



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

DZIEDZINA NAUK INŻYNIERYJNO-TECHNICZNYCH

DYSCYPLINA INŻYNIERIA MECHANICZNA

ROZPRAWA DOKTORSKA

Badania nieniszczące głównych (wytypowanych) elementów silników gazowych, w celu wypracowania programu zmiany systemu przeglądów okresowych silników

Autor: mgr inż. Grzegorz Grzywnowicz

Promotor rozprawy: dr hab. inż. Maciej Roskosz Prof. AGH

Praca wykonana: AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Inżynierii Mechanicznej i Robotyki, Katedra Inżynierii Maszyn i Transportu

Kraków, 2023



AKADEMIA GÓRNICZO-HUTNICZA IM. STANISŁAWA STASZICA W KRAKOWIE

FIELD OF ENGINEERING AND TECHNOLOGY

SCIENTIFIC DISCIPLINE: MECHANICAL ENGINEERING

DOCTORAL DISSERTATION

Non-destructive testing of the main (selected) components of
gas engines, with a view to developing a programme for
changing the engine periodic inspection system

Author: MSc. Eng. Grzegorz Grzywnowicz

Promoter: Prof. PHD Eng. Maciej Roskosz

Completed at: AGH University of Science and Technology in Kraków, Faculty of
Mechanical Engineering and Robotics, Department of Mechanical Engineering and
Transport

Kraków, 2023

Pragnę serdecznie podziękować Panu Dr hab. inż. Maciejowi Roskoszowi, Profesorowi AGH Akademii Górniczo - Hutniczej w Krakowie za dotychczasową pomoc oraz wsparcie przy realizacji pracy doktorskiej.

Spis treści

Streszczenie	6
Abstract	6
1. Lista skrótów i akronimów.....	7
2. Wprowadzenie, cel i zakres pracy.....	8
3. Gaz z odmetanowania kopalń jako paliwo energetyczne.....	11
4. Efektywne wykorzystanie gazu z odmetanowania kopalń.....	13
5. Silniki w PTEP S.A. – przegląd parku maszynowego.	16
6. Skrócona charakterystyka silnika.....	18
7. Kryteria wyboru wytypowanie układów / elementów silnika do badań.....	22
7.1 Zalecenia DTR dotyczące przeglądów i wymian podzespołów silników.	23
7.2 Analiza kluczowych układów / zespołów silnika w celu wyboru elementów do badań.	26
7.3 Opis i diagnostyka wybranych układów / zespołów silnika.	27
7.3.1 Głowice zaworowe silnika (zawory dolotowe i wylotowe).	27
7.3.2 Układ korbowodów i panewek (półpanewek) tłoków silników.	35
8. Metody badań nieniszczących.	38
9. Zakres prac pomiarowo – badawczych i analitycznych.....	40
9.1 Zestawienie wyników pomiarów zbiecia trzonków zaworowych cylindrów A 1 – 8 i B 1 – 8 silnika SG 1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.	40
9.2 Zestawienie wyników pomiarów zbiecia trzonków zaworowych cylindrów A 1 – 8 i B 1 – 8 silnika SG 4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.	47
9.3 Badania nieniszczące wytypowanych elementów silnika SG1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz silnika SG 4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.....	53
9.4 Podsumowanie wyników badań.	58
10. Analiza parametrów ruchowych silników SG1 i SG4.	59
10.1 Analiza parametrów ruchowych silnika SG1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.....	59
10.2 Wykaz usterek / awarii SG 1 TCG 2032V16 MN 2208931 Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.	81
10.3 Podsumowanie analizy parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.....	83
10.4 Analiza parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.	83
10.5 Wykaz usterek / awarii SG 4 TCG 2032V16 MN 2208930 Zakład Pniówek.....	96
10.6 Podsumowanie analizy parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.	99
11. Porównanie ekonomiczne kosztów przeglądów silników.....	100
11.1 Propozycja nowego harmonogramu przeglądów silników wraz z analizą ekonomiczną....	101

11.2	Korzyści ekonomiczne zmienionego planu serwisowania / przeglądów silników.....	105
12.	Podsumowanie.	108
13.	Spis rysunków:	111
14.	Spis Tabel:	114
15.	Literatura:	115

Streszczenie

Celem niniejszej pracy badawczej, realizowanej w ramach doktoratu wdrożeniowego, było wykazanie możliwości zmian systemu (czasookresów) głównych przeglądów / remontów silników, których paliwem jest gaz z odmetanowania kopalń. Wykonane badania nieniszczące wytypowanych elementów silnika, analiza parametrów ruchowych silników oraz korelacja i interpretacja uzyskanych wyników, miały na celu wypracowanie odpowiedzi na postawione pytanie: Czy można wydłużać okresy między koniecznymi, wymaganymi dokumentacją techniczno-ruchową producentów silników, remontami / przeglądami?

Należy nadmienić, że w skali przemysłowej, główne przeglądy silników generują wielomilionowe koszty w niebagatelny sposób obciążając fundusz remontowy przedsiębiorstwa.

Do celów analitycznych wykorzystano sprawdzone, proste, inżynierskie metody badawcze (NDT), które charakteryzowały się niskimi kosztami wykonania. Pozwala to na zoptymalizowanie nakładów finansowych przy jednoczesnym uzyskaniu wiążących wyników pozwalających na wypracowanie finalnych wniosków.

Wypracowane wnioski końcowe, sformułowane na bazie przeprowadzonych badań i analiz, były podstawą do wypracowania zmienionego / nowego systemu (harmonogramu) przeglądów okresowych silników gazowych. Nowy harmonogram obejmuje silniki które są w okresie pogwarancyjnym. Nowo wybudowane silniki, będące w okresie gwarancji producenta, dostawcy, Generalnego Realizatora Inwestycji (GRI), etc., mają zazwyczaj określone czasookresy przeglądów serwisowych, których terminowe dotrzymanie limituje uznanie lub odrzucenie jakichkolwiek roszczeń gwarancyjnych.

Abstract

The aim of this research work, carried out as part of an implementation doctorate, was to demonstrate the feasibility of changing the system, i.e. the main overhaul/repair intervals, of engines whose fuel is gas from mine de-methanation. Non-destructive testing of selected engine components, analysis of engine operating parameters and correlation and interpretation of the obtained results was aimed at finding an answer to the question: Is it possible to extend the intervals between the necessary overhauls / maintenance required by the technical and operating documentation of engine manufacturers?

It should be mentioned that, on an industrial scale, major engine overhauls generate costs of several million euros, which are a considerable burden on the company's overhaul fund.

For analytical purposes, tried-and-tested simple engineering test methods (NDT) were used, which were characterised by low execution costs. This optimises the financial outlay while producing binding results that allow final conclusions to be reached

The final conclusions, formulated on the basis of the research and analysis carried out, were the basis for the development of a revised/new system (schedule) for periodic inspections of gas engines. The new schedule includes engines that are in the post-warranty period. Newly-built engines, which are under warranty by the manufacturer, supplier, General Contractor (GRI), etc., usually have specific service inspection intervals, the timely adherence to which limits the acceptance or rejection of any warranty claims.

1. Lista skrótów i akronimów.

CHP	Combined Heating Power Generation	Skojarzone wytwarzanie ciepła i energii elektrycznej
SUECH	Combined Energy and cooling system	Skojarzony układ energetyczno-chłodniczy
EU ETS	EU Emission Trading System	System handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych
BAT	Best Available Technology	Najlepsze dostępne techniki / technologie
GRI		Główny Realizator Inwestycji
TGE		Towarowa Giełda Energii
NDT	Non Destructive Testing	Badania nieniszczące
DTR		Dokumentacja Techniczno-Ruchowa
URE		Urząd Regulacji Energetyki
PTEP S.A.		PGNiG TERMIKA Energetyka Przemysłowa S.A. Grupa Orlen
JSW S.A.		Jastrzębska Spółka Węglowa S.A.
SRK		Spółka Restrukturyzacji Kopalń S.A.

2. Wprowadzenie, cel i zakres pracy.

Każde przedsiębiorstwo ma na celu produkcję, sprzedaż, przynoszenie zysków i rozwój. Jest to proces naturalny i oczywisty. Jednak gdy już tak się dzieje, osoby zarządzające przedsiębiorstwem muszą przyglądać się bacznie otoczeniu rynkowemu, reagować na zmiany i trendy, obserwować zmiany prawne, etc. Wiele czynników, czy to zależnych od zarządzających czy też niezależnych, ma czasem determinujący wpływ na to czy przedsiębiorstwo będzie istniało na rynku lub będzie zbliżało się do zakończenia swej działalności. Jednym z czynników mających wpływ na zysk firmy są koszty produkcji. W dużym uproszczeniu, każde przedsiębiorstwo produkcyjne, potrzebuje surowców do produkcji oraz maszyn, które z tych surowców wytworzą gotowy produkt. W przypadku firm energetycznych, są, to: węgiel, gaz, pelet lub inne paliwo oraz kotły, turbiny, silniki. Dzięki tym urządzeniom produkcyjnym mamy energię elektryczną, ciepło, sprężone powietrze i inne media, które są sprzedawane końcowemu odbiorcy.

Jednym z kluczowych elementów kosztowych jest utrzymanie istniejącego parku maszynowego w stanie wysokiej dyspozycyjności i zapewnienie ciągłości ruchowej urządzeń. Producenci, czy też dostawcy urządzeń produkcyjnych, stawiają przed eksploatatorami wyzwania, w postaci reżimów przeglądów technicznych. Często, co staje się już normą, gwarancja na urządzenie produkcyjne jest udzielana tylko pod warunkiem wykonywania przeglądów serwisowych, zgodnie z określonym zakresem przeglądu/wymiany i ustalonym np. godzinami pracy urządzenia, harmonogramem, etc.. Jest to praktyka zabezpieczająca producenta urządzenia, a także eksploatatora przed ewentualną odpowiedzialnością wynikającą, np. z tytułu wady ukrytej. Zdajemy sobie sprawę, że producent wlicza w koszt urządzenia jakąś część ryzyka wcześniejszej awarii, którą jest w stanie zwymiarować finansowo.

