbudzenia zgodnie z równaniami:

$$I_d = \frac{E_w - U_f \cos \vartheta}{X_d} \tag{3}$$

$$I_q = \frac{U_f \sin \vartheta}{X_q} \tag{4}$$

Prąd stojana *I* maszyny można wyznaczyć z zależności:

$$I = \sqrt{I_d^2 + I_q^2} \tag{5}$$

przy czym składowa czynna prądu  $I_P$  ma wartość:

$$I_P = \frac{P}{3U_f} \tag{6}$$

Stąd moc bierną silnika Q można zapisać w postaci:

$$Q = \begin{cases} -3U_f \sqrt{I^2 - I_P^2} & \text{dla } \vartheta < \vartheta_0 \\ \\ 3U_f \sqrt{I^2 - I_P^2} & \text{dla } \vartheta \ge \vartheta_0 \end{cases}$$
(7)

gdzie  $\vartheta_0$  – kąt mocy przy pracy z  $\cos\varphi = 1$  przy założeniu, że znak dodatni mocy biernej oznacza pobieranie przez silnik mocy biernej indukcyjnej, a znak ujemny zwrot mocy biernej indukcyjnej do sieci (pobieranie mocy biernej pojemnościowej). Na rysunku 1 przedstawiono typowe charakterystyki mocy biernej w zależności od prądu wzbudzenia z zaznaczonym ograniczeniem wynikającym z wartości znamionowej prądu wzbudzenia.



Rys. 1. Zależność mocy biernej silnika od prądu zbudzenia dla różnych wartości obciążenia mocą czynną

Nadążna kompensacja mocy biernej z wykorzystaniem silnika synchronicznego może prowadzić do zmian kąta mocy przy niezmienionym momencie obciążenia. Na rysunku 2 przedstawiono typowe charakterystyki kąta mocy w zależności od prądu wzbudzenia.



Rys. 2. Zależność kąta mocy od prądu zbudzenia dla różnych wartości obciążenia mocą czynną

Jak można zauważyć na rysunku 2, możliwa jest praca niedociążonego silnika z kątem mocy większym od znamionowego. Jednak przekroczenie granicy stabilności statycznej prowadzi do wypadnięcia silnika z synchronizmu i wyłączenia napędu przez układy zabezpieczeń.

Jedną z najczęściej wykorzystywanych charakterystyk opisujących stan pracy silnika synchronicznego są krzywe Mordeya, zwane także ze względu na swój kształt krzywymi V. Krzywe te można wyznaczyć analitycznie na podstawie parametrów dostępnych na tabliczce znamionowej silnika oraz wartości reaktancji synchronicznych  $X_d$  i  $X_q$ . Przyjęcie do obliczeń właściwych wartości reaktancji  $X_d$  i  $X_q$  jest niezbędne do prawidłowego określenia zakresu regulacji prądu wzbudzenia w zależności od obciążenia silnika mocą czynną, zapewniającego stabilną pracę w stanie synchronicznym. Na rysunku 3 przedstawiono typowy kształt krzywych Mordeya z zaznaczonym dopuszczalnym obszarem pracy silnika.



Rys. 3. Krzywe Mordeya z zaznaczonym dopuszczalnym obszarem pracy silnika

Aby zapewnić stabilną pracę w stanie synchronicznym, należy odpowiednio sterować prądem wzbudzenia, uwzględniając wpływ momentu obciążenia, napięcia zasilania, zadanej wartości mocy biernej, a także ograniczenia związane z wartościami znamionowymi prądu stojana i wzbudzenia, utrzymując jednocześnie kąt mocy w dopuszczalnym zakresie [1, 2, 12, 15, 18].

# 2. MIKROPROCESOROWY BLOK ZASILANIA WZBUDZENIA SILNIKA SYNCHRONICZNEGO

Na rysunku 4 przedstawiono schemat bloku zasilania wzbudzenia o sterowaniu mikroprocesorowym przeznaczony do współpracy z silnikami synchronicznymi dużej mocy zasilanymi napięciem 6 kV o znamionowych prądach wzbudzenia do 400 A [5, 8]. Urządzenie zawiera przekształtnik tyrystorowy oraz tranzystorowy układ kluczowania rezystora rozruchowego, nadzorowane przez układ mikroprocesorowy.

Klucze tranzystorowe w obwodzie rezystora rozruchowego umożliwiają przepływ dwukierunkowego prądu indukowanego w uzwojeniu wzbudzenia podczas rozruchu asynchronicznego silnika. Bezstycznikowy układ wzbudzenia pozwala na zwiększenie niezawodności i trwałości urządzenia.

Oprogramowanie urządzenia pozwala na autonomiczne sterowanie pracą silnika, poczynając od rozruchu [8–10, 21, 22] (w tym także dla układu z dławikiem rozruchowym), przez odpowiednie sterowanie wyłącznikami w polu 6 kV rozdzielni zasilającej silnik oraz mostkiem tyrystorowym w obwodzie wzbudzenia, pracę synchroniczną z możliwością utrzymywania zadanej wartości prądu wzbudzenia lub mocy biernej, procedury forsowania prądu wzbudzenia, po proces wyłączenia technologicznego lub awaryjnego z rozładowaniem energii uzwojenia wzbudzenia [10]. Dodatkowo urządzenie może być włączone do nadrzędnego systemu kompensacji mocy biernej, realizując bezstopniową, nadążną regulację mocy biernej w trakcie pracy synchronicznej silnika [6].

Zastosowanie urządzenia do sterowania napędem wentylatora głównego przewietrzania kopalni wprowadza ostre kryteria dotyczące pracy napędu. Przepisy górnicze wymagają, aby w każdym szybie wydechowym oprócz czynnego wentylatora obecny był wentylator rezerwowy, którego uruchomienie możliwe jest w ciągu 10 minut [19]. Awaria wentylatora głównego i nieudany rozruch wentylatora rezerwowego stwarzają poważne zagrożenie dla zdrowia i życia załogi, a przerwa trwająca co najmniej 20 minut skutkuje wstrzymaniem robót i wyprowadzeniem pracowników w kierunku szybów wdechowych lub na powierzchnię [19]. Ważne jest więc ustalenie właściwych



Rys. 4. Schemat układu sterowania silnika: MS – silnik synchroniczny, WT – wzbudnica tyrystorowa, μP – system mikroprocesorowy, PT – prostownik tyrystorowy, UR – układ rozruchowy, W – wyłącznik, O – odłącznik, WD – wyłącznik dławika, DŁ – dławik rozruchowy

parametrów rozruchu oraz ograniczenia zakresu regulacji prądu wzbudzenia w trakcie pracy synchronicznej. Pomocne w tym celu mogą być procedury umożliwiające monitorowanie i diagnostykę pracy napędu, zarówno w trybie online, jak i z możliwością przeglądania danych archiwalnych, co ma szczególne znaczenie podczas analizy ewentualnych, niespodziewanych stanów awaryjnych.

## 3. REJESTRACJA I MONITOROWANIE STANU URZĄDZENIA

System mikroprocesorowy urządzenia rejestruje wartości pomiarowe mocy czynnej i biernej, napięcia zasilania, prądu stojana i prądu wzbudzenia. Rejestrowane są także wszystkie zmiany stanu lub trybu pracy, sterowanie łącznikami pola zasilającego w rozdzielni 6 kV, realizacja procedur dodatkowych (np. forsowanie prądu wzbudzenia przy zapadzie napięcia zasilania [7, 13]), wystąpienie zdarzeń alarmowych lub awaryjnych wykrytych przez algorytmy programowe systemu mikroprocesorowego lub zewnętrzne urządzenia zabezpieczające. Rejestrowane informacje przechowywane są w pamięci nieulotnej i mogą być wykorzystane do analizy pracy napędu i diagnozowania ewentualnych nieprawidłowości. Możliwe jest także przesyłanie rejestrowanych informacji w czasie rzeczywistym do urządzenia zewnętrznego za pomocą dostępnych interfejsów komunikacyjnych.

Jednym z elementów interfejsu HMI urządzenia jest ekran LCD pozwalający m.in. na monitorowanie stanu pracy napędu. Wyświetlane są informacje o stanie aktualnym, ostrzeżenia alarmowe i awaryjne czy wykresy przebiegów czasowych rejestrowanych wielkości pomiarowych. Na rysunku 5 przedstawiono przykładowe informacje wyświetlane na ekranie urządzenia.

Mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia wyposażony jest w zestaw interfejsów komunikacyjnych współpracujących z oprogramowaniem diagnostyczno--serwisowym lub zewnętrznymi systemami nadzorującymi. Dostępny jest interfejs MODBUS ASCII i RTU [17] w standardzie RS-485, łącze USB [16] oraz interfejs sieci Ethernet realizujący łączność z wykorzystaniem protokołu TCP/IP [20] z systemem autoryzacji użytkownika i możliwością filtrowania adresów IP umożliwiających ustanowienie połączenia. Przy łączności Ethernetowej możliwa jest praca w trybie klienta lub serwera. Dodatkowo w oprogramowaniu urządzenia zaimplementowano serwer HTTP [14] umożliwiający dostęp do podstawowych informacji z wykorzystaniem przeglądarki internetowej z obsługą JavaScript.

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowe strony generowane przez serwer HTTP wbudowany w oprogramowanie systemu mikroprocesorowego. Zawartość stron jest automatycznie odświeżana w przeglądarce internetowej z okresem 10 s.



Rys. 5. Monitorowanie pracy napędu na ekranie LCD urządzenia



Rys. 6. Monitorowanie pracy napędu z wykorzystaniem przeglądarki internetowej

#### 4. OPROGRAMOWANIE DIAGNOSTYCZNE

W celu szczegółowej analizy pracy napędu z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia opracowano oprogramowanie diagnostyczno-serwisowe dla systemu Windows. Oprogramowanie umożliwia monitorowanie i sterowanie pracą urządzenia poprzez interfejs RS-485, USB lub połączenie TCP/IP w sieci Ethernet.

Na rysunku 7 przedstawiono wygląd interfejsu oprogramowania dedykowanego do obsługi diagnostycznoserwisowej.



Rys. 7. Oprogramowanie diagnostyczno-serwisowe

Jedną z funkcji diagnostycznych jest możliwość pobrania z pamięci nieulotnej systemu mikroprocesorowego zarejestrowanych zdarzeń związanych z pracą układu napędowego. Rejestracja tego typu informacji w urządzeniu i możliwość przeglądania ich w dowolnym czasie przydatna jest do analizy zachowania się napędu w przypadku nietypowych i nieprzewidzianych zdarzeń związanych z pracą urządzenia napędzanego lub systemu zasilającego.

Na rysunku 8 przedstawiono przykładową sekwencję zdarzeń odczytaną z systemu mikroprocesorowego. Oprogramowanie diagnostyczne pozwala na przeglądanie, wyszukiwanie, sortowanie i filtrowanie odczytanych informacji.

Nr	Data	Opis	Iw		I		U		
23	2016.04.28 23:03:48	Załączenie wyłącznika pola obejście	0.	A 00	406.	33 A	6.1	9 kV	
24	2016.04.28 23:02:38	Rozruch	0.	A 00	0.00	A	6.4	7 kV	
25	2016.04.28 23:02:38	Załączenie wyłącznika 6 kV	0.	A 00	0.00	A	6.4	7 kV	
26	2016.04.28 02:11:08	Wyłączenie dmuchawy		<b>F</b> (h)		Ch	1	kv	
27	2016.04.28 01:30:01	Gotowość		Filtrowanie	V	Start/Stop	N	kV	
28	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie wyłącznika pola obejście	P	Dane I	. 1	Forsowanie	us	kV	
29	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie	43	build		Awarie		kV	
30	2016.04.28 01:30:01	Wyłączenie wyłącznika 6 kV	28	2.63 A	1	Alaman		kV	
31	2016.04.23 17:07:15	Koniec alarmu: Zabezpieczenie >> Iw	34	8.95 A	•	Alarmy		kV	
32	2016.04.23 17:07:12	Koniec alarmu: Zabezpieczenie >> I	45	8.42 A	295.	25 A	6.7	0 kV	
33	2016.04.23 17:07:11	Alarm: Zabezpieczenie >> I	53	7.37 A	402.	11 A	6.7	7 kV	
34	2016.04.23 17:07:09	Alarm: Zabezpieczenie >> Iw	53	7.89 A	515.	64 A	6.8	4 kV	
35	2016.04.23 17:07:06	Stan synchroniczny	53	7.89 A	559.	93 A	6.8	4 kV	
36	2016.04.23 17:07:03	Forsowanie	0.	A 00	563.	A 90	6.1	8 kV	
37	2016.04.23 17:07:01	Załączenie wyłącznika pola obejście	35	.26 A	404.	92 A	6.2	9 kV	
38	2016.04.23 17:05:50	Rozruch	0.	A 00	0.00	A	6.5	4 kV	
39	2016.04.23 17:05:50	Załączenie wyłącznika 6 kV	0.	00 A	0.00	A	6.5	4 kV	
40	2016.04.23 16:38:43	Gotowość	0.	A 00	0.00	A	6.3	8 kV	

Rys. 8. Analiza zdarzeń zarejestrowanych przez system mikroprocesorowy

Oprogramowanie diagnostyczne umożliwia odczyt rejestrowanych przebiegów czasowych wielkości pomiarowych oraz synchronizację pomiarów z systemem rejestracji zdarzeń w jednym oknie. Na rysunku 9 przedstawiono okno analizy stanu pracy. Nietypowy przebieg prądu wzbudzenia w początkowej fazie rozruchu silnika wynika z zastosowanego jednokierunkowego przetwornika pomiarowego prądu typu LEM oraz z okresu próbkowania sygnału przez procedurę pomiarową systemu mikroprocesorowego.



