

Grzegorz Grzywnowicz<sup>1</sup>, Maciej Roskosz<sup>2\*</sup>, Krzysztof Porębski<sup>1</sup>, Franciszek Kurdziel<sup>1</sup>, Adam Kalwar<sup>1</sup>

<sup>1</sup>PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A., Jastrzębie Zdrój

<sup>2</sup>AGH Akademia Górniczo-Hutnicza, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki

# Wybrane aspekty diagnostyki elementów silników spalinowych zasilanych metanem

## Selected aspects of diagnostics of components of methane-fueled internal combustion engines

### ABSTRACT

The article describes the topics related to selected components of the internal combustion engine, which are key from the point of view of operational diagnostics. The degree of wear, degradation, noticed damage or symptoms of deficiencies of selected elements or technological systems have an impact on the achieved operating parameters. The above phenomena also affect the economics of the device's operation and the possibility of its components failing.

**Keywords:** gas engines, methane, diagnostics

### STRESZCZENIE

W artykule opisano tematykę związaną z wybranymi elementami silnika spalinowego, które są kluczowymi z punktu widzenia diagnostyki eksploatacyjnej. Stopień zużycia, degradacji, zauważone uszkodzenia lub objawy niedomagań wytypowanych poszczególnych elementów lub układów technologicznych mają wpływ na osiągnięte parametry eksploatacyjne. Powyższe zjawiska mają także wpływ na ekonomikę pracy urządzenia oraz możliwość awarii jego podzespołów.

**Słowa kluczowe:** silniki gazowe, metan, diagnostyka

### 1. Wstęp

Niniejszy artykuł dotyczy wybranych układów / elementów silników spalinowych zasilanych gazem, a w szczególności poruszone zostaną zagadnienia związane z ich diagnostyką ruchową [1 - 4]. Analiza obejmuje silniki, w których paliwem jest gaz z odmetanowania kopalń. Silnik zabudowane są w przedsiębiorstwie PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.

Spółka eksploatuje:

- 10 silników – paliwo gaz z odmetanowania kopalń JSW S.A. lub SRK Sp. z o.o. (Oddziały: Moszczenica, Pniówek oraz Suszec).
- 1 silnik – paliwo gaz sieciowy GZ51 (Oddział Wodzisław).
- 1 silnik – paliwo gaz koksowniczy (Oddział Częstochowa).

Silniki zabudowane w latach 1998 – 2015, przykładowy pokazano na rys. 1.

Poniżej podano przykładowe oznaczenie silnika w tabliczce znamionowej

- C - Caterpillar (Producent silnika)
- G - Silnik gazowy
- 260 - Seria
- X - Liczba cylindrów

W tabeli 1 przedstawiono podstawową analizę gazu z odmetanowania kopalń JSW S.A. lub SRK Sp. z o.o..

### 2. Podstawowe informacje o analizowanych silnikach

Konstrukcyjnie każda z jednostek jest spalinowym silnikiem tłokowym, w którym energia spalanego paliwa, w tym przypadku mieszaniny gazu z powietrzem, zamieniana jest



Rys. 1. Silnik typ CG 260 – 16 [5]

Fig. 1. Engine type CG 260 – 16 [5]

**Tab. 1.** Podstawowa analiza metanu (wartości średnie z poszczególnych kopalń JSW S.A. lub byłych kopalń JSW S.A – SRK Sp. z o.o.) [1]

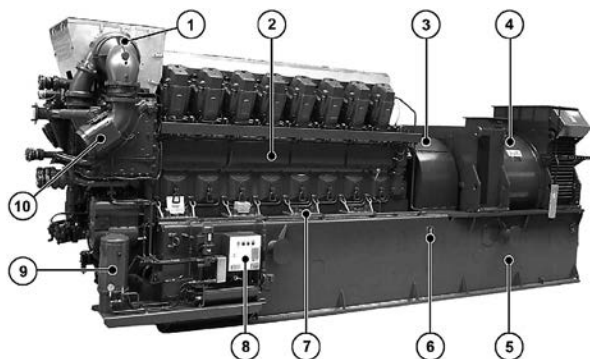
**Tab. 1.** Basic methane analysis (average values from individual mines of JSW S.A. or former mines of JSW S.A - SRK Sp.z o.o.) [1]