Gwarancja na każde urządzenia techniczne, produkcyjne nieuchronnie upływa. Dalsze działania utrzymaniowe, serwisowe dotyczące maszyn i urządzeń w okresie pogwarancyjnym stawiają wyzwania przed służbami remontowymi. Większość Osób związana z przemysłem energetycznym oraz działających w innych gałęziach przemysłu wie o standardowym rozwiązaniu, jakim jest wykonywanie, w dalszym ciągu, zalecanych przeglądów okresowych, wraz z konieczną lub zalecaną wymianą części i podzespołów. Każda maszyna czy urządzenie posiada DTR [10, 11] lub instrukcję, a przypadku starszych maszyn, zalecenia przeglądowe wynikają z doświadczeń eksploatacyjnych (np. dobre praktyki inżynierskie). Konwencjonalne i stosowane rozwiązania oraz zdrowy rozsądek wraz z doświadczeniem podpowiadają eksploatatorowi, że dalsze wykonywanie przeglądów, serwisów, etc., jest jak najbardziej prawidłowym rozwiązaniem. Minimalizujemy ryzyko awarii, czyli zjawiska nieprzewidywalnego i losowego. Utrzymujemy park maszynowy w gotowości ruchowej, zapewniamy ciągłość produkcji. Jednakże w otoczeniu w jakim przychodzi działać przedsiębiorstwom czasem występują okresy dekonunktury. Oczywiście energia elektryczna oraz ciepło są potrzebne klientowi, a dostawy są obligatoryjne, w oparciu o zapisy zawartych umów. Jednak koszty produkcji potrafią niemiło zaskoczyć producentów. Związane jest to z niepewnością cen emisji CO₂ [1], dodatkowych kosztów inwestycji, wynikające z wdrażanych przepisów prawnych (BAT), rosnących cen paliw, rosnących kosztów pracy

i wielu innych uwarunkowań prawnych lub ekonomicznych, które generują koszty po stronie producenta / wytwórcy mediów energetycznych. Po stronie przychodowej także możemy odczuć wahania cen energii na rynku lub np. niedotrzymanie gwarantowanych parametrów produkowanych mediów energetycznych, a co za tym idzie konieczność udzielenia obligatoryjnych bonifikat. Wiąże się to z utratą przychodów.

Czasem, nieszczęśliwa kumulacja ww. czynników może doprowadzić do krótkotrwałej zapaści finansowej przedsiębiorstwa (utrata płynności finansowej).

Oczywiście w powyższych przypadkach przedsiębiorstwa ratują się tak jak mogą. Jednym ze sposobów jest obniżenie wydatków po stronie kosztów. W naszym przypadku mówimy o prawie „standardowej praktyce” czyli obniżeniu kosztów remontów. W tej definicji mieszczą się także planowane przeglądy wynikające, jak wcześniej wspomniano z DTR i instrukcji.

W związku z powyższym stawiamy następujące pytanie, szukając przemysłanych oszczędności w sferze remontów i planowych przeglądów, czy nauka, a w szczególności badania nieniszczące, mogą być przydatne w praktyce remontowej silników napędzanych gazem z odmetanowania kopalń? Czy trzeba wykonywać wszystkie zalecane przez producenta przeglądy i wymiany części? Czy proste i szybkie metody pomiarowe i analizy inżynierskie oraz ich korelacja z podstawowymi parametrami ruchowymi może być wskaźnikiem stanu technicznego urządzeń? Czy można na podstawie badań, pomiarów i analiz wyników opracować nowe zakresy przeglądów i nowe harmonogramy przeglądów?

Postawiono tezę, że możliwe jest uzyskanie wymiernych korzyści ekonomicznych poprzez zmianę systemu przeglądów silników.

Powyższe zagadnienia posłużyły do sformułowania głównego celu pracy:

Czy możliwe jest wydłużenie okresów między remontami (zmian systemu głównych przeglądów / remontów) silników, których paliwem jest gaz z odmetanowania kopalń.

Powyższy cel zrealizowano poprzez rozwiązanie następujących zadań szczegółowych:

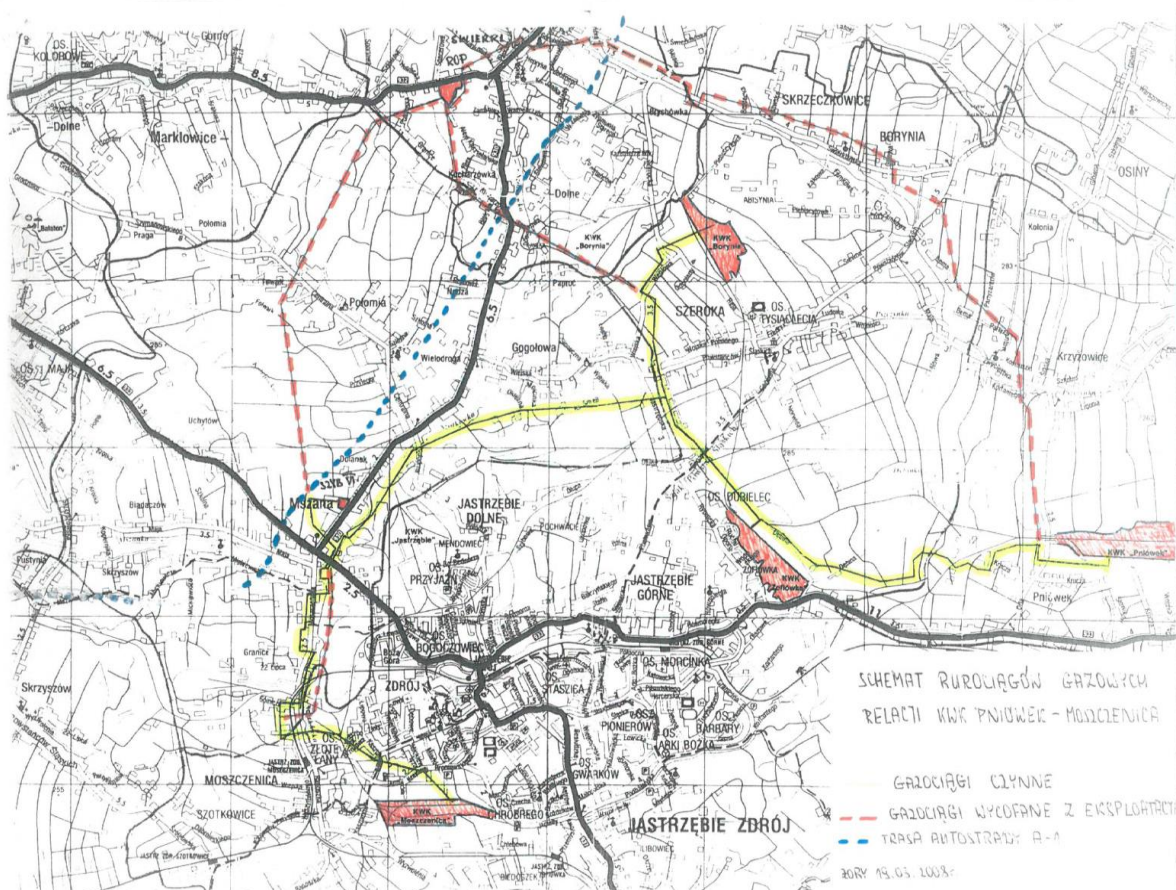
- Wytypowanie elementów do badań, które poddawane są największym obciążeniom termicznym i mechanicznym,
- Przeprowadzenie badań nieniszczących wytypowanych elementów,
- Analizę kluczowych parametrów ruchowych silnika (moc i temperatura w cylindrach silnika),
- Wypracowanie nowego harmonogramu przeglądów wraz z uproszczoną analizą ekonomiczną.

Niniejsza praca realizowana jest w ramach II Edycji Programu „Doktorat Wdrożeniowy” (Dz.U. 2017 poz.873, Dz.U. 2018 poz. 569). Główną kanwą i założeniem takiego trybu realizacji pracy jest rozwiązanie konkretnego problemu technicznego, zarządczego lub/i ekonomicznego, które w przedsiębiorstwie produkcyjnym stanowi swoistego typu wyzwanie dla kadry inżynieryjno-technicznej czy też menadżerskiej. Optymalną ścieżką jest połączenie powyżej wymienionych elementów i wypracowanie konkretnego rozwiązania. Rozwiązanie takie, powinno łączyć aspekty techniczne, naukowo-badawcze i ekonomiczne oraz pozwolić na finalne opracowanie efektów końcowych. Wdrożenie takiego rozwiązania powinno być dostępne z technicznego punktu widzenia, tj. będzie możliwe do wprowadzenia w przedsiębiorstwie w dłuższej lub krótszej perspektywie czasu oraz winno być opłacalne ekonomicznie, tj. wprowadzone rozwiązanie pozwoli na uzyskanie wymiernych efektów /

korzyści finansowych. Znalezienie odpowiedniego rozwiązania możliwe jest także poprzez analizę dotychczasowego dorobku naukowego, w zakresie badań i analiz silników. Czy to w naukowych opracowaniach i literaturze polskiej czy też obcojęzycznej, możemy znaleźć szereg pozycji, których lektura i studiowanie może nie zapewnić nam gotowego rozwiązania, jednak pozwolą na znalezienie ścieżki dojścia do końcowego, finalnego i satysfakcjonującego rozwiązania. Jest to także jeden z niebagatelnych elementów pracy naukowo-badawczej, który oprócz rozszerzenia wiedzy w interesującej i potrzebnej dziedzinie naukowej może rzucić nowe światło i wskazać nowe kierunki rozwiązań konkretnego problemu będącego tematem realizowanej pracy. Przeprowadzony przegląd literatury naukowo-technicznej wskazuje na obszerny stan wiedzy na temat konstrukcji silników spalinowych [16, 39]. Zarówno pod względem teoretycznym [24, 25, 26, 27, 28] jak i praktycznym możemy znaleźć szereg opracowań, które swym obszarem merytorycznym obejmują częściowo zagadnienia będące przedmiotem niniejszej pracy badawczej. Szczególnym i najszerszym zainteresowaniem w sferze konstrukcji, badań elementów silników [18, 30, 31], badań emisji spalin i ich efektu ekologicznego [13, 41, 42, 43] i eksploatacji, cieszą się silniki spalinowe, wykorzystywane w transporcie drogowym. Analizom badawczym poddawane są zarówno całe jednostki silnikowe [23, 32, 33] jak i poszczególne elementy składowe silnika, np. szeroko stosowane turbosprężarki [17, 21, 22] jak i mniejsze elementy składowe silnika [12, 46]. Nieco mniej możemy się dowiedzieć o badaniach silnika w stanach dynamicznych [19, 20], co jak wskazuje obecny stan wiedzy, obarczone jest złożonością problemów i procesów zachodzących w silnikach. Szczegółowej analizie poddawane są także parametry związane z zasilaniem silnika paliwem, w szczególności optymalizacją jego zużycia [29, 34] lub układami dozowania / wtrysku paliwa do silnika [14]. Często podejmowanym tematem w literaturze naukowej jest badanie poszczególnych cykli pracy silnika w oparciu o wykonane wykresy indykatorowe, które przedstawiają zmienność chwilowego ciśnienia w przestrzeni roboczej cylindra w zależności od chwilowych położenia tłoka, chwilowych ustawień skrętnych wału korbowego, chwilowej objętości przestrzeni roboczej, etc. [35, 36, 37, 38]. Także układy towarzyszące jednostek silnikowych, np. układy chłodzenia są w kręgu zainteresowań analityczno-badawczych [41].

