

2 (554) 2023

Mining

INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL



INFORMATICS
INFORMATYKA

ELECTRICAL ENGINEERING
ELEKTRONIKA

AUTOMATION
AUTOMATYKA

CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering

AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
MECHANICAL ENGINEERING
TECHNICAL IT AND TELECOMMUNICATIONS
ENVIROMENTAL ENGINEERING, MINING AND ENERGY TECHNOLOGY
MATERIALS ENGINEERING
QUALITY MENAGEMENT

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA
INŻYNIERIA MECHANICZNA
INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA
INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA
INŻYNIERIA MATERIAŁOWA
NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

MINING – INFORMATICS, AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING
Published since 1962

DOI: <https://doi.org/10.7494/miag>

Chairman of the Scientific Board/ Przewodniczący Rady Naukowej:
Grzegorz Cieplik, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Secretary of the Scientific Board/ Sekretarz Rady Naukowej:
Tomasz Rokita, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Members of the Scientific Board/ Członkowie Rady Naukowej:
Dariusz Andriukaitis, Kaunas University of Technology, Kaunas (Lithuania)
Imashev Askar, Karaganda Technical University, Karaganda (Kazakhstan)
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)
Jiří Fries, Technical University of Ostrava, Ostrava (Czech Republic)
Waldemar Korzeniowski, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Dou Lin-ming, China University of Mining and Technology, Xuzhou (China)
Arkadiusz Meżyk, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Josph Molnar, University of Miskolc, Miskolc (Hungary)
Jacek Paraszczak, Laval University, Quebec (Canada)
Liubomyr Romanyshyn, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk (Ukraine)
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)
Nenad Zrnčić, University of Belgrade, Belgrade (Serbia)

Editorial staff/ Redakcja czasopisma:

Editor in Chief/ Redaktor naczelny – *Krzysztof Krauze*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Deputy Editor in Chief/ Zastępca redaktora naczelnego – *Krzysztof Filipowicz*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Managing Editor/ Kierownik redakcji – *Kamil Mucha*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Manuscript Editor/ Redaktor techniczny – *Tomasz Wydro*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Web Editor/ Redaktor strony internetowej – *Marcin Nawrocki*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)

Associate editors/ Redaktorzy tematyczni:

Automation and robotics – *Jaroslav Joostberens*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Electrical engineering – *Tomasz Siostrzonek*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Environmental engineering, mining and energy technology – *Horst Gondek*, VSB Technical University of Ostrava, Ostrava (Czechia)
Materials engineering – *Vitalii Panchuk*, Ivano-Frankivsk National Technical University of Oil and Gas, Ivano-Frankivsk (Ukraine)
Mechanical engineering – *Leonel Francisco Castañeda Herediaeradia*, EAFIT University, Medellin (Columbia)
Technical IT – *Ryszard Klempka*, AGH University of Krakow, Krakow (Poland)
Telecommunications – *Antoni Wojaczek*, Silesian University of Technology, Gliwice (Poland)
Quality management – *Erika Sujová*, Technical University in Zvolen, Zvolen (Slovakia)

PUBLISHER

Linguistic Corrector/ Korekta językowa: *Aedden Shaw* (English/ język angielski), *Kamila Zimnicka* (Polish/ język polski)

Desktop Publishing/ Skład komputerowy: Andre

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

© Wydawnictwa AGH, Kraków 2023, Creative Commons CC-BY 4.0 License

ISSN 2449-6421 (online)

ISSN 2450-7326 (printed)

The electronic version of the journal is the primary one.

Number of copies: 50

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

Table of Contents

Marek Borowski, Klaudia Zwolińska-Gładys, Andrzej Szmuk

An analysis of the potential use of methane from hard coal mines in a trigeneration system to reduce emissions into the atmosphere	7
Analiza możliwości wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w układzie trójgeneracyjnym w celu ograniczenia emisji do atmosfery	19

Konrad Trzop

Application of a measuring and recording system with MEMS technology for a powered roof support	31
Zastosowanie układu pomiarowego rejestrującego parametry pracy obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem technologii MEMS	38

Paweł Galant, Radosław Srebnik

Optimalization of the transport of excavated material in hard coal mines based on improvements in the automatic control mode	45
Optymalizacja transportu urobku w kopalni węgla kamiennego przez usprawnienie automatycznego trybu sterowania	49

Franciszek Niezgoda, Janusz Zając, Kazimierz Mitko, Izabela Górecka, Stanisław Mojżysz

Innovative Mine Floor Grinding Machine	53
Innowacyjna górnicza frezarka spągowa	61

ABSTRACTS

MAREK BOROWSKI
KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS
ANDRZEJ SZMUK

AN ANALYSIS OF THE POTENTIAL USE OF METHANE FROM HARD COAL MINES IN A TRIGENERATION SYSTEM TO REDUCE EMISSIONS INTO THE ATMOSPHERE

Greenhouse gases and their emissions are issues that are being increasingly discussed due to climate change. Next to carbon dioxide, methane is considered one of the most important greenhouse gases. Reducing methane emissions could result in noticeable environmental benefits in a short time. Anthropogenic emissions constitute approximately 60% of total methane emissions and thus solutions to reduce emissions of this gas are most often sought in this sector. The subject of the study is the methane capture system in the "Pniówek" mine, belonging to the Upper Silesian Coal Basin (southern Poland), and the potential for methane management using a trigeneration system. The article discusses the utilization of methane from hard coal mines to reduce its emissions into the atmosphere and as a profitable solution to use the emitted gas. The authors describe a trigeneration system in which methane from the mine is burned in gas engines and used to produce electricity, heat, and cooling energy. This allows for reducing methane emissions into the atmosphere while increasing the efficiency of coal use. The article shows the results of measurements carried out in a hard coal mine in Poland. The presented example indicates the ecological and economic benefits resulting from the use of a trigeneration system.

KONRAD TRZOP

APPLICATION OF A MEASURING AND RECORDING SYSTEM WITH MEMS TECHNOLOGY FOR A POWERED ROOF SUPPORT

Innovative technologies in hard coal production are indispensable for building a modern business enterprise. The pace of environmental and social changes inspires the need for continuous improvement of the coal mining process. The domain of machinery and equipment is the most important element of the entire production process. Machines and equipment require the constant monitoring of their operating parameters to ensure production continuity and safety. A solution addressing those needs is a measuring system that records the parameters of the powered roof support. The constructed measuring system uses MEMS technologies to measure changes in the transverse and longitudinal inclination of the elements and the height of the powered roof support. The measuring system allows for determining the parameters of the powered roof support's operation in the mining wall. The following paper presents an example of the use of MEMS technology in the measuring system sensors, as well as the stages of real-life research on adapting the powered roof support to the measuring system.

STRESZCZENIA

MAREK BOROWSKI
KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS
ANDRZEJ SZMUK

ANALIZA MOŻLIWOŚCI WYKORZYSTANIA METANU Z KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO W UKŁADZIE TRÓJGENERACYJNYM W CELU OGRANICZENIA EMISJI DO ATMOSFERY

Z uwagi na zmiany klimatyczne coraz częściej poruszane są zagadnienia dotyczące gazów cieplarnianych i ich emisji. Metan, obok dwutlenku węgla, uznawany jest za jeden z najistotniejszych gazów cieplarnianych, którego ograniczenie emisji może przynieść w krótkim czasie zauważalne korzyści dla środowiska. Emisje antropogeniczne stanowią około 60% całkowitej emisji metanu, stąd też to właśnie w tym obszarze najczęściej poszukiwane są rozwiązania ograniczające emisje tego gazu. Przedmiotem opracowania jest system ujęcia metanu w kopalni „Pniówek” należącej do Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (południowa Polska) oraz możliwości zagospodarowania tego gazu za pomocą silników trójgeneracyjnych. W artykule omówiono możliwość wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery oraz z uwagi na możliwość jego opłacalnego wykorzystania. Autorzy przedstawiają zastosowanie układu trójgeneracyjnego, w którym metan z kopalni jest spalany w silnikach gazowych i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej. Pozwala to na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wykorzystania węgla. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w kopalni węgla kamiennego w Polsce i na tym przykładzie wskazano na ekologiczne i ekonomiczne korzyści wynikające z zastosowania układu trójgeneracyjnego.

KONRAD TRZOP

ZASTOSOWANIE UKŁADU POMIAROWEGO REJESTRUJĄCEGO PARAMETRY PRACY OBUDOWY ZMECHANIZOWANEJ Z WYKORZYSTANIEM TECHNOLOGII MEMS

Stosowanie innowacyjnych technologii w procesie produkcji węgla kamiennego jest nieodzownym elementem budowania przedsiębiorstwa na miarę współczesnych czasów. Tempo zachodzących zmian środowiskowych i społecznych powoduje potrzebę ciągłego doskonalenia procesu produkcyjnego, którego najważniejszym elementem są maszyny i urządzenia. Wymagają one stałego monitorowania ich parametrów pracy celem zapewnienia ciągłości produkcyjnej oraz bezpieczeństwa. Propozycją rozwiązania tego problemu jest układ pomiarowy rejestrujący parametry pracy obudowy zmechanizowanej, wykorzystujący technologię MEMS do pomiaru zmian nachylenia poprzecznego i podłużnego elementów oraz wysokości obudowy. Praca układu pozwala określić parametry pracy zmechanizowanej obudowy w ścianie wydobywczej. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania technologii MEMS w czujnikach układu pomiarowego oraz etapy badań zrealizowanych w celu przystosowania obudowy zmechanizowanej do wdrożenia przedstawionego rozwiązania w warunkach rzeczywistych.

PAWEŁ GALANT
RADOSŁAW SREBNIAK

OPTIMALIZATION OF THE TRANSPORT OF
EXCAVATED MATERIAL IN HARD COAL MINES
BASED ON IMPROVEMENTS
IN THE AUTOMATIC CONTROL MODE

Hard coal mines are increasingly struggling with the widespread phenomenon of the decarbonization of the economies of European countries. As a result, they are forced to constantly look for opportunities to reduce unit mining costs. This is extremely difficult because producers of mining machinery and equipment are unwilling to incur high costs for the research and development of new products, as this industry is burdened with a high risk of unprofitability. This article describes one of the examples in which an attempt was made to reduce the costs of hard coal mining by modifying the method of controlling underground haulages consisting of belt conveyors in the Polish LW “Bogdanka” mine.

FRANCISZEK NIEZGODA
JANUSZ ZAJĄC
KAZIMIERZ MITKO
IZABELA GÓRECKA
STANISŁAW MOJŻYSZ

INNOVATIVE MINE FLOOR GRINDING MACHINE

This article describes the process of development of the Hydroma floor grinding machine. It describes the current methods of solving exploitation problems related to uplifting of the floor in mining facilities and the issues of the need to maintain proper cross-sections of roadways under current mining exploitation conditions in order to ensure the continuity and safety of mining facility operations. The existing methods of floor grinding were analyzed in terms of cost, labor intensity, safety, and environmental protection. The following section outlines the process of developing a mine floor grinding machine at Urządzenia i Konstrukcje Spółka Akcyjna, namely the stage of technical and marketing analysis is discussed, during which the needs and possibilities of implementing the floor grinding machine were assessed, as well as the process of preliminary research and design, construction and tests conducted on a prototype grinding machine. The operation of the floor grinder – which is driven by an electric motor to grind the elevated rock bed, load and transport the grinded rock to the hauling trucks, all performed by remote control – is described. In conclusion, the advantages of the Hydroma grinder are discussed, as it performs the work efficiently, effectively and safely, without exposing the environment to harmful emissions.

PAWEŁ GALANT
RADOSŁAW SREBNIAK

OPTIMALIZACJA TRANSPORTU UROBKU
W KOPALNI WĘGLA KAMIENNEGO
PRZEZ USPRAWNIENIE
AUTOMATYCZNEGO TRYBU STEROWANIA

W obecnych czasach kopalnie węgla kamiennego zmagają się z powszechnym zjawiskiem dekarbonizacji gospodarek krajów europejskich. Dlatego zmuszone są stale poszukiwać możliwości obniżania jednostkowych kosztów wydobywania. Jest to wyjątkowo trudne w obecnych czasach, ponieważ producenci maszyn i urządzeń górniczych nie są skłonni ponosić wysokich kosztów na badania i rozwój nowych produktów, gdyż branża ta jest obciążona wysokim ryzykiem nieopłacalności. Ten artykuł opisuje jeden z przykładów, w którym podjęto próbę obniżenia kosztów wydobywania węgla kamiennego wykorzystując modyfikację sposobu sterowania podziemnymi odstawami urobku w polskiej kopalni LW „Bogdanka”.

FRANCISZEK NIEZGODA
JANUSZ ZAJĄC
KAZIMIERZ MITKO
IZABELA GÓRECKA
STANISŁAW MOJŻYSZ

INNOWACYJNA GÓRNICZA FREZARKA SPĄGOWA

W artykule opisano proces powstania frezarki spągowej Hydroma. Omówiono aktualne sposoby rozwiązania problemów eksploatacyjnych związanych z wypiętrzaniem spągu w zakładach górniczych oraz kwestie konieczności utrzymania właściwych przekrojów wyrobisk w aktualnych warunkach eksploatacji górniczej w celu zapewnienia ciągłości i bezpieczeństwa ruchu zakładu górniczego. Przeanalizowano dotychczasowe metody pobierki spągu pod kątem kosztów, pracochłonności, bezpieczeństwa i ochrony środowiska. W dalszej części nakreślono proces powstawania górniczej frezarki spągowej w firmie Urządzenia i Konstrukcje Spółka Akcyjna – to jest omówiono etap analizy technicznej i marketingowej, w trakcie której oceniono potrzeby i możliwości wdrożenia frezarki spągowej, proces badań wstępnych i projektowania oraz budowy i badań przeprowadzonych na prototypie frezarki. Opisano sposób działania frezarki spągowej, która napędzana silnikiem elektrycznym frezuje/urabia wypiętrzony spąg, ładuje i transportuje urobione skały do wozów transportowych, a wszystko to wykonuje sterowana zdalnie. W podsumowaniu omówiono zalety frezarki spągowej Hydroma wykonującej pracę efektywnie, skutecznie, z zapewnieniem bezpieczeństwa pracy, bez narażania środowiska na emisję szkodliwych substancji.

MAREK BOROWSKI

KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS

ANDRZEJ SZMUK

An analysis of the potential use of methane from hard coal mines in a trigeneration system to reduce emissions into the atmosphere

Greenhouse gases and their emissions are issues that are being increasingly discussed due to climate change. Next to carbon dioxide, methane is considered one of the most important greenhouse gases. Reducing methane emissions could result in noticeable environmental benefits in a short time. Anthropogenic emissions constitute approximately 60% of total methane emissions and thus solutions to reduce emissions of this gas are most often sought in this sector. The subject of the study is the methane capture system in the “Pniówek” mine, belonging to the Upper Silesian Coal Basin (southern Poland), and the potential for methane management using a trigeneration system. The article discusses the utilization of methane from hard coal mines to reduce its emissions into the atmosphere and as a profitable solution to use the emitted gas. The authors describe a trigeneration system in which methane from the mine is burned in gas engines and used to produce electricity, heat, and cooling energy. This allows for reducing methane emissions into the atmosphere while increasing the efficiency of coal use. The article shows the results of measurements carried out in a hard coal mine in Poland. The presented example indicates the ecological and economic benefits resulting from the use of a trigeneration system.

Key words: methane emission, emission reduction, economic use, trigeneration system

1. INTRODUCTION

Methane has been recognized by the Intergovernmental Panel on Climate Change as the second most important greenhouse gas and thus it is necessary to focus on the reduction of its emissions. Progressing climate change has increased interest in greenhouse gas emissions and the potential to reduce them. The significant dominance of carbon dioxide in total greenhouse gas emissions has resulted in focusing attention on the sources of this gas in recent years but despite a much lower emission level, methane constitutes the most significant threat to the climate neutrality of the environment.

The amount of methane in the atmosphere has increased significantly over recent decades. The first increase was discernible in the 1980s. Then, after 1998, this value began to stabilize until 2008, when a signif-

icant increase in the concentration of this gas was noticed again, and this trend is being maintained. At the same time, it shows how important it is to introduce remedial measures in this area.

The sources of methane emissions may be natural or result from human activities. Natural sources include wetlands and peat bogs, while anthropogenic sources cover animal breeding, the energy sector (including activities related to mineral extraction), and waste landfills [1]. Anthropogenic emissions account for approximately 60% of total methane emissions.

There are many possible reasons for such an intense growth in methane content in the atmosphere. The dominant factor here is the increase in methane emissions in three sectors: energy, waste (including sewage), and agriculture [2]. Figure 1 shows the structure of global methane emissions.

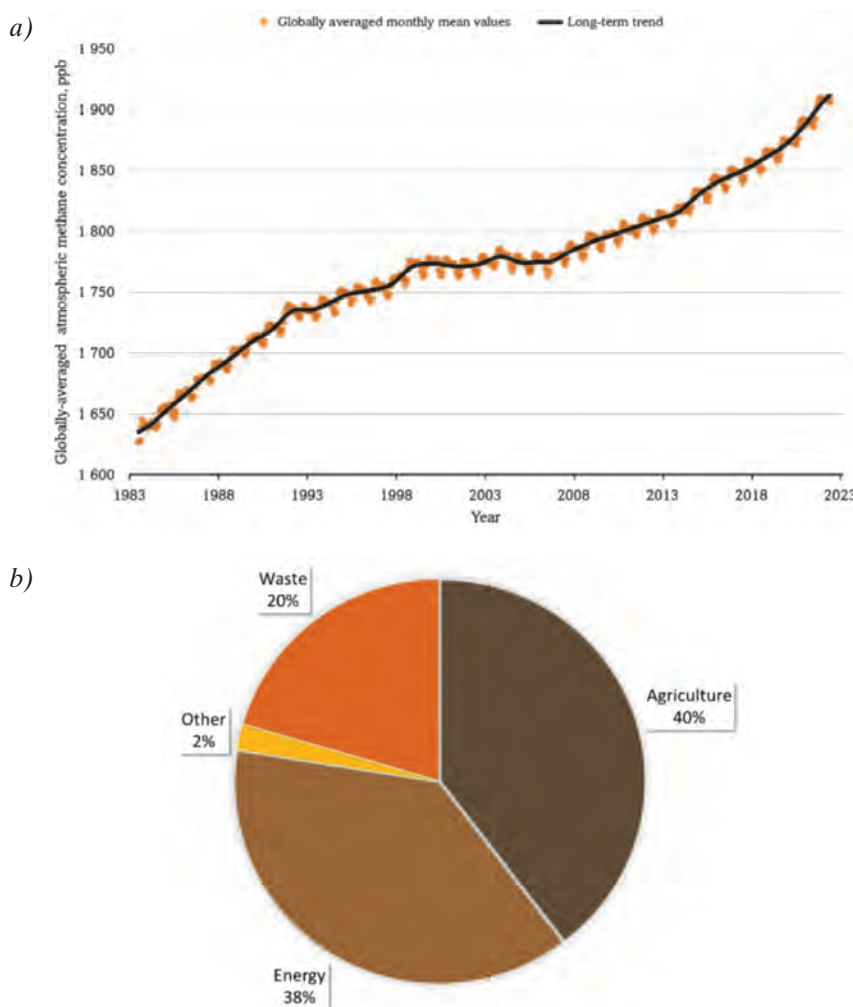


Fig. 1. Methane in the environment: a) global average monthly concentration of methane in the atmosphere, determined from sea surface areas in the years 1983–2022 – based on [3]; b) summary of methane emissions from anthropogenic sources by main sectors for 2020 – based on [4]

The global upward trend may be influenced by increased emissions in the agricultural, waste, and fossil fuel sectors in South and Southeast Asia, as well as growth in the fossil fuel sector in the United States [2]. However, Europe, where total emissions from anthropogenic sources constitute 7.4% of global methane emissions, is the only continent where methane emissions are constantly being reduced. For comparison, emissions occurring in Asia and the Pacific (excluding the Middle East and Russia) constitute 42.6% of the total methane emissions in the world [4]. According to data from the European Environment Agency (EEA), methane emissions in the EU-27 countries in 2021 were reduced by 37.4% compared to 1990, and, year by year, a decreasing trend in the observed values is noticed. Analyzing emissions over a shorter time horizon, it should be noted that the annual emissions decreased by 10.1% over ten years. Due to the already adopted climate policy strategies,

the European Union is expected to be well on its way to reducing CH_4 emissions. According to the prepared scenarios [5], methane emissions are expected to decrease by approximately 20% in 2015–2030. Subsequent reductions in emissions will require the implementation of additional strategies in this direction. One of the global initiatives aimed at taking joint actions to reduce methane emissions is the methane agreement – The Global Methane Pledge (GMP), signed by over a hundred countries in 2021 during the COP26 climate conference. Today, 155 countries are participating in the GMP, which aims to reduce methane emissions by 30% from 2020 levels by 2030, which could slow global warming by more than 0.2°C by 2050.

The article focuses on using captured methane to produce electricity, heat, and cold in a trigeneration system in the example of the “Pniówek” mine. An analysis of the system’s operating efficiency and, in

particular, the possibility of using methane as a source of electricity production was presented. Detailed results include methane capture using the methane drainage system, gas concentration, and electricity production over six months.

2. METHANE EMISSION INTO THE ATMOSPHERE

2.1. Methane emission in Poland

As in the case of the analysis of the global situation, when considering the structure of methane

emissions in Poland, the study started with the division into main sectors. A summary of methane emissions in Poland in 2020 is presented in Figure 2.

The most crucial sources of methane emissions in Poland include the energy sector, agriculture, and waste management. They account for 46.0%, 31.9%, and 22.0%, respectively. The first of these categories can be divided into two subcategories: fuel combustion and volatile emissions from fuels. The second category is noticeably dominant and is responsible for approximately 38.7% of total methane emissions in Poland. Focusing in detail on the energy sector, it can be noted that the predominant value of emissions comes from volatile emissions from solid fuels, which in 2020 are estimated at 579.1 kt.

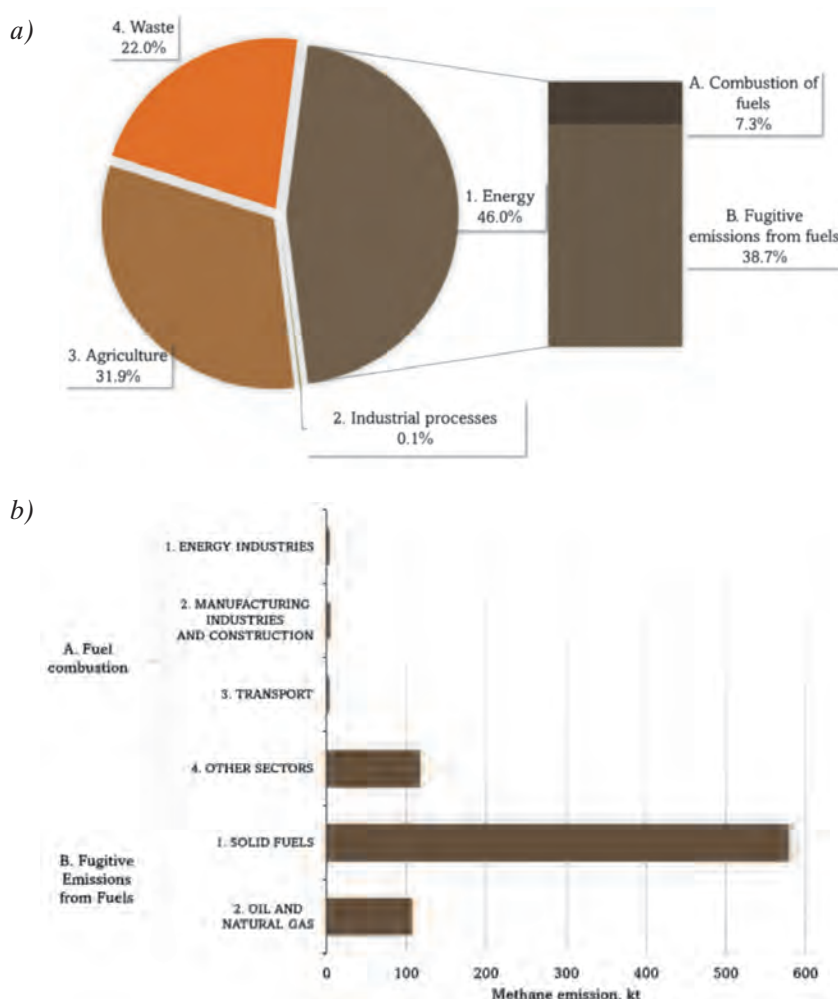


Fig. 2. Summary of methane emissions in Poland in 2020: a) from anthropogenic sources according to main sectors; b) related to the energy sector – based on [6]

2.2. Characteristics of methane release into mining excavations

The nature of methane release into mine workings is very complex, as it depends on numerous geological

and mining factors and changes in atmospheric pressure. Methane in coal deposits may occur in two forms: in free form, found in the pores and crevices of the deposit, and in the form of a gas physicochemically bound to coal. During mining, both coal seams and

rocks surrounding the seam are relaxed and cracked, which leads to a growth in permeability and the release of methane from the relaxed zone into the goaves and workings. This is related to the disturbance of the pressure balance in the deposit, where the distribution of pressure changes in the rock mass is characterized by variability in time and space. The occurring pressure gradient causes the mass of gas to move towards the excavation, where the pressure is lower than the pressure of the gas in the rock mass. The stream of methane released into workings is defined as the total value of the amount of methane released from the mined seam, both from mined and transported coal and from the exposed coal bed of the working face, as well as emissions from neighboring seams located in the roof and floor and within the range of mining influences [7].

Many factors could significantly affect the intensity of methane emissions in a mining excavation. The most important of them include the method of deposit exploitation, the mining techniques used, the amount of extraction, and the selected method of ventilation and drainage of methane from the rock mass. Additionally, the operation of auxiliary devices to actively combat the methane threat or the impact of dams separating air currents will be crucial. Circumstances beyond human control will significantly influence emissivity including sudden drops in atmospheric pressure, the strength of roof rocks, or the occurrence of rock mass tremors.

Of the 20 hard coal mines operated in Poland, 19 are in the Upper Silesian Coal Basin. The only exception is Lubelski Węgiel "Bogdanka" SA, situated in the Lublin Coal Basin. In the period 2021–2022, 12 mining plants carried out extraction from methane deposits, where methane emissions were observed. At the same time, in 4 other mining plants, where work was also carried out in methane seams, no gas emissions were noticed. Exploitation in exclusively non-methane fields was carried out in 4 other mines. The principal source of methane capture in Polish mines is mining areas (64%), followed by methane captured on dams isolating goaves (34%). The share of methane drainage from drilled faces is very low (2%). The total absolute methane capacity in 2022 amounted to 778.95 million m³/year, of which ventilation methane capacity accounted for 475.48 million m³/year, while 303.47 million m³/year was discharged through the drainage system. The methane drainage system uses 206.07 million m³/year (68%). Captured gas from

methane drainage systems is not always fully effectively used, which can be explained by the following factors: variable gas quality, insufficient technical infrastructure, as well as regulations and standards in this area. Therefore, the total emission of methane into the atmosphere in Polish mines is caused by the emission of methane from ventilation shafts (VAM) and the emission of unused methane from methane drainage. Currently, several projects on the capture and utilization of methane from rock mass are being implemented. Unfortunately, there are certain limitations in obtaining methane, especially from post-mining areas, related to the minimum concentration of captured gas of 30%. Therefore, as part of the Reduction of Methane Emissions Project – REM, the construction of a parallel methane drainage system with reduced gas concentration was proposed. The scope of work includes both the design and construction stages. In this way, a surface methane drainage station with a network of underground pipelines with methane intakes, a measurement system, and an automatic control system will be built in "Pniówek". Methane obtained from post-mining spoils will be utilized to produce electricity in gas engines connected to power generators. Another project being implemented is an intelligent methane drainage system, the aim of which is to optimize and improve the efficiency of the mine methane drainage system through its automation and digitization.

3. TECHNOLOGIES OF CAPTURE AND UTILIZATION OF METHANE

The techniques of methane drainage, capture, and use of gas in coal mines have been known for many years. Nevertheless, significant progress at the turn of the XX and XXI centuries has been noticed both in the advancement of technology and its application [8]. The principal purpose of methane capture is to ensure mine operation safety and continuity of mining operations. Methane drainage systems are designed to capture methane and discharge it outside the exploitation area or to the surface. Selecting an inappropriate method may result in low methane capture efficiency and/or low methane concentrations in the gas. However, we should not forget about environmental protection and increasingly higher requirements for reducing methane emissions into the atmosphere. Therefore, the management of captured methane and

its effective utilization are becoming increasingly crucial. The efficiency of use is influenced primarily by an efficient methane drainage system, which ensures a constant methane concentration in the captured methane-air mixture. The demethanization station is automatically turned off when the CH_4 concentration drops below 30%. Therefore, attempts are being made to build an alternative methane intake installation with a reduced concentration of up to 20%. It is impossible to capture methane below this value due to approaching the upper explosive limit.

To increase the effectiveness and safety of methane capture, it is necessary to control and measure the methane concentration in the captured mixture in the methane drainage system. Thanks to ongoing control of methane concentration, it is possible to identify areas with an increased risk of growth in methane inflow or poor capture efficiency. It allows corrective and optimization actions to be taken to improve the efficiency of the entire methane capture system. In short, methane concentration control and precise measurement are essential to ensure safety and optimize methane capture processes. Monitoring measures are an essential part of any methane risk management strategy and enable effective actions to reduce emissions and optimize mining operations.

Various global trends in the demethanation of coal seams can be observed. Drainage through holes can be appropriately performed to capture methane from mining excavation, corridor workings, or post-mining excavation. The fundamental division according to the period of drainage of the rock mass includes forward methane release from coal seams untouched by mining operations (CBM – coalbed methane) and the

current capture of gas released during mining activities (CMM – coal mine methane) [9]. Pre-methane demethanation is used for strongly methane-bearing, deep-lying seams with high permeability after already using the fracturing technique. This allows the seam to be degassed several years before operation. In pre-mining methane drainage, underground drilling in the coal seam and drilling from the surface can be used. The concentration of captured methane is approximately 90%. The effectiveness of this method is determined by appropriate gas permeability. Due to low seam permeability values, pre-mining methane drainage is practically not used in Polish conditions. Operational methane drainage in the mining excavation area is generally characterized by good efficiency, which results from the relaxation of coal seams during exploitation. The hole drainage methods used must be adapted to the ventilation method and the concentration of the captured methane is 40–50%.

Parameters characteristic of Polish hard coal mines in 2018–2022, including absolute methane capacity, the amount of captured methane, the efficiency of methane drainage, the efficiency of management of captured methane, and hard coal production, are listed in Table 1. The average efficiency of methane drainage in 2022 was 38.9%, which is lower than the value obtained in 2021. At the same time, an increase in the management efficiency of captured methane by over five percentage points was noted.

Methane from the drainage system can be used in various gas management solutions depending on the quality and volume flow of the discharged mixture. Known methods include gas combustion, supply into the gas network, use as an auxiliary or main source for energy systems, chemical input, or car fuel.

Table 1
The methane-bearing capacity in hard coal mines in 2018–2022 [10]

Parameter	Year				
	2018	2019	2020	2021	2022
Absolute methane-bearing capacity [million m^3/year]	916.1	803.8	819.6	815.3	778.9
Amount of captured methane [million m^3/year]	317.0	301.6	302.8	340.9	303.5
Methane drainage efficiency [%]	34.6	37.5	37.0	41.8	38.9
Efficiency of captured methane utilization [%]	64.1	62.8	62.1	62.8	67.9
Hard coal production [million tons]	63.4	61.6	54.4	55.0	52.8

The essential advantage of the popular solution of flare combustion is low investment cost and reduced methane emissions but this is at the cost of carbon dioxide being emitted into the atmosphere. Therefore, this method will be gradually limited or used mainly in emergencies. Introducing methane into gas networks requires high quality, including enrichment and expensive purification of the supplied gas. An increasingly frequently implemented solution is the utilization of methane as an energy source. Most often, this energy is used for the needs of a mining plant. It can be used as an additional fuel, for example, co-burned with other energy sources or as the primary fuel using engines, gas turbines, fuel cells, steam power plants, and other energy installations.