Analiza składu	Kopalnia			
	KWK JasMos obecnie SRK	KWK Ruch Zofiówka	KWK Pniówek	KWK Suszec obecnie SRK
Azot [%]	35,98	40,18	38,62	42,64
CO <sub>2</sub> [%]	3,44	4,5	2,88	5,47
Etan [%]	0,1	0,1	0,14	0,14
Metan [%]	53,74	48,8	48,8	49,28
Tlen [%]	6,74	6,46	9,52	2,55
Wartość opałowa [MJ/m <sup>3</sup> ]	19,36	17,56	17,62	17,72

\*Autor korespondencyjny. E-mail: mroskosz@agh.edu.pl

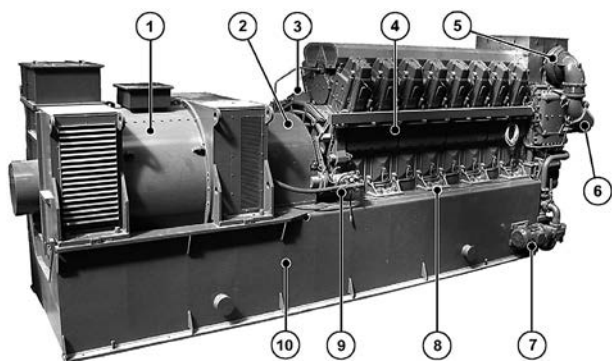
w energię mechaniczną. Energia mechaniczna przenoszona jest na wał, który poprzez sprzęgło, napędza generator wytwarzający energię elektryczną.

Poniżej pokazano trzy rysunki silnika, na których zobrazowano jego najważniejsze podzespoły i elementy. Rysunek nr 4 obrazuje oznaczenie stron silnika oraz ustala zasady oznaczeń poszczególnych cylindrów. Taka typizacja oznaczeń pomaga w czynnościach remontowych i zapobiega ewentualnej pomyłce przy np. powtórny montaż elementów głowic, zaworów, etc.



Rys. 2. Strona lewa silnika (1 Turbosprężarka, 2 Silnik, 3 Koło zamachowe / Sprzęgło, 4 Generator, 5 Rama podstawowa, 6 Tabliczka znamionowa agregatu, 7 Łożyskowanie silnika, 8 Elektryczny podgrzewacz, 9 Filtr oleju smarowego strumienia pobocznego, 10 Mieszacz gazu i powietrza) [5]

Fig. 2. Left side of the engine (1 Turbocharger, 2 Engine, 3 Flywheel / Clutch, 4 Generator, 5 Base frame, 6 Generator nameplate, 7 Engine mounting, 8 Electric heater, 9 Side stream lube oil filter, 10 Gas and air mixer) [5]



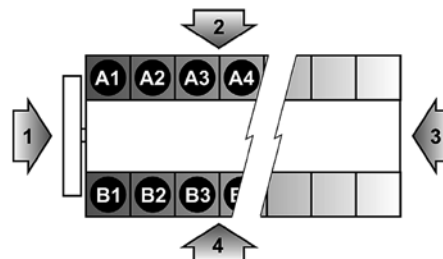
Rys. 3. Strona prawa silnika (1 Generator, 2 Koło zamachowe / Sprzęgło, 3 Układ zapłonowy, 4 Silnik, 5 Turbosprężarka, 6 Mieszacz gazu i powietrza, 7 Pompa wstępnego smarowania, 8 Łożyskowanie silnika, 9 Rozrusznik na sprężone powietrze, 10 Rama podstawowa) [5]

Fig. 3. Right side of the engine (1 Generator, 2 Flywheel / Clutch, 3 Ignition, 4 Engine, 5 Turbocharger, 6 Gas and air mixer, 7 Pre-lubrication pump, 8 Engine mounting, 9 Compressed air starter, 10 Basic frame) [5]

Strony silnika:

- 1) Strona napędowa - Strona koła zamachowego, strona sprzęgła
- 2) Strona lewa - Strona cylindrów A
- 3) Strona wolna - Strona czołowa, strona przeciwległa do sprzęgła
- 4) Strona prawa - Strona cylindrów B

Każdy cylinder posiada oznaczenie składające się z jednej litery oraz jednej cyfry. Patrząc od strony napędu, liczenie rozpoczyna się po lewej stronie od cylindra A1, a po prawej od cylindra B1. Patrząc od strony napędu silnik obraca się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara, w lewo.



