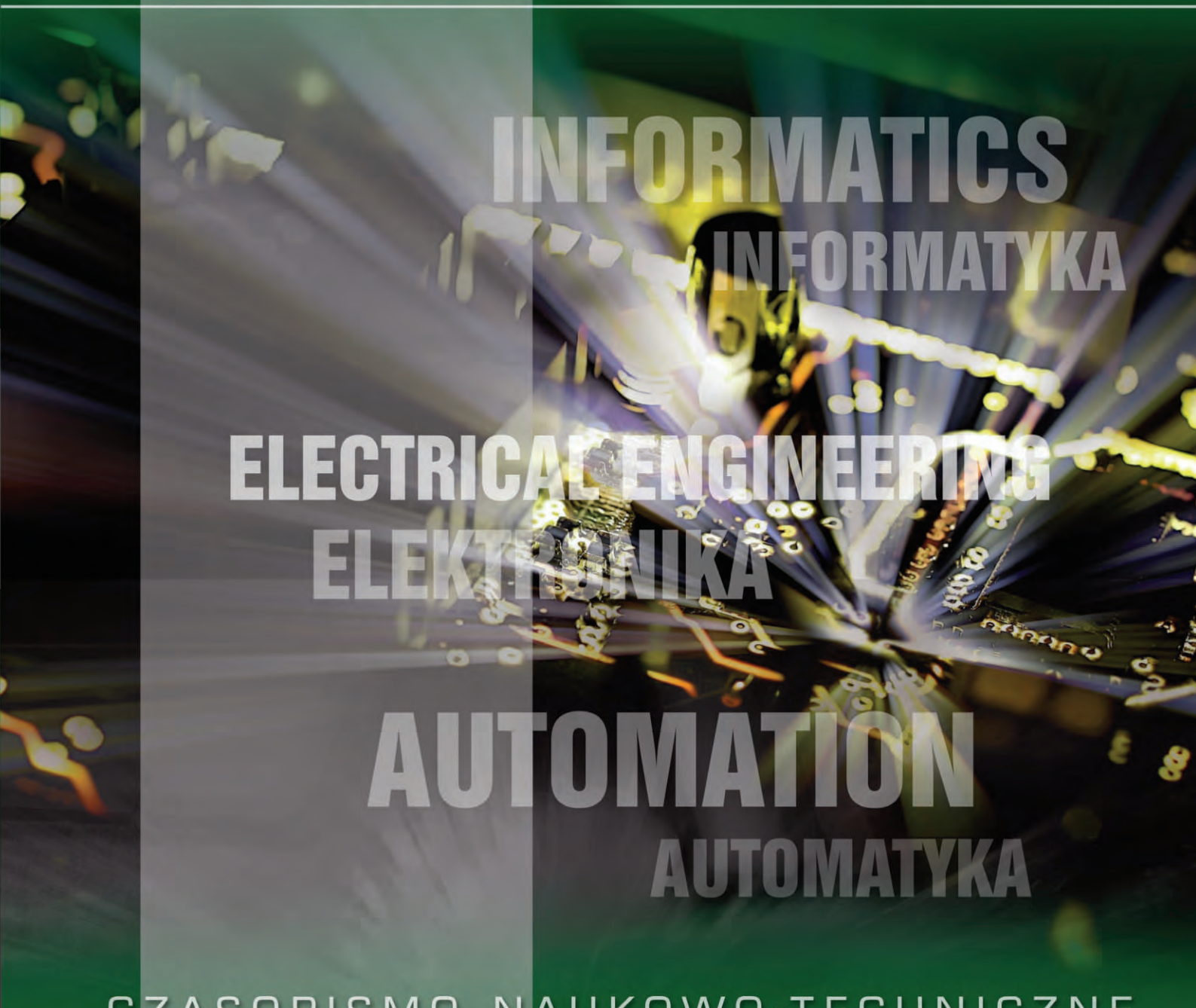
1 (557) 2024

Mining
INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL



CZASOPISMO NAUKOWO-TECHNICZNE

Mining – Informatics Automation and Electrical Engineering

AGH

Mining INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

SCIENTIFIC AND TECHNICAL JOURNAL

NO. 1 (557) 2024

AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

MECHANICAL ENGINEERING

TECHNICAL IT AND TELECOMMUNICATIONS

ENVIROMENTAL ENGINEERING, MINING AND ENERGY TECHNOLOGY

MATERIALS ENGINEERING

QUALITY MANAGEMENT

AUTOMATYKA, ELEKTRONIKA I ELEKTROTECHNIKA

INŻYNIERIA MECHANICZNA

INFORMATYKA TECHNICZNA I TELEKOMUNIKACJA

INŻYNIERIA ŚRODOWISKA, GÓRNICTWO I ENERGETYKA

INŻYNIERIA MATERIAŁOWA

NAUKI O ZARZĄDZANIU I JAKOŚCI

WYDAWNICTWA AGH
KRAKÓW 2024

ISSN 2449-6421

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 Cieplok, 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:
Darius Andriukatis, 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 Mężyk, 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 Zrnić, 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 – *Jarosław 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 2024, Creative Commons CC-BY 4.0 License

ISSN 2449-6421

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

Adam Kalwar, Roman Filipek, Paweł Madejski, Krzysztof Pytel, Franciszek Kurdziel

The energy balance of a CHP unit fuelled by mine gas 7

Bilans energetyczny agregatu kogeneracyjnego zasilanego gazem kopalnianym 16

Tomasz Krakowski

The magnetic testing of steel ropes in hard-to-access places 25

Badania magnetyczne lin stalowych w miejscach trudno dostępnych 33

Mining INFORMATICS AUTOMATION AND ELECTRICAL ENGINEERING

Nr 1 (557) 2024

ABSTRACTS

ADAM KALWAR
ROMAN FILIPEK
PAWEŁ MADEJSKI
KRZYSZTOF PYTEL
FRANCISZEK KURDZIEL

THE ENERGY BALANCE OF A CHP UNIT FUELLED BY MINE GAS

This paper presents the results of a study of a gas engine heat recovery system in terms of efficient use of the energy contained in the fuel, with the study performed determining the most efficient variant of gas engine operation. A comparison between the manufacturer's data and the performance results was also made. Simulations performed on the system model allowed the optimum engine load range to be determined. The results of the analyses also indicated which variant of the engine heat recovery system is the most effective.

TOMASZ KRAKOWSKI

THE MAGNETIC TESTING OF STEEL ROPES IN HARD-TO-ACCESS PLACES

The increasing requirements for safety, reliability and quality mean that the testing of steel ropes has become an inseparable element in their production and operation stages. The basic method used in testing has become the magnetic testing method of steel ropes (MTR). Despite the extensively developed knowledge, equipment, and methods of analysing diagnostic signals, difficult to access places and the ends of steel ropes are not fully covered by diagnostics. Visual inspection, which is one of the basic methods of non-destructive testing in this area of ropes, has many limitations. This area of magnetic defectoscopy is a place where new solutions and structures for testing steel ropes are created. The article presents an example of solutions used for diagnostics in places with difficult access. A new concept of a diagnostic system for magnetic testing of ropes in these sections is described. The results of initial laboratory verification measurements of the new solution are also presented.

STRESZCZENIA

ADAM KALWAR
ROMAN FILIPEK
PAWEŁ MADEJSKI
KRZYSZTOF PYTEL
FRANCISZEK KURDZIEL

BILANS ENERGETYCZNY AGREGATU KOGENERACYJNEGO ZASILANEGO GAZEM KOPALNIANYM

W artykule przedstawiono wyniki badań układu odzysku ciepła silnika gazowego pod kątem efektywnego wykorzystania energii zawartej w paliwie, co pozwoliło na określenie najbardziej wydajnego wariantu pracy silnika gazowego. Dokonano również porównania danych producenta z wynikami osiąganych parametrów eksploatacyjnych. Przeprowadzone symulacje na modelu układu pozwoliły wyznaczyć optymalny zakres obciążeń silników. Wyniki analiz wskazały również, który wariant układu odzysku ciepła z silnika jest najbardziej efektywny.

TOMASZ KRAKOWSKI

THE MAGNETIC TESTING OF STEEL ROPES IN HARD-TO-ACCESS PLACES

Rosnące wymagania dotyczące bezpieczeństwa, niezawodności oraz jakości powodują, że badania lin stalowych stały się nieodłącznym elementem zarówno etapu produkcji, jak i eksploatacji. Podstawową metodą stosowaną w tym zakresie jest metoda badań magnetycznych lin stalowych (MTR). Mimo szeroko rozwiniętej wiedzy, aparatury i metod analizy sygnałów diagnostycznych trudno dostępne miejsca oraz zakończenia lin stalowych nie są w pełni objęte diagnostyką. Kontrola wizualna, która jest jedną z podstawowych metod badań nieniszczących w tym obszarze, ma istotne ograniczenia. Defektoskopia magnetyczna to dziedzina, w której powstają nowe rozwiązania i konstrukcje przeznaczone do badań lin stalowych. W artykule przedstawiono przykłady rozwiązań wykorzystywanych do diagnostyki miejsc o utrudnionym dostępie. Opisano nową koncepcję układu diagnostycznego do badań magnetycznych lin w tych odcinkach. Zaprezentowano również wyniki wstępnych laboratoryjnych pomiarów weryfikacyjnych nowego rozwiązania.

https://doi.org/10.7494/miag.2024.1.557.7

ADAM KALWAR
ROMAN FILIPEK
PAWEŁ MADEJSKI
KRZYSZTOF PYTEL
FRANCISZEK KURDZIEL

The energy balance of a CHP unit fuelled by mine gas

This paper presents the results of a study of a gas engine heat recovery system in terms of efficient use of the energy contained in the fuel, with the study performed determining the most efficient variant of gas engine operation. A comparison between the manufacturer's data and the performance results was also made. Simulations performed on the system model allowed the optimum engine load range to be determined. The results of the analyses also indicated which variant of the engine heat recovery system is the most effective.

Key words: *gas engines, mine gas, coke-oven gas, gas fuel, cogeneration*

1. INTRODUCTION

The energy balance of cogeneration units is an important element on the basis of which it is possible to assess their efficiency and profitability. The results of the balance sheet make it possible to determine the conditions under which it is possible to maximize the use of the energy generated and minimize losses, which translates into better operational efficiency and environmental benefits [1].

The energy balance of gas engine-driven cogeneration units presents an analysis of the energy efficiency of these systems, taking into account both electricity and heat production [2]. The basic aspects of the energy balance of CHP units take into account the production of electricity and heat, the energy balance of a CHP unit includes an analysis of the amount of energy produced and consumed in the system, the efficiency of energy production in the system, and a consideration of environmental aspects [3].

2. INDUSTRIAL INSTALLATIONS SELECTED FOR TESTING

2.1. Cogeneration system powered by gas from mine de-methanation

Two gas engines of the same series (TCG 2032 V16 made by MWM Deutz) powered with the same fuel – mine gas, and one engine fuelled with coke oven gas (also of the same series) were selected as test stands. The engines fuelled by mine gas use two different heat recovery system solutions. The engines powered by mine gas are installed at the "Moszczenica" Combined Heat and Power Plant in Jastrzębie-Zdrój. Engine No. 1 (hereinafter referred to as SG-1) is a TCG 2032 V16 engine put into operation in December 2011, the electric power is 4.0 MWe and 3.9 MWt. Engine No. 2 (hereinafter referred to as SG-2) is a CG 260 16V engine (renamed after the change of ownership of MWM GmbH) put into operation in November 2014, electric power is 4.3 MWe and 3.9 MWt.

The difference in the electrical power of the engines is due solely to the model of generator used.

Both engines operated at maximum hours in connection with the national electric power system. Thermal energy from the engines is transferred to the district heating network as:

– hot water,
– central heating.

The basic parameter of operation is to maximize the electricity generated [4]. The only difference in the installations of these engines is the method of receiving heat from the engine. For the SG-1 engine, the heat is received into a single heat exchanger, and the exchanger produces a constant-temperature or variable--temperature parameter as required, while the SG-2 engine installation has two exchangers built in, one for the constant-temperature parameter and one for the variable-temperature parameter. The fixed-temperature parameter is otherwise called hot water, and the variable-temperature parameter is called central heating.

2.2. Cogeneration system powered by coke oven gas

A coke-gas-fuelled engine, commissioned in 2013, is installed at the "Nowa" Coking Plant in Częstochowa, it is also a TCG 2032 V16 engine but its electric power is reduced to 2.9 MW_e and 3.4 MW_t.

This engine was intended to be operated from the "Pniówek" Combined Heat and Power Plant in Pawlowice. This plan did not come to fruition due to the engine's operational difficulties, frequent shutdowns and failure rate. The engine produced electricity in conjunction with year-round production of process steam for the "Nowa" Coking Plant, its heat recovery system was coupled with a process steam generator.

This engine was decommissioned in 2022, after working nearly 56,724 rbh, due to the termination of the contract for the purchase of electricity and heat in process steam by the owners of the "Nowa" Coking Plant.

3. ENERGY BALANCE

The energy balance of the mine gas-fired genset is an important diagnostic tool for analysing and controlling the energy production process, playing an important role in determining the operating conditions under which the operational efficiency of the cogeneration unit is greatest [5]. It is important for monitoring, optimizing and managing the system that converts the chemical energy contained in mine gas into electricity and heat. The results of the energy balance of the cogeneration unit are shown in Tables 3, 4 and 5. This type of analysis is important for improving energy efficiency, achieving significant savings in energy consumption and maintaining compliance with the requirements governing energy production. Table 1 shows the declared parameters of engines powered by mine gas.

Table 1

Technical data of the motor series TCG 2032

Electrical power	4,000/4,300* kW_e
Heat from engine cooling	1,436 kW
Heat from cooling the mixture	367 kW
Exhaust heat	2,435 kW
Heat from the oil cooler	483 kW
Engine input power in fuel	9,946 kW
Electrical efficiency	43,2%
Thermal efficiency	43,8%
Overall efficiency	87,0%

* The 4,000-kilowatt output is for the Van Dyke generator engine, while 4,300 is for the Magnetti Marelli generator engine

4. NUMERICAL ANALYSIS

Numerical analysis of the aggregate input data was carried out in the Ebsilon environment [6]. Conducting the analysis was to answer the question of what the distribution of heat loads of heat recovery plants at different loads looks like, how the efficiency of the plant changes depending on its load, ultimately, this information was passed on to the services operating engines fuelled by mine gas.

For the purposes of the analysis, the following assumptions were made [7] and gas engine technical parameters:

– power of the generator: 4.3/4.0/3.0 MW_e, (depends on the type of fuel),
– unit heat consumption: 8 225.6 kJ/kWh,
– electric efficiency: 43.77%,
– exhaust gas stream: 6.34 kg/s,
– exhaust gas outlet temperature: 453°C.

Gas engine parameters

– degree of opening of the exhaust flap [%] – indicating the flue gas flow through the recovery boiler,
– temperatures on the power supply c.o., c.w.u.,
– flow of c.o., c.w.u.,
– water temperature in the return flow.

Composition of the mine gas

Composition of the mine gas is analysed live by chromatograph and the results of the data analysis are available in the SCADA system, making it possible to carry out analyses at any time from any period of the plant's operation. The gas analysis results shown below are averages from 2017 to 2019. Data sampling was conducted every hour with hourly averaged values:

- 33.46% N_2,
- 6.73% O_2,
- 3.91% CO_2,
- 55.69% CH_4,
- 0.02% C_2H_6,
- 0.01% C_3H_8.

Analysing the data in Table 2 and the graph in Figure 1, it can be seen that in 2017 the content of pure CH_4 in the mixture ranged from 64,7 to 50,6%, while in 2018 the content of pure CH_4 varied from 56,8 to 50,8%. Much of the stabilization in the composition of the gas mixture is due to the use of gas intake from the inactive mine workings of the former Jas-Mos mine.

The input data cited above were implemented into a model of a gas engine together with a heat recovery system in the Ebsilon environment, on the basis of the input data in the implemented model of the cogeneration unit. Analyses were carried out on the basis of which results were obtained showing the distribution of the thermal load on the elements of the heat recovery system and the flow values at various points in the system, assigned to the engine load values in the range from 50 to 100% with a step of 10%.

The use of gas extraction from inactive mining areas of the former JasMos mine provides significant stabilization in the composition of the gas mixture.

Table 2

Pure content CH_4 in the mixture [2]

Month	2017	2018	2019
January	56.13	50.24	55.50
February	61.24	48.75	55.96
March	63.41	52.67	54.31
April	64.70	53.97	55.70
May	62.39	55.48	56.20
June	60.77	56.23	56.12
July	58.26	59.12	55.63
August	52.47	61.66	56.85
September	52.88	60.58	51.72
October	52.37	58.22	51.48
November	54.10	54.34	51.66
December	50.60	52.81	50.79
Yearly average	**57.44**	**55.34**	**54.33**

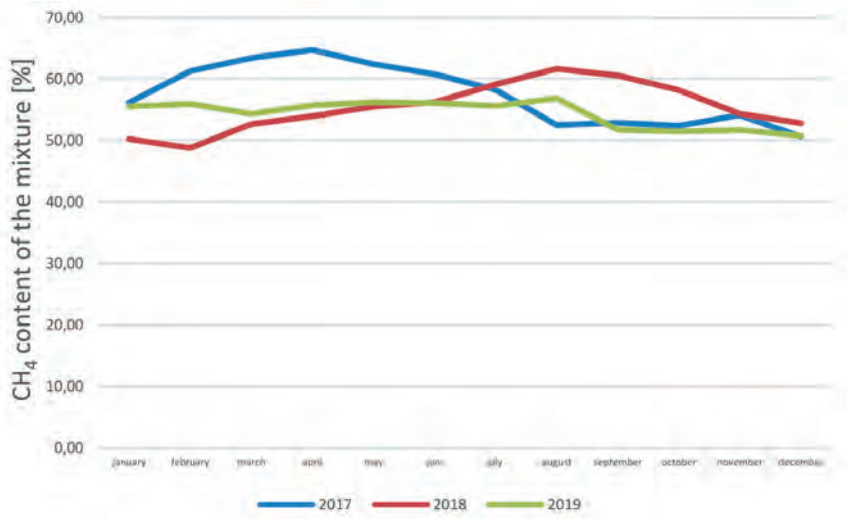


Fig. 1. Pure content CH_4 in the mixture [2]

Composition of the coke oven gas

The composition of coke oven gas is not tested continuously, the result presented below is averaged from analyses performed over 8 days in December 2014 and 8 days in January 2015:

- 4.2% N_2,
- 1.0% O_2,
- 3.5% CO_2,
- 7.6% CO,
- 24.2% CH_4,
- 3.0% C_2H_6,
- 56.5% H_2.

The lack of continuous monitoring or cyclical analyses of the gas composition does not allow any conclusions to be drawn regarding changes in the gas composition and its impact on the operation of the engine fuelled with this fuel.

5. CALCULATION MODEL OF THE ENGINE

Calculation model of the engine implemented in the Ebsilon environment represent: Figure 2 for a fossil gas engine with two heat exchangers, Figure 3 for an engine fuelled by coke oven gas with a steam generator.

