

MASZYNY GÓRNICZE

3/2016

KWARTALNIK NAUKOWO-TECHNICZNY



MASZYNY GÓRNICZE

MINING MACHINES

3(147)2016

Kwartalnik naukowo-techniczny
Rok XXXIV, wrzesień 2016

Zespół Redakcyjny:

Redaktor Naczelny:
dr inż. Antoni Kozieł

Z-ca Redaktora Naczelnego:
dr inż. Edward Pieczora

Sekretarz Redakcji:
mgr inż. Romana Zajac

Redaktor statystyczny:
dr inż. Jarosław Tokarczyk

Redaktor językowy:
mgr Anna Okulińska

Redaktorzy tematyczni:
dr hab. inż. Beata Grynkiewicz-Bylina,
prof. nadzw. w ITG KOMAG
prof. dr hab. inż. Adam Klich
prof. dr hab. inż. Zdzisław Kleczek
prof. dr hab. inż. Aleksander Lutyński
dr hab. inż. Stanisław Szveda,
prof. nadzw. w Pol. Śl.
prof. dr hab. inż. Teodor Winkler

Wydawca:
Instytut Techniki Górniczej KOMAG
ul. Pszczyńska 37, 44-101 Gliwice
tel. 32 2374 528
fax 32 2374 304
<http://www.komag.eu>

Redakcja nie zwraca nadesłanych
artykułów i nie odpowiada za treść
ogłoszeń i reklam.

Wersję elektroniczną wydawanego
kwartalnika należy traktować jako
wersję pierwotną.



ISSN 2450-9442

Szanowni Państwo

Prezentujemy kolejny numer kwartalnika „Maszyny Górnicze”, w którym zawarto artykuły poświęcone innowacyjnym rozwiązaniom z zakresu drążenia tuneli ratowniczych metodą odspajania skał, iskrobezpiecznych układów i systemów sterowania maszynami i urządzeniami górnictwami, zwalczania zapylenia i górnictw napędów spalinowych.

Prezentowane prace badawcze mają charakter koncepcji i są podstawą do poszukiwania możliwości wdrażania nowych rozwiązań w górnictwie.

Zdajemy sobie sprawę z bardzo trudnej sytuacji ekonomicznej tej branży przemysłowej, ale doświadczenie i przykłady osiągania wielu sukcesów rynkowych wykazują, że nie trzeba dokonywać od razu rzeczy wielkich, aby mieć wpływ na otaczającą nas rzeczywistość.

Rozwój technologii i technik jest ciągły i należy zawsze dążyć do osiągania kolejnych celów. Działanie krok po kroku, zaangażowanie zespołów ludzkich oraz gotowość do inwestowania może przynieść oczekiwane efekty. Trzeba podejmować ryzyko.

Wiele prezentowanych w naszym czasopiśmie rozwiązań znalazło już zastosowanie i odniosło sukces rynkowy. Mamy nadzieję, że również prezentowane w tym wydaniu rozwiązania techniczne i organizacyjne zostaną docenione i wdrożone. Życzymy tego wszystkim naszym partnerom przemysłowym i naukowym.

Zachęcając do lektury niniejszego wydania „Maszyn Górniczych” tradycyjnie zapraszam do współpracy z naszą redakcją.

*Redaktor Naczelny
dr inż. Antoni Kozieł*

PROJEKTOWANIE I BADANIA

Cebula D., Kalita M.: Badania i analiza naprężeń krytycznych w materiale skalnym wywołanych mechanicznym odspajaniem 3

Bałaga D., Siegmund M., Prostański D., Kalita M.: Innowacyjny system zraszania dla wyrobisk ścianowych..... 14

NAPĘDY I UKŁADY NAPĘDOWE

Majewski M., Suffner H.: Układy sterujące wąskotorowych lokomotyw powierzchniowych 23

Figiel A.: Wymagania dotyczące zapewnienia iskrobezpieczeństwa systemów sterowania 38

Dobrzaniecki P.: Dostosowanie silnika spalinowego z układem wtryskowym common rail górniczej maszyny roboczej do obowiązujących wymagań i przepisów 45

SYSTEMY STEROWANIA, MONITORINGU I DIAGNOSTYKI

Stankiewicz K., Jasiulek D., Jagoda J., Jura J.: Rozproszone systemy sterowania maszyn i urządzeń górniczych 54

DESIGNING AND TESTING

Cebula D., Kalita M.: Tests and analysis of critical stresses in rocks caused by mechanical rocks falling off 3

Bałaga D., Siegmund M., Prostański D., Kalita M.: Innovative spraying system for longwall panels 14

DRIVERS AND DRIVE SYSTEMS

Majewski M., Suffner H.: Control systems for narrow-gauge surface locomotives 23

Figiel A.: Requirements for intrinsic safety of the control systems 38

Dobrzaniecki P.: Adaptation of mining machine's diesel engine with common rail injection system to the requirements and regulations that are in force 45

SYSTEMS FOR CONTROL, MONITORING AND DIAGNOSTICS

Stankiewicz K., Jasiulek D., Jagoda J., Jura J.: Dispersed systems for control of mining machines and equipment 54

Badania i analiza naprężeń krytycznych w materiale skalnym wywołanych mechanicznym odspajaniem

mgr inż. Danuta Cebula
dr inż. Marek Kalita
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W artykule omówiono metodę mechanicznego odspajania calizny skalnej przy użyciu kotew rozprężnych pod kątem możliwości zastosowania do wykonywania tuneli ratowniczych. Przedstawiono analizę wyników badań in situ i laboratoryjnych. Badania zrealizowano w ramach projektu europejskiego INREQ, w Skansenie Górniczym Królowa Luiza. Wyniki badań umożliwiły weryfikację modelu zniszczenia materiału skalnego dla mechanicznego odspajania. Wyznaczono również kierunki dalszych prac.

Słowa kluczowe: technologia drażenia chodnika, odspajanie skał, badanie geometrii odspojenia, badania wytrzymałościowe skał

Keywords: technology of roadway development, rocks falling off, testing the falling off geometry, rock strength tests

Abstract:

Method for rock falling off with use of expanding bolts in the case of development of rescue tunnels is discussed. Analysis of in situ and laboratory test results is presented. Tests were realized within the INREQ project in Skansen Górniczy Królowa Luiza (Mining Heritage Park Queen Luiza). Test results enabled verification of the model of rock material destruction in the case of mechanical falling off process. Direction of further research work have been determined.

1. Wprowadzenie

Koncepcja metody mechanicznego odspajania skał oraz badania mające na celu ocenę możliwości jej zastosowania do drażenia wyrobisk ratunkowych były przedmiotem prac prowadzonych w ramach projektu INREQ. Metoda oparta jest na wykorzystaniu lekkich i łatwych w transporcie narzędzi ręcznych. Ze względu na zastosowane narzędzia, stężenie metanu w wyrobisku nie ogranicza możliwości stosowania proponowanej metody urabiania. Ponadto nie powoduje destrukcji górotworu, poza ściśle wyznaczoną strefą i pozwala na wykonywanie wyrobisk w skałach zwięzłych [3].

Metoda może znaleźć znacznie szersze zastosowanie do urabiania skał zwięzłych, jako alternatywna do technologii urabiania materiałami wybuchowymi. Ewentualny rozwój tej technologii będzie jednak uzależniony od przeprowadzenia prac badawczo-rozwojowych mających na celu wyznaczenie empirycznego modelu niszczenia różnego typu skał i m.in. wyznaczanie geometrii odspojenia, siły krytycznej P powodującej destrukcję materiału oraz efektywności tego procesu.

W niniejszym artykule przedstawiono analizę wyników badań in situ i laboratoryjnych zrealizowanych w ramach projektu INREQ [6].

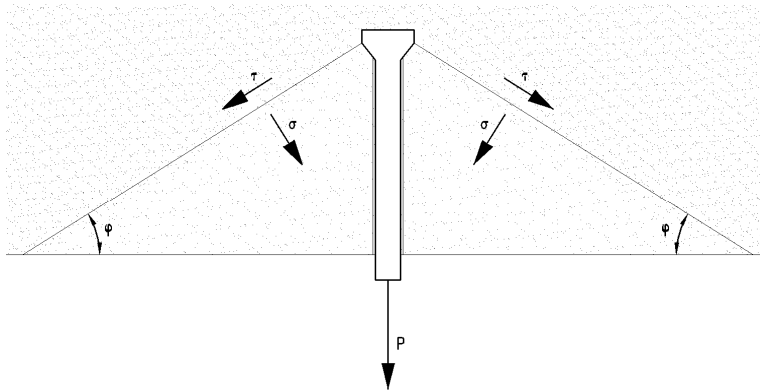
2. Analiza stanu wyężenia w materiale skalnym wywołanego mechanicznym odspajaniem

Omawiana metoda mechanicznego odspajania skał polega na tym, że w czole urabianego wyrobiska wiercony jest otwór, w którym za pomocą elementu rozpiernającego mocowane jest

ciągnie. Następnie na utwardzone w skale ciągnie oddziałuje siła powodująca odspojenie fragmentu skały od masywu [9]. W przypadku skał nie sformułowano uniwersalnego kryterium wytrzymałościowego. Należy zatem posługiwać się kilkoma kryteriami do oceny wytrzymałości, uwzględniając mechanizmy niszczenia przez ściskanie, ścinanie i rozciąganie [12]. Wybrane kryterium wytrzymałościowe powinno być zgodne z wynikami doświadczeń [8, 11]. Dla zagadnień takich jak skrawanie skał, stateczność kopalnianych wyrobisk pionowych i poziomych, urabianie materiałami wybuchowymi, czy wytrzymałość zakotwienia, opracowano empiryczne zależności pozwalające na rozwiązywanie konkretnych problemów technicznych [1, 2, 8, 10, 12, 13].

Do opisu stanu wytrzymałości skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym i obciążonego siłą przyjęto hipotezę Coulomba-Mohra. Jej podstawowym założeniem jest to, że zniszczenie materiału w złożonym stanie naprężenia zachodzi przez poślizg w płaszczyźnie maksymalnych naprężeń stycznych [5].

Na rysunku 1 przedstawiono założony model zniszczenia skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym.



Rys. 1. Zakładany model zniszczenia skał w otoczeniu ciągnie zamocowanego elementem rozprężnym, P – siła wyrywania, τ – naprężenia styczne do powierzchni ścinania, σ – naprężenia normalne do powierzchni ścinania, φ – kąt płaszczyzny ścinania

Zakładając równomierny rozkład naprężeń, naprężenia normalne i styczne do powierzchni ścinania można wyznaczyć z zależności:

$$\sigma = \frac{N}{F} \quad [MPa]$$

$$\tau = \frac{T}{F} \quad [MPa]$$

gdzie:

N – składowa siły P normalna do powierzchni ścinania, $P \cdot \cos\varphi$ [N],

T – składowa siły P styczna do powierzchni ścinania, $P \cdot \sin\varphi$ [N],

F – pole powierzchni ścinania [mm^2],

φ – kąt płaszczyzny ścinania [$^\circ$].

Według zmodyfikowanego warunku Coulomba-Mohra naprężenia normalne do powierzchni ścinania zwiększają opór ścinania wprost proporcjonalnie do swojej wartości [12].

Rozpatrując zadanie dwuwymiarowe, równanie stanu granicznego Coulomba-Mohra przyjmuje postać (rys. 2):

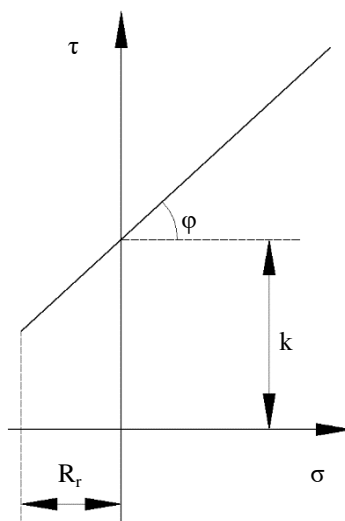
$$|\tau| = k + \sigma \tan \varphi$$

gdzie:

τ – naprężenia styczne do powierzchni ścięcia,

σ – naprężenia normalne do powierzchni ścięcia,

k – kohezja.



Rys. 2. Graficzny obraz hipotezy Coulomba-Mohra - na podstawie [12]

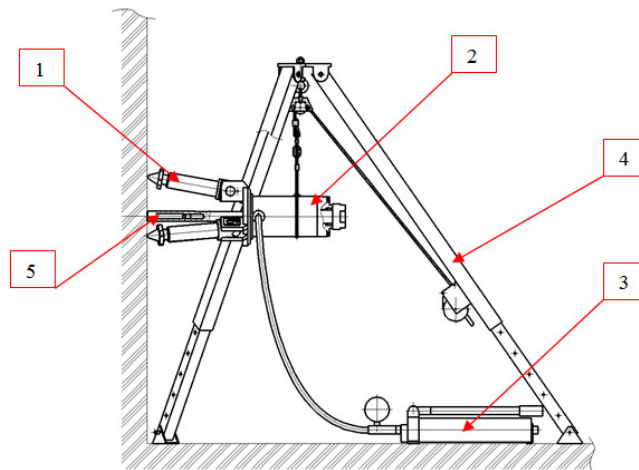
3. Badania mechanizmu niszczenia calizny skalnej

W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG, w ramach projektu europejskiego o akronimie INREQ, prowadzono badania mechanizmu odspajania calizny skalnej przy pomocy urządzenia UDWR-1. Próby prowadzono w warunkach dołowych, w Skansenie Górniczym Królowa Luiza w Zabrze, w wyrobisku kamiennym (piaskowiec). Celem badań było sprawdzenie możliwości zastosowania technologii mechanicznego odspajania skał do drążenia wyrobisk ratowniczych, a w szczególności pomiar siły krytycznej, powodującej odspojenie oraz pomiar geometrii odspajanych fragmentów skalnych.

Urządzenie doświadczalne przeznaczone do badań metody mechanicznego odspajania skał (UDWR-1) składa się z następujących elementów (rys.3) [4]:

- podpora nośna (1),
- cylinder hydrauliczny (2),
- pompa ręczna (3),
- statyw (4),
- kotwa (5).

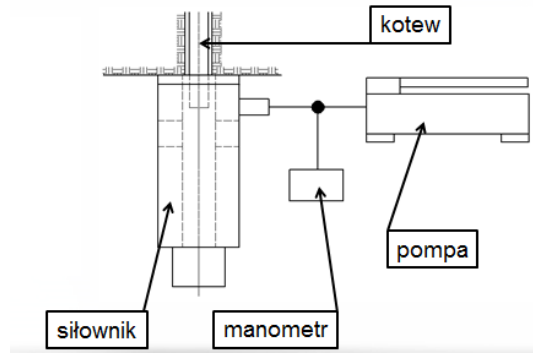
Dodatkowym wyposażeniem są wiertarka oraz żerdź z koronką.



Rys. 3. Model 3D urządzenia do drążenia wyrobisk ratowniczych UDWR-1 [4]

Opracowana w ITG KOMAG technologia mechanicznego odspajania skał z zastosowaniem urządzenia UDWR-1 (rys. 3) wymaga wywiercenia otworu i zakotwienia w nim kotwy (5). Następnie za pomocą statywu (4), na którym zawieszona jest podpora nośna (1) z cylindrem hydraulicznym (2), następuje mocowanie kotwy (5) do cylindra hydraulicznego (2). Po wstępnym rozparciu podpory nośnej (1), można zluźnić linę statywu (4) i za pomocą pompy ręcznej (3) zwiększać ciśnienie w cylindrze (2), aż do odspojenia fragmentu skały.

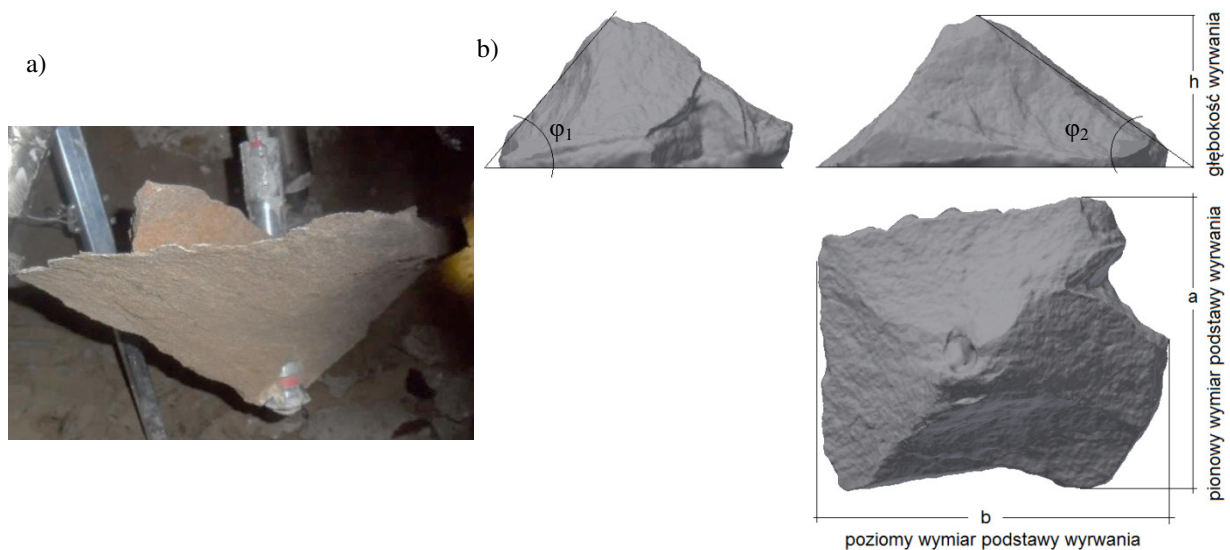
Kotwy mechaniczne zbudowane są najczęściej z gładkiego pręta stalowego, którego jeden koniec zaopatrzony jest w głowicę kotwiącą, natomiast drugi, zewnętrzny koniec, poprzez podkładkę i nakrętkę styka się z powierzchnią calizny skalnej (stropu). Dokręcając nakrętkę nadaje się kotwie wstępny naciąg. Jego zalecana wartość wynosi około 70% nośności kotwy [12]. Mechanizm wrywania kotwy z górotworu potwierdzono badaniami laboratoryjnymi i in situ, mającymi na celu określenie siły zakotwienia i wytrzymałości kotwy. Urządzenia do wrywania kotew charakteryzują się podobną zasadą działania. Na wystającą z otworu końcówkę kotwy zakłada się siłownik hydrauliczny urządzenia, a następnie zwiększa się stopniowo siłę osiową i rejestruje wysuw kotwy z otworu (rys. 4). W ten sposób doprowadza się do zniszczenia pręta lub zniszczenia jego zamocowania w otworze [2, 10, 12]. Budowa i zasada działania urządzenia do wrywania kotew powoduje w materiale skalnym naprężenia ściskające wynikające z podparcia urządzenia o caliznę w bliskiej odległości otworu, w którym zamocowana jest kotwa, jest to istotna różnica w stosunku do badań prowadzonych przy pomocy urządzenia UDWR-1.



Rys. 4. Schemat urządzenia do wykonywania prób wyrywania kotwi - na podstawie: [2, 10, 12]

Istotny wpływ na wartość krytyczną siły P powodującej odspojenie materiału ma powierzchnia odspojenia (powierzchnia boczna stożka, którego wysokość jest uzależniona od głębokości zamocowania kotwy). W ramach projektu przeprowadzono badania mające na celu pomiar krytycznej siły P , powodującej odspojenie skały oraz geometrii odspojenia. Należy podkreślić, że wartość krytycznej siły P jest ograniczona przez wartość siły zrywającej zamocowanie końcówki kotwy w skałę i wytrzymałość ciągną na rozciąganie.

Przeprowadzone badania wykazały, że jest możliwe odspajanie calizny skalnej w formie regularnych stożków. Na rysunku 5a pokazano przykładowy wyrwany stożek skalny.



Rys. 5. Odspojony stożek skalny, a) fotografia, b) model 3D opracowany metodą fotogrametryczną [opracowanie własne]

W trakcie badań osadzano kotwy na różnej głębokości i rejestrowano ciśnienie w siłowniku urządzenia oraz mierzono wymiary geometryczne wyłomu skalnego powstałego w wyniku wyrywania kotwy, wymiary podstawy wyrwania pionowo – a i poziomo – b oraz głębokość wyrwania – h (rys. 5b). Sporządzano również dokumentację fotograficzną oraz filmową obrazującą wykonywanie poszczególnych czynności.

Odspojone fragmenty skalne miały kształt stożków eliptycznych. Różne cechy geometryczne stożków (różne wartości kąta nachylenia płaszczyzny w poziomie – φ_2 i pionie – φ_1) mogły wynikać z anizotropowości materiału. Średni kąt pochylenia powierzchni odspojenia wyniósł $28,3^\circ$ (tab. 1). Kąt pochylenia płaszczyzny odspojenia określono na podstawie wymiarów wylomu. Zarejestrowane maksymalne wartości ciśnienia w siłowniku urządzenia, w odniesieniu do powierzchni roboczej tłoka siłownika, pozwoliły na obliczenie wartości krytycznej siły P [kN]. Wyniki badań i obliczone na ich podstawie wartości zestawiono w tabeli 1.