Rys. 4. Oznaczenie stron silnika, numeracja cylindrów i kierunek obrotu silnika [1]

Fig. 4. Marking of engine sides, numbering of cylinders and direction of engine rotation [5]

### 3. Kryteria wyboru układu lub elementu silnika do diagnostyki

Zagadnienie, którego dotyczy niniejszy artykuł odnosi się do wytypowania układów / elementów silnika, których diagnostyka pozwoli na określenie ich wpływu na parametry pracy. Jest to proces złożony, ponieważ wymaga dużego doświadczenia eksploatacyjnego i sporej wiedzy eksperckiej. Określenie kryteriów, jakie powinny spełniać wytypowane części powinno być poparte wiedzą eksploatacyjną, ale także, jakże ważnym w obecnych czasach, rachunkiem ekonomicznym.

Poniżej określono kryteria, które powinny być brane pod uwagę przy wyborze takich układów / elementów silnika, które z wysokim prawdopodobieństwem pozwolą nam na poprawną diagnostykę mającej na celu zapewnienie niezawodności jego dalszej eksploatacji. Obejmują one:

- 1) Zalecenia Dokumentacji Techniczno-Ruchowej (DTR), w której znajduje się wykaz elementów, dla których podano wartości graniczne, np. wymiary, których przekroczenie lub niedotrzymanie może spowodować uszkodzenie urządzenia.
- 2) Analizę zużycia eksploatacyjnego układów silnika / elementów poprzez wykonywanie przeglądów oraz okresowych, kontrolnych pomiarów danych części oraz prowadzenie rejestru, w celu zebrania informacji o postępującym zużyciu eksploatacyjnym danego układu silnika lub jego elementu.
- 3) Umieszczenie wytypowanego układu silnika lub jego elementów wpływające na prosty i nie generując nadmiernych kosztów demontaż i po wykonaniu procedur diagnostycznych powtórny montaż, tak, aby urządzenie gotowe było do uruchomienia i pracy w całym zakresie obciążenia.
- 4) Ciężar i wymiary badanej części / elementu – gabaryty pozwalające na przeprowadzenie badań nieniszczących z jednoczesną minimalizacją kosztów towarzyszących, np. użycie specjalistycznych urządzeń dźwigowych do demontażu, np. demontaż wału głównego silnika, uniknięcie badania małych, typowych elementów, np.

elementy złączne (śruby, nakrętki).

- 5) Analiza awarii urządzenia pod kątem części / elementów odpowiedzialnych za awarię – wytypowanie najbardziej newralgicznych części / elementów, których badanie pozwoli na osiągnięcie założonego celu badawczego.
- 6) Dobór optymalnej metody badawczej, która pozwoli na weryfikację części / elementu bez konieczności dodatkowych zabiegów, np. mycie, odtłuszczenie, specjalna obróbka powierzchni etc. po przeprowadzonym badaniu.

#### 4. Wybór układów silnika lub jego elementów

Ponad 20 letnie doświadczenie eksploatacyjne pozwala na wytypowanie kilku, opisanych poniżej układów silnika, których częsta kontrola oraz badanie jest jak najbardziej wskazana w celu utrzymania poprawnej pracy silnika. Poprawna praca to osiągnięcie mocy znamionowej oraz brak problemów eksploatacyjno-ruchowych do czasu awarii (zdarzenie losowe) lub planowanego przeglądu wynikającego z DTR lub dobrych praktyk inżynierskich. Stan techniczny silnika jest analizowany poprzez pryzmat kosztów, przychodów i zysków poprzez służby ekonomiczne, co prowadzi do wytypowania newralgicznych układów:

- układ paliwowy silnika,
- układ smarowania silnika i generatora,
- układ spalinowy.