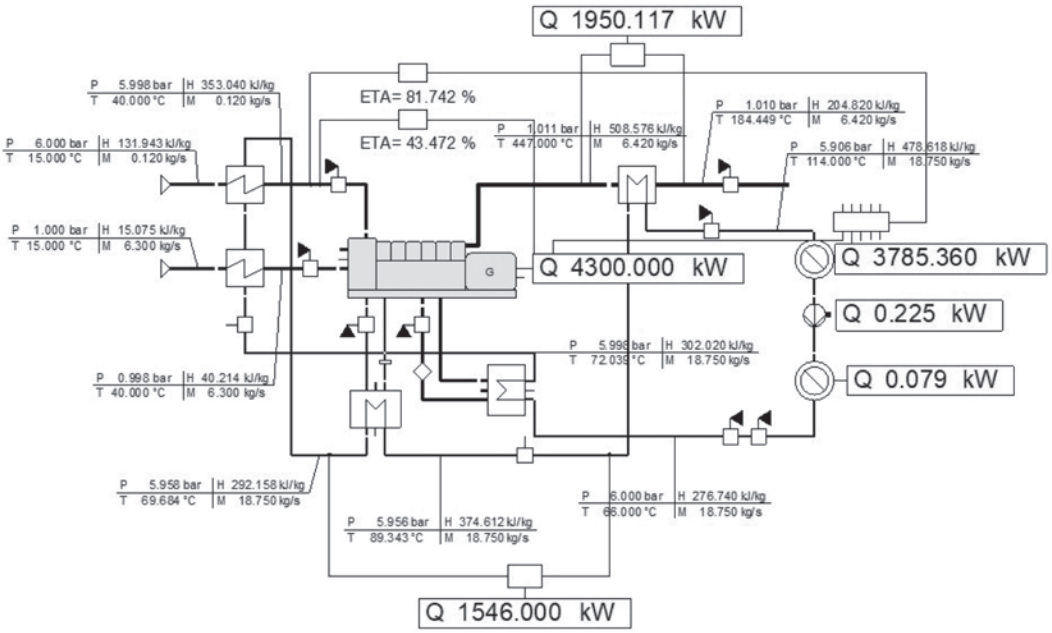


Fig. 2. Model engine CG 260 16V [3]

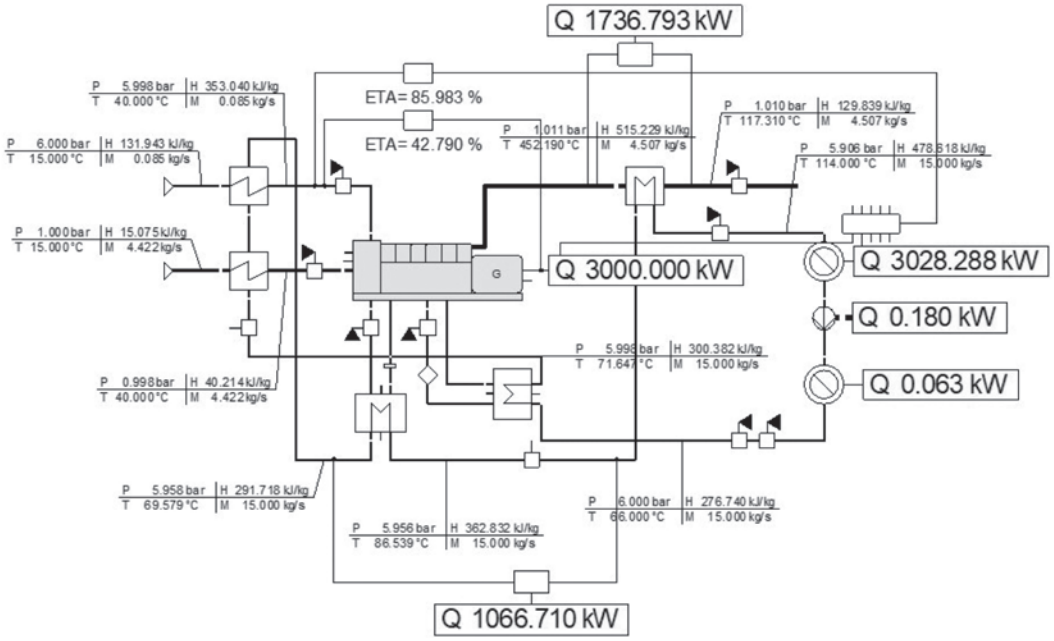


Fig. 3. Model engine TCG 2032 V16 by coke oven gas [3]

Table 3

Load characteristics of the engine and heat recovery system CG-260 16V [2]

Parameter	Engine load					
	100	90	80	70	60	50
Electric power [kW]	4,300	3 870	3 440	3 010	2 580	2 150
Thermal power from the engine cooling system [kW]	1,546.0	1,388.4	1,230.8	1,081.8	941.4	801.0
Heat power recovered from the exhaust gas [kW]	1,932.6	1,819.5	1,691.6	1,559.1	1,420.8	1,266.5
Thermal power [kW]	3,785.4	3,498.9	3,197.8	2,905.1	2,619.9	2,318.6
Exhaust gas temperature [°C]	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0	179.0
Exhaust gas flow [kg/s]	6.420	5.808	5.196	4.601	4.024	3.447
Gas consumption [kg/s]	0.352	0.321	0.289	0.258	0.227	0.197
Air flow [kg/s]	6.068	5.487	4.907	4.343	3.797	3.250
Electrical efficiency [%]	43.550	43.490	42.433	41.610	40.496	39.033
Total efficiency [%]	81.890	81.971	81.879	81.769	81.617	81.126

For services operating gas engines, the most important indicator of gas fuel quality is the content of pure CH_4 in the mixture. The engine can even operate with less than 40% CH_4 in the mixture, but starting the engine is possible only with CH_4 concentrations above 40%, which is why it is so important to ventilate the gas system using a gas boiler – such a solution allows gas with too low a content of pure CH_4 to be efficiently and effectively removed from a section of the network (about 5 km). Carrying out this process without the use of a water boiler for this purpose would involve the prolonged release of gas into the atmosphere through process blowpipes built on the gas installation of gas engines.

For testing engines fuelled by mine gas, measurements were used at the points of gas injection into the network and at the points of gas injection into the gas system of gas engines.

Comparing the graphs in Figures 4 and 5, it can be observed that these engines achieve the best overall efficiency at a load of 90%, reaching an overall efficiency of 82% for the CG 260 16V engine and 85% for the TCG 2032 V16 engine.

The engine fuelled by coke gas (Fig. 6) also achieves the highest efficiency at 100% load and is close to 86%.

Table 4

Load characteristics of the engine and heat recovery system TCG 2032 V16 [2]

Parameter	Engine load					
	100	90	80	70	60	50
Electric power [kW]	4,000	3,600	3,200	2,800	2,400	2,000
Thermal power from the engine cooling system [kW]	1,546.0	1,388.4	1,230.8	1,081.8	941.4	801.0
Heat power recovered from the exhaust gas [kW]	1,951.7	1,836.2	1,706.3	1,571.7	1,431.5	1,275.4
Thermal power [kW]	3,804.9	3,516.1	3,212.8	2,918.1	2,630.9	2,327.7
Exhaust gas temperature [°C]	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0	175.0
Exhaust gas flow [kg/s]	6.420	5.808	5.196	4.601	4.024	3.447
Gas consumption [kg/s]	0.328	0.298	0.269	0.240	0.212	0.183
Air flow [kg/s]	6.092	5.510	4.927	4.361	3.812	3.264
Electrical efficiency [%]	43.555	43.490	42.433	41.610	40.496	39.033
Total efficiency [%]	84.985	85.095	85.037	84.974	84.887	84.461

Table 5

Load characteristics of the engine and heat recovery system TCG-2032 V16 [2]

Parameter	Engine load					
	100	**90**	**80**	**70**	**60**	**50**
Electric power [kW]	3,000	2,700	2,400	2,100	1,800	1,500
Thermal power from the engine cooling system [kW]	1,066.7	956.5	850.9	1 313.2	657.9	615.0
Heat power recovered from the exhaust gas [kW]	1,736.8	1,480.1	1,404.6	754.4	1,221.8	1,076.1
Thermal power [kW]	3,028.3	2,649.8	2,460.48	2,271.2	2,081.9	1,892.7
Exhaust gas temperature [°C]	117.3	148.7	141.5	136.2	126.6	155.1
Exhaust gas flow [kg/s]	4.507	4.082	3.668	3.277	2.886	2.711
Gas consumption [kg/s]	0.085	0.078	0.070	0.063	0.056	0.053
Air flow [kg/s]	4.422	4.004	3.598	3.214	2.830	2.659
Electrical efficiency [%]	42.790	42.245	41.517	40.471	39.156	34.614
Total efficiency [%]	85.983	83.704	84.080	84.242	84.446	78.289

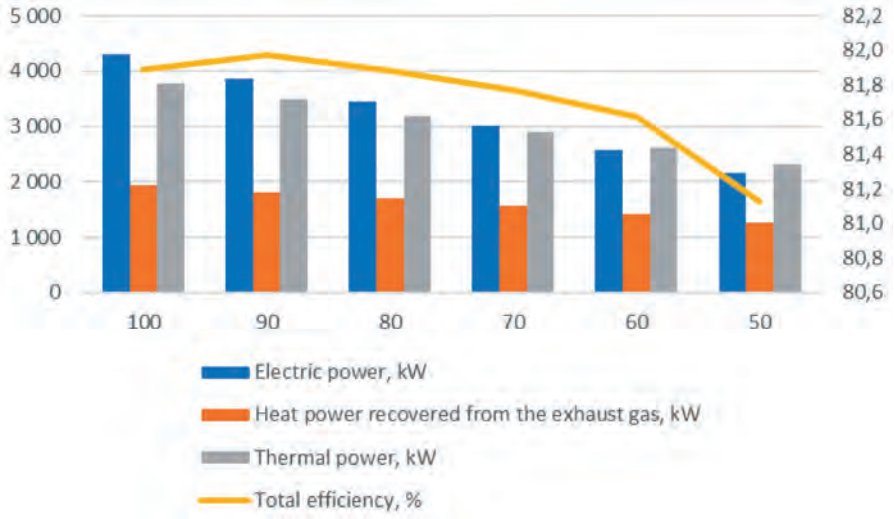


Fig. 4. Variation of engine power (CG 260 16V) and total efficiency with change in load – mine gas

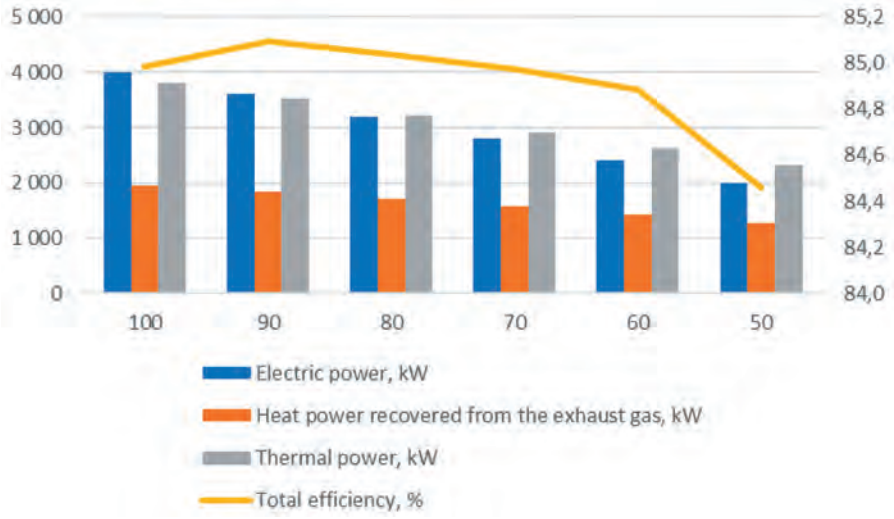


Fig. 5. Change in engine power (TCG 2032 V16) and total efficiency with change in load – mine gas

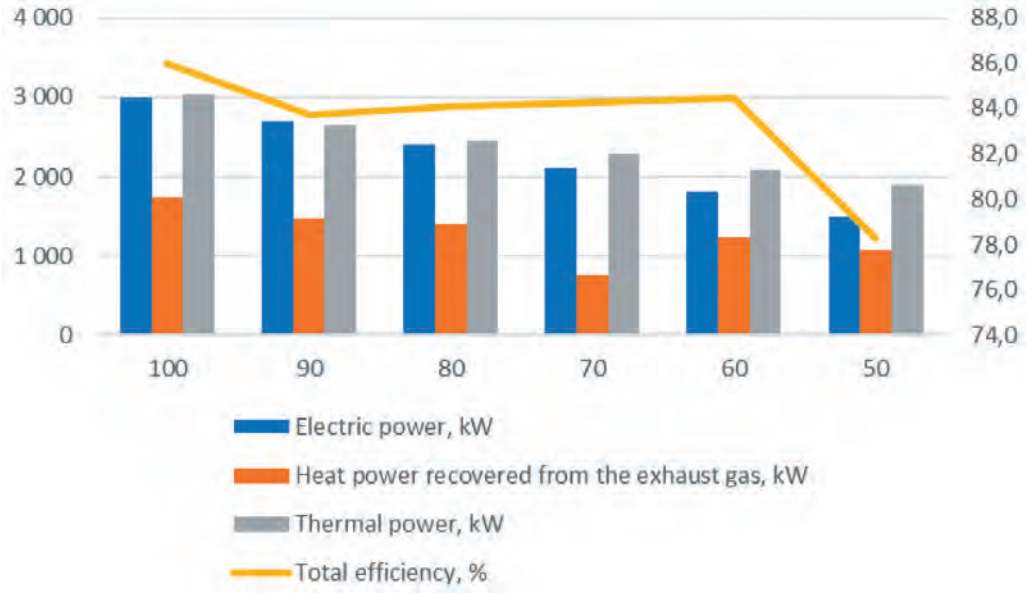


Fig. 6. Variation of engine power and total efficiency with load change – coke oven gas

6. RESULTS

For the TCG 2032 V16 engine in this range, the efficiency increases from 84.9 to 85.1%, for the CG 260 16V the range is between 82.0 and 82.2%. In contrast, the engine fuelled by coke gas has a range of efficiency changes from 84.45 to 86%.

For all the engines tested, it is confirmed that the effective operating range of the engine is between 60 and 100%, which coincides with the engine manufacturer's recommended load range, with efficiency changes ranging from 0.2 to 1.15%. All these values are illustrated in Figure 7.

For comparison, the data for the pure CH_4 content in the mix in 2016–2023 are also collated (Fig. 8), the graph allows us to see the increase in concentration variability in 2019–2022, in 2023. There are many factors influencing the variation in concentration, so in order to get an accurate idea of the reasons for the changes in pure CH_4 concentration, it would be necessary to compare the results at the point of consumption with the results of the gas composition analyses at the point of gas supply to the grid. The table presented here, therefore, is purely illustrative.

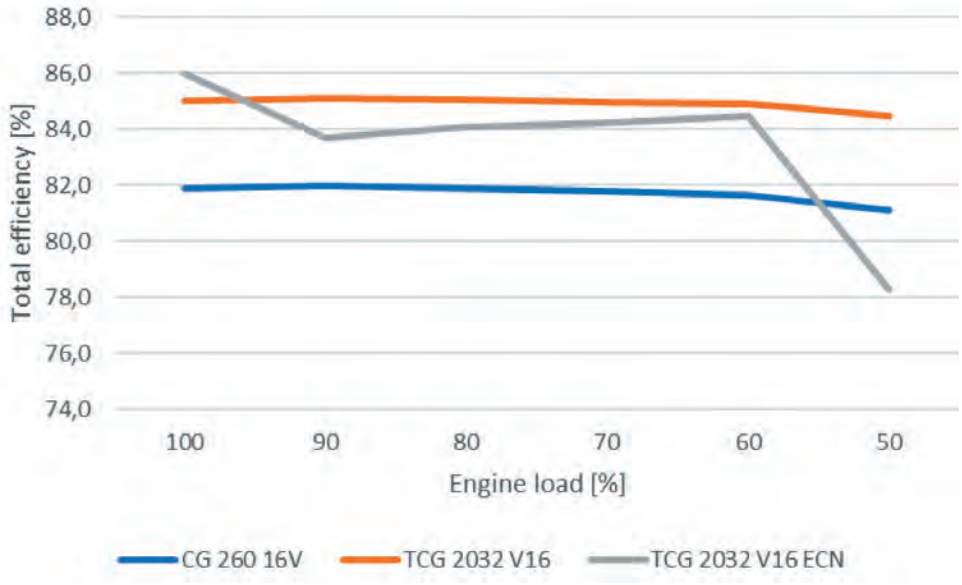


Fig. 7. Comparison of total engine efficiency

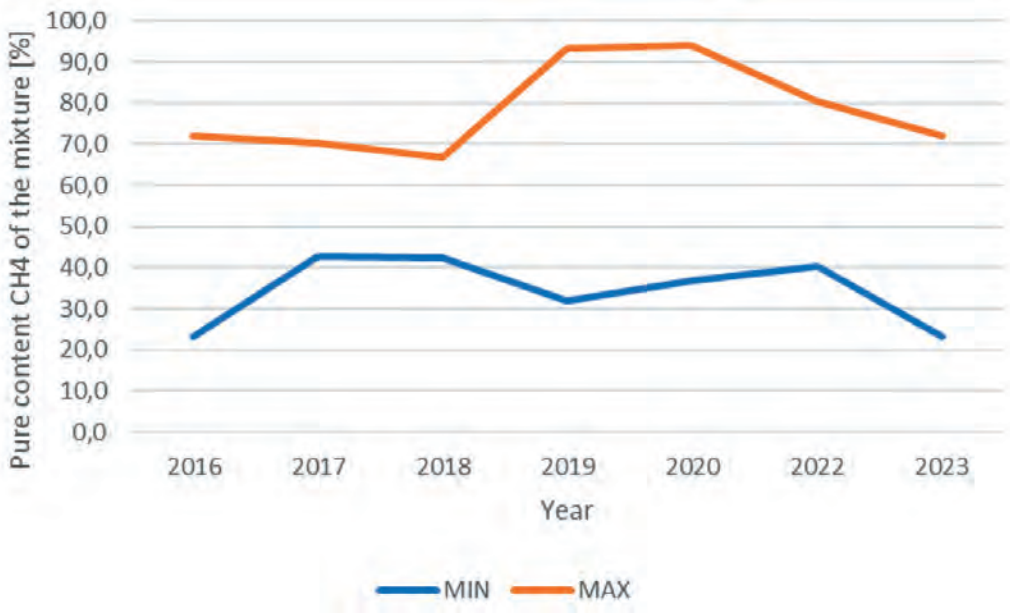


Fig. 8. Change in pure CH_4 concentration in the mixture

To understand the reasons for variations in pure CH_4 concentration, it is necessary to compare consumption point results with gas composition analyses at the grid supply point.

7. SUMMARY

The simulations conducted allowed for the analysis of the change in thermal power of the cogeneration unit depending on engine load, with simulations performed for three different systems:

- an engine powered by mine gas transferring heat to a single heating exchanger,
- an engine powered by mine gas transferring heat to two heating exchangers,
- an engine powered by coke oven gas transferring heat to a steam generator.

For technological reasons, gas engines can operate continuously within a load range of 65% to 100%, while they can operate periodically within a range of 50% to 65%, provided the conditions specified by the manufacturer in the engine's technical documentation are met.

An interesting conclusion from the analysis is that the engine with a single heating exchanger of higher power has better efficiency than with two exchangers, even though the two-exchanger system is generally considered better by operators. Another noteworthy finding is the operating point at which the engine achieves the highest overall efficiency. The analyses pointed to a specific operating point where maximum overall efficiency is attained, highlighting the importance of precisely adjusting the engine load to optimize its performance.

The simulation results were based on actual values of the gas composition and technical data provided by the manufacturer, increasing the reliability of the findings. The simulations provided additional insights into engine operating systems, with the results obtained from real gas composition values and data from engine information sheets provided by the manufacturer [8].