3. Gaz z odmetanowania kopalń jako paliwo energetyczne.

W spółce PGNiG TERMIKA Energetyka Przemysłowa S.A. (PTEP S.A. Grupa Orlen) od wielu lat wykorzystywany jest gaz – metan z odmetanowania kopalń jako paliwo napędowe w silnikach gazowych. Skład paliwa (Tabela nr 1), jeżeli chodzi o koncentrację, zawartość metanu CH₄ (średnia wartość ok. 50%) oraz ilość (podaż) pozyskiwanego gazu jest zmienny i zależy od wielu czynników, takich, jak: aktualnie eksploatowany pokład w kopalni (metanowość pokładu), ilość odwiertów odprężających złożę/pokład, ciśnienie atmosferyczne, naprężenia w górotworze (gazo przepuszczalność), etc. Rozróżniamy cztery kategorie zagrożenia metanowego, w zależności od ilości objętościowej metanu pochodzenia naturalnego, zawartej w jednostce wagowej, w głębi calizny węglowej zwanej „metanonośnością”. Kopalnie JSW S.A. zaliczane są do IV, najwyższej kategorii zagrożenia metanowego. Oznacza to, że metanonośność jest większa niż 8 m³/Mg w przeliczeniu na czystą substancję węglową. Ten „skarb energetyczny” ukryty w głębi kopalni stanowi jednak śmiertelne niebezpieczeństwo dla ludzi pracujących pod ziemią. Względy bezpieczeństwa są jednym z czynników, które powodują rozwój wydobywania metanu ze złóż węgla kamiennego. Stosowane na szeroką skalę systemy odmetanowania, np. odwierty odprężające i wydobywanie metanu przez Zakłady Odmetanowania Kopalń (ZOK) przyczyniają się do redukcji zagrożenia oraz zwiększenia energetycznego wykorzystania tego cennego paliwa. Gaz z odmetanowania wyrobisk górniczych poprzez stacje odmetanowania, czy to dołowe czy też naziemne, w których zlokalizowane są sprężarki, transportowany jest rurociągami do Zakładów / Oddziałów firmy gdzie zlokalizowane są silniki gazowe. Długości rurociągów gazowych (zewnątrzna sieć gazowa), w PTEP S.A. wynosi ok. 14,6 km (Rys. nr 1.). Średnice rurociągów wynoszą od DN 400 do DN 500/600 przy czym część sieci wykonana jest w technologii rurociągów stalowych, a część sieci w rurociągach PE (polietylen). Szczególnie na terenach przebiegających w obrębie czynnej eksploatacji górniczej, ze względu na występowanie ruchów terenu, zastosowanie rurociągów z PE zapobiega występowaniu potencjalnych nieszczelności. Ciekawostką jest konieczność okresowego odwadniania rurociągów, w celu utrzymania ich drożności. Zawarte w mieszaninie gazu powietrze skrapla się w rurociągu, powodując konieczność interwencji służb dbających o ich drożność. Wilgoć zawarta w gazie jest usuwana na całej trasie rurociągu, a także na terenie zakładów PTEP S.A. Za odwadnianie na rurociągach poza zakładami PTEP S.A. odpowiedzialna jest specjalistyczna firma, natomiast za odwadnianie na instalacjach wewnątrz zakładów odpowiada obsługa urządzeń. Poza cyklicznym odwadnianiem czasami zachodzi konieczność interwencyjnego odwadniania, najczęściej wtedy kiedy zaobserwować można nieuzasadniony spadek przepływu gazu, tj. rosnące opory jego przesyłu.

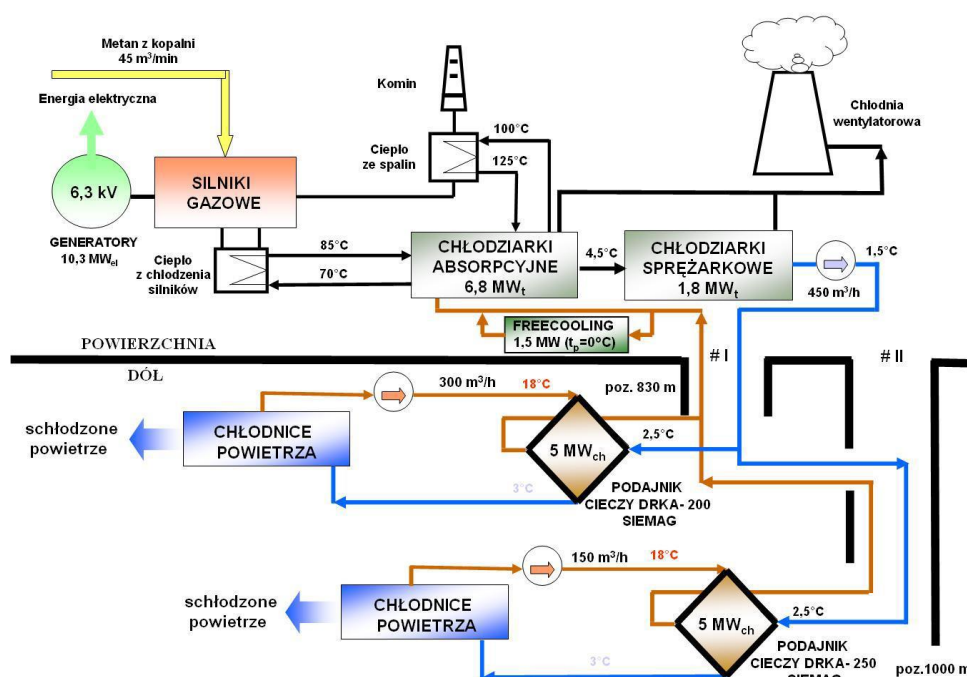


Rys. 1 Schemat sieci gazowej PTEP S.A. (przebieg trasy oznaczono kolorem żółtym)

4. Efektywne wykorzystanie gazu z odmetanowania kopalń.

Jak wyżej wspomniano, gaz z odmetanowania kopalń w spółce PTEP S.A. wykorzystywany jest do napędu silników gazowych, jednak nie jest to jedyny sposób zagospodarowania tego cennego paliwa. Jednym ze sposobów wykorzystania jest współspalanie z paliwem węglowym gazu w kotłach wodnych lub parowych. Specjalnie dedykowane palniki, montowane są w komorach paleniskowych kotłów. Metoda ta nie generuje stosunkowo wysokich kosztów inwestycyjnych związanych z wykonaniem projektu i montażem palników. Często zainstalowane palniki służą jako palniki rozpałkowe, niejako inicjując proces spalania podstawowego paliwa jakim jest węgiel. Współspalanie gazu z odmetanowania kopalń korzystnie wpływa na strukturę kosztów przedsiębiorstwa. Gaz z odmetanowania można wykorzystać także w postaci ciekłej (skroplonej). Przykładem takiej instalacji, który został wdrożony na skalę przemysłową, jest wybudowana w 2011r. instalacji skraplania gazu z odmetanowania kopalń. Instalacja zlokalizowana została w byłej kopalni KWK „Krupiński”, w Suszcu. Warto także wspomnieć o próbach budowy instalacji do pozyskiwania gazu z nieczynnych wyrobisk pokopalnianych. Próby te prowadzono na obszarze byłej kopalni KWK „Moszczenica” w Jastrzębiu-Zdroju. Gaz sprężany jest w dyktowanej instalacji sprężarkowej i magazynowany w butlach, które transportowane są do spalania w przeznaczonych do tego instalacjach.

Interesującym i wartym szerszego poruszenia rozwiązaniem, jest poniżej opisana instalacja wykorzystująca gaz z odmetanowania kopalń do produkcji chłodu, tj. zimnej wody, zwaną potocznie, wodą „lodową” o temperaturze ok. o temperaturze ok. 1,5 °C.



Rys. 2 Skojarzony Układ Energetyczno Chłodniczy (SUECh) w KWK Pniówek – PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.

Powyższy schemat (Rys. nr 2) obrazuje instalację Skojarzonego Układu Energetyczno-Chłodniczego zrealizowaną w KWK „Pniówek”. Schemat oddaje główną ideę działania instalacji, w której do wytwarzania chłodu (woda „lodowa” o temperaturze ok. 1,5 °C) wykorzystywane jest ciepło produkowane w silnikach gazowych. Obecnie układ składa się z czterech silników, które obok energii elektrycznej produkują ciepło. Produkowane ciepło jest właściwie produktem ubocznym produkcji energii elektrycznej. Oczywiście produkcja energii elektrycznej i ciepła w skojarzeniu podnosi efektywność energetyczną całego układu. Ciepło odzyskiwane jest z układów: chłodzenia mieszanki gazowo – powietrznej, chłodzenia oleju silnikowego, chłodzenia korpusu silnika oraz spalin. Ciepło (gorąca woda) doprowadzane jest do chłodziarek absorpcyjnych, w których schładzany jest czynnik zwany wodą „lodową”. W bardzo dużym uproszczeniu można zaryzykować stwierdzenie, że zasada działania chłodziarek absorpcyjnych (czynnik roboczy roztwór bromku-litu) przypomina działanie zwyczajnej lodówki. Zadaniem chłodziarek sprężarkowych (czynnik roboczy amoniak) jest dochłodzenie wody „lodowej” do pożądanych parametrów wyjściowych z układu (z 4,5 °C do 1,5 °C). Schłodzona woda „lodowa” jest rozprowadzana poprzez układ podajników cieczy zlokalizowanych w podziemnych wyrobiskach dołowych (Siemag) do chłodnic powietrza. Chłodnice powietrza wdmuchują schłodzone (zimne) powietrze do podziemnych wyrobisk górniczych. Jednocześnie następuje ogrzanie wody „lodowej” (z 2,5 °C do 18 °C). Woda „lodowa” po przejściu całego cyklu zwracana jest do obiegu i ponownie trafia do sprężarek absorpcyjnych, gdzie następuje jej schłodzenie do pożądanych parametrów (1,5 °C). W czasie pracy sprężarek absorpcyjnych oraz sprężarkowych konieczne jest ich chłodzenie. Proces ten jest realizowany za pomocą trzyczekłowej chłodni wentylatorowej.