Purified and enriched gas can also be added to CNG and LNG. The main disadvantage of this solution, apart from the high processing, storage, and transport costs, is the need to meet the high-quality requirements of the obtained fuel [8]. In Poland, methane utilization methods are dominated by solutions related to energy production (mainly in gas engines) and co-combustion. The use of cogeneration systems to produce both electricity and heat is developing in particular dynamically. Combustion of captured methane is the simplest method of reducing CH_4 emissions. Direct combustion of methane is most often used only when there is no other option or in the event of a failure. Increasing the efficiency of gas management from methane removal is possible by assuring the stability of the composition of the methane-air mixture supplied to energy installations. The constancy of qualitative and quantitative gas parameters can be ensured by implementing appropriate

activities, including controlling and regulating the methane removal process, supplying high-concentration gas from external sources, or purifying the mixture from inert gases [11].

A separate issue is the use of methane from ventilation air (VAM), where the main challenge is related to a significant stream of the mixture with low methane concentration. Therefore, it is necessary for the mine ventilation system to maintain the methane concentration below the lower explosive limit. The average methane content in ventilation air may vary significantly depending on the rock mass characteristics and the methane content in the coal seams. In the typical conditions of Polish mining plants, the methane content is usually 0.3% (it may be higher but never exceeds 0.75%). Due to the high ventilation airflow in mines, despite such low methane concentration values, a significant amount of methane is emitted into the atmosphere. It is estimated that approximately 70% of the total amount of methane released during mining works is emitted into the atmosphere through ventilation shafts. The solutions implemented so far on an industrial scale are mainly based on reducing VAM emissions through combustion, with other solutions being intensively developed in this area. Technologies that enable the enrichment of the methane-air mixture to methane concentrations are gaining popularity. Enriched gas with appropriate methane concentration could be used in existing devices that require higher contents of the flammable component in the mixture for proper operation [12]. The classification of methane management solutions divided into use as the main and auxiliary resource in a given technology is shown in Figure 3.

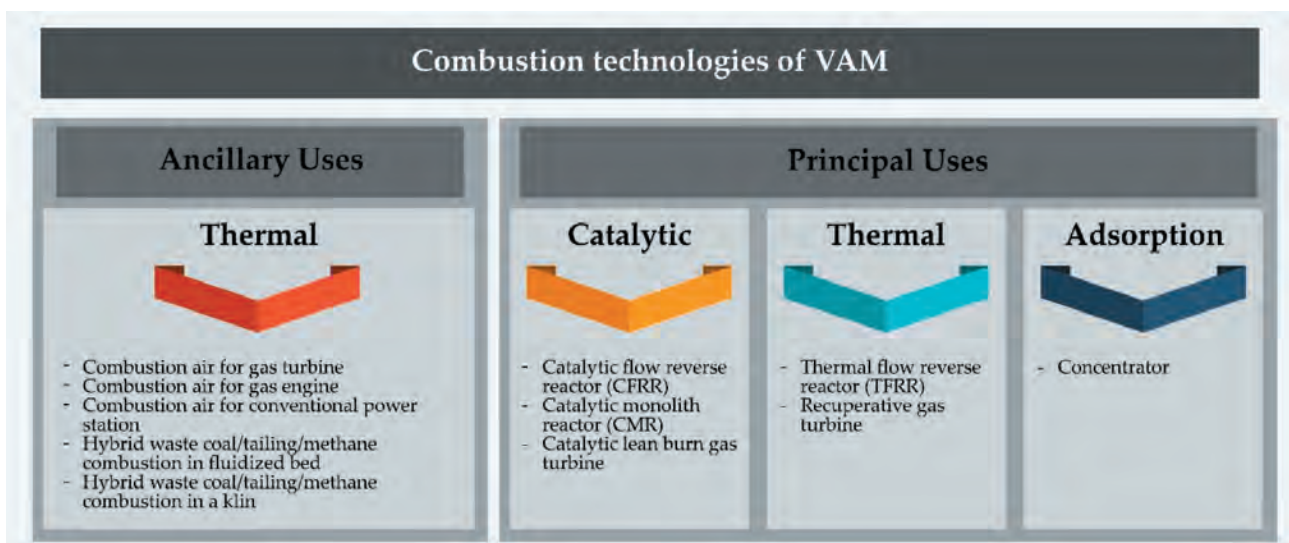


Fig. 3. VAM combustion technologies – classification and examples – based on [12]

4. ANALYSIS OF THE CASE OF CAPTURED METHANE UTILIZATION BY GAS ENGINES IN A TRIGENERATION SYSTEM

The subject of the analysis is the methane capture and utilization system in the “Pniówek” mine, located in the Upper Silesian Coal Basin (southern Poland). The

study concerns the operation of a trigeneration system based on a gas piston engine powered by mine gas and absorption chillers. The engines produce electricity and heat whilst, on the cooling side, the system’s task is to cool ventilation air in mining headings for the underground part of the mine. The installation diagram and device parameters are presented in Figure 4. Figure 5 shows the energy balance of the trigeneration system.

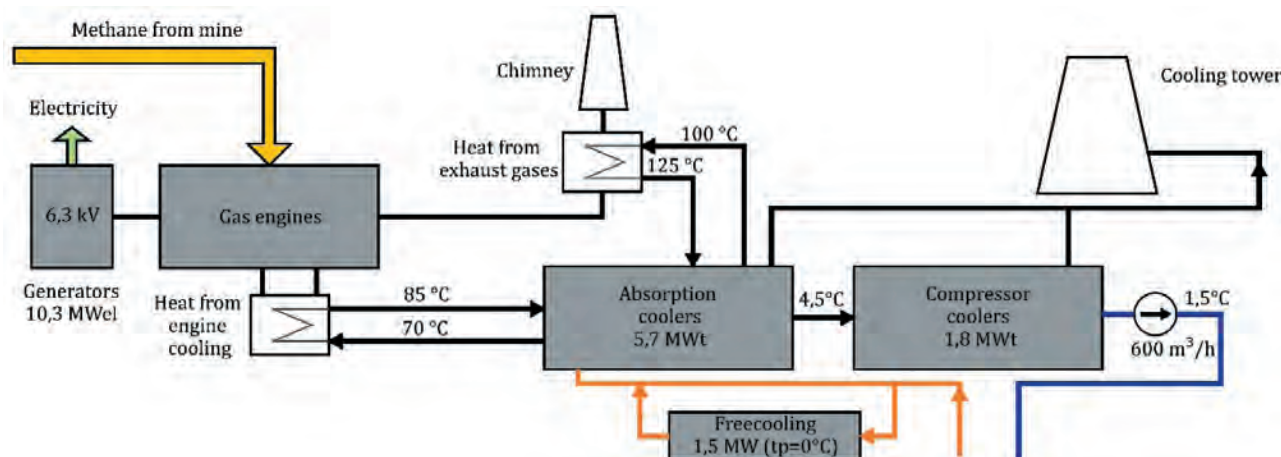


Fig. 4. Trigeneration system diagram – based on [13]

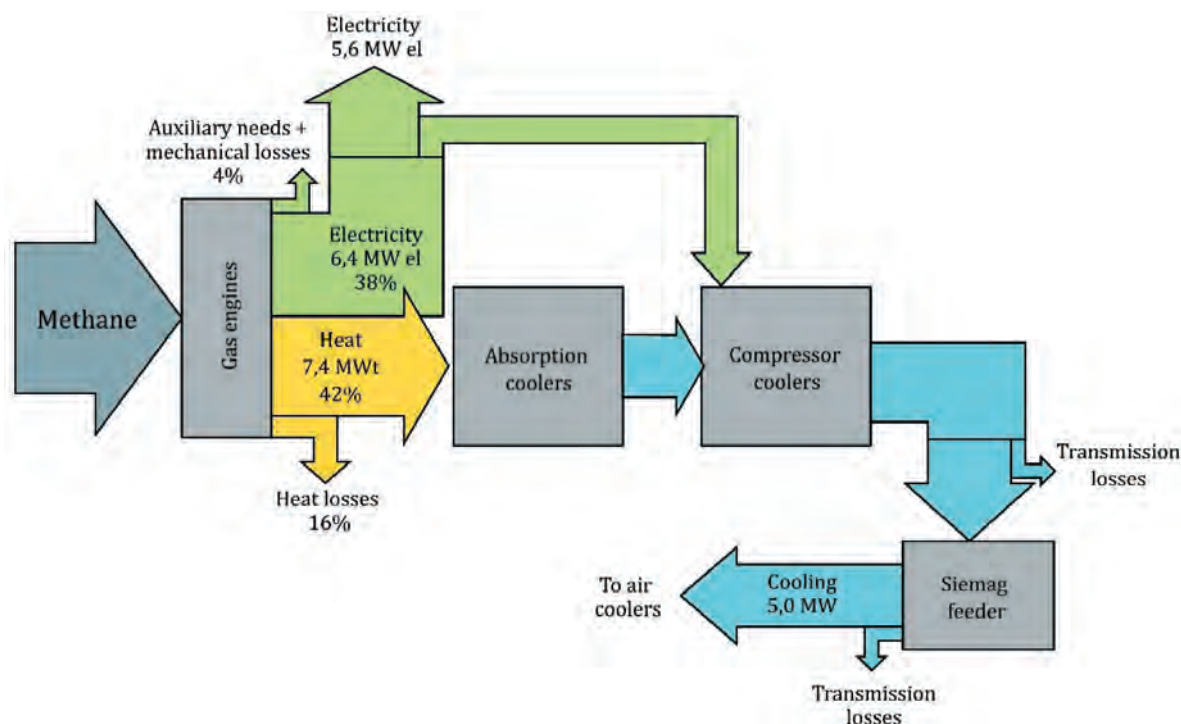


Fig. 5. Energy balance of the trigeneration system – based on [13]

4.1. Characteristics of the methane drainage station

The main element of the methane capture system is the drainage station. Its task is to create negative pressure in the methane drainage pipeline network

and to transmit the captured gas from devices using methane. The methane drainage station can be divided into an installation on the suction side (1st compression stage), devices generating negative pressure and an installation on the discharge side (2nd compression stage), overpressure generating devices and

auxiliary systems, including a gas cooling installation, regulating and safety devices, and control and monitoring equipment. On the suction side of the installation, there is also an exhaust chimney enabling gas to be discharged into the atmosphere under formation pressure in the event of a standstill of the methane drainage station. Due to the large amount of gas captured from the rock mass by the methane drainage station in the “Pniówek” mine, the methane-air mixture is pumped under different pressures to three receivers, i.e., gas engines, inter-mine gas transmission installation and heat and power plant, where the gas is burned and used for the mine’s needs. The subject of further analysis is only methane combustion in

a gas engine. The second compression stage is used to obtain the required gas pressure parameters on the transmission side to consumers after the methane drainage station.

The methane drainage station operates automatically, ensuring a stable pressure of gas sent to consumers. All impurities in the form of dust, water, or oil-water condensate are removed from the captured gas after the gas passes through the compressors, which allows the gas to be used to produce electricity and heat. Detailed operating parameters of the methane drainage station in the “Pniówek” mine are presented in the article [14]. A view of the methane drainage station with gas engines is shown in Figure 6.

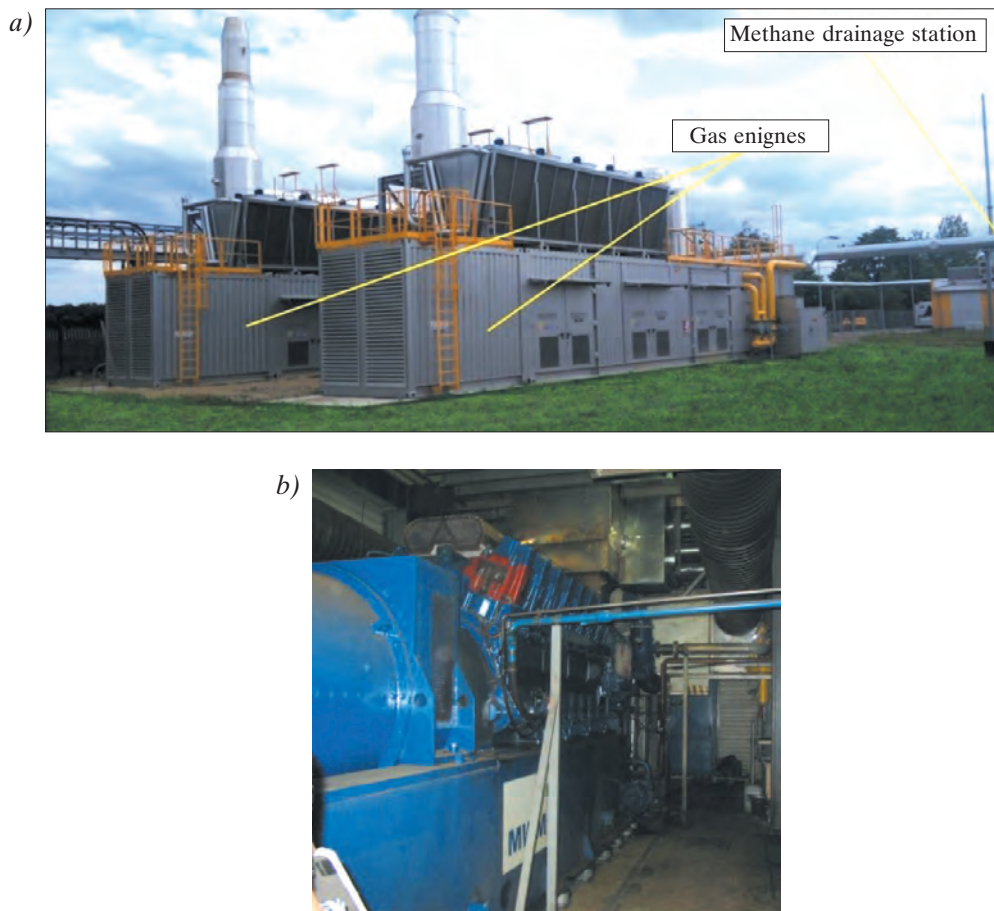


Fig. 6. Methane drainage system in the “Pniówek” mine: a) methane drainage station [14]; b) gas engine

4.2. Measurement scheme

The combined energy and cooling system in the “Pniówek” mine is equipped with a measuring set that allows for the analysis of the parameters of the gas obtained from methane removal and the amount of electricity produced (Fig. 7). The presented results were collected in the period from January 1 to June 31,

and mainly analyzed the stream of captured methane, the concentration of methane in the mixture, and the production of electricity. Readings were sampled every 15 minutes and then averaged on an hourly, daily, and monthly basis, respectively. Based on the results from the methane drainage station, an analysis of gas intake from methane drainage was carried out during the research period.

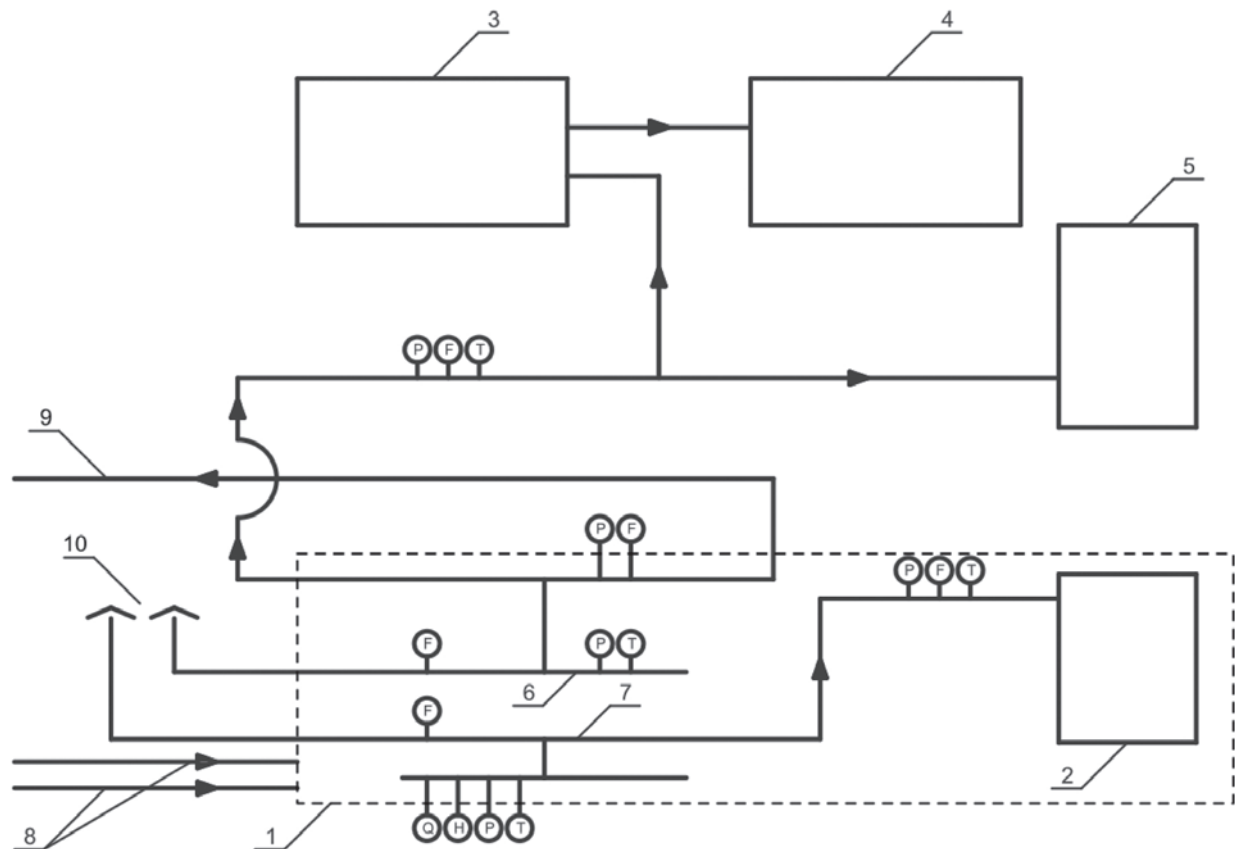


Fig. 7. Measuring system with sensor arrangement: *T* – gas temperature measurement; *H* – gas humidity measurement; *P* – gas pressure measurement; *F* – measurement of gas flow rate; *Q* – measurement of gas quality; 1 – methane drainage station; 2 – compressor hall; 3 – reduction station; 4 – heat and power plant; 5 – gas engines; 6 – 2nd stage of the pressure manifold; 7 – 1st stage of the pressure manifold; 8 – pipeline with methane-air mixture from a hard coal mine; 9 – inter-mine transmission installation; 10 – blowouts

4.3. Analysis and discussion of results

The results collected from the methane drainage station of the analyzed mine formed the basis for the presented study, which focused on the variability

of gas intake and electricity production. The first stage of the work focused on the analysis over an hourly cycle, where the raw data was averaged over that time. The results are presented in Figure 8.

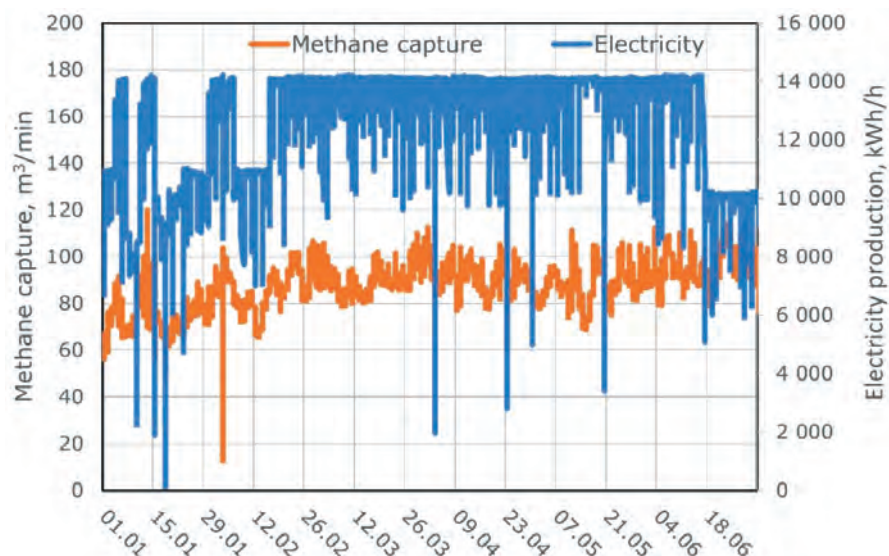


Fig. 8. Changes in methane capture and electricity production in an hourly cycle

With a methane-air mixture of 90–100 m³/min, electricity production of 14,000 kWh/h was achieved while reducing the methane intake to 60–70 m³/min results in electrical production lowering to 11,000 kWh/h.

To use the captured mixture in the system described above, it is crucial to maintain the appropriate methane concentration in the methane-air stream. Therefore, the concentration of this parameter was

also analyzed, and the course of variability is shown in Figure 9. The graph shows that the methane concentration remained at an average level of approximately 60%.

Figure 10 shows changes in the methane concentration, electricity production, and the mixture capture after daily and monthly averages in the analyzed period.

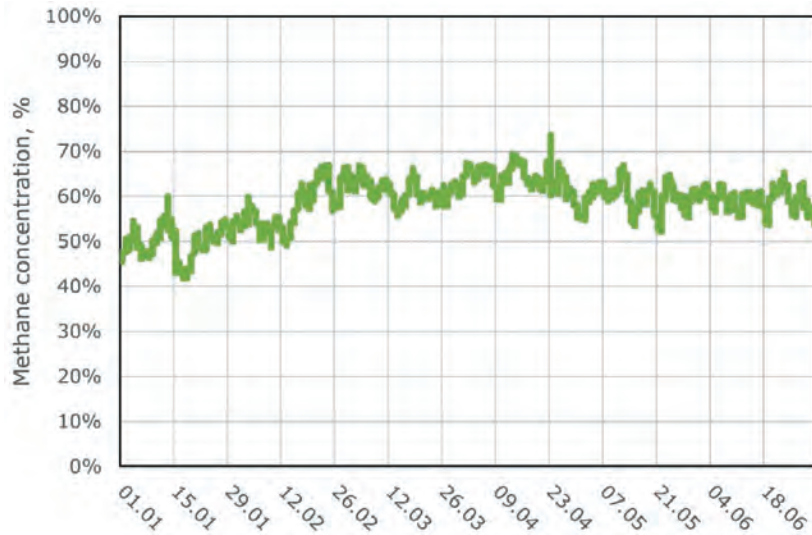


Fig. 9. Changes in methane concentration in the mixture

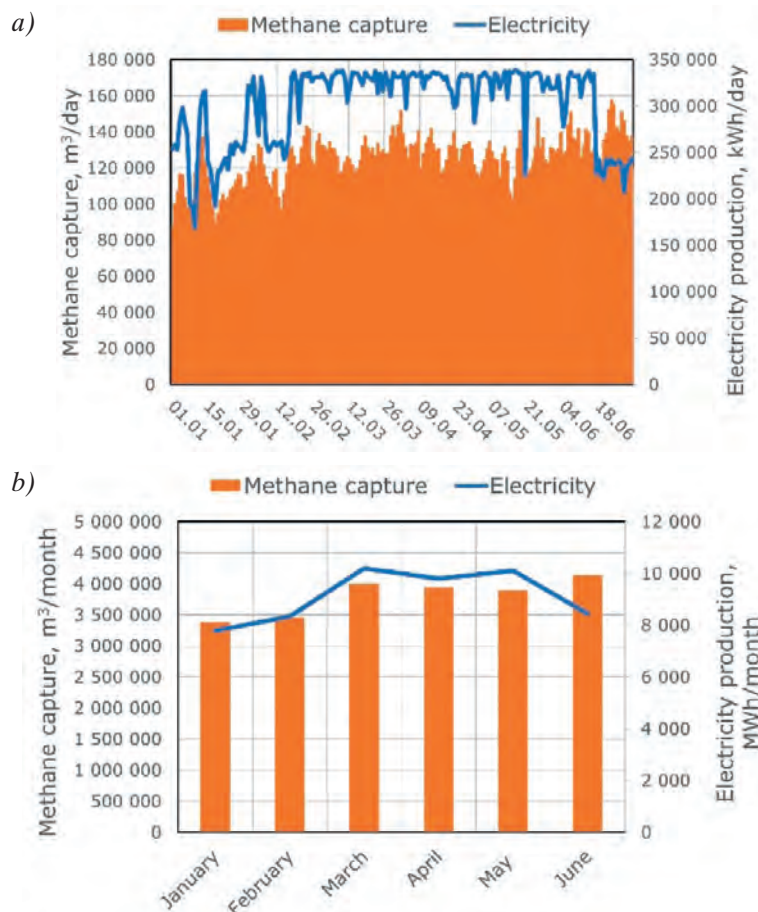


Fig. 10. Variability of methane capture in the first half of the year: a) in the daily cycle; b) on a monthly basis

In the first half of the year, the monthly methane capture varied from 3.3 million to 4.2 million m³ per month, resulting in electricity production from 7.7 to 10.2 thousand MWh per month. Methane emissions in this amount correspond to approximately 55–65 thousand tons of CO₂eq, assuming a GWP of 25. As a result of methane combustion, carbon dioxide is released into the atmosphere in larger quantities than the methane supplied to the process. By burning every ton of methane, 2.75 tons of carbon dioxide are emitted. Due to the much lower impact of this gas on the greenhouse effect, despite higher emissions, this process has a much smaller impact on the atmosphere compared to the emission of pure methane. With such significant methane emissions into the atmosphere during mining, methane combustion plays an essential role in reducing the greenhouse effect.

4.4. Proposal of a comprehensive approach to the management and economic use of methane

Applying best practices in demethanization and methane utilization is crucial to reducing methane-related incidents that too often accompany coal mining and contributing to environmental protection by reducing greenhouse gas (GHG) emissions [8].

The lack of effective management of the production and distribution of electricity/heat/cooling energy makes it impossible to exploit coal seams with high methane and climatic hazards, and unmanaged methane emissions cause environmental damage but also involve emission fees, which will pose a problem with the profitability of mining in the future. Hence, a comprehensive approach to the issue of methane capture and its optimal management is especially crucial. Figure 11 shows a diagram of a comprehensive approach to the challenge of methane capture and utilization.

The first stage in the adopted procedure was a detailed understanding of the source of methane in the analyzed mine, i.e., the predicted emission to the mine workings and/or the atmosphere. Recognition of resources is necessary to select gas capture and use techniques. The next step concerns the optimization of the chosen methane capture method by increasing the quantity and quality of the captured gas. Based on the first two stages, it is possible to develop the conception of methane capture and management in the next stage and then implement the project. However, this is not the last stage in the appropriate management of methane emissions in the mine since one of the most important is the proper operation of the system. This mainly relates to the ongoing analysis of changes in methane availability, monitoring the parameters of the captured mixture, training staff in the proper system operation, and systematic maintenance.

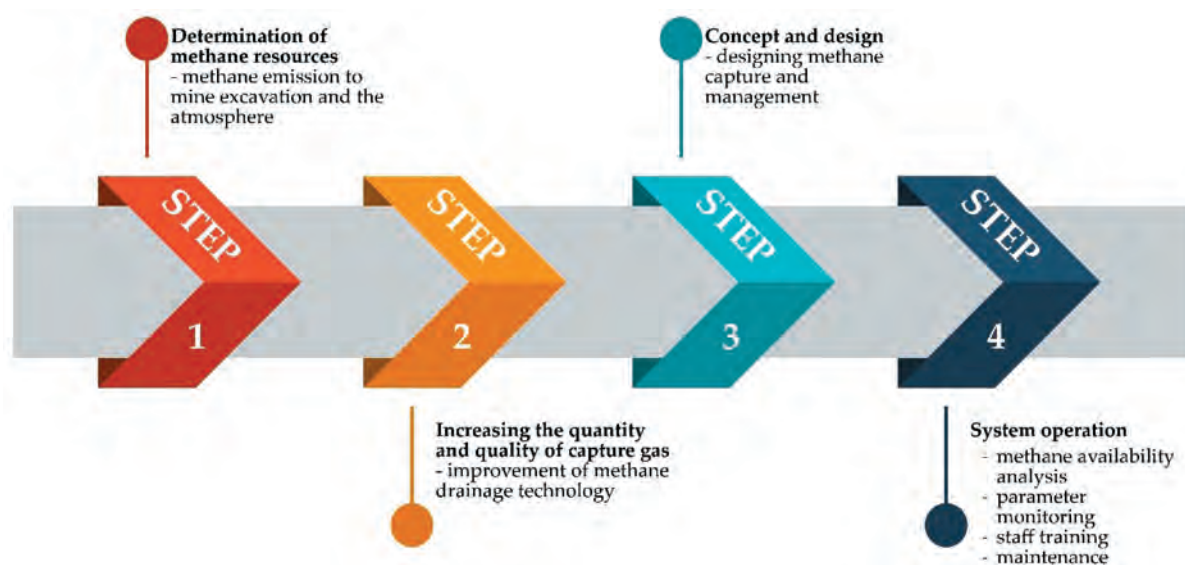


Fig. 11. Scheme of a comprehensive approach to the issue of methane capture and management

5. SUMMARY

Methane emissions from mines have been of great interest for years. This is a crucial topic, not only for environmental reasons but also for energy and, therefore,

financial benefits. Poland, along with the United States, Russia, Australia, Ukraine, Kazakhstan, and India, is one of the countries with significant CMM emissions.

To ensure professional and effective risk management, good practices in mining need to be transferred

to all countries. Regardless of the location or mining conditions, it is possible to significantly reduce the risk of methane incidents and explosions. Effective management of methane risk in coal mines can also have the benefit of contributing to the reduction of greenhouse gas emissions. The trigeneration system in which methane from the mine is burned in gas engines and used to produce electricity, heat, and cooling energy is an example of reasonable and optimal management. This allows for reducing methane emissions into the atmosphere while increasing the efficiency of coal mining in conditions of methane and climatic threats.

The article presents the results of the study carried out in a hard coal mine in Poland. This example is used to indicate the ecological and economic benefits resulting from the trigeneration system. The monthly methane capture ranges from 3.3 million m³ to 4.1 million m³. It corresponds to monthly electricity production from 7,790 MWh to 10,190 MWh. This methane emission in CO₂ equivalent is approximately 55–66 thousand tons of CO₂eq.

In summary, it should be stated that methane utilization from hard coal mines in a trigeneration system is a potential solution to effectively reduce methane emissions into the atmosphere. However, to achieve this goal, it is necessary to ensure the appropriate concentration and amount of methane captured by the methane drainage system. These parameters are crucial elements of an effective methane emission reduction strategy in the coal sector.

References

- [1] Modzelewski W., Nęcki J.: *Emisje metanu: wyzwanie dla klimatu, energetyki i prawa*. ClientEarth, Prawnicy dla Ziemi, Warszawa 2022, <https://www.clientearth.pl/media/fz5hbsnu/2022-01-26-emisje-metanu-wyzwanie-dla-klimatu-energetyki-i-prawa.pdf> [20.02.2023].
- [2] Jackson R.B., Saunio M., Bousquet P., Canadell J.G., Poulter B., Stavert A.R., Bergamaschi P., Niwa Y., Segers A., Tsuruta A.: *Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources*. Environmental Research Letters 2020, 15, 071002, <http://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>.
- [3] Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J.: *Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring, Laboratory measurements. Version 2022-10*, 2022, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
- [4] International Energy Agency: *Methane Tracker Database*, 2022, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022> [20.02.2023].

- [5] Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., Schöpp W.: *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 timeframe – results from the GAINS model*. Environmental Research Letters 2020, 2, 025004.
- [6] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). *Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022 Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2020. Raport syntetyczny*, Warszawa 2022, https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2022_raport_syntetyczny_PL.pdf.
- [7] Borowski M., Szlązak N., Swolkień J.: *Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na efektywność ujęcia metanu ze ściany wydobywczej przez system odmetanowania*. Wiadomości Górnicze 2016, 67, 9: 526–533.
- [8] United Nations. Economic Commission For Europe, and Methane To Markets Partnership: *Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines*. New York – Geneva: United Nations, 2010, <https://lccn.loc.gov/2010554273> [20.02.2023].
- [9] Nawrat S., Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Napieraj S., Gatnar K.: *Utylizacja metanu z pokładów węgla w polskich kopalniach podziemnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2009.
- [10] Wyższy Urząd Górniczy: *Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górnictwa-geologiczną w 2022 roku (porównanie od roku 2017)*. Katowice 2023.
- [11] Borowski M., Życzkowski P., Łuczak R., Karch M., Cheng J.: *Tests to Ensure the Minimum Methane Concentration for Gas Engines to Limit Atmospheric Emissions*. Energies 2020, 13, 44, <https://doi.org/10.3390/en13010044>.
- [12] Pawlaczyk-Kurek A., Suwak M.: *Will It Be Possible to Put into Practice the Mitigation of Ventilation Air Methane Emissions? Review on the State-of-the-Art and Emerging Materials and Technologies*. Catalysts 2021, 11, 1141, <https://doi.org/10.3390/catal11101141>.
- [13] Gatnar K.: *Kogeneracja i trójgeneracyjna na bazie gazu z odmetanowania kopalń – aktualny stan w Jastrzębskiej Spółce Węglowej. Materiały XXX Konferencji z cyklu Zagadnienie surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*, Zakopane, 9–12.10.2016 r., https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty30/k30_mk_z/k30mk_gatnar_z.pdf [20.02.2023].
- [14] Borowski M., Życzkowski P., Cheng J., Łuczak R., Zwolińska K.: *The Combustion of Methane from Hard Coal Seams in Gas Engines as a Technology Leading to Reducing Greenhouse Gas Emissions – Electricity Prediction Using ANN*. Energies 2020, 13, 4429, <https://doi.org/10.3390/en13174429>.