The next stage of analysis involves performing simulations for the actual operating parameters of the heat recovery system and engines powered by gas from mine methane drainage, as the engine powered by coke oven gas is no longer in operation.

References

[1] Ciuła J., Kowalski S., Generowicz A., Barbusiński K., Matuszak Z., Gaska K.: *Analysis of Energy Generation Efficiency and Reliability of a Cogeneration Unit Powered by Biogas*. Energies 2023, 16, 2180. https://doi.org/10.3390/en16052180.

[2] Gong H., Chen Z., Yu H., Wu W., Wang W., Pang H., Du M.N.: *Methane recovery in a combined amine absorption and gas steam boiler as a self-provided system for biogas upgrading*. Energy 2018, 157: 744–751.

[3] Salemdeeb R., Saint R., Clark W., Lenaghan M., Pratt K., Millar F.: *A pragmatic and industry-oriented framework for data quality assessment of environmental footprint tools*. Resources, Environment and Sustainability 2021, 3: 100019. http://dx.doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100019.
[4] Salomón M., Savola T., Kirjavainen M., Martin A.R., Fogelholm C.J.: *Distributed Combined Heat and Power Generation with Small-Scale Biomass Plants – State of the Art Review*. Second International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects, 2–4 October 2002, Stockholm, Sweden.
[5] Themelis N.J., Ulloa P.A.: *Methane generation in landfills*. Renewable Energy 2007, 32, 7: 1243–1257. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020.
[6] Zhao S., Wang W., Ge Z.: *Energy and Exergy Evaluations of a Combined Heat and Power System with a High Back-Pressure Turbine under Full Operating Conditions*. Energies 2020, 13: 4484. https://doi.org/10.3390/en13174484.
[7] Technical and operational documentation MWM Deutz, 2011.
[8] Xue Y., Ge Z., Yang L., Du X.: *Peak shaving performance of coal-fired power generating unit integrated with multi-effect distillation seawater desalination*. Applied Energy 2019, 250: 175–184. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.190.

ADAM KALWAR, Ph.D. Eng.
adam.kalwar@termika.pgnig.pl

FRANCISZEK KURDZIEL, Ph.D. Eng.
franciszek.kurdziel@termika.pgnig.pl

PGNiG TERMIKA
Energetyka Przemysłowa S.A.
ul. Rybnicka 6C
44-335 Jastrzębie-Zdrój, Poland

ROMAN FILIPEK, Ph.D. Eng.
romanf@agh.edu.pl

PAWEŁ MADEJSKI, prof.
madejski@agh.edu.pl

KRZYSZTOF PYTEL, prof.
kpytel@agh.edu.pl

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

© 2024 Authors. This is an open access publication, which can be used, distributed and reproduced in any medium according to the Creative Commons CC-BY 4.0 License.

ADAM KALWAR
ROMAN FILIPEK
PAWEŁ MADEJSKI
KRZYSZTOF PYTEL
FRANCISZEK KURDZIEL

Bilans energetyczny agregatu kogeneracyjnego zasilanego gazem kopalnianym

W artykule przedstawiono wyniki badań układu odzysku ciepła silnika gazowego pod kątem efektywnego wykorzystania energii zawartej w paliwie, co pozwoliło na określenie najbardziej wydajnego wariantu pracy silnika gazowego. Dokonano również porównania danych producenta z wynikami osiąganych parametrów eksploatacyjnych. Przeprowadzone symulacje na modelu układu pozwoliły wyznaczyć optymalny zakres obciążeń silników. Wyniki analiz wskazały również, który wariant układu odzysku ciepła z silnika jest najbardziej efektywny.

Słowa kluczowe: *silniki gazowe, gaz kopalniany, gaz koksowniczy, paliwo gazowe, kogeneracja*

1. WPROWADZENIE

Bilans energetyczny agregatów kogeneracyjnych jest ważnym elementem, na podstawie którego możliwe jest dokonanie oceny ich efektywności i opłacalności. Wyniki przeprowadzonego bilansu pozwalają określić warunki, przy których możliwe jest maksymalne wykorzystanie wytwarzanej energii oraz zminimalizowanie strat, co przekłada się na lepszą efektywność operacyjną i korzyści środowiskowe [1].

Bilans energetyczny agregatów kogeneracyjnych napędzanych silnikami gazowymi obejmuje analizę efektywności energetycznej tych systemów, uwzględniającą zarówno produkcję energii elektrycznej, jak i cieplnej [2]. Podstawowe aspekty tego bilansu dotyczą ilości energii wytwarzanej i zużywanej w systemie, ocenę efektywności jej produkcji oraz wpływ na środowisko [3].

2. INSTALACJE PRZEMYSŁOWE WYTYPOWANE DO BADAŃ

2.1. Układ kogeneracyjny zasilany gazem z odmetanowania kopalń

Jako stanowiska do badań wytypowano dwa silniki gazowe tego samego typoszeregu (TCG 2032 V16 produkcji MWM Deutz) zasilane jednakowym paliwem – gazem kopalnianym, oraz jeden silnik zasilany gazem koksowniczym (również tego samego typoszeregu). Silniki zasilane gazem kopalnianym korzystają z dwóch różnych rozwiązań układu odzysku ciepła. Silniki zasilane gazem kopalnianym są zainstalowane w Elektrociepłowni „Moszczenica" w Jastrzębiu-Zdroju. Silnik nr 1 (dalej nazywany SG-1) to silnik TCG 2032 V16 oddany do eksploatacji w grudniu 2011 roku. Jego moc elektryczna to 4,0 MW_e i 3,9 MW_t. Silnik nr 2 (dalej nazywany SG-2) to silnik CG 260 16V (nowa nazwa po zmianie właściciela firmy MWM GmbH) oddany do eksploatacji w listopadzie 2014 roku, mający moc elektryczną 4,3 MW_e i 3,9 MW_t. Różnica w mocy elektrycznej silników wynika wyłącznie z modelu zastosowanego generatora.

Oba silniki pracowały przez maksymalną liczbę godzin w połączeniu z krajowym systemem elektroenergetycznym. Energia cieplna z silników przekazywana jest do sieci ciepłowniczej jako:

- ciepła woda użytkowa (c.w.u.),
- centralne ogrzewanie (c.o.).

Podstawowym parametrem pracy jest maksymalizacja wytwarzanej energii elektrycznej [4]. Jedyną różnicą w instalacjach tych silników jest sposób odbioru ciepła. Z silnika SG-1 ciepło jest odbierane do jednego wy-

miennika ciepłowniczego i w zależności od potrzeb wymiennik wytwarza parametr stałotemperaturowy lub zmiennotemperaturowy, natomiast w przypadku instalacji silnika SG-2 zabudowano dwa wymienniki, jeden dla parametru stałotemperaturowego i drugi dla parametru zmiennotemperaturowego. Parametr stałotemperaturowy to inaczej c.w.u., a parametr zmiennotemperaturowy to c.o.

2.2. Układ kogeneracyjny zasilany gazem koksowniczym

Silnik zasilany gazem koksowniczym, oddany do eksploatacji w 2013 roku, zainstalowany jest na terenie Koksowni Częstochowa Nowa Sp. z o.o. – GRUPA ZARMEN. Jest to również silnik TCG 2032 V16, jednak jego moc elektryczna jest zmniejszona do 2,9 MW_e i 3,4 MW_t.

Silnik ten w zamyśle miał być obsługiwany z Elektrociepłowni „Pniówek" w Pawłowicach. Pomysł ten nie doszedł do skutku ze względu na trudności eksploatacyjne silnika, częste odstawienia i awaryjność. Silnik produkował energię elektryczną w połączeniu z całorocznym wytwarzaniem pary technologicznej dla Koksowni „Nowa", jego układ odzysku ciepła został sprzężony z wytwornicą pary technologicznej.

Silnik wyłączono z eksploatacji w 2022 roku, po przepracowaniu blisko 56 724 rbg., ze względu na wypowiedzenie umowy na zakup energii elektrycznej i energii cieplnej w parze technologicznej przez właścicieli Koksowni „Nowa".

3. BILANS ENERGETYCZNY

Bilans energetyczny agregatu zasilanego gazem kopalnianym stanowi ważne narzędzie diagnostyczne służące do analizy i kontrolowania procesu produkcji energii, a także odgrywa istotną rolę w określeniu warunków pracy, w których efektywność operacyjna agregatu kogeneracyjnego jest największa [5]. Ma on duże znaczenie dla monitorowania, optymalizacji oraz zarządzania systemem przekształcającym energię chemiczną zawartą w gazie kopalnianym na energię elektryczną i cieplną. Wyniki bilansu energetycznego agregatu kogeneracyjnego przedstawiono w podrozdziale 5 w tabelach 3–5. Tego rodzaju analiza jest istotna w kontekście poprawy efektywności energetycznej, osiągania znaczących oszczędności w zużyciu energii oraz zachowania zgodności z wymogami regulującymi produkcję energii. W tabeli 1 przedstawiono deklarowane parametry silników zasilanych gazem kopalnianym.

Tabela 1

Dane techniczne silnika typoszeregu TCG 2032 [1]

Moc elektryczna	4000/4300* kW_e
Ciepło z chłodzenia silnika	1436 kW
Ciepło z chłodzenia mieszanki	367 kW
Ciepło ze spalin	2435 kW
Ciepło z chłodnicy oleju	483 kW
Moc wejściowa silnika w paliwie	9946 kW
Sprawność elektryczna	43,2%
Sprawność termiczna	43,8%
Sprawność całkowita	87,0%

* Moc 4000 kW dotyczy silnika z generatorem Van Dyke, natomiast 4300 kW – silnika z generatorem Magnetti Marelli

4. DANE WEJŚCIOWE

Analiza numeryczna danych wejściowych agregatów została wykonana w środowisku Ebsilon [6]. Jej celem było uzyskanie odpowiedzi na pytanie, jak wygląda rozkład obciążeń cieplnych instalacji odzysku ciepła w różnych obciążeniach, jak zmienia się sprawność instalacji w zależności od jej obciążenia, docelowo informacje te przekazane zostały do służb eksploatujących silniki zasilane gazem kopalnianym.

Na potrzeby analizy przyjęto wymienione w kolejnych akapitach założenia [7] oraz następujące parametry silnika gazowego:

- moc generatora: 4,3/4,0/3,0 MW_e (zależy od rodzaju paliwa),
- jednostkowe zużycie ciepła: 8225,6 kJ/kWh,
- sprawność elektryczna: 43,77%,
- strumień spalin: 6,34 kg/s,
- temperatura wylotowa spalin: 453°C,
- stopień otwarcia klapy spalin [%] – informujący o przepływie spalin przez kocioł odzysknicowy,
- temperatury na zasilaniu c.o., c.w.u.,
- przepływ c.o., c.w.u.,
- temperatura wody na powrocie.

Skład gazu kopalnianego

Skład gazu kopalnianego jest badany na bieżąco przez chromatograf, a wyniki analizy danych są dostępne w systemie SCADA, dzięki temu jest możliwe wykonanie analiz w dowolnym momencie z dowolnego okresu pracy instalacji. Przedstawione poniżej wyniki analizy gazu są wartościami uśrednionymi z lat

2017–2019. Próbkowanie danych co godzinę z wartościami uśrednianymi godzinowo:

- 33,46% N_2,
- 6,73% O_2,
- 3,91% CO_2,
- 55,69% CH_4,
- 0,02% C_2H_6,
- 0,01% C_3H_8.

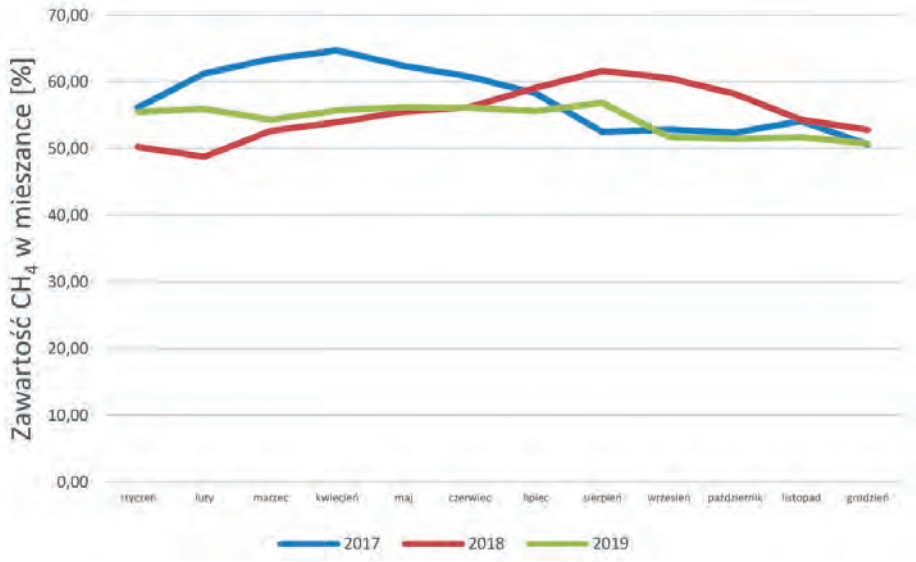
Analizując dane z tabeli 2 oraz wykres z rysunku 1, można zauważyć, że w 2017 roku zawartość czystego CH_4 w mieszance zawierała się w zakresie od 64,7% do 50,6%, natomiast w 2018 roku zawartość czystego CH_4 zmieniała się w zakresie od 56,8% do 50,8%. Dużą stabilizację w składzie mieszanki gazowej powoduje korzystanie z ujęcia gazu z nieczynnych wyrobisk kopalnianych byłej kopalni Jas-Mos.

Przytoczone powyżej dane wejściowe zostały zaimplementowane do modelu silnika gazowego wraz z układem odzysku ciepła w środowisku Ebsilon, zaimplementowane dane pozwoliły na przeprowadzenie analiz, których wyniki pokazują rozkład obciążenia termicznego elementów układu odzysku ciepła oraz wartości przepływu w poszczególnych punktach układu, przyporządkowane do wartości obciążenia silnika w zakresie od 50% do 100% z krokiem co 10%.

Tabela 2

Procentowa zawartość [%] czystego CH_4 w mieszance [2]

Miesiąc	2017	2018	2019
Styczeń	56,13	50,24	55,50
Luty	61,24	48,75	55,96
Marzec	63,41	52,67	54,31
Kwiecień	64,70	53,97	55,70
Maj	62,39	55,48	56,20
Czerwiec	60,77	56,23	56,12
Lipiec	58,26	59,12	55,63
Sierpień	52,47	61,66	56,85
Wrzesień	52,88	60,58	51,72
Październik	52,37	58,22	51,48
Listopad	54,10	54,34	51,66
Grudzień	50,60	52,81	50,79
Średnia roczna	**57,44**	**55,34**	**54,33**



Rys. 1. Zawartość procentowa czystego CH_4 w mieszance [2]

Skład gazu koksowniczego

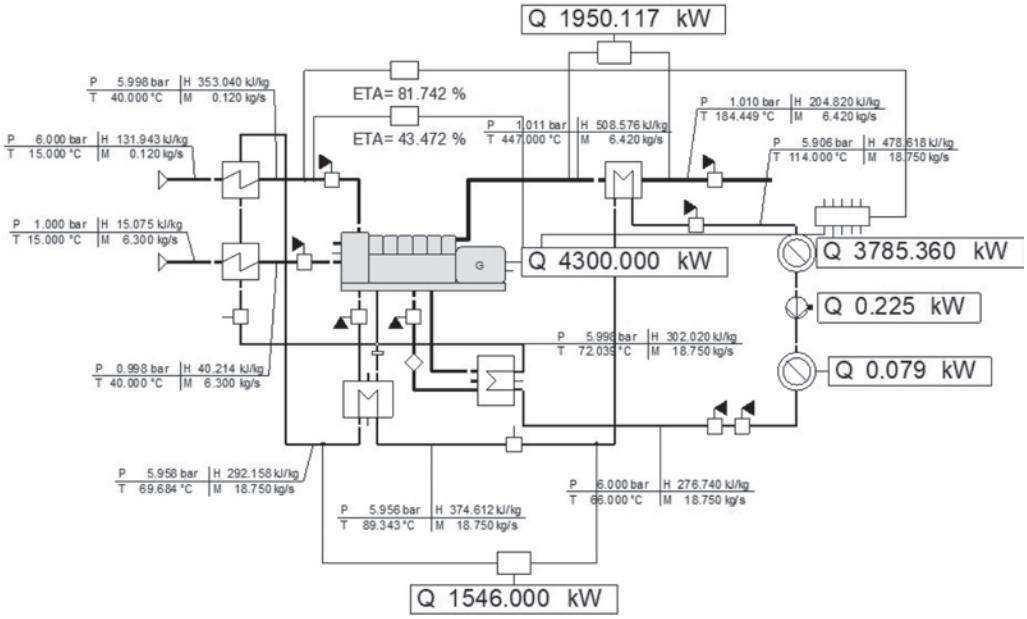
Skład gazu koksowniczego nie jest badany w sposób ciągły. Zaprezentowane poniżej wyniki są uśrednione z analiz wykonywanych przez 8 dni w grudniu 2014 roku i 8 dni stycznia 2015 roku:

- 4,2% N_2,
- 1,0% O_2,
- 3,5% CO_2,
- 7,6% CO,
- 24,2% CH_4,
- 3,0% C_2H_6,
- 56,5% H_2.

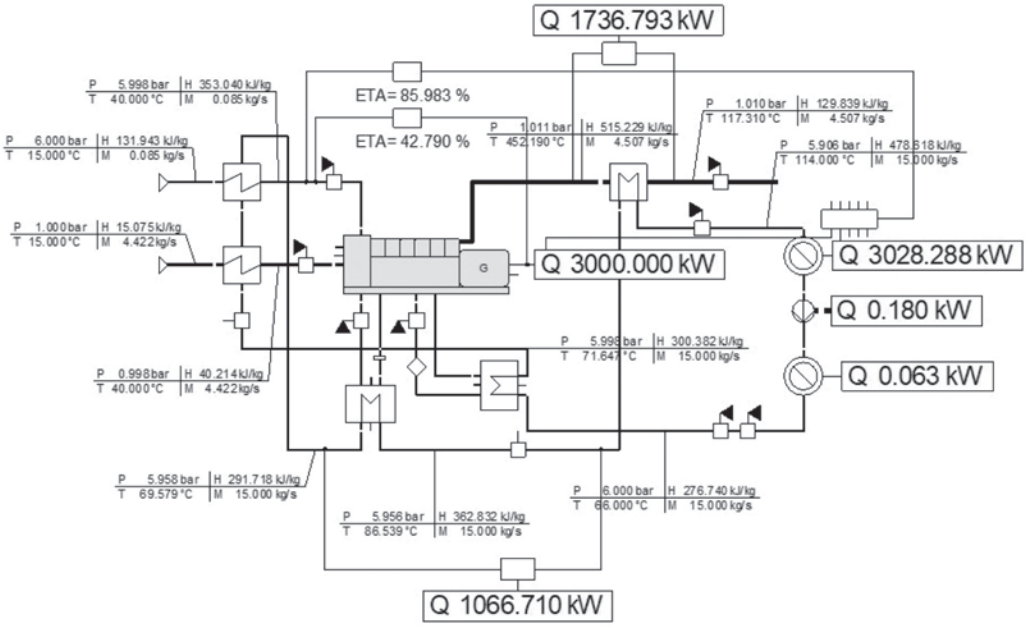
Brak ciągłego monitoringu czy też cyklicznych analiz składu gazu nie pozwala na jakiekolwiek wnioskowanie dotyczące zmian składu gazu oraz jego wpływu na eksploatację silnika zasilanego tym paliwem.