Powyższe zestawienie należy traktować jako otwarte z możliwością dodawania w miarę zdobywania doświadczeń eksploatacyjnych, wiedzy oraz zasobności portfela nowych układów lub ich elementów. Można osiągnąć taki punkt, w którym nakłady na przeglądy, kontrole i badania zrównają się lub przewyższą koszty remontów lub przeglądów (robocizna i części zamienne). W tym momencie należy zastanowić się nad dalszą celowością i sensem prac badawczo-diagnostycznych.

#### 5. Opis i diagnostyka wybranych układów silnika.

Silniki składają się z wielu odrębnych układów, których efektem współdziałania jest produkcja energii mechanicznej przetwarzanej w analizowanych przypadkach w energię elektryczną oraz ciepłą. W tym przypadku energia ciepła jest produktem ubocznym powstającym w wyniku konieczności schładzania korpusu silnika, mieszanki powietrzno-gazowej czy też oleju. Ten produkt uboczny jest bardzo pożądanym w elektrociepłowniach i stanowi znaczące źródło przychodów. Spaliny wylotowe o temperaturze ok. 450°C stanowią dodatkowe źródło ciepła, którego wykorzystanie z punktu widzenia efektywności termodynamicznej oraz ekonomicznej jest jak najbardziej wskazane.

Diagnostyka oraz umiejętna analiza bieżąca oraz historyczna pozyskanych danych eksploatacyjnych wpływa na uzyskiwane parametry eksploatacyjne urządzenia (moc, ciepło). Stanowi także źródło danych, które mogą być wykorzystane do analiz i badań nad zużyciem eksploatacyjnym części i podzespołów silnika. Należy jednak wziąć pod uwagę, iż pomimo tego, że silniki zaopatrzone są w dość dużą liczbę czujników i automatykę kontrolną ich pracy, istnieją

obszary, w których można uzyskać dodatkowe informacje diagnostyczne. Na podstawie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych można uzupełnić w/w instalacje pomiarowe o dodatkowe elementy kontroli, aby wyprzedzić powstanie awarii lub zapobiec wcześniejszej degradacji elementów silnika. Kontrola taka może również służyć do przedłużenia czasu wykorzystania elementów silnika, a tym samym umożliwić poprzez kompilację i analizę danych ruchowych oraz oględzin / pomiarów / badań elementów, wydłużenie czasu eksploatacji silnika.

Silnik ma kilka podstawowych układów, które muszą i powinny być poddawane kontroli i badaniom, ponieważ mają one duży wpływ na wydajność oraz bezawaryjną pracę całego układu silnika i generatora.

Układ paliwowy silnika - składa się z instalacji doprowadzającej gaz do układu spalania. W tej, tzw. „ścieżce gazowej” (rysunki 5 i 6) możemy zidentyfikować kilka newralgicznych elementów, mających wpływ na pracę silnika.

Jakość gazu ma bardzo duży wpływ na stabilną pracę silnika dlatego też kontrola stanu instalacji jest jednym z głównych elementów, na które trzeba zwrócić szczególną uwagę. Kontrola zawilgocenia, upustu kondensatu, stan filtrów (czystość) oraz pozostałych elementów to kluczowe składniki wpływające na bezawaryjną lub awaryjną pracę silnika. Na zaprezentowanej „ścieżce gazowej” znajdują się trzy newralgiczne elementy, które można doposażyć w dodatkowe pomiary kontrolne, dające nam wgląd w sytuację stanu wydajności sieci gazowej. Pierwszym elementem jest filtr gazu, który z uwagi na jakość gazu kopalnianego (zawilgocenie oraz w niektórych przypadkach zaolejenie) ulega zabrudzeniu. Zastosowanie kontroli ciśnienia pomiaru przed i za filtrem pozwala na ocenę stanu wydajności przepływu paliwa gazowego do silnika (różnica ciśnień). Drugim elementem jest tzw. „zawór zerowy” który redukuje nam ciśnienie podane do ciśnienia prawie zerowego (0,3 mm słupa wody), gdzie silnik pobiera gaz do mieszalników. Jest znanym z praktyki faktem, że przez zmęczenie materiału sprężyny regulatora lub degradację membran może nastąpić niedostateczne podanie odpowiedniej ilości gazu do silnika. Zastosowanie pomiarów kontrolnych różnicy ciśnienia pozwoli na odpowiednią kontrolę nad stanem sieci gazowej przed silnikiem.