Rys. 9. Okno diagnostyki pracy napędu

W dolnej części okna analizy stanu pracy (obszar A) wyświetlane są przebiegi pomiarowe z wybranego przedziału czasowego z nałożoną informacją z systemu rejestracji zdarzeń. Umieszczenie kursora myszy w dowolnej pozycji wykresu skutkuje wyświetleniem w obszarze B wartości pomiarowych ze wskazanej chwili czasowej, opisem stanu pracy napędu w obszarze C oraz wyświetleniem aktywnych w tym czasie alarmów i awarii w obszarze D. Obszar E okna umożliwia wybór zdarzenia z listy zarejestrowanych zdarzeń. Wybór zdarzenia z listy powoduje automatyczne wyskalowanie i przesunięcie wykresu z obszaru A do odpowiedniej chwili czasowej.

Analityczne wyznaczenie obszaru pracy silnika synchronicznego ze względu na dopuszczalną wartość kąta mocy wymaga znajomości reaktancji synchronicznych  $X_d$  i  $X_q$ . Pomiarowe wyznaczenie krzywych Mordeya umożliwia weryfikację wartości przyjętych do obliczeń oraz ewentualną korektę ograniczenia związanego z minimalną dopuszczalną wartością prądu wzbudzenia.

Na rysunku 10 przedstawiono okno oprogramowania diagnostycznego umożliwiające wykreślenie krzywych V na podstawie serii pomiarów zarejestrowanych w stanie pracy synchronicznej. Oprogramowanie umożliwia wybór przedziału mocy czynnej dla każdej z wykreślanych krzywych oraz dopasowanie liczby próbek dla wyznaczania wykreślanych wartości metodą średniej kroczącej.



Rys. 10. Wyznaczanie krzywych Mordeya na podstawie pomiarów w stanie synchronicznym

#### 5. PODSUMOWANIE

Przedstawiony mikroprocesorowy blok zasilania wzbudzenia silników synchronicznych wraz z oprogramowaniem diagnostyczno-serwisowym jest rozwiązaniem autorskim, jednym z najnowocześniejszych na rynku.

Zastosowanie zaprezentowanego urządzenia z mikroprocesorowym układem sterowania pozwala na zautomatyzowanie procesu rozruchu silnika synchronicznego, uproszczenie obsługi i zmniejszenie awaryjności napędu. Umożliwia wykorzystanie urządzenia w układach automatycznego załączania napędu rezerwowego w przypadku awarii układu podstawowego.

Wbudowane interfejsy komunikacyjne pozwalają na zdalne sterowanie i monitorowanie pracy napędu. Możliwość wykorzystania silnika z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia jako regulowanego źródła mocy biernej w nadążnym układzie kompensacji pozwala na prostą integrację urządzenia z zakładowymi systemami zapewnienia jakości energii elektrycznej.

Oprogramowanie diagnostyczne z rejestracją parametrów pracy umożliwia dogłębną analizę zachowania się układu napędowego. Wykorzystanie przedstawionego oprogramowania w procesie rozruchu technologicznego podczas wdrażania urządzenia, pozwala na dobór i diagnozę parametrów rozruchu [5, 8–10] oraz nastaw regulatorów i ograniczeń zapewniających prawidłową pracę układu napędowego.

Kilkadziesiąt wdrożeń zrealizowanych przez firmę JJA Progress przy współudziale autora w układach napędowych z silnikami synchronicznymi dużej mocy, głównie wentylatorów przewietrzania kopalń głębinowych oraz bezawaryjna praca eksploatowanych urządzeń potwierdza skuteczność zastosowanych rozwiązań oraz przydatność opracowanych narzędzi diagnostycznych.

#### Literatura

- Al-Hamrani M.M., Von Jouanne A., Wallace A.: Power factor correction in industrial facilities using adaptive excitation control of synchronous machines, Conference Record of the 2002 Annual Pulp and Paper Industry Technical Conference, Toronto, Ontario, Canada 2002: 148–154.
- Bajorek Z.: Teoria maszyn elektrycznych, Wydawnictwo Politechniki Rzeszowskiej, Rzeszów 1987.
- [3] Campeanu A., Enache S., Vlad I., Liuba G., Augustinov L., Cautil I.: Simulation of asynchronous operation in high power salient pole synchronous machines, XXth International Conference on Electrical Machines (ICEM), Marseille 2012: 1823–1828.
- [4] Colak I., Bayindir R., Bay O.F.: Reactive power compensation using a fuzzy logic controlled synchronous motor, "Energy Conversion and Management" 2003, 44: 2189–2204.
- [5] Dokumentacja techniczno-ruchowa wzbudnicy Progress POWER. ENEL-PC, Gliwice 2011.
- [6] Hyla M.: Automatic compensation of reactive power with a system for monitoring a 6 kV electrical power grid in mine, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 2: 5–10.

- [7] Hyla M.: Impact of voltage dips on the operations of a high--power synchronous motor with a reactive power controller, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2016, 2: 5–13.
- [8] Hyla M.: Power supply unit for the excitation of a synchronous motor with a reactive power regulator, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 1: 17–21.
- Hyla M.: Rozruch silnika synchronicznego z mikroprocesorowym blokiem zasilania wzbudzenia, "Przegląd Elektrotechniczny" 2017, 4: 177–184.
- [10] Hyla M.: Wybrane aspekty sterowania tyrystorową wzbudnicą silnika synchronicznego, V Ogólnopolska Konferencja Naukowa Modelowanie i Symulacja MIS-5, Kościelisko 2008, s. 345–348.
- [11] Igbinovia F. O., Fandi G., Švec J., Müller Z., Tlusty J.: Comparative review of reactive power compensation technologies, 16th International Scientific Conference on Electric Power Engineering (EPE), Kouty nad Desnou, 2015, s. 2–7.
- [12] Kaczmarek T., Zawirski K.: Układy napędowe z silnikiem synchronicznym, Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej, Poznań 2000.
- [13] Kay J.A., Paes R. H, Seggewiss J.G., Ellis R.G.: Methods for the control of large medium-voltage motors: application considerations and guidelines, IEEE Transactions on Industry Applications 2000, 36, 6: 1688–1696.
- [14] Krishnamurthy B., Rexford J.: Web protocols and practice: HTTP/1.1, networking protocols, caching, and traffic measurement, Addison-Wesley Professional, Boston 2001.
- [15] Latek W.: Teoria maszyn elektrycznych, WNT, Warszawa 1987.

- [16] Mielczarek W.: USB. Uniwersalny interfejs szeregowy, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2005.
- [17] Modicon MODBUS Protocol Reference Guide. Modicon Inc., USA 1993.
- [18] Plamitzer A.: Maszyny elektryczne, WNT, Warszawa 1986.
- [19] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych (Dz.U. z 2002 r., nr 139, poz. 1169 oraz z 2006 r., nr 124, poz. 863 oraz z 2010 r., nr 126, poz. 855).
- [20] Siyan K.S., Parker T.: TCP/IP. Księga eksperta, Wydawnictwo Helion, Gliwice 2002.
- [21] Zalas P., Zawilak J.: Łagodzenie oraz skrócenie czasu procesu synchronizacji silników synchronicznych, "Elektrotechnika i Elektronika" 2006, 25, 2: 216–220.
- [22] Zalas P., Zawilak J.: Wphyw układu sterowania prądem wzbudzenia na proces synchronizacji silnika synchronicznego, "Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe" 2006, 75: 83–88.
  - dr inż. MARIAN HYLA Wydział Elektryczny Politechnika Śląska ul. B. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice marian.hyla@polsl.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.68

KRZYSZTOF KRAUZE ŁUKASZ BOŁOZ TOMASZ WYDRO KAMIL MUCHA

# Badania trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów

W artykule zamieszczono informacje dotyczące noży styczno-obrotowych, które obecnie są najpowszechniej stosowanymi narzędziami urabiającymi. Opisano ich zastosowanie, budowę, sposoby zwiększania ich trwałości oraz problemy występujące podczas ich eksploatacji. Główną częścią artykułu są wyniki badań trwałości noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów bądź napawanych lub obrobionych w sposób zwiększający ich trwałość. Do badań wybrano noże wzorcowe, handlowe oraz noże prototypowe. Przedstawiono również specjalne nowoczesne stanowisko laboratoryjne do badania procesu urabiania przez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami, należące do Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH w Krakowie, na którym przedmiotowe badania zostały wykonywane.

Słowa kluczowe: mechaniczne urabianie skał, noże styczno-obrotowe, trwałość, zużycie, stanowisko laboratoryjne

#### 1. WPROWADZENIE

Drążenie wyrobisk chodnikowych i eksploatacja wyrobisk ścianowych odbywa się najczęściej za pomocą urabiania mechanicznego, które polega na bezpośrednim oddziaływaniu narzędziem lub zespołem narzędzi skrawających na caliznę skalną. Najbardziej powszechne jest urabianie skał przez frezowanie kombajnami oraz struganie strugami przy użyciu narzędzi skrawających (noże kombajnowe, strugowe) [1–3].

Obecnie zarówno w kombajnach chodnikowych, ścianowych, a nawet szybowych, najczęściej stosowane są noże styczno-obrotowe. Dzięki większej trwałości noże te prawie całkowicie wyparły starsze rozwiązania, czyli noże styczne płaskie oraz promieniowe. Ma to szczególne znaczenie dla zmniejszenia czasu wymaganego na ich wymianę oraz zużycie uchwytów i organów [3–5].

Noże styczno-obrotowe stosowane w organach kombajnów ścianowych (rys. 1a) charakteryzują się

znaczną długością korpusu ( $L_n \ge 80 \text{ mm}$ ) i smukłością. Ostrza tych noży zbrojone są węglikami o kącie zbieżności stożka  $2\beta_u \ge 93^\circ$ . Również część chwytowa wprowadzana w uchwyt nożowy jest dłuższa i może być stopniowana. Nóż przed wypadnięciem z uchwytu zabezpieczany jest różnego typu zawleczkami, pierścieniami lub tulejkami. Noże kombajnów chodnikowych (rys. 1b) mocowane są w uchwytach przyspawanych do głowicy urabiającej zabudowanej na ramieniu maszyny. Są one w przeciwieństwie do noży kombajnów ścianowych krótsze i mniej smukłe, a węgliki stosowane na ostrza tych noży mają większe kąty zbieżności stożka [4–7].

Proces frezowania nożami styczno-obrotowymi wymaga od narzędzia takiego kształtu i wymiarów, aby jego ostrze zagłębiające się podczas pracy w caliznę na głębokość  $g_s$  uzyskiwało właściwe ruchowe kąty skrawania. Szczególnie należy zwrócić uwagę na to, aby ostrze noża w procesie skrawania miało zawsze dodatni ruchowy kąt przyłożenia  $\alpha_r$  [1, 8].