MAREK BOROWSKI, Prof. AGH
borowski@agh.edu.pl

KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS, M.Sc., Eng.
kzwolinska@agh.edu.pl

ANDRZEJ SZMUK, M.Sc., Eng.
szmuk@agh.edu.pl

AGH University of Krakow
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Krakow, Poland

MAREK BOROWSKI

KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS

ANDRZEJ SZMUK

Analiza możliwości wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w układzie trójgeneracyjnym w celu ograniczenia emisji do atmosfery

Z uwagi na zmiany klimatyczne coraz częściej poruszane są zagadnienia dotyczące gazów cieplarnianych i ich emisji. Metan, obok dwutlenku węgla, uznawany jest za jeden z najistotniejszych gazów cieplarnianych, którego ograniczenie emisji może przynieść w krótkim czasie zauważalne korzyści dla środowiska. Emisje antropogeniczne stanowią około 60% całkowitej emisji metanu, stąd też to właśnie w tym obszarze najczęściej poszukiwane są rozwiązania ograniczające emisje tego gazu. Przedmiotem opracowania jest system ujęcia metanu w kopalni „Pniówek” należącej do Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (południowa Polska) oraz możliwości zagospodarowania tego gazu za pomocą silników trójgeneracyjnych. W artykule omówiono możliwość wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w celu ograniczenia jego emisji do atmosfery oraz z uwagi na możliwość jego opłacalnego wykorzystania. Autorzy przedstawiają zastosowanie układu trójgeneracyjnego, w którym metan z kopalni jest spalany w silnikach gazowych i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej. Pozwala to na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wykorzystania węgla. W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w kopalni węgla kamiennego w Polsce i na tym przykładzie wskazano na ekologiczne i ekonomiczne korzyści wynikające z zastosowania układu trójgeneracyjnego.

Słowa kluczowe: emisja metanu, ograniczenie emisji, wykorzystanie gospodarcze, układ trójgeneracyjny

1. WPROWADZENIE

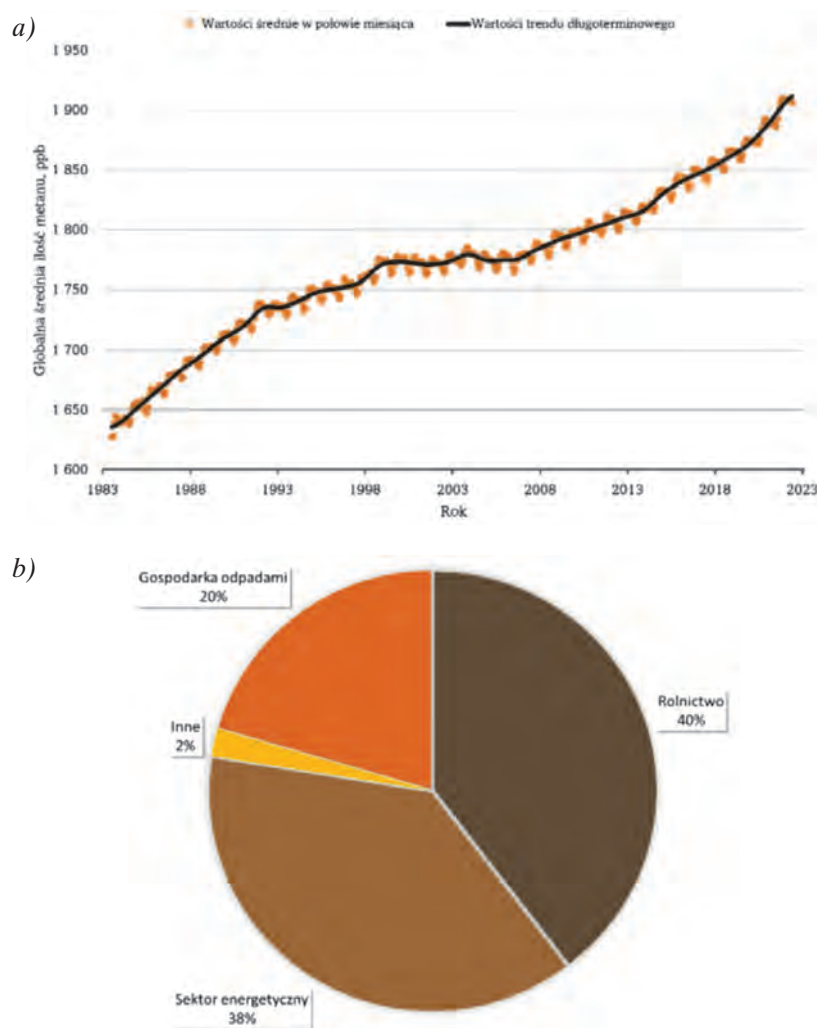
Metan został uznany przez Międzyrządowy Zespół ds. Zmian Klimatu jako drugi z najistotniejszych gazów cieplarnianych, stąd też niezbędne jest zwrócenie uwagi na możliwości ograniczenia jego emisji. Postępujące zmiany klimatyczne wpłynęły na wzrost zainteresowania emisjami gazów cieplarnianych i możliwościami ich ograniczenia. Znaczna dominacja dwutlenku węgla w całkowitej emisji gazów cieplarnianych spowodowała w ostatnich latach skupienie uwagi na źródłach jego emisji. Pomimo niższego poziomu emisji metan stanowi obok dwutlenku węgla najistotniejsze zagrożenie dla neutralności klimatycznej środowiska.

Ilość metanu w atmosferze wzrosła znacząco w ciągu ostatnich dekad. Pierwszy wzrost zauważalny był w latach 80. ubiegłego wieku. Następnie po 1998 roku wartość ta zaczęła się stabilizować, aż do roku 2008,

kiedy ponownie zauważono znaczny wzrost stężenia tego gazu, a tendencja ta jest wciąż utrzymywana. Jednocześnie pokazuje to, jak istotne jest wprowadzenie środków zaradczych w tym zakresie.

Źródła emisji metanu mogą być naturalne lub też wynikać z działalności człowieka. Wśród źródeł naturalnych wymienić można mokradła, torfowiska, natomiast do źródeł antropogenicznych można zaliczyć: hodowlę zwierząt, sektor energetyczny, w tym działalność związaną w wydobywaniu kopaliny i składowiska odpadów [1]. Emisje antropogeniczne stanowią około 60% całkowitej emisji metanu.

Istnieje wiele możliwych przyczyn tak intensywnego wzrostu zawartości metanu w atmosferze. Czynnikiem dominującym jest zwiększenie emisji metanu w sektorach energetycznym i odpadów (w tym ścieków) oraz w rolnictwie [2]. Na rysunku 1 przedstawiono strukturę globalnej emisji metanu.



Rys. 1. Metan w środowisku: a) globalne średniomiesięczne stężenie metanu w atmosferze, wyznaczone z powierzchniowych obszarów morskich w latach 1983–2022 – na podstawie [3]; b) zestawienie emisji metanu ze źródeł antropogenicznych według głównych sektorów na rok 2020 – na podstawie [4]

Na przedstawioną globalną tendencję wzrostową mogą wpływać zarówno zwiększona emisja w sektorach rolnictwa, odpadów i paliw kopalnych z południowej i południowo-wschodniej Azji, a także wzrostu w sektorze paliw kopalnych w Stanach Zjednoczonych [2]. Natomiast Europa, dla której całkowita emisja ze źródeł antropogenicznych stanowi 7,4% globalnej emisji metanu, jest jedynym kontynentem, na którym emisje metanu są stale ograniczane. Dla porównania emisja występująca na terenie Azji i Pacyfiku (z wykluczeniem obszaru Bliskiego Wschodu i Rosji) stanowi 42,6% całkowitej emisji metanu na świecie [4]. Zgodnie z danymi Europejskiej Agencji Środowiska (European Environment Agency, EEA) emisja metanu w krajach EU-27 w roku 2021 uległa redukcji o 37,4% w porównaniu z rokiem 1990, a rok do roku obserwowane wartości zauważalnie maleją. Analizując dane emisyjne w krótszym okresie, należy zwrócić uwagę, że w ciągu 10 lat uzyskano zmniejszenie rocz-

nej emisji o 10,1%. Ze względu na już przyjęte strategie polityki klimatycznej oczekuje się, że Unia Europejska będzie na dobrej drodze do zmniejszenia emisji CH_4 . Według ułożonych scenariuszy [5] w latach 2015–2030 przewiduje się zmniejszenie emisji metanu o około 20%. Dalsze obniżenie poziomu emisji wymagać będzie wdrożenia dodatkowych strategii w tym kierunku. Jedną z inicjatyw globalnych zmierzających do podejmowania wspólnych działań na rzecz ograniczenia emisji metanu jest porozumienie metanowe – *The Global Methane Pledge* (GMP), podpisane przez ponad sto krajów w 2021 roku podczas konferencji klimatycznej COP26. Obecnie w GMP uczestniczy 155 krajów, których celem jest ograniczenie emisji metanu do 2030 roku o 30% w stosunku do poziomu z 2020 roku, co może spowolnić globalne ocieplenie o ponad $0,2^\circ\text{C}$ do 2050 roku.

W artykule skupiono się na wykorzystaniu ujętego metanu do produkcji energii elektrycznej, ciepła

i chłodu w trójgeneracyjnym systemie na przykładzie kopalni „Pniówek”. Przedstawiono analizę efektywności pracy systemu, a w szczególności możliwości wykorzystania metanu jako źródła produkcji energii elektrycznej. Szczegółowe wyniki obejmują ujęcie metanu za pomocą systemu odmetanowania, stężenie gazu oraz produkcję energii elektrycznej w okresie półrocznym.

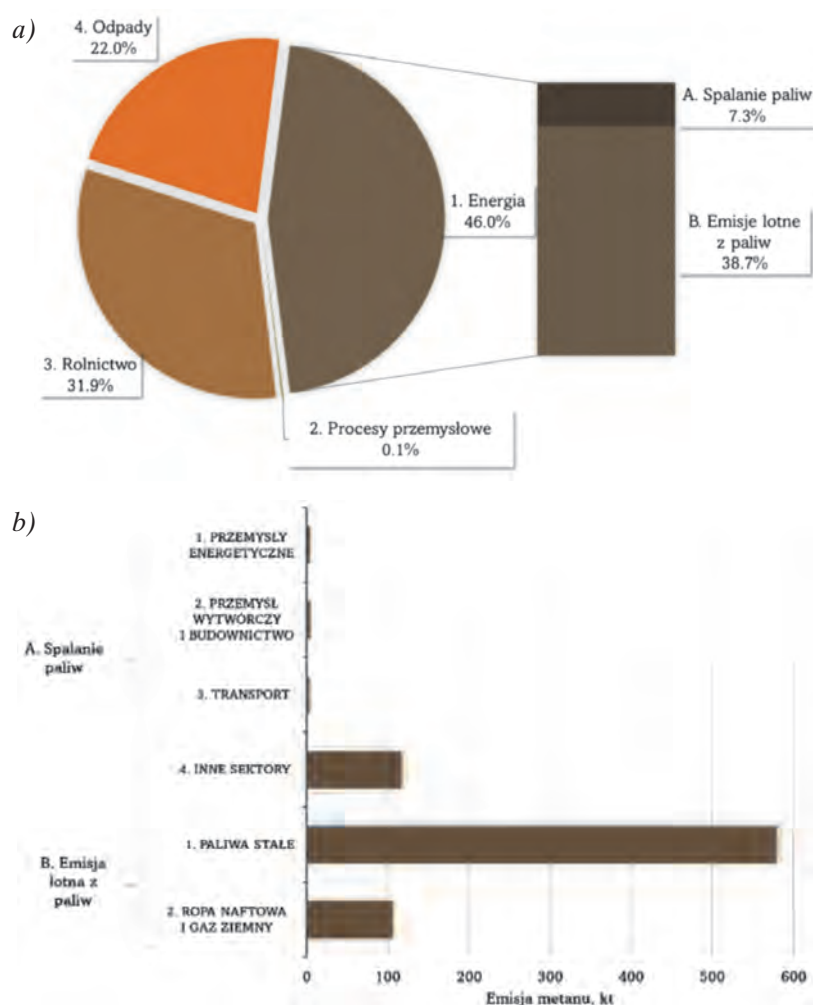
2. EMISJA METANU DO POWIETRZA ATMOSFERYCZNEGO

2.1. Emisja metanu w Polsce

Podobnie jak w przypadku analizy globalnej sytuacji, rozważania o strukturze emisji metanu w Polsce

także rozpoczęto od podziału na główne sektory. Zestawienie emisji metanu w Polsce w roku 2020 przedstawia rysunek 2.

Wśród najważniejszych źródeł emisji metanu w Polsce można wymienić sektor energetyczny, rolnictwo i gospodarkę odpadami. Odpowiadają one za odpowiednio 46,0%, 31,9% i 22,0% emisji. Pierwszą z wymienionych kategorii można rozważać z podziałem na dwie podkategorie: spalanie paliw i emisje lotne z paliw. Druga z wymienionych kategorii jest wyraźnie dominująca i odpowiada za około 38,7% całkowitej emisji metanu w Polsce. Skupiając się szczegółowo na sektorze energetyki, można zauważyć, że przeważająca wartość emisji pochodzi z emisji lotnej z paliw stałych, które w 2020 roku szacuje się na 579,1 kt.



Rys. 2. Zestawienie emisji metanu w Polsce w roku 2020: a) ze źródeł antropogenicznych według głównych sektorów; b) ze źródeł związanych z sektorem energetycznym – na podstawie [6]

2.2. Charakterystyka wydzielania metanu do wyrobisk górniczych

Charakter wydzielania się metanu do wyrobisk kopalnianych jest bardzo złożony, zależy bowiem od

wielu czynników geologicznych, górniczych i zmian ciśnienia atmosferycznego. Metan w złożu węglowym może występować w dwóch formach: w postaci swobodnej w porach i szczelinach złoża oraz w postaci gazu związanego fizykochemicznie z węglem. W trakcie

przewodzenia eksploatacji górniczej dochodzi do odprężenia i spękania zarówno pokładów węgla, jak i skał znajdujących się w otoczeniu pokładu, co w konsekwencji prowadzi do wzrostu przepuszczalności i wydzielania metanu ze strefy odprężonej do zrobów oraz do wyrobisk. Jest to związane z zaburzeniem równowagi ciśnień w złożu, gdzie rozkład zmian ciśnienia w górotworze charakteryzuje się zmiennością w czasie i przestrzeni. Występujący gradient ciśnienia powoduje, że rozpoczyna się ruch masy gazu skierowany do wyrobiska, gdzie ciśnienie jest mniejsze od ciśnienia gazu zawartego w górotworze. Strumień uwalnianego do wyrobisk metanu określany jest jako sumaryczna wartość ilości metanu wydzielającego się z pokładu eksploatowanego zarówno z urobionego i transportowanego węgla, jak i odsłoniętej calizny węglowej czoła wyrobiska oraz emisji z pokładów sąsiednich zalegających w stropie i spągu, będących w zasięgu wpływów eksploatacyjnych [7].

Istnieje wiele czynników, które mogą w istotny sposób wpłynąć na intensywność emisji metanu do wyrobiska górniczego. Spośród najważniejszych z nich można wymienić sposób eksploatacji złoża, stosowane techniki urabiania, wielkość wydobywania oraz wybrany sposób wentylacji i drenażu metanu z górotworu. Kluczowa jest również praca pomocniczych urządzeń aktywnego zwalczania zagrożenia metanowego lub wpływ tam oddzielających prądy powietrza. Na emisyjność wpływają także okoliczności niezależne od człowieka, w tym gwałtowne spadki ciśnienia atmosferycznego, wytrzymałość skał stropowych czy też występowanie wstrząsów górotworów.

Spośród 20 kopalń, które zajmują się wydobywaniem węgla kamiennego w Polsce, aż 19 zlokalizowanych jest w Górnośląskim Zagłębiu Węglowym. Jednak tylko jedna, Lubelski Węgiel „Bogdanka” SA, działa w Lubelskim Zagłębiu Węglowym. W latach 2021–2022 w 12 zakładach górniczych prowadzono wydobywanie z pokładów metanowych, gdzie zaobserwowano emisję metanu. Natomiast w czterech zakładach górniczych, gdzie również wykonywano prace w pokładach metanowych, nie stwierdzono emisji tego gazu. Eksploatacja w polach wyłącznie niemetanowych była prowadzona w czterech innych kopalniach. Głównymi źródłami ujęcia metanu w polskich podziemnych kopalniach są rejon prowadzonych robót górniczych: tzw. odmetanowanie eksploatacyjne (64%) i tamy izolujące zrobów poeksploatacyjnych (34%). Udział odmetanowania prowadzonego z drążonych przodków jest bardzo mały (2%). Całkowita metanowość bezwzględna w 2022 roku wyniosła 778,95 mln m³/rok, z czego metanowość wentylacyjna stanowiła 475,48 mln m³/rok,

natomiast przez system drenażu odprowadzono 303,47 mln m³/rok. Z ujętego metanu przez system odmetanowania gospodarczo wykorzystywano 206,07 mln m³/rok (68%). Metan pozyskiwany z instalacji odmetanowania nie zawsze jest w pełni efektywnie wykorzystywany, co można tłumaczyć następującymi czynnikami: zmienną jakością gazu, niewystarczającą infrastrukturą techniczną oraz regulacjami i normami w tym zakresie. Zatem za całkowitą emisję metanu do atmosfery w polskich kopalniach odpowiada emisja z szybów wentylacyjnych (VAM) oraz emisja gazu niewykorzystanego z odmetanowania. Aktualnie realizowanych jest szereg projektów związanych z pozyskiwaniem i utylizacją metanu z górotworu. Niestety występują pewne ograniczenia z pozyskiwaniem metanu w szczególności z rejonów poeksploatacyjnych, co jest związane z minimalnymi stężeniami ujmowanego gazu, które wynosi 30%. Dlatego w ramach projektu redukcji emisji metanu (REM) podjęto się budowy równoległego systemu odmetanowania o obniżonym stężeniu gazu. Zakres prac obejmuje zarówno etap projektowy, jak i budowlany. W ten sposób w „Pniówku” powstanie powierzchniowa stacja odmetanowania z sieciami dolowych rurociągów z ujęciami metanu, system pomiarowy oraz automatycznego sterownia. Pozyskany ze zrobów poeksploatacyjnych metan wykorzystany zostanie do produkcji energii elektrycznej w silnikach gazowych połączonych z generatorami prądu. Kolejnym realizowanym projektem jest inteligentny system odmetanowania, którego celem jest optymalizacja i poprawa efektywności pracy kopalnianego systemu odmetanowania przez jego automatyzację i cyfryzację.

3. TECHNOLOGIE UJĘCIA I WYKORZYSTANIA METANU

Techniki drenażu metanowego, ujęcia i wykorzystania gazu w kopalniach węgla są znane od wielu lat, jednak na przełomie XX i XXI wieku zauważono znaczny postęp zarówno w zaawansowaniu technologii, jak i w zakresie jej zastosowania [8]. Głównym celem wychwytywania metanu jest zapewnienie bezpieczeństwa pracy kopalni i ciągłości pracy wydobywczej. Systemy odmetanowania mają za zadanie wychwytywanie metanu i odprowadzenie go poza rejon eksploatacji lub na powierzchnię. Dobór niewłaściwej metody może skutkować niską efektywnością ujęcia metanu i/lub uzyskaniem niskich stężeń metanu w gazie. Nie należy jednak zapominać o kwestii ochrony środowiska i coraz wyższych wymagań co do redukcji emisji metanu do atmosfery. Dlatego rośnie znaczenie zagospodarowania ujętego metanu, a także jego efektyw-

nego wykorzystania. Na efektywność wykorzystania wpływa przede wszystkim wydajny system odmetanowania, który zapewni stałe stężenie metanu w ujmowanej mieszaninie metan-powietrze. Stacja odmetanowania zostaje automatycznie wyłączona w sytuacji, gdy stężenie CH_4 spada poniżej 30%. Dlatego podejmuje się próby budowy alternatywnej instalacji ujęcia metanu o obniżonym stężeniu do 20%. Ujęcie metanu poniżej tej wartości nie jest możliwe, ponieważ zbliżamy się do górnej granicy wybuchowości.

W celu zwiększenia skuteczności i bezpieczeństwa wychwytywania metanu konieczne jest kontrolowanie i pomiar jego stężenia w ujętej mieszaninie w instalacji odmetanowania. Dzięki bieżącej kontroli stężenia metanu można zidentyfikować obszary o podwyższonym ryzyku wzrostu dopływu metanu lub słabą efektywność ujmowania, co umożliwia podejmowanie działań naprawczych i optymalizacyjnych zmierzających do poprawy efektywności całego systemu ujęcia metanu. Kontrola stężenia metanu i precyzyjny pomiar mają zasadnicze znaczenie zarówno dla zapewnienia bezpieczeństwa, jak i dla optymalizacji procesów wychwytu tego gazu. Środki monitoringu stanowią kluczową część strategii zarządzania ryzykiem związanym z metanem oraz pozwalają na skuteczne działania w celu redukcji emisji i optymalizacji operacji górniczych.

Na świecie obserwuje się różne trendy w zakresie odmetanowania pokładów węgla. Drenaż otworami może być odpowiednio wykonywany w celu ujęcia metanu z wyrobisk eksploatacyjnych, wyrobisk korytarzowych lub też przestrzeni zrobów poeksploatacyjnych. Podstawowy podział z uwagi na okres wykonywania drenażu górotworu obejmuje odmetanowanie wyprzedzające z pokładów węgla nienaruszonych eksploatacją górniczą (CBM – *coalbed methane*) oraz bieżące ujęcie gazu uwalnianego podczas prowadzenia działalności górniczej (CMM – *coal mine methane*) [9]. Odmetanowanie wyprzedzające jest stosowane dla silnie meta-

nowych, głęboko zalegających pokładów o wysokiej przepuszczalności po uprzednim zastosowaniu techniki szczelinowania. Pozwala to odgazować pokład w ciągu kilku lat przed eksploatacją. W odmetanowaniu przed-eksploatacyjnym można stosować zarówno odwierty dołowe w pokładzie węgla, jak i odwierty z powierzchni. Stężenie ujętego metanu wynosi około 90%. O skuteczności tej metody decyduje odpowiednia gazoprzepuszczalność. W warunkach polskich, ze względu na małe wartości przepuszczalności pokładów, odmetanowanie przedeksploatacyjne praktycznie nie jest stosowane. Odmetanowanie eksploatacyjne w rejonie wyrobisk eksploatacyjnych ogólnie charakteryzuje się dobrą efektywnością, co wynika z odprężenia pokładów węgla w trakcie prowadzonej eksploatacji. Stosowane metody drenażu otworowego muszą być dostosowane do sposobu przewietrzania. Stężenie ujętego metanu kształtuje się na poziomie 40–50%.

Parametry charakterystyczne dla polskich kopalń węgla kamiennego w latach 2018–2022, w tym metanowość bezwzględna, ilość ujętego metanu, efektywność odmetanowania, efektywność zagospodarowania ujętego metanu oraz wydobywanie węgla kamiennego zestawiono w tabeli 1. Średnia efektywność odmetanowania w roku 2022 wyniosła 38,9%, co jest wartością niższą w stosunku do wartości uzyskanej w 2021 roku. Jednocześnie zauważono wzrost efektywności zagospodarowania ujętego metanu o ponad 5 punktów procentowych.

Metan pochodzący z odmetanowania, w zależności od jakości i strumienia objętościowego odprowadzanej mieszanki, może być wykorzystywany w różnych rozwiązaniach zagospodarowania gazu. Wśród znanych metod można wymienić spalanie gazu, odprowadzenie do sieci gazowej, wykorzystanie jako pomocnicze lub główne źródło energii, stosowane jako wsad chemiczny lub paliwo samochodowe. Główną zaletą popularnego rozwiązania, jakim jest spalanie w pochodni, jest niski koszt inwestycyjny i ograniczenie emisji metanu.

Tabela 1
Metanowość w kopalniach węgla kamiennego w latach 2018–2022 [10]

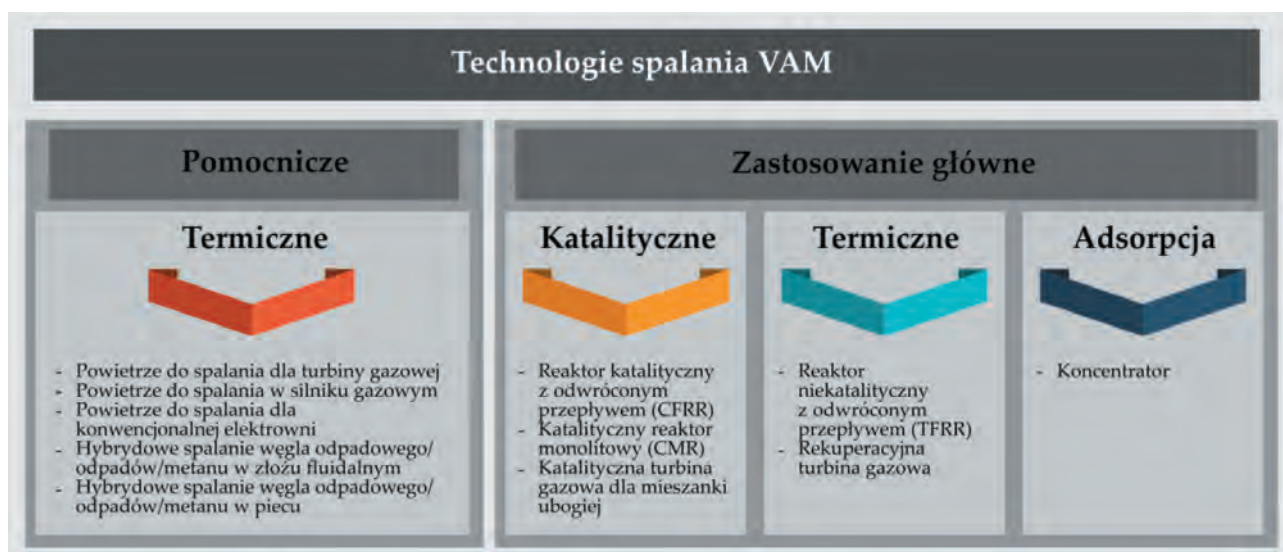
Parametr	Rok				
	2018	2019	2020	2021	2022
Metanowość bezwzględna [mln m ³ /rok]	916,1	803,8	819,6	815,3	778,9
Ilość ujętego metanu [mln m ³ /rok]	317,0	301,6	302,8	340,9	303,5
Efektywność odmetanowania [%]	34,6	37,5	37,0	41,8	38,9
Efektywność zagospodarowania ujętego metanu [%]	64,1	62,8	62,1	62,8	67,9
Wydobycie węgla kamiennego [mln ton]	63,4	61,6	54,4	55,0	52,8

Jednocześnie do atmosfery emitowany jest dwutlenek węgla, w związku z czym zastosowanie tej metody będzie sukcesywnie ograniczane lub wykorzystywane głównie w sytuacjach awaryjnych. Wprowadzanie gazu do sieci gazowych wymaga bardzo wysokiej jakości gazu, w tym także wzbogacania i kosztownego oczyszczania dostarczanego gazu. Rozwiązaniem coraz częściej implementowanym obecnie jest wykorzystanie metanu jako źródła energii. Zazwyczaj energia ta wykorzystywana jest na potrzeby zakładu górniczego. Metan może być wykorzystany jako paliwo dodatkowe i współspalane z innymi nośnikami energii lub też jako paliwo podstawowe w silnikach, turbinach gazowych, ogniach paliwowych, siłowniach i innych instalacjach energetycznych.

Oczyszczony i wzbogacony gaz może być także dodawany do CNG i LNG. Głównymi wadami tego rozwiązania obok wysokich kosztów przetwarzania, przechowywania i transportu jest także konieczność spełnienia wysokich wymagań jakościowych uzyskanego paliwa [8]. W polskich warunkach przeważają metody utylizacji metanu związane z wytwarzaniem energii (głównie w silnikach gazowych) oraz współspalania. Szczególnie dynamicznie rozwija się wykorzystanie układów kogeneracyjnych do wytwarzania zarówno energii elektrycznej, jak i ciepła. Spalanie ujmowanego metanu jest najprostszą metodą ograniczenia emisji CH_4 . Bezpośrednie spalanie metanu jest najczęściej wykorzystywane tylko wtedy, gdy nie ma innej możliwości zagospodarowania lub w przypadku awarii. Zwiększenie efektywności zagospodarowania gazu z odmetanowania możliwe jest dzięki zapewnieniu stabilności składu metanowo-powietrznej mieszaniny dostarczanej do instalacji energetycznych. Stabilność parametrów zarówno jakościowych, jak

i ilościowych gazu może być zapewniona dzięki realizacji odpowiednich działań, w tym prowadzeniu kontroli i regulacji procesu odmetanowania, doprowadzeniu gazu o wysokim stężeniu z zewnętrznych źródeł lub też oczyszczaniu mieszaniny z gazów inertnych [11].

Odrębnym zagadnieniem jest wykorzystanie metanu z powietrza wentylacyjnego (VAM), gdzie głównym wyzwaniem jest ujęcie znacznych ilości mieszaniny gazów o niskim stężeniu metanu. Średnia zawartość metanu w powietrzu wentylacyjnym może się znacznie różnić w zależności od charakterystyki górotworu i zawartości metanu w pokładach węgla. W warunkach polskich zakładów górniczych zawartość metanu wynosi zwykle 0,3% (może być wyższa, ale nigdy nie przekracza 0,75%). Pomimo tak niskich wartości stężenia metanu i z uwagi na wysokie natężenie przepływu powietrza wentylacyjnego w kopalniach do atmosfery emitowana jest znaczna ilość metanu. Szacuje się, że około 70% całkowitej ilości metanu uwalnianego podczas robót górniczych emitowane jest do atmosfery szybami wentylacyjnymi. Dotychczas wdrożone na skalę przemysłową rozwiązania opierają się głównie na redukcji emisji VAM przez spalanie. Inne rozwiązania w tym zakresie są intensywnie rozwijane. Coraz większym zainteresowaniem cieszą się technologie umożliwiające wzbogacenie mieszaniny metanopowietrze do takich stężeń metanu, które umożliwią jego wykorzystanie w już istniejących urządzeniach, wymagających do poprawnej pracy wyższych zawartości składnika palnego w mieszaninie zasilającej [12]. Klasyfikacja rozwiązań zagospodarowania metanu z podziałem na wykorzystanie jako główny i pomocniczy zasób w danej technologii przedstawiono na rysunku 3.