5. MODEL OBLICZENIOWY SILNIKA

Modele silników zaimplementowanych do środowiska Ebsilon przedstawiają różne warianty zarówno ze względu na rozwiązanie układu odzysku ciepła, jak i zastosowanego paliwa: rysunek 2 dotyczy silnika zasilanego gazem kopalnianym z dwoma wymiennikami ciepłowniczymi; rysunek 3 – silnika zasilanego gazem koksowniczym z wytwornicą pary.



Rys. 2. Model silnika CG 260 16V [3]



Rys. 3. Model silnika TCG 2032 V16 dla gazu koksowniczego [3]

Tabela 3

Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła CG-260 16V [2]

Parametr	Obciążenie silnika					
	100	**90**	**80**	**70**	**60**	**50**
Moc elektryczna [kW]	4300	3870	3440	3010	2580	2150
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1546,0	1388,4	1230,8	1081,8	941,4	801,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1932,6	1819,5	1691,6	1559,1	1420,8	1266,5
Moc cieplna [kW]	3785,4	3498,9	3197,8	2905,1	2619,9	2318,6
Temperatura spalin [°C]	179,0	179,0	179,0	179,0	179,0	179,0
Przepływ spalin [kg/s]	6,420	5,808	5,196	4,601	4,024	3,447
Zużycie gazu [kg/s]	0,352	0,321	0,289	0,258	0,227	0,197
Przepływ powietrza [kg/s]	6,068	5,487	4,907	4,343	3,797	3,250
Sprawność elektryczna [%]	43,550	43,490	42,433	41,610	40,496	39,033
Sprawność całkowita [%]	81,890	81,971	81,879	81,769	81,617	81,126

Dla służb eksploatujących silniki gazowe najważniejszym wskaźnikiem jakości paliwa gazowego jest zawartość czystego CH_4 w mieszance. Silnik może pracować nawet przy zawartości poniżej 40% CH_4 w mieszance, jednak jego uruchomienie jest możliwe wyłącznie przy stężeniu CH_4 powyżej 40%, dlatego tak ważne jest przewietrzenie instalacji gazowej za pomocą kotła gazowego – rozwiązanie takie pozwala w sposób sprawny i skuteczny usunąć z odcinka sieci (około 5 km) gaz o zbyt niskiej zawartości czystego CH_4. Przeprowadzenie tego procesu bez użycia do tego kotła wodnego wiązałoby się z długotrwałym wypuszczaniem gazu do atmosfery przez wydmuszki technologiczne zabudowane na instalacji gazowej silników gazowych.

Dla badań silników zasilanych gazem kopalnianym wykorzystywano pomiary w punktach wtłaczania gazu do sieci oraz w punktach wprowadzania gazu do instalacji gazowej silników gazowych.

Porównując wykresy na rysunkach 4 i 5, można zaobserwować, że silniki te pracują z największą efektywnością przy obciążeniu na poziomie 90%, osiągając sprawność całkowitą na poziomie 82% dla silnika CG 260 16V i 85% dla silnika TCG 2032 V16.

Silnik zasilany gazem koksowniczym (rys. 6) osiąga również największą sprawność przy obciążeniu 100%, wynoszącą prawie 86%.

Tabela 4

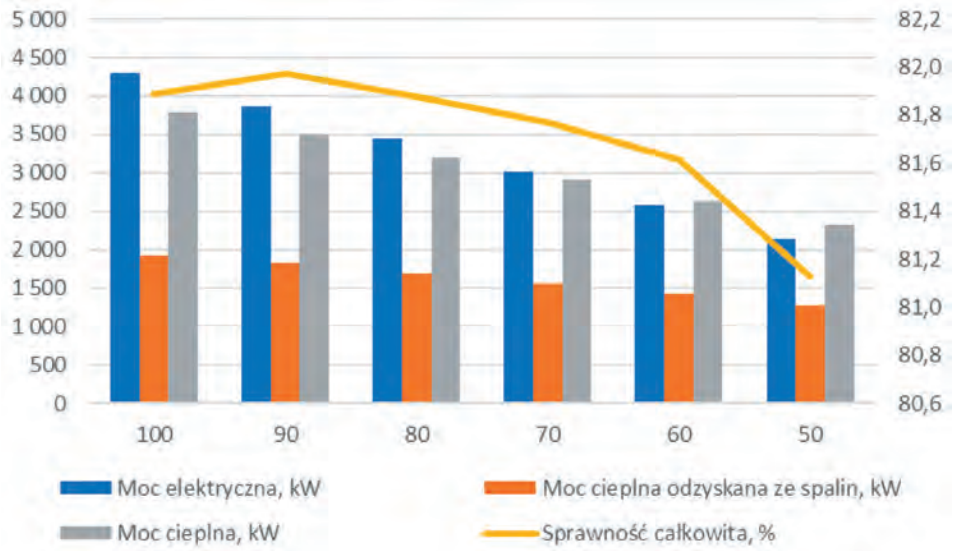
Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła TCG 2032 V16 [2]

Parametr	Obciążenie silnika					
	100	**90**	**80**	**70**	**60**	**50**
Moc elektryczna [kW]	4000	3600	3200	2800	2400	2000
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1546,0	1388,4	1230,8	1081,8	941,4	801,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1951,7	1836,2	1706,3	1571,7	1431,5	1275,4
Moc cieplna [kW]	3804,9	3516,1	3212,8	2918,1	2630,9	2327,7
Temperatura spalin [°C]	175,0	175,0	175,0	175,0	175,0	175,0
Przepływ spalin [kg/s]	6,420	5,808	5,196	4,601	4,024	3,447
Zużycie gazu [kg/s]	0,328	0,298	0,269	0,240	0,212	0,183
Przepływ powietrza [kg/s]	6,092	5,510	4,927	4,361	3,812	3,264
Sprawność elektryczna [%]	43,555	43,490	42,433	41,610	40,496	39,033
Sprawność całkowita [%]	84,985	85,095	85,037	84,974	84,887	84,461

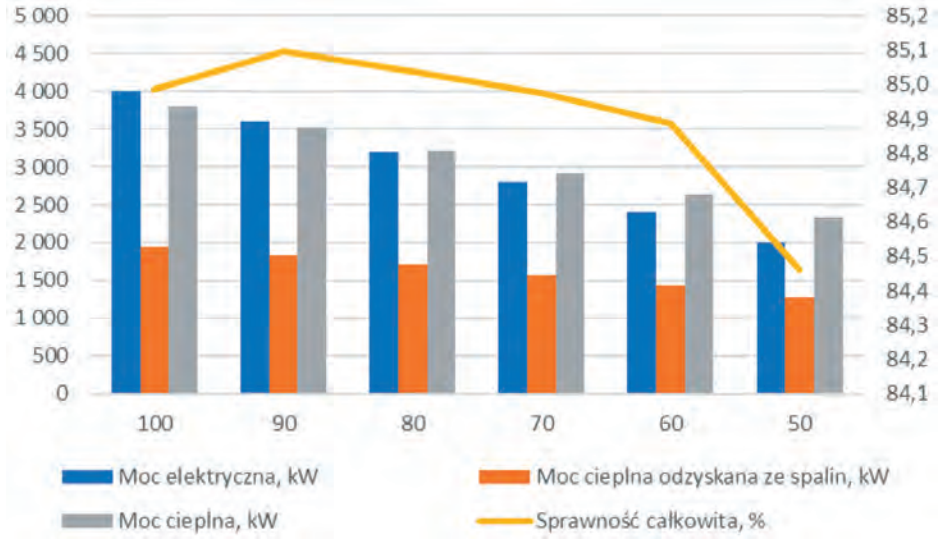
Tabela 5

Charakterystyka obciążenia silnika i układu odzysku ciepła TCG 2032 V16 dla gazu koksowniczego [2]

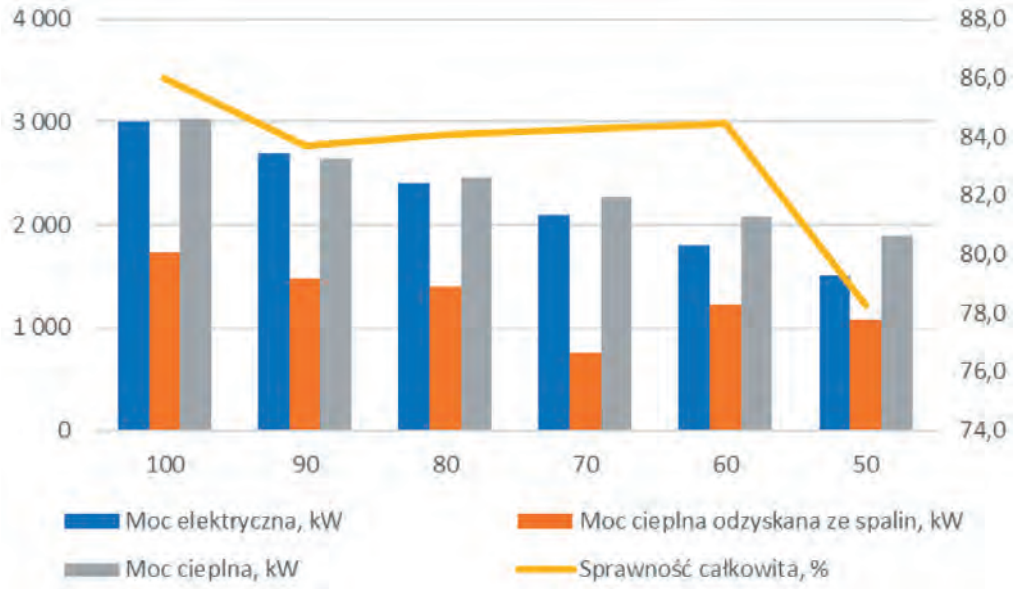
Parametr	Obciążenie silnika					
	100	**90**	**80**	**70**	**60**	**50**
Moc elektryczna [kW]	3000	2700	2400	2100	1800	1500
Moc cieplna odzyskana z układu chłodzenia [kW]	1066,7	956,5	850,9	1313,2	657,9	615,0
Moc cieplna odzyskana ze spalin [kW]	1736,8	1480,1	1404,6	754,4	1221,8	1076,1
Moc cieplna [kW]	3028,3	2649,8	2460,48	2271,2	2081,9	1892,7
Temperatura spalin [°C	117,3	148,7	141,5	136,2	126,6	155,1
Przepływ spalin [kg/s]	4,507	4,082	3,668	3,277	2,886	2,711
Zużycie gazu [kg/s]	0,085	0,078	0,070	0,063	0,056	0,053
Przepływ powietrza [kg/s]	4,422	4,004	3,598	3,214	2,830	2,659
Sprawność elektryczna [%]	42,790	42,245	41,517	40,471	39,156	34,614
Sprawność całkowita [%]	85,983	83,704	84,080	84,242	84,446	78,289



Rys. 4. Zmiana mocy silnika (CG 260 16V) i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz kopalniany



Rys. 5. Zmiana mocy silnika (TCG 2032 V16) i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz kopalniany



Rys. 6. Zmiana mocy silnika i sprawności całkowitej wraz ze zmianą obciążenia – gaz koksowniczy

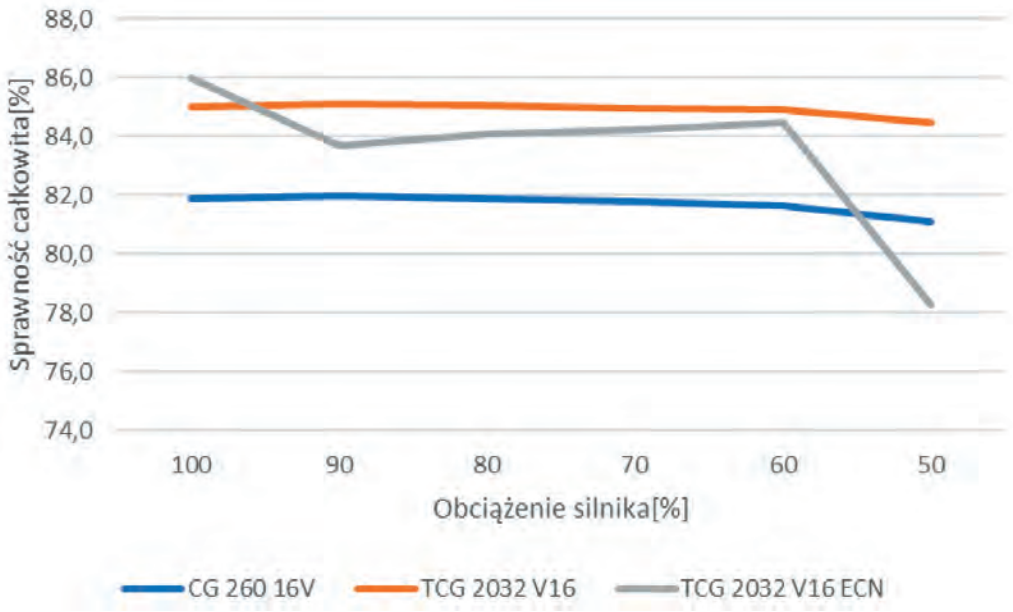
6. WYNIKI

Sprawność silnika TCG 2032 V16 w tym zakresie rośnie od 84,9 do 85,1%, zaś w przypadku silnika CG 260 16V – od 82,0% do 82,2%. Z kolei zakres zmian sprawności silnika zasilanego gazem koksowniczym wynosi od 84,45% do 86%.

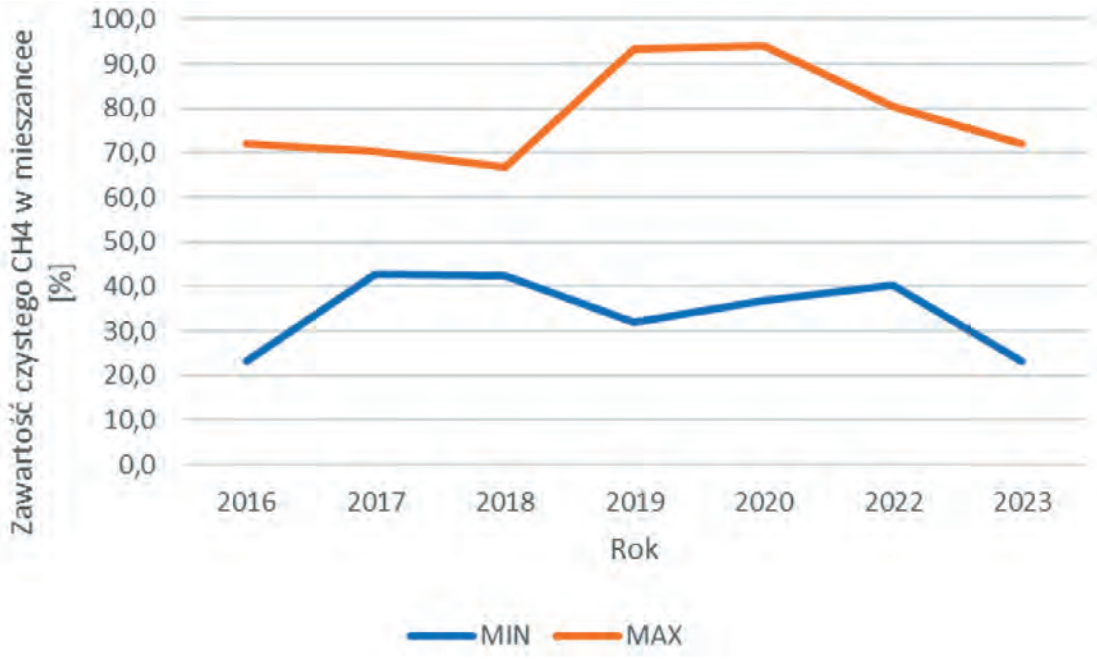
W przypadku wszystkich badanych silników potwierdza się, że efektywny zakres ich pracy mieści się w przedziale od 60% do 100%, co pokrywa się z zakresem obciążeń zalecanych przez producenta silnika, a zmiany sprawności wahają się od 0,2% do 1,15%. Wszystkie te wartości zostały zobrazowane na rysunku 7.

W celach porównawczych zestawiono również dane dotyczące zawartości czystego CH_4 w mieszance w latach 2016–2023 (rys. 8), wykres pozwala zaobserwować wzrost zmienności koncentracji w latach 2019–2023.

Na zmienność koncentracji ma wpływ bardzo wiele czynników, dlatego aby dokładnie przybliżyć powody zmian koncentracji czystego CH_4, należałoby zestawić wyniki w punkcie poboru z wynikami analiz składu gazu w punkcie podaży gazu do sieci. Aby zrozumieć przyczyny wahań stężenia czystego CH_4, konieczne jest porównanie wyników w punkcie poboru z analizami składu gazu w punkcie zasilania sieci.



Rys. 7. Porównanie sprawności całkowitej silników



Rys. 8. Zmiana koncentracji czystego CH_4 w mieszance

7. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone symulacje pozwoliły przeanalizować zmianę mocy cieplnej agregatu kogeneracyjnego w zależności od obciążenia silnika. Wykonano je dla trzech następujących układów:

- silnik zasilany gazem kopalnianym przekazującym ciepło do jednego wymiennika ciepłowniczego,
- silnik zasilany gazem kopalnianym przekazującym ciepło do dwóch wymienników ciepłowniczych,
- silnik zasilany gazem koksowniczym przekazujący ciepło do wytwornicy pary.

Silniki gazowe ze względów technologicznych mogą pracować w zakresie 65–100% obciążenia w sposób trwały, natomiast okresowo zakres ich pracy może wynosić od 50% do 65% przy zachowaniu warunków określonych przez producenta w dokumentacji techniczno-ruchowej.

Ciekawym wnioskiem wynikającym z przeprowadzonej analizy jest wyższa sprawność silnika z jednym wymiennikiem ciepłowniczym o większej mocy niż z dwoma, tym bardziej że według osób eksploatujących silniki lepszy wydaje się układ z dwoma wymiennikami.

Kolejnym interesującym aspektem jest punkt pracy silnika, w którym osiągana jest największa sprawność całkowita. Analizy wskazały, przy jakim obciążeniu silnika osiągana jest maksymalna sprawność całkowita. Wyniki potwierdziły, jak duże znaczenie ma precyzyjne obciążenie silnika dla optymalizacji jego efektywności. Symulacja była oparta na rzeczywistych wartościach składu gazu zasilającego oraz danych technicznych dostarczonych przez producenta, co zwiększa wiarygodność uzyskanych wyników. Przeprowadzone symulacje przyniosły dodatkowe informacje dotyczące układów pracy silników. Zaprezentowane wyniki uzyskano na podstawie realnych wartości składu gazu zasilającego oraz danych zawartych w kartach informacyjnych silników przekazanych przez producenta [8].

Kolejnym etapem analiz jest wykonanie symulacji z uwzględnieniem realnych parametrów pracy układu odzysku ciepła oraz parametrów pracy silników zasilanych gazem z odmetanowania kopalń. W przypadku silnika zasilanego gazem koksowniczym eksploatacja została zakończona.

Literatura

[1] Ciuła J., Kowalski S., Generowicz A., Barbusiński K., Matuszak Z., Gaska K.: *Analysis of Energy Generation Efficiency and Reliability of a Cogeneration Unit Powered by Biogas*. Energies 2023, 16, 2180. https://doi.org/10.3390/en16052180.

[2] Gong H., Chen Z., Yu H., Wu W., Wang W., Pang H., Du M.N.: *Methane recovery in a combined amine absorption and gas steam boiler as a self-provided system for biogas upgrading*. Energy 2018, 157: 744–751.