Nóż zamocowany w uchwycie jest częścią organu (rys. 2), dlatego ruchowe kąty skrawania  $\alpha_r$  i  $\gamma_r$  zależą



Rys. 1. Nóż styczno-obrotowy zamocowany na organie: a) kombajnu ścianowego; b) kombajnu chodnikowego



Rys. 2. Parametry ustawienia uchwytu i noża styczno-obrotowego na organie [6]

nie tylko od parametrów konstrukcyjnych noża, ale również uchwytu i organu, jak też od prędkości skrawania  $v_s$  i posuwu  $v_p$ . Wynika stąd, że dla organu o średnicy  $D_s$ , prędkości skrawania  $v_s$  i posuwu  $v_p$ , wysokości uchwytu  $H_u$  i kącie  $\delta_u$ , należy dobrać nóż styczno-obrotowy o wymaganej długości  $L_n$  i kącie ostrza  $2\beta_u$ . Wtedy pozostałe parametry konstrukcyjne noża muszą mieć takie wartości, aby zapewnić najkorzystniejsze warunki urabiania [8–10]. Stąd też bardzo ważne jest zapewnienie takich parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych noża, by uzyskać jak najmniejsze opory urabiania i jak najwyższą jego trwałość [1, 4, 10]. Narzędzie skrawające podczas eksploatacji jest elementem będącym bezpośrednio w kontakcie z urabianą calizną. W wyniku procesu urabiania w strefie styku narzędzia ze skrawanym materiałem dochodzi do jego zużycia. Powoduje to zmiany zarówno kształtu geometrycznego noża, jak i ubytek jego masy. Szczególnie zmiana kształtu i ubytek masy części roboczej skutkuje wypadnięciem węglika, a tym samym utratą zdolności skrawających. Innym zagadnieniem jest uszkodzenie mechaniczne noża wynikające z niewłaściwej eksploatacji lub jego wykonania [3, 4, 10].

O prawidłowej pracy noży decyduje nie tylko odpowiedni dobór parametrów konstrukcyjnych i kinematycznych noży, ale również technologia ich wykonania i rodzaj zastosowanych materiałów. Dlatego w celu zwiększenia trwałości noży obrotowych prowadzi się szereg badań nad opracowaniem nowych materiałów zarówno na ostrza, jak i korpusy tych narzędzi.

Ostrza aktualnie najczęściej wykonuje się z węglików spiekanych na osnowie kobaltu. Jednakże stosuje się również inne materiały na ostrze, np. cermetale, spieki ceramiczne czy diament polikrystaliczny [5, 7]. Cermetal (nazwa powstała z połączenia słów ceramika i metal) jest węglikiem spiekanym z twardymi cząstkami opartymi na tytanie. Początkowo cermetale były kompozytami TiC oraz niklu. Nowoczesne cermetale nie zawierają niklu i posiadają zaprojektowaną strukturę cząsteczek rdzenia z węglika tytanu Ti (C, N), drugiej twardej fazy z (Ti, Nb, W) (C, N) oraz bogatego w wolfram spoiwa kobaltowego. W grupie spieków ceramicznych możemy wyróżnić ceramikę tlenkową zawierającą głównie tlenek glinu  $(Al_2O_3)$  oraz spieki ceramiczne azotkowe, zawierające głównie azotek krzemu (Si<sub>3</sub>N<sub>4</sub>). Natomiast diament polikrystaliczny (PCD) jest kompozytem cząsteczek diamentu zapieczonych razem z metalicznym spoiwem. Diament jest najtwardszym i najbardziej odpornym na ścieranie materiałem. Jako narzędzie skrawające charakteryzuje się wysoką odpornością na zużycie, ale niską stabilnością chemiczną w wysokich temperaturach i łatwo rozpuszcza się w żelazie [5, 7, 11].

Uzyskuje się wtedy nóż, którego ostrze wykazuje dużą trwałość, jeżeli równolegle część robocza noża zabezpiecza węglik przed wypadnięciem. Stąd stosuje się wiele metod ograniczających szybkość zużycia się korpusu noża, a tym samym i wykruszanie węglików [3, 9].

Na korpusy noży styczno-obrotowych stosuje się stale o dużej udarności, wytrzymałości i odporności na ścieranie, które dodatkowo mogą być poddane procesowi nawęglania i obrabiane cieplnie [7, 12]. W celu ograniczenia zużycia wykonuje się również zabezpieczenie zewnętrznej powierzchni stożkowej noża warstwą odporną na ścieranie, wykonywaną metodą napawania (rys. 3b, c). Innym sposobem jest wykonanie na części atakującej korpusu noża dodatkowego pierścienia z węglika spiekanego (rys. 3a) [5, 10]. Sposoby te zwiększają trwałość noży, lecz wymagane jest jej potwierdzenie na podstawie badań eksploatacyjnych lub laboratoryjnych.

Pomiar szybkości zużycia noży styczno-obrotowych ma na celu określenie ich trwałości. Pomiaru trzeba dokonywać zawsze w tych samych warunkach, tak by wyniki były wiarygodne, powtarzalne i probabilistyczne. Pozwoli to ocenić trwałość noża, ale również porównać w tym aspekcie różne noże. W warunkach przemysłowych trwałość noży skrawających określa się zazwyczaj jako stosunek liczby noży wymienionych do objętości urobionego minerału. Najczęściej jest to liczba noży zużytych na pozyskanie 1000 Mg lub 1000 m<sup>3</sup> urobku. Natomiast w warunkach laboratoryjnych szybkość zużycia noża czy noży (trwałość) najefektywniej można wyznaczyć poprzez ubytek masy w stosunku do urobionej przez nóż czy noże objętości próbki skalnej [8–10].

W niniejszym artykule przedstawiono wyniki badań, których celem był wcześniej wspomniany pomiar szybkości zużycia noży styczno-obrotowych, wykonanych z różnych materiałów. Porównano noże wzorcowe, handlowe oraz prototypowe. Badania przeprowadzono na specjalnym nowoczesnym stanowisku laboratoryjnym do badania procesu urabiania poprzez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami, należącym do Katedry Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH Kraków.

#### 2. PRZEDMIOT BADAŃ

Badaniami objęto osiem typów noży styczno-obrotowych wykonanych z różnych materiałów bądź napawanych lub obrobionych w sposób zwiększający ich trwałość. Wszystkie noże, oprócz wzorcowych, były nożami prototypowymi (rys. 4), o części roboczej długości 90 mm i kącie ostrza  $2\beta_u = 90^\circ$ . Siedem typów zbrojonych było węglikami spiekanymi, natomiast jeden typ wkładką ceramiczną. Do badań przeznaczono następujące noże:

- noże wzorcowe, handlowe z węglikiem ¢22 –
   4 sztuki oznaczone jako "handlowy 22",
- noże wzorcowe, handlowe z węglikiem \$\overline{25}\$ 4 sztuki oznaczone jako "handlowy 25" (rys. 4c),



Rys. 3. Sposoby zwiększania trwałości korpusów noży: a) nóż styczno-obrotowy z dodatkowymi pierścieniami z węglika spiekanego na części atakującej; b) nóż styczno-obrotowy z warstwą napawaną; c) nóż promieniowy z warstwą napawaną [3, 8]



Rys. 4. Wybrane noże przeznaczone do badań: a) "odlewany 22"; b) "złoty 25"; c) "handlowy 22"; d) "srebrny 22"; e) "napawany 25"

- noże napawane laserowo z węglikiem ¢22 (do napawania wykorzystano noże "handlowy 22") – 4 sztuki – oznaczone jako "napawany 22",
- noże napawane laserowo z węglikiem \$\$\overline{25}\$ (do napawania wykorzystano noże "handlowy 25") 4 sztuki oznaczone jako "napawany 25" (rys. 4e),
- noże z powłoką azotku tytanu z węglikiem \$25 (do napawania wykorzystano noże "handlowy 25") 4 sztuki oznaczone jako "złoty 25" (rys. 4b),
- noże z utwardzonym korpusem z węglikiem ¢25 (do napawania wykorzystano noże "handlowy 22")
  4 sztuki, oznaczone jako "srebrny 22" (rys. 4d),
- noże wykonane przez odlewanie z węglikiem ¢22 (noże odlewane, brak informacji o materiale) – 4 sztuki, oznaczone jako "odlewany 22" (rys. 4a),
- noże wykonane przez odlewanie z wkładką ceramiczną zamiast węglika spiekanego (brak informacji o materiale) – 4 sztuki – oznaczone jako "ceramiczny".

### 3. PLAN I METODYKA BADAŃ

W ocenie trwałości noży dostarczonych do badań przyjęto szybkość ich zużycia definiowaną jako łączny ubytek masy noży do objętości urobku uzyskanego podczas próby skrawania sztucznego bloku skalnego [8, 9]. Przyjęta definicja parametru określającego trwałość noży oraz wymagania dotyczące badania szybkości ich zużycia skutkują koniecznością sformułowania następującego planu badań:

 przygotowanie próbki cementowo-piaskowej (cement, piasek, kruszywa, woda) o zadanej wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie (wyznaczona empirycznie),

- przygotowanie tarczy badawczej z odpowiednimi uchwytami,
- przygotowanie i oznaczenie noży do badań oraz pomiar ich masy,
- zamocowanie czterech noży styczno-obrotowych na tarczy badawczej,
- urabianie przez frezowanie w warunkach laboratoryjnych przy stałej wartości prędkości posuwu i skrawania,
- demontaż noży,
- pomiar masy noży po procesie urabiania,
- pomiar objętości urobku uzyskanego w czasie pracy badanych noży,
- obliczenie współczynnika C2 określającego szybkość zużycia noży.

Realizacja założonego planu i metodyki wymagała wyznaczenia lub przyjęcia następujących istotnych parametrów związanych z procesem urabiania przedmiotowymi nożami:

- urabianie próbki cementowo-piaskowej składającej się z cementu, piasku i kruszywa bazałtowego o wytrzymałości na jednoosiowe ściskanie  $R_c$  =
  - = 22,65 MPa i masie właściwej  $\gamma_w$  = 2,18 Mg/m<sup>3</sup>,
- prędkość posuwu  $v_{pu} = 0.01 \text{ m/min},$
- liczba obrotów tarczy badawczej n = 42 obr/min,
- długość skrawu: 120 mm,
- zabiór skrawu: 152 mm,
- średnica tarczy badawczej po ostrzach: \$\$1863 mm.

Po wyznaczeniu masy noży przed badaniami i po nich oraz określeniu urobionej przez nie objętości urobku możliwe jest wyznaczenie wskaźnika charakteryzującego szybkość zużycia badanych noży.
Szybkość zużycia noży (trwałość) określić należy za pomocą wzoru:

$$C2 = \frac{\Delta m}{m} \cdot \frac{V_w}{V_u} [-] \tag{1}$$

gdzie:

- C2 szybkość zużycia noży na podstawie masy,
- $\Delta m$  ubytek masy noża podczas badań (korpus wraz z ostrzem) [g],
- m masa noża przed badaniami [g],
- $V_w$  objętość wzorcowa próbki [m<sup>3</sup>],
- $V_u$  objętość próbki urobiona podczas badań [m<sup>3</sup>].

Objętość wzorcowa  $V_w$  jest przyjmowana arbitralnie. Objętość próbki urobiona podczas badań  $V_u$  jest wartością obliczeniową i wyznaczaną na podstawie zmierzonego zabioru, średnicy organu oraz długości wykonanego skrawu [8].

Badania wszystkich typów noży przeprowadza się zgodnie z podaną metodyką i planem badań. Należy zaznaczyć, że im mniejsza wartość parametru C2, tym zużycie noża jest mniejsze. Realizacja badań laboratoryjnych jest w tym przypadku szczególnie polecana, lecz wymaga przeprowadzenia ich na specjalnym stanowisku spełniającym wymagania przyjętej metodyki badań [8].

#### 4. REALIZACJA BADAŃ

Przed przystąpieniem do badań wszystkie noże zostały sprawdzone w celu zapisania ewentualnych niedoskonałości, sfotografowane oraz zważone. Następnie każdy zestaw noży został poddany badaniom na poniżej opisanym stanowisku.