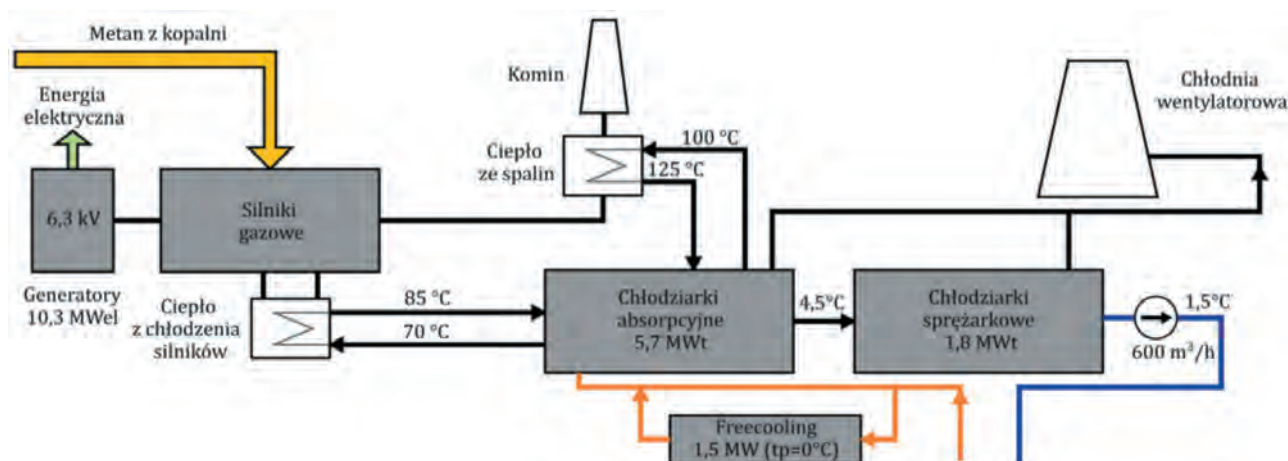


Rys. 3. Technologie spalania VAM: klasyfikacja i przykłady – na podstawie [12]

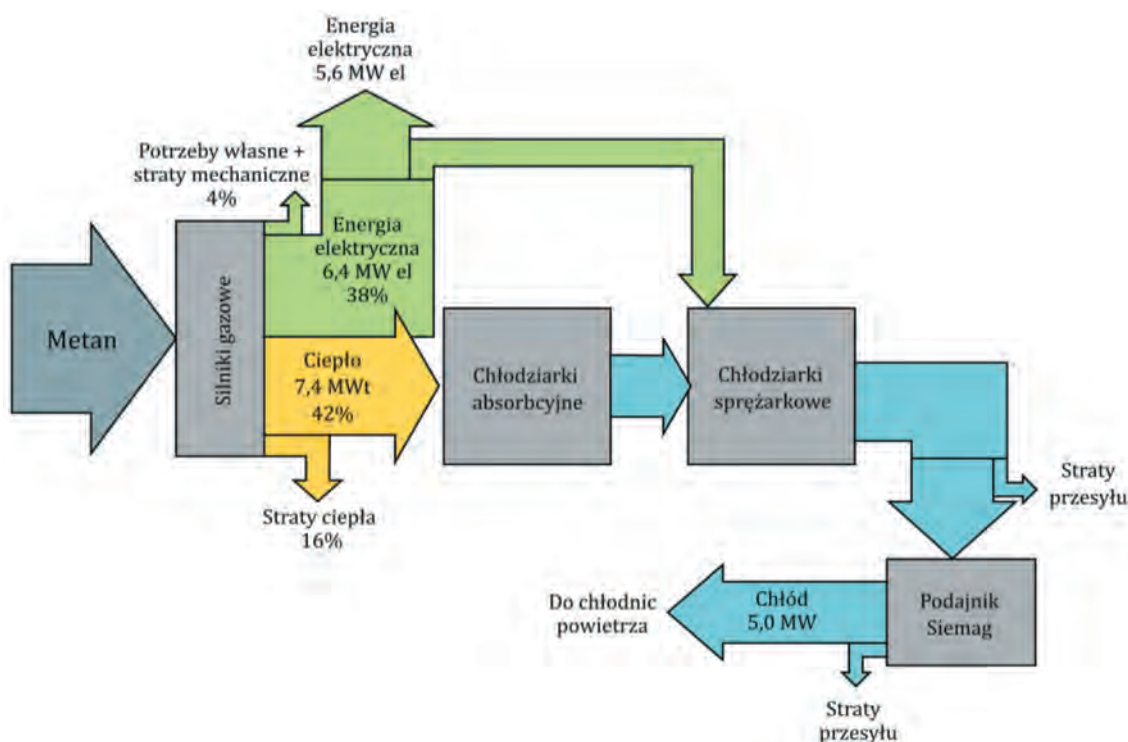
4. ANALIZA PRZYPADKU ZAGOSPODAROWANIA UJĘTEGO METANU PRZEZ SILNIKI GAZOWE ZABUDOWANE W UKŁADZIE TRÓJGENERACYJNYM

Przedmiotem analizy jest system ujęcia i utylizacji metanu w kopalni „Pniówek”, położonej na obszarze Górnośląskiego Zagłębia Węglowego (południowa Polska). Analiza dotyczy pracy układu trójgeneracyjnego

nego zbudowanego z wykorzystaniem gazowego silnika tłokowego zasilanego gazem kopalnianym i chłodziarek absorpcyjnych. Silniki produkują energię elektryczną oraz ciepłą. Po stronie chłodniczej zadaniem układu jest chłodzenie powietrza wentylacyjnego w wyrobiskach górniczych dla części podziemnej kopalni. Schemat instalacji oraz parametry urządzeń zostały przedstawione na rysunku 4. Natomiast na rysunku 5 pokazano bilans energii układu trójgeneracyjnego.



Rys. 4. Schemat instalacji układu trójgeneracyjnego – na podstawie [13]



Rys. 5. Bilans energii układu trójgeneracyjnego – na podstawie [13]

4.1. Charakterystyka stacji odmetanowania

Głównym elementem systemu ujęcia jest stacja odmetanowania. Jej zadaniem jest wytworzenie podciśnienia w sieci rurociągów instalacji odmetanowania

oraz przesyłanie ujętego gazu od urządzeń wykorzystujących metan. W stacji odmetanowania można wyodrębnić instalację po stronie ssącej (I stopień sprężenia), urządzenia wytwarzające podciśnienie oraz instalację po stronie tłocznej (II stopień sprężenia),

urządzenia wytwarzające nadciśnienie oraz układy pomocnicze, w tym instalację chłodzenia gazu, urządzenia regulujące i zabezpieczające oraz aparaturę kontrolno-pomiarową. W instalacji po stronie ssącej znajduje się również komin wydmuchu umożliwiający odprowadzanie gazu do atmosfery pod ciśnieniem złożowym w przypadku postępu stacji odmetanowania. Ze względu na bardzo dużą ilość ujmowanego gazu z górotworu przez stację odmetanowania w kopalni „Pniówek” mieszanina metan-powietrze przetłaczana jest pod różnym ciśnieniem do trzech odbiorników, tj. silników gazowych, instalacji przesyłu gazu międzykopalnianego i elektrociepłowni, gdzie gaz jest spalany i wykorzystywany na potrzeby kopalni. Przedmiotem dalszej analizy jest tylko spalanie

metanu w silniku gazowym. Aby uzyskać wymagane parametry ciśnienia gazu po stronie przesyłu do odbiorców za stacją odmetanowania, stosuje się drugi stopień sprężania.

Stacja odmetanowania pracuje w sposób automatyczny. Dzięki temu uzyskiwane jest stabilne ciśnienie gazu przesyłanego do odbiorców. Z ujmowanego gazu usuwane są wszelkie zanieczyszczenia w postaci pyłów, wody czy kondensatu olejowo-wodnego po przejściu gazu przez sprężarki, co pozwala na zastosowanie gazu do produkcji energii elektrycznej i ciepła. Szczegółowe parametry pracy stacji odmetanowania w kopalni „Pniówek” przedstawiono w artykule [14]. Widok stacji odmetanowania wraz z silnikami gazowymi przedstawia rysunek 6.

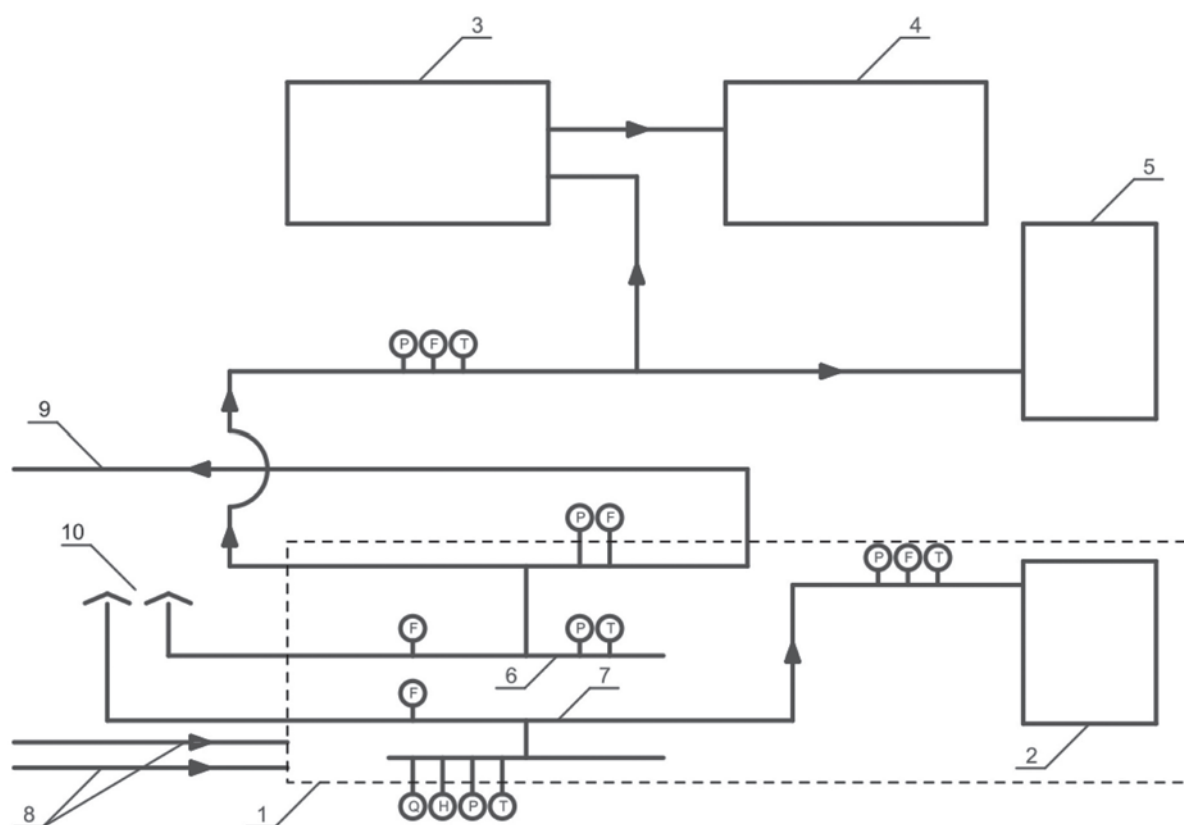


Rys. 6. System odmetanowania w kopalni „Pniówek”: a) stacja odmetanowania [14]; b) silnik gazowy

4.2. Schemat pomiarowy

Skojarzony system energetyczno-chłodniczy w kopalni „Pniówek” wyposażony jest w układ pomiarowy pozwalający na analizę parametrów pozyskiwanego gazu z odmetanowania oraz wielkość produkcji energii elektrycznej (rys. 7). Prezentowane wyniki zbierane były w okresie od 1 stycznia do 31 czerwca, gdzie

analizowane były głównie strumień ujętego metanu, stężenie metanu w mieszance oraz produkcja energii elektrycznej. Odczyty wykonywane były w próbkowaniu co 15 min, a następnie uśredniane odpowiednio w cyklu godzinowym, dobowym i miesięcznym. Na podstawie wyników ze stacji odmetanowania przeprowadzono analizę ujęcia gazu z odmetanowania w okresie badawczym.

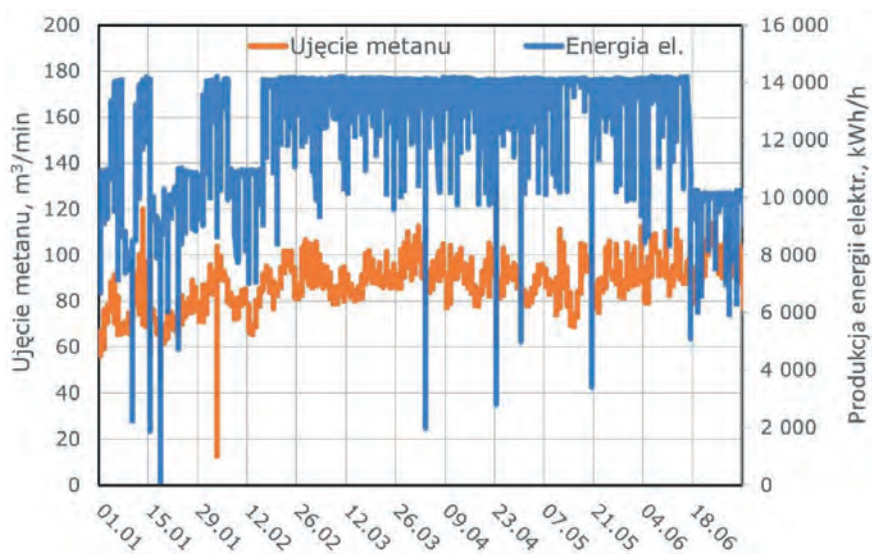


Rys. 7. System pomiarowy z rozmieszczeniem czujników: T – pomiar temperatury gazu; H – pomiar wilgotności gazu; P – pomiar ciśnienia gazu; F – pomiar natężenia przepływu gazu; Q – pomiar jakości gazu; 1 – stacja odmetanowania; 2 – hala sprężarek; 3 – stacja redukcyjna; 4 – elektrociepłownia; 5 – silniki gazowe; 6 – II stopień kolektora ciśnieniowego; 7 – I stopień kolektora ciśnieniowego; 8 – rurociąg z mieszaniną metan-powietrze z kopalni węgla kamiennego; 9 – instalacja przesyłu między kopalnianego; 10 – wydmychy

4.3. Analiza i dyskusja wyników

Zgromadzone wyniki ze stacji odmetanowania kopalni stanowiły podstawę przedstawionej analizy, gdzie skupiono się na zmienności ujęcia gazu i produkcji energii elektrycznej. W pierwszym etapie pracy surowe dane zo-

stały uśrednione cyklu godzinowym. Wyniki przedstawiono na rysunku 8. Przy ujęciu mieszaniny metan-powietrze na poziomie 90–100 m³/min uzyskano produkcję energii elektrycznej na poziomie 14 000 kWh/h. Zmniejszenie ujęcia metanu do wartości 60–70 m³/min powoduje obniżenie produkcji elektrycznej do poziomu 11 000 kWh/h.

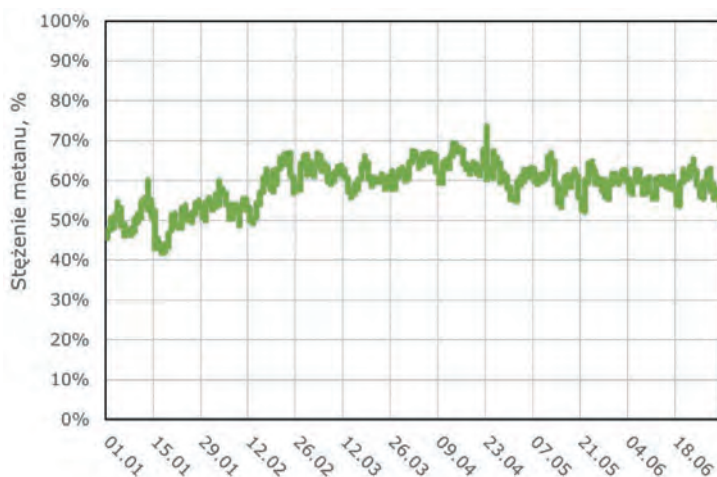


Rys. 8. Wykres zmian ujęcia metanu i produkcji energii elektrycznej w cyklu godzinowym

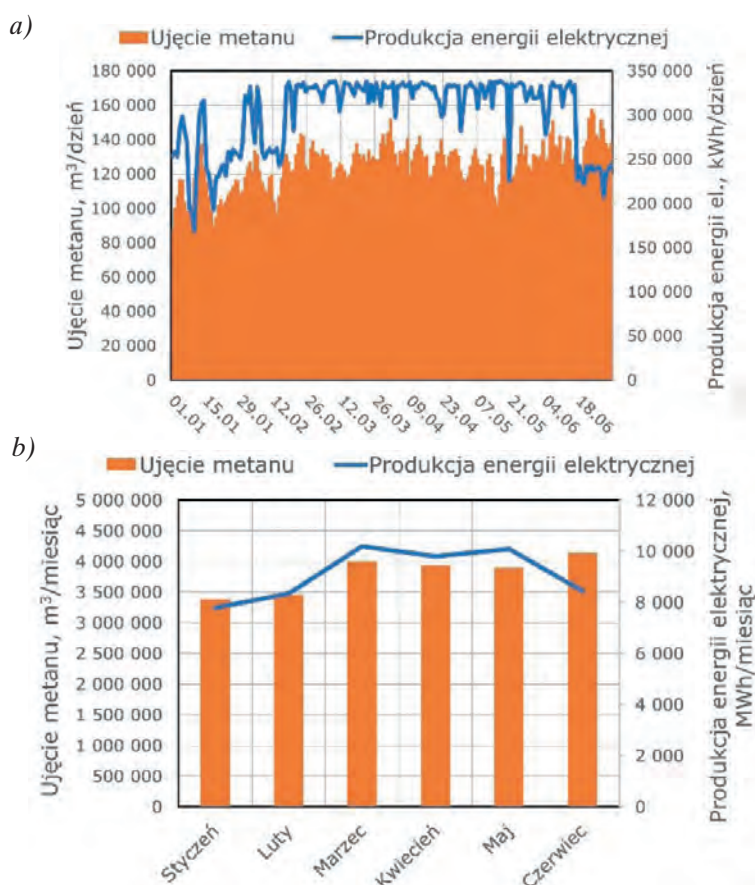
W celu wykorzystania ujętej mieszaniny w opisanym powyżej systemie kluczowe jest utrzymanie odpowiedniego stężenia metanu w strumieniu metan-powietrze. Analizie poddano zatem także stężenie tego parametru, a przebieg zmienności przedstawiono na rysunku 9. Z wykresu wynika, że stężenie

metanu utrzymywało się na średnim poziomie około 60%.

Na rysunku 10 przedstawiono zmiany stężenia metanu, produkcji energii elektrycznej oraz ujęcia mieszaniny po uśrednieniu dobowym i miesięcznym w analizowanym okresie.



Rys. 9. Wykres zmian stężenia metanu w mieszance



Rys. 10. Zmienność ujęcia metanu w I półroczu: a) w cyklu dziennym; b) w cyklu miesięcznym

Miesięczne ujęcie metanu w pierwszym półroczu zmienia się w zakresie od 3,3 do 4,2 mln m^3 na miesiąc, co przekłada się na produkcję energii elektrycznej od 7,7 do 10,2 tys. MWh na miesiąc. Emisja me-

tanu w takiej ilości odpowiada około 55–65 tysięcy ton CO_2e , przy założeniu współczynnika GWP na poziomie 25. W wyniku spalania metanu do atmosfery uwalniany jest dwutlenek węgla w większej ilości niż

metan, który jest dostarczany do procesu. Na każdą tonę spalnego metanu emitowane jest 2,75 Mg dwutlenku węgla. W związku ze znacznie niższym wpływem tego gazu na efekt cieplarniany, pomimo większej emisji, proces ten ma o wiele mniejszy wpływ na atmosferę w porównaniu z emisją czystego metanu. Przy tak znacznej emisji metanu do atmosfery w trakcie wydobywania spalanie metanu odgrywa kluczową rolę w procesie ograniczania efektu cieplarnianego.

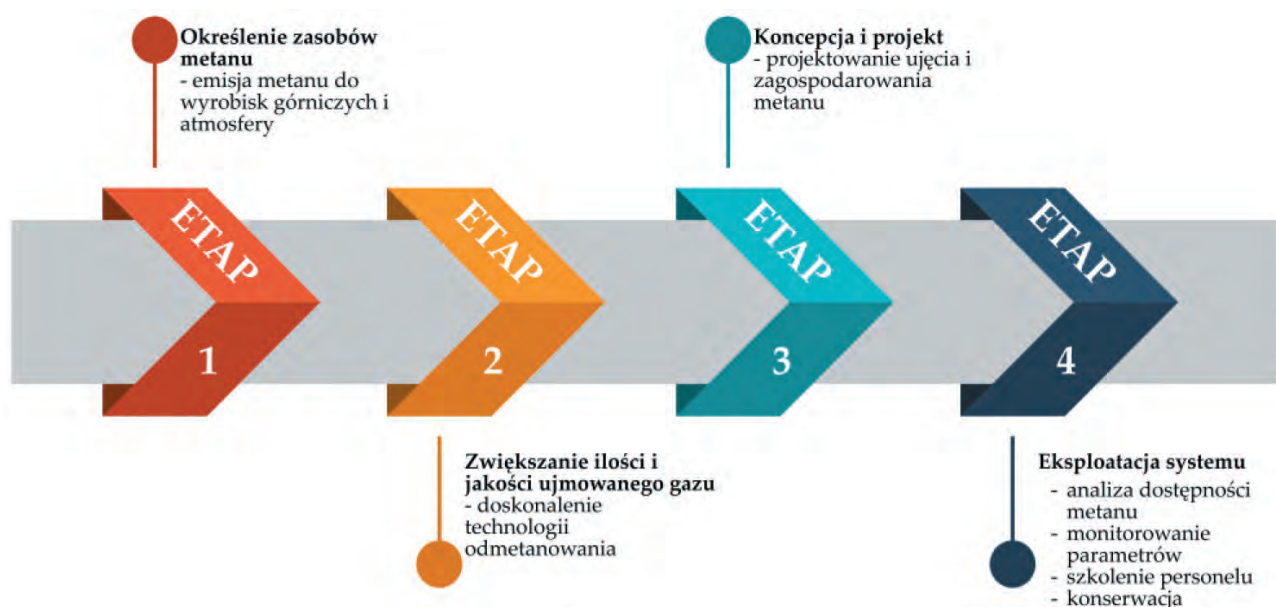
4.4. Propozycja kompleksowego podejścia do zarządzania i gospodarczego wykorzystania metanu

Stosowanie najlepszych praktyk w zakresie odmetanowania i wykorzystania metanu ma kluczowe znaczenie dla ograniczenia zdarzeń związanych z metanem, które zbyt często towarzyszą wydobywaniu węgla, a jednocześnie przyczynia się do ochrony środowiska przez redukcję emisji gazów cieplarnianych (GHG) [8].

Brak efektywnego zarządzania produkcją i dystrybucją energii elektrycznej/ciepłej/chłodniczej uniemożliwia eksploatację pokładów węgla o dużym zagrożeniu metanowym i klimatycznym, a dodatkowo niezagospodarowane emisje metanu powodują szkody

środowiskowe, ale także wiążą się z opłatami emisyjnymi, co w przyszłości będzie stanowić problem opłacalności wydobywania. Stąd też tak ważne jest kompleksowe podejście do problematyki ujmowania metanu i jego optymalnego zagospodarowania. Na rysunku 11 przedstawiono diagram kompleksowego podejścia do zagadnienia ujmowania i wykorzystania metanu.

Za pierwszy etap postępowania przyjęto szczegółowe rozeznanie w zakresie źródła metanu w analizowanej kopalni, czyli ustalenia prognozowanej emisji do wyrobisk górniczych i/lub atmosfery. Rozpoznanie zasobów jest niezbędne do właściwego doboru techniki ujmowania i wykorzystania gazu. Kolejny krok dotyczy optymalizacji wybranej metody odmetanowania przez zwiększenie ilości i jakości ujmowanego gazu. Na podstawie dwóch pierwszych etapów możliwe jest opracowanie koncepcji projektowanego ujęcia i zagospodarowania metanu, a następnie wdrożenie projektu. Nie jest to jednak ostatni etap właściwego zarządzania emisjami metanu w kopalni. Jednym z najważniejszych etapów jest właściwa eksploatacja systemu. Dotyczy to głównie bieżącej analizy zmian w dostępności metanu, monitorowania parametrów ujętej mieszaniny, szkolenia personelu w zakresie właściwej obsługi systemu oraz systematycznej konserwacji.



Rys. 11. Schemat kompleksowego podejścia do problematyki ujmowania i zagospodarowania metanu

5. PODSUMOWANIE

Emisja metanu z kopalń od lat budzi duże zainteresowanie. Jest to temat bardzo istotny nie tylko ze względów środowiskowych, ale także z uwagi na korzyści energetyczne, a co za tym idzie – finansowe. Polska jest obok Stanów Zjednoczonych, Rosji, Au-

stralii, Ukrainy, Kazachstanu i Indii jednym z krajów o znaczącej emisji CMM.

Aby zapewnić profesjonalne i skuteczne zarządzanie ryzykiem, należy przenieść dobre praktyki wydobywcze do wszystkich krajów. Niezależnie od lokalizacji czy warunków górniczych możliwe jest znaczne ograniczenie ryzyka wystąpienia zdarzeń i wybuchów

metanu. Skuteczne zarządzanie ryzykiem metanowym w kopalniach węgla może również przynieść korzyść w postaci przyczynienia się do ograniczenia emisji gazów cieplarnianych. Zastosowanie układu trójgeneracyjnego, w którym metan z kopalni jest spalany w silnikach gazowych i wykorzystywany do produkcji energii elektrycznej, ciepłej i chłodniczej, jest przykładem optymalnego zagospodarowania. Pozwala to na zmniejszenie emisji metanu do atmosfery przy jednoczesnym zwiększeniu efektywności wydobywania węgla w warunkach zagrożenia metanowego oraz klimatycznego.

W artykule przedstawiono wyniki badań przeprowadzonych w kopalni węgla kamiennego w Polsce i na tym przykładzie wskazano na ekologiczne i ekonomiczne korzyści wynikające z zastosowania układu trójgeneracyjnego. Miesięczne ujęcie metanu waha się od 3,3 mln m³ do 4,1 mln m³, co odpowiada miesięcznej produkcji energii elektrycznej od 7790 MWh do 10 190 MWh. Taka emisja metanu w ekwiwalencie CO₂ wynosi około 55–66 tys. ton CO₂e.

Istnieje zatem potencjał do wykorzystania metanu z kopalni węgla kamiennego w układzie trójgeneracyjnym w celu skutecznego ograniczenia emisji tego gazu do atmosfery. Jednakże, aby osiągnąć ten cel, konieczne jest zapewnienie odpowiedniego stężenia i ilości ujmowanego metanu przez system odmetanowania, co stanowi kluczowy element skutecznej strategii redukcji emisji metanu w sektorze węglowym.

Literatura

- [1] Modzelewski W., Nęcki J.: *Emisje metanu: wyzwanie dla klimatu, energetyki i prawa*. ClientEarth, Prawnicy dla Ziemi, Warszawa 2022, <https://www.clientearth.pl/media/fz5hbsnu/2022-01-26-emisje-metanu-wyzwanie-dla-klimatu-energetyki-i-prawa.pdf> [20.02.2023].
- [2] Jackson R.B., Saunio M., Bousquet P., Canadell J.G., Poulter B., Stavert A.R., Bergamaschi P., Niwa Y., Segers A., Tsuruta A.: *Increasing anthropogenic methane emissions arise equally from agricultural and fossil fuel sources*. Environmental Research Letters 2020, 15, 071002, <http://doi.org/10.1088/1748-9326/ab9ed2>.
- [3] Lan X., Thoning K.W., Dlugokencky E.J.: *Trends in globally-averaged CH₄, N₂O, and SF₆ determined from NOAA Global Monitoring, Laboratory measurements. Version 2022-10*, 2022, <https://doi.org/10.15138/P8XG-AA10>.
- [4] International Energy Agency: *Methane Tracker Database*, 2022, <https://www.iea.org/reports/global-methane-tracker-2022> [20.02.2023].

- [5] Höglund-Isaksson L., Gómez-Sanabria A., Klimont Z., Rafaj P., Schöpp W.: *Technical potentials and costs for reducing global anthropogenic methane emissions in the 2050 time-frame – results from the GAINS model*. Environmental Research Letters 2020, 2, 025004.
- [6] Krajowy Ośrodek Bilansowania i Zarządzania Emisjami (KOBiZE). *Krajowy Raport Inwentaryzacyjny 2022 Inwentaryzacja emisji i pochłaniania gazów cieplarnianych w Polsce dla lat 1988–2020. Raport syntetyczny*, Warszawa 2022, https://www.kobize.pl/uploads/materialy/materialy_do_pobrania/krajowa_inwentaryzacja_emisji/NIR_2022_raport_syntetyczny_PL.pdf.
- [7] Borowski M., Szlązak N., Swolkień J.: *Wpływ zmian ciśnienia barometrycznego na efektywność ujęcia metanu ze ściany wydobywczej przez system odmetanowania*. Wiadomości Górnicze 2016, 67, 9: 526–533.
- [8] United Nations. Economic Commission For Europe, and Methane To Markets Partnership: *Best Practice Guidance for Effective Methane Drainage and Use in Coal Mines*. New York – Geneva: United Nations, 2010, <https://lccn.loc.gov/2010554273> [20.02.2023].
- [9] Nawrat S., Kuczera Z., Łuczak R., Życzkowski P., Napieraj S., Gatnar K.: *Utylizacja metanu z pokładów węgla w polskich kopalniach podziemnych*. Uczelniane Wydawnictwa Naukowo-Dydaktyczne, Kraków 2009.
- [10] Wyższy Urząd Górniczy: *Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo-geologiczną w 2022 roku (porównanie od roku 2017)*. Katowice 2023.
- [11] Borowski M., Życzkowski P., Łuczak R., Karch M., Cheng J.: *Tests to Ensure the Minimum Methane Concentration for Gas Engines to Limit Atmospheric Emissions*. Energies 2020, 13, 44, <https://doi.org/10.3390/en13010044>.
- [12] Pawlacyk-Kurek A., Suwak M.: *Will It Be Possible to Put into Practice the Mitigation of Ventilation Air Methane Emissions? Review on the State-of-the-Art and Emerging Materials and Technologies*. Catalysts 2021, 11, 1141, <https://doi.org/10.3390/catal11101141>.
- [13] Gatnar K.: *Kogeneracja i trójgeneracyjna na bazie gazu z odmetanowania kopalń – aktualny stan w Jastrzębskiej Spółce Węglowej. Materiały XXX Konferencji z cyklu Zagadnienie surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej*, Zakopane, 9–12.10.2016 r., https://se.min-pan.krakow.pl/pelne_teksty30/k30_mk_z/k30mk_gatnar_z.pdf [20.02.2023].
- [14] Borowski M., Życzkowski P., Cheng J., Łuczak R., Zwolińska K.: *The Combustion of Methane from Hard Coal Seams in Gas Engines as a Technology Leading to Reducing Greenhouse Gas Emissions – Electricity Prediction Using ANN*. Energies 2020, 13, 4429, <https://doi.org/10.3390/en13174429>.

dr hab. inż. MAREK BOROWSKI, prof. AGH
borowski@agh.edu.pl

mgr inż. KLAUDIA ZWOLIŃSKA-GLĄDYS
kzwolinska@agh.edu.pl

mgr inż. ANDRZEJ SZMUK
szmuk@agh.edu.pl

AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

KONRAD TRZOP

Application of a measuring and recording system with MEMS technology for a powered roof support

Innovative technologies in hard coal production are indispensable for building a modern business enterprise. The pace of environmental and social changes inspires the need for continuous improvement of the coal mining process. The domain of machinery and equipment is the most important element of the entire production process. Machines and equipment require the constant monitoring of their operating parameters to ensure production continuity and safety. A solution addressing those needs is a measuring system that records the parameters of the powered roof support. The constructed measuring system uses MEMS technologies to measure changes in the transverse and longitudinal inclination of the elements and the height of the powered roof support. The measuring system allows for determining the parameters of the powered roof support's operation in the mining wall. The following paper presents an example of the use of MEMS technology in the measuring system sensors, as well as the stages of real-life research on adapting the powered roof support to the measuring system.

Key words: powered roof support, efficiency, safety, FEM, MEMS, underground mining

1. INTRODUCTION

The development of innovative solutions provokes the need for research on their adaptation to the difficult conditions of the mining industry [1, 2]. Implementing research in this domain requires several analyses of large data sets and real-life tests [3]. Difficult geological and mining conditions pose major challenges to the engineering environment [4–6]. The machine park is an area that needs continuous improvement [7]. The wall complex is the key element for coal processing and consists of a mining machine, a powered roof support, and a scraper conveyor [7].

The powered roof support is the part of the mechanized wall complex that excavates the rock mass and transports it from the forehead zone. The powered roof support is tasked with securing the working space in which the operation is carried out and sup-

porting the operation of the entire mechanized complex, the elements of which are largely important for the entire system [8].

The risks in the mining production process, especially the natural ones, place very high demands on the powered roof support and its sections [8]. The cooperation of the powered roof support and the rock mass affects the efficiency of other machines, including primarily the mining machine [8].