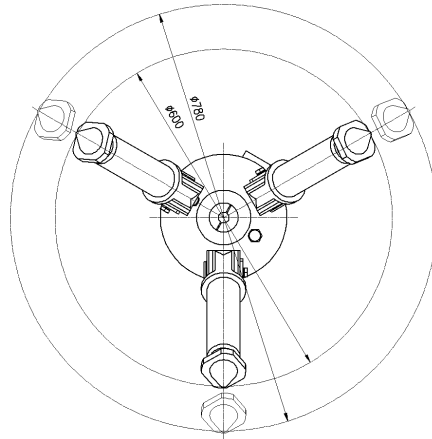
Wyniki badań mechanicznego odspajania skał w warunkach in situ [3]

Tabela 1

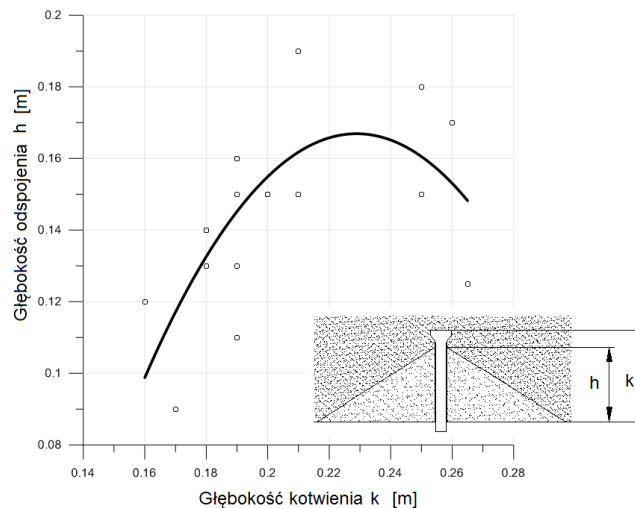
Poz.	Głębokość kotwienia k [m]	Głębokość odspojenia h [m]	Wymiary podstawy wyrwania [m]		Kąt φ_1 [°]	Kąt φ_2 [°]	Siła P [kN]
			pionowy a	poziomy b			
1	0,16	0,12	0,6	0,4	22	31	123,45
2	0,17	0,09	0,35	0,35	27	27	98,76
3	0,18	0,14	0,54	0,71	27	21	115,22
4	0,18	0,13	0,43	0,42	31	32	98,76
5	0,18	0,14	0,55	0,7	27	22	172,83
6	0,19	0,16	0,5	0,7	33	25	90,53
7	0,19	0,11	0,5	0,57	24	21	115,22
8	0,19	0,13	0,5	0,6	28	23	98,76
9	0,19	0,15	0,65	0,55	25	29	172,83
10	0,19	0,16	0,6	0,5	28	33	65,84
11	0,2	0,15	0,6	0,78	27	21	197,52
12	0,2	0,15	0,57	0,51	28	31	181,06
13	0,21	0,15	0,53	0,43	30	35	222,21
14	0,21	0,19	0,7	0,56	29	34	65,84
15	0,25	0,18	0,5	0,6	36	31	82,3
16	0,25	0,15	0,6	0,6	27	27	164,6
17	0,26	0,17	0,55	0,65	32	28	189,29
18	0,265	0,125	0,4	0,36	32	35	205,75
Śr.	0,20	0,14	0,53	0,5	28,5	28,1	136,71

Próby odspajania calizny skalnej za pomocą kotwy osadzonej na głębokości większej niż 0,22 m kilkakrotnie kończyły się zerwaniem kotwy lub jej wyciągnięciem. Było to najprawdopodobniej spowodowane geometrią podpory urządzenia UDWR-1 (rys. 6). Podpora ograniczała wymiary podstawy stożka odspojenia do 0,6 m. Powyżej tego wymiaru podpora powodowała ściskanie odspajanego materiału. Widoczna na rysunku 6 średnica ϕ 0,78 m odnosi się do regulacji długości nóg podpory, która służy głównie do jej dopasowania do nierówności calizny. Podczas prób, gdy dochodziło do zerwania kotwy lub przekroczenia wytrzymałości zakotwienia, siła P była większa od 200 kN. Najczęściej, przy głębokościach kotwienia powyżej 0,22 m, element rozprężny kotwy przesunął się w otworze, a następnie dochodziło do odspojenia stożka o znacznie mniejszej wysokości niż głębokość zakotwienia.

Na rysunku 7 przedstawiono zależność głębokości kotwienia i głębokości odspojenia dla poszczególnych prób (powyżej 0,22 m głębokości zakotwienia nie następował przyrost, lecz spadek głębokości odspojenia).



Rys. 6. Podpora siłownika urządzenia UDWR-1 [3]



Rys. 7. Aproxymacja zależności głębokości kotwienia i odspojenia dla poszczególnych prób mechanicznego odspajania skał [opracowanie własne]

4. Analiza naprężeń krytycznych

Znając wymiary podstawy i wysokość wyrwania obliczono przybliżoną powierzchnię odspojenia, oraz normalną i styczną do tej powierzchni składową siły P . Pozwoliło to na oszacowanie krytycznych naprężeń stycznych i normalnych. Naprężenia normalne do powierzchni odspojenia mieściły się w przedziale $0,16 \div 1,33$ MPa, a naprężenia styczne do powierzchni odspojenia mieściły się w przedziale $0,11 \div 0,72$ MPa (tab. 2).

Wyniki obliczeń naprężeń krytycznych [3]

Tabela 2

Poz.	Składowa N siły P normalna do powierzchni ścinania [N]	Składowa T siły P styczna do powierzchni ścinania [N]	Pole powierzchni bocznej stożka [mm ²]	Naprężenie σ [MPa]	Naprężenie τ [MPa]
1	106911	61725	211502	0,51	0,27
2	85529	49380	108189	0,80	0,43
3	99783	57610	331488	0,30	0,16
4	85529	49380	166289	0,52	0,28
5	149675	86415	166289	0,91	0,49
6	78401	45265	314424	0,25	0,14
7	99783	57610	242245	0,41	0,22
8	85529	49380	261199	0,33	0,18
9	149675	86415	314560	0,48	0,26
10	57019	32920	273426	0,21	0,11
11	171057	98760	402429	0,43	0,23
12	156802	90530	261458	0,60	0,33
13	192439	111105	212010	0,92	0,50
14	57019	32920	361272	0,16	0,09
15	71274	41150	282611	0,25	0,14
16	142548	82300	316116	0,46	0,25
17	163930	94645	323519	0,51	0,28
18	178185	102875	135540	1,33	0,72
Śr.	118394	68355	260254	0,52	0,28

Przeprowadzono również badania laboratoryjne skał pobranych z przodka, w którym prowadzono badania in situ. Badania wytrzymałościowe wykonano w laboratorium Katedry Geomechaniki, Budownictwa Podziemnego i Zarządzania Ochroną Powierzchni Wydziału Górnictwa i Geologii Politechniki Śląskiej, zgodnie z sugestiami Międzynarodowego Towarzystwa Mechaniki Skał (ISRM) i normami dotyczącymi dokładności wykonania próbek [7, 14]. Z bryły piaskowca pobranej podczas badań in situ odwiercono, a następnie oszlifowano próbki walcowe o różnych, w zależności od przeznaczenia, wysokościach h i średnicy d . Wykonano 18 prób wytrzymałościowych: prób obciążania punktowego, oznaczania wytrzymałości granicznej na rozciąganie, wytrzymałości na ścinanie przy ściskaniu i ścinania bezpośredniego. Widok próbek foremnych po zniszczeniu przedstawiono na rysunku 8.



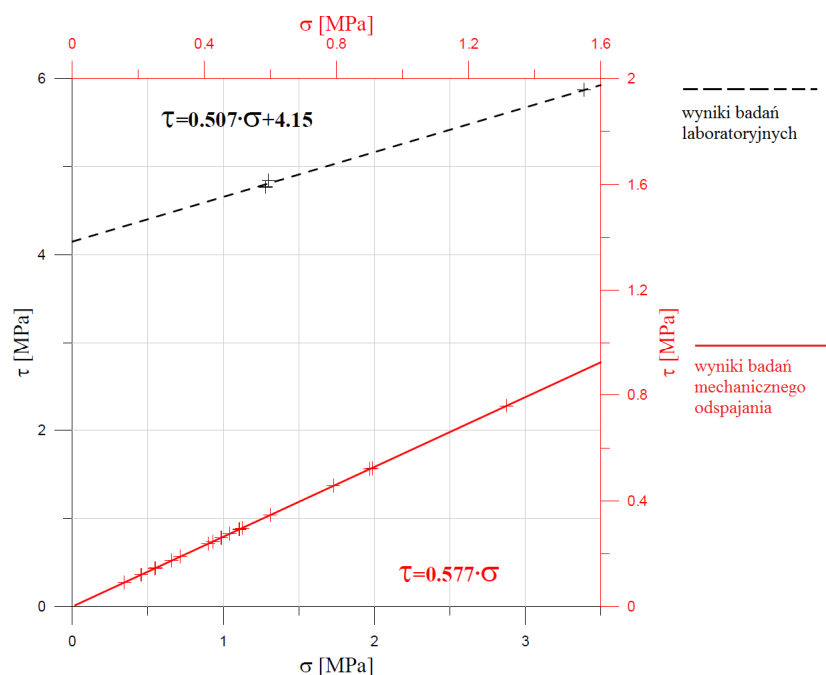
Rys. 8. Widok próbek foremnych piaskowca po przeprowadzeniu prób wytrzymałościowych [14]

Przeprowadzone badania pozwoliły na wyznaczenie [14]:

- wytrzymałości granicznej na jednoosiowe ściskanie, $\sigma_C \approx 20,1$ MPa,
- wytrzymałości granicznej na jednoosiowe rozciąganie, $\sigma_T \approx 1,8$ MPa,
- spójności w próbie ścinania przy ściskaniu, $c \approx 4,2$ MPa,
- spójności w próbie ścinania bezpośredniego $c \approx 2,9$ MPa,
- kąta tarcia wewnętrznego $\varphi = 27^\circ$.

Wartości spójności c i kąta tarcia wewnętrznego φ dla badanego piaskowca oznaczono w próbach ścinania przy ściskaniu. Badania przeprowadzono na próbkach o wymiarach: średnica $d \approx 42$ mm i wysokości $h \approx 50$ mm. Próbki umieszczono w przyrządach do przeprowadzania prób ścinania przy ściskaniu, w maszynach wytrzymałościowych typu EDB-60 [15]. Na podstawie maksymalnych wartości naprężeń normalnych σ i stycznych τ uzyskanych w próbach laboratoryjnych wyznaczono postać równania stanu granicznego Coulomba-Mohra. Wyznaczono również zależność maksymalnych naprężeń stycznych i normalnych otrzymanych podczas badań in situ (tab. 2). Porównanie wyników przedstawiono na rysunku 9. Otrzymane wartości współczynnika tarcia wewnętrznego – $\tan \varphi$, są zbliżone i wynoszą, dla badań laboratoryjnych 0,507 oraz dla badań mechanicznego odspajania 0,577. Wyznaczony kąt tarcia wewnętrznego φ odpowiednio dla badań laboratoryjnych i in situ wynosi $26,88^\circ$ i $29,88^\circ$. Natomiast otrzymano dużą rozbieżność odnośnie wartości spójności materiału – k . Spójność wyznaczona na podstawie prostej Coulomba-Mohra z badań laboratoryjnych wynosi 4,15 MPa, natomiast z badań mechanicznego odspajania jest bliska zeru. Zakładając, że w górotworze spękanym kohezja nie występuje [2], wówczas równanie Coulomba-Mohra przyjmuje postać:

$$|\tau| = \sigma \tan \varphi$$



Rys. 9. Porównanie prostej Coulomba-Mohra dla otrzymanych maksymalnych wartości naprężeń τ i σ z badań laboratoryjnych i badań mechanicznego odspajania

W świetle wyników badań prowadzonych w ramach projektu INREQ można stwierdzić, że znajomość kąta tarcia wewnętrznego materiału pozwala na przybliżone określenie geometrii płaszczyzny odspojenia. Należy mieć jednak na uwadze, że właściwości wytrzymałościowe materiału zależą od kierunku usytuowania tzw. płaszczyzn osłabienia (uwarstwienia, łupliwości itd.) [10], co w bezpośredni sposób wpływa na wielkość kąta tarcia wewnętrznego. Na geometrię płaszczyzny odspojenia, podobnie jak na parametry wytrzymałościowe skał wpływ może mieć również stan naprężenia calizny wynikający z głębokości zalegania skał. Określenie geometrii odspojenia i siły krytycznej podczas wrywania pozwoliło na oszacowanie naprężeń w urabianym materiale.

5. Podsumowanie

Badania przeprowadzone w ramach projektu INREQ pozwoliły określić geometrię odspojenia, co jest niezbędne do opracowania technologii drążenia chodnika o zadanych wymiarach i kształcie, wstępne oszacowanie metryki wiercenia otworów, jak również oszacowanie energochłonności i wydajności urabiania. Zmierzona podczas badań in situ średnia wartość kąta pochylenia powierzchni odspojenia wyniosła $28,3^\circ$, natomiast kąt tarcia wewnętrznego skał wyznaczony w badaniach laboratoryjnych wyniósł 27° . Może to wskazywać, że znajomość kąta tarcia wewnętrznego materiału pozwala na przybliżone określenie geometrii płaszczyzny odspojenia. Są to wyniki badań jednego typu skały (piaskowiec), a zastosowane prototypowe urządzenie badawcze UDWR-1 mogło wprowadzać w badanym materiale nie pożądane naprężenia ściskające wynikające z konstrukcji podpory nośnej. Mając powyższe na uwadze należy, dla określenia geometrii odspojenia, prowadzić dalsze badania w innych przodkach kamiennych, za pomocą urządzenia badawczego o zmodernizowanej konstrukcji. Badania laboratoryjne skał pod kątem wyznaczenia wewnętrznego kąta tarcia, spójności oraz wytrzymałości na rozciąganie pozwalają na odniesienie wyników badań in situ do parametrów skał wyznaczanych w podstawowych próbach wytrzymałościowych. Dalsze badania powinny pozwolić na opracowanie empirycznego modelu niszczenia skał w złożonym stanie naprężenia wywołanym mechanicznym odspajaniem.

Literatura

- [1] Borecki M., Chudek M.: Mechanika górotworu. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1972
- [2] Cała M., Flisiak J., Tajduś A.: Mechanizm współpracy kotwi z górotworem o zróżnicowanej budowie. Biblioteka Szkoły Eksploatacji Podziemnej. Seria z Lampką Górniczą nr 8, Kraków, 2001
- [3] Cebula D.: Wyniki badań dołowych technologii mechanicznego odspajania skał. Nowoczesne metody eksploatacji węgla i skał zwięzłych. Monografia, Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica, Kraków 2015 s. 212-222
- [4] Cebula D., Kalita M., Prostański D.: Próby dołowe technologii drążenia tuneli ratowniczych metodą niszczenia spójności skał. Maszyny Górnicze 2015 nr 1 s. 3-7
- [5] Derski W., Izbicki R., Kisiel I., Mróz Z.: Mechanika techniczna, Tom VII. Mechanika skał i gruntów. Państwowe Wydawnictwo Naukowe, Warszawa, 1982
- [6] Drwięga A., Cebula D., Kalita M. i inni: Sprawozdanie za rok 2014 z realizacji projektu INREQ ITG KOMAG. Gliwice 2014 (materiały niepublikowane)

- [7] ISRM, Commission on Testing Methods: The Complete ISRM Suggested Methods for Rock Characterization, Testing and Monitoring:1974-2006. Edited by R. Ulusay and J.A. Hudson. Ankara, Turkey 2007
- [8] Jonak J., Podgórski J.: Numeryczne badania procesu skrawania skał izotropowych. Lubelskie Towarzystwo Naukowe, Lublin, 2006
- [9] Kalita K.; Prostański D.: Technologia drążenia tuneli ratowniczych metodą niszczenia spójności skał. Przegląd Górniczy 2012 nr 12 s. 86-91
- [10] Kidybiński A.: Podstawy geotechniki kopalnianej. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1982
- [11] Kłeczek Z.: Geomechanika górnicza. Śląskie Wydawnictwo Techniczne, Katowice, 1994
- [12] Pytel W.: Geomechaniczne problemy doboru obudowy kotwowej dla wyrobisk górniczych. KGHM CUPRUM, Wrocław, 2012
- [13] Sałustowicz A.: Zarys mechaniki górotworu. Wydawnictwo „Śląsk”, Katowice, 1986
- [14] Tomiczek K.: Sprawozdanie z badań laboratoryjnych piaskowca z ZKWK „Królowa Luiza”. Laboratorium Mechaniki Skał KGBPiZOP, Gliwice, 2015 (materiały niepublikowane)
- [15] Tomiczek K.: Badania wytrzymałości skał na ścinanie. Wydawnictwo Górnicze, Kwartalnik Budownictwo Górnicze i Tunelowe, nr 3, Katowice 2008, s. 11-20

Czy wiesz, że

... Węgiel kamienny jest piątym największym eksportowym surowcem Rosji. Rosja plasuje się na trzecim miejscu, tuż przed Indonezją i Australią, pod względem eksportu węgla. W 2015 roku eksport przyniósł 9.5 biliona dolarów, a w pierwszym kwartale 2016 roku – 1.9. Rosyjskie zakłady wydobywcze preferują eksport niż dostarczanie węgla na krajowy rynek, nawet kosztem efektywności. W 2015 roku wyeksportowano z Rosji 155 milionów ton węgla, co stanowi 40% całego wydobycia.

World Coal 7/2016

Innowacyjny system zraszania dla wyrobisk ścianowych

dr inż. Dominik Bałaga
mgr inż. Michał Siegmund
dr inż. Dariusz Prostański
dr inż. Marek Kalita
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W artykule przedstawiono innowacyjny system zraszania typu KOMAG, przeznaczony do ograniczania zapylenia generowanego podczas urabiania kombajnami w systemach ścianowych. Zaprezentowano jego budowę, parametry pracy oraz zasadę działania. Omówiono wyniki badań jego skuteczności działania przeprowadzonych w warunkach rzeczywistych.

Abstract:

Innovative spraying system of KOMAG type, designed for reduction of airborne dust generated during longwall shearer operation in longwall panel is presented. Design of the spraying system, its operational parameters and principle of operation are described. The effectiveness of its operation in real conditions is discussed.

Słowa kluczowe: górnictwo, zagrożenia naturalne, zapylenie, zraszanie powietrzno-wodne

Keywords: mining industry, natural hazards, airborne dust, air-and-water spraying

1. Wprowadzenie

Zapylenie powietrza w górnictwie węgla kamiennego stanowi jedno z podstawowych zagrożeń mogących skutkować:

- katastrofą górnictw, spowodowaną wybuchem pyłu węglowego,
- chorobą zawodową (pylica płuc), wskutek ekspozycji organizmów ludzkich na długoterminowe działania pyłu (zwłaszcza krzemionki).

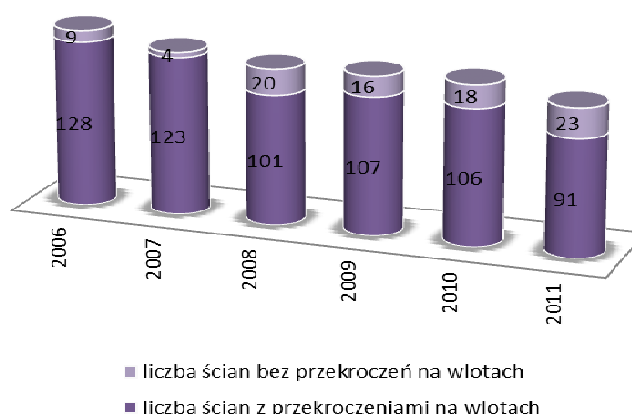
Stosowane w kombajnach ścianowych instalacje zraszające mają na celu ograniczenie zapylenia w miejscu pracy operatorów kombajnu oraz operatorów sekcji obudowy zmechanizowanej. Wyniki badań wykazują, że stężenia zapylenia mierzone na wylocie z wyrobiska ścianowego oraz w wyrobiskach przyległych osiągają znaczne wartości, niejednokrotnie przekraczające najwyższe dopuszczalne wartości stężenia (NDS) [5].

Również pylica płuc w górnictwie węgla kamiennego jest ciągle niepokojącym zjawiskiem, co potwierdzają dane Wyższego Urzędu Górniczego [4] (rys. 1.).



Rys. 1. Liczba stwierdzonych przypadków pylicy u czynnych zawodowo i byłych pracowników kopalń węgla kamiennego w latach 2011-2015 [4]

Fakt przekraczania dopuszczalnego stężenia zapylenia w wyrobiskach chodnikowych, doprowadzających powietrze do wyrobisk ścianowych powoduje, że już na wlotach ścian występuje jego wysoki poziom (rys. 2).