#### 4.1. Stanowisko badawcze

Badania zostały zrealizowane na stanowisku laboratoryjnym do badania procesu urabiania w wyniku frezowania lub wiercenia obrotowego pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami. Służy ono do realizacji kompleksowych badań laboratoryjnych związanych z szeroko pojętym procesem skrawania skał. Przedmiotowe stanowisko badawcze umożliwia realizację procesu frezowania określonym organem urabiającym sztucznej lub naturalnej próbki skalnej, w warunkach laboratoryjnych. Stanowisko badawcze składa się z trzech głównych podzespołów (rys. 5):

- zespołu napędu organu,
- zespołu mocowania i prowadzenia próbki,
- układu pomiarowego i sterowania.

Zespół napędowy organu urabiającego posadowiony jest na fundamencie i składa się z silnika indukcyjnego prądu zmiennego zasilanego z pośredniego przemiennika częstotliwości sterowanego według zasady DTC o mocy 250 kW (napięcie zasilania – 3 × 400 V; liczba obrotów –1487 obr/min). Moment obrotowy z wału silnika przenoszony jest na wał organu urabiającego poprzez przekładnię mechaniczną o przełożeniu i = 28. Dodatkowo na wale silnika zamontowany został momentomierz. Konfiguracja układu pozwala na pracę napędu w dwóch zakresach, tzw. regulacja na stały moment (do 50 obr/min) i regulacja na stałą moc (do 120 obr/min). Zespół napędowy zakończony jest wielowypustem, na którym mocowany jest organ urabiający.

Próbka skalna przemieszcza się podłużnie oraz poprzecznie względem organu urabiającego. Ruch zarówno podłużny, jak i poprzeczny próbki skalnej wymuszony jest za pomocą siłowników hydraulicznych, które umożliwiają uzyskanie prędkości posuwu od 0 do 9,9 m/min, siłę posuwu do 150 kN, skok podłużny do 2,5 m, a poprzeczny do 1,3 m. Długość próbki skalnej wynosi 2,5 m, szerokość 1,3 m, wysokość 2,5 m.

Na stanowisku można badać organy urabiające o maksymalnej średnicy wynoszącej 2,2 m i maksymalnym zabiorze równym 1,0 m. Urobek powstały w czasie urabiania trafia do pojemnika poruszającego się na prowadnicach wraz z urabianą próbką. Rozwiązanie takie umożliwia odbiór urobku w sposób ciągły (w ramach próby pomiarowej).

Układ sterowania, kontroli i rejestracji poszczególnych wielkości związanych z procesem urabiania, umieszczony jest w kabinie ograniczającej poziom hałasu i zanieczyszczenia. Układ sterowania został wykonany z wykorzystaniem sterowników programowalnych PLC. Do wizualizacji i sterowania procesem wykorzystuje się panel dotykowy oraz pilot zdalnego sterowania. Operator ma możliwość zmiany wszystkich parametrów procesu oraz podgląd aktualnych wartości wielkości rejestrowanych (mierzonych). Układ pomiarowy składa się z czujników umożliwiających wyznaczenie przebiegów, takich jak:

- prędkość posuwu podłużnego,
- prędkość posuwu poprzecznego,
- prędkość obrotowa organu,
- moment oporu skrawania,
- siły w kierunku podłużnym,
- siły w kierunku poprzecznym.

Dodatkowo na stanowisku jest możliwość prowadzenia pomiaru zapylenia podczas badań oraz wykonania analizy uziarnienia otrzymanego urobku.



Rys. 5. Stanowisko laboratoryjne do badania procesu urabiania poprzez frezowanie lub wiercenie obrotowe pojedynczymi narzędziami skrawającymi lub organami: a) kabina operatora; b) betonowa próbka wraz z zespołem jej mocowania i posuwu oraz testowy organ urabiający; c) zespół napędowy organu urabiającego

#### 4.2. Przebieg badań

Badania przeprowadzono dla ośmiu kompletów noży zgodnie z opisanym planem i metodyką. Noże na tarczy badawczej tworzyły układ nożowy, którego schemat zamieszczono na rysunku 6. Noże rozmieszczone były na obwodzie co 90°. Każdy komplet noży mocowany był w ponumerowanych od 1 do 4 uchwytach zabudowanych na tarczy. Na rysunku 7 przedstawiono noże zamocowane w uchwytach, przygotowane do badań w poszczególnych próbach.

Na rysunku 8 przedstawiono wybrane noże po przeprowadzeniu procesu urabiania. Następnie noże zostały przygotowane do pomiaru ich masy, a na podstawie uzyskanych wartości obliczono, zgodnie z założonym planem i metodyką badań, parametry określające szybkość zużycia poszczególnych typów noży.

#### 4.3. Opracowanie wyników badań

Na podstawie zmierzonych wartości oraz podanych wzorów opracowano wyniki badań, które zestawiono w tak zwanych kartach pomiarów. Główną częścią karty jest tabela, której przykład przedstawiono poniżej (tab. 1). Karta pomiarów składa się z dwóch stron. Strona pierwsza zawiera informacje dotyczące wykonawców, realizacji badań (data, parametry próbki), badanych noży (oznaczenie, waga przed i po pomiarach), objętość urobionej próbki, parametr C2 dla każdego noża i wartość średnią.

Na drugiej stronie karty pomiarów zamieszcza się zdjęcia każdego noża wykonane po badaniach (robi się trzy zdjęcia każdego noża co 120° względem jego osi) (rys. 9).



Rys. 6. Schemat zastosowanego układu nożowego z oznaczeniem numerów noży [8]



Rys. 7. Przykładowe noże styczno-obrotowe przygotowane do badań



Rys. 8. Wybrane noże po badaniach: a) "złoty 25"; b) "odlewany 22"; c) "napawany 25"

Nóż "handlowy 22"		Przed badaniem	Po badaniu, $V_w = 5 \text{ m}^3$							
-	Oznaczenie Oz	Oznaczenie	Masa Masa	Ubytek masy		Zdjęcia		т. г. <sup>3</sup> л		
Lp.	noża	producenta	noża <i>m</i> [g]	noża <i>m<sub>p</sub></i> [g]	$\Delta m = m - m_p [g]$	0°	120°	240°	$V_u [\mathbf{m}^2]$	C2 [-]
1	1	_	1830,14	1809,69	20,45	1-I	1-II	1-III	0,0539	1,036
2	2	-	1828,49	1795,85	32,64	2-I	2-II	2-III	0,0539	1,655
3	3	-	1828,80	1792,85	35,95	3-I	3-II	3-III	0,0539	1,822
4	4	_	1828,40	1793,48	34,92	4-I	4-II	4-III	0,0539	1,771
Średnia parametru względnego ubytku masy noża C2:						C2: 1	,571			

Tabela 1 Zestawienie wyników badań oraz wyznaczonych parametrów dla noży "handlowy 22"





Rys. 9. Zdjęcia noży "handlowy 22" po badaniach wykonane co 120° względem osi noża

# 5. OCENA TRWAŁOŚCI BADANYCH NOŻY

W ramach realizacji badań szybkości zużycia (trwałości) noży styczno-obrotowych przeprowadzono osiem prób skrawania nożami. W wyniku przeprowadzonych badań oraz stosownych obliczeń opracowano wyniki. Na podstawie ich analizy można stwierdzić, że noże oznaczone jako "złoty 25" oraz "handlowy 22" i "handlowy 25" charakteryzowały się najmniejszą szybkością zużycia.

Poniżej przedstawiono uwagi dotyczące poszczególnych noży:

- "handlowy 22" i "handlowy 25" (noże fabryczne) uzyskały bardzo dobry rezultat,
- "napawany 22" i "napawany 25" pomimo zastosowania napawania laserowego uzyskały rezultat nieznacznie gorszy od noża handlowego, który wykorzystano do ich wykonania,
- "złoty 25" uzyskały najlepszy rezultat, jednak zastosowanie powłoki z azotku tytanu zwiększyło jedynie nieznacznie ich wytrzymałość na zużycie ścierne,
- "srebrny 22" pomimo zastosowania specjalnej obróbki korpusu (nie ujawniono, na czym polegał przeprowadzony proces) uzyskały rezultat nieznacznie gorszy od noża handlowego, który wykorzystano do ich wykonania,
- "odlewany 22" nóż odlewany, toczony po odlaniu do wymaganych wymiarów, korpusy noży pękły po umieszczeniu węglika spiekanego, noże na pozycji 2 i 3 zostały wyłamane podczas badań,
- "ceramiczny" nóż odlewany, toczony po odlaniu do wymaganych wymiarów, zużyły się wyjątkowo szybko pomimo czterokrotnie mniejszej objętości urobionej próbki, nóż na pozycji 2 wykruszył się, a nóż na pozycji 3 złamał się w części chwytowej.

# 6. ZAKOŃCZENIE

Jak przedstawiono w niniejszym artykule, sposobów zwiększania trwałości i zmniejszania szybkości zużycia noży styczno-obrotowych jest wiele. Obecnie najbardziej popularne i przynoszące najlepsze efekty jest napawanie części roboczej warstwą odporną na ścieranie. Jednakże, jak wynika z przeprowadzonych badań, nie zawsze jest to najlepsze rozwiązanie. Dodatkowo można stwierdzić, że nawet najlepsza powłoka ochronna nie spełni swojej funkcji, jeśli nóż lub jego ostrze będzie wykonany ze słabej jakości materiału.

Na pewno celowe jest dalsze prowadzenie prób dla zwiększenia trwałości noży, gdyż ma ona bardzo duży wpływ na obniżenie kosztów eksploatacji, a tym samym cen wydobywanych surowców.

#### Literatura

- [1] Krauze K.: Urabianie skał kombajnami ścianowymi, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [2] Krauze K., Klempka R., Mucha K.: Computer aided design of cutting heads, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 4: 22–32.
- [3] Krauze K., Mucha K.: Zwiększenie odporności na zużycie ścierne noży kombajnowych, "Przegląd Górniczy" 2016, 1: 63–67.
- Jonak J.: Urabianie skał głowicami wielonarzędziowymi, Wydawnictwo Naukowe Śląsk, Katowice 2002.
- [5] Kotwica K.: Effect of selected working conditions of cutting picks on their wear during the mining of hard rocks, "Quarterly Mechanics and Control" 2010, 29, 3: 110–119.
- [6] Bołoz Ł.: Ocena obciążenia jednoorganowego kombajnu ścianowego na podstawie badań analitycznych [praca doktorska], Kraków 2012.
- [7] Kotwica K., Gospodarczyk P.: Hard Rock Mining with use of New Cutting Tools, "Journal of Mining Sciences" 2003, 39, 4: 387–393.
- [8] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: Parametric factors for the tangential – rotary picks quality assessment, "Archives of Mining Sciences" 2015, 60, 1: 265–281.
- [9] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: Ocena jakości noży stycznoobrotowych na podstawie badań laboratoryjnych, "Mechanizacja, Automatyzacja i Robotyzacja w Górnictwie: monografia 2012", Lędziny 2012.
- [10] Krauze K., Skowronek T., Mucha K.: Influence of the hard faced layer welded on tangential – rotary pick operational part on to its wear rate, "Archives of Mining Sciences" 2016, 61, 4: 779–792.
- [11] Sandvik Coromant: http://www.sandvik.coromant.com [dostęp: 24.04.2017].
- [12] Kotwica K.: The influence of water assistance on the character and degree of wear of cutting tools applied in roadheaders, "Archives of Mining Sciences" 2011, 56, 3: 353–374.

prof. dr hab. inż. KRZYSZTOF KRAUZE dr inż. ŁUKASZ BOŁOZ dr inż. TOMASZ WYDRO mgr inż. KAMIL MUCHA Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki AGH Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków {krauze, boloz, wydro, kmucha}@agh.edu.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.77

SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN PIOTR WOJTAS ARTUR KOZŁOWSKI

# Kontrola operacyjna w informacyjnym systemie zarządzania zgrzewaniem doczołowym szyn realizowana w czasie rzeczywistym

Kontrola operacyjna jakości zgrzewania szyn jest zasadniczym elementem kontroli procesu całego procesu technologicznego produkcji szyn. W praktyce do tego celu stosowane są systemy działające w czasie rzeczywistym. W artykule zaproponowano nową metodę, która stosuje logikę rozmytą do analizowania danych pochodzących z testów mechanicznych połączeń oraz inspekcji ultradźwiękowej połączeń.