The primary elements of the powered roof support include all parts that transfer loads caused by the pressure of the roof rocks. Additional elements are the parts that do not carry loads coming from the pressure of the roof rocks, but that are necessary for the functioning of the powered roof support [9]. The primary elements are shown in Figure 1.

Continuous monitoring of the powered roof support's operating parameters is required to improve work

safety and efficiency. The author proposes adapting the measuring system, which would allow for constant measurement of geometric parameters and pressure [9].

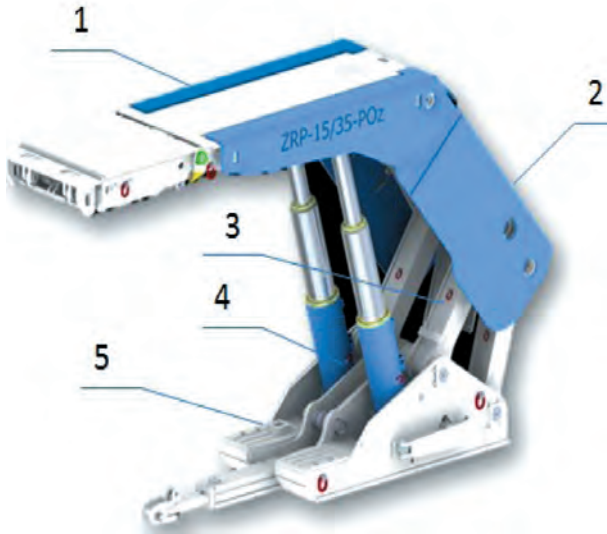


Fig. 1. Structural elements of powered roof support
1 – cap piece, 2 – shield support, 3 – lemniscates,
4 – hydraulic props, 5 – foot piece

The measurement system is based on miniaturized electro-mechanical devices operating using MEMS technology [9–11]. The technology facilitates the development of advanced machines and devices [10, 11]. MEMS technology is interdisciplinary. It combines engineering, design, and manufacturing areas [10, 11]. It is used in mechanical engineering, chemistry, materials engineering, electrical engineering, fluid engineering, optics, medicine, communication systems, and space science [10, 11]. Using the technology in various types of sensors allows for measuring vibration, impact, inclination, displacement, and rotation (Fig. 2) [10–12]. The measurement is made with the component force of gravity (g), which affects the object on the surface. MEMS is resistant to vibration and is highly reliable. Furthermore, it has low energy consumption, microscopic construction, and low production costs [10–12].

The paper presents the results of the model, bench, and real-life tests, the purpose of which was to determine the installation location of sensors and the correct operation of the measuring system. The measuring and recording system consisted of a computer with specialized software and four sensors. The applied solution made it possible to measure the inclination angles of the powered roof support elements and the height of the machine at a given stage of its operation.

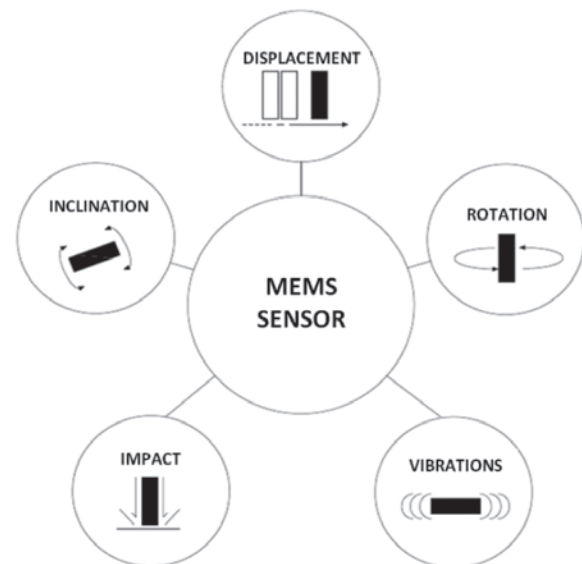


Fig. 2. Measuring capacity of MEMS sensors [11]

It was possible to visualize the operating cycle of the powered roof support thanks to the measurements obtained, and the collected data.

2. THE RESEARCH PROCESS OF THE POWERED ROOF SUPPORT'S DEVELOPMENT

Monitoring the parameters of the operation of a powered roof support is a challenge for engineers due to the difficult working conditions of the entire measuring system and the powered roof support cycle resulting from the coal mining process. Ameliorating the measuring system requires long-term research and analysis of the data obtained at each research stage. To refine the measuring system, we focused on each of its elements, carrying out model, bench, and experimental real-life tests, and finally attempting to implement them into the production cycle.

2.1. Model tests

The model tests were the first part of the analysis, which was supposed to determine the mounting locations of the measuring system designed for constant monitoring of the powered roof support parameters [15]. The research was based on the finite element method (FEM), which included performing real stress simulations on the structural elements of the powered roof support. The first stage consisted of determining the geometric parameters of the designed section of the pow-

ered roof support. Then, the limits of elasticity and plasticity of the structure were determined with the view to the boundary conditions. The next step included determining the calculation area in the form of a computational grid, as well as performing a simulation of reduced stresses. Figure 3 presents an example of the simulation on a powered roof support section.

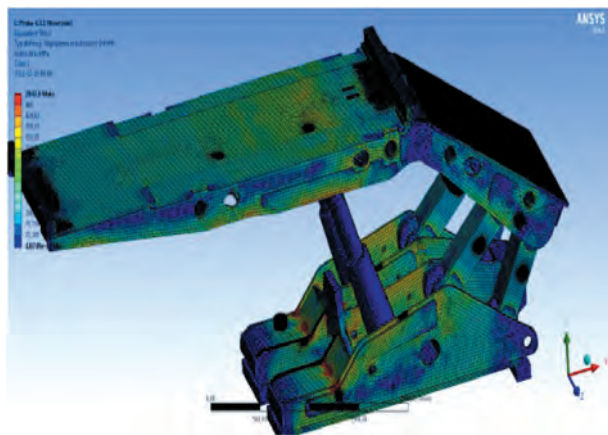


Fig. 3. Example of simulation of model tests on powered roof support – FEM method

The simulation facilitated identifying the areas which are most vulnerable to breakage or plasticization by external forces in real-life conditions, thus excluding these areas as a potential mounting location for the measuring system. The model tests carried out at the design stage made it possible to exclude collisions of the basic elements of the powered roof support with the measuring and recording system and to determine the initial locations of its installation.

2.2. Bench testing

Bench tests were carried out on the measuring system designed for this purpose and the powered roof support sections, which during real-life tests were installed in a wall excavation. The sensors constituting the measuring system were installed following the guidelines established at the stage of computer simulations. The sensors were installed on the primary elements of the powered roof support section, i.e. cap piece, foot piece, shield and lemniscate. The tests aimed to obtain data pertinent to the height of the powered roof support (Fig. 4) in the alternating phases of its operation and to confirm whether the measuring system works correctly. Measurements were continuously verified manually (Fig. 5).

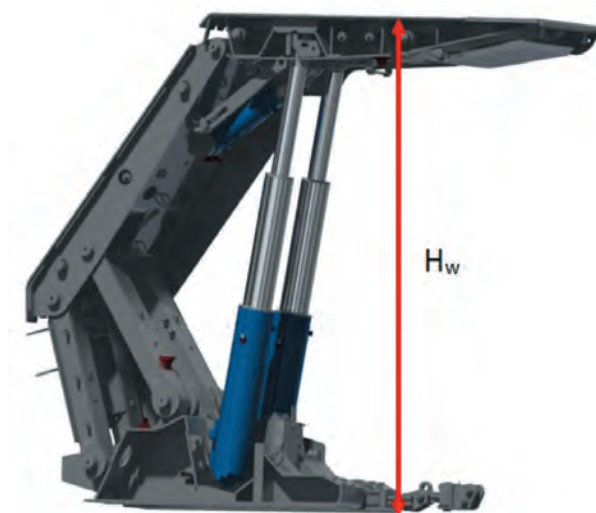


Fig. 4. Measuring the powered roof support working height



Fig. 5. Manual measurement of the powered roof support working height

The Figure 6 and Table 1 present changes in the working height of the powered roof support, resulting from the way it is controlled during bench tests. This data is used to pre-determine the measurement error. The measurement error was calculated by comparing the manual measurements with the data obtained from the measuring system. The scope of error at the time of testing was within 4–10 cm. In addition, no collision was detected with the primary powered roof support and additional structural elements while operating it in real-life conditions with the installed measuring system. Thus, the analyses from computer simulations were correct [15].

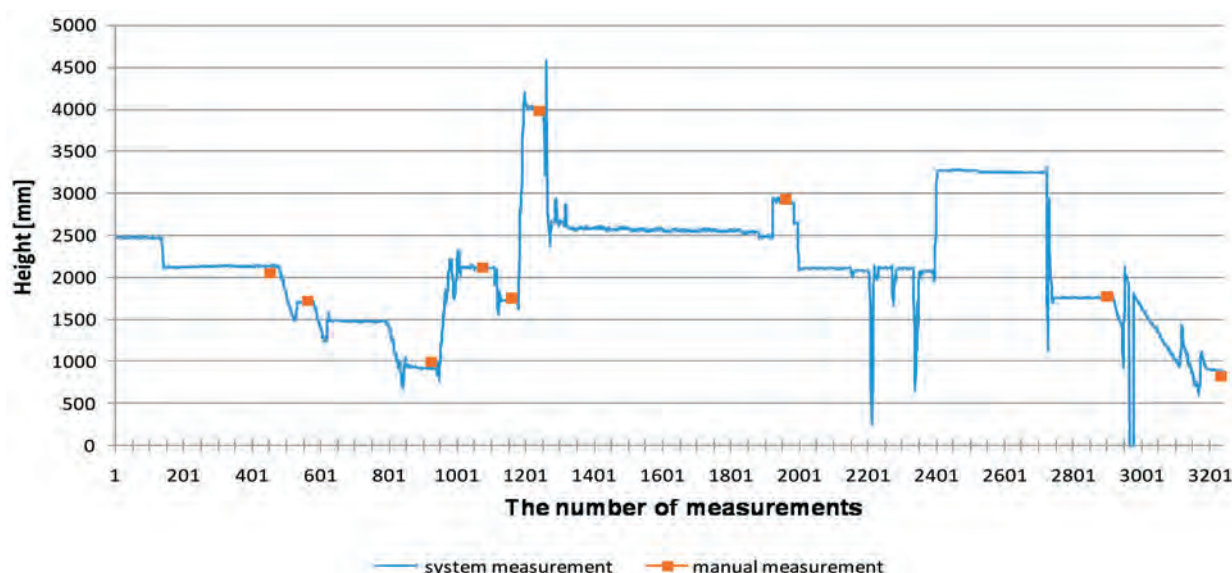


Fig. 6. View of the distribution of the system's measurements and manual height of the powered roof support section at the test station

Table 1
Comparison of measurements from bench tests

Type of measurement	1	2	3	4	5	6	7	8	9
System [mm]	2137.89	1715.61	927.29	2131.12	1722.03	3987.04	2906.37	1768.74	883.83
Manual [mm]	2235.89	1761.61	1004.29	2193.12	1780.03	4039.04	2973.37	1811.74	967.83
Difference [mm]	98	46	77	62	58	52	67	43	84

2.3. Experimental tests

Model tests performed with the finite element method (FEM) and bench tests allowed to exclude

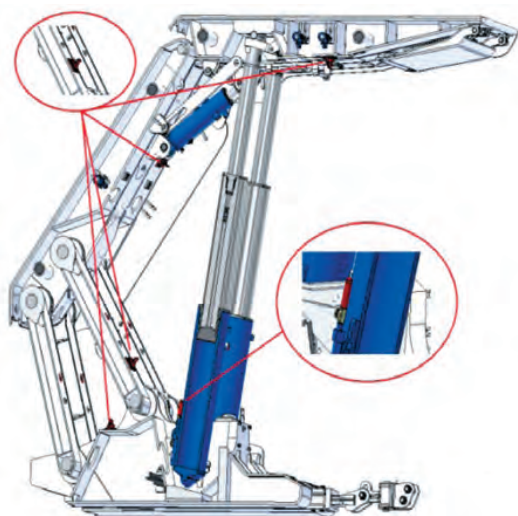


Fig. 7. Placement of sensors on the test station under real-life conditions

collisions of individual elements of the powered roof support with built-in sensors at the initial stage. They also identified and excluded the sensor mounting locations that were most exposed to external forces. The developed guidelines helped to create a research station and enabled the practical use of the entire system under real-life conditions. The placement of sensors in real-life conditions is presented in Figure 7.

The measuring system was equipped with a hydraulic prop operating pressure sensor to obtain additional parameters of the section in the wall excavation. This measurement additionally provided the load-carrying capacity of the powered roof support that can affect its working height. The location and installation method had a key influence on the calibration of the measuring and recording system. The correct orientation of the sensor is dependent on the mounting brackets. The innovative mounting

brackets are installed so that the orientation of the sensor's lens is as per the guidelines established at the stage of bench testing. An example of a sensor installed with a mounting bracket is presented in Figure 8.

Conducting tests in real-life conditions provided large data sets, which served to determine the guidelines for the monitoring system. At the stage of experimental tests, the parameters of the operation of three sections of the powered roof support were determined based on the height of their operation (Fig. 9). The obtained data confirmed the correct operation of the measuring system. The next stage involved the use of a measuring system for continuous monitoring of the parameters of the powered roof support. The system enables data to be transmitted to the visualization stand located in the sub-wall excavation and to the surface [9].



Fig. 8. Sensor installation in real-life conditions using mounting brackets

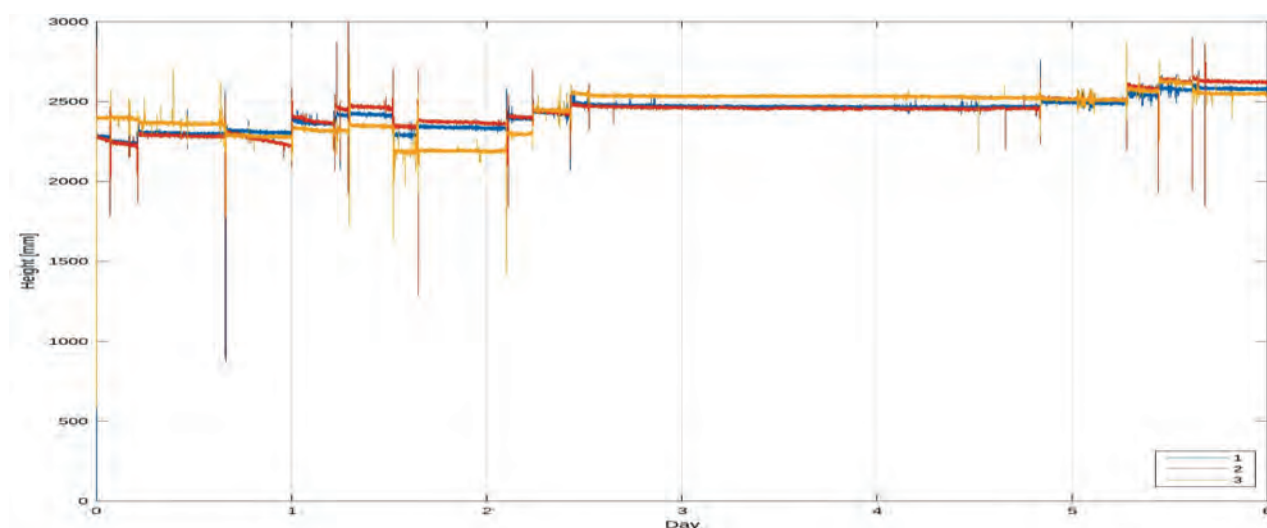


Fig. 9. View of height distribution in powered roof support sections

3. EXAMPLE OF USE

Measuring system has been installed in underground conditions in the mining wall in deck 510 with a mass from 8.8 m to 10.8 m. The layers there collapse at an angle of approx. 6° southwest. Five sections in the wall excavation were monitored. Three of them were equipped with a set of sensors installed side by side. The others were installed at a distance of 25 and 35 sections in the direction of the reverse drive of the scraper conveyor.

The bottom computer for the current data visualization from the section was located in the sub-wall

excavation. The geometric parameters of the section i.e. the transverse and longitudinal inclination of the primary elements of the powered roof support, height, and pressure were all monitored. Figure 10 presents the visualization of the operation parameters of one of the monitored sections. Connection and mutual communication of sensors in the sections was wireless. Data was transmitted to the server room on the surface from an underground station located in the excavation. Wireless communication between 5 sections and the cooperation of the underground station with the server room on the surface was used in the measuring system's tests for the first time.

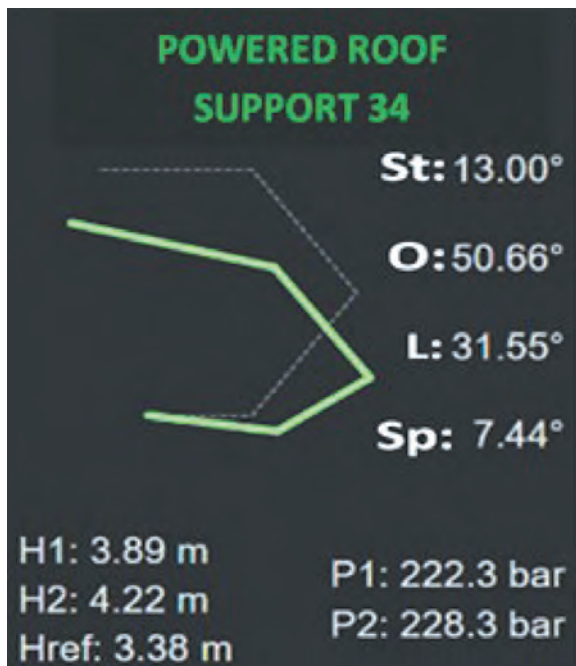


Fig. 10. Visualization of powered roof support operational parameters under real-life conditions

4. SUMMARY

Thanks to the measurements of the powered roof support geometry (transverse and longitudinal inclination, height), we can determine changes occurring in the height of the wall and the inclination of the powered roof support's primary elements. The difficult conditions forced us to use additional equipment in the powered roof support sections in order to increase the safety and efficiency of work in the wall excavation. Mining in a pit with variable inclination significantly affects the efficiency of the coal loading process and increases the power consumption of the electric and feed motor. The increasing inclination degree in the wall excavation changes the way machines are operated and managed. Improving working conditions and constant monitoring of these factors is possible with the help of continuous measurement of changes in the inclination of the machines and devices. Using powered roof support geometry monitoring systems, we have a chance to reduce the number of malfunctions of the entire wall complex, reduce the effects of uncontrolled falling of roof rocks, preserve the geometric parameters of the excavation, and constantly monitor the powered roof support operation from any place. Ongoing monitoring of geometric

changes in the powered roof support, occurring during the mining process, will allow for:

- ensuring the stability of the roof;
- maintaining the expected geometric parameters of the excavations;
- increasing competitiveness in the mining market;
- increasing security;
- reducing the risk of adverse events associated with falling roof rocks;
- improving the quality of big data storage and analysis;
- increasing the effectiveness of control and supervision of employees;
- early detection and prevention of malfunctions;
- determining the inclination and height of the section at a given working stage;
- increasing the efficiency of the entire wall complex.

The measuring and recording system is one with the tools for improving autonomous wall complexes. The data made available by the measuring sensors can be used by the control systems of the powered roof support to visualize the wall, in advanced automatic wall complexes. They will allow for automatic control of the powered roof support progress following the recognition and assumed shape of the wall excavation. The applied measuring system allows continuous access to the operating parameters of the powered roof support without the need for intervention of employees and adaptation of these parameters to external conditions.

The paper presents the stages of the tests, the purpose of which was to adapt the measuring system and the design of the powered roof support to cooperate, thereby obtaining the compatibility of the structure with the measuring system. Without long-term research on the location and method of mounting the sensors of the measuring system, the quality of the measurement data obtained would be fraught with a high error possibility.

References

- [1] Szurgacz D.: *Zmechanizowana obudowa ścianowa w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [2] Prostański D.: *Empirical Models of Zones Protecting Against Coal Dust Explosion*. Archives of Mining Sciences 2017, 62, 611–619.
- [3] Korbiel T., Stepien B., Batko W., Pawlik P., Blaut J.: *Recognition of the 24-hour Noise Exposure of a Human*. Archives of Acoustics 2017, 42, 601–607.
- [4] Burdzik R.: *Impact and Assessment of Suspension Stiffness on Vibration Propagation into Vehicle*. Sensors 2023, 23, 1930.

- [5] Hebda-Sobkowicz J., Gola S., Zimroz R., Wyłomańska A.: *Identification and Statistical Analysis of Impulse-Like Patterns of Carbon Monoxide Variation in Deep Underground Mines Associated with the Blasting Procedure*. Sensors 2019, 19, 2757.
- [6] Kawalec W., Błazej R., Konieczna M., Król R.: *Laboratory Tests on e-pellets effectiveness for ore tracking*. Mining Sciences 2018, 25, 7–18.
- [7] Krauze K., Klempka R., Mucha K., Wydro T.: *Computer-aided selection of the stabilizing system parameters of the mobile transport and assembly manipulator in mining excavations*. Archives of Mining Sciences 2023, 68, 3–18.
- [8] Rajwa S., Janoszek T., Prusek, S.: *Influence of canopy ratio of powered roof support on longwall working stability – A case study*. International Journal of Mining and Technology Science 2019, 29, 591–598.
- [9] Trzop K., Szurgacz D.: *Optimal geometry of the powered roof support's operation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2024, 1295(1), 012005.
- [10] Łuczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M.: *Sensing Tilt with MEMS Accelerometers*. IEEE Sensors Journal 2006, 6(6), 1669–1675.
- [11] Łuczak S.: *Pomiar odchylenia od pionu z użyciem akcelerometrów MEMS*. Pomiary Automatyka Robotyka 2008, 7–8, 14–16.
- [12] Analog Devices: *Using an accelerometer for inclination sensing*. AN-1057 Application Note 2010, 1–8.
- [13] Xu R., Zhou S., Li W. J.: *MEMS Accelerometer Based Non-specific-User Hand Gesture Recognition*. IEEE Sensors Journal 2012, 12, 5.
- [14] Wang H., Xiong D., Duan Y., Liu J., Zhao X.: *Advances in vibration analysis and modelling of large rotating mechanical equipment in mining arena: A review*. AIP Advance 2023, 13, 110702.
- [15] Szurgacz D., Trzop K., Gil J., Zhironkin S., Pokorný J., Gondek H.: *Numerical Study for Determining the Strength Limits of a Powered Longwall Support*. Processes 2022, 10, 527.

Konrad TRZOP, M.Sc., Eng.
Polska Grupa Górnicza S.A.
Department KWK Ruda Ruch Bielszowice
ul. Halembaska 160,
41-711 Ruda Śląska, Poland
konrad.trzop.kt@gmail.com

KONRAD TRZOP

Zastosowanie układu pomiarowego rejestrującego parametry pracy obudowy zmechanizowanej z wykorzystaniem technologii MEMS

Stosowanie innowacyjnych technologii w procesie produkcji węgla kamiennego jest nieodzownym elementem budowania przedsiębiorstwa na miarę współczesnych czasów. Tempo zachodzących zmian środowiskowych i społecznych powoduje potrzebę ciągłego doskonalenia procesu produkcyjnego, którego najważniejszym elementem są maszyny i urządzenia. Wymagają one stałego monitorowania ich parametrów pracy w celu zapewnienia ciągłości produkcyjnej oraz bezpieczeństwa. Propozycją rozwiązania tego problemu jest układ pomiarowy rejestrujący parametry pracy obudowy zmechanizowanej, wykorzystujący technologię MEMS do pomiaru zmian nachylenia poprzecznego i podłużnego elementów oraz wysokości obudowy. Praca układu pozwala określić parametry pracy zmechanizowanej obudowy w ścianie wydobywczej. W artykule przedstawiono przykład wykorzystania technologii MEMS w czujnikach układu pomiarowego oraz etapy badań zrealizowanych w celu przystosowania obudowy zmechanizowanej do wdrożenia przedstawionego rozwiązania w warunkach rzeczywistych.

Słowa kluczowe: zmechanizowana obudowa ścianowa, efektywność, bezpieczeństwo, MES, MEMS, górnictwo podziemne

1. WPROWADZENIE

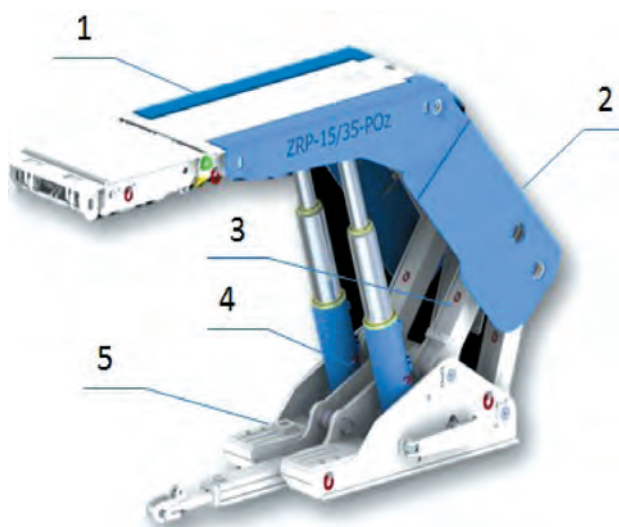
Rozwój innowacyjnych rozwiązań powoduje potrzebę prowadzenia badań w zakresie ich przystosowania do trudnych warunków branży wydobywczej [1, 2]. Realizacja badań w tym zakresie wymaga analiz dużych zbiorów danych oraz testów w warunkach rzeczywistych [3]. Niesprzyjające warunki geologiczno-górniczne stanowią duże wyzwanie dla środowiska inżynierskiego [4–6]. Obszarem, który wymaga ciągłego doskonalenia, jest park maszynowy [7]. W procesie urabiania węgla kamiennego kluczowym elementem jest kompleks ścianowy, który składa się z maszyny urabiającej, obudowy ścianowej oraz przenośnika ścianowego [7].

Obudowa zmechanizowana wchodzi w skład zmechanizowanego kompleksu ścianowego, którego zadaniem jest bezpośrednie urabianie górotworu oraz przetransportowanie urobku ze strefy przodkowej.

Obudowy mają m.in. zabezpieczać przestrzeń roboczą, w której prowadzona jest eksploatacja, oraz wspomagać pracę całego kompleksu zmechanizowanego, co powoduje, że znaczenie każdej z nich dla całego systemu jest bardzo duże [8].

Występujące w procesie produkcji górniczej zagrożenia, w szczególności naturalne, sprawiają, że sekcje obudowy oraz cała obudowa muszą spełniać bardzo wysokie wymagania [8]. Jej współpraca z górotworem ma także wpływ na efektywność pracy pozostałych maszyn, w tym głównie urabiającej [8].

Do elementów podstawowych obudowy zmechanizowanej zaliczamy wszystkie części przenoszące obciążenia wywołane naciskiem skał stropowych. Elementami dodatkowymi nazywamy części nieprzenoszące obciążeń pochodzących z nacisku skał stropowych, lecz niezbędne do funkcjonowania obudowy [9]. Elementy podstawowe zostały zobrazowane na rysunku 1.



Rys. 1. Elementy konstrukcyjne obudowy zmechanizowanej:

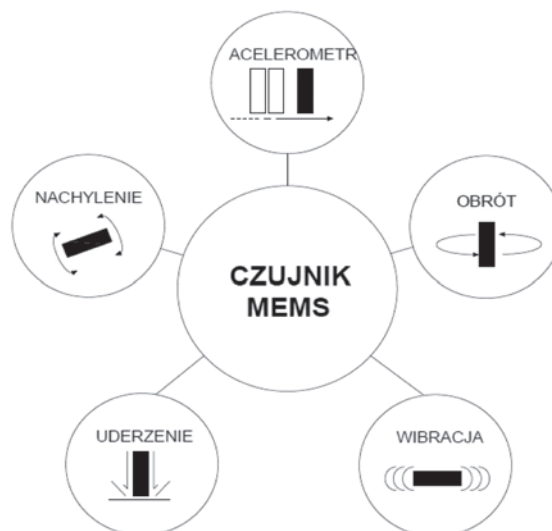
1 – stropnica, 2 – osłona odzawałowa, 3 – lemniskaty, 4 – stojaki hydrauliczne, 5 – spąglica

W celu poprawy bezpieczeństwa pracy i efektywności obudowy ścianowej konieczne jest zastosowanie ciągłego monitoringu jej parametrów pracy. Do wykonania tego zadania może posłużyć układ, który pozwoliłby na stały pomiar parametrów geometrycznych i ciśnienia [9].

Zastosowany układ pomiarowy wykorzystany w badaniach składał się ze zminiaturyzowanych urządzeń elektromechanicznych działających w technologii MEMS [9–11]. Jest ona stosowana w zaawansowanych maszynach i urządzeniach [10, 11]. Technologia MEMS ma charakter interdyscyplinarny, łączy w sobie obszary inżynieryjne, projektowe i produkcyjne [10–12] i jest wykorzystywana w inżynierii mechanicznej i materiałowej, chemii, elektrotechnice, inżynierii płynów i optyki, medycynie, komunikacji układów oraz kosmonautyce [10–12]. Zastosowanie tej technologii w różnego typu czujnikach umożliwia pomiar wibracji, uderzenia, pochylenia, przemieszczenia oraz obrotu (rys. 2) [10–12]. Pomiar odbywa się z wykorzystaniem składowej siły grawitacji g , która oddziałuje na obiekt na powierzchni. Urządzenia w technologii MEMS cechują się odpornością na wibracje, dużą niezawodnością, niskim zużyciem energii, mikroskopijną budową oraz niskimi kosztami produkcji [10–12].

Artykuł prezentuje wyniki badań modelowych, stanowiskowych oraz w warunkach rzeczywistych, których celem było określenie miejsc montażu czujników oraz osiągnięcie prawidłowej pracy układu. Układ pomiarowo-rejestrujący składał się z komputera wyposażonego w specjalistyczne oprogramowanie i czterech czujni-

ków. Zastosowane rozwiązanie umożliwiło pomiary kątów nachylenia elementów obudowy i jej wysokości w danej fazie pracy. Dzięki przeprowadzonym pomiarom oraz zebranym danym można było zobrazować cykl pracy zmechanizowanej obudowy ścianowej.



Rys. 2. Zdolności pomiarowe czujników MEMS [11]

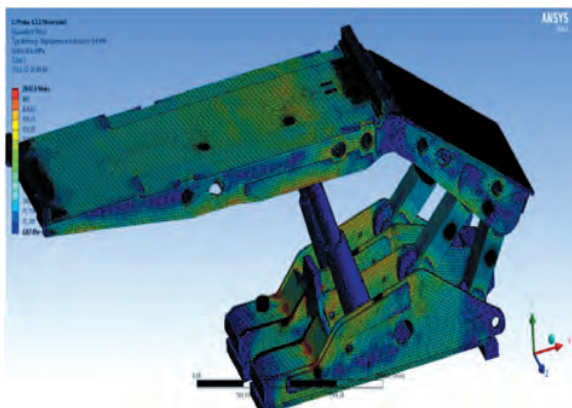
2. PRZEBIEG BADAŃ W ZAKRESIE ROZWOJU KONSTRUKCJI OBUDOWY ŚCIANOWEJ

Monitoring parametrów pracy obudowy zmechanizowanej stanowi wyzwanie dla inżynierów ze względu na trudne warunki pracy całego układu pomiarowego oraz cykl pracy obudowy związany z procesem urabiania węgla. Doskonalenie pracy układu pomiarowego wymaga długotrwałych badań i analiz danych pozyskiwanych na każdym z ich etapów. W celu dopracowania układu pomiarowego skupiono się na każdym jego elemencie, realizując badania modelowe, stanowiskowe oraz eksperymentalne w warunkach rzeczywistych, ostatecznie podejmując próby wdrożenia do cyklu produkcyjnego.

2.1. Badania modelowe

Badania modelowe stanowiły pierwszą część podjętej analizy polegającej na wyznaczeniu miejsc montażu układu pomiarowego zaprojektowanego do stałego monitoringu parametrów pracy obudowy ścianowej [15]. W badaniach wykorzystano metodę elementów skończonych (MES), która pozwoliła na wykonanie symulacji naprężeń rzeczywistych na elementach konstrukcyjnych obudowy. Pierwszy etap polegał na określeniu

parametrów geometrycznych projektowanej sekcji obudowy zmechanizowanej. Kolejno określono granice sprężystości i plastyczności konstrukcji, uwzględniając zadane warunki brzegowe. Następnym etapem było wyznaczenie obszaru obliczeniowego w postaci siatki obliczeniowej i wykonanie symulacji naprężeń zredukowanych. Na rysunku 3 zaprezentowano przykład takiej symulacji na sekcji obudowy zmechanizowanej.