Rys. 2. Liczba ścian, w których występuje przekroczenie dopuszczalnych wartości pyłów szkodliwych na ich wlotach [5]

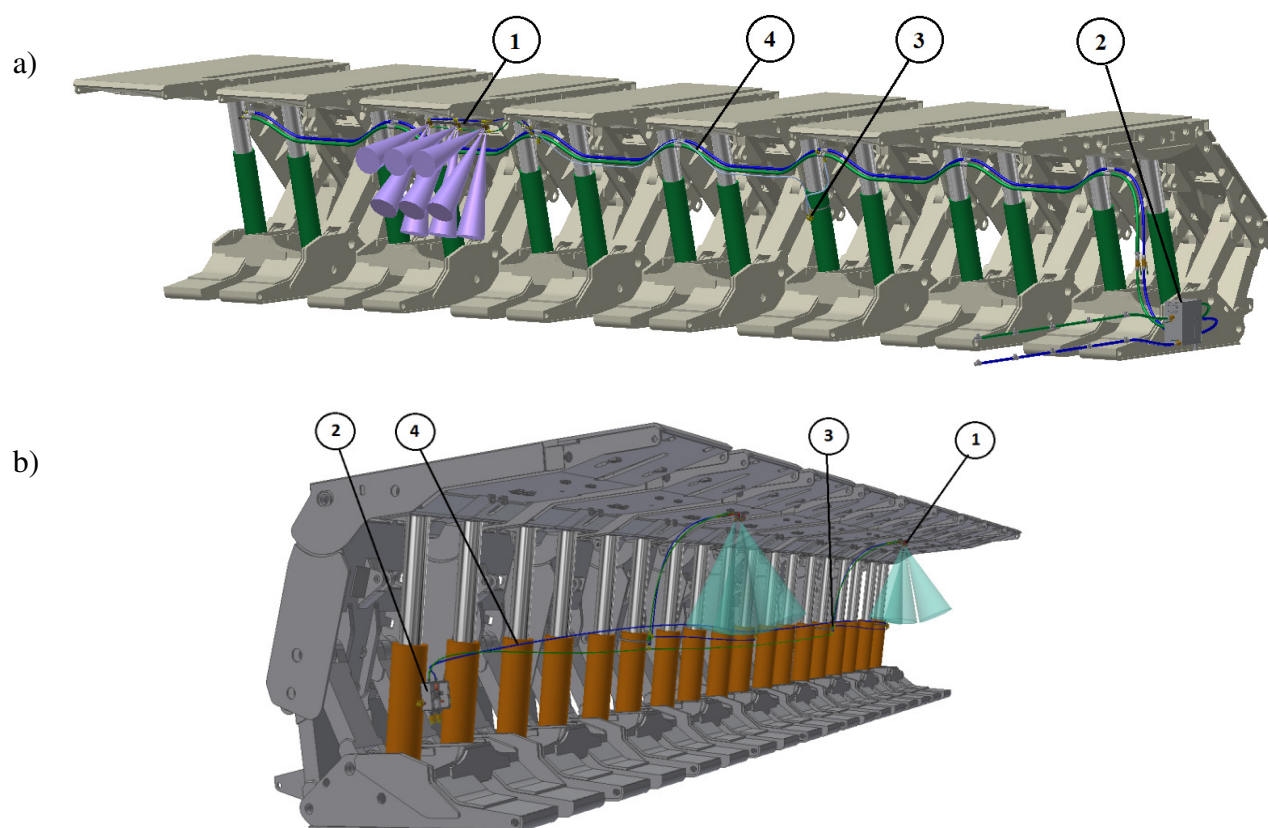
Powyższe zagrożenia są inspiracją do prowadzenia prac badawczych zmierzających do ograniczenia ich skutków. W Instytucie Techniki Górniczej KOMAG realizowane są prace dotyczące wdrożeń innowacyjnych rozwiązań systemów zraszania, mających na celu poprawę komfortu i bezpieczeństwa pracy w wyrobiskach ścianowych oraz w chodnikach nadścianowych (w prądzie zużytego powietrza) [1]. Ich efektem jest powietrzno-wodny system zraszania typu KOMAG [2, 6, 7], charakteryzujący się wysoką skutecznością ograniczania zapylenia oraz niezawodnością działania i energooszczędnością. System może być stosowny w dwóch wariantach, w zależności od miejsca zabudowy. W wariantcie typu KOMAG, system przeznaczony jest do zabudowy w ścianach wysokich, natomiast w wariantcie typu KOMAG-N, dedykowany jest do ścian niskich.

2. Budowa systemu

System zraszania powietrzno-wodnego składa się z powtarzalnych baterii zraszających (1), umieszczonych w ścianie na wybranych sekcjach obudowy zmechanizowanej (rys. 3). Główne elementy systemu zraszania to:

1. baterie zraszające,
2. zespół zasilający,
3. elementy sterujące,
4. magistrala zasilająca.

Baterie zraszające montowane są pod stropnicą sekcji obudowy zmechanizowanej i mają za zadanie wytworzenie strumieni powietrzno-wodnych skierowanych w przestrzeń roboczą kombajnu (rys. 4). Bateria składa się z trzech korpusów, montowanych na panelu nośnym. W każdym z korpusów zabudowane są trzy dwuczynnikiowe dysze (dziewięć dysz w baterii zraszającej), do których dostarczana jest woda oraz sprężone powietrze. W przewodzie dostarczającym wodę zainstalowany jest regulator przepływu, utrzymujący wymagane natężenia przepływu. Układ zasilający zapewnia stabilność parametrów dostarczanych mediów oraz ogranicza ich nadmierne zużycie.



Rys. 3. Główne elementy powietrzno-wodnego systemu zraszania: a) typ KOMAG, b) typ KOMAG-N [6, 7]



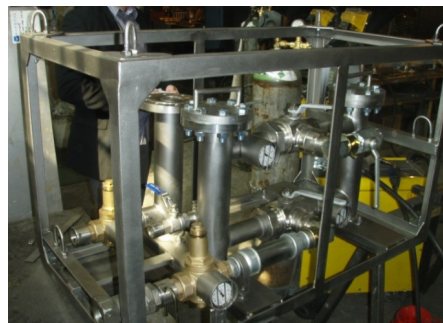
Rys. 4. Bateria zraszająca powietrzno-wodnego systemu zraszania typu KOMAG zamontowana pod stropnicą sekcji obudowy zmechanizowanej [10]

W systemie typu KOMAG-N zastosowano baterie zraszające zamontowane przegubowo na płycie montażowej, pod stropnicą sekcji obudowy zmechanizowanej (rys. 5). Baterie zraszające dzięki niewielkim gabarytom, które w zależności od ułożenia dysz wynoszą od 35 do 110 mm, przystosowane są do wytwarzania strumieni zraszających w ścianach niskich. Bateria zraszająca wyposażona jest w kolektor zasilający i rozdzielający wodę na trzy elastyczne przewody. Następnie woda dostarczana jest do trzech dysz dwuczynninkowych, zabudowanych w zespole zraszającym, zasilanym sprężonym powietrzem. Dysze wkręcone w złącza obrotowe umożliwiają zmianę kierunku działania strumienia każdej z dysz o kąt w zakresie $\pm 45^\circ$.



Rys. 5. Bateria zraszająca powietrzno-wodnego systemu zraszania typu KOMAG-N zamontowana pod stropnicą sekcji obudowy zmechanizowanej [10]

W obu typach systemu, baterie zraszające wytwarzają strumienie powietrzno-wodne skierowane w stronę czoła ściany, obejmując swym zasięgiem większość powierzchni przekroju poprzecznego wyrobiska. Liczba zamontowanych baterii systemu uzależniona jest od długości ściany oraz poziomu zapylenia. System wyposażono w magistralę powietrzno-wodną oraz zespół zasilający, znajdujący się w chodniku przyścianowym. Magistrala dostarcza wodę i sprężone powietrze z zespołu zasilającego do dysz powietrzno-wodnych, natomiast zespół zasilający służy do ustawiania wartości parametrów mediów za pomocą filtrów, zaworów redukcyjnych oraz magnetyzera (rys. 6).



Rys. 6. Zespół zasilający powietrzno-wodnego systemu zraszania [10]

Elementy sterujące systemem, umiejscowione są kilka sekcji wcześniej, przed każdą z baterii zraszających, co umożliwia sterowanie otwarciem i zamknięciem przepływu wody i sprężonego powietrza przed zbliżeniem się do baterii zraszających. Załączanie i wyłączanie zraszania realizowane jest poprzez zawór odcinający, umiejscowiony na przewodzie doprowadzającym wodę (rys. 7).

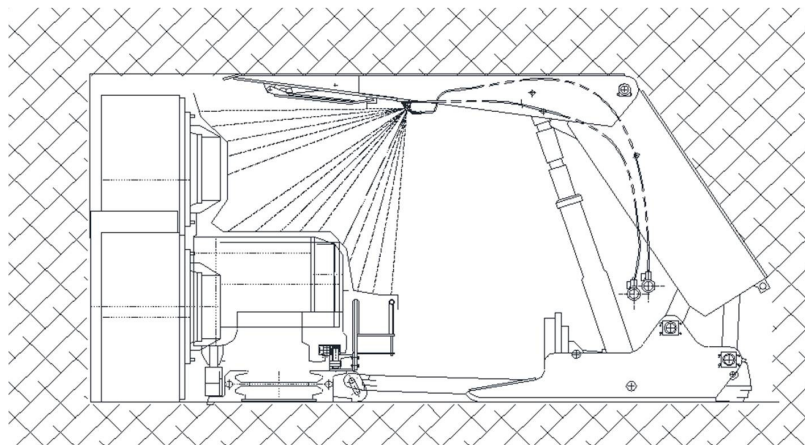


Rys. 7. Zawór odcinający, sterujący przepływem wody i sprężonego powietrza [10]

Obecność odpowiedniej wartości ciśnienia wody, pojawiającej się w gnieździe pilotującym, otwiera zawór zwrotny sterowany, pozwalając na swobodny przepływ sprężonego powietrza, równocześnie z przepływem wody, do powietrzno-wodnej baterii zraszającej. Powietrzno-wodny system zraszania typu KOMAG oraz KOMAG-N, zbudowany standardowo jest z 5 do 10 baterii zraszających. Baterie mocowane są na stropnicach sekcji obudowy zmechanizowanej co 15 do 30 m.

3. Zasada działania systemu

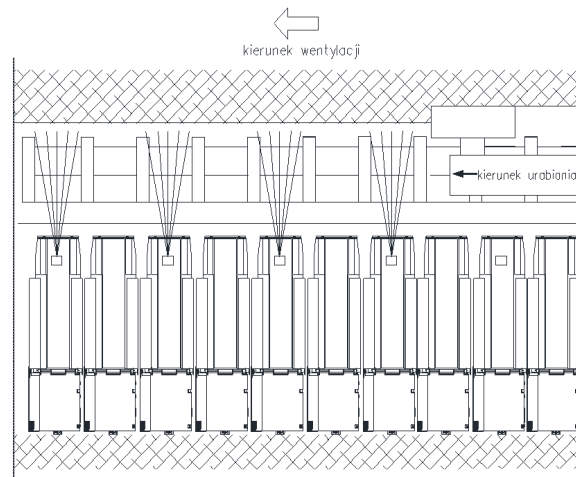
Media zraszające, woda oraz sprężone powietrze, wcześniej oczyszczane za pomocą filtrów, dostarczane są przewodami do zespołu zasilającego (poz. 2, rys. 3). Następnie redukowane jest ich ciśnienie do wartości $0,3 \div 0,6$ MPa i dostarczane są do magistrali zasilającej (poz. 4, rys. 3). Z magistrali są one kierowane do układu sterowania (poz. 3, rys. 3) (woda kierowana jest do zaworu odcinającego, zlokalizowanego w pobliżu stojaka hydraulicznego sekcji obudowy zmechanizowanej). Przesterowanie zaworu odcinającego umożliwia przepływ wody do baterii zraszającej znajdującej się na określonej sekcji obudowy (poz. 1, rys. 3). Woda dostarczana jest także do regulatora przepływu umiejscowionego przed baterią zraszającą oraz do zaworu zwrotnego sterowanego, który wymusza przepływ sprężonego powietrza do baterii zraszającej. Sprężone powietrze dostarczane jest do zaworu zwrotnego wprost z magistrali. Po dostarczeniu obu mediów do baterii, w dyszach dwuczynnika wytwarzane są strumienie zraszające (rys. 8).



Rys. 8. Teoretyczny zasięg strumieni mgły powietrzno-wodnej [6, 7]

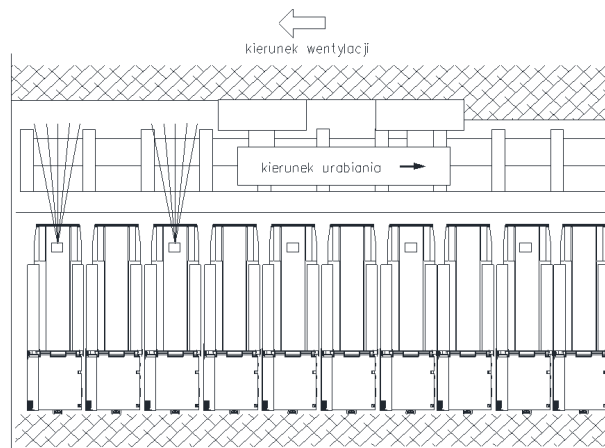
Strumienie mgły powietrzno-wodnej strącają część pyłu przemieszczającego się z prądem powietrza przez wyrobisko ścianowe, a nie strącone, lecz zwilżone cząsteczki pyłu, tworzą aglomeraty o zwiększonej masie, skracając swój czas opadania. Instalacja zraszania powietrzno-wodnego do strącania i redukcji pyłu charakteryzuje się niskim zużyciem wody ($0,5 \div 2,0$ dm³/min dla jednej baterii zraszającej) oraz niewielką ilością sprężonego powietrza (ok. 250 dm³/min dla jednej baterii zraszającej). System przemieszczany jest wraz z sekcjami obudowy zmechanizowanej z postępowaniem ścian.

Algorytm układu sterowania, pozwala na oszczędne i racjonalne stosowanie mediów, w aspekcie komfortu pracy. Obsługa kombajnu podczas urabiania calizny węglowej zgodnie z kierunkiem przepływu powietrza przez wyrobisko ścianowe, wyłącza kolejne baterie zraszające w ścianie, do których zbliża się kombajn (rys. 9). Kombajnści znajdują się zatem cały czas w prądzie „czystego” powietrza. Instalacja zraszająca systemu znajdująca się przed kombajnem redukuje pył generowany m.in. przez organy urabiające oraz sekcje obudowy zmechanizowanej (rabowanie i przesuwanie).



Rys. 9. Sposób wyłączenia baterii zraszających, w przypadku urabiania calizny węglowej w kierunku przepływu powietrza [6, 7]

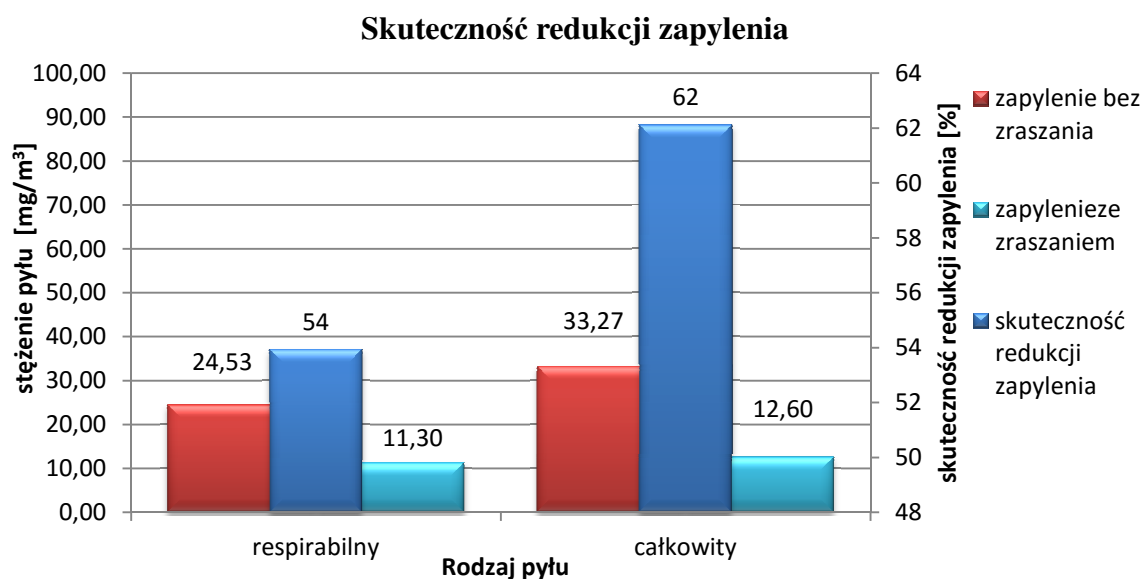
Urabianie calizny węglowej w kierunku przeciwnym do kierunku przepływu powietrza, wymaga załączania kolejnych baterii zraszających, w miarę przemieszczania się kombajnu. Zlokalizowanie zaworu odcinającego, w odpowiedniej odległości od baterii zraszającej, pozwala na uniknięcie kontaktu obsługi kombajnu ze strumieniem zraszającym (rys. 10).



Rys. 10. Sposób włączania baterii zraszających, w przypadku urabiania calizny węglowej w kierunku przeciwnym do przepływu powietrza [6, 7]

4. Badania skuteczności działania systemu

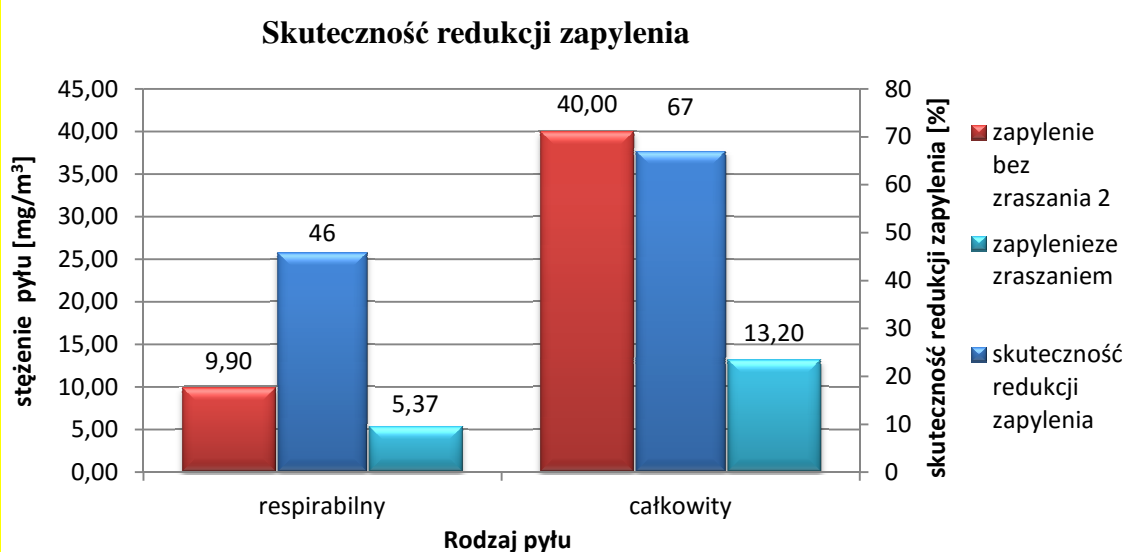
Powietrzno-wodny system zraszania typu KOMAG oraz KOMAG-N wdrożono w ścianach ZG Sobieski oraz KWK Budryk [2]. W systemie zraszania typu KOMAG, zabudowano dziewięć baterii zraszających umieszczonych na co dwudziestą sekcji obudowy zmechanizowanej. Przeprowadzono badania skuteczności działania systemu, przy pomocy pyłomierzy grawimetrycznych (pomiar frakcji całkowitej i respirabilnej pyłu CIP-10I oraz CIP-10R), a pomiary zapylenia wykonano w odległości 6 m od końca ściany. Mierzono poziom zapylenia bez i z użyciem systemu zraszania typu KOMAG, a następnie określano jego skuteczność działania. Wyniki pomiaru stężenia pyłu przy włączonym i wyłączonym systemie oraz uzyskaną skuteczność redukcji zapylenia całkowitego i respirabilnego przedstawiono na rysunku 11.



Rys. 11. Stężenie pyłu całkowitego i respirabilnego oraz skuteczność redukcji zapylenia przez system KOMAG [8]

Badania wykazały spadek stężenia pyłu całkowitego i respirabilnego przy działającej instalacji systemu. Stężenie pyłu całkowitego przy włączonej instalacji wynosiło $12,6 \text{ mg}/\text{m}^3$, i było niższe o $20,57 \text{ mg}/\text{m}^3$ od stężenia przy wyłączonym systemie zraszania. Skuteczność systemu w ograniczaniu zapylenia całkowitego wyniosła $62,12\%$. Analogicznie, określono stężenie pyłu respirabilnego, które przy włączonej instalacji wynosiło $11,3 \text{ mg}/\text{m}^3$, a przy wyłączonym systemie $24,53 \text{ mg}/\text{m}^3$. Skuteczność redukcji zapylenia respirabilnego przez system zraszania w ścianie typu KOMAG wyniosła $53,94\%$.

System zraszania typu KOMAG-N, przeznaczony dla ścian niskich, zainstalowano w ścianie wydobywczej KWK Budryk (zabudowano trzy baterie zraszające). Badania stężenia pyłu, wykonano w odległości 3 m od końca ściany. Wyniki pomiaru stężenia pyłu przy włączonym i wyłączonym systemie oraz uzyskaną skuteczność redukcji zapylenia całkowitego i respirabilnego przedstawiono na rysunku 12.



Rys. 12. Stężenie pyłu całkowitego i respirabilnego oraz skuteczność redukcji zapylenia przez system KOMAG-N [9]

Wyniki badań zapylenia z włączonym systemem zraszania typu KOMAG-N, wykazały redukcję zapylenia całkowitego i respirabilnego odpowiednio o 67% i 45,79% w odniesieniu do zapylenia zmierzonego przy wyłączonej instalacji zraszającej. Stężenie pyłu całkowitego przy włączonej instalacji wyniosło $13,2 \text{ mg/m}^3$, a przy wyłączonej 40 mg/m^3 . Stężenie pyłu respirabilnego spadło z $9,9 \text{ mg/m}^3$, przy wyłączonym systemie, do $5,37 \text{ mg/m}^3$, przy działającej instalacji zraszającej systemu typu KOMAG-N.

5. Podsumowanie

Wdrożony system powietrzno-wodnego zraszania typu KOMAG w wyrobisku ścianowym ZG Sobieski oraz typu KOMAG-N w KWK BUDRYK, jest innowacyjnym rozwiązaniem, nie stosowanym dotychczas w polskim górnictwie. System charakteryzuje się niewielkim poborem wody zraszającej ($4,5 \div 18,0 \text{ dm}^3/\text{min}$) oraz niewielką ilością sprężonego powietrza ($2,5 \text{ m}^3/\text{min}$). Prawidłowy sposób eksploatacji instalacji nie powoduje styczości obsługi kombajnu ze strumieniami zraszającymi.