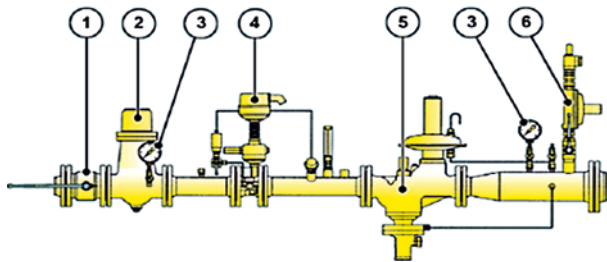
Trzecim ważnym elementem instalacji gazowej jest przerywacz płomienia, który, tak jak filtr gazu, ulega zanieczyszczeniu. Kontrola jego stanu przepustowości jest jednym z elementów oceny stanu sieci. Niestabilna praca sieci gazowej powoduje tzw. falowanie mocy, a przez to większe obciążenia elementów silnika (wał, łożyska), co prowadzi do szybszego zużycia eksploatacyjnego poszczególnych elementów urządzenia, a w ostateczności do jego awarii.

Układ smarowania silnika i generatora - układ ten jest jednym z najważniejszych, jeżeli nie najważniejszym punktem, który powinien podlegać analizie i pomiarom, w celu uniknięcia przykrych niespodzianek ruchowych.

Układ ten składa się z części smarowania elementów silnika i odbioru ciepła z układu smarnego. Silniki są dość dobrze uzbrojone w przyrządy służące do kontroli temperatury i ciśnienia oleju. Uzyskiwane dane pomiarowe zapewniają



kontrolę nad stanem obecnym (ruchowym), lecz nie pokazują trendów zmian w układzie. Takim „kontrolerem”, który pomoże wyprzedzić stan awaryjny jest okresowa analiza oleju.



Rys. 5. Ścieżka gazowa doprowadzająca paliwo gazowe do silnika (1. Urządzenie odcinające (kurek z czopem kulistym) 2. Filtr gazu 3. Manometr 4. Wolometr z przelicznikiem ilości 5. Regulator ciśnienia gazu z urządzeniem odcinającym 6. Urządzenie kontrolne ilości gazu przeciekowego) [6]

Fig. 5. Gas path leading gaseous fuel to the engine (1. Shut-off device (ball valve plug) 2. Gas filter 3. Pressure gauge 4. Volumetric with volume conversion 5. Gas pressure regulator with shut-off device 6. Leak gas quantity control device) [6]

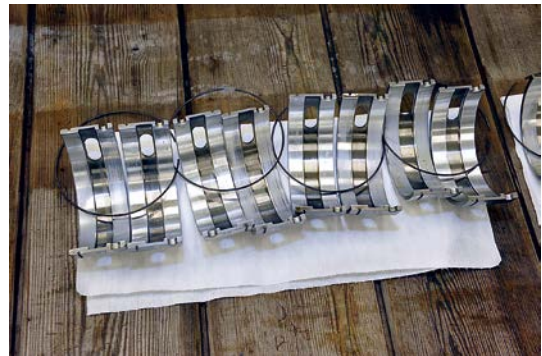


Rys. 6. Instalacja doprowadzająca paliwo gazowe do silnika - ścieżka gazowa

Fig. 6. Gas supply system for the engine - gas path

Analiza pokazuje, czy elementy silnika, takie jak: panewki – rys. 7, wał – rys. 8, tłoki – rys.9, korbowody– rys.9 nie ulegają degradacji. Analizy te powinny zawierać badania na obecność metali, krzemianów, siarki oraz ogólnego stanu oleju (tzw. starzenie, kwasowość, zasadowość). Smarowanie stosowane jest także na łożyskach generatora – rysunki 10 i 11, gdzie z uwagi na pory roku stężenie smaru jest zmienne i odprowadzenie nadmiaru smaru kanałami do tego przystosowanymi może ulegać zakłóceniom. Zjawisko to powoduje wzrost temperatur na łożyskach (lato do 80 °C, zima 40°C). Z doświadczenia wiadomo, że bardzo pomocnym elementem wspierającym kontrolę nad stanem łożysk generatora byłyby okresowe pomiary drgań i osiowości, które pokażą z wyprzedzeniem stan łożysk generatora. Zainstalowanie układu do ciągłego pomiaru drgań byłoby z punktu widzenia

diagnostyki wskazane i celowe. Rozwiązanie te umożliwiłoby ciągłą rejestrację oraz kontrolę kluczowego parametru.