Tabela nr 1 Podstawowa analiza metanu (wartości średnie z poszczególnych kopalń JSW S.A. lub byłych kopalń JSW S.A).

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

Źródło: Opracowanie własne

Aspektem, którego nie można pominąć, jest udowodnione niekorzystne działanie metanu na warstwę ozonową ziemi [2, 3]. Nie tylko freony i ich pochodne działają szkodliwie na warstwę ozonową.

Celem wiodącym, jest optymalne zużycie gazu bez jego wydmuchu do atmosfery. W tym miejscu trzeba wspomnieć że priorytetem jest spalanie gazu w silnikach gazowych – jako najbardziej efektywne wykorzystanie energii zawartej w gazie, dopiero w drugiej kolejności gaz jest spalany czy też współspalany w kotłach parowych lub wodnych. W celu realizacji tego zadania został wdrożony system wizualizacji pracy (pomiarów ilościowych oraz pomiarów parametrów gazu) sieci gazowej tak, że każdy z odbiorców gazu kopalnianego, ma w każdej chwili bieżące informacje dotyczące ilości i jakości zagospodarowanego gazu. Wszelkie zmiany wielkości poboru gazu są uzgadniane i konsultowane w ramach zakładów podłączonych do sieci gazowej.

5. Silniki w PTEP S.A. – przegląd parku maszynowego.

Spółka PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A. (PTEP S.A.) eksploatuje 12 silników gazowych (stan na 10.2022r) (Tabela nr 2):

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

Silniki zabudowano w latach 1998 – 2015.

Tabela nr 2 Wykaz silników zabudowanych i eksploatowanych w PTEP S.A.

Lp.	Silnik	Rok przejęcia do eksploatacji	Nr fabryczny	Moc elektr. [MW _e]	Moc cieplna [MW _t]
	Zakład Pniówek				
1	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	2000	MN 2200761	3,2	3,6
2	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	2000	MN 2200849	3,2	3,6
3	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	2006	MN 2206287	3,9	3
4	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	2011	MN 2208930	4	3,9
	Zakład Suszec				
5	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	2001	MN 001032	3	3
6	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	2005	MN 2205619	3,9	4
7	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	2015	MN 2212189	2,0	2
8	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	2015	MN 2212188	2,0	2
	Zakład Suszec Oddział Częstochowa				
9	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	2013	MN 2210197	2,9	3,4
	Zakład Jastrzębie-Zdrój Oddział Moszczenica				
10	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	2011	MN 2208931	4	3,9
11	Silnik gazowy tłokowy CG260-16	2014	MN 2211546	4	3,9
	Zakład Wodzisław				
12	Silnik gazowy tłokowy MTU 20V4000L33	2014	528 103 142	2,2	2

Z uwagi na normalizację i typizację parku produkcyjnego silniki (11 szt.) pochodzą od jednego producenta, firmy MWM obecnie Caterpillar. Producentem silnika zainstalowanego w Oddziale w Wodzisławiu jest firma MTU. Silniki zainstalowane w Zakładach Jastrzębie-Zdrój

Moszczenica i Pniówek pracują na wspólnej sieci gazowej i to między tymi zakładami w głównej mierze rozdzielany jest gaz. Oprócz silników z gazu kopalnianego korzystają również kotły Zakładu Jastrzębie-Zdrój, jednak jak już to zostało wyżej opisane pierwszeństwo w zużyciu gazu, mają silniki gazowe. Silnik gazowy w Zakładzie Wodzisław, jako jedyny pracuje na paliwie, którym jest gaz ziemnym doprowadzany z sieci miejskiej. Natomiast silnik zabudowany w lokalizacji Częstochowa (Zakład Suszec Oddział Częstochowa) zasilany jest gazem koksowniczym.

Należy nadmienić, że polityka inwestycyjna PTEP S.A. w dużej mierze koncentruje się na realizacji nowych źródeł produkcyjnych opartych na silnikach, których paliwem jest gaz z odmetanowania kopaliń. Obecnie zrealizowano inwestycję w Zakładzie Jastrzębie-Zdrój polegającą na zabudowie dwóch jednostek silnikowych o mocy 2,0 MWe każda. (oddanie do eksploatacji – kwiecień / maj 2023r.).

6. Skrócona charakterystyka silnika.

Poniżej (Rys. nr 3), w celu przybliżenia urządzenia techniczno-produkcyjnego jakim jest silnik, który będzie stanowił bazę badawczą (stanowisko badawcze) dla wypracowania konkretnych rozwiązań związanych z tematem pracy, przedstawiono krótki opis techniczny przykładowej jednostki silnikowej.



Rys. 3 Silnik typ CG 260 – 16 (oznaczenie silnika)

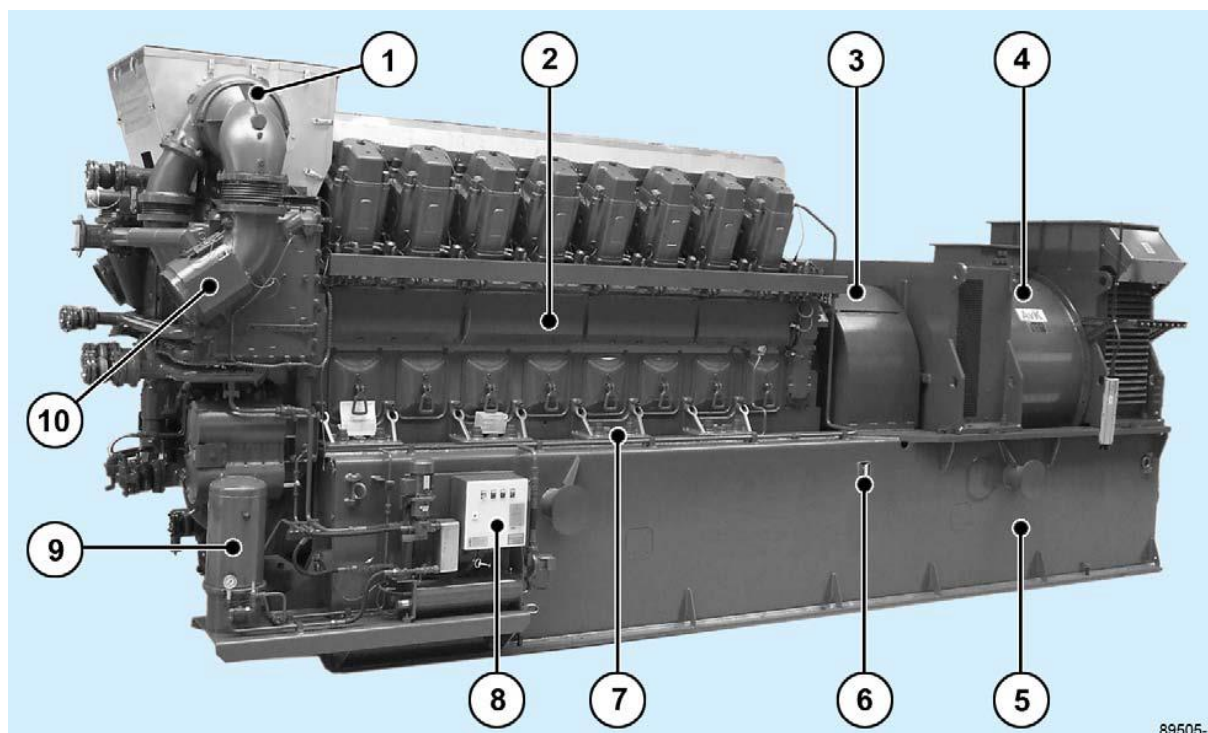
Poniżej podamy przykładowe oznaczenie silnika.

Patrz oznaczenie (tabliczka znamionowa)

- **C** - Caterpillar
- **G** - Silnik gazowy
- **260** - Seria
- **X** - Liczba cylindrów (w tym przypadku 16 cylindrów)

Każda z wymienionych w Tabeli nr 2 jednostek jest spalinowym silnikiem tłokowym, w którym energia spalanego paliwa, w tym przypadku gazu, a właściwie mieszaniny gazu z powietrzem, zamieniana jest w energię mechaniczną. W samochodzie energia ta przekazywana jest na koła dzięki czemu pojazd się porusza. W naszym przypadku napędzany jest generator, który wytwarza energię elektryczną (6,0 kV).