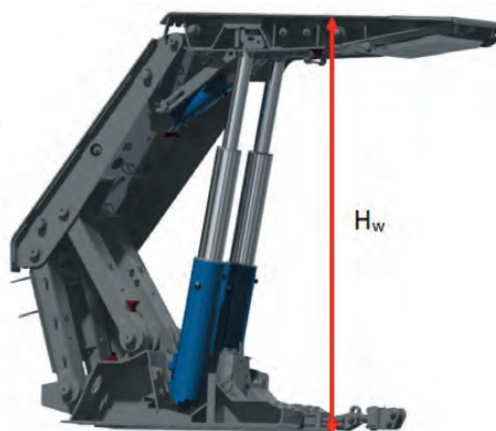
Rys. 3. Przykład symulacji badań modelowych nad obudową zmechanizowaną (metoda MES)

Wykonana symulacja przyczyniła się do wyznaczenia miejsc w konstrukcji najbardziej narażonych na zerwanie lub uplastycznienie w wyniku oddziaływania sił zewnętrznych w warunkach rzeczywistych. Takie obszary nie mogły być brane pod uwagę jako potencjalne miejsca montażu układu pomiarowego. Zrealizowane badania modelowe na etapie projektowania pozwoliły wykluczyć kolizje podstawowych elementów obudowy zmechanizowanej z układem pomiarowo-rejestrującym oraz wyznaczyć wstępne miejsca montażu urządzeń.

2.2. Badania stanowiskowe

Badania stanowiskowe zostały zrealizowane z użyciem zaprojektowanego do tego celu układu pomiarowego. Wybrano sekcję obudowy zmechanizowanej, która podczas badań w warunkach rzeczywistych stanowiła maszynę zabudowaną w wyrobisku ścianowym. Czujniki stanowiące układ pomiarowy rozmieszczono według wytycznych sformułowanych na etapie symulacji komputerowych. Zostały one zainstalowane na podstawowych elementach sekcji obudowy zmechanizowanej, tj. na stropnicy, spągnicy, osłonie odzawałowej i lemniskatach. Celem prowadzonych badań było uzyskanie danych niezbędnych do wyznaczenia wysokości pracy obudowy (rys. 4)

w zmiennych fazach jej pracy oraz potwierdzenie prawidłowej pracy układu pomiarowego. Wykonane pomiary były na bieżąco porównywane z pomiarami ręcznymi w celu ich weryfikacji (rys. 5).

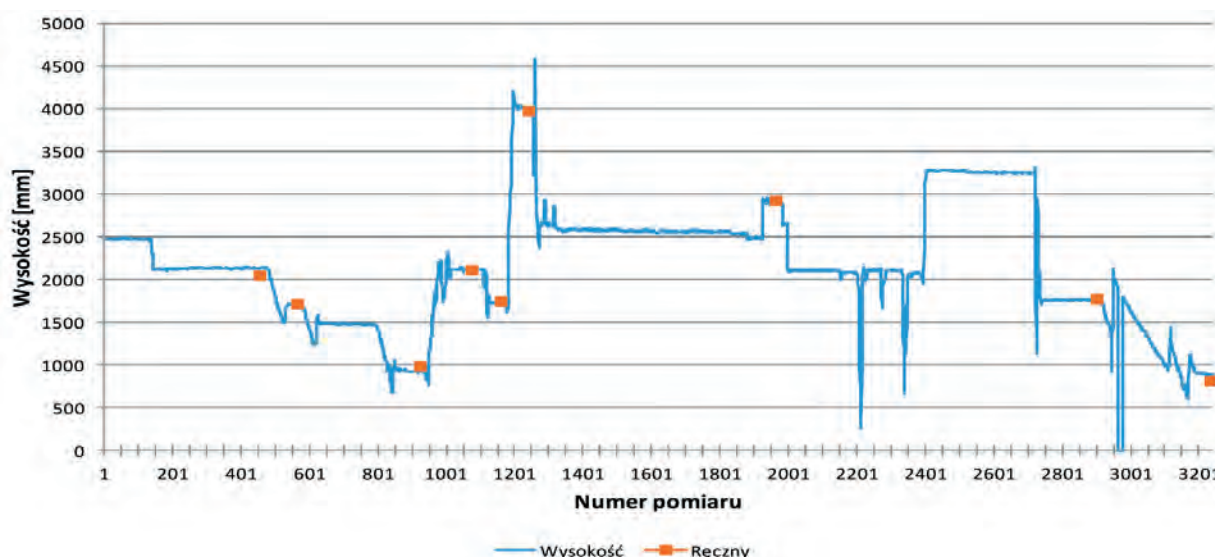


Rys. 4. Pomiar wysokości pracy obudowy zmechanizowanej



Rys. 5. Ręczny pomiar wysokości pracy obudowy zmechanizowanej

Na rysunku 6 oraz w tabeli 1 zaprezentowano zmiany wysokości pracy obudowy wynikające ze sposobu sterowania nią podczas badań stanowiskowych. Dzięki tym danym oraz porównaniu pomiarów ręcznych z danymi uzyskanymi z układu pomiarowego określono błąd pomiarowy. Zakres błędu w czasie badań stanowiskowych wahał się w granicach 4–10 cm. Dodatkowo sposób sterowania obudową przetestowano w warunkach rzeczywistych z zainstalowanym układem pomiarowym, co wykazało brak kolizji z jej podstawowymi i dodatkowymi elementami konstrukcyjnymi. Potwierdzono tym samym analizy przeprowadzone na podstawie symulacji komputerowych [15].



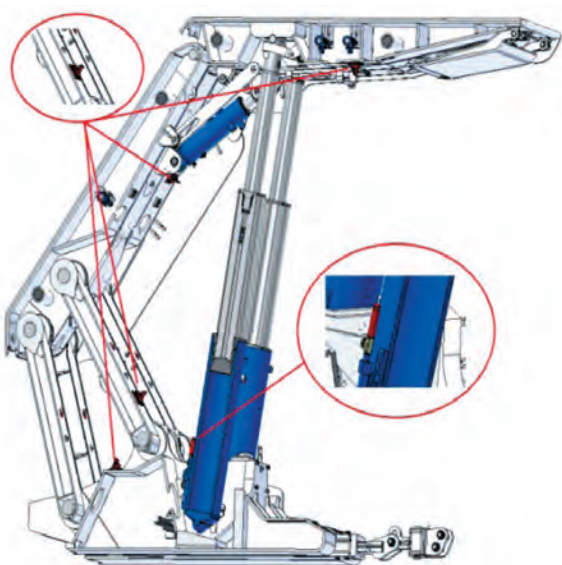
Rys. 6. Rozkład pomiarów pochodzących z badanego układu i pomiarów ręcznych wysokości sekcji zmechanizowanej obudowy ścianowej na stanowisku badawczym

Tabela 1
Zestawienie pomiarów z badań stanowiskowych

Rodzaj pomiaru	1	2	3	4	5	6	7	8	9
System [mm]	2137,89	1715,61	927,29	2131,12	1722,03	3987,04	2906,37	1768,74	883,83
Ręczny [mm]	2235,89	1761,61	1004,29	2193,12	1780,03	4039,04	2973,37	1811,74	967,83
Różnica [mm]	98	46	77	62	58	52	67	43	84

2.3. Badania eksperymentalne

Badania modelowe wykonane metodą elementów skończonych (MES) oraz badania stanowiskowe po-



Rys. 7. Rozmieszczenie czujników na stanowisku badawczym w warunkach rzeczywistych

zwoliły na początkowym etapie wykluczyć kolizje poszczególnych elementów obudowy zmechanizowanej z zabudowanymi czujnikami oraz wyeliminowały potencjalne miejsca montażu czujników, które były najbardziej narażone na oddziaływanie sił zewnętrznych. Opracowane wytyczne zostały użyte do stworzenia stanowiska badawczego i praktycznego wykorzystania całego układu. Rozmieszczenie czujników w warunkach rzeczywistych zaprezentowano na rysunku 7.

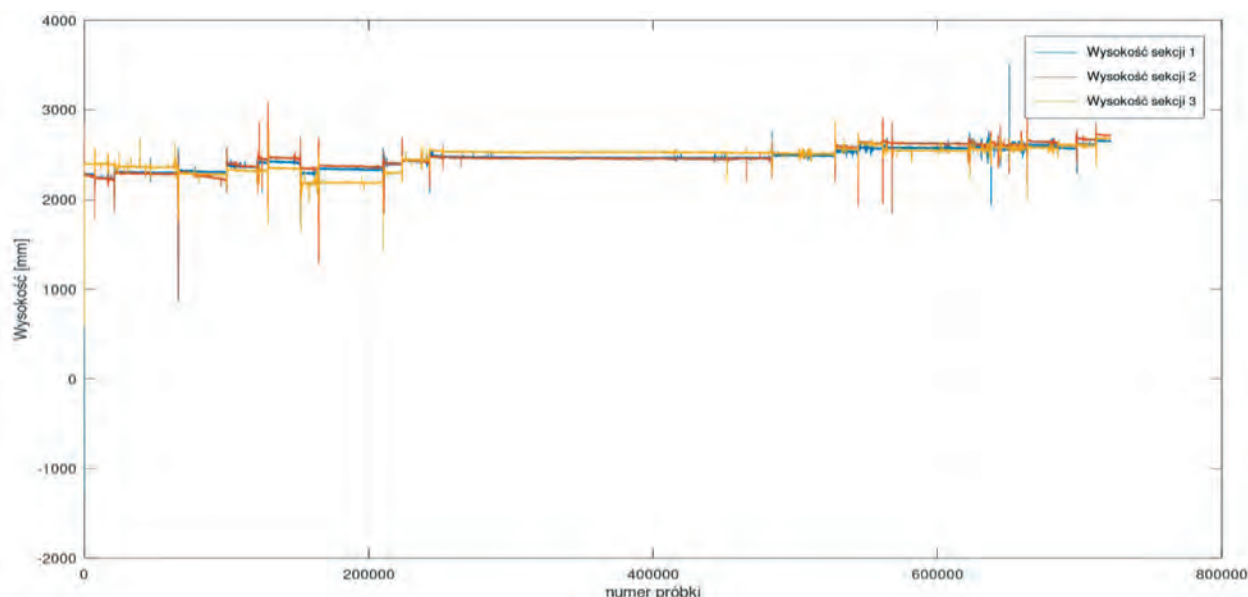
W celu uzyskania dodatkowych danych o parametrach pracy sekcji w wyrobisku ścianowym wyposażono układ pomiarowy w czujnik ciśnienia pracy stojaka hydraulicznego. Pomiar ten dodatkowo dostarczył informacji o parametrach obciążenia obudowy, które mogą wpływać na wysokości jej pracy. Miejsce i sposób zabudowy miało kluczowy wpływ na wzorcowanie układu pomiarowo-rejestrującego. Prawidłową orientację czujnika uzyskano dzięki zastosowaniu innowacyjnych uchwytów montażowych, które zostały tak zabudowane, aby sposób orientacji kłosa czujnika

był zgodny z wytycznymi określonymi na etapie badań stanowiskowych. Przykład montażu czujnika z uchwytem zaprezentowano na rysunku 8.

Badania w warunkach rzeczywistych dostarczyły dużych zbiorów danych, które zostały poddane analizie w celu określenia wytycznych dla systemu monitoringu. Na etapie badań eksperymentalnych określono parametry pracy trzech sekcji obudowy, wyznaczając wysokości ich pracy (rys. 9). Uzyskane dane potwierdziły prawidłową pracę układu pomiarowego. Kolejny etap polegał na wykorzystaniu układu pomiarowego do ciągłego monitoringu parametrów pracy obudowy ścianowej z możliwością transmisji danych do stanowiska wizualizacji zlokalizowanego w wyrobisku podścianowym oraz przesyłu danych na powierzchnię [9].



Rys. 8. Montaż czujnika w warunkach rzeczywistych z wykorzystaniem uchwytów



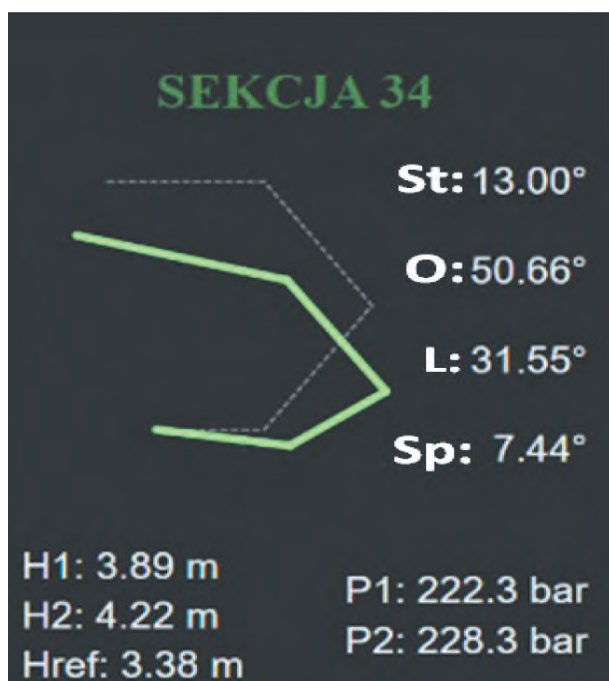
Rys. 9. Widok rozkładu wysokości w sekcjach zmechanizowanej obudowy ścianowej

3. PRZYKŁAD WYKORZYSTANIA

Układ pomiarowy został zainstalowany w warunkach dołowych w ścianie wydobywczej w pokładzie 510 o miąższości od 8,8 m do 10,8 m. Warstwy w tym rejonie zapadają pod kątem około 6° w kierunku południowo-zachodnim. Monitoringiem objęto 5 sekcji w wyrobisku ścianowym, z których trzy z nich zostały wyposażone w zestaw czujników zabudowanych obok siebie. Kolejne czujniki umieszczono w odległości 25 i 35 sekcji w kierunku napędu zwrotnego przenośnika ścianowego.

W wyrobisku podścianowym zlokalizowano komputer dołowy do bieżącej wizualizacji danych pozyskiwanych z sekcji.

Monitorowano parametry geometryczne sekcji: nachylenie poprzeczne i podłużne podstawowych elementów obudowy, wysokość oraz ciśnienie. Wizualizacje przedstawiono na rysunku 10, gdzie zaprezentowano parametry pracy jednej z monitorowanych sekcji. Połączenie i komunikacja czujników w sekcjach odbywały się bezprzewodowo. Ze stanowiska dołowego zlokalizowanego w wyrobisku dane były transmitowane do serwerowni na powierzchni. Wykonane badania stanowiły pierwsze testy układu pomiarowego wykorzystującego komunikację bezprzewodową pomiędzy 5 sekcjami i współpracę stanowiska dołowego z serwerownią na powierzchni.



Rys. 10. Wizualizacja parametrów pracy obudowy w warunkach rzeczywistych

4. PODSUMOWANIE

Na podstawie wykonanych pomiarów geometrii obudowy zmechanizowanej (nachyleń poprzecznych i podłużnych, wysokości) możemy określić zmiany zachodzące w wysokości prowadzonej ściany oraz nachylenie podstawowych elementów obudowy. Trudne warunki wymuszają na użytkowniku zastosowanie w sekcjach obudowy zmechanizowanej dodatkowego wyposażenia w celu zwiększenia bezpieczeństwa i efektywności pracy w wyrobisku ścianowym. Prowadzenie wydobywania w wyrobisku o zmiennym nachyleniu znacznie wpływa na sprawne ładowanie urobku oraz zwiększa zużycie mocy przez silnik organu i posuwu. Narastające nachylenie w wyrobisku ścianowym wymusza zmiany w sposobie obsługi maszyn, prowadzenia eksploatacji oraz zarządzania załogą. Poprawa warunków pracy i stały nadzór nad tymi czynnikami jest możliwy dzięki ciągłemu pomiarowi zachodzących zmian w nachyleniu maszyn i urządzeń. Wykorzystując do tego systemy monitorowania geometrii obudowy, dajemy sobie szansę na zmniejszenie liczby awarii całego kompleksu ścianowego, zniwelowanie skutków niekontrolowanego opadu skał stropowych, zachowanie parametrów geometrycznych wyrobiska oraz utrzymywanie stałego nadzoru nad pracą obudowy z każdego miejsca. Bieżące monitoro-

wanie zmian geometrycznych obudowy zachodzących podczas procesu urabiania pozwoli:

- zapewnić stateczność stropu;
- utrzymać zakładane parametry geometryczne wyrobisk;
- zwiększyć konkurencyjność na rynku wydobywczym;
- zwiększyć bezpieczeństwo;
- ograniczyć ryzyko wystąpienia zdarzeń niepożądanych związanych z opadem skał stropowych;
- poprawić jakość przechowywania dużych zbiorów danych oraz ich analizy;
- zwiększyć efektywność kontroli i nadzoru nad pracownikami;
- wcześniej wykrywać awarie oraz im zapobiegać;
- określić nachylenie i wysokość sekcji w danej fazie pracy;
- zwiększyć efektywność pracy całego kompleksu ścianowego.

Układ pomiarowy stanowi jedno z narzędzi do doskonalenia autonomicznych kompleksów ścianowych. Dane udostępniane przez czujniki pomiarowe mogą być wykorzystane przez systemy sterowania obudową zmechanizowaną do wizualizacji ściany w zaawansowanych automatycznie kompleksach ścianowych. Pozwoli to na automatyczne sterowanie postępowaniem obudowy zgodnie z rozpoznaniem i zakładanym kształtem wyrobiska ścianowego. Zastosowany układ pomiarowy umożliwia ciągły dostęp do danych na temat parametrów pracy obudowy bez konieczności ingerencji pracowników oraz dostosowanie tych parametrów do warunków zewnętrznych.

W artykule zaprezentowano etapy przeprowadzonych badań, których celem było dostosowanie układu pomiarowego i konstrukcji obudowy zmechanizowanej do pracy, a tym samym uzyskanie kompatybilności konstrukcji z układem pomiarowym. Bez przeprowadzonych długotrwałych badań w zakresie wyznaczenia miejsca i sposobu montażu czujników układu pomiarowego uzyskane dane byłyby obciążone znacznym błędem.

Literatura

- [1] Szurgacz D.: *Zmechanizowana obudowa ścianowa w zmiennych warunkach górniczo-geologicznych*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Wrocławskiej, Wrocław 2019.
- [2] Prostański D.: *Empirical Models of Zones Protecting Against Coal Dust Explosion*. Archives of Mining Sciences 2017, 62, 611–619.
- [3] Korbiel T., Stepień B., Batko W., Pawlik P., Blaut J.: *Recognition of the 24-hour Noise Exposure of a Human*. Archives of Acoustics 2017, 42, 601–607.

- [4] Burdzik R.: *Impact and Assessment of Suspension Stiffness on Vibration Propagation into Vehicle*. Sensors 2023, 23, 1930.
- [5] Hebda-Sobkowicz J., Gola S., Zimroz R., Wyłomańska A.: *Identification and Statistical Analysis of Impulse-Like Patterns of Carbon Monoxide Variation in Deep Underground Mines Associated with the Blasting Procedure*. Sensors 2019, 19, 2757.
- [6] Kawalec W., Błazej R., Konieczna M., Król R.: *Laboratory Tests on e-pellets effectiveness for ore tracking*. Mining Sciences 2018, 25, 7–18.
- [7] Krauze K., Klempka R., Mucha K., Wydro T.: *Computer-aided selection of the stabilizing system parameters of the mobile transport and assembly manipulator in mining excavations*. Archives of Mining Sciences 2023, 68, 3–18.
- [8] Rajwa S., Janoszek T., Prusek, S.: *Influence of canopy ratio of powered roof support on longwall working stability – A case study*. International Journal of Mining Science and Technology 2019, 29, 591–598.
- [9] Trzop K., Szurgacz D.: *Optimal geometry of the powered roof support's operation*. IOP Conference Series: Earth and Environmental Science 2024, 1295(1), 012005.
- [10] Łuczak S., Oleksiuk W., Bodnicki M.: *Sensing Tilt with MEMS Accelerometers*. IEEE Sensors Journal 2006, 6(6), 1669–1675.
- [11] Łuczak S.: *Pomiar odchylenia od pionu z użyciem akcelerometrów MEMS*. Pomiary Automatyka Robotyka 2008, 7–8, 14–16.
- [12] Analog Devices: *Using an accelerometer for inclination sensing*. AN-1057 Application Note 2010, 1–8.
- [13] Xu R., Zhou S., Li W. J.: *MEMS Accelerometer Based Non-specific-User Hand Gesture Recognition*. IEEE Sensors Journal 2012, 12, 5.
- [14] Wang H., Xiong D., Duan Y., Liu J., Zhao X.: *Advances in vibration analysis and modelling of large rotating mechanical equipment in mining arena: A review*. AIP Advances 2023, 13, 110702.
- [15] Szurgacz D., Trzop K., Gil J., Zhironkin S., Pokorný J., Gondek H.: *Numerical Study for Determining the Strength Limits of a Powered Longwall Support*. Processes 2022, 10, 527.

mgr inż. Konrad TRZOP
Polska Grupa Górnicza S.A.
Oddział KWK Ruda Ruch Bielszowice
ul. Halembaska 160, 41-711 Ruda Śląska
konrad.trzop.kt@gmail.com

PAWEŁ GALANT
RADOŚŁAW SREBNIAK

Optimalization of the transport of excavated material in hard coal mines based on improvements in the automatic control mode

Hard coal mines are increasingly struggling with the widespread phenomenon of the decarbonization of the economies of European countries. As a result, they are forced to constantly look for opportunities to reduce unit mining costs. This is extremely difficult because producers of mining machinery and equipment are unwilling to incur high costs for the research and development of new products, as this industry is burdened with a high risk of unprofitability. This article describes one of the examples in which an attempt was made to reduce the costs of hard coal mining by modifying the method of controlling underground haulages consisting of belt conveyors in the Polish LW “Bogdanka” mine.

Key words: conveyor belt, control mode, automatic

1. INTRODUCTION

The mining haulage of excavated material, made by belt conveyors in underground mining plants, is a key element of the coal mining process [1]. It is therefore extremely important to ensure its smooth operation and to limit the number of stops of individual conveyors forming the haulage of excavated material from the longwalls and tunnel digging areas. The efficiency of such haulage has a direct impact on the production results of the entire company. Therefore, the search for improvements in this area is absolutely justified.

2. THE SEARCH FOR COST REDUCTION SOLUTIONS

In the LW “Bogdanka” mine, the most effective hard coal mining plant in Poland and characterized by innovative technical solutions, it was decided to try

to increase the efficiency of the mine haulage of excavated material operations based on the existing equipment – belt conveyors with control systems already installed and operating in underground workings. It should also be noted that key hauling made of belt conveyors in the LW “Bogdanka” mine operate remotely, from positions located outside the haulage route, including from the surface.

3. NEW CONCEPTION OF CONVEYOR CONTROL

A group of engineers employed at LW “Bogdanka” during their postgraduate studies at the AGH University of Science and Technology in Krakow created a diploma thesis entitled *Optymalizacja transportu urobku przenośnikami taśmowymi* under the supervision of prof. Arkadiusz Kuśtra [2], where an in-depth analysis of factors disturbing the operation of underground mine haulage, such as the start-up times of

belt conveyors and the cumulative transport times of mined material from the wall to the retention points, during which the stopping of any element of the haulage chain means a break in the entire mining process. The discussed study also included a technical proposal to improve the process of transporting excavated material, which was later implemented for general use in the coal mining process at the LW “Bogdanka” mine. The analysis of factors affecting the continuity of the work of the haulage of excavated material consisted of writing down all the processes which occurred during the operation of individual belt conveyors during their normal operation and interpreting these processes as a function of time.



Fig. 1. Analysis of key times in the excavated material haulage system

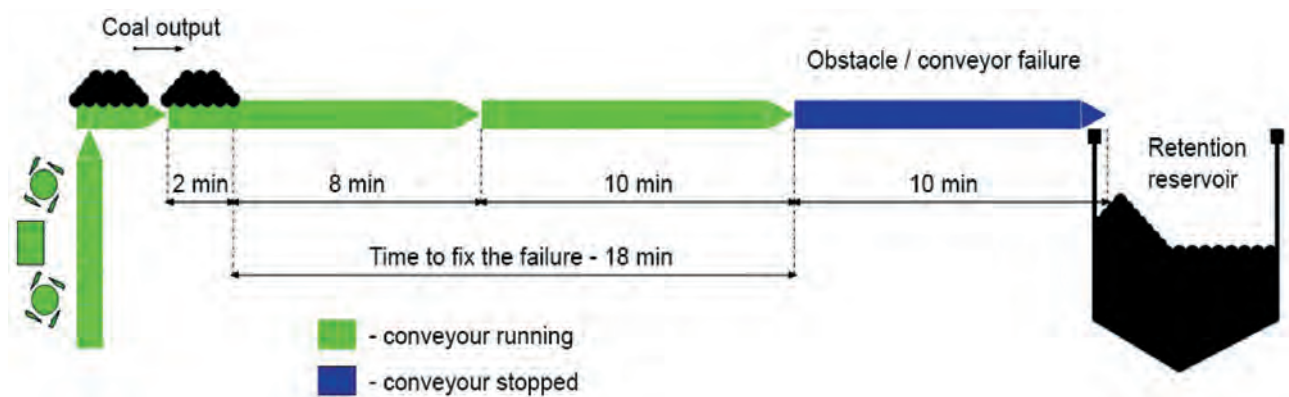


Fig. 2. The idea of controlling the haulage of excavated material in intelligent control mode

The following conclusions were drawn from the observations made:

- undesirable start-up times of each conveyor are unavoidable using the currently available technical means, and no possibility of eliminating them or significantly shortening them has been found;
- the transport time of excavated material on long conveyors is so significant that it is in these spaces that efficiency improvements should be sought.

Therefore, it was decided to remodel the automatic operation mode of excavated material haulage by changing its algorithm, taking into account additional data provided to the system.

In the previous automatic haulage operation mode, the entire conveyor chain was stopped from the point of failure to its end, which in such cases led to the stopping of mining machines [3].

The new concept assumes the introduction of the “mining material presence” parameter to the local conveyor controllers algorithm, so that if this information is not confirmed, conveyors that are not at risk of covered by mined material will not be stopped despite the preceding conveyor being stopped. As a result, not every stop of the conveyor during hauling results in stopping the operation of the longwalls and tunnel driving areas, because the new control system can use the empty spaces of the conveyor belts as a time buffer, which is used to remove the ongoing fault.

Elektrometal SA, a company providing control systems for mining, has modified its Elsap-05 system by changing the algorithm of the automatic operating mode according to the instructions of engineers from LW “Bogdanka” mine. Additionally, this manufacturer designed and manufactured a new element of the control system called the COU-22 “mined material presence” [4] sensor for the needs of this project.

This sensor allows you to mechanically determine the presence or absence of mined material in key places along the haulage route and transmit this information to the local controller. Additionally, in local controllers, in order to distinguish the innovative operating mode from the others, it was called the “intelligent” mode.



Fig. 3. Excavated material presence sensor

Thanks to the use of this innovation, the conveyor control system can provide increased time for active haulage of mined material for mining machines and at the same time shorten the time of emergency stops in the mining process.

LW “Bogdanka” mine has already had several months of experience with this solution, and the results demonstrate the effectiveness of this idea in use conveyor strings both at longwalls and tunnel driving areas.

Examples of results obtained on the haulage of excavated material from the tunnel driving area with the implemented “intelligent” mode system on only one conveyor are presented in Table 1 (daily observations) and Table 2 (weekly observations).

As can be seen in the tunnel driving area, the introduction of the “intelligent” control mode on one of the conveyors (a haulage consisting of four conveyors, an innovation used on conveyor no. 2) resulted in an increase in the time when the active haulage is available for mining by over 5 hours.

The results of using the “intelligent” mode for longwalls are very interesting, as it is easy to determine the costs and profitability of such an investment due to the knowledge of the unit longwall standstill costs.

Table 1

Characteristics of haulage operation time in “intelligent” control mode – daily observations

Date	“Recovered” working time as a result of innovation – daily
13.03.2023	00:09:30
14.03.2023	00:06:38
15.03.2023	00:13:31
16.03.2023	00:25:56
17.03.2023	00:06:49
18.03.2023	00:00:00
19.03.2023	00:00:00
Sum [hh:mm:ss]	01:02:24

Table 2

Characteristics of haulage operation time in “intelligent” control mode – weekly observations

Date of reading	“Recovered” working time as a result of innovation – weekly
5.03.2023	01:13:47
12.03.2023	01:43:14
19.03.2023	01:02:24
26.03.2023	01:03:53
Sum [hh:mm:ss]	05:03:18

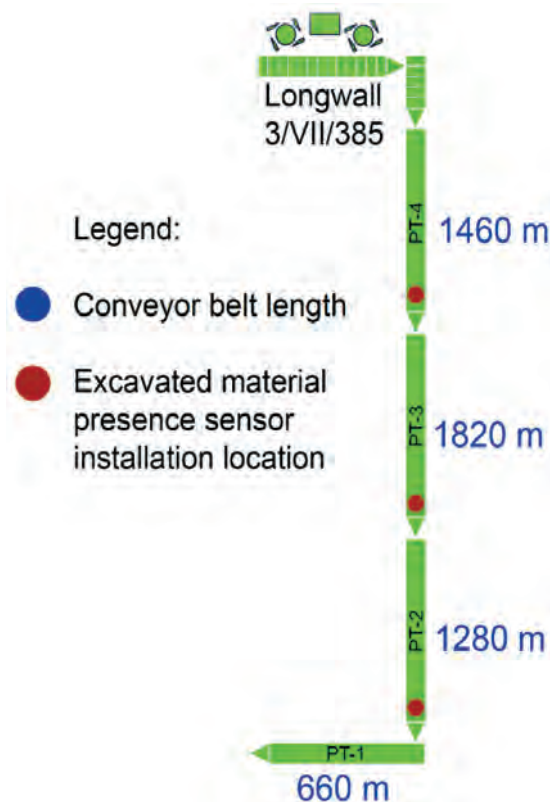


Fig. 4. Excavated material presence sensor installation location

Table 3
Effects of the Elsap-05 system in intelligent mode, delivery
from the 3/VII/385 longwall area in the period from November 1–12, 2023

Conveyor	Working time with “intelligent” control mode	Working time with “intelligent” control mode + mining machine is working
PT2	00:55:34	00:10:36
PT3	00:35:13	00:00:07
PT4	00:32:26	00:00:23
SUM [hh:mm:ss]	02:03:13	00:11:06

The above data fully justify the use of the innovative control mode on all types of haulages of excavating material in underground mining plants.

4. CONCLUSIONS

To sum up – the most important benefits of the “intelligent” control mode concept in the process of controlling mined haulage are:

- extension of the availability time of active haulage,
- reduction of lost revenues,
- extending the life of machines by reducing the number of starts.

The example of the modernization of the conveyor control systems at LW “Bogdanka” mine proves that an innovative approach to solving issues related to increasing efficiency in mining does not have to be associated with high costs. There is still a lot of poten-

tial to be exploited in the devices and systems currently used in our plants, we just need to notice where it is hidden.

References

- [1] Żur T.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
- [2] Galant P., Srebniak R., Kozak S., Skawiński M., Żuk M.: *Optimalizacja transportu urobku przenośnikami taśmowymi*. AGH University of Science and Technology in Krakow 2022 [diploma thesis].
- [3] *System Automatyzacji Przenośników ELSAP-05/P*. ELEKTROMETAL SA Cieszyn, July 2019 [user manual].
- [4] *Czujnik obecności urobku Typ COU-22*. ELEKTROMETAL SA Cieszyn, December 2023 [user manual].

PAWEŁ GALANT, M.Sc., Eng.
pgalant@lw.com.pl
RADOSŁAW SREBNIAK, Eng.
rsrebniak@lw.com.pl
LW “Bogdanka” Mine
21-013 Puchaczów, Poland

PAWEŁ GALANT
RADOŚLAW SREBNIAK

Optymalizacja transportu urobku w kopalni węgla kamiennego przez usprawnienie automatycznego trybu sterowania

W obecnych czasach kopalnie węgla kamiennego zmagają się z powszechnym zjawiskiem dekarbonizacji gospodarek krajów europejskich. Dlatego zmuszone są stale poszukiwać możliwości obniżania jednostkowych kosztów wydobywania. Jest to wyjątkowo trudne w obecnych czasach, ponieważ producenci maszyn i urządzeń górniczych nie są skłonni ponosić wysokich kosztów na badania i rozwój nowych produktów, gdyż branża ta jest obciążona wysokim ryzykiem nieopłacalności. Ten artykuł opisuje jeden z przykładów, w którym podjęto próbę obniżenia kosztów wydobywania węgla kamiennego, wykorzystując modyfikację sposobu sterowania podziemnymi odstawami urobku w polskiej kopalni LW „Bogdanka”.