System w znacznym stopniu przyczynił się w obu przypadkach wdrożenia do poprawy bezpieczeństwa oraz komfortu pracy załóg górniczych. Stosowanie systemu KOMAG, może ograniczyć ryzyko zachorowania na pylicę płuc oraz możliwość wystąpienia niebezpieczeństwa wybuchu pyłu węglowego. Skuteczność w redukcji zapylenia całkowitego i respirabilnego wyniosła ponad 50%. System zraszania poprawił warunki pracy załogi pracującej w ścianie, jak również w wyrobiskach, które odprowadzały zużyte powietrze ze ściany. Dodatkową zaletą zastosowanych systemów zraszania typu KOMAG był wzrost zawilgocenia osiadłego pyłu w chodniku nadścianowym, dzięki czemu możliwe było zwiększenie czasu między kolejnymi omywaniami wyrobiska chodnikowego, zabezpieczającymi przed wybuchem pyłu węglowego (mniejsze koszty zużycia wody) [3]. Innowacyjność oraz efekty działania systemu zostały docenione w konkursie WUG „Z INNOWACJĄ BEZPIECZNIEJ W GÓRNICTWIE - ZWALCZANIE ZAPYLENIA ORAZ ZAGROŻENIA WYBUCHEM PYŁU WĘGLOWEGO”, podczas którego ścianowy system zraszania typu KOMAG nagrodzono dyplomem.

Literatura

- [1] Prostański D., Bałaga D., Siegmund M., Urbanek A.: Ograniczenie zapylenia w kopalniach z wykorzystaniem powietrzno-wodnych urządzeń zraszających Bryza. Materiały na konferencję: XXII Szkoła Eksploatacji Podziemnej 2013, Kraków, 18-22 lutego 2013 s. 1-12
- [2] Prostański D.: Powietrzno-wodne urządzenia zraszające zmniejszające zapylenie w ścianach węglowych. KOMTECH 2013, Innowacyjne techniki i technologie dla górnictwa. Bezpieczeństwo - Efektywność - Niezawodność, Instytut Techniki Górniczej KOMAG, Gliwice 2013 s. 189-199; 0,71 ark. wyd., ISBN 978-83-60708-78-1
- [3] Prostański D.: Ocena intensywności osiadania pyłu węglowego w wyrobiskach górniczych z wykorzystaniem modeli empirycznych. Materiały na konferencję: Górnicze Zagrożenia Naturalne 2014, XXI Międzynarodowa Konferencja Naukowo-Techniczna "Zagrożenia naturalne a bezpieczne i efektywne kopalnie", Targanice k/Żywca, 4-7 listopada 2014 s. 1-10

- [4] Ocena stanu bezpieczeństwa pracy, ratownictwa górniczego oraz bezpieczeństwa powszechnego w związku z działalnością górniczo – geologiczną w 2015 roku. Wyższy Urząd Górniczy, Katowice 2016 r.
- [5] Kalus A.: Stan bezpieczeństwa i higiena pracy w górnictwie w 2011r. (Broszura). Wyższy Urząd Górniczy, Katowice, kwiecień 2012 r.
- [6] Bałaga D., i inni: Praca statutowa. Ścianowy system zraszania powietrzno-wodnego typu KOMAG, ITG KOMAG, Gliwice 2013 r. (materiały niepublikowane)
- [7] Bałaga D., i inni: Praca statutowa. System zraszania powietrzno-wodnego typu KOMAG-N, ITG KOMAG, Gliwice 2013 r. (materiały niepublikowane)
- [8] Bałaga D., i inni: Praca statutowa. Ocena skuteczności działania systemu zraszania powietrzno-wodnego typu KOMAG w ZG Sobieski, ITG KOMAG, Gliwice 2013 r. (materiały niepublikowane)
- [9] Bałaga D., i inni: Praca statutowa. Ocena skuteczności działania systemu zraszania powietrzno-wodnego typu KOMAG-N w KWK Budryk, ITG KOMAG, Gliwice 2013 r. (materiały niepublikowane)
- [10] Dokumentacja fotograficzna ITG KOMAG

Czy wiesz, że

... Węgiel brunatny i kamienny są najważniejszymi paliwami energetycznymi na świecie. W skali globalnej, 30% zapotrzebowania na energię jest pokrywana właśnie przez węgiel. Zużycie energii i zapotrzebowanie na te surowce energetyczne rośnie, zwłaszcza ze stałym wzrostem światowej populacji i rozwoju przemysłu gospodarek wschodzących. Na całym świecie wydobywa się ok. 8 bilionów ton węgla rocznie.

AT Mineral Processing 7-8/2016

Układy sterujące wąskotorowych lokomotyw powierzchniowych

mgr inż. Marek Majewski
mgr inż. Hubert Suffner
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W artykule zaprezentowano rozwój układów sterowania wąskotorowych lokomotyw powierzchniowych z napędem spalinowym związany z wprowadzaniem autonomicznych układów sterowania. Omówiono ich przykładowe rozwiązania spełniające funkcje: zasilające, zabezpieczające, kontrolne i zarządzające.

Abstract:

Development of the control systems for narrow-gauge surface locomotives after implementation of autonomous control systems is presented. Sample solutions with feeding, protecting and controlling functions are discussed.

Słowa kluczowe: wąskotorowa lokomotywa spalinowa; układ sterujący, monitorowanie parametrów pracy

Keywords: narrow-gauge diesel locomotive, control system, monitoring of operational parameters

1. Wstęp

Wąskotorowe lokomotywy powierzchniowe są przeznaczone do prac na otwartych przestrzeniach zakładów górniczych, hutniczych, w cegielniach oraz w innych zakładach produkcyjnych. W lokomotywach wąskotorowych, w większości, są stosowane napędy spalinowe.

Zgodnie z obowiązującymi przepisami [5] ich użytkowanie, wymaga stosowania układów sterujących i kontrolujących, wpływających na bezpieczeństwo pracy. W maszynach tych, były stosowane do tej pory, urządzenia sterownicze oraz kontrolne, oparte przede wszystkim na przełącznikach oraz na wskaźnikach analogowych.

Konfiguracje układu sterowania do konkretnej maszyny były dostosowane do sposobu przekazywania napędu z silnika spalinowego na koła jezdne, realizowanego poprzez:

- zmiennik momentu (przekładnia mechaniczna i sprzęgło hydrokinetyczne),
- układ hydrostatyczny (pompy i silniki hydrauliczne),
- przekładnię elektryczną (silnik spalinowy sprzęgnięty trwale z generatorem synchronicznym lub prądu stałego oraz elektryczne silniki napędowe zarówno asynchroniczne, jak i prądu stałego).

W niniejszym artykule omówiono przykładowe układy sterujące lokomotyw powierzchniowych produkowanych w Polsce, na podstawie dokumentacji opracowanej w KOMAG-u. Zaprezentowano również kierunki ich rozwoju w oparciu o układy autonomiczne.

2. Układy sterujące wąskotorowych lokomotyw stosowanych na powierzchni kopalń

Prace rozwojowe nad wąskotorowymi lokomotywami powierzchniowymi podjęto w KOMAG-u w latach 80-tych XX wieku. W tym okresie w przemyśle wydobywczym istniało zapotrzebowanie na maszyny tego typu mające zastąpić dotychczas eksploatowane, między innymi typu WLs-40, produkowane przez „FABLOK” Chrzanów oraz Zakłady Cegielskiego w Poznaniu.



Rys. 1. Widok wnętrza kabiny lokomotywy WLs-40 [1]

Dokumentację lokomotywy WLs40 opracowano w Biurze Technicznym Fabryki Lokomotyw „FABLOK” w Chrzanowie w 1950 r. na bazie, produkowanej przed wojną, lokomotywy 1DK (niemieckiej firmy Deutz). W skład napędu wchodził silnik wysokoprężny S64L o mocy nominalnej 40 KM (moc szczytowa wynosiła 44 KM), produkowany w Andrychowie, połączony z czterobiegową skrzynią, wytwarzaną również na licencji niemieckiej firmy Deutz (rys. 1 i 2).



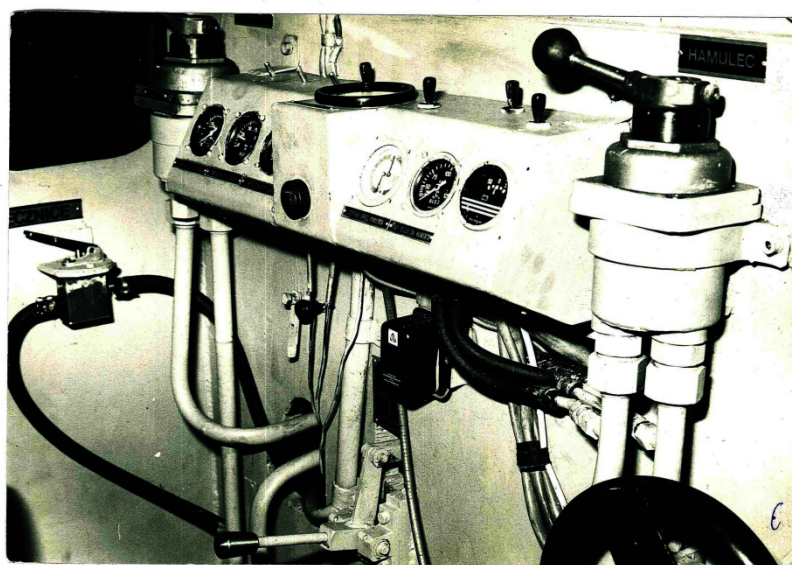
Rys. 2. Lokomotywa WLs-40 [1]

Napęd na koła był przenoszony za pomocą ślepego wału z korbami Halla i wiązarów (poziomych drągów stalowych łączących czop korbowy koła napędzanego silnikiem z czopami korbowymi kół napędowych). Lokomotywy WLS-40 stosowano głównie na trasach kolei przemysłowych, w cegielniach, kopalniach, cukrowniach i innych zakładach, rzadziej w zakładach leśnych. Niewielka ich ilość używana była przez wojsko.

Pierwszą konstrukcję lokomotyw o symbolu WLP-85 (rys. 3 i 4) opracowano w KOMAG-u w połowie lat 80-tych ubiegłego wieku. Lokomotywę o masie 10 ton wyposażono w wysokoprężny silnik firmy ANDORIA o mocy 80 kW, z rozruchem elektrycznym, przekładnią hydrokinetyczną i rewersyjną. Przekazanie napędu z przekładni rewersyjnej na zestawy kołowe odbywało się za pomocą wałów przegubowych i przekładni kątowych [8].



Rys. 3. Lokomotywa WLP-85 [9]



Rys. 4. Pulpit sterowniczy lokomotywy WLP-85 [7]

Wszystkie czynności związane ze sterowaniem pracą lokomotywy wykonywał manualnie jej operator, z wykorzystaniem zespołu dźwigni i przycisków. Pulpit sterowniczy znajdował się w kabinie maszynisty. Umieszczono w nim trakometr z obrotomierzem i licznikiem motogodzin oraz wskaźniki: temperatury cieczy chłodzącej silnik, ładowania prądnicy, ciśnienia oleju w silniku spalinowym oraz łączniki elektryczne do sterowania wyposażeniem elektrycznym maszyny.

Sterowanie pracą lokomotywy WLP-85 obejmowało następujące funkcje:

- przestawienie dźwigni wolnych obrotów w położenie pracy,
- uruchomienie silnika spalinowego,
- sprawdzenie poprawności pracy silnika i innych zespołów lokomotywy,
- włączenie oświetlenia drogowego według zamierzonego kierunku jazdy,
- włączenie hamulca manewrowego,
- zwolnienie hamulca postojowego,
- włączenie sprzęgła (odłączenie przekładni rewersyjnej od silnika),
- wybór kierunku jazdy w przekładni rewersyjnej,
- wyłączenie hamulca manewrowego z jednoczesnym włączeniem sprzęgła,
- jazda w wybranym kierunku – prędkość regulowana obrotami silnika,
- hamowanie hamulcem manewrowym, uruchamianie piasecznic, nadawanie sygnałów dźwiękowych,
- zatrzymywanie lokomotywy poprzez:
 - obniżanie obrotów silnika,
 - włączenie hamulca manewrowego,
 - wyłączenie sprzęgła i ustawienie dźwigni kierunku jazdy w pozycję „0”,
 - włączenie hamulca postojowego.

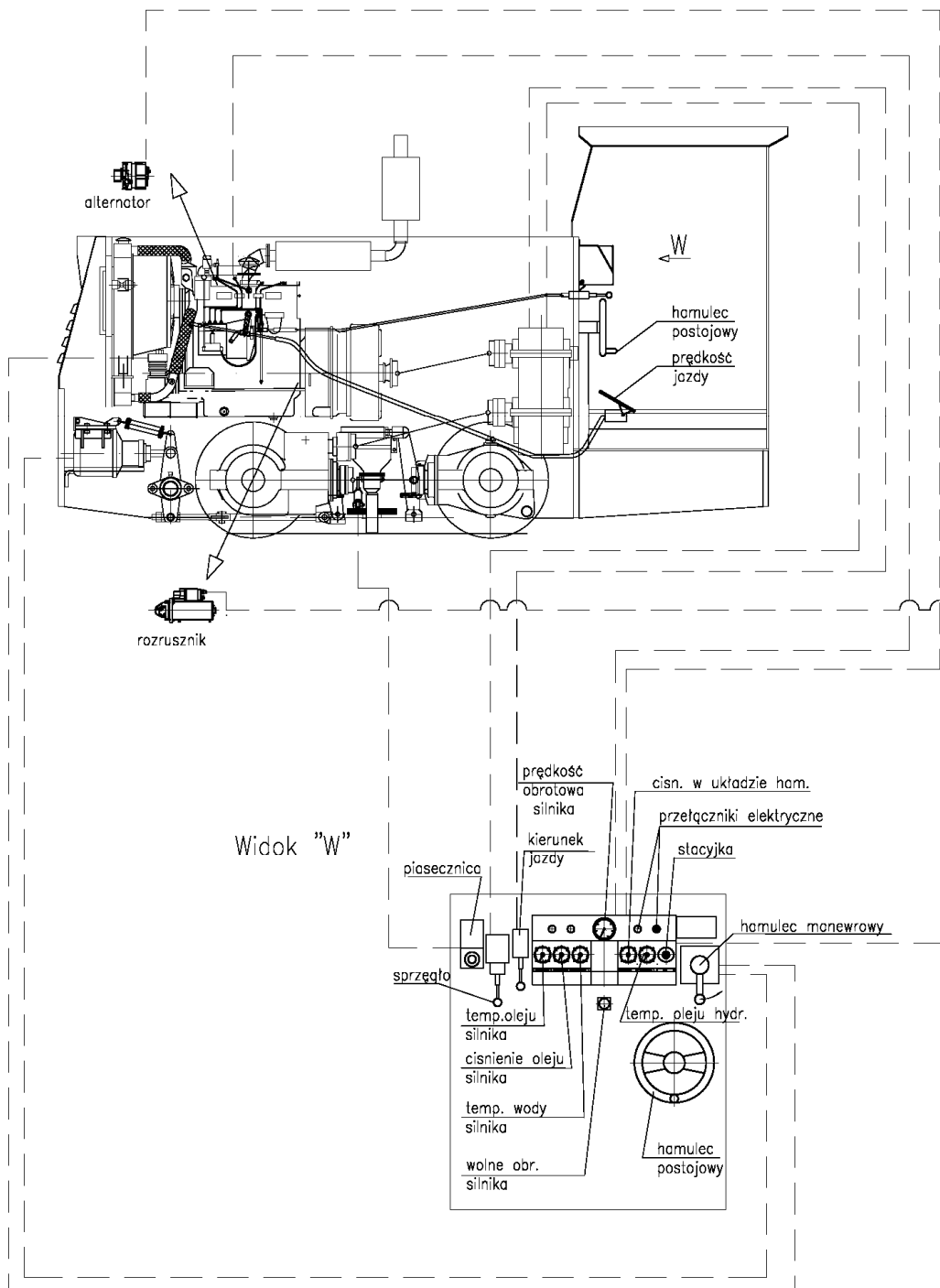
Wyłączenie pracy napędu następowało po przestawieniu dźwigni wolnych obrotów silnika spalinowego w pozycję „0”.

Na rysunku 5 przedstawiono rozmieszczenie dźwigni mechanicznych sterowania pracą lokomotywy oraz pulpitu z przyrządami wskazującymi wielkości mierzonych parametrów.

Na rysunku 6 przedstawiono schemat ideowy połączeń wyposażenia elektrycznego.

Lokomotywa była wyposażona w układ elektryczny typowy dla ówczesnych samochodów, który pozwalał obserwować wskazania mierzonych parametrów, a dalsze postępowanie zależało od maszynisty. Lokomotywa nie posiadała czuwaka ani wyłącznika awaryjnego.

W razie potrzeby nagłego wyłączenia lokomotywy maszynista włączał hamulec manewrowy, obniżał i zerował obroty silnika oraz uruchamiał hamulec postojowy.

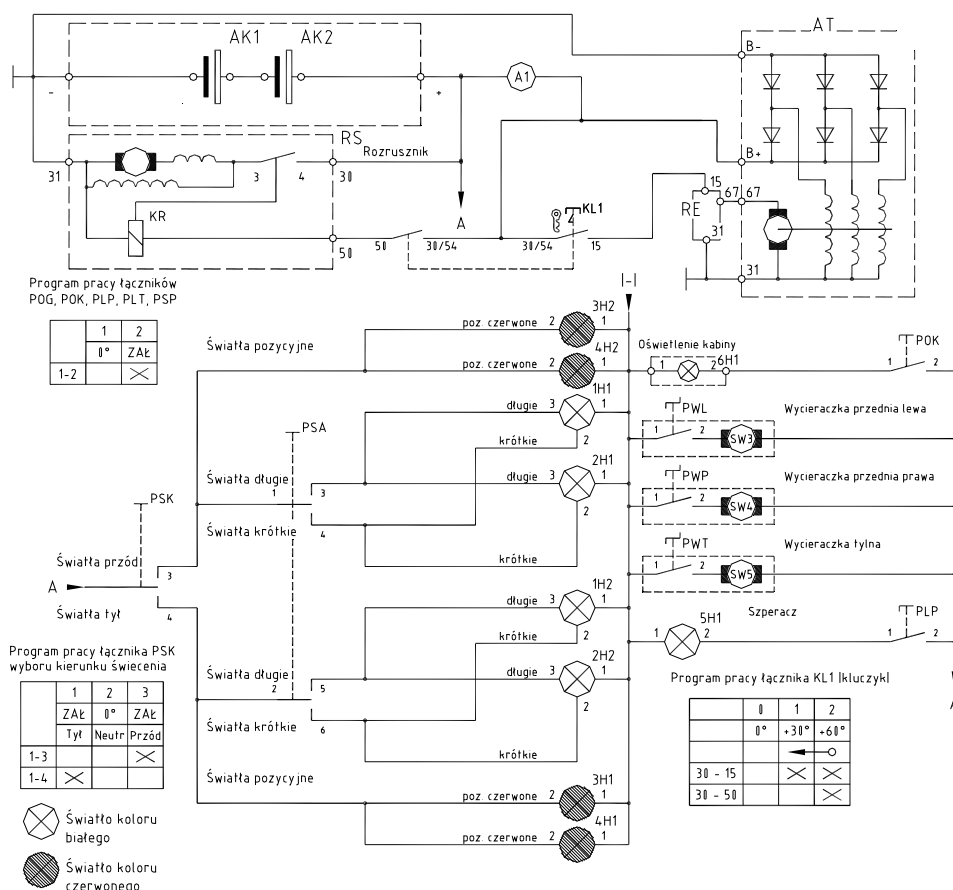


Rys. 5. Schemat sterowania mechanicznego lokomotywy WLP-85 oraz pulpitu sterowniczego [2]

Eksploatacja lokomotywy WLP-85 wykazała, że miała ona zbyt dużą moc silnika, która nie była w pełni wykorzystywana w trakcie manewrów i kompletowania pociągów z materiałem do opuszczania w podziemia kopalń, co istotnie wpływało na zużycie paliwa.

Opracowano zatem lokomotywę o symbolu WLP-50 o masie do 8 ton i silnikiem spalinowym o mocy 60 kW (rys. 7).

Rozwiązanie układu sterowania było identyczne jak w lokomotywie WLP-85. Lokomotywy typu WLP-85 i WLP-50 są nadal eksploatowane do chwili obecnej (lokomotywa WLP-50 jest oferowana przez MWM Brzesko).



Rys. 6. Schemat elektryczny ideowy lokomotywy WLP-85 [2]

Objaśnienia:

AK1, AK2 – akumulator,

AT – alternator,

RE – regulator napięcia,

RS – rozrusznik,

KL1 – łącznik stacyjny,

A1 – amperomierz,

KR – przełącznik rozrusznika,

PSK, PSA, POK, PWL, PWP, PWT, PLP – łączniki,

1H1, 2H1, 1H2, 2H2 – reflektor drogowy (światła krótkie i długie),

3H1, 4H1, 3H2, 4H2 – światła pozycyjne.

Lokomotywa typu WLP-85 została wdrożona do eksploatacji na kopalni KWK Walenty-Wawel (nie istniejąca), a jeden z egzemplarzy był użytkowany w KWK Wesoła. Producentem lokomotyw były Zakłady Mechaniczne Ruda Śląska, które uległy likwidacji, w związku z tym nie uzyskano danych dotyczących wielkości produkcji.



Rys. 7. Lokomotywa WLP-50 [10]

Wąskotorowa lokomotywa powierzchniowa typu WLP-50 została wdrożona w KWK Krupiński i była również użytkowana w innych kopalniach Rybnickiego Okręgu Węglowego. Firma MWM Brzesko nie udostępniła danych na temat ilości wyprodukowanych lokomotyw.

W 2007 r. w KOMAG-u rozpoczęto prace rozwojowe nad opracowaniem nowej lokomotywy powierzchniowej o symbolu WLP-50EM (rys. 8).