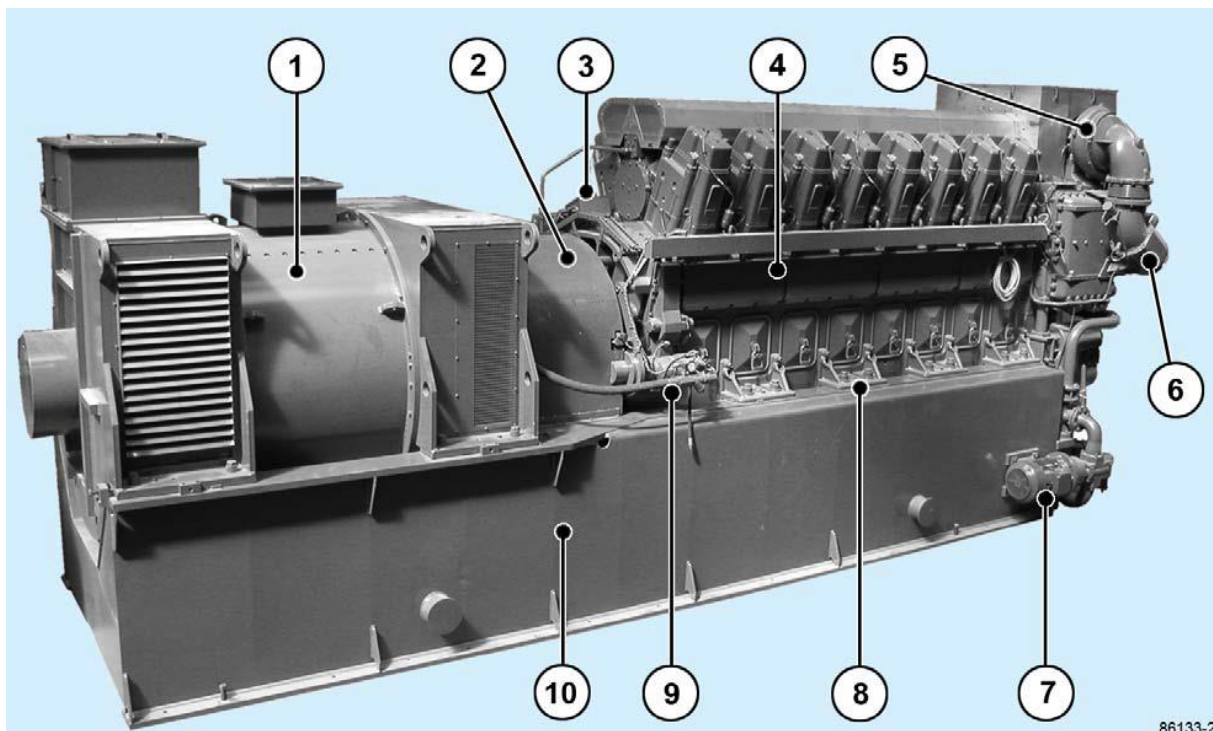
Poniżej (Rys. nr 4 i Rys. nr 5) zaprezentowano dwie fotografie silnika na których zobrazowano jego najważniejsze podzespoły i elementy.



89505-1

Rys. 4 Podstawowe podzespoły i elementy silnika - Strona lewa silnika

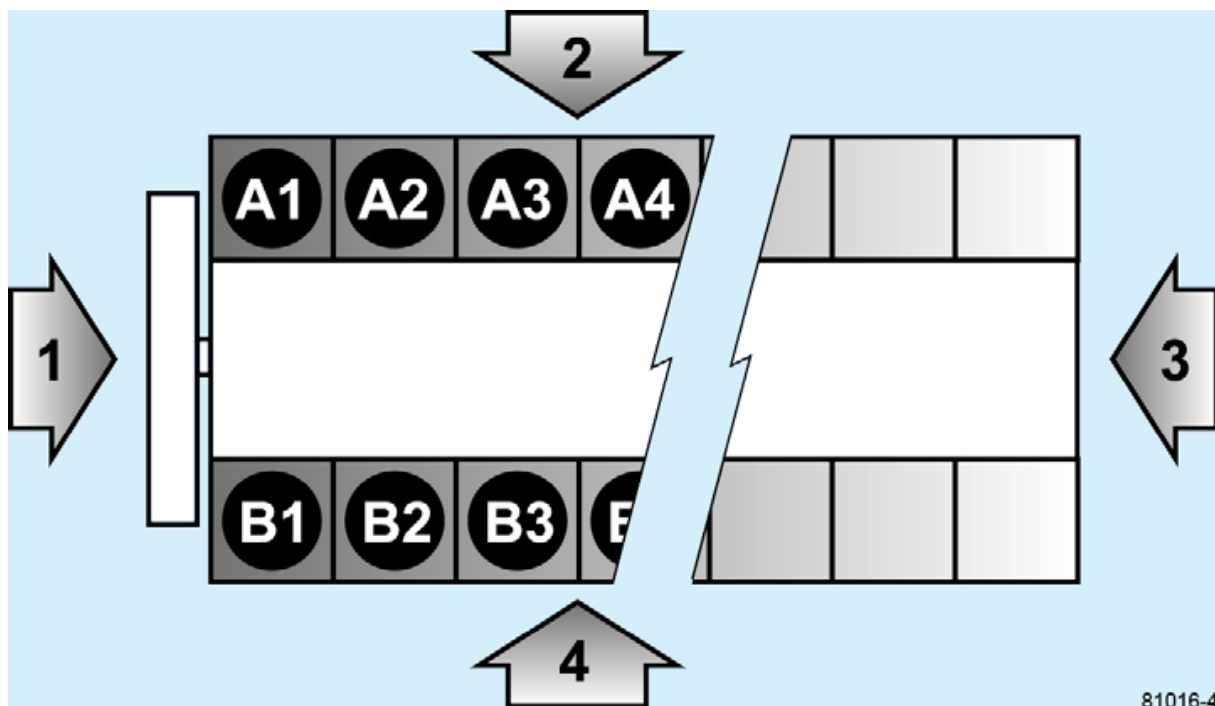
1. Turbosprężarka
2. Silnik
3. Koło zamachowe / Sprzęgło
4. Generator
5. Rama podstawowa
6. Tabliczka znamionowa agregatu
7. Łożyskowanie silnika
8. Elektryczny podgrzewacz
9. Filtr oleju smarowego strumienia pobocznego
10. Mieszacz gazu i powietrza



Rys. 5 Podstawowe podzespoły i elementy silnika - 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

W celu usystematyzowania procesów pomiarowych oraz badawczych poniżej (Rys. nr 6) przedstawiono systematykę oznaczania stron silnika i numeracji cylindrów. Należy dodać, że przytoczone oznaczenie jest stosowane w standardowych procedurach technicznych przy wykonywaniu przeglądów silników jak i w sytuacji usuwania awarii.



Rys. 6 Oznaczenie stron silnika, numeracja cylindrów i kierunek obrotu silnika.

Strony silnika:

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

Oznaczenie cylindrów:

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.

Kierunek obrotów silnika:

Patrząc od strony napędu silnik obraca się w kierunku przeciwnym do ruchu wskazówek zegara (w lewo).

7. Kryteria wyboru wytypowanie układów / elementów silnika do badań.

Kluczowym zagadnieniem, mającym na celu udowodnienie postawionej tezy, związanej ze zmianą systemu / czasokresów przeglądów silników, a tym samym uzyskaniu wymiernych korzyści ekonomicznych jest wybór układów / elementów silnika, których diagnostyka pozwoli na przyjrzenie się ich wpływowi 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 i doświadczeniem eksploatacyjnym ale także, jakże ważnym w obecnych czasach, aspektem finansowym.

Poniżej określono kryteria, którymi powinniśmy się kierować przy wyborze takich układów / elementów silnika, które z wysokim prawdopodobieństwem pozwolą nam na diagnostykę urządzenia (jego elementów) pod względem dalszej eksploatacji.

1. Zalecenia DTR (Dokumentacja Techniczno-Ruchowa) – w dokumentacji znajdziemy wykaz części / elementów gdzie podano wartości graniczne, np. wymiary, których przekroczenie lub niedotrzymanie może spowodować uszkodzenie urządzenia. Znajdziemy tam oprócz w/w danych także czasookresy przeglądów i wymian podzespołów, które są zalecane przez producentów silników. Zalecenia wynikające z DTR opisane zostały w rozdziale 7.1.
2. Analiza zużycia eksploatacyjnego układów silnika / elementów – 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. Dostęp do wytypowanego układu silnika / elementu – mamy tutaj na myśli takie umiejscowienie danego układu lub elementu w urządzeniu, aby w sposób jak najbardziej prosty i nie generując wysokich kosztów skontrolować wytypowany układ lub dany element zdemontować, a po wykonaniu przeglądu / pomiarów / badań powtórnie element zamontować, tak aby urządzenie gotowe było do uruchomienia i pracy w pełnym 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 (demontaż wału głównego silnika).
5. Oszczędność – wykonanie badań / pomiarów inżynierskich charakteryzujących się małym potencjałem generowania kosztów.
6. Analiza awarii urządzenia pod kątem części / elementów odpowiedzialnych za awarię – wytypowanie najbardziej newralgicznych części / elementów, których badanie pozwoli na osiągnięcie założonego celu badawczego.
7. Dobór (przypasowanie) części / elementu do zastosowanej metody badawczej (badania nieniszczące) – np. zastosowanie metody badawczej, która pozwoli na weryfikację części / elementu bez konieczności dodatkowych, kosztownych zabiegów np. specjalna

obróbka powierzchni przed i po przeprowadzonym badaniu, specjalistyczne urządzenia badawcze, etc.

Powyższe kryteria nie są zbiorem zamkniętym i należy je traktować jako główne wytyczne, których zastosowanie ma na celu zebranie jak największego zbioru danych do analiz w przedmiotowej pracy badawczej przy jednoczesnym ograniczeniu nakładów finansowych.

7.1 Zalecenia DTR dotyczące przeglądów i wymian podzespołów silników.

Tak jak zaakcentowano w rozdziale nr 7, poniżej, w formie tabelarycznej (Tabela nr 3 i Tabela nr 4), w oparciu o DTR silników [10, 11], zestawiono czynności / zakresy techniczne, które winny być wykonywane w ramach obsługi gwarancyjnej i pogwarancyjnej silników. Są to zalecenie, wytyczne opisane i przedstawione przez producentów silników.

Tabela nr 3 Wykaz oznaczeń oraz zakresu prac konserwacyjnych silników typu TCG i CG [10].