Słowa kluczowe: przenośnik taśmowy, tryb sterowania, automatyka

1. WPROWADZENIE

Odstawy urobku zbudowane z przenośników taśmowych w podziemnych zakładach górniczych stanowią kluczowy element procesu wydobywania węgla [1]. Niezwykle ważne jest zatem zapewnienie płynności działania oraz ograniczenie liczby zatrzymań poszczególnych przenośników tworzących ciąg odstawy urobku ze ścian i przodków. Efektywność pracy takiej odstawy ma bezpośredni wpływ na wyniki produkcyjne całego przedsiębiorstwa. Dlatego poszukiwanie usprawnień w tym obszarze jest jak najbardziej uzasadnione.

2. POSZUKIWANIA ROZWIĄZAŃ REDUKUJĄCYCH KOSZTY

W kopalni Lubelski Węgiel „Bogdanka” najefektywniejszym w Polsce zakładzie wydobywającym wę-

giel kamienny charakteryzującej się innowacyjnymi rozwiązaniami technicznymi postanowiono podjąć próbę zwiększenia wydajności pracy odstaw urobku na bazie posiadanego sprzętu – zabudowanych i pracujących już w dołowych wyrobiskach przenośników taśmowych wraz z systemami sterowania. Zaznaczyć należy tu także, że kluczowe odstawy urobku w kopalni LW „Bogdanka” pracują w trybie zdalnym, ze stanowisk zlokalizowanych poza trasą odstaw, w tym także z powierzchni.

3. NOWA KONCEPCJA STEROWANIA PRZENOŚNIKAMI

Grupa inżynierów zatrudnionych w LW „Bogdanka” podczas studiów podyplomowych realizowanych w Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie stworzyła pracę dyplomową zatytułowaną *Optymalizacja transportu urobku przenośnikami taśmowymi* pod

opieką prof. Arkadiusza Kustry [2], gdzie dokonano wnikliwej analizy czynników zaburzających działanie podziemnych odstaw urobku, takich jak czasy rozruchów przenośników taśmowych oraz skumulowany czas transportu urobku od ściany do punktów retencyjnych, podczas których zatrzymanie dowolnego elementu ciągu odstawy oznacza przerwę w całym procesie wydobywania. W omawianym opracowaniu znalazła się także propozycja techniczna usprawniająca proces transportu urobku, która w późniejszym czasie została wdrożona do powszechnego stosowania w procesie wydobywania węgla w LW „Bogdanka”.

Analiza czynników wpływających na ciągłość pracy odstawy urobku polegała na rozpisaniu wszystkich procesów zachodzących podczas pracy poszczególnych przenośników taśmowych w trakcie ich normalnej eksploatacji i interpretacji tych procesów w funkcji czasu.



Rys. 1. Analiza kluczowych czasów pracy odstawy urobku



Rys. 2. Idea sterowania odstawą urobku w automatycznym trybie „inteligentnym”

Z poczynionych obserwacji wyciągnięto następujące wnioski:

- niepożądane czasy rozruchów każdego z przenośników są nie do uniknięcia przy zastosowaniu aktualnie posiadanych środków technicznych, nie znaleziono możliwości ich wyeliminowania bądź znaczącego ich skrócenia;
- czas transportu urobku na trasie długich przenośników jest na tyle znaczący, że to właśnie w tych przestrzeniach należy szukać poprawy efektywności.

Postanowiono zatem przemodelować tryb automatycznej pracy odstawy urobku przez zmianę jego algorytmu z uwzględnieniem dodatkowych danych dostarczonych do systemu.

W dotychczasowym trybie pracy automatycznej odstawy ciąg przenośników zostawał zatrzymywany w całości od miejsca wystąpienia usterki do jego końca, co w takim przypadku prowadziło do zatrzymania maszyn urabiających [3].

Nowa koncepcja zakłada wprowadzenie do algorytmu sterowania odstawą urobku parametru „obecność urobku”, tak aby w razie braku potwierdzenia tej informacji przenośniki niezagrożone zasypaniem nie były zatrzymywane pomimo zatrzymania przenośnika poprzedzającego. W rezultacie nie każde zatrzymanie przenośnika w ciągu odstawy powoduje przerwę w pracy ściany bądź w urabianiu przodka, ponieważ nowy system sterowania potrafi wykorzystać puste przestrzenie taśm przenośnikowych jako bufor czasu potrzebny do usunięcia trwającej usterki.

Firma Elektrometal SA, dostarczająca systemy sterowania dla górnictwa, zmodyfikowała swój system Elsap-05 przez zmianę algorytmu automatycznego trybu pracy według wskazówek inżynierów z LW „Bogdanka”. Dodatkowo ten producent zaprojektował i wyprodukował na potrzeby omawianego projektu nowy element systemu sterowania o nazwie czujnik obecności urobku COU-22 [4].

Czujnik ten pozwala w sposób mechaniczny określić stan obecności lub nieobecności urobku w kluczowych miejscach na trasie odstawy urobku oraz przekazać tę informację do sterownika lokalnego. Dodatkowo w sterownikach lokalnych w celu rozróżnienia innowacyjnego trybu pracy od pozostałych nazwano go trybem „inteligentnym”.



Rys. 3. Czujnik obecności urobku

Dzięki zastosowaniu tej innowacji system sterowania przenośnikami potrafi udostępnić zwiększony czas czynnej odstawy urobku dla maszyn urabiających i jednocześnie skrócić czas postojów awaryjnych w procesie wydobywania.

LW „Bogdanka” posiada już kilkunastomiesięczne doświadczenie z pracy tego rozwiązania, a wyniki wykazują skuteczność tego pomysłu zarówno w zastosowaniu na odstawach urobku ze ścian wydobywczych, jak i przodków drążących nowe wyrobiska.

Przykładowe wyniki uzyskane na odstawie urobku z przodka z zaimplementowanym systemem trybu „inteligentnego” tylko na jednym przenośniku prezentuje tabela 1 (obserwacje dobowe) oraz tabela 2 (obserwacje tygodniowe).

Jak widać, w rejonie przodkowym wprowadzenie trybu sterowania „inteligentnego” na jednym z przenośników (odstawa złożona z czterech przenośników, innowacja zastosowana na przenośniku nr 2) spowodowało zwiększenie czasu udostępnienia czynnej odstawy dla urabiania w wielkości ponad 5 godzin.

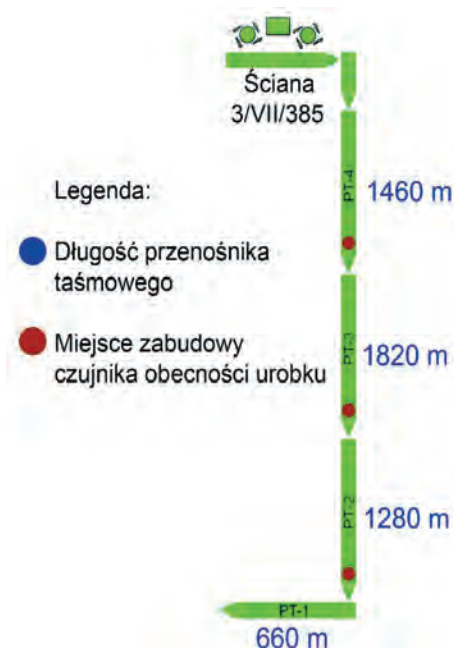
Bardzo ciekawie przedstawiają się wyniki stosowania trybu „inteligentnego” w przypadku odstaw ścianowych, gdzie łatwo określić opłacalność takiej inwestycji ze względu na znajomość jednostkowych kosztów postoju ściany.

Tabela 1
Charakterystyka czasu pracy odstawy
w trybie sterowania inteligentnego –
obserwacje dobowe

Doba	„Odzyskany” czas pracy w trybie innowacyjnym – dobowo
13.03.2023	00:09:30
14.03.2023	00:06:38
15.03.2023	00:13:31
16.03.2023	00:25:56
17.03.2023	00:06:49
18.03.2023	00:00:00
19.03.2023	00:00:00
Suma [hh:mm:ss]	01:02:24

Tabela 2
Charakterystyka czasu pracy odstawy
w trybie sterowania inteligentnego –
obserwacje tygodniowe

Data odczytu	„Odzyskany” czas pracy dzięki innowacji – tygodniowo
5.03.2023	01:13:47
12.03.2023	01:43:14
19.03.2023	01:02:24
26.03.2023	01:03:53
Suma [hh:mm:ss]	05:03:18



Rys. 4. Miejsca instalacji czujników
obecności urobku

Tabela 3
Efekty pracy systemu Elsap-05 w trybie inteligentnym – odstawa z rejonu ściany 3/VII/385
w okresie 1–12.11.2023 r.

Przenośnik	Czas pracy w trybie inteligentnym	Czas pracy w trybie „inteligentny + kombajn ścianowy urabia”
PT2	00:55:34	00:10:36
PT3	00:35:13	00:00:07
PT4	00:32:26	00:00:23
Suma [hh:mm:ss]	02:03:13	00:11:06

Powyższe dane w pełni uzasadniają zastosowanie innowacyjnego trybu sterowania na wszystkich rodzajach odstaw w podziemnych zakładach górniczych.

obecnie eksploatowanych w naszych zakładach można jeszcze dostrzec spory potencjał i możliwości ich wykorzystania.

4. WNIOSKI

Reasumując, najważniejsze korzyści, jakie niesie za sobą koncepcja trybu „inteligentnego” w procesie sterowania odstawami urobku, to:

- wydłużenie czasu dostępności czynnej odstawy,
- redukcja utraconych przychodów,
- wydłużenie żywotności maszyn przez zredukowanie ilości ich rozruchów.

Przykład modernizacji sterowania odstawami w kopalni „Bogdanka” dowodzi tego, że innowacyjne podejście do rozwiązywania zagadnień z podnoszeniem efektywności w górnictwie wcale nie musi wiązać się z wielkimi kosztami. W urządzeniach i systemach

Literatura

- [1] Żur T.: *Przenośniki taśmowe w górnictwie*. Wydawnictwo Śląsk, Katowice 1980.
- [2] Galant P., Srebniak R., Kozak S., Skawiński M., Żuk M.: *Optymalizacja transportu urobku przenośnikami taśmowymi*. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Kraków 2022 [praca dyplomowa].
- [3] *System Automatyzacji Przenośników ELSAP-05/P*. ELEKTROMETAL SA, Cieszyń, lipiec 2019 [instrukcja obsługi].
- [4] *Czujnik obecności urobku Typ COU-22*. ELEKTROMETAL SA, Cieszyń, grudzień 2023 [instrukcja obsługi].

mgr inż. PAWEŁ GALANT
pgalant@lw.com.pl
inż. RADOSŁAW SREBNIAK
rsrebniak@lw.com.pl
Lubelski Węgiel „Bogdanka” S.A.
21-013 Puchaczów

FRANCISZEK NIEZGODA

JANUSZ ZAJĄC

KAZIMIERZ MITKO

IZABELA GÓRECKA

STANISŁAW MOJŻYSZ

Innovative Mine Floor Grinding Machine

This article describes the process of development of the Hydroma floor grinding machine. It describes the current methods of solving exploitation problems related to uplifting of the floor in mining facilities and the issues of the need to maintain proper cross-sections of roadways under current mining exploitation conditions in order to ensure the continuity and safety of mining facility operations. The existing methods of floor grinding were analyzed in terms of cost, labor intensity, safety, and environmental protection. The following section outlines the process of developing a mine floor grinding machine at Urządzenia i Konstrukcje Spółka Akcyjna, namely the stage of technical and marketing analysis is discussed, during which the needs and possibilities of implementing the floor grinding machine were assessed, as well as the process of preliminary research and design, construction and tests conducted on a prototype grinding machine. The operation of the floor grinder – which is driven by an electric motor to grind the elevated rock bed, load and transport the grinded rock to the hauling trucks, all performed by remote control – is described. In conclusion, the advantages of the Hydroma grinder are discussed, as it performs the work efficiently, effectively and safely, without exposing the environment to harmful emissions.

Key words: longwall mining, longwall grinding machine, longwall face raising

1. INTRODUCTION

In practically every industry there are works or technological processes that need to be carried out and without which the whole task or product cannot be realized, while at the same time these works are arduous, marginal, and often difficult to mechanize (they are mainly based on manual work). In the mining industry, and particularly in hard coal mines in Poland, one such onerous task is floor grinding in roadways, necessary to restore their original (nominal) dimensions. The uplifting of the floor is a natural process. “In many hard coal mines, problems with swelling and uplifting of the floor as a result of the

high pressure of the rock mass and unfavorable mining and geological conditions start to occur a few weeks after the opening and preparation of the roadways, with the result that the dimensions and cross-section of the roadways are reduced. Difficulties then arise with regard to the proper operation of transport equipment, material transport and the restriction of the free cross-section of the roadways for the flow of air to the faces” [1].

Deformation of the floor can account for 80–90% of the total vertical conversion [2]. Ensuring the proper functioning of the roadways requires that the floor is kept to nominal diameters, i.e. the floor rock is ground and removed [1].

2. PROPER MAINTENANCE OF THE CROSS-SECTION OF MINE GALLERIES

Currently, exploitation has to be carried out under increasingly difficult geological mining conditions which require the mine to go deeper and deeper, resulting in specific hazards – methane, rock bursts, high temperatures, as well as those related to the exploitation pressure resulting in the frequent uplift of the floor (Fig. 1a, b).

In conditions of the increasing depth of exploitation and the related rise in temperature in the mine seams, as well as the increase in methane release during mining, it becomes crucial to maintain the correct parameters of the cross-section of the roadways which constitute the ventilation network of the mine. The correct cross-sections of the roadways make it possible to supply the right amount of air while main-

taining the permitted air flow velocities in the roadways [2] (air flow velocities are regulated by mining regulations). Therefore, finding a way to maintain the dimensions of the mine roadways under the prevailing rock mass pressures is one of the basic factors ensuring a proper atmosphere in the mine roadways and eliminating methane hazards. “Excessive deformation of the floor makes it necessary to retrieve it, or results in reinforcement of the lining or complete reconstruction of the roadways” [2]. Maintaining the original geometry of the roadways is important, not only to ensure the proper ventilation of the mine roadways, but it is also important to remove the effects of uplift of the floor if there is a built in route for the transportation of mined rock by conveyors or railways, which may cause stopping of the transport of mined rock and/or the transport of materials and people by the railways [1, 2].

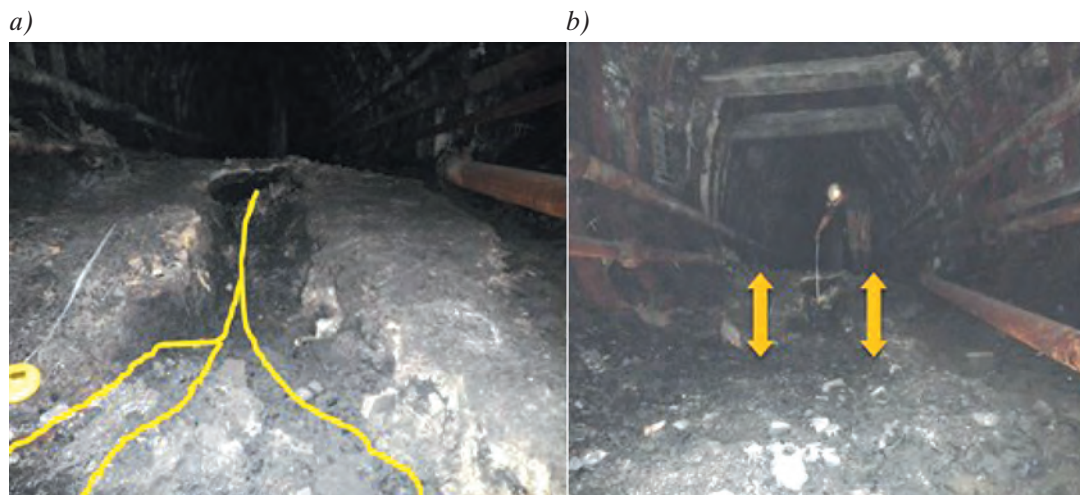


Fig. 1. Floor uplift: a) with marked floor crack lines; b) with marked uplift lines

3. METHODS OF MAINTAINING THE REQUIRED CROSS-SECTIONS OF MINE ROADWAYS

Over the years, numerous attempts have been made to comprehensively mechanize the process of maintaining the floor, thereby reducing the time taken to carry out this work. However, to date, these attempts have not resulted in a successful solution. In empty roadways (without any built-up space at the floor), there are usually no obstacles to performing this work and a roadheader is often used, which can quickly and effectively restore the original geometry of the roadways. The problem arises when the roadways in question are already equipped with railways and/or conveyor.

In this case, floor maintenance becomes difficult and time-consuming. In such cases, a combination of manual work, supported by the so-called „small mechanization” tools, and loading machines (if there is sufficient space) is used. Loading machines are commonly used in the Polish coal mining industry. They are used to pick up loose floor material and to load the excavated material after blasting the upraised floor during the mining works (using the blasting technique) and to pull materials in various places in the mine’s infrastructure. Loaders are self-driven machines based on a crawler chassis with an electrohydraulic drive in which all control functions are carried out hydraulically. The hydraulic pump is driven by an electric motor, powered by an unrolled cable connected to the mine’s electric-

ity line. The disadvantage of this type of machine is that, in excavating operations, the bucket/clamp of the loader can only handle loose and cracked rock, but is unable to crush it. Another inconvenience may be the lack of a parallel mucking-out system, in the form of mine cars or containers suspended from a rail or conveyor, which forces the bucket to be moved to a potential unloading location. This has the effect of extending working time with operations that are not productive [3].

In the mining industry, attempts have been made to eliminate the disadvantages and inconveniences in the operation of loaders to give this type of machine new functionalities, e.g. by increasing the working range of the bucket, redesigning the arm in a similar manner to solutions used in construction machinery, i.e. the ability to quickly change the bucket for a small drum. Such attempts were made, among others, by a team at the AGH Department of Mining, Processing and Transport Machinery under the direction of Prof. Krzysztof Krauze on the basis of the ŁBT-700EH loader [1]. However, all of these attempts have failed to fully solve the problem of how to mechanize the floor grinding process, as they were based on a machine whose original purpose was different and therefore could not prove itself in such a specific line of work.

4. ASSUMPTIONS FOR THE CONSTRUCTION OF A MINE FLOOR GRINDING MACHINE

The company Urządzenia i Konstrukcje SA from Żory, Poland (UiK SA) made an effort to comprehensively design and build a machine from scratch which would be specifically dedicated to the mechanical grinding and transportation of excavated material. Until now, the problem of simultaneous mining and loading of the grinded rock was not solved. The simultaneous mining and loading of the rock is a complicated operation, which is why the machine solutions developed thus far have proposed the loading and gathering of the rocks only after the grinding had been made [1]. Among other things, due to the innovativeness of the solution – simultaneous mining and loading – the project entitled »Development of an Innovative HYDROMA Grinding Machine for Underground Mine« was submitted to the “Intelligent De-

velopment Operational Program” announced by the National Centre for Research and Development, where it was positively verified, as a result of which contract No. POIR.01.01.01-00-1117/18 was signed and funding was awarded for the implementation of this project.

5. DESIGN AND CONSTRUCTION OF THE GRINDING MACHINE

The technical team established by UiK SA performed a market survey among potential users regarding the expectations and features that such a product should meet.

As a result of the survey, the types of rock present in the floor were determined, and their parameters were examined with a view to select the power of the cutting unit of the floor grinding machine. Depending on the mine, level of extraction and gallery, different types of rock can be found in the floor zone, such as: clayey coal, claystone with coal laminae, coal shale, crushed claystone, layered siltstone, sandstone, masonry, crushed claystone with sandstone inserts, claystone with coal laminae, etc. For these rocks, the following parameters have been examined. The compressive strength R (range from 8 MPa to a maximum of 70 MPa), volumetric weight (12.0–25.8 kN/m³), demouldability (0.4–1.0), fracture index RQD (5–70%), compactness index (0.4–5.9) were examined, among others.

At the same time, the shape and form of the occurrence of the uplifted floor were examined – Fig. 1a,b. The following formal assumptions were made in the design of the new machine: compliance with the Machinery Directive 2006/42/EC and ATEX 2014/34/EU, as well as the standards harmonized with them, i.e.: PN-EN 12100:2010; PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02; PN-EN ISO 80079-36:2016-07; PN-EN1127-2:2014-08.

Basing on the results of these tests, minimum parameters were determined in the creation of the first assumptions, which were in line with the expectations of the technical division at the audited mines. On this basis, the design team had to resolve the contradictions between the small dimensions of the machine and the requirement for a wide range of operation and functionality when designing. The proper selection of the mining drum was also a problem due to the shape of the uplifted floor and the variability and heterogeneity of its structure and construction [4].

The following key technical assumptions were made:

Mechanical design:

- weight of not more than 12 tons,
- travel speed not less than 6 m/min,
- travel on longitudinal slopes $\pm 18^\circ$, transverse slopes ± 5 ,
- height of grinding machine not more than 1.5 m,
- cutting drum (Fig. 2), with operating speeds of 20–25 rpm (speed 1) and 40–50 rpm (speed 2) – allows adjustment of the drum performance
- excavated material loading table with integral chain conveyor,
- a chain speed not less than 0.6 m/s,
- an assumed operational life of the pick not less than 8 hours for the assumed compressive strength of the floor.

Electrical components:

- main drive motor for the hydraulic pump,
- chain drive motor for the transport conveyor,
- main control box with frequency converter and protection.

Hydraulic circuits:

- two hydraulic pumps (one operating in closed circuit to operate the drum, the other operating in open circuit to drive the crawler trucks, loading arms, cylinders),
- loading arms drive motors,
- crawlers drive system.

5. TESTING OF A PROTOTYPE OF THE HYDROMA FLOOR GRINDING MACHINE

In order to reliably test the prototype under pressure of the high level of requirements for the new machine, a testing area with a test track was built in our company. In selected mines we examined the parameters of the floor, as well as fragments/chunks of the rocks. We used them in prepared mixes for test grinding in the test area. Three blocks were made from different compositions of B1, B2, B3 mixes. Dimensions of the blocks L/W/H: 2.8 m $\times$ 1.4 m $\times$ 1 m (Fig. 3). Their uniaxial compression strengths ranged from approximately $R = 20$ MPa to approximately $R = 70$ MPa. During the test, the blocks prepared in this way were arranged variously in relation to each other. At the same time, the grinding machine moved along a specially prepared rock and coal bed of varying granulation. During the cutting of the rock, blocks were placed in the testing ground that made it possible to simulate the grinding of the floor with different planes of approach: face, side, horizontal, and simultaneous grinding of several surfaces. Moving the Hydroma on the arranged testing ground made it possible to assess its stability during operation and its mobility while passing through difficult terrain.

A series of tests – about 30 trials in different variations over a period of almost 20 hours – allowed us to identify shortcomings which were immediately corrected/modified or, if necessary, entire subassemblies were reconstructed.

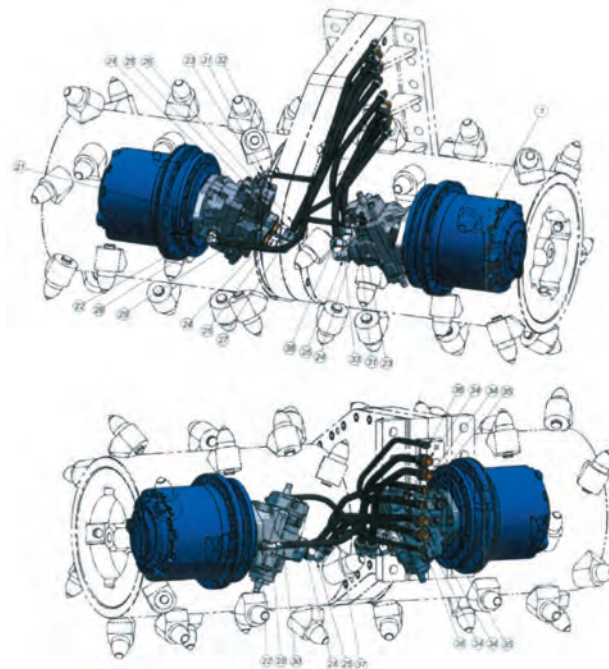


Fig. 2. Diagram of the cutting drum – subject of the patent application.
(Patent P.448424 – cutting drum of a mining floor grinding machine)



Fig. 3. Operation of floor grinding machine – grinding of blocks with chunks of floor rock on the testing ground

Among other things, the problem with the malfunctioning feeder and the blocking of the loading arms (Fig. 4) was modified and resolved. The original design of the arms was too close to each other and because they were

made entirely of steel it caused rocks to wedge between the arm and block them when larger pieces of rock were hit. As a result of the modifications, the ends of the arms were made of the original flexible scrapers.

a)



b)



Fig. 4. Loading arms: a) before modernization; b) after modernization

As part of the modifications made to the Hydroma prototype, the water spray system was improved to primarily prevent ignition and explosion as well as to reduce dust and cool the knives [5] (Fig. 5). The effectiveness of this system was confirmed by tests at the

Central Mining Institute PIB KD Barbara Dust Hazard Control Department. The installed water jet system provides an adequate level of safety for this type of mining machine and does not require additional spraying devices, e.g. behind-the-knife jets.

a)



b)



Fig. 5. Spraying system test stand: a) test trials; b) spraying system operation

An additional foot placed at the rear was designed and constructed (Fig. 6) to allow support against the ground which stabilizes the machine during operation, especially on inclines. The varying strength of the bedrock causes the machine to vibrate. This is not a problem when the machine is working horizontally.

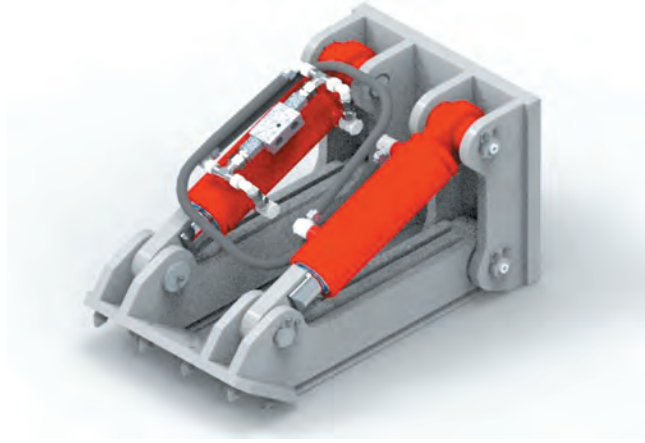


Fig. 6. Supporting foot for the Hydroma floor grinding machine

An essential component of this machine is a dedicated control system with algorithms and procedures in place to take into account the various conditions during normal operation and in emergency situations [6]. The control of the operation of the Hydroma floor grinding machine itself is implemented by means of a control panel (Fig. 7), allowing:

- the operator to be at a safe distance – outside of the environment of the pollution caused by the ground being excavated such as dust and noise,
- the possibility of introducing the grinding machine into areas exposed to various hazards – danger of landslides, falling objects, impact of other working machines, etc.,
- working in areas that are difficult to access without endangering the operator,
- the possibility of working in an environment that has a negative impact on people or poses a threat to their safety – chemical, biological, hydrogen and dust hazards, etc.



Fig. 7. The control panel of the Hydroma floor grinding machine

Increasing the longitudinal inclination above $>10^\circ$, can cause the machine to slide during grinding. The support foot stabilizes the machine during operation. Unfortunately, this increases the operating time – the support prevents the machine from moving forward but allows the grinding system to work stably.

The proposed solution does not include cameras associated with the grinding machine. The operator can stay away from the grinding machine, but within its operating range, so as to allow its safe operation.

In more than 30 trials on the test track, the Hydroma floor grinding machine performed its work over a distance of more than 600 m.

In simulated start – stop cycles, carried out 50 times, the drive motor warmed up to 60°C (measured at the motor winding).

6. TEST RESULTS

Test performed on the prototype confirmed the key technical assumptions (mentioned earlier). The final weight of the Hydroma prototype (Fig. 8) was 12 tons and its height did not exceed 1.1 m. Positively result of tests allowed the Hydroma prototype to be prepared for examination and testing for compliance with the Machinery Directive 2006/42/EC and ATEX 2014/34/EU and their harmonized standards, i.e: PN-EN 12100:2010; PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02; PN-EN ISO 80079-362016-07; PN-EN1127-2:2014-08.

The final result of the project was the TRL 9 technological preparation level. The built and tested machine exhibits a compact design when compared to roadheaders and loaders, an exceptionally low height of $\sim 1.1\text{m}$, which allows it to work in galleries occupied by other machines, equipment or installations. It allows

the performance of independent floor grinding, loading and hauling the excavated material via an integral conveyor. The Hydroma's design allows it to be equipped with a dedicated conveyor, increasing flexibility and convenience in planning the extraction location. The operator can control all of the machine functions via radio from a safe location. The machine's small dimensions, relatively low weight and clever design make

it quick and easy to change its location between galleries and levels. In sections where this is possible, the grinding machine moves by itself within the range of the electrical power supply. To change location, only the power cable has to be rewired. In the event of further transport to another level, for example, it is possible to quickly dismantle and reassemble the machine in several pieces.



Fig. 8. Prototype of the Hydroma floor grinding

Comparing the work of the Hydroma floor grinding machine to previous floor cutting methods, the following results were obtained:

1. With the blasting method – complete elimination of blasting gases:

Harmful factor	Unit	When using the blasting method	When using the grinding machine
Content of toxic components (NO) in gases	[l/kg]	8.6	0.0
Toxic constituents content (CO) in gases	[l/kg]	18.3	0.0

2. With manual working methods assisted by so-called „low mechanization” tools:
 - reduction of inhalable dust concentrations:

Harmful factor	Unit	When using the blasting method	When using the grinding machine
Geometrical concentration (GM) of inhalable dust in a gallery during floor cutting	[mg/m ³]	8.25	7.0

- reduction in labor intensity and costs:

Harmful factor	Unit	When using the blasting method	When using the grinding machine
Number of man-hours to remove 250 m of uplifted floor	[h]	312.5	20.8
Cost of removal of 1 m of uplifted floor*	[PLN/m ³]	800.00	123.85

* Costs according to 2018 analysis.

7. SUMMARY

The results of the R&D project entitled. „Development of the HYDROMA Innovative Mine Floor Grinding Machine” not only resulted in the attainment of the TRL9 technological preparation level, but the achieved research and test results show that the floor grinding machine solves many problems related to the cutting of the uplifted floor. The use of Hydroma will make it possible to extend exploitation of galleries by restoring or maintaining their nominal cross-sections, without causing difficulties or interruptions in their operation. This will simplify logistical

processes for the movement of materials, machinery, and equipment in such roadways and transport routes that are prone to disturbances in the form of the up-lifting of the floor. This translates directly into a reduction in mining costs (other methods currently used to restore the functionality of roadways are disproportionately more expensive, as shown earlier), as these works are necessary if the roadways in question are indispensable in the long term and in the technological process of extracting the mineral or to ensure adequate ventilation. The machine built allows costs to be optimized in terms of restoring the correct dimensions of the roadways clamped from the bottom. The replacement of previous methods using explosives or combustion-powered equipment with an electrically driven machine equipped with a spraying device eliminates dust, the release of blasting gases into the mine atmosphere, and removes hazards resulting from blasting under methane hazard conditions.

The designed and manufactured machine offers the possibility of reconstruction in order to adapt it to other working conditions or applications. If there is a need to use a grinding machine with the above-described features in a different working environment, UiK SA has the capabilities and technical means to modify it appropriately or develop a new version of the grinding machine depending on market demand, e.g. with a combustion engine or battery electric drive.