Rys. 8. Lokomotywa WLP-50EM [7]

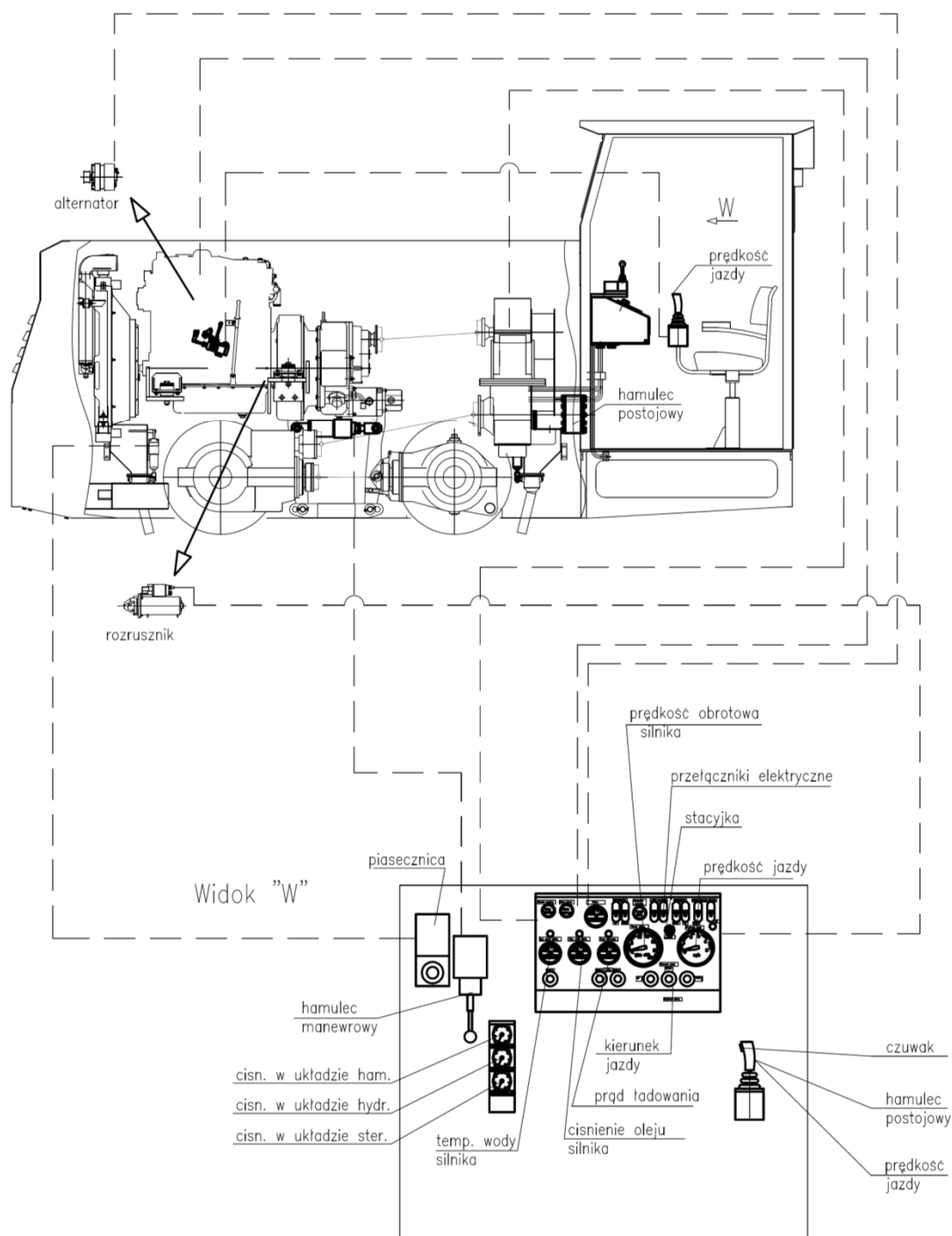
Zastosowano w niej silnik firmy Andoria o mocy 80 kW, wyposażony w funkcje sterowane elektrycznie. Rysunek 9 prezentuje pulpit lokomotywy, a rysunek 10 rozmieszczenie elementów sterowania. W trakcie prac projektowych nad układem sterowania, uwzględniono wymagania związane z dyrektywą UE dotyczące zasadniczych wymagań dla maszyn [5], co wymagało wprowadzenia czuwaka i układu wyłączenia awaryjnego. W nowym rozwiązaniu zastosowano też nowoczesne elementy elektrotechniki i elektroniki przemysłowej, które w międzyczasie pojawiły się na rynku.



Rys. 9. Pulpit sterowniczy lokomotywy WLP-50EM [7]

Sterowanie większością czynności obsługowych lokomotywy odbywa się z wykorzystaniem aparatury elektro-elektronicznej. Dotyczy to między innymi:

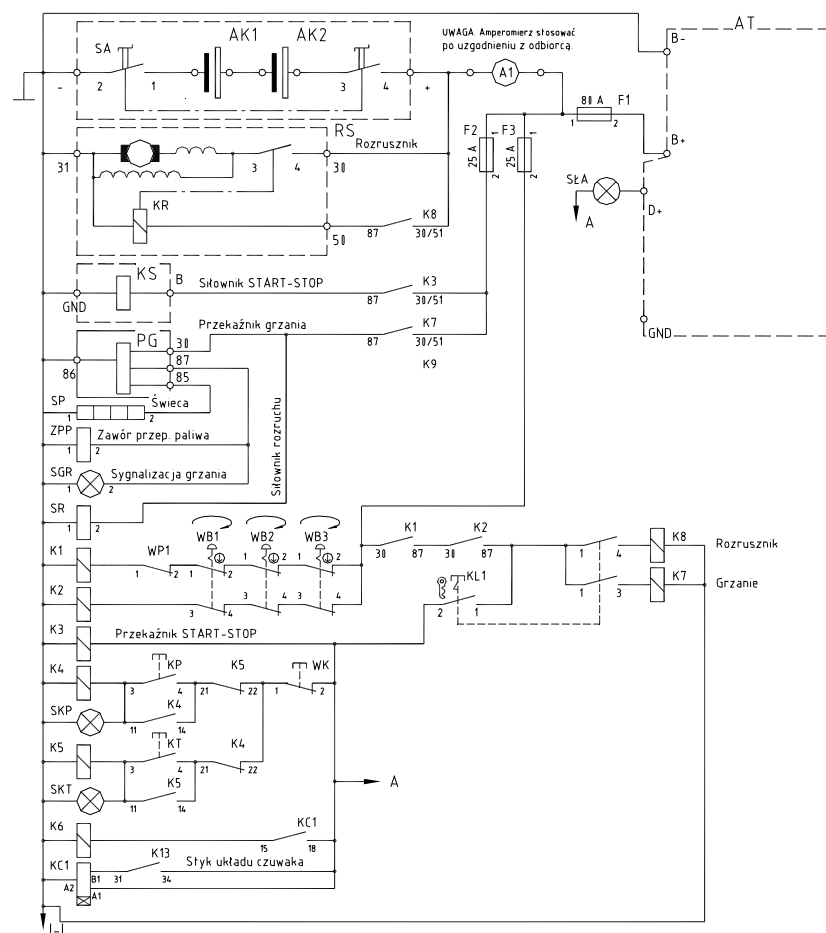
- przygotowania silnika do pracy (sprawdzenie stanu aparatury – wskazania przyrządów),
- uruchomienia silnika spalinowego lokomotywy (siłownik KS, przekaźnik grzania PG, świeca żarowa SP, załączenie zaworu przepływu paliwa ZPP),
- wyboru kierunku jazdy (przycisk wyboru kierunku jazdy w przód KP, przycisk wyboru jazdy w tył KT, wyłączenie kierunku jazdy WK),
- zwolnienia hamulca postojowego (po wyborze kierunku jazdy i aktywowaniu układu czuwaka),
- aktywowania czuwaka,
- sterowania prędkością jazdy (wychylenie manipulatora elektrohydraulicznego).



Rys. 10. Schemat układu sterowania lokomotywy WLP-50EM [3]

Maszynista obsługuje manualnie jedynie:

- hamulec manewrowy (podanie ciśnienia oleju hydraulicznego wykrywane poprzez czujnik, którego styk umożliwia aktywowanie czuwaka),
- oświetlenie (łączniki ręczne),
- kierunek jazdy i prędkość przemieszczania się lokomotywy (wychylanie dźwigni manipulatora – zadajnik prędkości),
- hamowanie manewrowe, uruchamianie piasecznic, nadawanie sygnałów dźwiękowych.



Rys. 11. Schemat elektryczny ideowy układu sterowania lokomotywy WLP-50EM [3]

Wyposażenie elektryczne lokomotywy spełnia wymagania silnika spalinowego w zakresie monitorowania pracy poszczególnych zespołów oraz realizuje również funkcje sterownicze. Na rysunku 11 pokazano schemat elektryczny ideowy układu elektrycznego lokomotywy WLP-50EM.

Kolejną konstrukcją w typoszeregu lokomotyw WLP-50 jest lokomotywa WLP-50B, która różni się od lokomotyw WLP-50EM gabarytami i zastosowaniem układów pneumatyki do sterowania pracą hamulca i piasecznic. Kabinę maszynisty wyposażono we wskaźniki pracy instalacji pneumatycznej.

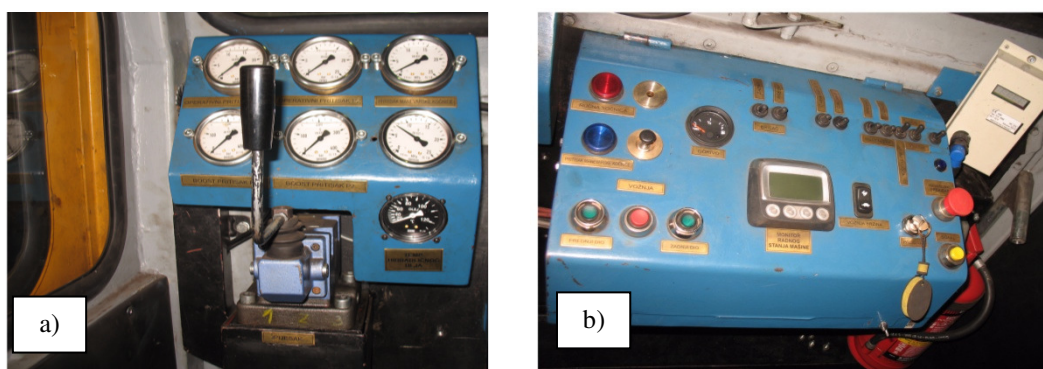
Producentem wąskotorowej lokomotywy powierzchniowej WLP-50EM jest firma Energo-Mechanik Strzelce Opolskie. Miejszem pierwszego wdrożenia lokomotywy była kopalnia KWK Bogdanka, ilości wyprodukowanych sztuk producent nie udostępnił. Badania użytkowe lokomotywy obejmowały sprawdzenie funkcjonalności wszystkich zespołów lokomotywy, w tym układów sterowania. Oprócz badań funkcjonalnych dokonano pomiaru siły pociągowej oraz oddziaływa na środowisko poprzez pomiar hałasu. Po pozytywnych wynikach badań lokomotywa została przekazana do eksploatacji przez użytkownika.

Następną lokomotywą opracowaną przez KOMAG była lokomotywa WLP-50EM/H (rys. 12).



Rys. 12. Lokomotywa WLP-50EM/H [7]

Do napędu wykorzystano silnik mocy 93 kW ze sterowaniem elektronicznym. Pulpit sterowniczy maszynisty lokomotywy pokazano na rysunku 13.

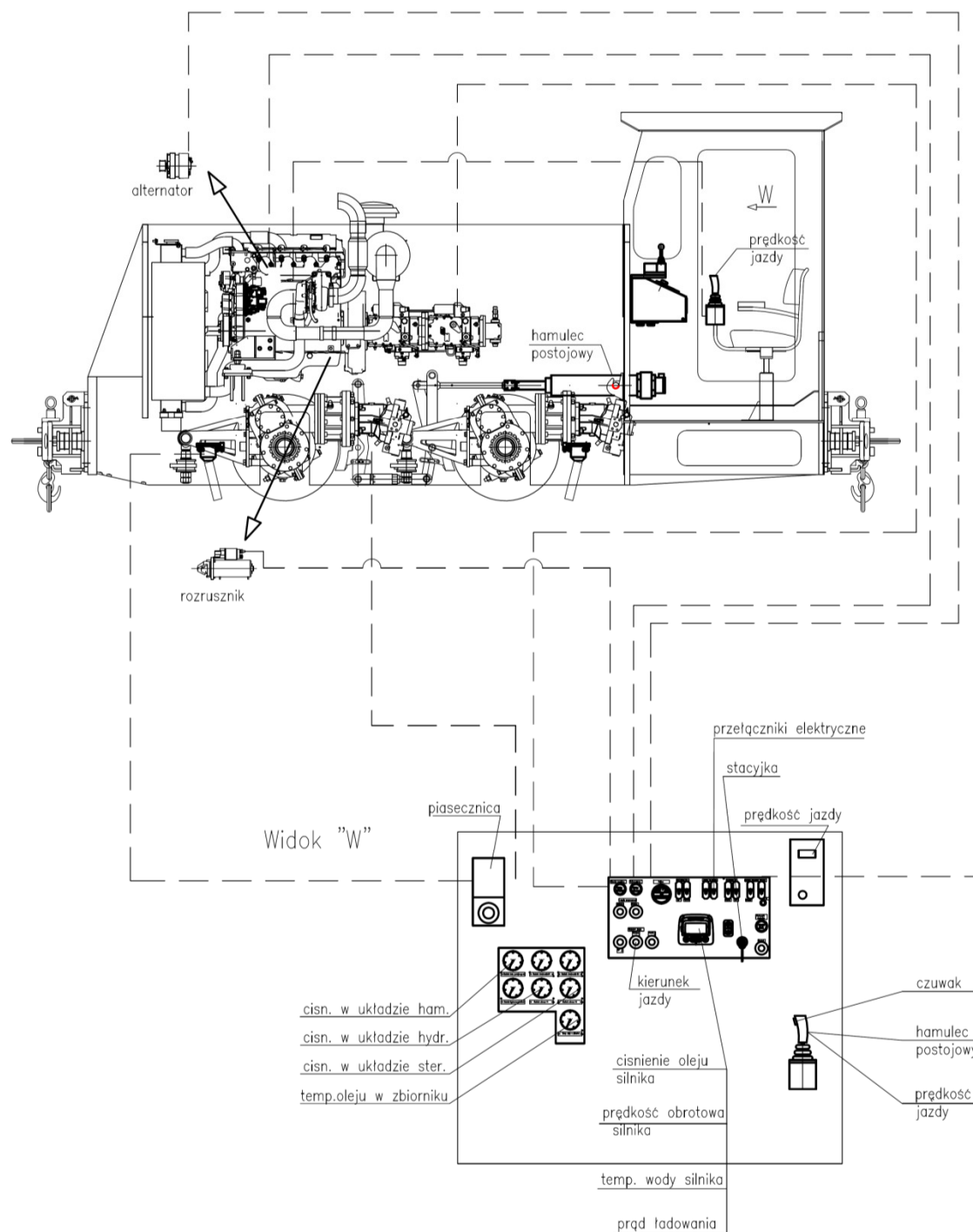


Rys. 13. Pulpity sterownicze maszynisty lokomotywy WLP-50EM/H [7]:

- a) Zespół wskaźników ciśnienia w obwodach hydraulicznych,
- b) Pulpit sterowania układami elektrycznymi wraz ze wskaźnikiem parametrów pracy silnika spalinowego

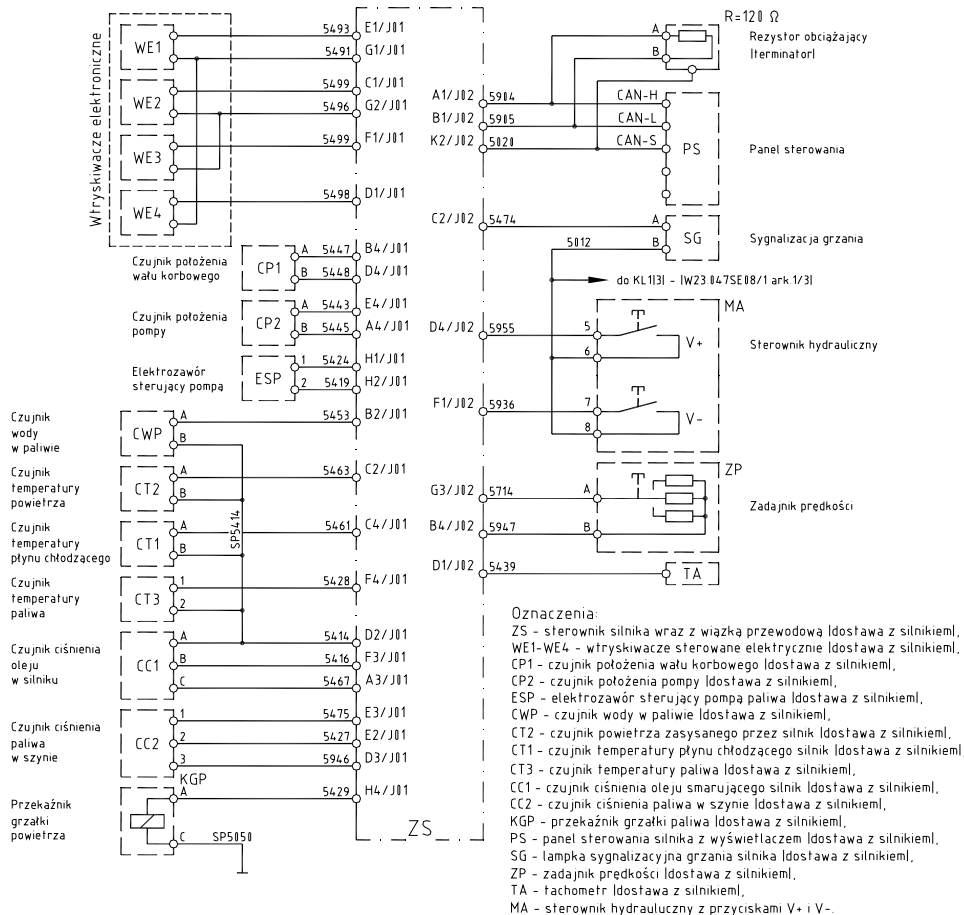
Nowością w układzie sterowania jest połączenie funkcji sterującej pracą całej lokomotywy ze sterownikiem silnika spalinowego ZS. Schemat układu sterowania mechanicznego pokazano na rysunku 14.

Z uwagi na obecność sterownika silnika spalinowego, dostosowano wyposażenie elektryczne lokomotywy, łącząc w jedną całość: układ monitorowania i sterowania silnika spalinowego oraz układ monitorowania i sterowania pracą pozostałego wyposażenia lokomotywy w tym napędu spalinowo-hydrostatycznego oraz zespołu wyłączania awaryjnego.



Rys. 14. Schemat układu sterowania lokomotywy WLP-50EM/H [4]

Producent silnika zezwolił jednak jedynie na wprowadzenie zmian polegających na powiązaniu obwodu bezpieczeństwa lokomotywy z układem sterowania silnika tak, aby jego włączenie powodowało, oprócz zadziałania hamulca awaryjno-postojowego, również zatrzymanie pracy silnika spalinowego. Na rysunku 15, pokazano schemat połączenia sterownika silnika spalinowego ZS z czujnikami oraz układem elektrycznym lokomotywy WLP-50EM/H.



Rys. 15. Schemat elektryczny ideowy sterownika ZS w lokomotywie WLP-50EM/H [4]

Sterownik silnika ZS współpracuje z czujnikami i na podstawie zmierzonych wielkości fizycznych, opracowuje sygnały sterujące momentem wtrysku paliwa do cylindrów, co ma wpływ na zmniejszenie zużycia paliwa, głośność pracy silnika oraz na zawartość szkodliwych substancji w spalinach. Sterownik silnika spalinowego reaguje na zadawane sygnały przez operatora w sposób optymalny według tzw. mapy paliwowej (algorytm wewnętrzny sterownika) niezależnie od gwałtownych przyspieszeń i obniżenia prędkości. Wartości aktualnych parametrów pracy silnika spalinowego są wyświetlane oraz rejestrowane w pamięci.

Producentem lokomotywy WLP-50EM/H jest firma Energo-Mechanik Strzelce Opolskie. Wyprodukowany egzemplarz został wdrożony na kopalni Kakanij w Bośni i Hercegowinie. Próby ruchowe przeprowadzono, przed oddaniem użytkownikowi, w kopalni KWK Ziemowit.

3. Kierunki rozwoju układów sterowania lokomotyw powierzchniowych

Doświadczenia uzyskane przez ITG KOMAG w trakcie prac projektowych i wdrożenia lokomotywy WLP-50EM/H wykazały, że istnieje potrzeba opracowania i wdrożenia sterownika elektronicznego, dedykowanego dla lokomotyw powierzchniowych. Sterownik nadrzędny, monitorowałby parametry pracy zespołów lokomotywy np. prędkość jazdy, temperaturę oleju roboczego, generując odpowiednie komunikaty dla obsługi oraz

podejmując samodzielne działania w sytuacjach awaryjnych (np. nadmierna prędkość jazdy). Sterownik współpracowałby również z urządzeniami sterowniczymi obsługiwanymi przez maszynistę, przekazywałby informacje na ekran wyświetlacza oraz generowałby sygnały ostrzegawcze dźwiękowe i w formie komunikatów. Układ taki wzorowany byłby na rozwiązaniu podobnym do zastosowanego w lokomotywie Lds-100K-EMA (maszyna przystosowana do pracy w podziemnych zakładach górniczych w warunkach zagrożenia wybuchem pyłu i gazu palnego). Prace rozwojowe nad tego typu rozwiązaniem rozpoczęto w KOMAG-u w 2015 roku.

Rozważane jest również opracowanie pojazdów z tzw. przekładnią elektryczną. W lokomotywie znalazłby zastosowanie wysokoprężny silnik spalinowy, sprzęgnięty trwale z generatorem. Generator, napędzany silnikiem spalinowym, wytwarzałby energię elektryczną do zasilania silników trakcyjnych. Przekładnia elektryczna poprzez układy regulacyjne (przełączniki częstotliwości), umożliwiałaby precyzyjne i bezstopniowe sterowanie mocą i prędkością maszyny.