Rys. 7. Panewki korbowodów  
Fig. 7. Crankbait shells



Rys. 8. Wał układu rozrządu silnika.  
Fig. 8. Engine timing shaft.



Rys. 9. Zestaw tłoka z korbą korbowodu z dolną częścią głowicy  
Fig. 9. Piston with connecting rod crank with the lower part of the head



Rys. 10. Uszkodzone łożysko generatora  
Fig. 10. Generator bearing defective



Rys. 11. Wirnik generatora  
Fig. 11. Generator rotor

Układ spalinowy – spaliny z silnika wykorzystywane są nie tylko jako nośnik ciepła w wymiennikach, ale także pełnią rolę medium napędowego turbosprężarek silnika. Turbosprężarki posiadają pomiary temperatury spalin, obrotów oraz ciśnienia doładowania, czyli kontrolę podstawowych parametrów pracy. Podczas pracy może nastąpić, np. rozszczelnienie się kanałów spalin, co powoduje tzw.

przedmuchy i utratę części spalin służących do napędu turbin. Prosty element sprawdzającym, w początkowej fazie stopniowego osłabienia pracy turbiny, jest kontrola temperatury wzdłuż kanału spalin na obu stronach silnika. Odbywa się to poprzez pomiar temperatury (pirometrem) na osłonach kanału w rejonie każdej głowicy. Innym sposobem jest użycie kamery termowizyjnej, która daje kompleksowy obraz rozkładu temperatury na badanym elemencie, co umożliwia stwierdzenie usterki i szybką reakcję obsługi. Przegrzanie osłony podczas przedmuchu wskazuje na nieuszczelnienie, która jest powodem obniżenia wydajności pracy silnika. Drugim elementem diagnostyki i oceny pracy silnika jest pomiar NO<sub>x</sub>, który jest bardzo dobrym wskaźnikiem aktualnego spalania silnika i wskazuje czy mieszanka jest prawidłowa i czy należy skorygować parametry silnika (np. krzywą spalania).

## 6. Podsumowanie

Poruszone zagadnienia są istotne z punktu widzenia diagnostyki eksploatacyjnej. Doposażenie pewnych układów silników w dodatkowe pomiary umożliwiłoby szybsze reagowanie na stwierdzone nieprawidłowości. Inną drogą działania mającego na celu zwiększenie niezawodności eksploatacji silników jest dobranie odpowiedniego zakresu i technik metod badań nieniszczących. Konsekwencją takiego działania mogłoby być uniknięcie awarii, a co za tym idzie nieplanowanych postojów, które generują koszty zarówno po stronie usuwania skutków awarii oraz braku produkcji energii elektrycznej i ciepła.

## 7. Literatura/References

- [1] Grzywnowicz G., Kalwar A., Kurdziel F.: Gaz kopalniany. Doświadczenia z eksploatacji silników gazowych Zeszyt Naukowy Systemy Wspomagania w Inżynierii Produkcji wydawnictwo PANOVA
- [2] Gatnar K. Methane from coal beds as alternative fuel - examples of solutions in Jastrzębska Spółka Węglowa S.A. Polityka Energetyczna – Energy Policy Journal. 2006;9(1):423-433
- [3] Nawrat S., Napieraj S., Kucharczyk B., Stasińska B.: Proecological technology of methane utilization from mines [w:] 22 nd World Mining Congress & Expo: 11-16 September 2011, UCTEA The Chamber of Mining Engineers of Turkey, Ankara 2011
- [4] Pająk S.: Praktyczne uwagi dotyczące pomiarów odbiorczych i gwarancyjnych układów kogeneracyjnych opartych na silnikach gazowych, XVI Forum Ciepłowników Polskich, Międzyzdroje wrzesień 2012.
- [5] DTR firmy Caterpillar
- [6] DTR firmy MWM Deutz
- [7] Książki napraw PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.