References

- [1] Krauze K., Kotwica K.: *Ładowarka z wymiennym osprzętem do frezowania skał spagowych*. Mechanizacja i Automatyza-cja Górnictwa 2009, 47, 1: 5–11.
- [2] Małkowski P., Ostrowski Ł.: *Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wy-piętrzania spągu*. Przegląd Górniczy 2014, 12, 70: 78–90.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadze-nia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118, z późniejszymi zmianami.
- [4] Kotwica K.: *Maszyny do mechanicznego drążenia wyrobisk ko-rytarzowych w skałach zwięzłych – teraźniejszość i przyszłość*. W: *Górnictwo – perspektywy, zagrożenia: mechanizacja prac górniczych*, red. W. Biały, J. Brodny, S. Czerwiński. Wydaw-nictwo PA NOVA, Gliwice 2014: 117–135.
- [5] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Wskaźniki parametryczne oceny jakości noży styczno-obrotowych*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 1: 265–281.
- [6] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 28 czerwca 2002 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy, prowadzenia ruchu oraz specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w pod-ziemnych zakładach górniczych*. Dz.U. 2002, nr 139, poz. 1169.
- [7] Deja P., Kapuściński D., Niedworok A., Polnik B.: *Badania innowacyjnego układu zasilająco-sterującego spagoladowarki górniczej*. Napędy i Sterowanie 2020, 7/8(22): 38–42.

FRANCISZEK NIEZGODA, Ph.D., Eng.

JANUSZ ZAJĄC, M.Sc.

KAZIMIERZ MITKO

IZABELA GÓRECKA, M.Sc.

STANISŁAW MOJŻYSZ, M.Sc.

Urządzenia i Konstrukcje S.A.
ul. Fabryczna 10, 44-240 Żory, Poland
biuro@uiksa.pl

FRANCISZEK NIEZGODA
JANUSZ ZAJĄC
KAZIMIERZ MITKO
IZABELA GÓRECKA
STANISŁAW MOJŻYSZ

Innowacyjna górnicza frezarka spągowa

W artykule opisano proces powstania frezarki spągowej Hydroma. Omówiono aktualne sposoby rozwiązywania problemów eksploatacyjnych związanych z wypiętrzaniem spągu w zakładach górniczych oraz kwestie konieczności utrzymania właściwych przekrojów wyrobisk w aktualnych warunkach eksploatacji górniczej w celu zapewnienia ciągłości i bezpieczeństwa ruchu zakładu górniczego. Przeanalizowano dotychczasowe metody pobierki spągu pod kątem kosztów, pracochłonności, bezpieczeństwa i ochrony środowiska. W dalszej części nakreślono proces powstawania górniczej frezarki spągowej w firmie Urządzenia i Konstrukcje Spółka Akcyjna – to jest omówiono etap analizy technicznej i marketingowej, w trakcie której oceniono potrzeby i możliwości wdrożenia frezarki spągowej, proces badań wstępnych i projektowania oraz budowy i badań przeprowadzonych na prototypie frezarki. Opisano sposób działania frezarki spągowej, która napędzana silnikiem elektrycznym frezuje/urabia wypiętrzony spąg, ładuje i transportuje urobione skały do wozów transportowych, a wszystko to wykonuje sterowana zdalnie. W podsumowaniu omówiono zalety frezarki spągowej Hydroma wykonującej pracę efektywnie, skutecznie, z zapewnieniem bezpieczeństwa pracy, bez narażania środowiska na emisję szkodliwych substancji.

Słowa kluczowe: urabianie spągu, frezarka spągowa, wypiętrzanie spągu

1. WSTĘP

Praktycznie w każdej gałęzi przemysłu występują prace czy procesy technologiczne, które są konieczne do wykonania i bez których nie można zrealizować całego zadania czy wyrobu, jednocześnie są to prace uciążliwe, marginalne oraz często trudno je zmechanizować (głównie opierają się na pracy ręcznej). W przemyśle wydobywczym, a w Polsce szczególnie w kopalniach węgla kamiennego jedną z takich uciążliwych prac jest pobierka spągu w wyrobiskach korytarzowych, konieczna, aby przywrócić ich pierwotne (nominalne) gabaryty. Wypiętrzanie spągu jest procesem naturalnym. „W wielu kopalniach węgla kamiennego już po kilku tygodniach od wykonania korytarzowych wyrobisk udostępniających i przysto-

wawczych, na skutek dużego ciśnienia górotworu i niekorzystnych warunków górniczo-geologicznych, zaczynają występować problemy związane z pęcznieniem i wypiętrzaniem spągu, co w konsekwencji powoduje ograniczenie gabarytów i przekroju poprzecznego wyrobiska. Występują wtedy trudności związane z prawidłową eksploatacją środków odstawy, transportu materiałów oraz ograniczeniem wolnego przekroju wyrobiska dla przepływu powietrza do przodków” [1].

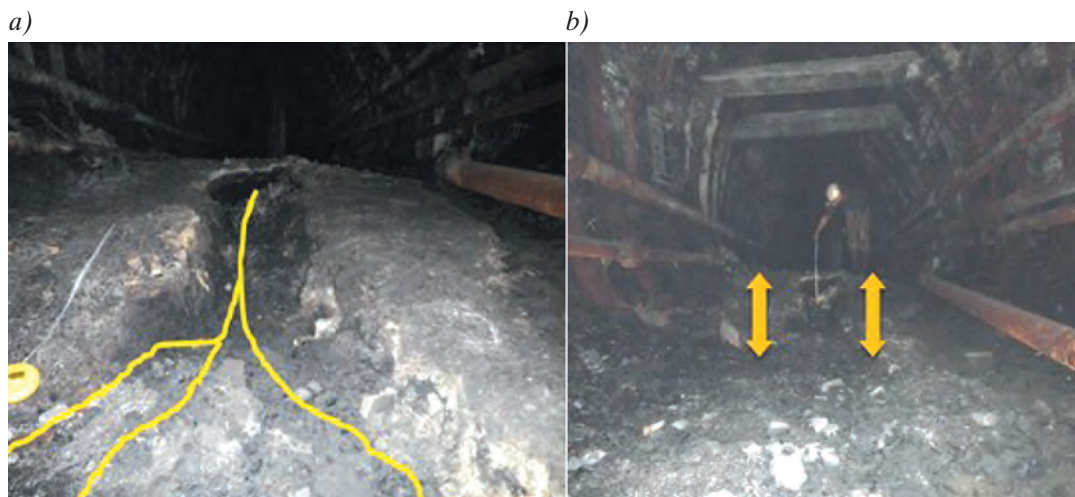
Deformacja spągu może stanowić 80–90% całkowitej konwersji pionowej [2]. Zapewnienie prawidłowego funkcjonowania wyrobiska wymaga wykonania pobierki spągu, czyli urobienia i usunięcia skał spągowych, wypiętrzonych i wtłoczonych w obręb wyrobiska [1].

2. WŁAŚCIWE UTRZYMANIE PRZEKROJU WYROBISK GÓRNICZYCH

Aktualnie eksploatację trzeba prowadzić w coraz trudniejszych warunkach geologiczno-górnictwowych. Wymaga to schodzenia z wydobywaniem coraz głębiej, co powoduje określone zagrożenia: metanowe, tąpnięcia, wysoką temperaturę, a także zagrożenia związane z ciśnieniem eksploatacyjnym powodującym częste wypiętrzanie spągów (rys. 1a, b).

W warunkach wzrastającej głębokości eksploatacji i związanym z tym wzrostem temperatury w wyrobiskach górniczych, a także ze wzrostem wydzielania się metanu w trakcie eksploatacji, kluczowe staje się utrzymanie właściwych parametrów przekroju wyrobisk stanowiących sieć wentylacyjną kopalni. Właściwe przekroje wyrobisk pozwalają na dostarczanie odpowiedniej ilości powietrza przy zachowaniu do-

zwolonych prędkości jego przepływu w wyrobiskach [2] (prędkości przepływu powietrza regulują przepisy górnicze). Zatem znalezienie sposobu utrzymania gabarytów wyrobisk górniczych w warunkach występujących ciśnień górotworu jest jednym z podstawowych czynników zapewniających właściwą atmosferę w wyrobiskach górniczych i eliminujących zagrożenie metanowe. „Zbyt duże deformacje spągu powodują konieczność jego pobierania lub też skutkują wzmocnieniem obudowy lub całkowitą przebudową wyrobisk” [2]. Zachowanie pierwotnej geometrii wyrobiska jest ważne nie tylko dla zapewnienia właściwej wentylacji wyrobisk w kopalni, ale także usunięcia skutków wypiętrzania spągu, zwłaszcza w przypadku trasy odstawy urobku przenośnikami lub torami kolejek spągowych. Wypiętrzenie spągu może bowiem spowodować zatrzymanie transportu urobku, materiałów oraz ludzi kolejkami spągowymi [1, 2].



Rys. 1. Wypiętrzenie spągu: a) z zaznaczonymi liniami spękań spągu; b) z zaznaczonymi liniami wypiętrzenia

3. METODY UTRZYMANIA WYMAGANYCH PRZEKROJÓW WYROBISK GÓRNICZYCH

Na przestrzeni lat wielokrotnie podejmowano próby kompleksowego zmechanizowania procesu pobierki spągu, a tym samym skrócenia czasu wykonania tych prac. Jednak do tej pory próby te nie przyniosły pomyślnego rezultatu. W pustych wyrobiskach (bez zabudowanej przestrzeni na spąg) z reguły nie ma przeszkód do wykonania tych prac i często wykorzystuje się do tego kombajn chodnikowy, który potrafi szybko i skutecznie przywrócić wyjściową geometrię wyrobiska. Problem pojawia się, gdy w danym wyrobisku korytarzowym są już zabudowane tory ko-

lejki i/lub odstawa urobku. Wtedy spągowanie staje się uciążliwe i czasochłonne. Prowadzenie robót polega wówczas na połączeniu pracy ręcznej wspomaganej narzędziami tzw. małej mechanizacji oraz spągoloadowarki (jeśli jest tyle wolnej przestrzeni). Spągoloadowarki są powszechnie stosowanymi maszynami w polskim górnictwie węglowym. Służą one do pobierki luźnego spągu oraz załadunku urobku po odstrzeleniu calizny przodka podczas drażenia wyrobisk korytarzowych techniką strzelniczą i do podciągania materiałów w różnych miejscach infrastruktury kopalnianej. Spągoloadowarki to samobieżne maszyny oparte na podwoziu gąsienicowym, wyposażone w napęd elektrohydrauliczny, w którym wszystkie funkcje sterownicze są realizowane za pomocą układu hydraulicznego.

Pompa hydrauliczna napędzana jest silnikiem elektrycznym, zasilanym z rozwijanego kabla podłączonego do kopalnianej sieci elektroenergetycznej. Wadą tego typu maszyn jest to, że przy pracach związanych ze spągowaniem łyżka/czerpak spągodawarki poradzi sobie tylko z luźnymi i spękanymi skałami spagowymi, lecz nie jest w stanie ich „urobić”. Inną niedogodnością może być brak równoległego transportu urobku, na przykład przez wozy kopalniane, pojemniki podwieszane do kolejki lub przenośnik, co zmusza spągodawarkę do cofania się do miejsca, gdzie możliwy jest rozładunek łyżki. W efekcie wydłuża to czas pracy o operacje, które nie są produktywne [3].

W przemyśle maszyn górniczych podejmowano próby wyeliminowania wad i niedogodności w pracy spągodawarek, które miały jej nadać funkcjonalności do tej pory niespotykane w tego typu maszynach, na przykład przez zwiększenie zakresu pola pracy łyżki, przeprojektowania wysięgnika na wzór rozwiązań stosowanych w maszynach budowlanych, tzn. możliwość szybkiej wymiany łyżki na mały organ urabiający. Próby takie były podejmowane m.in. przez zespół w Katedrze Maszyn Górniczych, Przeróbczych i Transportowych AGH pod kierunkiem prof. Krzysztofa Krauzego na bazie spągodawarki ŁBT-700EH [1]. Jednakże wszystkie te zabiegi ostatecznie nie rozwiązały w całości problemu z umaszynowaniem procesu pobierki spągu, ponieważ bazowały na maszynie, której pierwotny cel powstania był inny, i dlatego nie mogła się sprawdzić w tak specyficznej pracy.

4. ZAŁOŻENIA BUDOWY GÓRNICZEJ FREZARKI SPĄGOWEJ

Firma Urządzenia i Konstrukcje SA z Żor (UiK SA) podjęła wysiłek, aby kompleksowo, od podstaw zaprojektować i zbudować maszynę specjalnie przeznaczoną do mechanicznego urabiania i odstawy urobku z procesu pobierki spągu. Dotychczas problem jednoczesnego urabiania i ładowania frezowanego spągu nie został rozwiązany. Równoczesne urabianie spągu i ładowanie urobku jest operacją skomplikowaną, dlatego w opracowywanych do tej pory rozwiązaniach maszyny proponowano załadunek i odstawę urobku dopiero po urobieniu partii skał spagowych [1]. Między innymi ze względu na innowacyjność rozwiązania – jednoczesne urabianie i załadunek – projekt pod

nazwą „Opracowanie Innowacyjnej Górniczej Frezarki Spągowej HYDROMA” został zgłoszony do „Programu Operacyjnego Inteligentny Rozwój” ogłoszonego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju, gdzie został pozytywnie zweryfikowany, w wyniku czego podpisano umowę nr POIR.01.01.01-00-1117/18 oraz przyznano dofinansowanie na realizację tego projektu.

5. PROJEKTOWANIE I BUDOWA FREZARKI

Zespół techniczny powołany przez UiK SA przeprowadził badanie rynku wśród potencjalnych użytkowników odnośnie do oczekiwań i cech, jakie powinien spełniać taki produkt.

W wyniku badania określono rodzaje skał występujących w spągu oraz przebadano ich parametry pod kątem doboru mocy organu urabiającego frezarki spągowej. W spągu w zależności od kopalni, poziomu wydobywania, chodnika występują różne formy skał, takie jak: węgiel ilasty, iłowiec z kamieniami węgla, łupki węglowe, iłowiec zapiaszczony, mułowiec warstwowy, piaskowce, murowce, łupki ilaste zapiaszczone z wkładkami piaskowca, łupki ilaste z laminałami węgla itp. Dla tych materiałów zbadano m.in. wytrzymałość na ściskanie R_c (zakres występowania od 8 MPa do maksymalnie 70 MPa), ciężar objętościowy (12,0–25,8 kN/m³), rozmałalność (0,4–1,0) wskaźnik szczelinowości RQD (5–70%), wskaźnik zwięzłości (0,4–5,9).

Jednocześnie zbadano kształt i formy występowania wypiętrzonego spągu (rys. 1a, b). Przy projektowaniu nowej maszyny przyjęto następujące założenia formalne: zgodność z dyrektywą maszynową 2006/42/WE oraz ATEX 2014/34/UE, jak również normami z nimi zharmonizowanymi tj.: PN-EN 12100:2010; PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02; PN-EN ISO 80079-36:2016-07; PN-EN 1127-2:2014-08.

Na podstawie wyników tych badań, przy tworzeniu pierwszych założeń, określono minimalne graniczne parametry, które były zgodne z oczekiwaniami pionu technicznego w audytowanych kopalniach. Zespół konstruktorów musiał w procesie projektowania rozwiązać sprzeczności między kompaktowymi gabarytami maszyny a wymogiem szerokiego zakresu jej działania i funkcjonalności. Dodatkowym wyzwaniem był właściwy dobór organu urabiającego, uwzględniając kształt wypiętrzonego spągu oraz zmienność i niejednorodność jego struktury i budowy [4].

Poniżej wymieniono przyjęte kluczowe założenia techniczne.

Konstrukcja mechaniczna:

- masa nie większa niż 12 ton,
- prędkość jazdy nie mniejsza niż 6 m/min,
- poruszanie się po pochyłościach wzdłużnych $\pm 18^\circ$, poprzecznych $\pm 5^\circ$,
- wysokość frezarki nie większa niż 1,5 m,
- bęben urabiający (rys. 2), o prędkościach roboczych w zakresie 20–25 obr/min (bieg 1) oraz 40–50 obr/min (bieg 2) – umożliwia regulowanie wydajności pracy frezarki w funkcji wytrzymałości spągu na ściskanie,
- stół załadowniczy na urobek wraz z integralnym przenośnikiem odstawczym,
- prędkość łańcucha przenośnika odstawczego nie mniejsza niż 0,6 m/s,
- zakładana eksploatacyjna trwałość noża nie krótsza niż 8 h pracy dla założonej wytrzymałości spągu na ściskanie.

Elementy i instalacje elektryczne:

- główny silnik napędowy pompy hydraulicznej,
- silnik napędowy łańcucha przenośnika odstawczego,
- główna skrzynia sterownicza z falownikiem i zabezpieczeniami.

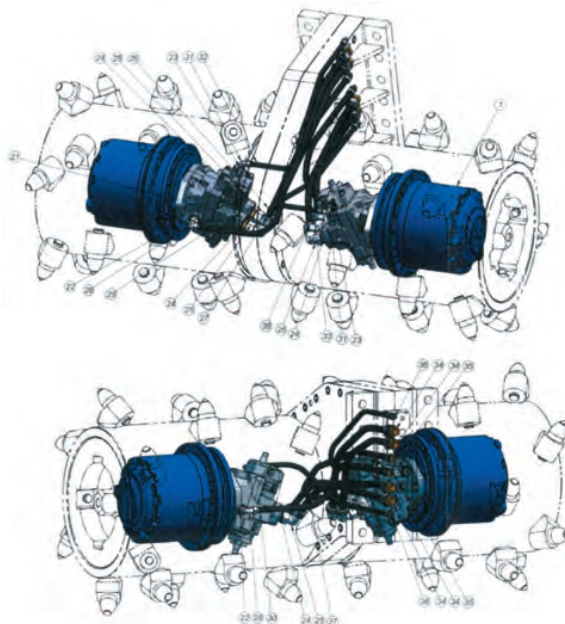
Obwody i instalacje hydrauliczne:

- dwie pompy układu hydraulicznego (jedna pracująca w układzie zamkniętym do obsługi bębna urabiającego, druga pracująca w układzie otwartym do napędzania wózków gąsienicowych, gwiazd załadowniczych, siłowników),
- silniki napędowe zabieraków gwiazdowych,
- układ jezdny gąsienicowy.

5. BADANIA PROTOTYPU GÓRNICZEJ FREZARKI SPĄGOWEJ HYDROMA

Aby rzetelnie przetestować budowany prototyp, mając na uwadze wysoki stopień wymagań dla nowego urządzenia na terenie firmy, zbudowano stanowisko badawcze z torem prób. W wytypowanych kopalniach przeprowadzono badania parametrów skał spągowych, a ich fragmenty/kawałki wykorzystano w mieszkach zastępczych przeznaczonych do frezowania testowego na stanowisku badawczym. Wykonane zostały trzy bloki z różnego składu mieszanek B1, B2, B3. Wymiary bloków (dł./szer./wys.): $2,8\text{ m} \times 1,4\text{ m} \times 1\text{ m}$ (rys. 3). Ich wytrzymałość na jednoosiowe ściskanie wynosiła mniej więcej od $R_c = 20\text{ MPa}$ do $R_c = 70\text{ MPa}$. Podczas badania tak przygotowane bloki ułożono różnorodnie względem siebie. Jednocześnie frezarka w trakcie urabiania bloków skalnych poruszała się po specjalnie przygotowanym podłożu skalno-węglowym o zmiennej granulacji. Taki sposób zorganizowania poligonu badawczego pozwolił zasympulować frezowanie spągu przy różnych płaszczyznach dojścia: czołowe, boczne, horyzontalne, oraz przy jednoczesnym frezowaniu kilku powierzchni. Poruszanie się Hydromy po zaaranżowanym podłożu pozwoliło ocenić jej stabilność przy pracy oraz mobilność podczas przejazdu w trudnym terenie.

Przeprowadzona seria badań, obejmująca około 30 prób w różnych wariantach przez niemal 20 godzin, pozwoliła na wychwycenie niedociągnięć, które były niezwłocznie poprawiane lub modyfikowane. W razie potrzeby przekonstruowywano całe podzespoły, aby zapewnić optymalne działanie maszyny.



Rys. 2. Schemat organu urabiającego – przedmiot zgłoszenia patentowego
(Patent P.448424 – Organ urabiający górniczej frezarki spągowej)



Rys. 3. Praca frezarki spągowej – urabianie bloków z kawałkami skał spągowych na poligonie badawczym

Rozwiązano między innymi problem z nieprawidłową pracą podajnika oraz blokowaniem się gwiazd załadowniczych (rys. 4). Zaprojektowane pierwotnie gwiazdy były zbyt blisko siebie i ich ramiona zostały wykonane całe ze stali, co przy pojawieniu się wię-

szych elementów urobku powodowało zaklinowywanie się skał pomiędzy ramionami gwiazd i ich blokowanie. W wyniku modyfikacji końcówki ramion gwiazd wykonano z oryginalnych elastycznych zgar- niaków.

a)



b)



Rys. 4. Gwiazdy załadownicze: a) stan przed modernizacją, b) stan po modernizacji

W ramach modyfikacji w prototypie Hydromy poprawiono układ zraszania wodnego, który przede wszystkim ma zapobiegać zapłonowi i wybuchowi, a także zmniejszać zapylenie i chłodzić noże [5] (rys. 5). Skuteczność działania tej instalacji została potwierdzona badaniami w Głównym Instytucie Gór-

nictwa PIB KD Barbara Zakład Zwalczania Zagrożeń Pyłowych. Zainstalowany układ zraszania wodnego zapewnia odpowiedni poziom bezpieczeństwa dla tego typu maszyny urabiającej i nie wymaga dodatkowych urządzeń zraszających, na przykład zraszania zanożowego.

a)



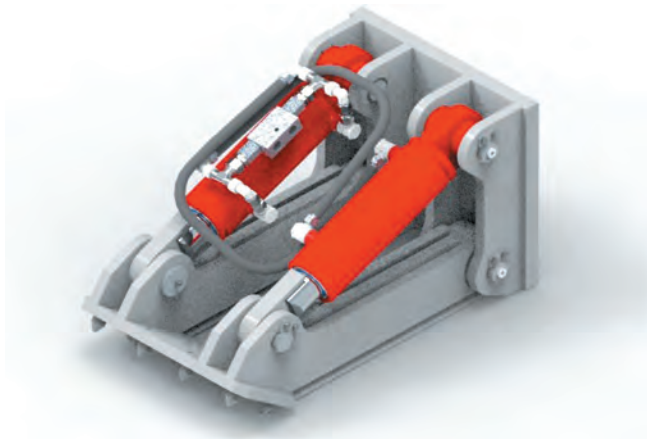
b)



Rys. 5. Stanowisko badawcze układu zraszania: a) próby badawcze; b) działanie układu zraszania

Zaprojektowano i wykonano dodatkową stopę umieszczoną z tyłu frezarki (rys. 6), umożliwiającą podparcie się o podłoże, co stabilizuje maszynę podczas pracy, szczególnie na pochyłościach. Zmienna wytrzymałość skał spągowych powoduje drgania maszyny. Nie stanowi to problemu podczas pracy w poziomie. Zwiększenie

pochyłości wzdłużnych o więcej niż 10° może spowodować osuwanie się maszyny podczas frezowania. W takim wypadku stosuje się stopę podpierającą. Niestety wydłuża się wtedy czas operacji – podparcie uniemożliwia poruszanie się maszyny do przodu, pozwala jednak na stabilną pracę układu frezującego.



Rys. 6. Stopa oporowa do frezarki spągowej Hydroma

Niezbędnym elementem tej maszyny jest dedykowany układ sterowania wraz z wprowadzonymi algorytmami i procedurami, które uwzględniają różnorodne warunki podczas normalnej pracy oraz w sytuacjach awaryjnych [6]. Samo sterowanie pracą frezarki spągowej Hydroma realizowane jest za pomocą panelu sterującego (rys. 7), umożliwiającego:

- przebywanie operatora w bezpiecznej odległości, poza środowiskiem zanieczyszczeń spowodowanych urabianym podłożem, takich jak zapylenie czy hałas,
- wprowadzenie frezarki w obszary narażone na różnego rodzaju niebezpieczeństwa (zagrożenie osuwiskami, spadającymi elementami, oddziaływanie innych pracujących maszyn etc.),
- prowadzenie prac w miejscach trudno dostępnych bez narażania operatora,
- prowadzenie prac w środowisku oddziałującym niekorzystnie na ludzi lub stanowiącym dla nich niebezpieczeństwo (zagrożenie chemiczne, biologiczne, wodorowe, zapylenie itp.).



Rys. 7. Panel sterujący frezarki spągowej Hydroma

W proponowanym rozwiązaniu nie przewidziano zastosowania kamer związanych z frezarką. Operator może przebywać z dala od frezarki, jednak w zasięgu jej pracy, tak aby kierować bezpieczną eksploatacją.

W więcej niż 30 próbach na torze testowym frezarka spągowa Hydroma wykonała swoją pracę na odcinku ponad 600 m.

W symulowanych cyklach: rozruch – praca na biegu jałowym – zatrzymanie, wykonanych 50 razy, silnik napędowy rozgrzał się do 60°C (pomiar na uzwojeniu silnika).

6. REZULTATY BADAŃ

Badania testowe prototypu potwierdziły przyjęte kluczowe założenia techniczne (wymienione wcześniej). Wynikowo masa prototypu Hydromy (rys. 8) wyniosła 12 ton, a jej wysokość nie przekroczyła 1,1 m. Pozytywne rezultaty pozwoliły przygotować prototyp Hydromy do badań i testów w celu sprawdzenia jego zgodności z dyrektywą maszynową 2006/42/WE oraz ATEX 2014/34/UE i normami z nimi zharmonizowanymi, tj.: PN-EN 12100:2010; PN-EN ISO/IEC 80079-38:2017-02; PN-EN ISO 80079-36:2016-07; PN-EN1127-2:2014-08.

Finalnie w wyniku projektu osiągnięto poziom gotowości technologicznej TRL 9. Zbudowana i przetestowana maszyna wykazuje się kompaktową budową w porównaniu z kombajnami chodnikowymi i spagoladowarkami, wyjątkowo niską wysokością (1,1 m), co

pozwała na prace w wyrobisku zajętym przez inne maszyny, urządzenia czy instalacje. Umożliwia samodzielne urabianie spągu (niwelację spągu), załadunek i odstawę urobku przez integralny przenośnik. Konstrukcja Hydromy pozwala doposażyć ją w specjalny wychylny podajnik odstawczy, dzięki czemu wzrasta elastyczność i wygoda w planowaniu miejsca odbioru urobku. Operator może sterować wszystkimi funkcjami maszyny drogą radiową z bezpiecznego miejsca.



Rys. 8. Prototyp frezarki spągowej Hydroma

Porównując prace frezarki spągowej Hydroma do dotychczasowych metod urabiania spągu, otrzymano następujące rezultaty.

1. Przy metodzie strzałowej – całkowita likwidacja gazów postrzałowych:

Czynnik szkodliwy	J.m.	Przy stosowaniu metody strzałowej	Przy stosowaniu frezarki spągowej
Zawartość toksycznych składników (NO_x) w gazach postrzałowych	[l/kg]	8,6	0,0
Zawartość toksycznych składników (CO) w gazach postrzałowych	[l/kg]	18,3	0,0

2. Przy metodzie pracy ręcznej wspomaganej narzędziami tzw. małej mechanizacji:
– obniżenie stężenia pyłu wdychanego:

Czynnik szkodliwy	J.m.	Przy stosowaniu metody strzałowej	Przy stosowaniu frezarki spągowej
Średnie geometryczne stężenie (GM) pyłu wdychanego w chodniku kopalni podczas pobierki spągu na stanowisku pracownika szeregowego do grupy pierwszej narażenia	[mg/m ³]	8,25	7,00

Małe gabaryty, stosunkowo niska masa, przemysłowa konstrukcja pozwala szybko i łatwo zmieniać jej lokalizację pomiędzy chodnikami i poziomami. Na odcinkach, gdzie jest to możliwe frezarka przemieszcza się sama w zasięgu zasilania elektrycznego – konieczność przepinania kabla zasilającego. W przypadku dalszego transportu, na przykład na inny poziom, istnieje możliwość szybkiego demontażu i montażu maszyny w kilku elementach.

- obniżenie pracochłonności i kosztów:

Czynnik szkodliwy	J.m.	Przy stosowaniu metody strzałowej	Przy stosowaniu frezarki spągowej
Liczba roboczogodzin do usunięcia 250 m ³ wypiętrzonego spągu	[h]	312,50	20,80
Koszt usunięcia 1 m ³ wypiętrzonego spągu*	[PLN/m ³]	800,00	123,85

* Koszty według analizy z 2018 r.

7. PODSUMOWANIE

Wyniki projektu badawczo-rozwojowego pt. „Opracowanie Innowacyjnej Górniczej Frezarki Spągowej HYDROMA” doprowadziły nie tylko do osiągnięcia poziomu gotowości technologicznej TRL9, ale także wykazały, że frezarka spągowa skutecznie rozwiązuje wiele problemów związanych z urabianiem wypiętrzonego spągu. Zastosowanie Hydromy umożliwia wydłużenie eksploatacji chodników podatnych na zaburzenia przez przywrócenie lub utrzymanie ich nominalnych przekrojów, nie powodując przy tym utrudnień ani przerw w ich funkcjonowaniu. Dzięki temu uproszczone zostaną procesy logistyczne przy przemieszczaniu materiałów, maszyn, urządzeń w takich wyrobiskach i drogach

transportowych, które są narażone na zaburzenia w formie wypiętrzania się spągu. Przekłada się to wprost na obniżenie kosztów wydobycia (inne obecnie stosowane metody przywrócenia funkcjonalności wyrobisk korytarzowych są niewspółmiernie droższe, co wykazano wcześniej), ponieważ te prace są konieczne do wykonania, jeśli dane wyrobisko jest niezbędne w dłuższej perspektywie czasowej i w procesie technologicznym wydobycia kopaliny lub do zapewnienia odpowiedniej wentylacji. Zbudowana maszyna pozwala na optymalizację kosztów w zakresie przywracania właściwych gabarytów zaciskanych od spągu wyrobisk. Zastąpienie dotychczasowych metod z użyciem materiałów wybuchowych lub urządzeń z napędem spalinowym przez maszynę z napędem elektrycznym wyposażoną w zraszacz likwiduje zapylenie, wydzielanie się gazów postrzałowych do atmosfery kopalnianej oraz eliminuje zagrożenia wynikające z wykonywania robót strzałowych w warunkach zagrożenia metanowego.

Zaprojektowana i wykonana maszyna daje możliwości przebudowy w celu jej dostosowania do innych warunków pracy lub zadań. Jeśli zaistnieje potrzeba wykorzystania frezarki o opisanych wyżej cechach w innym środowisku pracy, to firma UiK SA ma możliwości i środki techniczne, aby ją odpowiednio zmodyfikować lub opracować jej nową wersję w zależności od zapotrzebowania rynku, na przykład z napędem spalinowym lub napędem elektrycznym akumulatorowym.

Literatura

- [1] Krauze K., Kotwica K.: *Ładowarka z wymiennym osprzętem do frezowania skał spągowych*. Mechanizacja i Automatyza-cja Górnictwa 2009, 47, 1: 5–11.
- [2] Małkowski P., Ostrowski Ł.: *Wpływ właściwości mechanicznych skał otaczających wyrobisko korytarzowe na zjawisko wypiętrzania spągu*. Przegląd Górniczy 2014, 12, 70: 78–90.
- [3] *Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 23 listopada 2016 r. w sprawie szczegółowych wymagań dotyczących prowadzenia ruchu podziemnych zakładów górniczych*. Dz.U. 2017, poz. 1118, z późniejszymi zmianami.
- [4] Kotwica K.: *Maszyny do mechanicznego drążenia wyrobisk korytarzowych w skałach zwięzłych – teraźniejszość i przyszłość*. W: *Górnictwo – perspektywy, zagrożenia: mechanizacja prac górniczych*, red. W. Biały, J. Brodny, S. Czerwiński. Wydawnictwo PA NOVA, Gliwice 2014: 117–135.
- [5] Krauze K., Bołoz Ł., Wydro T.: *Wskaźniki parametryczne oceny jakości noży styczno-obrotowych*. Archives of Mining Sciences 2015, 60, 1: 265–281.
- [6] *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. 2002, nr 139, poz. 1169.
- [7] Deja P., Kapuściński D., Niedworok A., Polnik B.: *Badania innowacyjnego układu zasilająco-sterującego spagoladownicy górniczej*. Napędy i Sterowanie 2020, 7/8(22): 38–42.

dr inż. FRANCISZEK NIEZGODA

mgr inż. JANUSZ ZAJĄC

KAZIMIERZ MITKO

mgr inż. IZABELA GÓRECKA

mgr inż. STANISŁAW MOJŻYSZ

Urządzenia i Konstrukcje SA

ul. Fabryczna 10, 44-240 Żory

biuro@uiksa.pl