Słowa kluczowe: logika rozmyta, spawanie, kontrola operacyjna

## 1. WPROWADZENIE

Monitorowanie procesów produkcji składa się z kontroli wkładu, kontroli operacyjnej i kontroli przyjęcia. Kontrola wkładu to kontrola produktu, który dociera do konsumenta i jest przewidziany do użycia w procesie produkcji. Materiały wykorzystane przy produkcji muszą być sprawdzone. Kontrola operacyjna to kontrola produktu lub procesu, który odbywa się podczas realizacji określonych działań lub po ich zakończeniu. Kontrola przyjęcia jest kontrolą produktu finalnego. W jej wyniku zapada decyzja o zgodności produktu z normami i wymaganiami użytkowymi oraz o dostarczeniu produktu do konsumenta. Wyniki kontroli przyjęcia służą identyfikacji tych wad produktu, które nie zostały zidentyfikowane w trakcie kontroli operacyjnej oraz wprowadzeniu ewentualnych koniecznych zmian.

Zgrzewanie doczołowe iskrowe jest procesem o wielu zmiennych, w którym można wskazać różne fazy i zmiany napięcia, prądu, przemieszczenia, prędkości, oporu i energii (rys. 1). Aby uzyskać maksimum informacji o naturze i przebiegu procesu zgrzewania doczołowego iskrowego oraz by poznać jego cechy, przeprowadzono ciągłą rejestrację tych parametrów na etapie opracowania technologii zgrzewania doczołowego iskrowego [1]. Informacja ta użyta została przez konstruktorów do udoskonalenia procesu zgrzewania, jednak nie posłużyła jako źródło oceny jakości zgodnie z dokumentami normatywnymi.



Rys. 1. Proces zapisywania procesu zgrzewania doczołowego iskrowego szyn na maszynie K1000.  $U_1$  i  $I_1$  – napięcie i prąd zgrzewania na wejściu transformatora, L – liczba przemieszczeń części zgrzewanych (próbka stopionego metalu i spęczanie)

W wyniku eksperymentów zidentyfikowano zależności jakościowe poprzez zmiany niektórych parametrów zgrzewania, jak też zbadano wpływ tych parametrów na zmianę struktury spawów. W wyniku tych działań informacja o zmianie jakichkolwiek parametrów może być użyta do oceny ilościowej tego wpływu. Jakość spawów określona jest tolerowanymi odstępstwami głównych parametrów, zapisanymi w warunkach technicznych produktów spawanych (tab. 1). Można było zatem przeprowadzić kontrolę działania procesu rejestracji oraz porównanie tych parametrów w czasie rzeczywistym w celu natychmiastowego określenia parametrów wyjściowych warunków tolerancji, a także zmniejszyć prawdopodobieństwo uzyskania zgrzewu o niskiej jakości [1].

#### Tabela 1

Tolerowane odstępstwa od podstawowych parametrów zgrzewania doczołowego iskrowego na maszynach mobilnych, takich jak K900, K920, K922 (szyny typu P65, UIC60) oraz na maszynie stacjonarnej K1000 (szyny typu P50, P65, P75, UIC60)

Parametry zgrzewania	Wartości parametrów
Ciśnienie spęczania [MPa]	9–12
Prędkość spęczania [mm/s]	nie mniej niż 20 / 30
Prędkość topnienia [mm/s]	0,065–0,20 / 0,07–0,20
Prędkość w chwili zakończenia topnienia [mm/s]	0,7–2,5
Napięcie wejściowe transformatora zgrzewającego [V]: – zwojenie pierwotne – zwojenie wtórne	355–440 250–360
Naddatek topnienia [mm]	9–18
Naddatek spęczania [mm]	11,5–17 / 12–18

## 2. KONTROLA POŁĄCZEŃ

Kontrola przyjęcia spawów opiera się na inspekcji ultradźwiękowej oraz testach mechanicznych próbek szyn, regularnie w trakcie procesu zgrzewania. Kontroli dokonuje się na zgodność z warunkami technicznymi (obciążenie stopki szyny co najmniej 1400 kN przy odchyleniu co najmniej 30 mm według norm ukraińskich oraz odpowiednio 1600 kN i 20 mm według norm Unii Europejskiej). Testy akceptacyjne mogą być również użyte to skorygowania ustalonych wartości tolerancji. Główną wadą takiego rodzaju kontroli wartości tolerancji jest to, że nie bierze ona pod uwagę następujących czynników:

- istotnej roli wpływu parametrów pojedynczych i ich kombinacji w celu oszacowania jakości spawu,
- rozmieszczenia parametrów procesu w zakresie wartości tolerancji,
- zatarcia granic tolerancji.

Biorąc to pod uwagę, w celu oceny jakości spawów (test wytrzymałości spawów oraz wartości zgięcia), opracowano algorytm sterowania na podstawie logiki rozmytej. Z powodu złożoności procesu zgrzewania doczołowego iskrowego nie można było stworzyć modelu analitycznego, statystycznego czy innego modelu numerycznego. Ocena jakości spawu, z określonym poziomem prawdopodobieństwa, oparta jest na regułach logicznych zawartych w studium na temat technologicznych właściwości zgrzewania doczołowego iskrowego.

Oto niektóre z tych reguł [1, 2]:

- im wyższa samoregulacja, tym wyższa stabilność topnienia;
- im wyższa stabilność topnienia, tym niższa intensywność niszczenia styków spawanych;
- im niższy opór zwarciowy maszyny spawalniczej Z<sub>sc</sub>, tym wyższa samoregulacja (wyższa stabilność topnienia) i może dojść do zmniejszenia napięcia topnienia U<sub>me</sub>.

Pole temperatury w zgrzewanym produkcie określić można za pomocą współczynnika wydatkowanej energii Q oraz wartości próbki stopionego metalu L (tab. 2).

Na tej podstawie i na podstawie podobnych reguł opracowano oparte na logice rozmytej zasady oceny jakości połączeń spawanych.

Aby uwzględnić granice rozmycia dopuszczalnych odchyleń konwersji wartości parametrów procesu, użyto ich zgodnie z wartościami tolerancji specyfikacji w liczbie bezwymiarowej - stopień jej zgodności według specyfikacji parametrów w warunkach technicznych. Funkcje przekształceń, które mogą przybierać różne kształty, przedstawiono w formie trapezu (rys. 2). Tak więc w środku tej tolerancji  $X_{av} \pm \Delta X$ , gdzie  $X_{av}$  – wartość średnia oraz  $\Delta X = 1/6(X_{\text{max}} - X_{\text{min}})$ , funkcja przynależności specyfikacji parametru jest równa 1, a następnie, w zakresie tolerancji, zmniejsza się liniowo do zera. Zależności logiczne od efektu jakościowego parametrów procesu zgrzewania oporowego doczołowego opracowano na podstawie wniosków technologicznych, które biorą pod uwagę zarówno względny wpływ na proces, jak i lokalizację parametrów w strefie tolerancji.

#### 79

#### Tabela 2

Ocena pola temperatury w zależności od błędów odtwarzania danej energii Q oraz wartości próbki topionego metalu L, TF – pola temperatury (oh – przegrzanie, lh – niedogrzanie)

TF	Duży błąd ujemny L	Mały błąd ujemny <i>L</i>	Wartość nominalna <i>L</i>	Mały błąd dodatni <i>L</i>	Duży błąd dodatni <i>L</i>
Duży błąd ujemny $Q$	złe TF	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)
Mały błąd ujemny $Q$	złe <i>TF</i> (oh)	normalne TF	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)
Wartość normalna Q	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	normalne TF	złe <i>TF</i> (lh)	złe <i>TF</i> (lh)
Mały błąd dodatni $Q$	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	normalne TF	złe <i>TF</i> (lh)
Duży błąd dodatni $Q$	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	złe <i>TF</i> (oh)	normalne TF



Rys. 2. Funkcja konwersji rozmytej zgrzewania oporowego czołowego w celu kontroli jakości połączeń spawanych

Ocena jakości zgrzewania przeprowadzana jest więc w wyniku analizy parametrów na trzech etapach procesu: topnienie próbek metalu – utworzenie pola temperatury na końcach zgrzewanych produktów, końcowy etap topnienia próbek metalu – utworzenie środowiska ochronnego w przerwie iskrowej oraz spęcznienie – utworzenie związków chemicznych w fazie stałej. Wynik określany jest przez stopień wiarygodności opcji dopasowania na tych etapach specyfikacji tolerancji oraz, co za tym idzie, prawdopodobieństwa uzyskania styku spawanego odpowiadającego warunkom technicznym.

W następnym etapie te wyrażenia logiczne zostały przetworzone za pomocą znanych reguł na formę dogodną do implementacji na komputerze. Oprócz wyjaśnienia kwestii tolerancji rozwijany algorytm sterowania może być aktualizowany zgodnie z wynikami porównania jego oceny dotyczącej akceptacji danych przez adaptację algorytmów i sieci neuronowych [4–7].

# 3. SYSTEM ZARZĄDZANIA

Informacje na temat parametrów procesu oraz opinia o ich zgodności z warunkami technicznymi, w formie protokołu, stanowią kluczowy zestaw danych o procesie zgrzewania. Dane te są przechowywane przez cały czas realizacji procesu zgrzewania na liniach kolejowych i zawierają duże ilości informacji. Informacje te, razem z certyfikatem zgodności produktu, mogą być używane do wykrywania zakłóceń procesu zgrzewania, lecz nie są mierzalne za pomocą metod bezpośrednich. Takie metody przetwarzania danych, nazywane eksploracją danych, używane są do wykrywania wcześniej nieznanych danych (Wikipedia: https://pl.wikipedia.org/wiki/Eksploracja\_danych).

Użycie znanych metod przetwarzania danych statystycznych na temat styków, zbieranych przez konkretne okresy na tej samej maszynie, w tym samym zakładzie zgrzewającym szyny lub w całej branży przemysłowej pomagają zoptymalizować warunki obsługi maszyn spawalniczych oraz zarządzanie procesem produkcji szyn zgrzewanych.

W tym celu w Instytucie Paton we współpracy z Instytutem Technik Innowacyjnych EMAG z Katowic opracowano dwupoziomowy system zarządzania informacją (rys. 3). Na niższym poziomie cyfrowy system sterowania używa tradycyjnej kontroli jakości połączeń spawanych w celu natychmiastowej reakcji na zespolenie i zapobiega jego dalszemu rozpowszechnianiu.

Następnie informacje o stykach spawanych przekazywane są z maszyny zgrzewającej w fabryce na wyższy poziom – do centrum diagnostycznego. Centrum to przeprowadza statystyczne przetwarzanie protokołów ze zgrzewania szyn, tak aby wykryć zakłócenia, które trudno kontrolować za pomocą bezpośrednich pomiarów. Na przykład słaba realizacja działań pomocniczych w zakresie przygotowania szyn przed procesem zgrzewania, odchylenia od fizykochemicznych własności szyn metalowych, słabe przygotowanie technologiczne personelu obsługi technicznej, złe warunki produkcji.

Oprócz bezpośredniej kontroli cyfrowej procesu zgrzewania, istniejące lokalne systemy sterowania oferują następujące funkcje:

- przewidywanie jakości połączeń spawanych dla bardziej zaawansowanych algorytmów z możliwością użycia usług profesjonalistów w szczególnych przypadkach;
- monitorowanie warunków technicznych sprzętu zgrzewającego oraz tworzenie rekomendacji i planowania w zakresie utrzymania systemu;
- identyfikacja i rozpoznanie sytuacji alarmowych w celu przeprowadzenia natychmiastowej interwencji w procesie;
- identyfikacja odchyleń systemowych i trendów w parametrach procesu zgrzewania, które mogą prowadzić do pogorszenia jakości spawów, tworzenie rekomendacji do dostosowania parametrów zgrzewania.



Rys. 3. Schemat blokowy dwupoziomowego systemu zarządzania informacją

W przypadku zgrzewania doczołowego iskrowego na maszynach stacjonarnych i przenośnych następujące czynniki mogą powodować odchylenia w procesie produkcji i tym samym naruszenie jakości połączeń spawanych [1, 2]:

- słaba realizacja działań pomocniczych przeprowadzanych na szynach przed rozpoczęciem zgrzewania takich jak: przygotowanie końców, oczyszczanie powierzchni szyn, działania w zakresie zasilania prądem oraz postępowanie ze spawami po zgrzewaniu – obróbka powierzchni szyn w trakcie stępiania ostrych krawędzi;
- pogorszenie stanu technicznego sprzętu zgrzewającego, na przykład wzrost oporu w maszynie spawalniczej;
- 3) wady metalu, z którego odlana jest szyna;
- słaba praktyka technologiczna spawacza (ułożenie szyn przed zgrzewaniem);
- niezadowalające warunki produkcji, na przykład niepożądane zmiany w napięciu zasilania;
- 6) niekorzystny układ parametrów procesu, nawet jeżeli parametry są w granicach tolerancji, na przykład obniżenie napięcia zasilania i zwiększenie oporu maszyny spawalniczej.