E40	E50	E60	E70	Zakres prac konserwacyjnych wykonywanych przez Serwis
x				Endoskopia komór spalania
x				Badanie endoskopowe zaworów wlotowych i wylotowych
	x			Wymiana łożyska podstawowego nr 6 (V12) lub nr 8 (V16)
	x			Kontrola wzrokowa tulei cylindrów
	x			Kontrola wzrokowa pierścienia zgarniającego koks
	x			Kontrola wzrokowa elementów połączeniowych (kompensatory, uszczelki, przewody)
	x			Kontrola wału napędowego (Westgate)
	x	x		Czyszczenie mieszalnika gazu i powietrza
	x	x		Czyszczenie chłodnicy mieszanki
	x	x	x	Przeprowadzenie przeglądu głowic cylindrów
	x	x	x	Kontrola zamocowania silnika
	x	x	x	Kontrola drążków regulatora obrotów
	x	x	x	Wymiana przegubów drążków regulatora prędkości obrotowej
	x	x	x	Remont suwaka obrotowego
	x	x	x	Czyszczenie filtra płomienia - ewentualna wymiana
	x	x	x	Kontrola okablowania elektrycznego
	x	x	x	Wymiana kłapy spalin (Westgate)
	x	x	x	Kontrola zębniaka startera i wieńca zębatego na kole zamachowym
	x	x	x	Wymiana tłumika drgań skrętnych
		x		Sprawdzić wał korbowy - pomiar i wypolerowanie czopu korbowego
		x		Kontrola wałka korbowego, luzu łożyskowego
		x		Wymiana tulei korbowodów
		x		Kontrola wałka rozrządu, luzu łożyskowego
		x		Kontrola kompensatorów gumowych

		x		Sprawdzenie okablowania elektrycznego
		x	x	Kontrola węży, tłumików wibracji i przewodów giętkich
		x	x	Kontrola armatur oraz urządzeń nastawczych po stronie silnika
		x	x	Kontrola wałka korbowego, odległość od ścianek wału
		x	x	Wymiana łożysk korbowodów
		x	x	Wymiana sworzni tłokowych
		x	x	Wymiana pierścieni tłokowych
		x	x	Wymiana tłoków
		x	x	Wymiana łożyska podstawowego i osiowego
		x	x	Sprawdzenie tulei cylindra, kołnierz i powierzchnie mocowania
		x	x	Sprawdzenie komór wodnych
		x	x	Wymiana tulei cylindrowych
		x	x	Wymiana pierścienia zgarniającego koks
		x	x	Wymiana popychaczy zaworów
		x	x	Kontrola wałka rozrządu
		x	x	Wymiana nastawników regulacji prędkości obrotowej
		x	x	Wymiana elementów połączeniowych
		x	x	Wymiana wału napędowego (Westgate)
			x	Remont wału korbowego - pomiar i wypolerowanie czopu korbowego, w razie potrzeby przeszlifowanie
			x	Wymiana korbowodów
			x	Wymiana łożyska wałka rozrządu, łożyska wzdłużnego wałka rozrządu
			x	Sprawdzenie mechanizmu zaworu oraz czyszczenie mechanizmu
			x	Sprawdzenie i czyszczenie mechanizmu napędu kół
			x	Wymiana kompensatorów spalin
			x	Przeprowadzenie przeglądu mieszalnika gazu i powietrza
			x	Wymiana chłodnicy mieszanki
			x	Wymiana pompy olejowej
			x	Wymiana kompensatorów gumowych

Legenda:

- E 40** przegląd wykonywany po każdych 4 000 godzin pracy
- E 50** przegląd wykonywany po każdych 16 000 godzin pracy
- E 60** przegląd wykonywany po każdych 32 000 godzin pracy
- E 70** przegląd wykonywany po każdych 64 000 godzin pracy

Tabela nr 4 Wykaz oznaczeń oraz zakresu prac konserwacyjnych silników typu TBG [11].

E4	E5	E6	E7	Zakres prac konserwacyjnych wykonywanych przez Serwis
x	x	x	x	Testy i przebiegi funkcji
x	x	x	x	Kontrola wizualna urządzenia
x	x	x	x	Luz zaworowy sprawdzić
x	x	x	x	Spuszczenie kondensatu z butli powietrza
x	x	x	x	Przewód wysokiego napięcia, zagłębienie świec sprawdzić
x	x	x	x	Wymiana oleju smarującego
x	x	x	x	Wymiana filtra oleju smarującego
x	x	x	x	Konserwacja zaworu odpowietrzającego skrzynię korbową
x	x	x	x	Test agregatów pomocniczych za pomocą systemu TEM
x	x	x	x	Wymiana świec zapłonowych
x	x	x	x	Czyszczenie wkładów filtra powietrza
	x	x	x	Kontrola zamocowania silnika
	x	x	x	Koła zębate i wieniec zębaty sprawdzić
	x	x	x	Odcinek regulacji gazu i mieszacz gazu wyczyścić i sprawdzić
	x	x	x	Turbodoładowanie sprawdzić i wyczyścić
	x	x	x	Głowice cylindra wymienić bądź wyremontować
	x	x	x	Komory spalania wyczyścić, tuleje cylindrów sprawdzić
		x	x	Złączkę rurową wymienić
		x	x	Chłodnicę mieszanki wyczyścić
		x	x	Napęd zaworów sprawdzić
		x	x	Tłoki sprawdzić
		x	x	Łożyska panewek wymienić, tuleje sworzni tłokowych sprawdzić
		x	x	Pomiar składu spalin
		x	x	Tłumiki drgań wymienić
			x	Tuleje sworzni tłokowych wymienić
			x	Ustawienie silnika i sprzęgła sprawdzić
			x	Pomiary wału korbowego
			x	Łożyska główne wymienić
			x	Napędy kół i rozrządu wyczyścić i sprawdzić
			x	Popychacze zaworowe wymienić
			x	Wał rozrządu sprawdzić
			x	Łożyska osiowe wału rozrządu wymienić
			x	Pompę oleju smarującego wyremontować

Legenda:

- E 4** przegląd wykonywany po każdych 3 000 godzin pracy
- E 5** przegląd wykonywany po każdych 12 000 godzin pracy
- E 6** przegląd wykonywany po każdych 24 000 godzin pracy
- E 7** przegląd wykonywany po każdych 48 000 godzin pracy

Zasadniczą różnicą są czasookresy / godziny pracy między głównymi przeglądami, wynoszące w silnikach typu:

- TBG (stary typ silnika) – dla przeglądów E4, E5, E6 do E7 – 3, 12, 24 i 48 tys. rbh.
- TCG i CG (nowy typ silnika) dla przeglądów E40, E50, E60 i E70 – 4, 16, 32 i 64 tys. rbh.

Jak możemy zaobserwować w powyższych Tabelach nr 3 i 4, szereg elementów zalecanych jest do wymiany przez producenta silnika przy przeglądach E-6 lub E-7 czyli po 32,00 tys. lub 64,00 tys. godzin pracy silnika, w zależności od typu silnika. Znając czasookresy wykonywania przeglądów o oznaczeniach E-4 (1 dzień), E-5 (13 dni), E-6 (21 dni) do E-7 (52 dni) możemy stwierdzić, że silniki eksploatowane są praktycznie w sposób ciągły przez cały rok. Oczywiście zdarzają się sytuacje związane z awariami samego silnika lub układów towarzyszących, które niejako wymuszają postój silnika.

7.2 Analiza kluczowych układów / zespołów silnika w celu wyboru elementów do badań.

Ponad 20 letnie doświadczenie eksploatacyjne pozwoliło 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 nazwijmy to kolokwialnie: „stan zapomnienia, że mamy takie urządzenie w przedsiębiorstwie” do czasu awarii (zdarzenie losowe) lub planowanego przeglądu wynikającego z DTR lub dobrych praktyk inżynierskich. Innymi słowy, służbom technicznym pozostaje tylko śledzenie parametrów ruchowych silnika w zakresie odbiegania ich od normy. Należy zaznaczyć, że poruszamy się tylko w sferze technicznej, inżynierskiej urządzenia. Odpowiednie służby ekonomiczne w Przedsiębiorstwie śledzą na bieżąco parametry produkcyjne urządzenia poprzez pryzmat kosztów produkcji, przychodów i zysku. Ze względu na największe obciążenia termiczne oraz mechaniczne wytypowanymi układami silnika są:

- Głowice zaworowe silników (zawory dolotowe i wylotowe).
- Układ korbowodów i panewek (półpanewek) tłoków silników.

Oczywiście możemy traktować w/w zestawienie jako otwarte i dopisywać w miarę zdobywania doświadczeń, wiedzy oraz gotowości do ponoszenia kosztów badań nowe układy lub elementy. Jednocześnie mamy pełną świadomość, że znajdziemy w końcu taki punkt, w którym nakłady finansowe na planowane: badania, analizy, etc. zrównają się lub przewyższą koszty przeglądów (robocizna i części zamienne), co było by wskaźnikiem dojścia do pewnej granicy i zastanowienia się nad sensem naszych prac badawczo-diagnostycznych. Badania, które zostały wykonane cechuje prostota, uniwersalizm, możliwość do wykonania z punktu widzenia inżynierskiego, atrakcyjność ekonomiczna, tj. przystępność cenowa oraz wartość badawcza do wykonania analiz, związanych z niniejszą pracą.