[3] Salemdeeb R., Saint R., Clark W., Lenaghan M., Pratt K., Millar F.: *A pragmatic and industry-oriented framework for data quality assessment of environmental footprint tools*. Resources, Environment and Sustainability 2021, 3: 100019. http://dx.doi.org/10.1016/j.resenv.2021.100019.
[4] Salomón M., Savola T., Kirjavainen M., Martin A.R., Fogelholm C.J.: *Distributed Combined Heat and Power Generation with Small-Scale Biomass Plants – State of the Art Review*. Second International Symposium on Distributed Generation: Power System and Market Aspects, 2–4 October 2002, Stockholm, Sweden.
[5] Themelis N.J., Ulloa P.A.: *Methane generation in landfills*. Renewable Energy 2007, 32, 7: 1243–1257. https://doi.org/10.1016/j.renene.2006.04.020.
[6] Zhao S., Wang W., Ge Z.: *Energy and Exergy Evaluations of a Combined Heat and Power System with a High Back-Pressure Turbine under Full Operating Conditions*. Energies 2020, 13: 4484. https://doi.org/10.3390/en13174484.
[7] Dokumentacja techniczno-ruchowa MWM Deutz z 2011 roku.
[8] Xue Y., Ge Z., Yang L., Du X.: *Peak shaving performance of coal-fired power generating unit integrated with multi-effect distillation seawater desalination*. Applied Energy 2019, 250: 175–184. https://doi.org/10.1016/j.apenergy.2019.04.190.

dr inż. ADAM KALWAR
adam.kalwar@termika.pgnig.pl

dr inż. FRANCISZEK KURDZIEL
franciszek.kurdziel@termika.pgnig.pl

PGNiG TERMIKA
Energetyka Przemysłowa S.A.
ul. Rybnicka 6C
44-335 Jastrzębie-Zdrój

dr inż. ROMAN FILIPEK
romanf@agh.edu.pl

dr hab. inż. PAWEŁ MADEJSKI
madejski@agh.edu.pl

dr hab. inż. KRZYSZTOF PYTEL
kpytel@agh.edu.pl

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

© 2024 Autorzy. Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons CC-BY 4.0.

https://doi.org/10.7494/miag.2024.1.557.25

TOMASZ KRAKOWSKI

The magnetic testing of steel ropes in hard-to-access places

The increasing requirements for safety, reliability and quality mean that the testing of steel ropes has become an inseparable element in their production and operation stages. The basic method used in testing has become the magnetic testing method of steel ropes (MTR). Despite the extensively developed knowledge, equipment, and methods of analysing diagnostic signals, difficult to access places and the ends of steel ropes are not fully covered by diagnostics. Visual inspection, which is one of the basic methods of non-destructive testing in this area of ropes, has many limitations. This area of magnetic defectoscopy is a place where new solutions and structures for testing steel ropes are created. The article presents an example of solutions used for diagnostics in places with difficult access. A new concept of a diagnostic system for magnetic testing of ropes in these sections is described. The results of initial laboratory verification measurements of the new solution are also presented.

Key words: *steel ropes, diagnostics, magnetic testing of steel ropes*

1. INTRODUCTION

The method of magnetic testing of steel ropes is a non-destructive method. It consists in detecting defects and damage to steel ropes, which are previously magnetized with a constant magnetic field. In the case of a defect around the tested ferromagnet, magnetized with a constant magnetic field, a disturbance of the magnetic field force lines appears. The size of the disturbance, also occurring in the space surrounding the object, can be interpreted and analysed as an external magnetic field anomaly. This disturbance is usually related to the size and location of the defect. The basic set of measuring equipment consists of two units: a measuring head unit and a recorder unit or another device processing the diagnostic signal. The result of the measurement is a defectogram with recorded results, which requires further development [1, 2]. Magnetic testing consists in magnetizing the rope along its axis with a constant magnetic field (using a magnetic head), observing and recording phenomena that occur during the magnetization of the rope (sensor), interpreting and calculating the degree of rope wear based on the received signals. The main elements of the magnetic head are the magnetic circuit, which is defined as a closed path of the magnetic induction flux, which is a part of the magnetic field with a higher energy density per unit compared to the surrounding parts, and sensors that are placed in the symmetry plane of the head [2]. The magnetic circuit consists of (Fig. 1): the tested element (steel rope), pole pieces (ensure better penetration of the magnetic flux into the rope), permanent magnets (source of the magnetic field, their magnetic energy determines: detectability of defects, dimensions and weight of the head, magnets made of Ne-Fe-B, Al-Ni-Co, Sm-Co alloys or sinters are used), magnetic jumper (closes the magnetic circuit).

Two types of sensors are currently used in magnetic wire rope defectoscopy. The first is an inductive sensor, which is used to detect discontinuities of a step nature (broken wires, missing wire, excess) whilst the second type is the Hall sensor, which enables the detection of so-called continuous damage, abrasions, corrosion, etc., and quasi-continuous damage such as dense wire cracks along the length of the

rope, corrosion pits, and the loosening of strands. The measuring equipment currently employed uses sensors that record the change in the radial component of the value of the magnetic leakage flux above the tested element. The magnetic heads available on the market are excellent for testing long sections of wire ropes. However, their design has one basic limitation, namely the difficulty of testing in places with limited access, such as testing ropes with mounted clamps, at their ends, etc. This limitation results directly from the construction of the testing equipment and the fact that the sensor assembly is placed in the middle of its magnetic circuit. Such a design of the magnetic circuit and the sensor placed in its central part will always result in a certain untested section of the rope (Fig. 2).

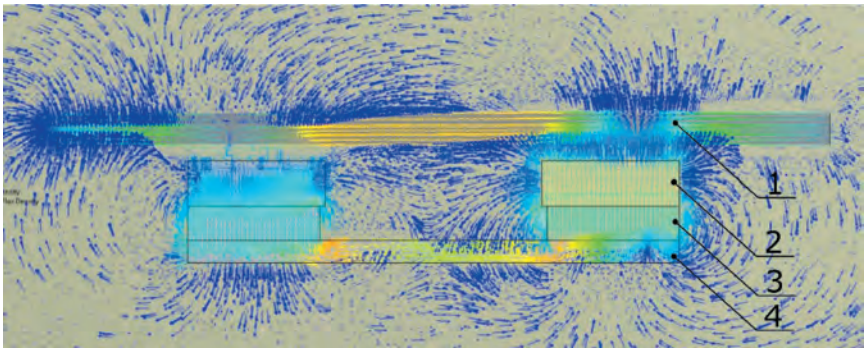


Fig. 1. Magnetic core and magnetic flux density distribution of the head:
1 – tested rope, 2 – pole piece, 3 – permanent magnet, 4 – magnetic jumper

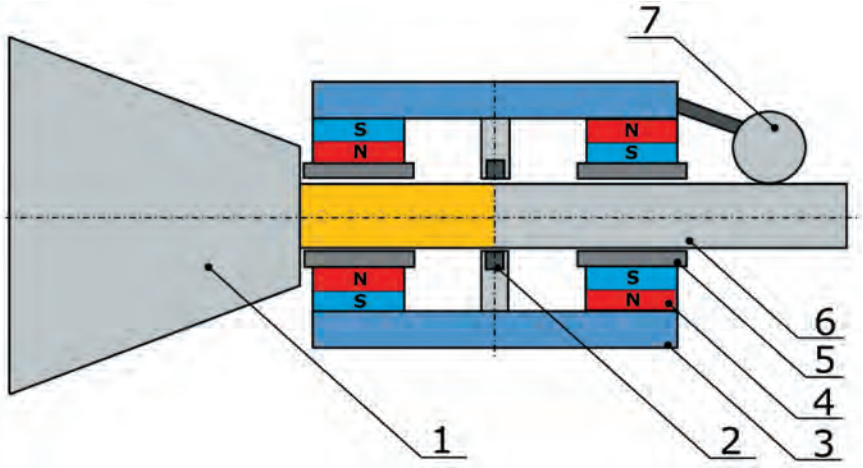


Fig. 2. Schematic diagram magnetic head, the untested area of the rope is marked yellow:
1 – tapered socket, 2 – magnetic sensor, 3 – magnetic jumper, 4 – permanent magnet, 5 – pole piece,
6 – tested rope, 7 – travel sensor

2. MEASUREMENT HEADS FOR LOCAL TESTING OF STEEL ROPES

The creators of the magnetic method, Mieczysław Jeżewski, Ludger Szklarski and Zygmunt Kawecki, were all professors of the AGH University of Krakow. They began their research in 1946 by creating the theoretical foundations of the method and making the first attempts to build measuring equipment. Previously, attempts to detect internal damage to ropes without unravelling them had been conducted in the 1920s in the USA by R. Sanford and in the 1930s by A. Otto and F. Wever, but the measurement results did not match the actual state. The research at AGH began by proving the thesis that damage inside the rope causes changes in the magnetic field. The results of laboratory tests were verified on real objects and, in 1962, the world's first magnetic defectograph for testing ropes, rods and steel pipes was patented. In 1963, the creators patented a new solution for a measuring sensor that allows the determination of the distance of damage from the axis of the tested rope [3]. Over the following years, the magnetic testing method was developed in the scope of its appli-

cation in testing steel ropes as well as other elements such as conveyor belts with steel cords [4], belts reinforced with steel cords [5], steel-polyurethane load-carrying belts [6], passenger lift guiding systems [7]. The development of the magnetic method in the area of diagnostics of steel ropes in hard-to-reach places has been carried out for many years. The output of this activity has been numerous concepts, some of which were filed as patents or utility models [8–11] and described in publications [12–16]. In most cases, they are based on a solution in which in the area of a stationary magnetic circuit magnetizing the rope longitudinally, the magnetic sensor moves circumferentially or longitudinally in relation to the tested hard-to-reach part of the rope. Selected examples of such solutions are presented below. The first example of such equipment is the magnetic head shown in Figure 3. According to the patent description [8], it consists of pole pieces placed both on the rope and its end, permanent magnets placed directly on the pole pieces, and magnetic jumper closing the magnetic circuit. The invention [9] shown in Figure 3 allows for diagnostics of a selected cross-section of the rope (12) in any of its fragments, including at their ends, for example at the tapered socket. The device consists of a two-part body, which is the place of attachment of the magnetic circuit elements: pole pieces (7), permanent magnets (4), shaped inserts adapted to the diameter of the rope (7) and the tapered socket (13) and the magnetic jumper (6). The magnetic circuit is closed by the tested rope and magnetizes the rope along its length. The sensor (12) moves circumferentially using the drive unit (8). The movement of the measuring sensor system and its drive is also possible between the pole pieces (12), which allows for testing another cross-section of the rope [9].

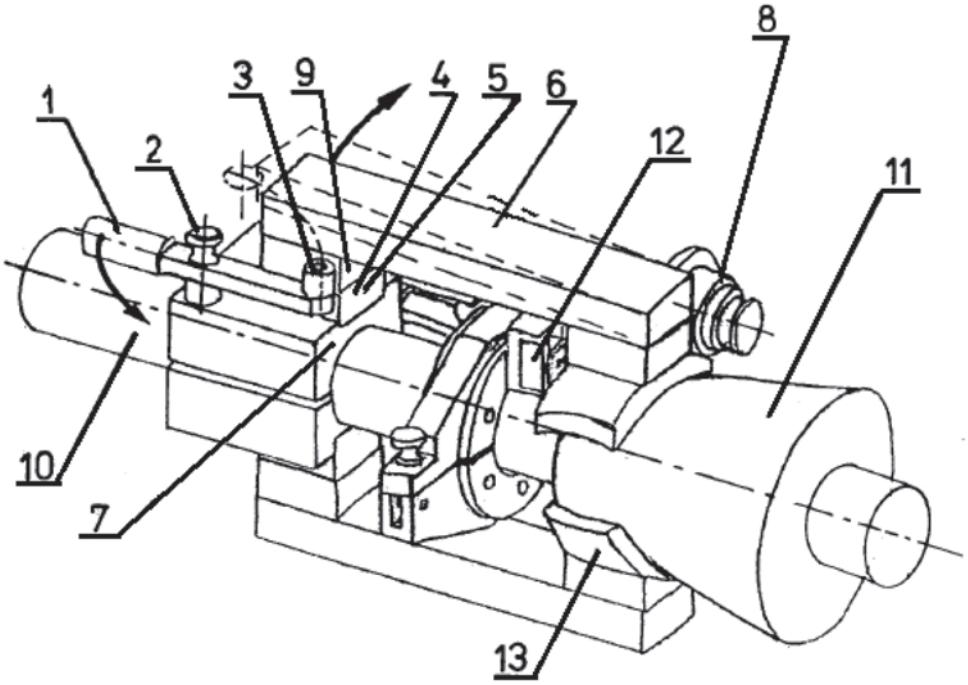


Fig. 3. Device for local testing of steel ropes [9]

Another concept, according to the utility model [10], assumes that the device (Fig. 4) is composed of appropriately polarized magnetizing units placed on the rope (A) and the tapered socket (B). The magnetizing units are composed of permanent magnets (6) and pole pieces (3, 7) whose shape and dimensions are adapted to the elements on which they are mounted. The pole piece is mounted on the rope using an insert (4), while pole piece 7 is made of a deformable material. Unlike the solution [8], the magnetic circuit does not have a jumper and the magnetizing units are mounted on the rope and its end thanks to the force of attraction of the magnets. This circuit is independent of the sensor system and is placed on the rope and its end in a stationary manner. The registration of the magnetic field around the rope, which is magnetized longitudinally, is carried out using the sensor unit. The system is located between the magnets and has the possibility of adjusting the sensor distance both along the rope axis and the distance from the rope. The measurement is carried out by moving the sensor around the rope [10].

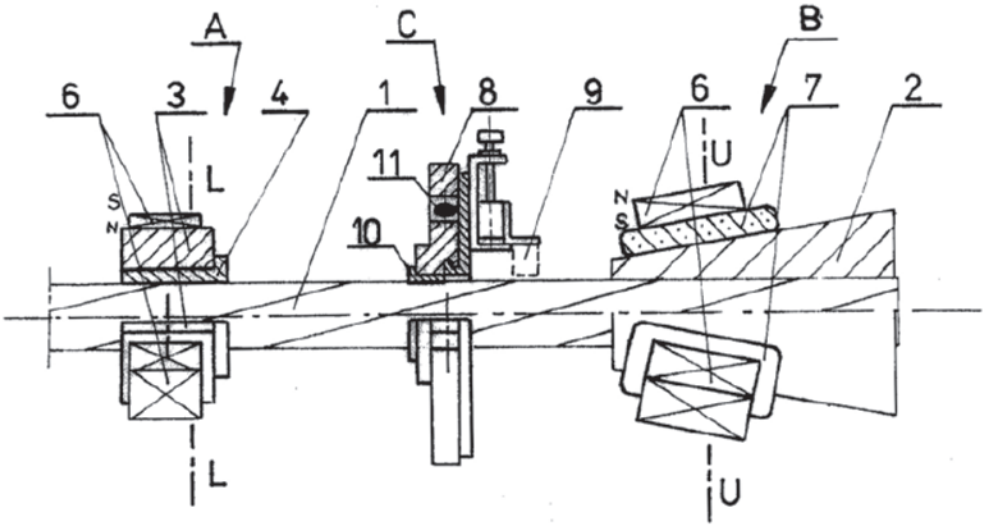


Fig. 4. Set for magnetic testing of steel ropes around the tapered socket [10]

Another solution (Fig. 5) consists of a two-part clamp (1) on which a mechanism is installed that allows the changing of the position of the magnetic circuit along and around the tested rope. As in the previously described solutions, the magnetic circuit magnetizes the tested steel rope longitudinally and consists of at least one magnet (12), a jumper (11) and pole pieces (13, 14), between which a measuring sensor (15) is located. The measurement is performed in a magnetic circuit with constant parameters, with a constant position of the measuring sensor relative to the pole pieces. The measurement signal is recorded as both a function of length and central angle, which allows a spatial image of the damage distribution to be obtained [11].

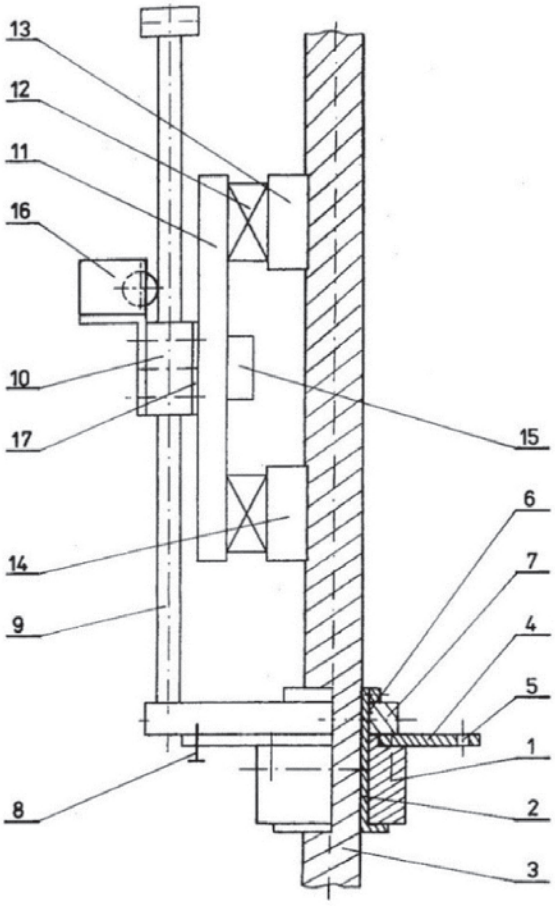


Fig. 5. Machine for testing stationary steel ropes over short lengths [11]

Analysis of the structure of solutions [8–11] and results described in publications [12–17] showed that in laboratory conditions it is possible to use the magnetic method for testing steel ropes in places with difficult access and at their ends. However, the discussed solutions are not free from operational and metrological imperfections. High cohesive forces from permanent magnets are a significant obstacle to the assembly and disassembly of the magnetic circuit. In places with limited access, the assembly and movement of the discussed devices, with large dimensions of the magnetic circuit, may lead to difficulties or even the impossibility of their use. In turn, the use of a system without a jumper, which is characterized by a smaller mass, much simpler structure and method of assembly, requires the use of a larger number of magnets or magnets with higher magnetic energy, which also causes operational problems. The basic metrological problem concerns the asymmetry of the magnetic field distribution in the areas of the rope distant from the source of the magnetic field, in particular in the solution [8, 9]. This is related to the fixed location of the magnetic circuit in relation to which the sensor registering the change in the magnetic leakage field moves. The lack of uniform magnetic field distribution affects the diagnostic properties of the solutions and the measurement accuracy obtained.

This problem has been significantly improved in a system without a magnetic jumper [10], with an increased number of magnets on the circumference of the tested rope. However, this solution is associated with the problem of ensuring a sufficiently high value of magnetic induction enabling the detection of defects in the tendons, thus the value of the useful signal is lower than in the case of traditional heads [12].