W celu identyfikacji opisanych zakłóceń następuje przetwarzanie protokołów dotyczących spawów za pomocą metod statystycznych oraz ich grupowanie według odpowiednich cech (tab. 3). Podczas zgrzewania, w czasie rzeczywistym generowane są następujące informacje (rys. 4):

- Wskaźnik jakości połączenia spawanego (prawdopodobieństwo zgodności z wymaganiami specyfikacji) obliczany jest po zgrzaniu połączenia na zmierzonych wartościach procesu zgrzewania przy użyciu algorytmu sterującego opartego na logice rozmytej [4–7]. Dane dotyczące numeru maszyny spawalniczej, nazwiska spawacza, inżyniera oraz członków zespołu do działań pomocniczych (przygotowanie szyn przed zgrzewaniem i obróbka styków spawanych po zgrzewaniu) zostały odpowiednio zgrupowane.
- 2) Pęknięcia, brak połączenia, matowe plamy itp. sprawdzane są za pomocą inspekcji ultradźwiękowej dla każdego styku spawanego. Dane te są zapisywane w bazie danych inspekcji. Wizualnie sprawdza się również jakość obróbki styku po stępieniu ostrych krawędzi. Informacja o wyżej wymienionych defektach oraz o błędnym interfejsie przetwarzania jest natychmiast dostępna dla spawaczy i brygadzisty. Wadliwy styk jest wycinany. Funkcje te są realizowane poza kontrolą systemu. Dane z inspekcji wprowadzane są ręcznie.
- Na początku, w środku i na zakończenie dnia pracy przeprowadza się testy mechaniczne wybranych zespawanych szyn. Dane testowe odchylenia L<sub>de</sub> i wytrzymałości F<sub>b</sub> są porównywane z określonymi

Tabela 3	Tabela	3
----------	--------	---

Lp.	Przyczyna naruszenia procesu zgrzewania doczołowego iskrowego szyn	Identyfikacja parametrów	Wielkość próbki	Grupy parametrów	Efekty parametryczne
1	działania pomocnicze: przygotowawcze przed zgrzewaniem oraz po zakończeniu procesu zgrzewania	Z <sub>sc</sub> , przetwarzanie danych wizualnych po zgrzewaniu	1–2 dni robocze	nazwisko kierownika + nazwa zgrzewarki	metody i sprzęt
2	stan techniczny sprzętu zgrzewającego	$T_w, U_1, U_2, V_{me}, V_f, \\V_{up}, L_o, L_{up}, Z_{sc}$	1/3–1 miesiąc	numer maszyny	utrzymanie, naprawa
3	właściwości fizykochemiczne szyn metalowych	<i>L<sub>de</sub></i> , <i>F<sub>b</sub></i> , inspekcja danych	natychmiast po wykryciu lub 1 dzień roboczy	numer partii, znak szyny, numer maszyny	korekta trybu zgrzewania
4	działania techniczne spawaczy	<i>T<sub>w</sub></i> , <i>T</i> pomiędzy zgrzewaniem, <i>Z<sub>sc</sub></i> , opóźnienie	natychmiast po wykryciu lub 1 dzień roboczy	nazwisko spawacza	metody (instrukcje produkcyjne)
5	kontrola procesowa zgrzewanych próbek i inspekcja ultradźwiękowa	L <sub>de</sub> , F <sub>b</sub> , dane inspekcji ultradźwiękowej	1 dzień roboczy	nazwisko spawacza nazwisko radiografa	metody i sprzęt
6	warunki produkcji	$U_1, U_2, V_{me}, V_f, V_{up}$	1–2 miesiące	zakład spawalniczy	stabilizacja U <sub>ps</sub> lub T <sub>oil</sub>
7	niepożądana kombinacja parametrów procesu	kontrola rozmyta i monitoring	natychmiast po wykryciu lub 1 dzień roboczy	numer spawu	korekta trybu zgrzewania

Identyfikacja przyczyn naruszeń w procesie zgrzewania doczołowego iskrowego szyn

z góry wartościami. Jeżeli uzyskane wartości są niższe niż te określone z góry, zgrzewa się i testuje dodatkowe próbki, tak aby zidentyfikować autentyczność nieakceptowanego odstępstwa. Gdy nieakceptowane odstępstwo zostaje potwierdzone, następuje dopasowanie procesu zgrzewania. Uzyskane dane używane są do przystosowania wzorcowej kontroli jakości zgrzewania.



Rys. 4. Algorytm sterowania procesem zgrzewania szyn. Działania w wytłuszczonych polach odbywają się w trybie automatycznym

W trybie offline generowane są następujące informacje.

 Aby sprawdzić stan techniczny maszyny spawalniczej, dane z takiego samego typu szyn, zgrzewanych na tej samej maszynie, uporządkowane są według warunków technicznych maszyny (w formie protokołu). Czas reakcji i odpowiednio czas średni, mogą mieć znaczenie – od jednego do kilku dni roboczych. Oczywiście informacja na temat napraw poawaryjnych dostarczana jest bezzwłocznie.

Aby kontrolować warunki produkcji, dokonuje się oceny statystycznej zgrzewania na tym samym typie maszyny i w tej samej fabryce, a dane umieszcza się według określonego porządku. Stabilność napięcia zasilania określana jest przez napięcie  $U_1$ ,  $U_2$ . Stabilność napędu hydraulicznego, związanego z temperaturą otoczenia i jej wpływem na płyn hydrauliczny, określona jest prędkościami  $V_{me}$ ,  $V_f$ ,  $V_{up}$ . Porównanie tych szacowanych wartości w różnych zakładach spawalniczych może posłużyć jako podstawa decyzji o udoskonaleniu warunków produkcji.

Średnie i skuteczne wartości parametrów zgrzewania zostały użyte w analizie statystycznej rozkładu wartości losowych parametrów procesu zgrzewania. Aby porównać różne parametry, wartości te były następnie przedstawione w jednostkach względnych, tzw. współczynniku dokładności  $K_a$  oraz odniesienia  $K_r$  [3]:

$$K_a = 6 \cdot S/\delta; \quad K_r = (X_a - X_o)/\delta$$

gdzie:

- $S, X_a$  RMS i średnie rozkładu parametrów procesu zgrzewania,
  - $\delta$  tolerancja ustawień,
  - X<sub>o</sub> środek tolerancji lub określona wartość.

Aby przeanalizować wariancję, należy wziąć pod uwagę, że niektóre z monitorowanych parametrów (np.  $L_{me}$ ,  $U_1$ ,  $U_2$ ,  $U_3$ ,  $P_o$ ,  $T_{upI}$ ) występują bezpośrednio w systemie zarządzania i błędy związane są z działaniem sprzętu oraz szczególnie z działaniem systemów sterowania.

Inne parametry ( $V_{me}$ ,  $T_w$ ,  $V_f$ ,  $V_{up}$ ) określane są pośrednio. Błędy tych parametrów związane są zarówno ze stanem sprzętu spawalniczego, jak i z przebiegiem procesu.

Na przykład system weźmie pod uwagę dane ze wskaźnikiem dokładności  $K_a$  z dwunastu maszyn spawających w czterech zakładach spawalniczych, z około trzydziestu tysięcy styków spawanych.

Pośrednie ustawianie wartości parametrów (rys. 6) pokazuje, że w przypadku trzech urządzeń (10, 11, 12) zachodzi istotna różnica w kontekście czasu zgrzewania. Te maszyny zaliczają się do tzw. zgrzewarek i spodziewane jest przedstawienie przez nie całkowitego odchylenia w charakterystyce zgrzewania. Dodatkowa analiza przeprowadzona wprost na stanowisku wykazała różnice pomiędzy różnymi technologiami przygotowania końców szyn spawanych wcześniej przed zgrzewaniem w porównaniu z użyciem do tego innych zgrzewarek.



Rys. 5. Wskaźniki dokładności  $K_a$  parametrów  $V_{me}$ ,  $V_f$ ,  $V_{up}$ ,  $T_w$  zgrupowane według maszyn



Rys. 6. Wskaźniki dokładności Ka parametrów, zgrupowane według zgrzewarek

Wartości współczynnika  $K_a$  dla parametrów zgrupowanych według zgrzewarek pokazują, że stacje hydrauliki w różnych zgrzewarkach (parametr *Po*) różnią się pod względem warunków technicznych i wymagana jest ich dodatkowa weryfikacja (rys. 6). Oprócz kwestii technicznych algorytm zawiera kwestie organizacyjne związane z produkcją torów zgrzewanych. Musi być zaktualizowany nie tylko na eksperymentalnym systemie zarządzania, lecz przede wszystkim skorygowany w zakresie urządzeń serwisujących tory.

#### 4. PODSUMOWANIE

Kontrola jakości połączeń zgrzewanych oparta jest na kontroli operacyjnej, inspekcji ultradźwiękowej i testach mechanicznych próbek technologicznych.

Logika rozmyta jest podstawą do udoskonalenia niezawodności kontroli operacyjnej jako głównego środka do zapobiegania połączeniom w algorytmie sterującym w czasie rzeczywistym. Algorytm sterujący logiki rozmytej ustalany jest na podstawie testów mechanicznych połączeń i inspekcji ultradźwiękowej.

Opracowano dwupoziomowy system zarządzania informacją oraz przeprowadzono analizę statystyczną kontroli jakości połączeń zgrzewanych. Wyniki pokazały nowe możliwości w zakresie podwyższenia stabilności połączeń spawanych.

#### Literatura

- Jacenko S.I.: Kontaktnaja stykowaja swarka opławlenijem, Naukowa dumka, Kijew 1992.
- [2] Gielman A.S.: Osnowy swarkidawlenijem, Maszynostrojenije, Moskwa 1970.
- [3] Pustylnik Je.I.: *Statisticzeskije mietody analiza iobrabotki nabludienij*, Nauka, Moskwa 1968.
- [4] Krugłow W.W., Dli M.I.: Intiellektualnyje informacyonnyje sistiemy: kompjutiernaja poddierżka sistiem nieczetkoj logiki i nieczetkogo wywoda, Fizmatlit, Moskwa 2002.

- [5] Terano T., Asai K., Sueno M.: Applied Fuzzy Systems, AP Proffesional, London 1994.
- [6] Kosko B.: Fuzzy Engineering, Prentice-Hall, Upper Saddle River 1997.
- [7] Wang L.X.: A course in fuzzy systems and control. Prentice--Hall, Upper Saddle River 1997.
- [8] Wojtas P., Kozłowski A.: Innowacyjne rozwiązania CNP EMAG, Sympozjum SEMAG: "Elektroenergetyka i automatyka w przemyśle wydobywczym", Szklarska Poręba 2013.

SERGEI IVANOWICH KUCHUK-YATSENKO PIOTR MIKHAILOVICH RUDENKO VALERY SEMIONOVICH GAVRYSH ALEXANDR VLADIMIROVICH DIDKOVSKY VALENTINA IVANOVNA SHVETS EVGENI VALENTINOVICH ANTIPIN The E. O. Paton Electric Welding Institute of the NAS of Ukraine, ul. Kazimir Malevich 11, 03680 Kijów, Ukraina office@paton.kiev.ua

> dr inż. PIOTR WOJTAS KZESO MACHINERY sp. z o.o. ul. Karoliny 4, 40-186 Katowice piotr.wojtas@kzeso.pl

dr inż. ARTUR KOZŁOWSKI Instytut Technik Innowacyjnych EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice A.Kozłowski@ibemag.pl

http://dx.doi.org/10.7494/miag.2017.1.529.85

SŁAWOMIR CHMIELARZ TOMASZ MOLENDA PIOTR SZYMAŁA WOJCIECH KORSKI

# Warunki stosowania izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych

Artykuł przedstawia zagadnienia związane z zastosowaniem separacji galwanicznej obwodów cyfrowych realizowanej poprzez zastosowanie nowoczesnych izolatorów cyfrowych w aplikacjach iskrobezpiecznych. Odniesiono się do wymagań odpowiednich norm i dyrektyw oraz przedstawiono ich interpretację. Określono ograniczenia związane ze stosowaniem izolatorów cyfrowych w obwodach iskrobezpiecznych.