4. Podsumowanie

W artykule przedstawiono przegląd lokomotyw powierzchniowych przeznaczonych do pracy na otwartych przestrzeniach zakładu przemysłowego w warunkach niezagrożonych wybuchem gazu/pyłu palnego. Przedstawiono rozwój sterowania wynikający ze zmieniających się przepisów, jak i wymagań użytkowników. W chwili obecnej, zgodnie z rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 30 kwietnia 2014 r., w sprawie szczególnych wymagań dla silników w zakresie ograniczenia emisji w maszynach powierzchniowych niedrogowych, jakimi są lokomotywy i inne pojazdy wykorzystywane na powierzchni kopalń, można stosować silniki z zapłonem samoczynnym, spełniające wymagania Etapu IV (czystości spalin) [6]. Jednym ze sposobów spełnienia tych wymagań będzie wykorzystanie silników z systemem elektronicznego sterowania wtryskiem paliwa poprzez sterownik mikroprocesorowy. Istotną cechą sterownika będzie zdolność, przy wysokim stopniu automatyzacji, do wiernego przetwarzania i przekazywania informacji.

Wprowadzenie nowych wąskotorowych lokomotyw powierzchniowych wpłynęło na polepszenie efektywności transportu przez obniżenie kosztów paliwa, poprawy warunków pracy i BHP, co pośrednio wymusiła „nowa dyrektywa maszynowa”. Użytkownicy są zainteresowani wymianą taboru powierzchniowego, co jednak ze względu na sytuację w przemyśle węglowym odbywa się bardzo wolno.

Literatura

- [1] Pokropiński B.: Lokomotywy spalinowe produkcji polskiej. Warszawa WKŁ 2009, Nr indeksu 61953826
- [2] Dokumentacja techniczno-ruchowa. Wąskotorowa lokomotywa powierzchniowa WLP-85. CMG KOMAG 1986
- [3] Dokumentacja techniczno-ruchowa. Wąskotorowa lokomotywa powierzchniowa WLP-50EM. ITG KOMAG 2008
- [4] Dokumentacja techniczno-ruchowa. Wąskotorowa lokomotywa powierzchniowa WLP-50EM/H. ITG KOMAG 2014

- [5] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 21 października 2008 r. w sprawie zasadniczych wymagań dla maszyn (Dz. U. z 2000 r. Nr 199, poz. 1228)
- [6] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 30 kwietnia 2014 r. w sprawie szczegółowych wymagań dla silników spalinowych w zakresie ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i cząstek stałych przez te silniki (Dz.U. 2014 poz. 588)
- [7] Dokumentacja fotograficzna – KOMAG
- [8] Pieczora E.: Prace prowadzone przez CMG KOMAG w zakresie dołowych i powierzchniowych wąskotorowych lokomotyw spalinowych. Materiały na sympozjum. Dołowe i powierzchniowe wąskotorowe lokomotywy spalinowe w kopalniach PW. CMG KOMAG Gliwice, grudzień 1990 s. 3-10
- [9] <http://www.garnek.pl/tyskimk/16972492/wlp85-4> (6 lipiec 2016)
- [10] <http://www.mwmbzresko.com> (6 lipiec 2016)

Czy wiesz, że

... Już w przyszłym roku sonda Chang'e 5 ma pobrać ok. 2 kg księżycowych skał i powrócić na ziemię. Skały są cenne, ponieważ gromadzą izotop helu, którego 1 t, przeliczając na wartość energetyczną, odpowiada 50 mln baryłek ropy. Wspomniany izotop, jeśli tylko zostanie odpowiednio skompresowany, może stać się paliwem przyszłości. [...] Jeżeli misja Chang'e 5 odniesie sukces, Chiny zapowiadają stałą eksploatację ciała niebieskiego od 2020 r.

Trybuna Górnicza 39/2016

Wymagania dotyczące zapewnienia iskrobezpieczeństwa systemów sterowania

dr inż. Andrzej Figiel
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

Prawidłowy, zgodny z wymaganiami norm, dobór urządzeń elektrycznych oraz instalacji kablowej w ramach systemu iskrobezpiecznego, decyduje o bezpieczeństwie stosowania układów sterowania w miejscach, w których występuje zagrożenie wybuchem gazu i/lub pyłu palnego. W niniejszym artykule przedstawiono zasady projektowania, dokumentowania, oceny i wykonywania systemów iskrobezpiecznych odpowiadające aktualnemu poziomowi wiedzy technicznej. Omówiono podstawowe wymagania dotyczące systemów iskrobezpiecznych (dobór urządzeń, kabli, sposób uziemiania i wykonywania połączeń wyrównawczych) oraz elementy jakie powinny się znaleźć w dokumencie opisującym taki system.

Słowa kluczowe: górnictwo, zagrożenie wybuchem, system iskrobezpieczny

Keywords: mining industry, explosion hazard, intrinsically safe system

Abstract:

Correct selection of electric devices and wiring system according to standard requirements for intrinsic safety decides about the safety use of the control systems in a potentially explosive atmosphere. Rules for designing documenting, assessment and manufacture of intrinsically safe systems with use of state-of-the-art technology is presented. General requirements for intrinsically safe systems (selection of devices, cables and earthing method as well as equipotential bonding) and elements that should be included in the documents describing the system are discussed.

1. Wprowadzenie

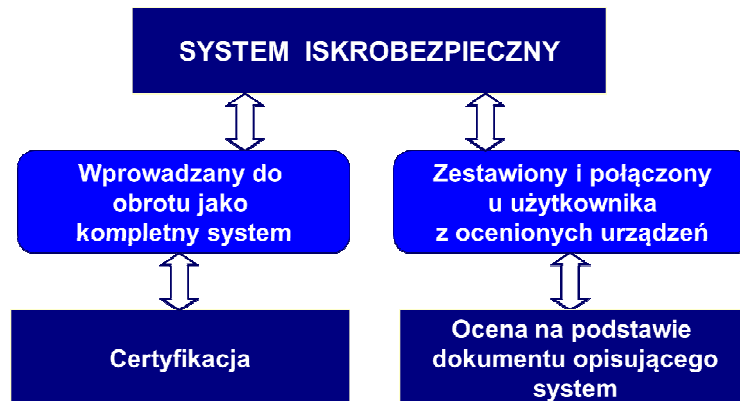
Systemy iskrobezpieczne, zanim zostaną wykonane na konkretnym obiekcie jako instalacje nowe lub modernizowane, muszą być prawidłowo zaprojektowane i ocenione jako bezpieczne. Gwarancją zapewnienia założonego poziomu zabezpieczenia przeciwwybuchowego jest zaprojektowanie, dokonanie oceny i wykonanie systemu iskrobezpiecznego zgodnie z wymaganiami normy PN-EN 60079-25:2011 [1]. W procesie projektowania uwzględnia się specyficzne wymagania dotyczące systemów iskrobezpiecznych rodzaju zabezpieczenia „i”, przeznaczonych do użytku w całości lub jako część w miejscach, gdzie jest wymagane użycie urządzeń grupy I, II lub III. Zgodnie z ww. normą, projektantem systemu iskrobezpiecznego może być producent, ekspert lub użytkownik, który posiada wymagane kompetencje i jest uprawniony do sporządzenia dokumentu opisującego system w imieniu swojego pracodawcy.

2. Wymagania dotyczące systemów iskrobezpiecznych

System iskrobezpieczny, zdefiniowany jako zestaw połączonych ze sobą urządzeń elektrycznych, przedstawiony w dokumencie opisującym system, w którym obwody lub części obwodów przeznaczonych do użytku w atmosferze wybuchowej są obwodami iskrobezpiecznymi, może być (rys. 1):

- systemem iskrobezpiecznym certyfikowanym tj. takim, dla którego wydano certyfikat potwierdzający jego zgodność z PN-EN 60079-25:2011,

- systemem iskrobezpiecznym niecertyfikowanym tj. takim, w którym znajomość parametrów elektrycznych poszczególnych certyfikowanych urządzeń elektrycznych, certyfikowanych urządzeń towarzyszących, urządzeń prostych oraz znajomość elektrycznych i fizycznych parametrów oprzewodowania łączącego pozwala jednoznacznie wnioskować, że iskrobezpieczeństwo jest zachowane.



Rys. 1. Podział i ocena systemów iskrobezpiecznych [opracowanie własne]

2.1. Dokument opisujący system iskrobezpieczny

Iskrobezpieczeństwo każdego systemu, niezależnie czy będzie certyfikowany, czy nie, należy wykazać w dokumencie (dokumencie opisującym system), w którym należy wyspecyfikować urządzenia elektryczne, ich parametry elektryczne oraz parametry oprzewodowania łączącego.

Dokument opisujący system powinien zawierać analizę osiąganego poziomu bezpieczeństwa, w tym co najmniej:

- schemat blokowy systemu ze wszystkimi urządzeniami systemu, łącznie z urządzeniami prostymi i oprzewodowaniem łączącym,
- oświadczenie dotyczące podgrupy (w przypadku grupy II i III), poziomu zabezpieczenia każdej części składowej systemu, klasy temperaturowej, kategorii i znamionowej temperatury otoczenia,
- wymagania i dopuszczalne parametry oprzewodowania łączącego, od których zależy iskrobezpieczeństwo, alternatywnie, w dokumencie powinien być wyszczególniony charakterystyczny rodzaj kabla lub przewodu i uzasadnienie jego zastosowania, w tym dozwolone rodzaje kabli lub przewodów wielożyłowych, które mogą być użyte w każdym obwodzie,
- szczegóły dotyczące uziemiania i połączeń wyrównawczych punktów systemu (jeżeli użyto urządzeń ochrony przepięciowej należy również dołączyć stosowną analizę); należy wskazać, który punkt lub punkty systemu są przeznaczone do połączenia z potencjałem odniesienia instalacji oraz wszystkie specjalne wymagania tego połączenia,
- uzasadnienie oceny urządzeń jako urządzeń prostych zgodnie z PN-EN 60079-11:2012 [2], tam gdzie ma to zastosowanie,
- jeżeli obwód iskrobezpieczny zawiera kilka urządzeń iskrobezpiecznych powinna być przedstawiona analiza sumy ich parametrów (powinna obejmować wszystkie urządzenia proste i certyfikowane urządzenia iskrobezpieczne),

- zakres temperatury otoczenia, jeżeli cały system lub jego część jest przeznaczona do pracy poza normalnym zakresem temperatury otoczenia, wynoszącym od -20°C do $+40^{\circ}\text{C}$,
- analizę szczególnych warunków stosowania poszczególnych urządzeń, zawartych w instrukcjach/certyfikatach urządzeń.

Dokument powinien posiadać niepowtarzalne oznakowanie, powinien być podpisany i datowany przez projektanta systemu.

2.2. Poziom zabezpieczenia systemu

Każdej części systemu iskrobezpiecznego przeznaczonego do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej, zgodnie z PN-EN 60079-11:2012, należy przypisać poziom zabezpieczenia „ia”, „ib” lub „ic”. Nie wymaga się, aby cały system miał jeden poziom zabezpieczenia. Urządzenie z poziomem zabezpieczenia „ia” zasilane z zasilacza „ib” tworzą system „ib”. System może posiadać poziom „ib” w warunkach normalnej pracy, przy zasilaniu zewnętrznym, lecz w przypadku, gdy zasilanie to jest odłączone zgodnie z określonymi warunkami bezpieczeństwa, system zasilany z rezerwowej baterii może posiadać poziom „ia”.

2.3. Wymagania dla kabli/przewodów wielożyłowych

Wielożyłowe kable lub przewody zawierające obwody zaliczone do poziomu zabezpieczenia „ia”, „ib” lub „ic” nie powinny zawierać obwodów nieiskrobezpiecznych. W normie PN-EN 60079-25:2011 rozróżnia się trzy rodzaje kabli/przewodów wielożyłowych (rodzaju A, B i C). Wymagania dla nich przedstawiono w tabeli 1.

Wymagania dla kabli/przewodów wielożyłowych - opracowano na podstawie [1]

Tabela 1

Rodzaj kabla wielożyłowego	Budowa żył	Izolacja	Ekran przewodzący	Dodatkowe wymagania	Analiza uszkodzeń
A	Średnice pojedynczych drutów lub drutów przewodów linkowych $\geq 0,1\text{ mm}$	Grubość izolacji $\geq 0,2\text{ mm}$ Próba wytrzymałości elektr. izolacji: ekran/pancerz – wiązka żył	Ekran przewo- dzące indywidu- alne każdego obwodu (pokrycie $\geq 60\%$ powierzchni)		Nie uwzględnia się
B		$\geq 500\text{ V AC}$ $\geq 750\text{ V DC}$ pomiędzy dwoma wiązkami żył		Instalacja stała, skutecznie ochroniona przed uszkodzeniami mechanicznymi	Nie uwzględnia się jeżeli brak obwodu o $U_0 > 60\text{ V}$
C		$\geq 1000\text{ V AC}$ $\geq 1500\text{ V DC}$			Dwa zwarcia żył, cztery przerwy

2.4. Uziemianie i połączenia wyrównawcze systemów iskrobezpiecznych

Obwód iskrobezpieczny powinien być nieuziemiony lub połączony tylko w jednym punkcie z potencjałem odniesienia, związanym z przestrzenią zagrożoną. W przypadku połączenia obwodu iskrobezpiecznego z ziemią, w obrębie systemu należy zastosować połączenia wyrównawcze. Więcej połączeń z ziemią w obwodzie jest dozwolone pod warunkiem, że obwód ten jest galwanicznie rozdzielony na podobwoły, z których każdy ma tylko jeden punkt uziemienia. Ekrany kabli/przewodów powinny być połączone z ziemią (w jednym punkcie).

2.5. Parametry elektryczne kabli lub przewodów

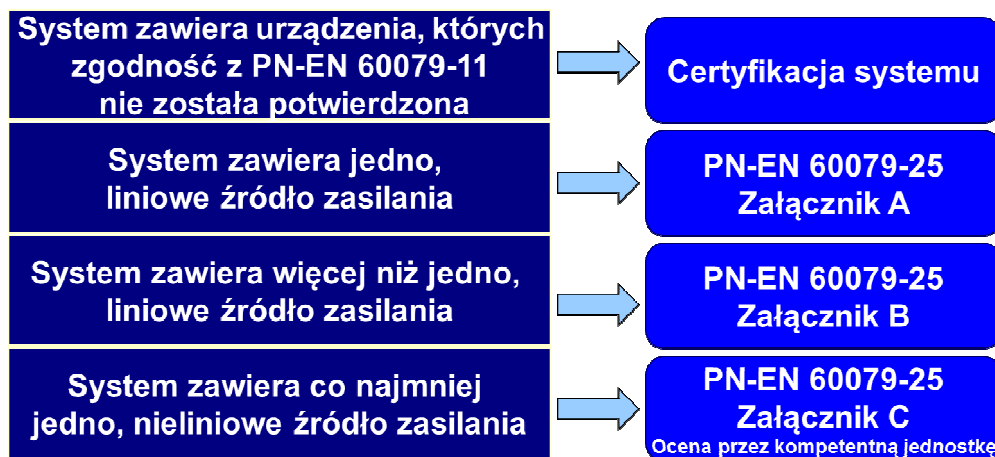
Parametry elektryczne (C_c i L_c lub C_c i L_c/R_c) wszystkich kabli lub przewodów zastosowanych w systemie iskrobezpiecznym przyjmuje się na podstawie:

- danych producenta (przyjmuje się najbardziej niekorzystne wartości),
- pomiarów próbki, wykonanych w sposób określony w Załączniku G normy PN-EN 60079-25:2011,
- obliczeń – jeżeli oprzewodowanie składa się z dwóch lub trzech żył konwencjonalnie wykonanych kabli lub przewodów (z ekranem lub bez ekranu) można przyjąć: 200 pF/m i 1 μ H/m albo stosunek indukcyjności do rezystancji (L_c/R_c) wyznacza się, dzieląc 1 μ H przez określoną przez producenta rezystancję pętli na metr; alternatywnie, dla prądów do $I_0 = 3$ A może przyjąć, że L/R wynosi 30 μ H/ Ω .

2.6. Ocena systemu iskrobezpiecznego

Ocena systemu iskrobezpiecznego zależy od tego, czy system jest zestawiony z urządzeń certyfikowanych, czy nie oraz od rodzaju i liczby źródeł zasilania. Szczegółowe zasady oceny podano w załącznikach do normy PN-EN 60079-25:2011 (rys. 2).

System składający się z urządzeń, których zgodność z PN-EN 60079-11:2012 nie została potwierdzona oraz system, w których liniowe i nieliniowe obwoły są połączone lub mogą się połączyć w stanach awaryjnych, powinien być oceniony przez kompetentną jednostkę certyfikującą, laboratorium badawcze lub upoważnionego inżyniera ze względu na konieczność zapewnienia dostępu do specjalistycznej wiedzy i odpowiedniej aparatury badawczej.

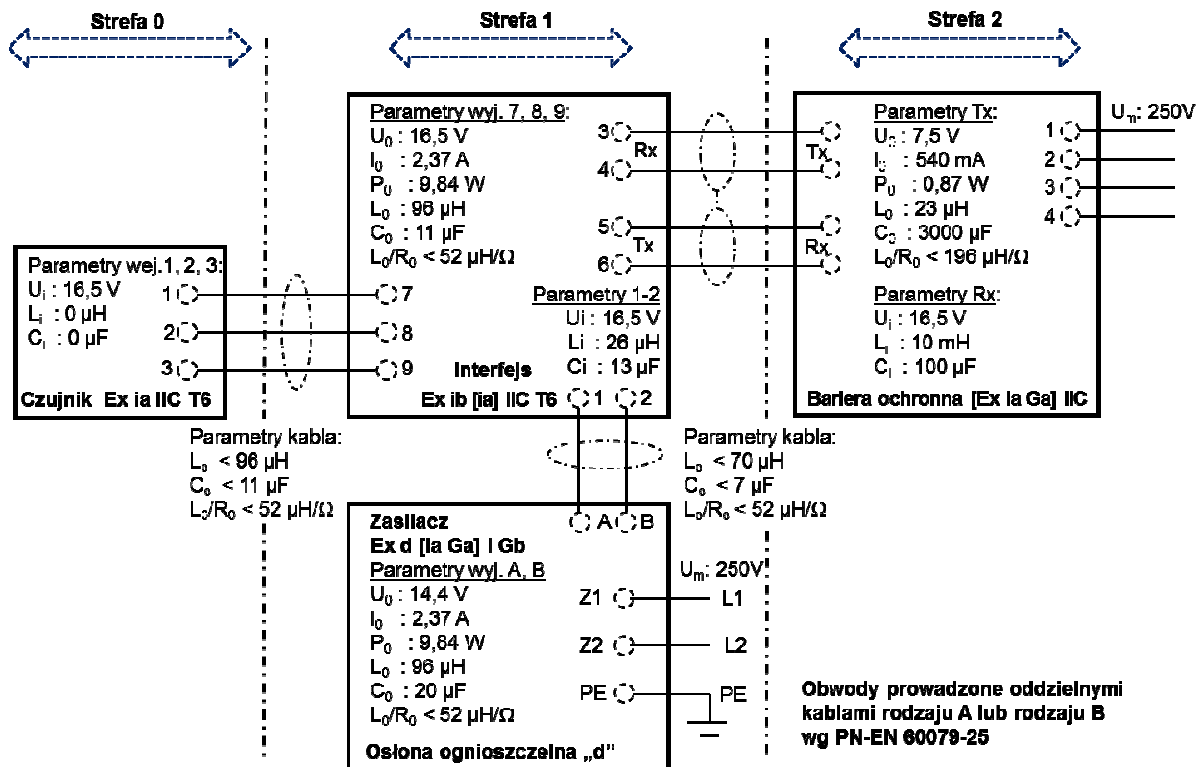


Rys. 2. Tryb oceny systemów iskrobezpiecznych - opracowano na podstawie [1]

Większość systemów iskrobezpiecznych zawiera jedno źródło zasilania, które jest połączone z jednym urządzeniem iskrobezpiecznym obiektywnym.

Ocenę systemu rozpoczyna określenie parametrów wejściowych i wyjściowych połączonych ze sobą urządzeń oraz parametrów kabla łączącego. Parametry te można znaleźć w certyfikacie, instrukcji lub rysunku kontrolnym, dostępnym dla projektanta systemu.

Przykład schematu blokowego systemu iskrobezpiecznego przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Przykład schematu blokowego systemu iskrobezpiecznego - opracowano na podstawie [1]

Ocena prostego obwodu iskrobezpiecznego obejmuje następujące kroki:

1. Porównanie grup urządzeń (jeżeli różnią się, to system przyjmuje najniższą grupę; na przykład, jeżeli jedno urządzenie jest IIC a drugie IIB, to wówczas system staje się IIB).
2. Porównanie poziomu zabezpieczenia (jeżeli różnią się, to system przyjmuje najniższy poziom zabezpieczenia; na przykład, jeżeli urządzenie jest „ia” a drugie „ib”, to system staje się „ib”).
3. Ustalenie klasyfikacji temperaturowej urządzeń instalowanych w przestrzeni zagrożonej (nie systemu).
4. Zapisanie zakresu dopuszczalnej temperatury otoczenia każdego urządzenia.
5. Porównanie parametrów wyjściowych źródła zasilania (U_o , I_o , P_o) z parametrami wejściowymi urządzenia obiektywnego (U_i , I_i , P_i). Parametry wyjściowe nie powinny przewyższać odpowiednich parametrów wejściowych. Sporadycznie, bezpieczeństwo urządzenia obiektywnego może być określone tylko przez jeden z tych parametrów. W tym przypadku parametry nieokreślone nie mają znaczenia.

$$U_o \leq U_i$$

$$I_o \leq I_i$$

$$P_o \leq P_i$$

6. Ustalenie dopuszczalnych parametrów kabla lub przewodu.

$$C_c = C_o - C_i$$

$$L_c = L_o - L_i$$

7. Sprawdzenie, czy poziom izolacji względem ziemi jest dopuszczalny oraz, czy wymagania dotyczące uziemienia systemu są spełnione.