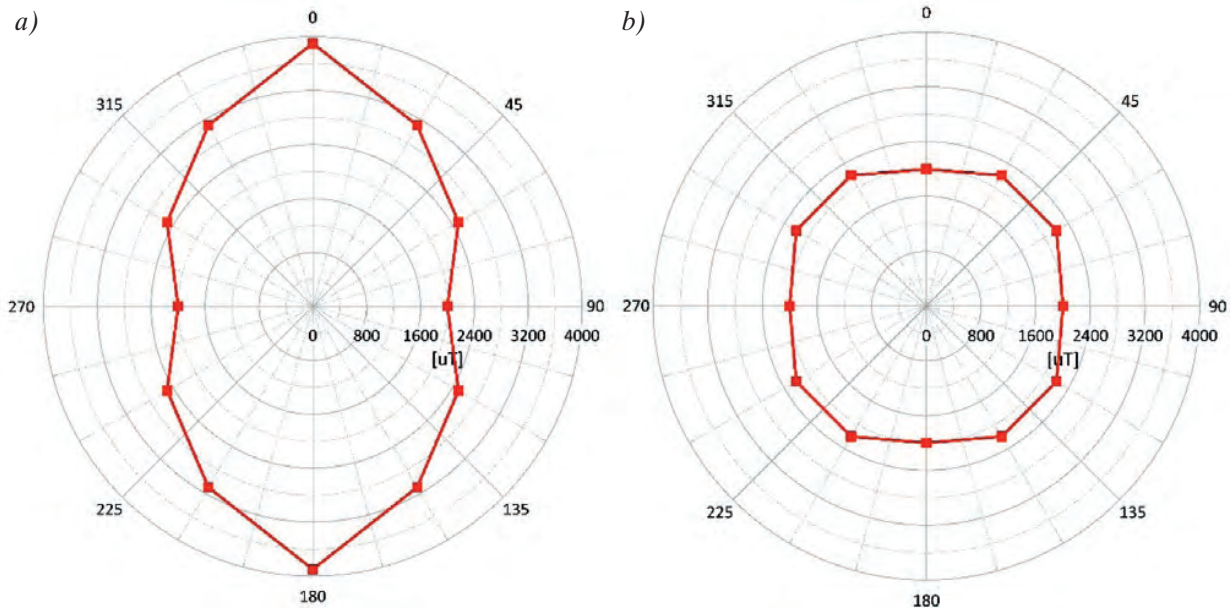


Fig. 6. Distribution of the magnetic field for magnetic heads in the plane normal to the axis of the rope with a diameter of 34 mm at a distance of 20 mm from the frontal plane of tapered socket: a) a system with a magnetic jumper according to the patent [8]; b) a system without a jumper according to the application [10, 12]

3. DIAGNOSTIC SYSTEM CONCEPT

The analysis of various concepts of systems for magnetic testing of ropes in hard-to-reach places contributed to the establishment of design, functional and metrological assumptions, as a result of which a new concept of a diagnostic system was developed. In contrast to the previously described solutions, it was assumed that the magnetic circuit magnetizing the rope longitudinally or transversely moves with the sensor around the tested rope. This concept is presented in Figure 7. When designing the new solution, the thesis was put forward that the use of such a solution means that in the absence of defects or changes in geometry, the magnetic field in the recording area remains at a similar level because the sensor is located in the same place of the moving magnetic circuit. It moves with the magnetic circuit and not in relation to it. The use of such a solution, in the absence of defects, will allow a symmetrical and uniform distribution of the magnetic field to be obtained. Combining such a design with the analysis of all components of the magnetic distribution of the field will enable the detection of magnetic anomalies resulting from rope damage. Changing the magnetizing system, which is the basic part of the diagnostic equipment, will enable the design assumptions to be met, improve its operational properties, ensure the versatility of the structure and the possibility of using it with different rope diameters and different geometrical limitations of the ends and hard-to-reach places.

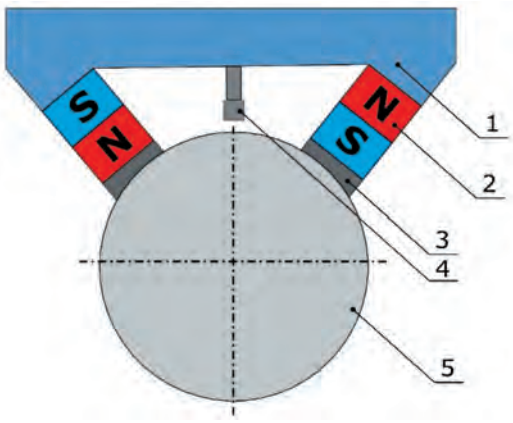


Fig. 7. Schematic diagram of the designed device: 1 – magnetic jumper, 2 – permanent magnet, 3 – pole piece, 4 – magnetic sensor, 5 – tested rope

4. MEASUREMENTS AND THEIR RESULTS

In order to verify the assumptions made, preliminary tests were carried out. Their aim was to confirm the thesis that the proposed measurement system would enable a uniform and symmetrical value of the magnetic field around the tested object to be obtained. In order to minimize the impact of a large number of variables on the obtained results, primarily the geometry of the tested element, and to confirm the thesis regarding the stability of the magnetic field distribution, a maximally simplified model was used in the tests. It was a steel cylinder with a diameter of 35 mm, on the side surface of which a cut was made with a width and depth of approximately 1 mm (Fig. 8).

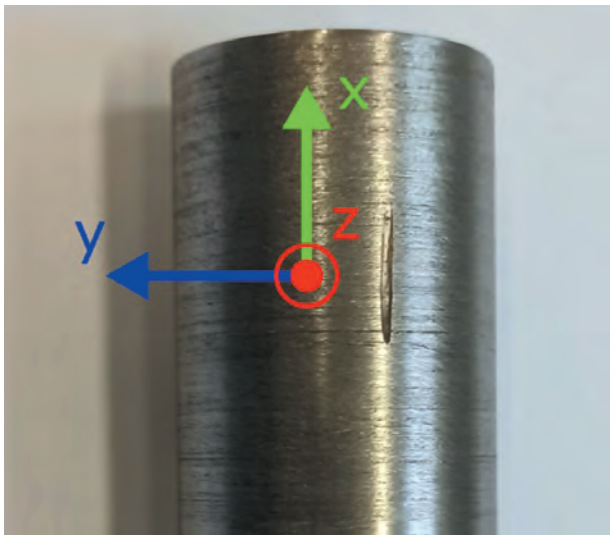


Fig. 8. Modelled damage – cut on the surface

The magnetization system used in the tests was in accordance with the previously described concept (Fig. 7). Ten N42 plate neodymium magnets with dimensions of 25 × 25 × 10 mm were used as the source of the magnetic field, the magnetic circuit consisted of a jumper and pole pieces with a shape adapted to the tested object. The measuring system was built from a part recording the magnetic dispersion field, an 3-axis, digital magnetometer MLX90393 and an Arduino--Mega microcontroller, and a part for recording displacement, which consisted of an Eltra ER30 incremental encoder and an NI USB-6216 measuring card. Signals from both modules were recorded using a program specially developed for this purpose in the LabView environment. The mounting and guiding elements were made of non-magnetic materials, primarily using 3D printing technology.

The measuring sensor, located 1 mm from the surface of the tested element, was mixed circumferentially with the magnetic core. As part of the research, during 4 rotations around the tested surface, 3 components of the magnetic field induction were recorded (Bx, By, Bz – Fig. 8). The recorded results are presented in Figure 9. The visible disturbances of the magnetic field of the three components, appearing cyclically, every 360°, are signals from the cut located on the surface of the tested object.

In order to increase the possibility of identifying the location of damage, the gradient of the recorded signal grad Bx, grad By, grad Bz and the product of these gradients grad Bxyz were determined, the results are presented in Figure 10.

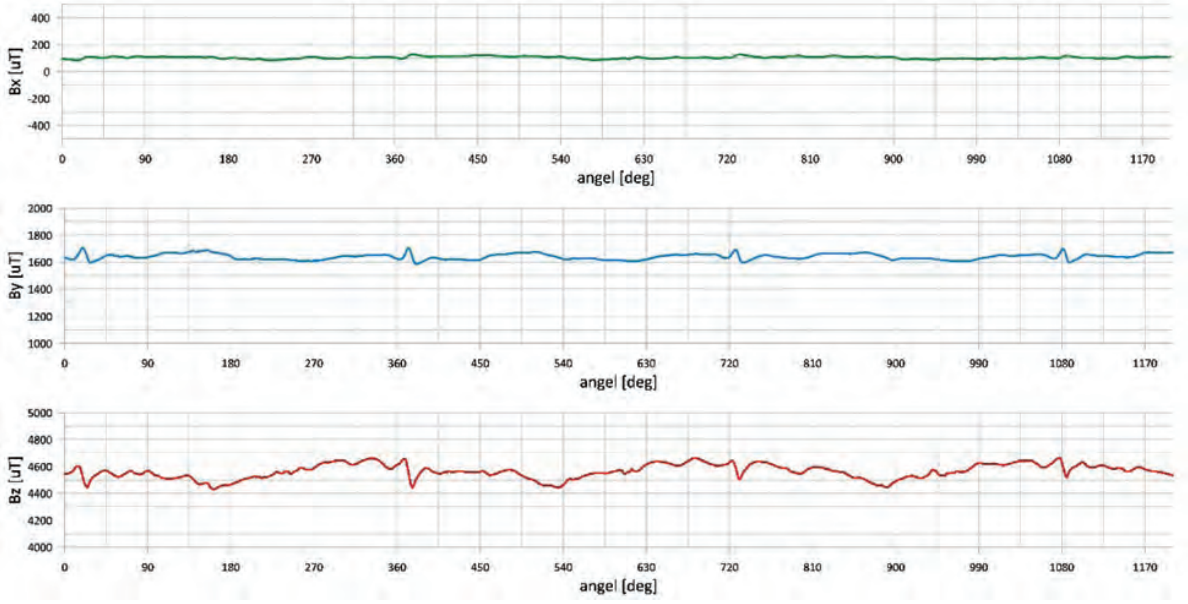


Fig. 9. Recorded values of magnetic field induction, 3 components Bx, By, Bz

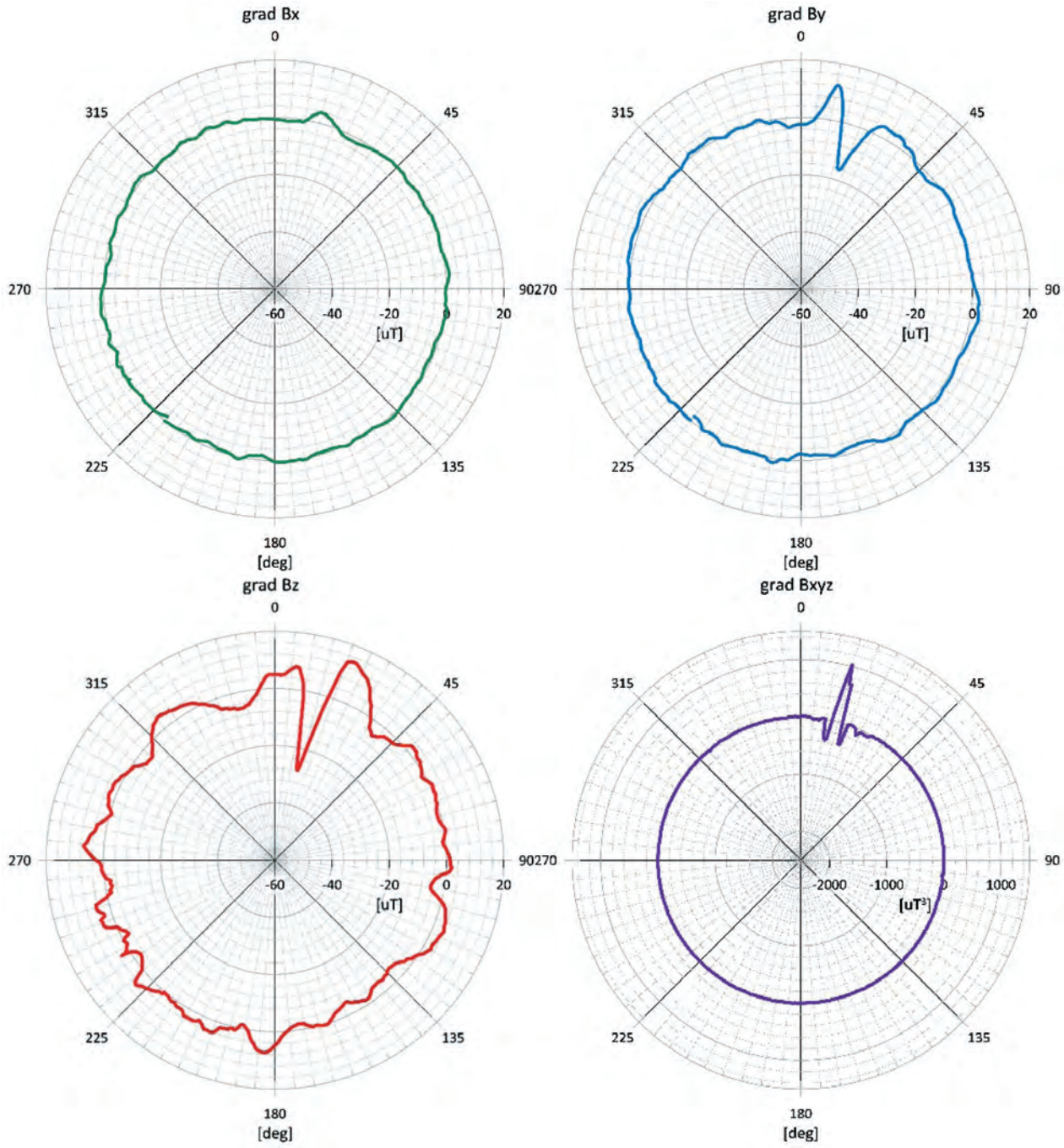


Fig. 10. The gradient of the recorded signal Bx, By, Bz and the product of these gradients, grad Bxyz

5. CONCLUSIONS

The laboratory tests carried out confirmed the thesis. The use of the proposed solution made it possible to obtain a uniform and symmetrical value of the magnetic field around the tested element. A change in the magnetic induction value is visible at the location of the damage. The use of the gradient signal analysis of the recorded magnetic induction values and the product of the gradients of the 3 components allowed for the unambiguous location of the modelled damage. In the laboratory tests carried out, the developed measurement system was characterized by the desired functional properties. Further laboratory tests will be related to metrological aspects, for example optimization of the magnetic circuit by selecting appropriate magnetic sensors and the method of their conduction, the method of signal analysis, and structural and functional aspects resulting from the type of ropes tested. It is also necessary to verify the solutions on a damage model with greater consistency with the real object.

References

[1] Kawecki Z., Stachurski J.: *Defektoskopia magnetyczna lin stalowych*. Wydawnictwo "Śląsk", Katowice 1969.

[2] Kwaśniewski J.: *Badania magnetyczne lin stalowych: system certyfikacji personelu w metodzie MTR*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.

[3] Hansel J.: *Badania magnetyczne lin stalowych: 60 lat rozwoju metody w AGH*. Zeszyty Naukowo-Techniczne nr 35, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Transportu Linowego, Kraków 2006.

[4] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Aparatura do badań nieniszczących lin stalowo-gumowych i taśm przenośnikowych zbrojonych linkami stalowymi/ Apparatus for non-destructive testing of rubber coated flat ropes and wire rope reinforced conveyor belts*. Zeszyty Problemowe: Badania Nieniszczące 2000, 5: 71–76.

[5] Kwaśniewski J., Molski S.: *Rozwój metodologii oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi w Akademii Górniczo-Hutniczej/ Development of the methodology for assessing the working condition of belts reinforced with steel cords at the AGH-UST*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2016, 3: 22–26.

[6] Ruta H., Krakowski T., Lonkwic P.: *Optimisation of the magnetic circuit of a measuring head for diagnostics of steel-polyurethane load-carrying belts using numerical methods*. Sustainability 2022, 14, 5: 1–19.

[7] Lonkwic P., Krakowski, T., Ruta H.: *Application of stray magnetic field for monitoring the wear degree in steel components of the lift guide rails system.* Metals 2020, 10, 1008.

[8] Hansel J., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 201156.

[9] Kwaśniewski J., Lankosz L., Molski S., Franczyk J.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 209211.

[10] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Zestaw do magnetycznego badania lin stalowych w strefie uchwytu stożkowego*. Wzór użytkowy PL065600.

[11] Hansel J., Tytko A., Koszyk M., Zawada K., Kubas B., Enders I.: *Urządzenie do badania nieruchomych lin stalowych na krótkich odcinkach*. Patent 209599.

[12] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Wykorzystanie analiz numerycznych przy projektowaniu urządzenia do badania lin stalowych w miejscach ich zamocowań.* Biuletyn WAT 2010, LIX, 4.

[13] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Evolution of equipment for testing of wire ropes in the tapered end sections*. The International Journal of Transport & Logistics 2010, 7: 8–16.

[14] Kowalski J., Kwaśniewski J., Lankosz L., Machula T., Molski S., Tytko A.: *Zastosowanie stałego pola magnetycznego w aparaturze do badania lin stalowych i w innych przyrządach pomiarowych*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2006, 36.

[15] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L., Koszyk M.: *Potentials of magnetic testing of hoisting ropes at the fixing points*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2003, 31: 88–102.

[16] Tytko A., Koszyk M.: *Non-destructive testing of guy rope ends.* Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2002, 29: 59–65.

[17] Krakowski T., Ruta H., Roskosz M.: *Application of the Magnetic Method in the Diagnostics of Wire Ropes at Tapered Sockets*. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2020, 1, 19–24.

TOMASZ KRAKOWSKI, Ph.D., Eng.
AGH University of Krakow
al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Krakow, Poland,
tomasz.krakowski@agh.edu.pl

© 2024 Author. This is an open access publication, which can be used, distributed and reproduced in any medium according to the Creative Commons CC-BY 4.0 License.

TOMASZ KRAKOWSKI

Badania magnetyczne lin stalowych w miejscach trudno dostępnych

Rosnące wymagania dotyczące bezpieczeństwa, niezawodności oraz jakości powodują, że badania lin stalowych stały się nieodłącznym elementem zarówno etapu produkcji, jak i eksploatacji. Podstawową metodą stosowaną w tym zakresie jest metoda badań magnetycznych lin stalowych (MTR). Mimo szeroko rozwiniętej wiedzy, aparatury i metod analizy sygnałów diagnostycznych trudno dostępne miejsca oraz zakończenia lin stalowych nie są w pełni objęte diagnostyką. Kontrola wizualna, która jest jedną z podstawowych metod badań nieniszczących w tym obszarze, ma istotne ograniczenia. Defektoskopia magnetyczna to dziedzina, w której powstają nowe rozwiązania i konstrukcje przeznaczone do badań lin stalowych. W artykule przedstawiono przykłady rozwiązań wykorzystywanych do diagnostyki miejsc o utrudnionym dostępie. Opisano nową koncepcję układu diagnostycznego do badań magnetycznych lin w tych odcinkach. Zaprezentowano również wyniki wstępnych laboratoryjnych pomiarów weryfikacyjnych nowego rozwiązania.

Słowa kluczowe: *liny stalowe, diagnostyka, badania magnetyczne lin stalowych*

1. WPROWADZENIE

Metoda badań magnetycznych lin stalowych jest techniką nieniszczącą. Polega na wykrywaniu wad i uszkodzeń lin stalowych uprzednio namagnesowanych stałym polem magnetycznym. W przypadku istnienia wady wokół badanego ferromagnetyka, namagnesowanego stałym polem magnetycznym pojawia się zaburzenie linii sił pola magnetycznego. Wielkość zaburzenia, występującego także w przestrzeni otaczającej obiekt, może być interpretowana i analizowana jako zewnętrzne magnetyczne pole rozproszenia. Zaburzenie to jest zazwyczaj związane z wielkością i położeniem wady. Podstawowy zestaw aparatury pomiarowej składa się z dwóch zespołów: zespołu głowicy pomiarowej i zespołu rejestratora lub innego urządzenia przetwarzającego sygnał diagnostyczny. Efektem pomiaru jest defektogram z zarejestrowanymi wynikami, który jednak wymaga dalszego opracowania [1, 2].