Słowa kluczowe: separacja galwaniczna, izolatory cyfrowe, aplikacje iskrobezpieczne

## 1. WSTĘP

Wśród elementów pozwalających realizować separację galwaniczną sygnałów transmisji cyfrowej stosunkowo niedawno - po 2000 roku - zostały wprowadzone na rynek elementy funkcjonujące z wykorzystaniem sprzężenia pojemnościowego albo indukcyjnego. Istotną innowacją było w nich zintegrowanie w jednym elemencie scalonym interfejsów wejścia/wyjścia o typowych poziomach logicznych CMOS wraz z układami współpracującymi z elementem sprzęgającym i samego elementu sprzęgającego. Najistotniejszymi zaletami tych elementów są ich bardzo duże szybkości pracy przy stosunkowo niewielkim - w porównaniu z innymi sposobami realizacji separacji - zapotrzebowaniu na energię oraz małe rozmiary. Prekursorami, jak również obecnymi liderami w dziedzinie rozwoju tego rodzaju elementów, są dwie firmy: Analog Devices, oferująca separatory w technologii iCoupler® [1] wykorzystującej sprzężenie indukcyjne, oraz Texas Instruments, oferująca separatory w technologii ISO [2] wykorzystującej sprzężenie pojemnościowe. Wykorzystanie elementów separujących w aplikacjach iskrobezpiecznych uwarunkowane jest spełnieniem wymagań określonych we właściwych normach. Zastosowanie środków pozwalających spełnić te wymagania w przypadku opisywanych elementów implikuje ich pracę w nietypowych warunkach. Skutkuje to częściową i zależną od stopnia odstępstwa od warunków nominalnych degradacją funkcjonalności (zwłaszcza maksymalnej szybkości pracy) [3].

# 2. ODNIESIENIE DO WARUNKÓW WYMAGANYCH DO SPEŁNIENIA NORM I DYREKTYW

Dla rozwiązań iskrobezpiecznych separatorów rozdzielających szybkie iskrobezpieczne interfejsy wymiany danych, pracujących w strefach zagrożonych wybuchem muszą być spełnione wymagania następujących aktów prawnych:

- Dyrektywy Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/ 34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej, która obowiązuje od 20 kwietnia 2016 r.;
- norm budowy przeciwwybuchowej:
  - PN-EN 60079-0:2013 03 + A11:2014-03: *Atmosfery wybuchowe – Część 0: Urządzenia – Podstawowe wymagania* [4].
  - PN-EN 60079-11:2012: Atmosfery wybuchowe

     Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i" [5].
  - PN-EN 60079-25:2011+AC:2014-08: Atmosfery wybuchowe – Część 25: Systemy iskrobezpieczne [6].

Podstawą stosowania izolatorów cyfrowych w układach iskrobezpiecznych jest interpretacja punktu 8.9 *Elementy oddzielające galwanicznie* normy PN-EN 60079-11:2012:

#### 8.9.1. Postanowienia ogólne

"Nieuszkadzalny element izolujący, odpowiadający poniższym wymaganiom, należy uznać za odporny na uszkodzenie, polegające na zwarciu nieuszkadzalnego oddzielenia izolacyjnego".

#### oraz

punktu 8.9.3 Elementy izolujące pomiędzy poszczególnymi obwodami iskrobezpiecznymi

"(…) Elementy izolujące powinny być brane pod uwagę jako zapewniające nieuszkadzalne oddzielenie oddzielnych obwodów iskrobezpiecznych, jeżeli są spełnione następujące warunki:

- a) wartości znamionowe elementu powinny być zgodne z 7.1 (z dającymi się zastosować wyjątkami niniejszego rozdziału), chyba że można wykazać, że jest niemożliwe, by obwody przyłączane do tych zacisków zaszkodziły nieuszkadzalności elementów izolujących. Sposoby zabezpieczania (takie jak wskazane w 8.9.2) mogą być niezbędne, aby uniknąć przekroczenia wartości znamionowych elementów izolujących;
- b) elementy powinny spełniać wymagania dotyczące wytrzymałości elektrycznej izolacji, zgodnie z 6.3.13. Znamionowe napięcie izolacji podane przez producenta elementu zapewniającego nieuszkadzalne oddzielenie nie powinno być mniejsze od napięcia próby wymaganego w 6.3.13 (...)".

Ważnym odniesieniem punktu 8.9.3 do punktu 6.3.13 *Wymagania odnośnie wytrzymałości elektrycznej* tej samej normy jest:

"Izolacja pomiędzy obwodem iskrobezpiecznym a korpusem urządzenia elektrycznego lub częściami, które mogą być uziemione, winna w normalnych warunkach wytrzymywać próbę napięciową, opisaną w punkcie 10.3 niniejszej normy, wykonaną przy użyciu napięcia przemiennego o wartości skutecznej dwa razy wyższej od napięcia obwodu iskrobezpiecznego, bądź przy użyciu napięcia o wartości 500 V, w zależności od tego, która z tych wartości jest większa. Jeśli obwód nie spełnia tego wymagania, urządzenie powinno być oznaczone symbolem "X", a w dokumentacji winna być zawarta niezbędna informacja odnośnie prawidłowej instalacji urządzenia. (...)

W sytuacji, w której przebicie pomiędzy oddzielnymi obwodami iskrobezpiecznymi mogłoby spowodować zagrożenie, izolacja, znajdująca się pomiędzy tymi obwodami, winna wytrzymywać napięcie probiercze o warto-

# ści skutecznej równej 2 U, lecz nie mniejszej niż 500 V, jeśli U jest sumą wartości skutecznych napięć tychże obwodów".

Izolatory w technologii *i*Coupler® oraz ISO mają dużą wytrzymałość elektryczną, jest ona zamieszczona w kartach katalogowych podstawowych wersji izolatorów oraz przedstawiona w tabeli 1. Izolatory zrealizowane w wymienionych technologiach posiadają nie mniejsze napięcia próby niż w wersjach podstawowych i spełniają powyższe wymagania.

## Tabela 1

### Wytrzymałość elektryczna izolatorów [7, 8]

Producent/ Technologia	Analog Devices/ <i>i</i> Coupler®	Texas Instruments/ ISO
Układ	ADuM 1100	ISO 721
Bezpieczeństwo i potwierdzenia zgodności	VIORM = 560 V peak 2500 V rms przez 1 minutę bez awarii wg UL 1577 Izolacja podstawowa 4000 V peak	VIORM = 560 V peak 2500 V rms przez 1 minutę bez awarii wg UL 1577 Izolacja podstawowa 4000 V peak

Należy zwrócić uwagę, że w przeciwieństwie do punktu 8.9.3 odnoszącego się do elementów izolujących różne obwody iskrobezpieczne, w punkcie 8.9.2 *Elementy izolujące pomiędzy obwodami iskrobezpiecznymi a obwodami nieiskrobezpiecznymi* istnieje zapis: "Następujące wymagania mają zastosowanie do elementów izolujących:

 a) Wymagania według Tablicy 5 należy również stosować do elementu izolującego z tym wyjątkiem, że wewnątrz uszczelnionych elementów, na przykład transoptorów, kolumny 5, 6 i 7 nie mają zastosowania. Jeżeli korzysta się z Tablicy F.1, kolumna 2 nie ma zastosowania".

Na podstawie powyższych zapisów w normach można stosować izolatory cyfrowe do separacji galwanicznej pomiędzy obwodami iskrobezpiecznymi.

Słuszność powyższej interpretacji wymagań potwierdzają również pracownicy jednostek notyfikowanych do dyrektywy ATEX, którzy zapoznali się z dokumentacjami urządzeń, w których zastosowano izolatory cyfrowe i wydali w tej sprawie pozytywne opinie.

# 3. OGRANICZENIA PARAMETRÓW IZOLATORA

Karty katalogowe izolatorów cyfrowych typu *i*Coupler® firmy Analog Devices oraz typu ISO firmy Texas Instruments zawierają ograniczenia poszcze-



Rys. 1. Schemat obwodu czterokanałowego izolatora ADuM141 w aplikacji iskrobezpiecznej

gólnych parametrów pracy tych elementów, warunkujące ich bezpieczne stosowanie:

- 1) moc wydzielona w obudowie,
- 2) lub prąd zasilania stron pierwotnej i wtórnej,
- oraz prąd w linii transmisyjnej izolatora stron pierwotnej i wtórnej.
- napięcie zasilania, napięcie na wejściu, napięcie na wyjściu.

Ogólny przykład układu spełniającego powyższe ograniczenia dla aplikacji iskrobezpiecznej dla separatorów Analog Devices przedstawiono na rysunku 1 (analogiczną interpretację można przedstawić dla separatorów Texas Instruments).

W układzie prezentowane są dwa alternatywne w zależności od miejsca ich zastosowania sposoby ograniczenia mocy wydzielonej (prądu zasilania) przez zastosowanie rezystorów Rz s1 (Rz s2). Maksymalna całkowita moc wydzielona w izolatorze  $P_{\max}IC(T_a)$ w odniesieniu do temperatury otoczenia wynosi:

$$P_{\max}IC(T_a) = P_{\max}s1(T_a) + P_{\max}s2(T_a)$$

gdzie:

 $P_{\max}s1(T_a) - \mod dostarczona do izolatora od strony pierwotnej,$ 

 $P_{\max}s2(T_a) - \mod doitadoira do izolatora od strony wtórnej.$ 

Po stronie pierwotnej moc dostarczona do układu wynosi:

$$P_{\max}s1(T_a) = \frac{Uz^2[DZ(s1)]_{\max}}{4 \cdot Rz(s1)_{\min}} + \sum_{i=n}^{i=1} \frac{Ui_{\max}^2(s1)}{4 \cdot Rch_n(s1)_{\min}}$$

gdzie:

 $Uz[DZ(s1)]_{max}$  – maksymalne napięcie zasilania strony pierwotnej,

- Rz(s1)<sub>min</sub> minimalna rezystancja szeregowa zasilania strony pierwotnej,
- *Ui*<sub>max</sub>(*s*1) maksymalne napięcie wejściowe na *n*-tym kanale izolatora strony pierwotnej,
- $Rch_n(s1)_{min}$  minimalna rezystancja szeregowa na *n*-tym kanale izolatora.

Analogicznie po stronie wtórnej moc dostarczona do układu wynosi:

$$P_{\max}s2(T_a) = \frac{Uz^2[DZ(s2)]_{\max}}{4 \cdot Rz(s2)_{\min}} + \sum_{i=n}^{i=1} \frac{Ui_{\max}^2(s2)}{4 \cdot Rch_n(s2)_{\min}}$$

gdzie:

- *Uz*[*DZ*(*s*2)]<sub>max</sub> maksymalne napięcie zasilania strony wtórnej,
  - Rz(s2)<sub>min</sub> minimalna rezystancja szeregowa zasilania strony wtórnej,

Rch\_n(s2)<sub>min</sub> – minimalna rezystancja szeregowa na *n*-tym kanale izolatora strony wtórnej.

# 3.1. Ograniczenie maksymalnej całkowitej mocy wydzielonej w obudowie izolatora

Maksymalna całkowita moc wydzielona w izolatorze  $P_{\text{max}}IC(T_a)$  w odniesieniu do temperatury otoczenia pracy ( $T_a$ ) nie powinna przekraczać:



Rys. 2. Zależność wartości granicznej bezpieczeństwa mocy od temperatury otoczenia według DIN V VDE V 0884-10 na przykładzie izolatora czterokanałowego ADuM14x dla obudowy RW-16 Wide Body [SOIC\_W] [9]

Dla  $T_a \leq 25^{\circ}$ C

$$P_{\max}IC(T_a) = P_{TPD_{\max}}$$

Dla  $25^{\circ}$ C  $< T_a \le 150^{\circ}$ C z równania prostej na podstawie charakterystycznych dwóch punktów dla tego przypadku (150°C, 0 W; 25°C, 2,78 W).

$$P_{\max}IC(T_a) = \frac{(P_{TPD\_Tj\max} - P_{TPD\_max}) \cdot (Ta - Tj_{TPD\_max}) + P_{TPD\_max} \cdot (Tj_{\max} - Tj_{TPD\_max})}{Tj_{\max} - Tj_{TPD\_max}}$$

gdzie:

- *P<sub>TPD\_Tj</sub>* max maksymalna moc, jaką można wydzielić przy maksymalnej temperaturze złącza (typowo 0 mW),
- *P<sub>TPD\_max</sub>* maksymalna moc, jaką można wydzielić w temperaturze pokojowej (typowo w 25°C),
  - Ta zakładana temperatura pracy,
- *Tj<sub>TPD\_max</sub>* maksymalna temperatura złącza, przy której można wydzielić maksymalną moc (typowo 25°C),
  - *Tj*<sub>max</sub> maksymalna temperatura złącza (typowo 150°C).