Wygodnym sposobem dokumentowania wyników analizy i oceny obwodu iskrobezpiecznego jest stworzenie tabeli (przykład: Tabela 2). W prezentowanym przykładzie porównano parametry iskrobezpiecznego interfejsu i współpracującego z nim czujnika temperatury.

Wyniki analizy i oceny systemu iskrobezpiecznego (opracowanie własne dotyczące przykładowego systemu iskrobezpiecznego przedstawionego na rys. 3)

Tabela 2

Element	Interfejs	Czujnik	Kabel	System
Grupa urządzenia	IIC	IIC	-	IIC
Poziom zabezpieczenia	ib [ia]	ia	-	ib (interfejs) ia (czujnik)
Klasyfikacja temperaturowa	T6	T6	-	-
Temperatura otoczenia	-10°C ÷ +40°C	-20°C ÷ +60°C	-	-
Porównanie parametrów:	Zaciski 7 – 8 – 9	Zaciski 1 – 2 – 3	-	-
– napięcie	$U_o = 16,5 \text{ V}$	$U_i = 16,5 \text{ V}$	-	✓
– prąd	$I_o = 2,37 \text{ A}$	-	-	✓
– moc	$P_o = 9,84 \text{ W}$	-	-	✓
– indukcyjność	$L_o = 96 \mu\text{H}$	$L_i = 0 \mu\text{H}$	$L_c \leq 96 \mu\text{H}$	✓
– pojemność	$C_o = 11 \mu\text{F}$	$C_i = 0 \mu\text{F}$	$C_c \leq 11 \mu\text{F}$	✓
– L/R	$L_o/R_o = 52 \mu\text{H/m}$	-	$L_c/R_c \leq 52 \mu\text{H/m}$	✓
Uziemienie	izolowany	izolowany	-	izolowany

Prezentowany, uproszczony sposób analizy i oceny systemu iskrobezpiecznego można wykorzystywać w sytuacji, gdy wartości skupione pojemności ΣC_i oraz indukcyjności ΣL_i (występujące równocześnie) nie przekraczają 1% wartości parametrów wyjściowych C_o , L_o (zdecydowana większość przypadków). Jeżeli system zawiera zarówno skupioną pojemność i skupioną indukcyjność, wzajemne ich oddziaływanie może zwiększyć zagrożenie przez iskry zdolne do spowodowania zapłonu. W rzadkich przypadkach, gdy skupiona indukcyjność ΣL_i (źródła zasilania i urządzeń obiektowych) i skupiona pojemność ΣC_i (źródła zasilania i urządzeń obiektowych) są większe niż 1% poszczególnych parametrów wyjściowych źródła zasilania C_o i L_o , to obydwie dopuszczalne parametry wyjściowe są dzielone przez dwa. Taki prosty sposób wyznaczenia dopuszczalnych parametrów wyjściowych można stosować wyłącznie, gdy maksymalna zewnętrzna pojemność C_o nie przekracza wartości 1 μF dla grupy I, IIA i IIB i 600 nF dla grupy IIC [1, 3]. Jeżeli nie można zastosować powyższej zasady, to w celu wyznaczenia parametrów C_o i L_o należy korzystać z wykresów zawartych w normie [1] lub specjalistycznych programów np. iSPARK.

3. Podsumowanie

Projektowanie systemów iskrobezpiecznych jest procesem bardzo istotnym ze względu na potencjalne skutki nieprawidłowego doboru urządzeń i nieprawidłowego wykonania połączeń między nimi (utrata iskrobezpieczeństwa).

Metodę analizy, oceny i dokumentowania systemów iskrobezpiecznych, bazującą na normie PN-EN 60079-25:2011, należy stosować na etapie projektowania każdego systemu przeznaczonego do pracy w strefach zagrożonych wybuchem. Jej stosowanie minimalizuje ryzyko wykonania instalacji elektrycznej, która nie zapewnia bezpieczeństwa przeciwwybuchowego.

Prawidłowo sporządzona dokumentacja systemu iskrobezpiecznego stanowi również zabezpieczenie dla jego projektanta, że zaproponowany przez niego system, spełnia odpowiednie wymagania techniczne i założony poziomem zabezpieczenia przeciwwybuchowego.

Literatura

- [1] Norma PN-EN 60079-25:2011 Atmosfery wybuchowe. Część 25: Systemy iskrobezpieczne
- [2] Norma PN-EN 60079-11:2012 Atmosfery wybuchowe. Część 11: Zabezpieczenie urządzeń za pomocą iskrobezpieczeństwa "i"
- [3] Thomas Eichhorn, Ulrich Johannsmeyer, Anton Schimmele – Verification of intrinsic safety. Ex-Magazine 2007

Czy wiesz, że

... Tak jak na optymalizacji sprzętu górniczego, tak branża górnicza ponownie skupia swoją uwagę na przeróbce węgla kamiennego. Z powodu spadku wydobycia węgla, przeróbka mechaniczna stoi przed trudnym zadaniem przetrwania przy coraz mniejszej liczbie działających kopalń. Wzbogacanie w cieczech ciężkich odgrywa kluczową rolę. Dlatego warto skupić się na tym procesie i jego optymalizacji, który nie tylko może zmniejszyć utratę dochodów, ale także może się przyczynić do zaoszczędzenia energii.

World Coal 8/2016

Dostosowanie silnika spalinowego z układem wtryskowym common rail górniczej maszyny roboczej do obowiązujących wymagań i przepisów

dr inż. Piotr Dobrzaniecki
Instytut Techniki Górniczej KOMAG

Streszczenie:

W niniejszym artykule przybliżono problematykę związaną z wprowadzeniem do eksploatacji oraz bezpiecznym użytkowaniem maszyny roboczej wyposażonej w wysokoprężny silnik spalinowy z układem common rail. Przedstawiono wymagania prawne odnośnie pozadrogowych maszyn roboczych z napędem spalinowym oraz odniesiono się do wymagań stawianych pojazdom z napędem spalinowym, przeznaczonym do pracy w podziemiach kopalń, ze szczególnym uwzględnieniem stref zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Scharakteryzowano źródła potencjalnych zagrożeń oraz przewidywany sposób ich neutralizacji w procesie dostosowania silnika spalinowego do wymogów prawnych.

Słowa kluczowe: wysokoprężny silnik spalinowy, silnik z układem zasilania common rail, dyrektywa spalinowa, etap IV, przestrzeń zagrożona wybuchem

Keywords: diesel engine, engine with common rail injection system, diesel directive, stage IV, potentially explosive atmosphere

Abstract:

Problems associated with commercialization and safe use of the machine equipped with diesel engine with common rail system are presented. Legal requirements regarding the machines with diesel drive, which operate off the roads, are given and referred to the requirements for vehicles with diesel drive designed for operation in mine undergrounds, with special attention paid to the areas threatened by methane and/or coal dust explosion hazard. Sources of potential hazards and planned method for their elimination by adaptation of diesel engine to the legal requirements are characterized.

1. Wstęp

Obecnie stosowane maszyny robocze z napędem spalinowym są wyposażane w wysokoprężne silniki z elektronicznie sterowanym układem wtryskowym, najczęściej układem common rail. Jest to konsekwencja rosnących wymagań zarówno w odniesieniu do zapotrzebowania na moc silnika, jak również ze względu na aspekty ekologiczne, związane z emisją spalin. Zastosowanie w silniku spalinowym układu zasilania typu common rail zapewnia osiągnięcie poziomu emisji etapu IIIA. Jednak ze względu na wymagania tzw. *dyrektywy spalinowej* [3] niezbędne jest, na dzień dzisiejszy, zapewnienie emisji na poziomie etapu IV ww. dyrektywy. W efekcie należy dodatkowo zastosować system pozaukładowej obróbki spalin w postaci katalizatora oraz filtra cząstek stałych. Rozwiązania tego typu są znane i powszechnie stosowane w pozadrogowych maszynach roboczych. Trudności techniczne pojawiają się gdy istnieje potrzeba zastosowania napędu spalinowego z układem obróbki spalin w przestrzeniach zagrożonych wybuchem palnych pyłów i/lub gazów. Przykładem takiego środowiska pracy są m.in. podziemia kopalń węgla kamiennego, gdzie zagrożenie stanowią pył węglowy oraz metan. W niniejszym artykule poruszono problematykę wprowadzenia i bezpiecznej eksploatacji nowoczesnego napędu spalinowego maszyny roboczej, w odniesieniu do obowiązujących przepisów, ze szczególnym uwzględnieniem stref zagrożonych wybuchem. Zagadnienie omówiono na przykładzie rozwiązań stosowanych na powierzchni oraz w podziemnych wyrobiskach, w tym w przestrzeniach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Szczegóły zostały omówione w dalszej części artykułu.

2. Przepisy prawne dotyczące zastosowania maszyn roboczych z napędem spalinowym

W ustawodawstwie polskim obowiązuje dyrektywa 97/68/WE [3] z dnia 16 grudnia 1997 r., wdrożona Rozporządzeniem Ministra Gospodarki z dnia 30 kwietnia 2014, ze zmianami wprowadzonymi m.in. dyrektywą 2012/46/UE. Wymienione dyrektywy regulują kwestie związane z ograniczeniem emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach. Ograniczenia związane z emisją substancji toksycznych obecnych w spalinach nie wyczerpują jednak wszystkich aspektów bezpieczeństwa stosowania maszyn roboczych z napędem spalinowym. W przypadku pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem palnych pyłów i/lub gazów kluczowe staje się zabezpieczenie przeciwwybuchowe poszczególnych zespołów napędu.

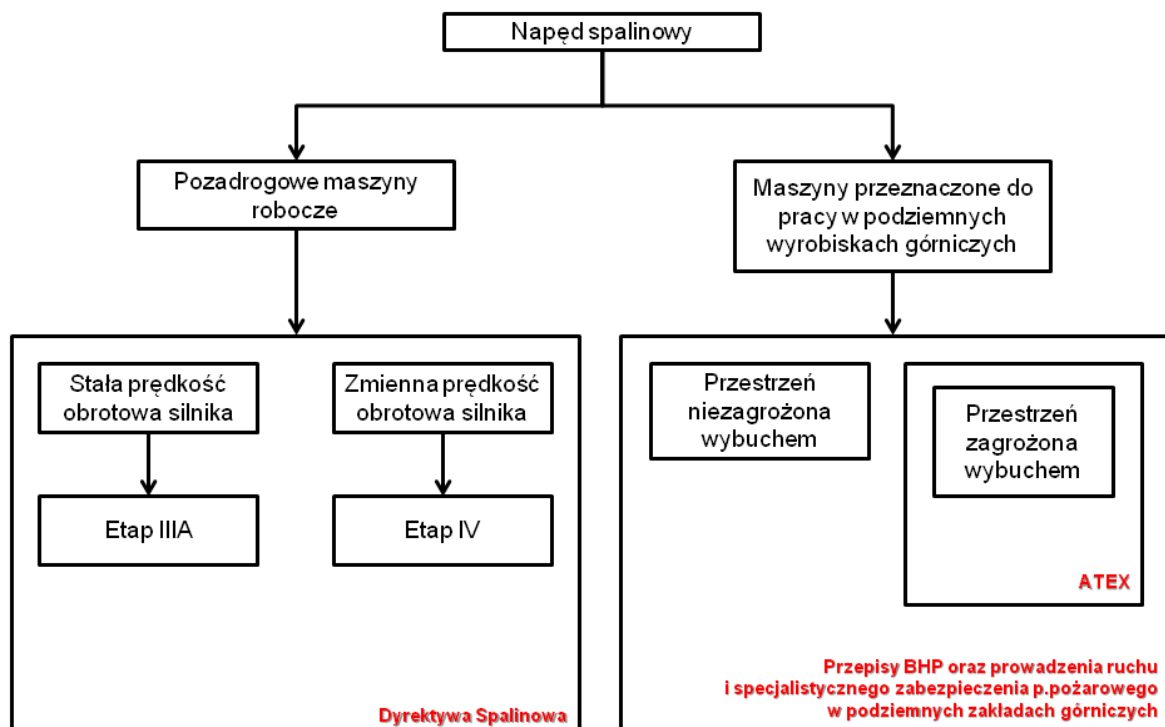
Jak wspomniano we wstępie, spełnienie wymagań obowiązujących przepisów dla napędów spalinowych można rozpatrywać w dwóch aspektach dotyczących:

- powierzchniowych maszyn roboczych z napędem spalinowym,
- maszyn roboczych przeznaczonych do pracy w podziemnych wyrobiskach zakładów górniczych.

W zakresie maszyn eksploatowanych w podziemiach kopalń można wyróżnić wyrobiska:

- niezagrożone występowaniem atmosfery potencjalnie wybuchowej,
- zagrożone wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego.

W zależności od docelowego miejsca pracy maszyny roboczej obowiązują akty prawne wg zależności pokazanej na rysunku 1.



Rys. 1. Przepisy dotyczące maszyn przeznaczonych do stosowania w wybranych miejscach pracy [1, 3, 2]

Oznacza to, że w przypadku wprowadzania do obrotu pozadrogowej maszyny roboczej wyposażonej w napęd spalinowy, należy spełnić wymagania określone w dyrektywie [3].

W zależności od reżimu pracy silnika spalinowego obowiązują różne kryteria [3]:

- a) emisja etapu IIIA, w przypadku silnika pracującego z regulatorem jednozakresowym,
- b) emisja etapu IV, w przypadku silnika pracującego z regulatorem dwuzakresowym lub wielozakresowym.

Stała prędkość obrotowa stanowi przypadek, gdy silnik spalinowy, wyposażony w regulator jednozakresowy, pracuje np. jako napęd generatora elektrycznego w agregacie lub w napędzie spalinowo-elektrycznym. Zmienna prędkość obrotowa realizowana jest przy użyciu regulatora dwuzakresowego lub wielozakresowego, wykorzystywanego w przypadku maszyn, w których sterowanie dawką paliwa i szybkością biegu silnika realizowane jest przez maszynistę lub kierowcę. Należy jednak pamiętać, że wymagania zawarte w [1, 3, 2] nie stanowią jedynych kryteriów, a dotyczą jedynie oceny możliwości zastosowania napędu spalinowego z uwagi na jego cechy konstrukcyjne oraz osiągane parametry użytkowe. Jednak w omawianych zastosowaniach napędu spalinowego są kluczowe i w dalszej części artykułu będą stanowiły tło rozważań.

Z punktu widzenia przepisów zawartych w [1], napęd spalinowy w przestrzeni podziemnego wyrobiska, nie może pogorszyć wymaganego składu powietrza w wyrobisku, ze szczególnym uwzględnieniem najwyższych dopuszczalnych stężeń gazów, jak pokazano w tabeli 1.

Najwyższe dopuszczalne stężenia gazów w powietrzu wyrobisk podziemnych [1]

Tabela 1

Rodzaj gazu	NDS / mg/m ³ (objętościowo i %)	NDSch / mg/m ³ (objętościowo i %)
Dwutlenek węgla	– (1,0)	– (1,0)
Tlenek węgla	30 (0,0026)	180 (0,015)
Tlenek azotu	5 (0,00026)	10 (0,00052)
Dwutlenek siarki	20 (0,00075)	50 (0,0019)
Siarkowodór	10 (0,0007)	20 (0,0014)

Z kolei z uwagi na dyrektywę ATEX w zakresie niebezpieczeństwa wybuchu metanu i/lub pyłu węglowego, wymagania wobec silnika wraz z niezbędnym wyposażeniem można sprowadzić do następujących:

- ograniczenie temperaturowe którejkolwiek z powierzchni mogących mieć styczność z atmosferą wybuchową – niedopuszczalne jest przekroczenie wartości 150°C,
- zastosowanie osłon przeciwybuchowych o odpowiednim stopniu ochrony w odniesieniu do urządzeń, które będą zabezpieczać.

W dalszej części artykułu przedstawiono wytyczne zaczerpnięte z dyrektywy spalinowej oraz obszar prac, które będą musiały zostać zrealizowane w odniesieniu do zespołu silnikowego.

3. Normy emisji Etapów IIIA, IIIB oraz IV

W odniesieniu do silników spalinowych, zasadnicze wymagania, które musi spełnić producent chcąc wprowadzić produkt na rynek, zawarto w tzw. dyrektywie spalinowej [3]. W dyrektywie określone zostały m.in. graniczne wartości emisji, charakterystyczne dla poszczególnych etapów oraz daty wprowadzenia ich w życie.

Graniczne wartości emisji składników spalin dla wprowadzanych etapów dyrektywy spalinowej [3, 1]

Tabela 2

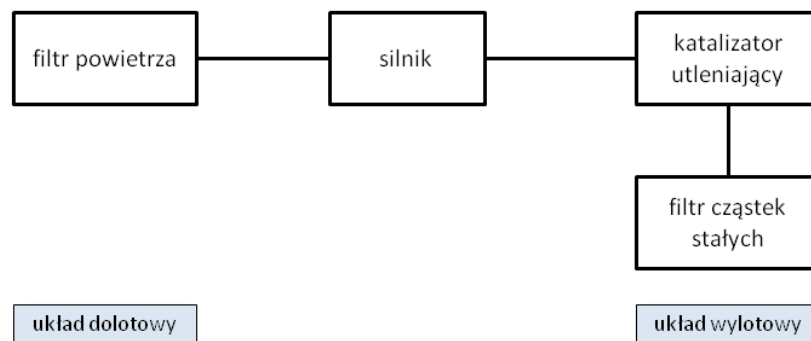
Moc netto P [kW]	Tlenek węgla CO [g/kWh]	Suma węglowodorów i tlenków azotu HC + NO _x [g/kWh]	Węglowodory HC [g/kWh]	Tlenki azotu NO _x [g/kWh]	Cząstki stałe PT [g/kWh]
Etap IIIA					
Data wprowadzenia Etapu IIIA dla kategorii 75÷130 – 31 grudnia 2005					
75 ≤ P < 130	5,0	4,0	-	-	0,3
Data wprowadzenia Etapu IIIA dla kategorii 130÷560 – 31 grudnia 2006					
130 ≤ P ≤ 560	3,5	4,0	-	-	0,2
Etap IIIB					
Data wprowadzenia Etapu IIIB dla kategorii 75÷130 – 31 grudnia 2010					
75 ≤ P < 130	5,0	-	0,19	3,3	0,025
Data wprowadzenia Etapu IIIB dla kategorii 130÷560 – 31 grudnia 2011					
130 ≤ P ≤ 560	3,5	-	0,19	2,0	0,025
Etap IV					
Data wprowadzenia Etapu IV dla kategorii 75÷130 – 31 grudnia 2013					
56 ≤ P < 130	5,0	-	0,19	0,4	0,025
Data wprowadzenia Etapu IV dla kategorii 130÷560 – 30 września 2014					
130 ≤ P ≤ 560	3,5	-	0,19	0,4	0,025

Zgodnie z powyższym silnik wprowadzany na rynek musi spełniać normę Etapu IV, co wymaga zastosowania dodatkowych urządzeń w układzie wylotowym silnika. Należy jednak mieć na uwadze, że spełnienie norm Etapu IV związane jest zarówno z samym silnikiem i jego układem zasilania, jak również z pozaukładową obróbką spalin. Problematyka dostosowania zespołu silnikowego związana jest więc z opracowaniem takich rozwiązań technicznych, by silnik spalinowy wprowadzony na rynek, mógł być bezpiecznie eksploatowany w przestrzeniach wyrobisk górniczych, również tych potencjalnie zagrożonych wybuchem.

W dalszej części artykułu została omówiona problematyka związana z wprowadzeniem zespołu silnika spalinowego, spełniającego Etap IV dyrektywy spalinowej do przestrzeni zagrożonej wybuchem, zwłaszcza do podziemnych wyrobisk górniczych.

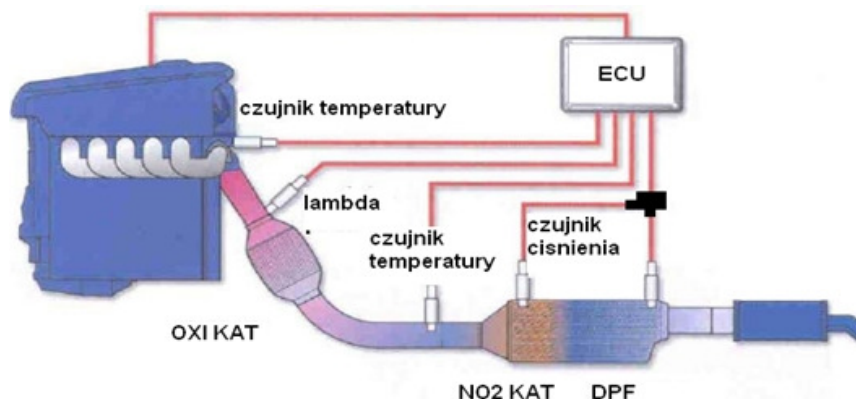
4. Dostosowanie zespołu silnikowego common rail przeznaczonego do pracy w przestrzeniach zagrożonych wybuchem

Jak wspomniano wcześniej można wyróżnić dwie grupy wymagań dotyczących silników spalinowych eksploatowanych w atmosferze podziemnych wyrobisk górniczych. Wymagania zawarte w [1, 3, 2] pozwalają na stwierdzenie, że wprowadzenie nowego silnika spalinowego, rozwijającego moc powyżej 56 kW do zagrożonej wybuchem przestrzeni wyrobiska górniczego sprowadza się de facto do dostosowania wyposażenia elektrycznego oraz układu obróbki spalin do wymagań dyrektywy ATEX. Powstaje zatem zagadnienie techniczno-technologiczne, polegające na odpowiedniej modyfikacji wyposażenia silnika, pozwalającego zachować wymagane poziomy emisji spalin zgodnie z dyrektywą spalinową. Aby je zrealizować koniecznym jest zastosowanie silnika z układem zasilania typu common rail. Układ sterowania systemu common rail pozwala na precyzyjne dozowanie paliwa do komory spalania. Aktualnie obowiązujący Etap IV dyrektywy wymaga, by w układzie wylotowym silnika znalazły się elementy, pokazane na rysunku 2.