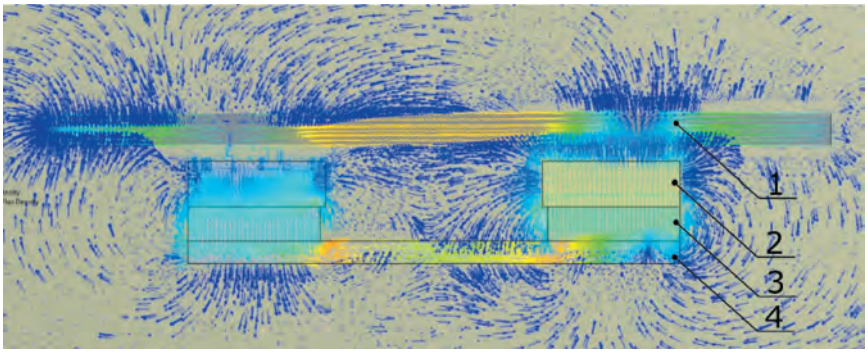
Badanie magnetyczne polega na namagnesowaniu liny wzdłuż jej osi stałym polem magnetycznym (za pomocą głowicy magnetycznej), obserwacji i rejestracji zjawisk, które zachodzą podczas namagnesowywania, interpretacji i obliczaniu na podstawie otrzymanych sygnałów stopnia zużycia liny. Główne elementy głowicy magnetycznej to obwód magnetyczny, który definiuje się jako zamkniętą drogę strumienia indukcji magnetycznej, będącą częścią pola magnetycznego o większej gęstości energii na jednostkę w porównaniu z częściami otaczającymi, oraz czujniki, które umieszczone są w płaszczyźnie symetrii obwodu magnetycznego [2].

W skład obwodu magnetycznego wchodzą (rys. 1): badany element (lina stalowa), nabiegunniki (zapewniają lepsze wnikanie strumienia magnetycznego w linę), magnesy trwałe (źródło pola magnetycznego, od ich energii magnetycznej zależą: wykrywalność wad, gabaryty i masa głowicy, stosuje się magnesy wykonywane ze stopów lub spieków Ne-Fe-B, Al-Ni-Co, Sm-Co), zwora magnetyczna (zamyka obwód magnetyczny).

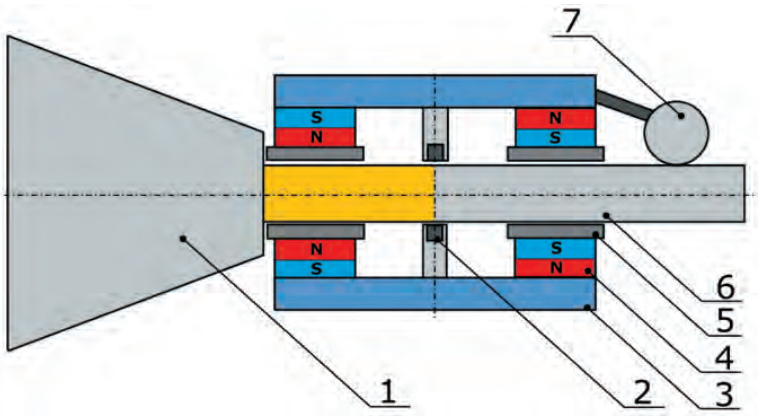
W defektoskopii magnetycznej lin stalowych wykorzystywane są obecnie dwa rodzaje czujników. Czujnik indukcyjny, służący do wykrywania nieciągłości o charakterze skokowym (pęknięte druty, brak drutu, naddatek). Czujnik hallotronowy umożliwia wykrycie tzw. uszkodzeń ciągłych, takich jak starcia, korozja itp. oraz uszkodzeń quasi-ciągłych, w tym zagęszczone pęknięcia drutów wzdłuż długości liny, wżery korozyjne, rozluźnienie splotek. W stosowanej aktualnie aparaturze

pomiarowej wykorzystuje się czujniki rejestrujące zmianę składowej radialnej wartości magnetycznego strumienia rozproszenia nad badanym elementem.

Dostępne na rynku głowice magnetyczne znakomicie sprawdzają się w badaniach długich odcinków lin stalowych. Ich konstrukcja wiąże się jednak z istotnym ograniczeniem – trudnościami w diagnostyce miejsc o ograniczonej dostępności, takich jak odcinki z zamontowanymi zaciskami czy zakończenia lin. Ograniczenie to wynika bezpośrednio z budowy aparatury badawczej, w której zespół czujników umieszczony jest w centralnej części obwodu magnetycznego. Taka konstrukcja obwodu magnetycznego i umieszczonego w jego centralnej części czujnika sprawia, że zawsze pozostaje pewien nieprzebadany odcinek liny (rys. 2).



Rys. 1. Magnetowód i rozkład indukcji magnetycznej głowicy:
1 – badana lina, 2 – nabiegunnik, 3 – magnes stały, 4 – zwora magnetyczna



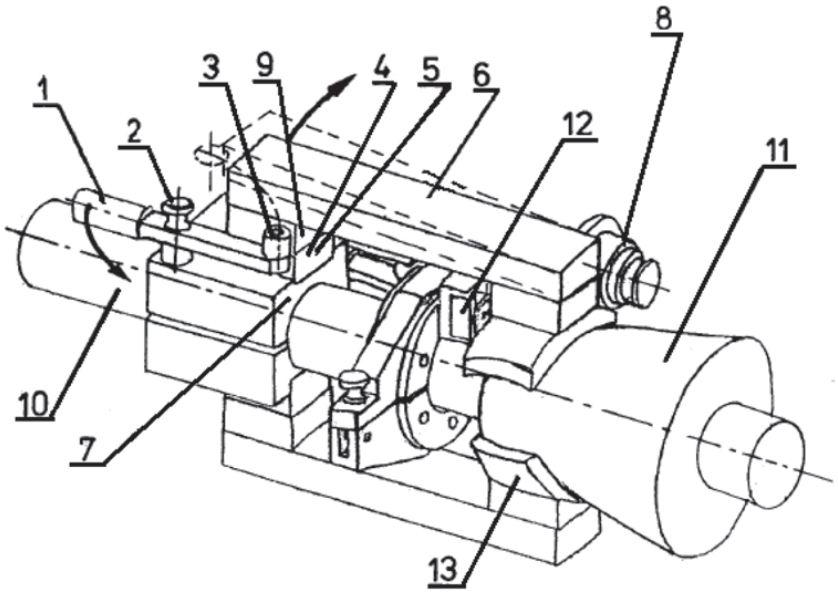
Rys. 2. Schemat głowicy do badań lin stalowych z niezbadanym odcinkiem liny zaznaczonym kolorem żółtym:
1 – uchwyt stożkowy, 2 – czujnik magnetyczny, 3 – zwora magnetyczna, 4 – magnes stały, 5 – nabiegunnik, 6 – badana lina, 7 – przetwornik drogi

2. GŁOWICE POMIAROWE DO BADANIA MIEJSCOWEGO LIN STALOWYCH

Twórcami metody magnetycznej byli profesorowie Akademii Górniczo-Hutniczej, Mieczysław Jeżewski, Ludger Szklarski i Zygmunt Kawecki. Swoje badania rozpoczęli w 1946 roku od stworzenia podstaw teoretycznych i pierwszych prób zbudowania aparatury pomiarowej. Wcześniej próby wykrywania uszkodzeń wewnętrznych lin bez ich rozplatania prowadzone były w latach 20 XX wieku w USA przez R. Sanforda oraz w latach 30. XX wieku przez A. Otto i F. Wevera, jednakże wyniki pomiarów nie zgadzały się ze stanem faktycznym. Badania na AGH rozpoczęto od udowodnienia tezy, że uszkodzenia wewnątrz liny powodują zmiany pola magnetycznego. Wyniki badań laboratoryjnych weryfikowane były na obiektach rzeczywistych. W 1962 r. został opatentowany pierwszy na świecie defektograf magnetyczny do badań lin, prętów i rur stalowych. W 1963 roku natomiast twórcy opatentowali nowe rozwiązanie czujnika pomiarowego, które umożliwia wyznaczenie odległości uszkodzenia od osi badanej liny [3]. Przez kolejne lata metoda badań magnetycznych była rozwijana w zakresie jej aplikacji w badaniach lin stalowych oraz takich ele-

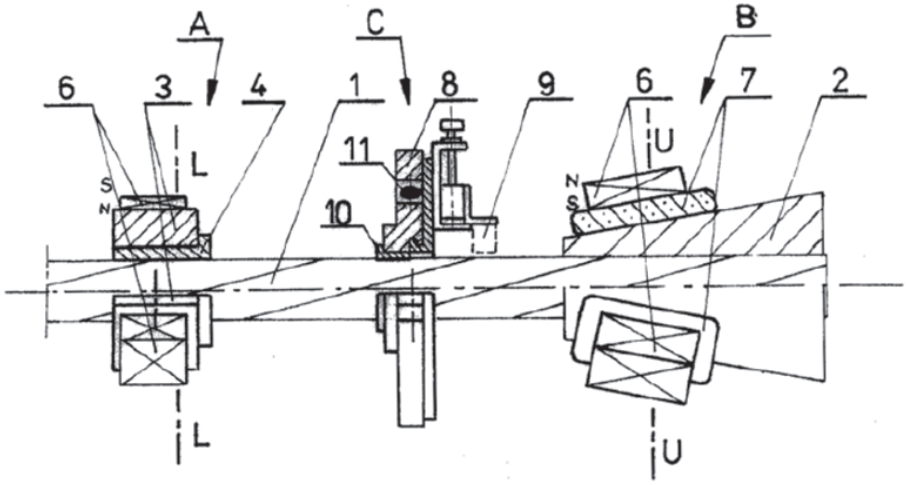
mentów, jak np. taśmy przenośnikowe z linkami stalowymi [4], liny stalowo-gumowe [5], cięgna stalowo-poliuretanowe [6], układy prowadzenia dźwigów osobowych [7]. Rozwój metody magnetycznej w obszarze diagnostyki lin stalowych w miejscach trudno dostępnych prowadzony jest przez wiele lat, w wyniku czego powstały między innymi koncepcje zgłoszone jako patenty lub wzory użytkowe [8–11] oraz opisane w publikacjach [12–16]. W większości przypadków są one oparte na rozwiązaniu, w którym w obszarze nieruchomego obwodu magnetycznego magnesującego linę wzdłużnie czujnik magnetyczny przemieszcza się obwodowo lub wzdłużnie względem badanego trudno dostępnego fragmentu liny. Wybrane przykłady takich rozwiązań przedstawiono poniżej.

Pierwszym z przykładów takiej aparatury jest głowica magnetyczna przedstawiona na rysunku 3. Zgodnie z opisem patentowym [8] składa się ona z nabiegunników umieszczonych zarówno na linie, jak i jej zakończeniu, magnesów trwałych – umieszczonych bezpośrednio na nabiegunnikach, oraz zamykających obwód magnetyczny zwór magnetycznych. Przedstawiony na rysunku 3 wynalazek [9] pozwala na diagnostykę wybranego przekroju liny (12) w dowolnych jej fragmentach, również przy ich zakończeniach, przykładowo przy uchwycie stożkowym. W skład urządzenia wchodzi dwuczęściowy korpus, który jest miejscem mocowania elementów obwodu magnetycznego: nabiegunników (7), magnesów trwałych (4), wkładek kształtowych dopasowanych do średnicy liny (7) i uchwytu stożkowego (13) oraz zwory magnetycznej (6). Obwód magnetyczny zamykany jest przez badaną linę i magnesuje ją wzdłuż jej długości. Czujnik (12) przemieszcza się obwodowo z wykorzystaniem zespołu napędowego (8). Przemieszczanie układu czujnika pomiarowego i jego napędu może się odbywać również między nabiegunnikami (12), co umożliwia przebadanie kolejnego przekroju liny [9].



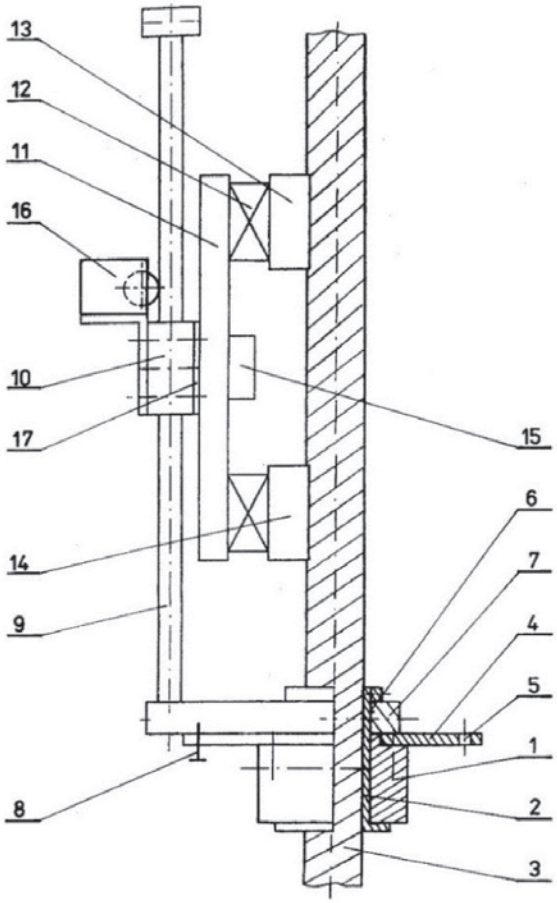
Rys. 3. Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych [9]

Kolejna koncepcja, zgodnie z wzorem użytkowym [10], zakłada, że urządzenie (rys. 4) zbudowane jest z odpowiednio względem siebie spolaryzowanych zespołów magnesujących umieszczonych na linie (A) i uchwycie stożkowym (B). Zespoły magnesujące zbudowane są z magnesów trwałych (6) oraz nabiegunników (3, 7) – ich kształt i wymiary dostosowane są do elementów, na których są mocowane. Nabiegunnik mocowany na linie za pomocą wkładki (4), natomiast nabiegunnik (7) mocowany na uchwycie stożkowym jest wykonany z odkształcalnego materiału. W odróżnieniu od rozwiązania [8] obwód magnetyczny nie posiada zwory, a zespoły magnesujące mocowane są na linie i jej zakończeniu dzięki sile przyciągania magnesów. Obwód ten jest niezależny od układu czujników i umieszczony jest na linie oraz jej zakończeniu w sposób nieruchomy. Rejestracja zaburzenia magnetycznego pola rozproszenia wokół liny, która magnesowana jest wzdłużnie, odbywa się z wykorzystaniem zespołu czujnika. Ustrój znajduje się pomiędzy magnesami i ma możliwość regulacji odległości czujnika zarówno wzdłuż osi liny, jak i odległości od liny. Pomiar odbywa się podczas ruchu czujnika dookoła liny [10].



Rys. 4. Zestaw do magnetycznego badania lin stalowych w strefie uchwytu stożkowego [10]

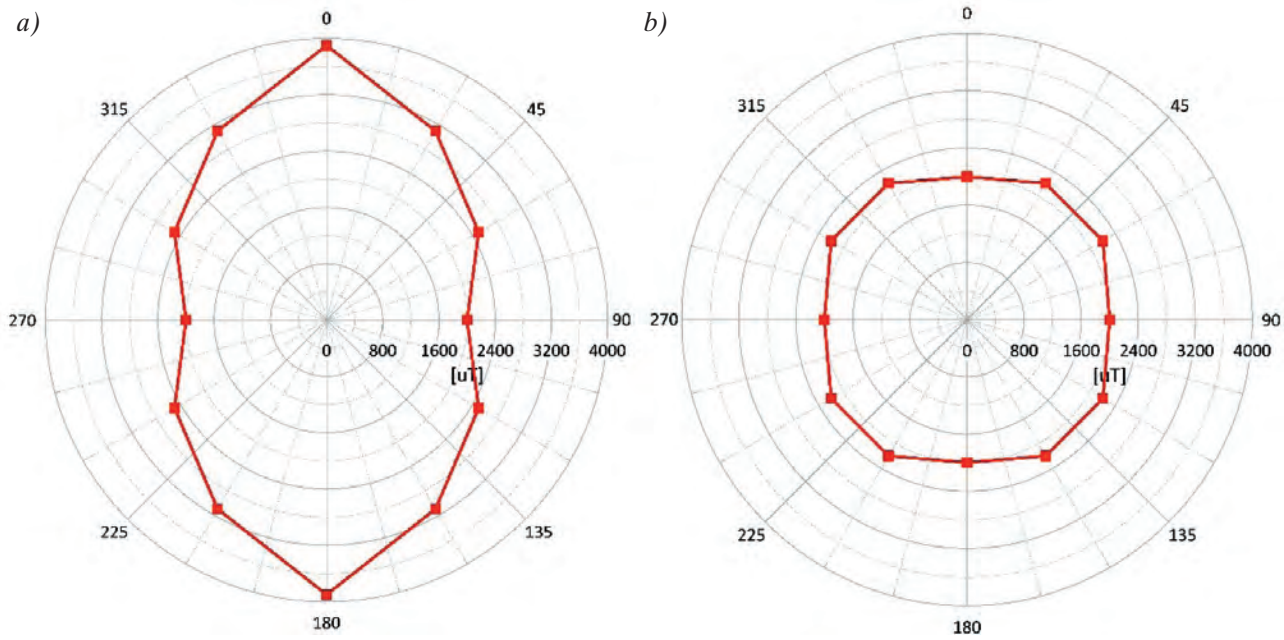
Kolejne rozwiązanie (rys. 5) zbudowane jest z dwuczęściowej obejmy zaciskowej (1), na której zainstalowany jest mechanizm umożliwiający zmianę pozycji obwodu magnetycznego wzdłuż i wokół badanej liny. Tak jak we wcześniej opisanych rozwiązaniach obwód magnetyczny magnesuje badaną linę stalową wzdłużnie i składa się z co najmniej jednego magnesu (12), zwory (11) i nabiegunników (13, 14), pomiędzy którymi znajduje się czujnik pomiarowy (15). Pomiar odbywa się w obwodzie magnetycznym o niezmiennych parametrach, ze stałym położeniem czujnika pomiarowego względem nabiegunników. Sygnał pomiarowy rejestrowany jest zarówno w funkcji długości, jak i kąta środkowego, co pozwala uzyskać przestrzenny obraz rozkładu uszkodzeń [11].