7.3 Opis i diagnostyka wybranych układów / zespołów silnika.

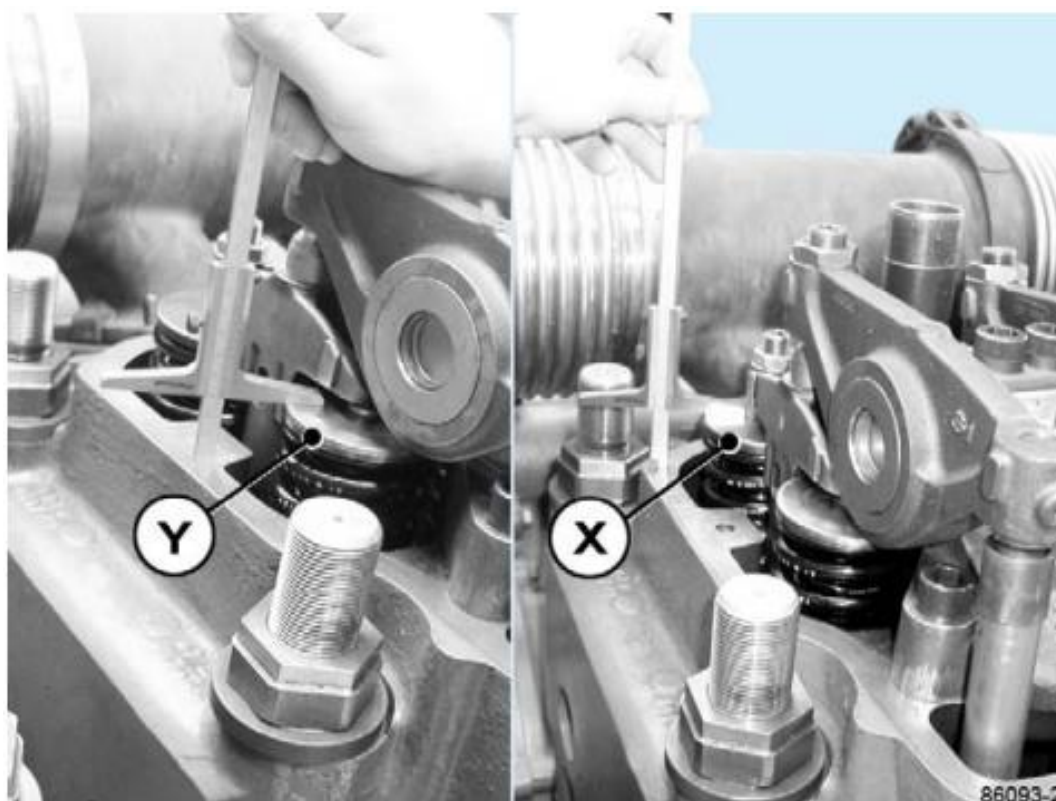
Silniki składają się z wielu odrębnych układów, których efektem współdziałania jest produkcja energii elektrycznej oraz ciepła. W tym przypadku ciepło możemy traktować jako produkt uboczny czy też odpadowy, który powstaje w wyniku konieczności schładzania korpusu silnika, mieszanki powietrzno-gazowej, czy też oleju. Ten produkt „uboczny” jest bardzo pożądanym w elektrociepłowniach i stanowi niebagatelne źródło przychodów. Spaliny wylotowe o temperaturze ok. 500°C stanowią także dodatkowe źródło ciepła, którego wykorzystanie jest z punktu widzenia efektywności termodynamicznej oraz ekonomicznej, jest jak najbardziej wskazane.

Poniżej przedstawiono skondensowany opis, wybranych układów / elementów / zespołów silnika, które zostały objęte badaniami. Diagnostyka oraz umiejętna analiza bieżąca oraz historyczna pozyskanych danych ruchowych, wpływa na uzyskiwane parametry eksploatacyjne urządzenia (moc, ciepło). Stanowi także źródło danych, które wykorzystano do analiz i badań nad zużyciem eksploatacyjnym części i podzespołów silnika.

7.3.1 Głowice zaworowe silnika (zawory dolotowe i wylotowe).

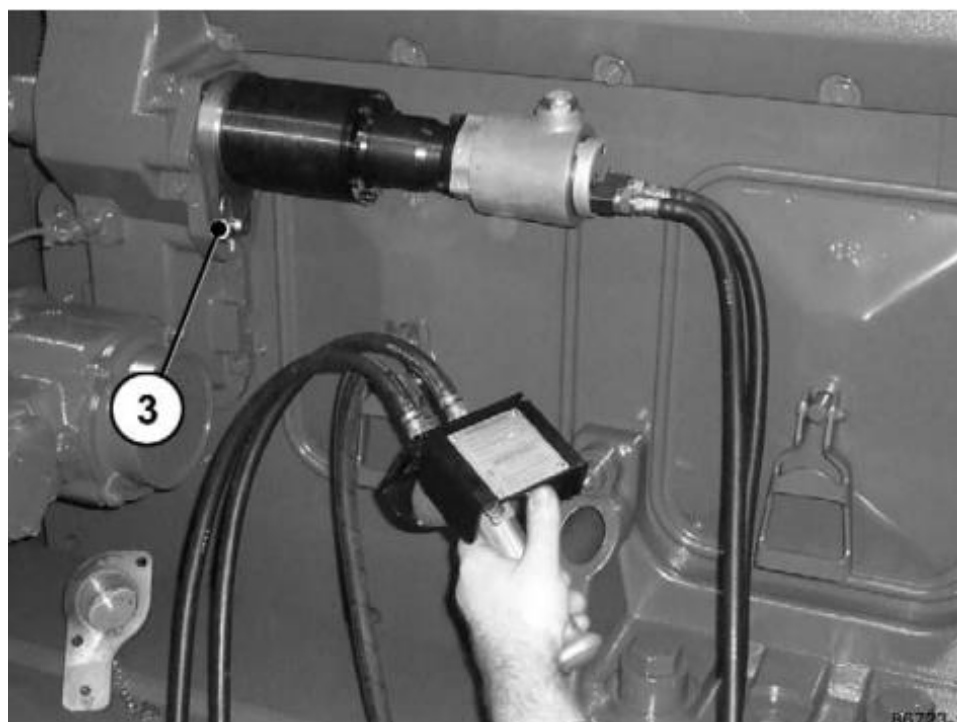
Układ paliwowy silnika składa się z szeregu elementów wchodzących w skład instalacji, której celem jest doprowadzenie gazu z odmetanowania kopalń (paliwa) do cylindrów (komór spalania) w których energia chemiczna paliwa zamieniana jest na energię mechaniczną. W skład tej instalacji wchodzi między innymi elementy odpowiedzialne za czystość gazu (filtry), elementy stabilizujące ciśnienie gazu (zawory redukcyjne), armatura odcinająca, głowica zaworowa, zawory wlotowe i wylotowe (Rys. nr 7), etc.

W celach badawczo-pomiarowych wielkością na której skoncentrowano się oraz poddano badaniom i analizie jest wartość luzu zaworowego obrazowaną przez wartość zbiecia trzonka zaworów w gniazdach zaworowych. Parametr ten obrazuje nam wartość luzu zaworowego oraz zużycie zaworu i siedziska zaworowego. Z punktu widzenia eksploatacyjnego jest to wartość kluczowa i wiodąca, pokazująca moment dochodzenia zaworu (trzonka zaworowego i gniazda) do wartości granicznych przy których eksploatacja silnika wiąże się z ryzykiem trwałego uszkodzenia głowicy zaworowej. Eksploatacja oraz powtarzające się cykle pracy zaworów wlotowych i wylotowych skutkują zużyciem zaworów jak i siedzisk zaworowych. Do pomiarów zbiecia trzonka zaworowego użyto głębokościomierza suwmiarkowego o dokładności pomiarowej 0,1 mm. Pomiar polega na zmierzeniu wartości (przy zamkniętym zaworze) od górnej misy / talerzyka sprężyny do powierzchni uszczelniającej pokrywę głowicy cylindra. Idę pomiaru przedstawia na Rys. nr 7. Pomiar dokonywany był zgodnie z zaleceniami DTR [10], tj. zgodnie z kolejnością zapłonu zaczynając od cylindra A 1 i kończąc na cylindrze B 8.

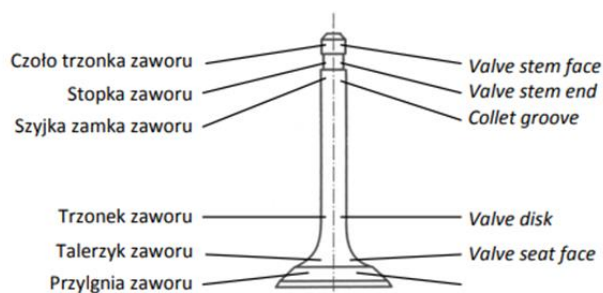


Rys. 7 Pomiar zbicia trzonka zaworowego [10]

Do obrotu wałka rozrządu, w celu uzyskania zamknięcia zaworu / zaworów i wykonania pomiarów, wykorzystywany jest specjalistyczny przyrząd (Rys. nr. 8), który montowany jest na końcówce wału. Urządzenie jest zasilane sprężonym powietrzem.



Rys. 8 Przyrząd do obrotu wałka rozrządu [10]



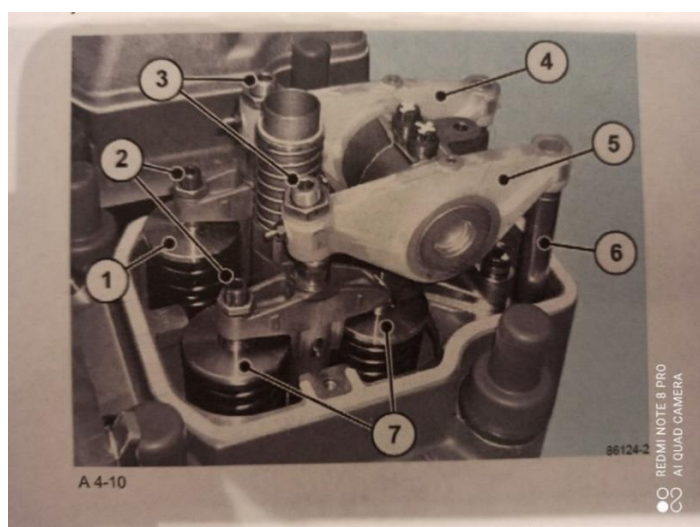
Rys. 1. Budowa zaworu silnika spalinowego

Fig. 1. Design of an ICE poppet valve

Rys. 9 Zwór wlotowy i wylotowy silnika spalinowego [12]

Zadaniem zaworów (Rys. nr 9) jest odsłanianie w określonym czasie kanałów wlotowych i wylotowych w celu wymiany ładunku w cylindrze. Gniazda zaworowe mają za zadanie uszczelniać zawory oraz odprowadzać ciepło z powierzchni przylgi do głowicy silnika [12].

Głowice cylindrów są produkowane podobnie jak skrzynia korbową ze specjalnego odlewane stopu. Na każdym cylindrze jest zamontowana pojedyncza głowica cylindra. Głowice cylindrów są chłodzone cieczą oraz są zintegrowane z układem chłodzenia silnika. Głowice cylindra posiadają cztery zawory, tzn. na każdy cylinder przypadają dwa zawory wlotowe odpowiedzialne za optymalne napełnienie, oraz dwa zawory wylotowe, odpowiedzialne za szybkie ujęcie spalin. Odporne na wysoką temperaturę zawory są umieszczone w pierścieniach gniazda zaworu. Zawory są „sterowane” przy wykorzystaniu sprawdzonej i niezawodnej techniki, stosującej poprzeczkę zaworów. Stosowany układ „sterowania” zaworów za pomocą poprzeczki jest bardzo odporny na zużycie i łatwy do konserwacji (Rys. nr 10 i Rys. nr 11).