# 3.2. Ograniczenie maksymalnego prądu zasilania strony pierwotnej i wtórnej



Rys. 3. Zależność wartości granicznych bezpieczeństwa prądu zasilania (Is1, Is2) od temperatury obudowy według DIN V VDE V 0884-10 na przykładzie izolatora trzykanałowego ADuM130x [10]

W analogiczny sposób jak w punkcie 3.1 z równania prostej na podstawie charakterystycznych dwóch punktów wyznaczana jest wartość prądu zasilania każdej strony w odniesieniu do temperatury obudowy, stanowiąca bezpieczną wartość graniczną. Wartością krytyczną temperatury obudowy jest temperatura złącza.

# 3.3. Ograniczenie maksymalnego prądu w linii transmisyjnej izolatora strony pierwotnej i wtórnej

Wartość ograniczonego maksymalnego prądu w linii transmisyjnej izolatora odpowiedniej strony ( $I_{o1}$ ,  $I_{o2}$ ) należy odnieść do zależności wartości granicznych bezpieczeństwa od temperatury.

Parametr	Rating		
Storage Temperature ( <i>T<sub>ST</sub></i> )	–65°C to +150°C		
Ambient Operating Temperature $(T_A)^1$	–40°C to +105°C		
Ambient Operating Temperature $(T_A)^2$	–40°C to +125°C		
Supply Voltages $(V_{DD1}, V_{DD2})^3$	–0.5 V to +7.0 V		
Input Voltage $(V_{IA}, V_{IB}, V_{IC}, V_{E1}, V_{E2})^{3, 4}$	$-0.5$ V to $V_{DDI}$ +0.5 V		
Output Voltage ( $V_{OA}$ , $V_{OB}$ , $V_{OC}$ ) <sup>3, 4</sup>	$-0.5$ V to $V_{DDO}$ +0.5 V		
Average Output Current per Pin⁵			
Side 1 ( <i>l</i> <sub>01</sub> )	-23 mA to +23 mA		
Side 2 ( <i>l</i> <sub>o2</sub> )	-30 mA to +30 mA		
Common-Mode Transients <sup>6</sup>	−100 kV/µs to +100 kV/µs		

Rys. 4. Przykład definicji wartości granicznych bezpieczeństwa ( $I_{o1}$ ,  $I_{o2}$ ) ograniczenie prądu w linii transmisyjnej do wartości bezpiecznej na przykładzie izolatora trzykanałowego ADuM130x [2]

Maksymalny prąd w kanale transmisyjnej strony pierwotnej w izolatorze  $I_{max}ch_s1(T_a)$  w odniesieniu do temperatury otoczenia pracy  $(T_a)$  nie powinien przekraczać:

Dla  $T_a \le 25^{\circ}$ C

$$I_{\max}ch_s1(T_a) = I_{o1} \max$$

Dla 25°C  $< T_a \le 150$ °C z równania prostej na podstawie dwóch punktów.

$$I_{\max}ch_s1(T_a) = \frac{(I_{o1}_{Tj\max} - I_{o1}_{\max}) \cdot (Ta - Tj_{o1}_{\max}) + I_{o1}_{\max} \cdot (Tj_{\max} - Tj_{o1}_{\max})}{Tj_{\max} - Tj_{o1}_{\max}}$$

gdzie:

- *I*<sub>o1\_*Tj* max</sub> maksymalny prąd, jaki może popłynąć przy maksymalnej temperaturze złącza (typowo 0 mA),
  - $I_{o1}$ max maksymalny prąd, jaki może popłynąć w temperaturze pokojowej (typowo w 25°C),
    - Ta zakładana temperatura pracy,
- *Tj*<sub>o1\_max</sub> maksymalna temperatura obudowy, przy której może popłynąć maksymalny prąd (typowo 25°C),
  - $Tj_{\text{max}}$  maksymalna temperatura złącza (typowo 150°C).

Wówczas można określić minimalną rezystancję szeregową na *n*-tym kanale  $Rch_n(s1)_{min}$  – przykładowo dla strony pierwotnej (s1):

$$Rch_n(s1)_{\min} = \frac{Ui_{\max}(s1)}{I_{\max}ch_s1(T_a)}$$

gdzie:

Ui<sub>max</sub>(s1) – maksymalne napięcie wejściowe na *n*-tym kanale izolatora strony pierwotnej,

 $I_{\max}ch_s1(T_a)$  – maksymalny prąd w *n*-tym kanale izolatora.

Analogiczne zależności obowiązują dla strony wtórnej izolatora.

Konieczność stosowania szeregowych rezystancji ograniczających prąd i moc włączonych w linie transmisyjne jest przyczyną ograniczeń funkcjonalnych. Rezystancje te tworzą wraz z pojemnościami wejściowymi izolatorów oraz układów współpracujących z izolatorami filtry dolnoprzepustowe zniekształcające przesyłane sygnały i ograniczające maksymalne szybkości lub wpływające niekorzystnie na zależności czasowe pomiędzy przesyłanymi sygnałami.

# 3.4. Ograniczenie napięcia zasilania stron izolatora, napięć na wejściu/wyjściu

Karty katalogowe izolatorów cyfrowych definiują maksymalne napięcia zasilania oraz maksymalne napięcia na liniach transmisyjnych poszczególnych stron. W aplikacjach iskrobezpiecznych w układach bez wejściowych ograniczników napięcia jest konieczne formalne ograniczenie napięcia do wartości nie większej niż: 6,0 V dla układów w technologii ISO, 7,0 V dla układów w technologii *i*Coupler®. W przypadku zasilania w typowej aplikacji iskrobezpiecznej są stosowane zabezpieczenia w postaci równoległych ograniczników napięcia złożonych z 5% diod Zenera.

Maksymalne napięcie wynika z napięcia diody Zenera (z uwzględnieniem 5% tolerancji) z danego typoszeregu diod, które zapewnia nieprzekroczenie wartości określonych w karcie katalogowej. Maksymalne napięcie zasilania dla technologii *i*Coupler® 7,0 V w aplikacji iskrobezpiecznej Ui = 6,51 V, Uo = 6,51 V.

Maksymalne napięcie zasilania dla technologii ISO 6,0 V w aplikacji iskrobezpiecznej Ui = 5,88 V, Uo = 5,88 V.

Karty katalogowe izolatorów cyfrowych definiują maksymalne napięcia wejść i wyjść poszczególnych stron. Napięcia te nie mogą przekroczyć określonej wartości względem napięcia zasilania danej strony izolatora.

W sytuacji gdy do wejść/wyjść danej strony izolatora dołączony jest tylko obwód zasilany przez ten sam ogranicznik napięcia, który zasila izolator, i można wykazać, że napięcie na wejściach/wyjściach będzie w każdym przypadku nie większe niż napięcie zasilania izolatora, wówczas nie jest wymagane dodatkowe ograniczenie napięcia na wejściach/wyjściach izolatora. W przeciwnym razie należy zapewnić nieprzekroczenie wartości napięcia na wejściach/wyjściach względem wartości określonej w karcie katalogowej, na przykład przez zastosowanie równoległych ograniczników napięcia w postaci nieuszkadzalnych diod włączonych pomiędzy linie wejść/wyjść a zasilanie izolatora w sposób zapewniający nieuszkadzalność tych połączeń (diody Dp s1 strony pierwotnej oraz diody Dp\_s2 strony wtórnej na rysunku 1).

Doświadczenia praktyczne potwierdzają możliwość zastosowania diodowych ograniczników napięcia na liniach wejść/wyjść, jednak przy znacznym ograniczeniu maksymalnych szybkości transmisji w stosunku do danych katalogowych: do 2 Mbps w przypadku układów wykonanych w technologii iCoupler® oraz do 3,675 Mbps w przypadku układów wykonanych w technologii ISO. Dla rozwiązania z diodowymi ogranicznikami napięcia na liniach transmisyjnych dopuszczalne wartości napięć przed ogranicznikami będą uzależnione od topologii układu, wartości elementów i parametrów diod zastosowanych w ogranicznikach.

### 4. PODSUMOWANIE

W porównaniu z alternatywnymi rozwiązaniami separacji galwanicznej sygnałów cyfrowych scalone izolatory pozwalają realizować separację przy stosunkowo niewielkim zapotrzebowaniu na energię w stosunku do oferowanych szybkości transmisji i liczby separowanych kanałów. Zastosowanie ich w aplikacjach iskrobezpiecznych do separacji poszczególnych obwodów iskrobezpiecznych możliwe jest pod warunkiem spełnienia wymogów określonych w normach, przy czym zastosowane w tym celu środki i rozwiązania układowe częściowo ograniczają ich funkcjonalność i parametry separacji w odniesieniu do katalogowych. Pomimo tych niedogodności znajdują zastosowania zwłaszcza przy separacji lokalnej szybkich interfejsów o dużej liczbie linii transmisyjnych.

#### Literatura

 Scott W.: iCoupler®, Digital Isolators Protect RS-232, RS-485, and CAN Buses in Industrial, Instrumentation and Computer Applications, "Analog Dialogue" 39–10, October 2005, [online:] http://www.analog.com/library/analogdialogue/archives/ 39-10/iCoupler.pdf [dostęp 18.11.2015].

- [2] Kugelstadt T.: Industrial data-acquisition interfaces with digital isolators, "Analog Applications Journal" 3Q 2011 [online:] http://www.ti.com/lit/an/slyt426/slyt426.pdf [dostęp 18.11.2015].
- [3] Chmielarz S., Molenda T.: Modern technologies of galvanic separation of digital signals and their possible applications in intrinsically safe devices, "Mining – Informatics, Automation and Electrical Engineering" 2015, 3: 59–67.
- [4] PN-EN 60079-0:2013-03+A11:2014-03: Atmosfery wybuchowe – Część 0: Urządzenia – Podstawowe wymagania.
- [5] PN-EN 60079-11:2012: Atmosfery wybuchowe Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i".
- [6] PN-EN 60079-25:2011+AC:2014-08: Atmosfery wybuchowe Część 25: Systemy iskrobezpieczne.
- [7] Analog Devices Inc.: Data Sheet iCoupler Digital Isolator ADuM1100: rev. K 2015, [online:] http://www.analog.com/media/ en/technical-documentation/data-sheets/ADUM1100.pdf [dostęp 18.11.2015].
- [8] Texas Instruments: Data Sheet ISO72x Single Channel High-Speed Digital Isolators ISO721, ISO721M, ISO722, ISO722M SLLS629L – January 2006 – Revised October 2015, [online:] http://www.ti.com/lit/ds/symlink/iso722.pdf [dostep 18.11.2015].
- [9] Analog Devices Inc.: Data Sheet 3.0 kV RMS / 3.75 kV RMS Quad Digital Isolators ADuM140D/ADuM140E/ADuM141D/ ADuM141E/ADuM142D/ADuM142E rev. M 2016, [online:] http://www.analog.com/media/en/technical-documentation/ data-sheets ADuM140D\_140E\_141D\_141E\_142D\_142E.pdf [dostęp 29.08.2016].
- [10] Analog Devices Inc.: Data Sheet Triple-Channel Digital Isolators ADuM1300/ADuM1301 rev. K 2015, [online:] http:// www.analog.com/media/en/technical-documentation/datasheets/ADuM1300\_1301.pdf [dostęp 18.11.2015].

mgr inż. SŁAWOMIR CHMIELARZ mgr inż. TOMASZ MOLENDA mgr inż. PIOTR SZYMAŁA mgr inż. WOJCIECH KORSKI Instytut Technik Innowacyjnych EMAG ul. Leopolda 31, 40-189 Katowice {S.Chmielarz, T.Molenda, P.Szymala, W.Korski}@ibemag.pl











e-ISSN 2449-6421 ISSN 2450-7326