Rys. 5. Urządzenie do badania nieruchomych lin stalowych na krótkich odcinkach [11]

Analiza budowy rozwiązań [8–11] oraz wyników opisanych w publikacjach [12–17] wykazały, że w warunkach laboratoryjnych możliwe jest wykorzystanie metody magnetycznej do badań lin stalowych w miejscach o utrudnionym dostępie i przy ich zakończeniu. Omawiane rozwiązania nie są jednak pozbawione niedoskonałości o charakterze użytkowym i metrologicznym. Duże siły spójności od magnesów stałych są znacznym utrudnieniem przy montażu i demontażu obwodu magnetycznego. W miejscach o ograniczonej dostępności montaż i przemieszczanie omawianych urządzeń, o dużych wymiarach obwodu magnetycznego, może prowadzić do trudności lub nawet braku możliwości ich zastosowania. Z kolei wybór układu bez zwory, który charakteryzuje się mniejszą masą, dużo prostszą budową i sposobem montażu, wymaga użycia większej liczby magnesów lub magnesów o większej energii magnetycznej, co również sprawia problemy użytkowe. Podstawowy problem metrologiczny dotyczy asymetrii rozkładu pola magnetycznego w obszarach liny oddalanych od źródła pola magnetycznego, zwłaszcza w rozwiązaniu [8, 9]. Związane jest to ze stałym usytuowaniem obwodu magnetycznego, względem którego przemieszcza się czujnik rejestrujący zmianę magnetycznego pola rozproszenia. Brak jednorodnego rozkładu pola magnetycznego wpływa na właściwości diagnostyczne rozwiązań i uzyskiwaną dokładność pomiarową. Problem ten zo-

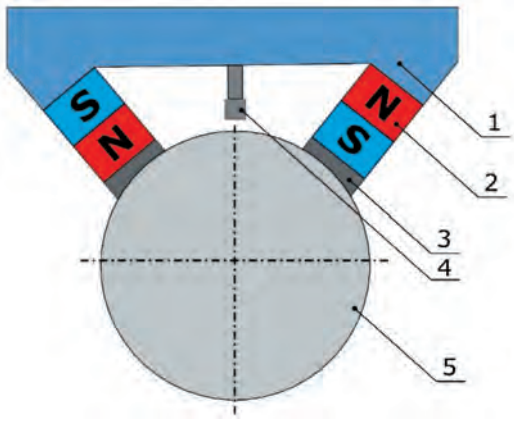
stał znacznie poprawiony w układzie bez zwory magnetycznej [10], ze zwiększoną liczbą magnesów na obwodzie badanej liny. Rozwiązanie to wiąże się jednak z zapewnieniem odpowiednio wysokiej wartości indukcji magnetycznej umożliwiającej wykrywalność wad w cięgnach, tym samym wartość sygnału użytecznego jest mniejsza niż w przypadku tradycyjnych głowic [12].



Rys. 6. Rozkład pola magnetycznego dla głowic magnetycznych w płaszczyźnie normalnej do osi liny o średnicy 34 mm, w odległości 20 mm od płaszczyzny czołowej stożka: a) układ ze zworą magnetyczną wg patentu [8]; b) układ bez zwory wg zgłoszenia [10, 12]

3. KONCEPCJA UKŁADU DIAGNOSTYCZNEGO

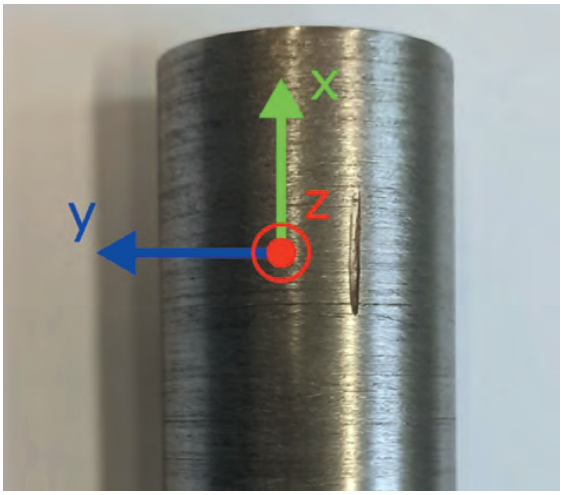
Analiza różnego rodzaju koncepcji układów do badań magnetycznych lin w miejscach trudno dostępnych przyczyniła się do postawienia założeń konstrukcyjnych, funkcjonalnych i metrologicznych, w efekcie czego została opracowana nowa koncepcja układu diagnostycznego. W odróżnieniu od opisywanych wcześniej rozwiązań założono, że obwód magnetyczny magnesujący linę wzdłużnie lub poprzecznie przemieszcza się wraz z czujnikiem wokół badanej liny. Koncepcja ta została przedstawiona na rysunku 7. Przy projektowaniu nowego rozwiązania postawiono tezę, że jego zastosowanie w przypadku braku defektu lub zmian geometrii powoduje, że magnetyczne pole rozproszenia w obszarze rejestracji pozostaje na podobnym poziomie, gdyż czujnik znajduje się w tym samym miejscu obwodu magnetycznego i przemieszcza się wraz z nim, a nie względem niego. Zastosowanie takiego rozwiązania, przy braku defektów, pozwoli na uzyskanie symetrycznego i jednorodnego rozkładu pola magnetycznego. Połączenie takiej konstrukcji z analizą wszystkich składowych rozkładu magnetycznego pola rozproszenia umożliwi wykrycie anomalii magnetycznych pochodzących od uszkodzeń liny. Zmiana układu magnesującego będącego podstawową częścią aparatury diagnostycznej umożliwi spełnienie założeń konstrukcyjnych, poprawi jego właściwości użytkowe, zapewni uniwersalność konstrukcji i możliwość zastosowania przy różnych średnicach liny i ograniczeniach geometrycznych zakończeń i miejsc trudno dostępnych.



Rys. 7. Schemat projektowanego urządzenia: 1 – zwora magnetyczna, 2 – magnes stały, 3 – nabiegunnik, 4 – czujnik magnetyczny, 5 – badana lina

4. POMIARY I ICH WYNIKI

W celu weryfikacji przyjętych założeń przeprowadzono badania wstępne. Miały one potwierdzić tezę, że zaproponowany układ pomiarowy umożliwi uzyskanie jednorodnej i symetrycznej wartości magnetycznego pola rozproszenia wokół badanego obiektu. Ze względu na minimalizację wpływu dużej ilości zmiennych, przede wszystkim geometrii badanego elementu, na uzyskiwane wyniki i chęć potwierdzenia postawionej tezy dotyczącej stałości rozkładu pola magnetycznego w badaniach posłużono się maksymalnie uproszczonym modelem. Był to stalowy walec o średnicy 35 mm, na którego powierzchni bocznej wykonano nacięcie o szerokości i głębokości około 1 mm (rys. 8).

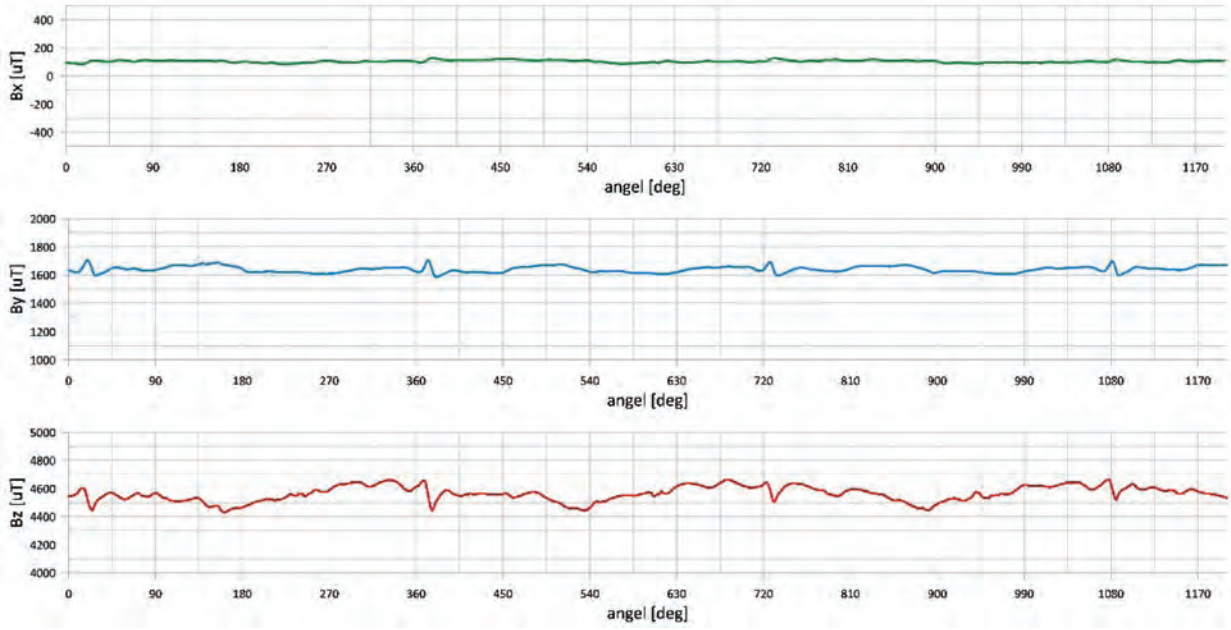


Rys. 8. Zamodelowane uszkodzenie – nacięcie na powierzchni

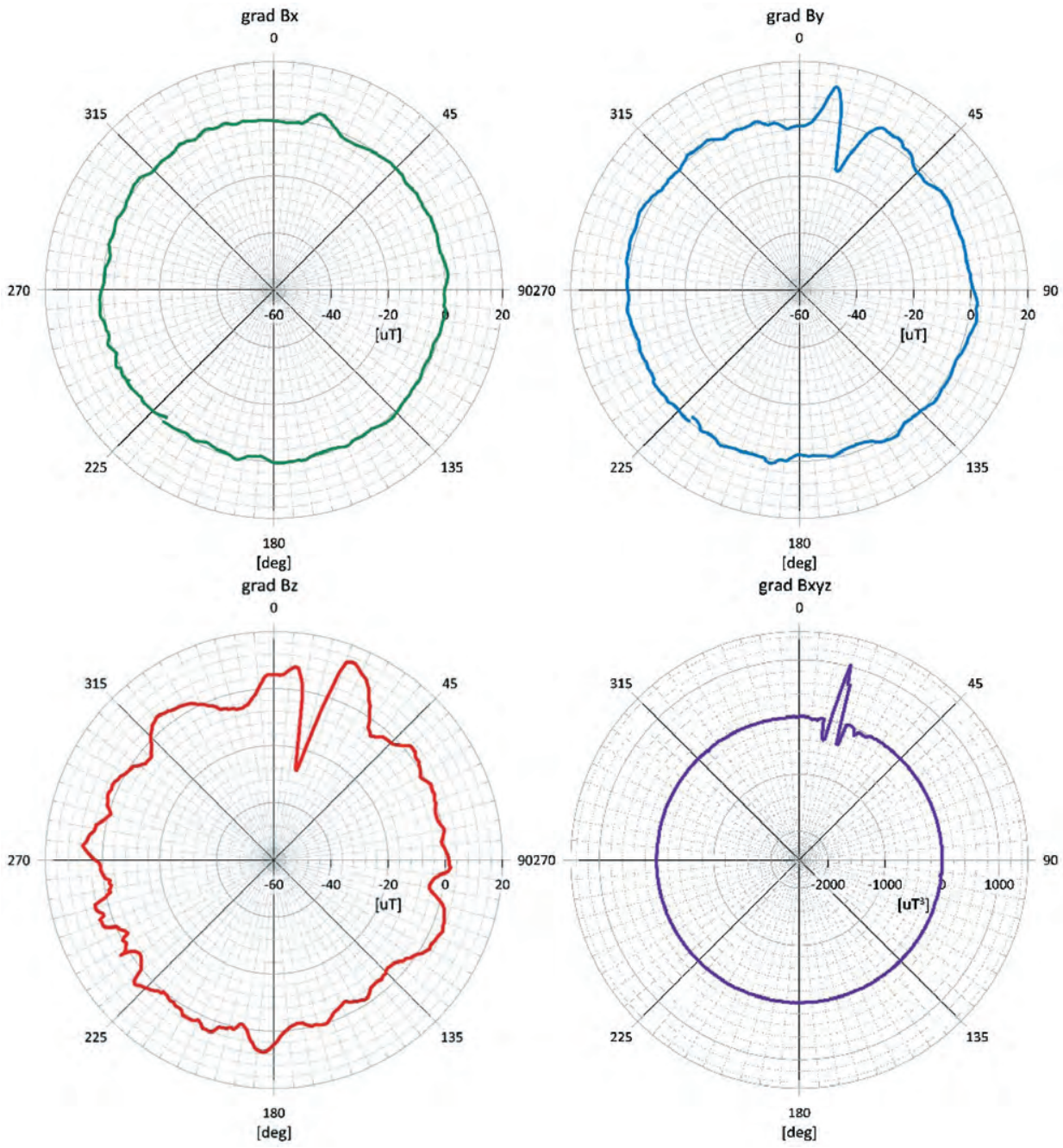
W badaniach wykorzystano układ magnesowania zgodny z opisaną wcześniej koncepcją (rys. 7). Jako źródła pola magnetycznego użyto 10 płytowych magnesów neodymowych N42 o wymiarach 25 × 25 × 10 mm. Na obwód magnetyczny składała się zwora oraz nabiegunniki o kształcie dopasowanym do badanego obiektu. Układ pomiarowy zbudowano z części rejestrującej magnetyczne pole rozproszenia, tj. z trójosiowego, cyfrowego magnetometru MLX90393 i mikrokontroler ArduinoMega oraz części do rejestracji przemieszczenia, która składała się z enkodera inkrementalnego Eltra ER30 oraz karty pomiarowej NI USB-6216. Rejestrację sygnałów z obydwu modułów przeprowadzono z wykorzystaniem specjalnie do tego celu opracowanego programu w środowisku LabView. Elementy mocowania i prowadzenia zostały wykonane z materiałów niemagnetycznych, przede wszystkim w technologii druku 3D.

Czujnik pomiarowy oddalony o 1 mm od powierzchni badanego elementu przemieszany był obwodowo wraz z magnetowodem. W ramach badań podczas czterech obrotów wokół badanej powierzchni rejestrowano trzy składowe indukcji pola magnetycznego (Bx, By, Bz – rys. 8). Zarejestrowane wyniki przedstawiono na rysunku 9. Widoczne, pojawiające się cyklicznie co 360°, zaburzenia pola magnetycznego trzech składowych są sygnałami od nacięcia znajdującego się na powierzchni badanego obiektu.

W celu zwiększenia możliwości identyfikacji miejsca występowania uszkodzenia wyznaczono gradient zarejestrowanego sygnału grad Bx, grad By, grad Bz oraz iloczyn tych gradientów grad Bxyz, zaś wyniki zaprezentowano na rysunku 10.



Rys. 9. Zarejestrowane wartości indukcji pola magnetycznego, trzy składowe: Bx, By, Bz



Rys. 10. Gradient zarejestrowanego sygnału Bx, By, Bz oraz iloczyn tych gradientów grad Bxyz

5. PODSUMOWANIE

Przeprowadzone badania laboratoryjne potwierdziły stawianą tezę. Zastosowanie zaproponowanego rozwiązania umożliwiło uzyskanie jednorodnej i symetrycznej wartości magnetycznego pola rozproszenia wokół badanego elementu. W miejscu występowania uszkodzenia widoczna jest zmiana wartości indukcji magnetycznej. Wykorzystanie w analizie sygnału gradientów zarejestrowanych wartości indukcji magnetycznej oraz iloczynu gradientów trzech składowych pozwoliło na jednoznaczną lokalizację zamodelowanego uszkodzenia. W przeprowadzonych badaniach laboratoryjnych opracowany układ pomiarowy cechował się pożądanymi właściwościami funkcjonalnymi. Dalsze badania laboratoryjne związane są z aspektami metrologicznymi, takimi jak optymalizacja obwodu magnetycznego, doborem odpowiednich czujników magnetycznych oraz sposobu ich prowadzenia, sposobem analizy sygnałów oraz kwestiami konstrukcyjnymi i funkcjonalnymi wynikającymi z rodzaju badanych lin. Konieczna staje się również weryfikacja rozwiązań na modelu uszkodzeń o większej spójności z obiektem rzeczywistym.

Literatura

[1] Kawecki Z., Stachurski J.: *Defektoskopia magnetyczna lin stalowych*. Wydawnictwo „Śląsk", Katowice 1969.

[2] Kwaśniewski J.: *Badania magnetyczne lin stalowych : system certyfikacji personelu w metodzie MTR*. Wydawnictwa AGH, Kraków 2010.

[3] Hansel J.: *Badania magnetyczne lin stalowych: 60 lat rozwoju metody w AGH*. Zeszyty Naukowo-Techniczne nr 35, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Transportu Linowego, Kraków 2006.

[4] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Aparatura do badań nieniszczących lin stalowo-gumowych i taśm przenośnikowych zbrojonych linkami stalowymi/ Apparatus for non-destructive testing of rubber coated flat ropes and wire rope reinforced conveyor belts*. Zeszyty Problemowe: Badania Nieniszczące 2000, 5: 71–76.

[5] Kwaśniewski J., Molski S.: *Rozwój metodologii oceny stanu technicznego taśm z linkami stalowymi w Akademii Górniczo-Hutniczej/ Development of the methodology for assessing the working condition of belts reinforced with steel cords at the AGH-UST*. Transport Przemysłowy i Maszyny Robocze 2016, 3: 22–26.

[6] Ruta H., Krakowski T., Lonkwic P.: *Optimisation of the magnetic circuit of a measuring head for diagnostics of steel-polyurethane load-carrying belts using numerical methods*. Sustainability 2022, 14, 5: 1–19.

[7] Lonkwic P., Krakowski, T., Ruta H.: *Application of stray magnetic field for monitoring the wear degree in steel components of the lift guide rails system.* Metals 2020, 10, 1008.

[8] Hansel J., Kwaśniewski J., Lankosz L.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 201156.

[9] Kwaśniewski J., Lankosz L., Molski S., Franczyk J.: *Urządzenie do miejscowego badania lin stalowych*. Patent 209211.

[10] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Zestaw do magnetycznego badania lin stalowych w strefie uchwytu stożkowego*. Wzór użytkowy PL065600.

[11] Hansel J., Tytko A., Koszyk M., Zawada K., Kubas B., Enders I.: *Urządzenie do badania nieruchomych lin stalowych na krótkich odcinkach*. Patent 209599.

[12] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Wykorzystanie analiz numerycznych przy projektowaniu urządzenia do badania lin stalowych w miejscach ich zamocowań.* Biuletyn WAT 2010, LIX, 4.

[13] Kwaśniewski J., Ruta H.: *Evolution of equipment for testing of wire ropes in the tapered end sections*. The International Journal of Transport & Logistics 2010, 7: 8–16.

[14] Kowalski J., Kwaśniewski J., Lankosz L., Machula T., Molski S., Tytko A.: *Zastosowanie stałego pola magnetycznego w aparaturze do badania lin stalowych i w innych przyrządach pomiarowych*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2006, 36.

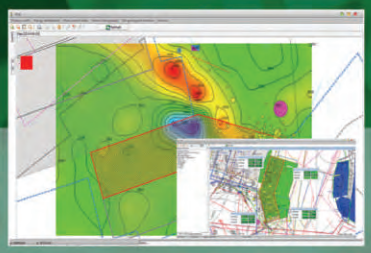
[15] Tytko A., Kwaśniewski J., Lankosz L., Koszyk M.: *Potentials of magnetic testing of hoisting ropes at the fixing points*. Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2003, 31: 88–102.

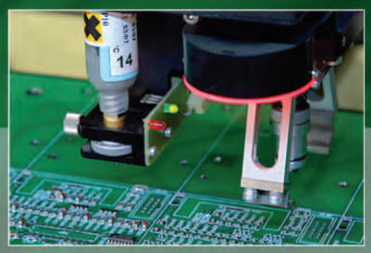
[16] Tytko A., Koszyk M.: *Non-destructive testing of guy rope ends.* Zeszyty Naukowo-Techniczne Katedry Transportu Linowego AGH 2002, 29: 59–65.

[17] Krakowski T., Ruta H., Roskosz M.: *Application of the Magnetic Method in the Diagnostics of Wire Ropes at Tapered Sockets*. Biuletyn Instytutu Spawalnictwa 2020, 1, 19–24.

dr inż. TOMASZ KRAKOWSKI
AGH Akademia Górniczo-Hutnicza
al. A. Mickiewicza 30,
30-059 Kraków
tomasz.krakowski@agh.edu.pl

© 2024 Autor. Jest to publikacja ogólnodostępna, którą można wykorzystywać, rozpowszechniać i kopiować w dowolnej formie zgodnie z licencją Creative Commons CC-BY 4.0.





ISSN 2449-6421