Rys. 2. Elementy układu dolotowo-wylotowego silnika spełniającego wymagania Etapu IV dyrektywy spalinowej [opracowanie własne]

W ogólnym przypadku zagadnienie dostosowania dodatkowego wyposażenia w układzie wylotowym silnika można sprowadzić do opracowania izolacji termicznej, jednak w układzie obróbki spalin występują również elementy wyposażenia elektrycznego. Na rysunku 3 przedstawiono schemat typowego układu oczyszczania spalin stosowanego w pojazdach samochodowych.



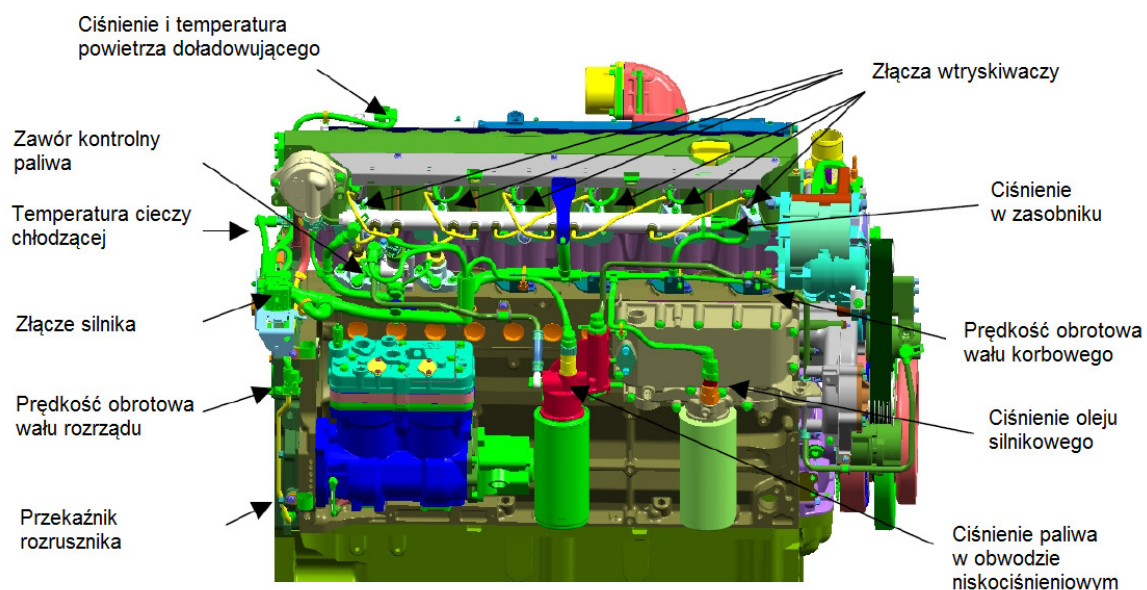
Rys. 3. Schemat układu oczyszczania spalin [7]

W przedstawionym układzie, w zakresie wyposażenia elektrycznego, można wyróżnić czujniki temperatury oraz czujniki ciśnienia przed i za filtrem cząstek stałych, odpowiedzialne za pomiar różnicy ciśnień (Δp). Pojawia się więc konieczność zabezpieczenia ich z uwagi na warunki pracy w atmosferze potencjalnie wybuchowej.

Oprócz układu obróbki spalin mamy również rozbudowane wyposażenie samego silnika, na które składają się m.in.:

- układ wtryskowy silnika,
- zestaw czujników zabudowanych w konstrukcji silnika,
- sterownik.

Przykład wyposażenia elektrycznego silnika przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Wyposażenie elektryczne silnika spalinowego na przykładzie jednostki TCD 2013 L06 2V [4]

Kompletacja wyposażenia elektrycznego silnika wynika w głównej mierze z zastosowanego układu zasilania. Układ zasilania common rail wymaga bardzo precyzyjnego sterowania, co wymusza obecność mikroprocesorowego sterownika, czujników dostarczających informacji do sterownika o stanie silnika oraz instalacji elektrycznej łączącej cały system. Za proces wtrysku odpowiadają z kolei wtryskiwacze, które również są sterowane przez jednostkę mikroprocesorową. Stanowią jednak zespół mechaniczno-elektryczny i jako takie również muszą zostać objęte działaniami w procesie dostosowania do pracy w warunkach zagrożenia wybuchem.

Oprócz wymienionych układów silnik musi posiadać źródło energii elektrycznej oraz rozrusznik elektryczny w przypadku, gdy nie jest stosowany rozruch np. hydrauliczny. Zespół silnikowy – silnik spalinowy, układ obróbki spalin i związane z nimi elementy wyposażenia elektrycznego – musi zostać poddany procesowi dostosowania. Zakres oraz rodzaj prac w zależności od obszaru, który będą obejmować został opisany w dalszej części artykułu.

5. Dostosowanie zespołu silnikowego do wymagań dyrektywy ATEX

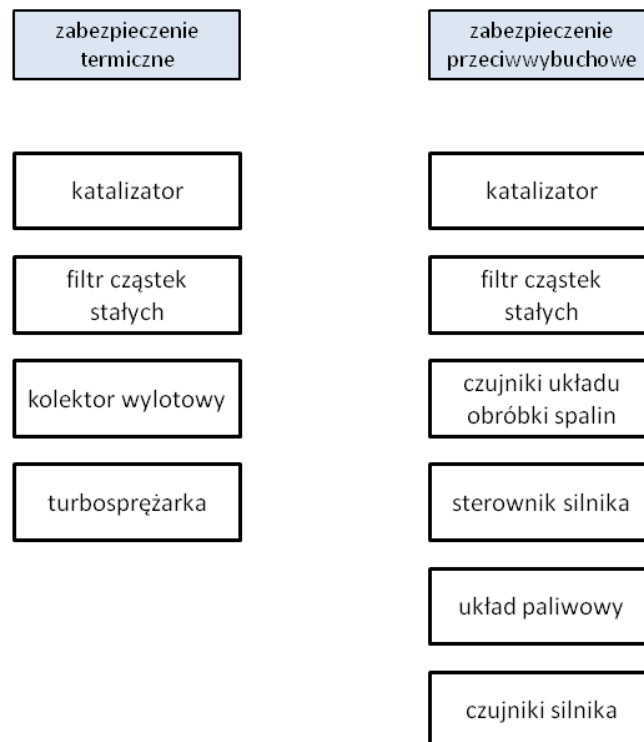
Uwzględniając ogólne wymagania sformułowane w rozdziale 2, w trakcie prac należy skoncentrować się na następujących elementach i układach:

- układ paliwowy ze szczególnym uwzględnieniem wtryskiwaczy,
- czujniki silnika,
- czujniki układu obróbki spalin,
- sterownik silnika,
- kolektor wylotowy silnika,
- turbosprężarka,
- katalizator,
- filtr cząstek stałych.

Istotą procesu dostosowania będzie:

- zabezpieczenie termiczne konstrukcji mechanicznej wybranych zespołów,
- zabezpieczenie przeciwwybuchowe wybranych elementów zespołu silnikowego.

Na rysunku 5 przedstawiono główne podzespoły silnika w aspekcie ich ochrony termicznej i przeciwwybuchowej, zgodnie z wymaganiami dyrektywy ATEX.

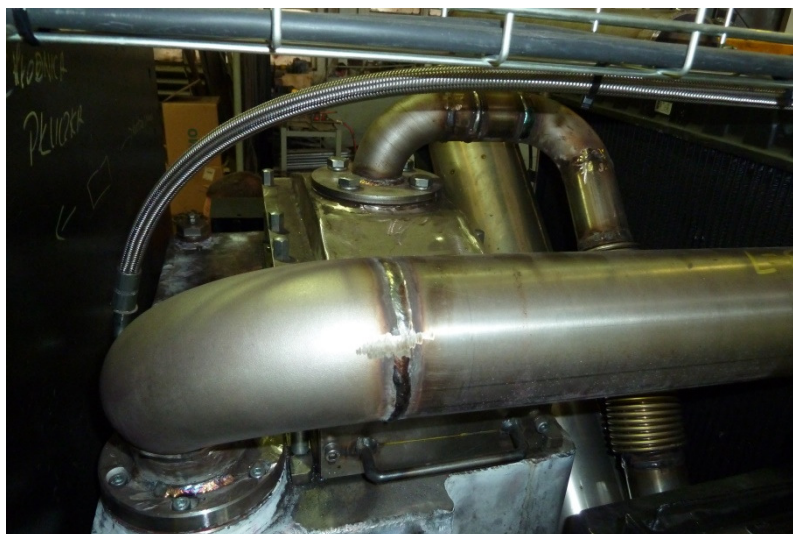


Rys. 5. Układy zespołu silnikowego podlegające dostosowaniu do wymagań dyrektywy ATEX
[opracowanie własne]

Środki i rozwiązania techniczne, które umożliwiają realizację zabezpieczeń przeciwwybuchowych to przede wszystkim:

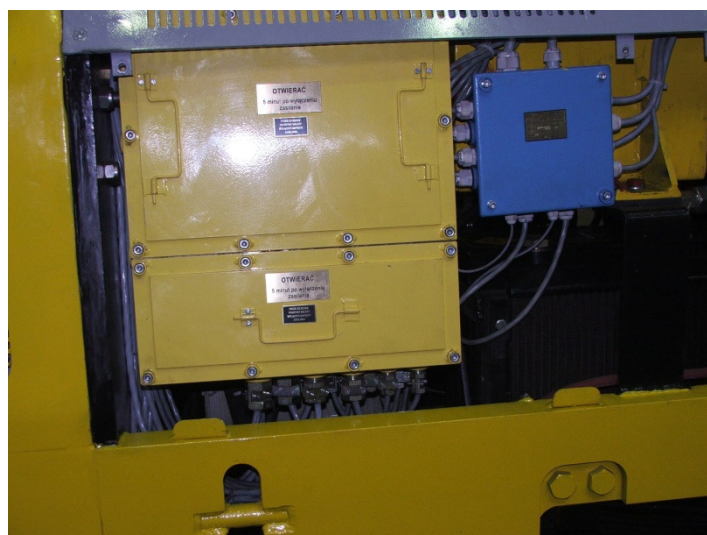
- osłony przeciwwybuchowe, w tym ognioszczelne oraz wzmocnione,
- iskrobezpieczna konstrukcja układów elektrycznych, w tym urządzeń oraz obwodów.

Zabezpieczenie termiczne realizuje się najczęściej poprzez zastosowanie płaszcza chłodzącego, wykorzystującego np. układ chłodzenia silnika spalinowego. Przykłady tego typu rozwiązań przedstawiono poniżej.



Rys. 6. Zespoły układu wylotowego silnika spalinowego w wykonaniu przeciwwybuchowym [6]

Widoczny na pierwszym planie przewód wylotu spalin jest konstrukcją typu „rura w rurze”, z chłodzeniem powierzchni w postaci płaszcza wodnego. Sposób łączenia przewodu ze współpracującymi z nim zespołami oraz jego konstrukcja techniczna stanowi przykład zarówno zabezpieczenia termicznego jak i osłony przeciwwybuchowej.



Rys. 7. Przykład wyposażenia elektrycznego w osłonach ognioszczelnych typu „d” [6]

Przedstawione skrzynie ognioszczelne typu „d” są przykładem zastosowania osłon przeciwwybuchowych (rys. 7), zgodnie z wymaganiami dyrektywy [2]. W podobny sposób należy zabezpieczyć np. jednostkę sterującą pracą silnika typu common rail.

6. Podsumowanie

W artykule omówiono zagadnienia związane z dostosowaniem nowoczesnego silnika spalinowego do wymagań obowiązujących w strefach zagrożonych wybuchem metanu i/lub pyłu węglowego. Główne ograniczenia w stosowaniu silników spalinowych w maszynach roboczych, również w tych pracujących w przestrzeniach potencjalnie wybuchowych, to występowanie zagrożeń wybuchowych oraz konieczność spełnienia wymagań związanych z poziomem emisji substancji toksycznych obecnych w spalinach. Przedstawiono wymagania dwóch głównych aktów prawnych, obowiązujących przy wprowadzaniu napędu spalinowego do eksploatacji. Scharakteryzowano poszczególne układy silnika oraz określono główne obszary działań w procesie jego dostosowania do eksploatacji w podziemnych wyrobiskach górniczych. Przedstawiono również ogólne sposoby ograniczenia zagrożenia zapłonem i wybuchem atmosfery potencjalnie niebezpiecznej.

Literatura

- [1] Dobrzaniecki P. i in.: Nowoczesny napęd spalinowy maszyn samobieżnych dla górnictwa. Identyfikacja zagadnień i zakresu prac związanych z dostosowaniem silnika spalinowego do wymagań Etapu IV dyrektywy spalinowej. ITG KOMAG Gliwice 2016 (materiały niepublikowane)
- [2] Dyrektywa 2014/34/UE Parlamentu Europejskiego i Rady 2014/34/UE z dnia 26 lutego 2014 r. w sprawie harmonizacji ustawodawstw państw członkowskich odnoszących się do urządzeń i systemów ochronnych przeznaczonych do użytku w atmosferze potencjalnie wybuchowej
- [3] Dyrektywa 97/68/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 16 grudnia 1997 r. w sprawie zbliżenia ustawodawstw Państw Członkowskich odnoszących się do środków dotyczących ograniczenia emisji zanieczyszczeń gazowych i pyłowych z silników spalinowych montowanych w maszynach samojezdnych nieporuszających się po drogach
- [4] Materiały techniczne Deutz, udostępnione przez BTH Fast
- [5] Przepisy bezpieczeństwa i higieny pracy oraz prowadzenia ruchu i specjalistycznego zabezpieczenia przeciwpożarowego w podziemnych zakładach górniczych. SITG Katowice 1998
- [6] Suffner H. i inni: Innowacyjne i bezpieczne systemy transportu w zakładach produkcji i przeróbki surowców mineralnych. Lokomotywa dołowa spalinowa dla kopalń węgla Lds-100K-EMA. ITG KOMAG Gliwice 2010 (materiały niepublikowane)
- [7] www.forum.octaviaclub.pl/viewtopic.php?t=55918

Rozproszone systemy sterowania maszyn i urządzeń górniczych

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

Streszczenie:

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

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

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

Abstract:

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

1. Wprowadzenie

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

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

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

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

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

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

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

2. Czujniki samozasilające się

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

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

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

Badania prowadzone są w trzech głównych kierunkach:

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

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

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

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

2.1. Źródła energii dostępne dla czujników samozasilających

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

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

3. System sterowania i diagnostyki KOGASTER

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

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

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

Podstawowe moduły systemu KOGASTER to:

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

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



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

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



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

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

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

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

Można ponadto podłączyć:

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

Moduł wyposażony jest również w:

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

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

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

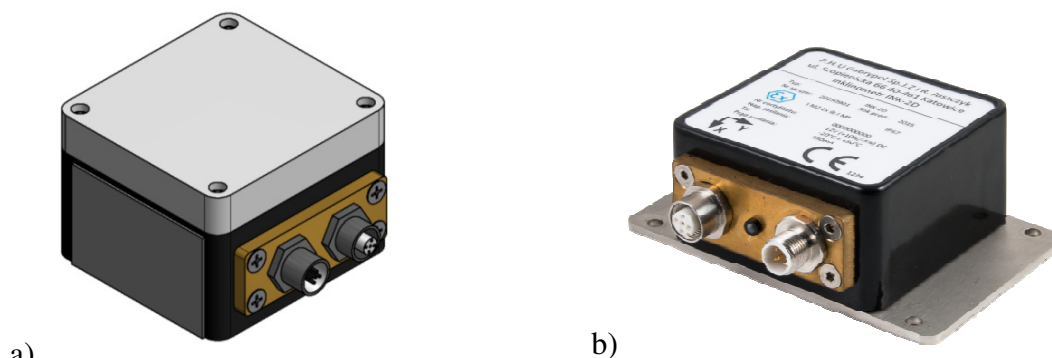
Moduł Inteligentnego Sterowania MIS-1 (rys. 3) jest uzupełnieniem systemu KOGASTER w zakresie małych i tanich systemów sterowania rozproszonego. Jest on wyposażony

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



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

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

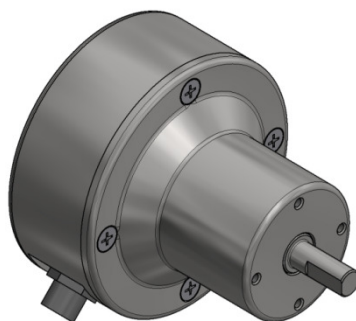


Rys. 4. Moduły systemu KOGASTER: a) Moduł Komunikacji Bezprzewodowej MKB-1 [10],
b) Inklinometr INK-2D [27]

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

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

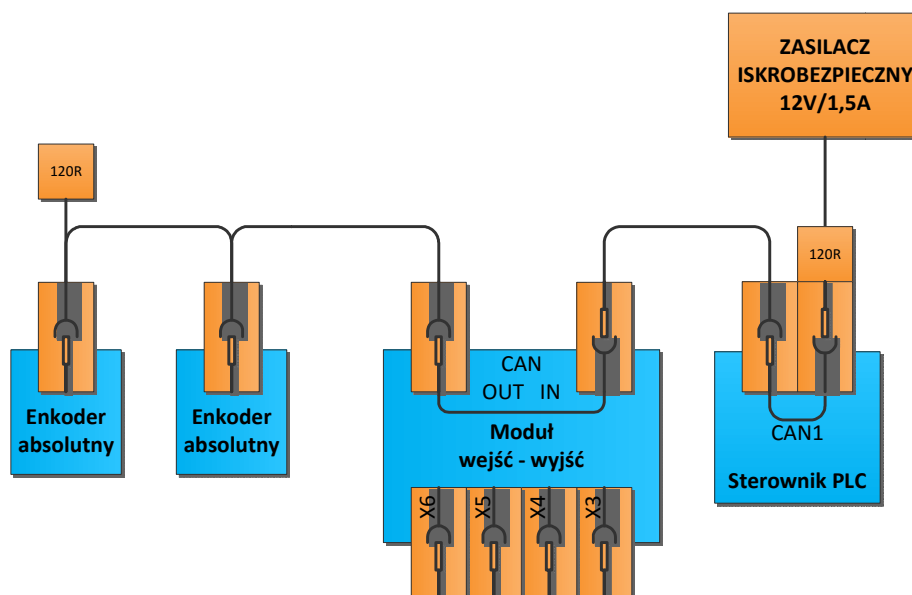
Kolejnym nowym sensorem systemu KOGASTER jest iskrobezpieczny, absolutny enkoder magnetyczny EM-1 (rys. 5). Służy on do pomiaru pozycji elementów mechanicznych maszyn. Enkoder magnetyczny jest odporny na drgania i udary mechaniczne, co umożliwia jego zabudowę w kombajnach ścianowych, chodnikowych oraz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



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

3.1. Struktura rozproszonego układu sterowania

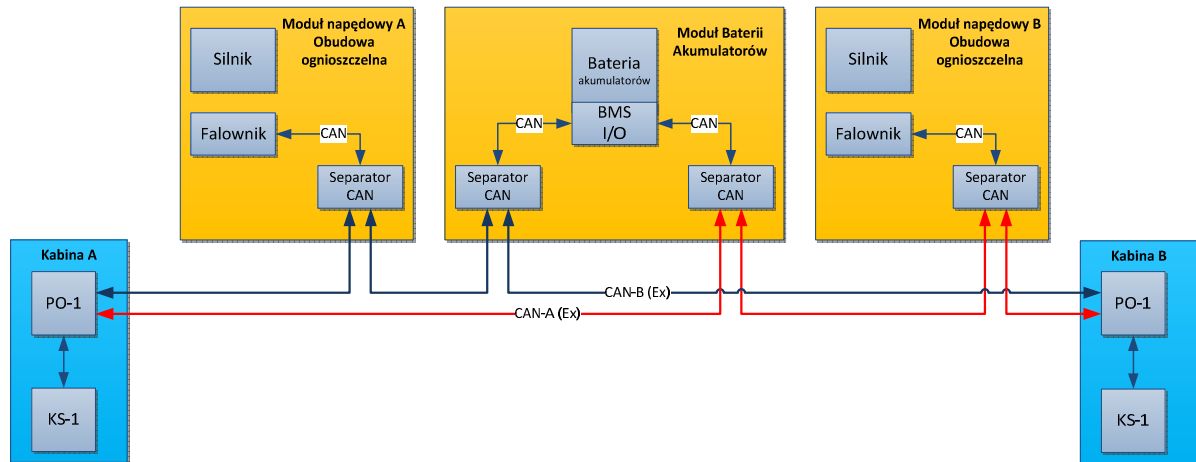
Konfiguracja rozproszonego układu sterowania składa się z modułów sterownika, wejść-wyjść, przetworników pomiarowych i elementów wykonawczych oraz interfejsu cyfrowego, połączonych cyfrową magistralą danych CAN. Zaletą takiego rozwiązania jest możliwość zasilania i transmisji danych w jednej wiązce przewodów.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



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

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

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



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

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

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

4. Inteligentne sieci komunikacyjne

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

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

4.1. Protokoły trasowania w sieciach Ad Hoc

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

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

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

4.2. Koncepcja samoorganizującej struktury komunikacyjnej w sieci sensorycznej

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

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

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

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

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

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

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

5. Podsumowanie

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

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

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

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

Literatura

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

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

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

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