Rys. 10 Układ sterowania zaworami w głowicy cylindra [10]

1. Śruba nastawcza poprzeczki zaworu
2. Śruba nastawcza dźwigienki wahliwej
3. Dźwigienka wahliwa wydechowa
4. Dźwigienka wahliwa wlotowa
5. Laska popychacza
6. Zawory wlotowe ze sprężyną i talerzem zaworu



Rys. 11 Zdjęcie układu zaworowego cylindra silnika SG 1

Poniżej (Rys. nr 12) zamieszczono krótki opis oraz rysunek obrazujący szczegół techniczny, który został objęty pomiarami.



Rys. 12 Pomiar zbiecia trzonka zaworowego

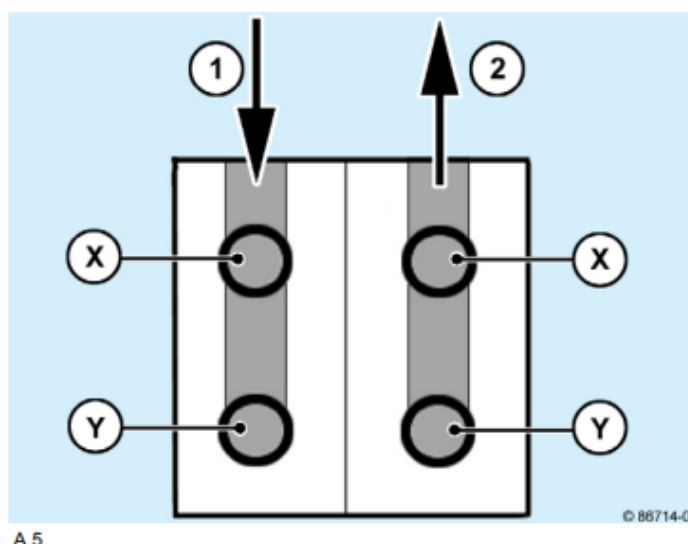
Pomiar zbić gniazd zaworowych (pomiar luzu zaworowego) jest czynnością kontrolną, wykonywaną okresowo, przy każdym planowanym przeglądzie silnika lub w przypadku podejrzenia przekroczenia wartości dopuszczalnej, zbicia / zużycia zaworów.

Odpowiedni luz zaworowy jest podstawą funkcjonowania każdego silnika nie wyłączając silnika napędzanego paliwem, którym jest gaz z odmetanowania kopalń. Wartość luzu zaworowego nie może być ani za duża, ani za mała, ponieważ obie te sytuacje wywierają niekorzystny wpływ na działanie silnika. Wartość ta jest ściśle określona przez producenta silnika i zamieszczona w DTR urządzenia [10, 11], a także w instrukcji eksploatacji silnika. Wspomniany już wcześniej luz zaworowy jest niezbędny do prawidłowej pracy jednostki silnikowej. Materiały, z których są wykonane poszczególne elementy konstrukcji silnika, cechują się rozszerzalnością cieplną. Każda część ulega także zużyciu eksploatacyjnemu. Dlatego właśnie w silniku potrzebna jest dodatkowa przestrzeń (luz zaworowy). Dzięki niej, zawory mogą zamykać się dokładnie, co ma wpływ na ich właściwe chłodzenie. Ten czynnik jest bardzo ważny, ponieważ zawory są najbardziej narażone na działanie wysokiej temperatury w silniku. Dokładne zachowanie luzu zaworowego wydłuża żywotność i zwiększa bezpieczeństwo eksploatacji silnika. Nieprawidłowa wartość luzu zaworowego wywołuje niepożądane zjawiska w silniku (spadki mocy, etc.) i można rozpoznać, kiedy luz zaworowy jest zbyt duży, a kiedy niewystarczający.

Nadmierny luz sprawia, że poszczególne elementy konstrukcji zbyt szybko się zużywają. Dotyczy to nie tylko samych zaworów, ale też innych części, takich jak krzywki wałka rozrządu zaworowego i dźwigienki. Zwiększona, nieprawidłowa wartość luzu zaworowego powoduje, że zawory otwierają się później i zamykają wcześniej. Ponieważ zawory są otwarte całkowicie tylko krótkotrwale, spada stopień napełnienia silnika. Skutkiem powyższego są spadki mocy.

Zbyt mała wartość luzu zaworowego lub w ekstremalnym przypadku brak luzu zaworowego, powoduje niepełne zamykanie zaworu. To z kolei powoduje spadek ciśnienia w komorze spalania / cylindrze. Charakterystycznym objawem takiej usterki może być spadek mocy silnika na skutek start sprężania. Jeśli zawory nie stykają się z gniazdami, nie mogą się też ochłodzić, wskutek czego wzrasta ich temperatura. Taka sytuacja zazwyczaj prowadzi do uszkodzenia tych elementów poprzez wypalenie grzybka zaworu oraz gniazda zaworowego. Ponadto na skutek cofnięcia się płomienia w kanale wydechowym lub kanale ssącym występuje niebezpieczeństwo pożaru silnika.

Poniżej, w oparciu o DTR silnika [10] zamieszczono Rys. nr 13 oraz Tabelę nr 5. Rys. nr 13 obrazuje nam schemat układu zaworów wlotowych i wylotowych silnika wraz z oznaczeniem stron wlotu paliwa (mieszanka metanu i powietrza) oraz wylotu spalin. Podano także poszczególne oznaczenia które zostały użyte w tablicach pomiarowych oraz zestawieniu uzyskanych wyników. Podano wymagane wartości luzów zaworowych po stronie wlotu paliwa jakim jest mieszanka gazu z powietrzem oraz po stronie wylotu spalin (Tabela nr 5).



Rys. 13 Układ zaworów wlotowych i wylotowych w głowicy cylindra silnika.

1. Strona wlotu mieszanki gazu i powietrza (ssanie)
 2. Strona wylotu spalin (wydech)
- X – Krótki kanał (KK)
Y – Długi kanał (KD)

Tabela nr 5 Wartości luzów zaworowych wlot i wylot oraz wartość graniczna zbiccia trzonka zaworowego silnika typ CG i TCG [DTR]

Luz na zaworze			
	Wlot	Miara ustawienia	0,3 mm
	Wylot	Miara ustawienia	1,3 mm
Stan zaworów przy zamontowanej głowicy cylindra			
	Wlot	Granica zużycia	41 mm
	Wylot	Granica zużycia	41 mm

Luz na zaworze (luz zaworowy) **Wlot** wynosi: 0,3 mm

Luz na zaworze (luz zaworowy) **Wylot** wynosi: 1,3 mm

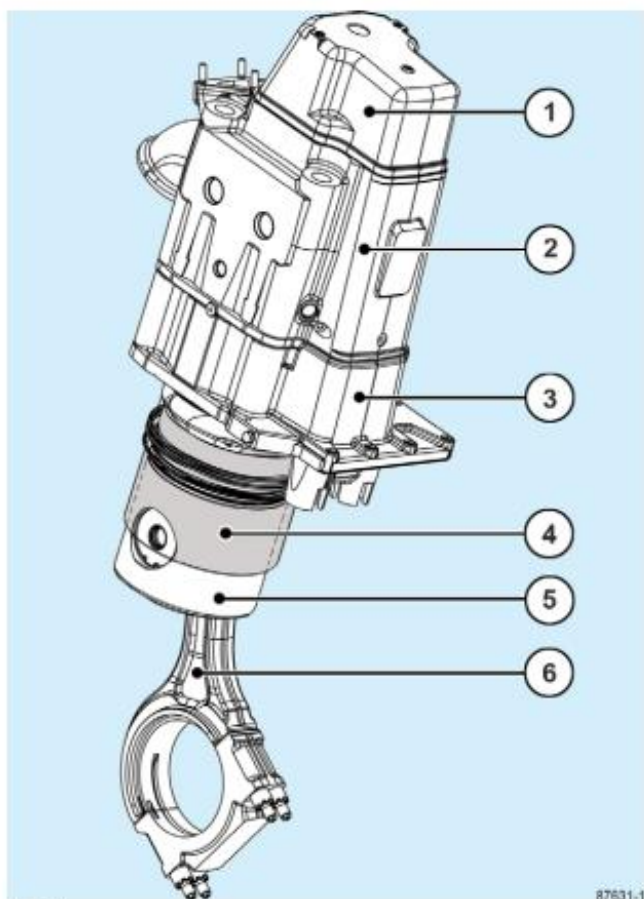
Graniczna wartość zużycia (zbicia trzonka zaworowego), wynikającą z DTR wynosi:

- **Wlot:** 41 mm
- **Wylot:** 41 mm

Należy dodać, że wartość początkowa (wymiar początkowy) trzonka zaworowego w nowych głowicach wynosi 38,00 – 38,50 mm. W głowicach regenerowanych wartość ta waha się w przedziale 38,50 – 39,00 mm.

W przypadku stwierdzenia podczas kontroli zbyt dużego luzu zaworowego, tj. zbliżania się do ponadnormatywnej wartości zbiccia trzonka zaworowego (wartości ≥ 41 mm), spowodowanego zużyciem mechanizmu zaworu, bezzwłocznie wprowadzane są działania

zmierzające do wyeliminowania potencjalnej możliwości trwałego uszkodzenia głowicy cylindra, a tym samym odstawienia silnika z ruchu. Najprostszym i jednocześnie najszybszym sposobem jest wymiana głowicy cylindra na nową lub regenerowaną głowicę. Rys. nr 12 obrazuje poz. 2 głowicę cylindra, która dzięki swej konstrukcji może zostać wymieniona w bardzo krótkim czasie.



- 1 Kołpak głowicy cylindra
- 2 Głowica cylindra
- 3 Płaszcz cylindra
- 4 Tuleja cylindrowa
- 5 Tłok
- 6 Korbowód

Rys. 14 Jednostka serwisowa

Jednostka serwisowa (Rys. nr 14), to nowa jednostka konstrukcyjna. Składa się ona z kompletnej głowicy cylindra, płaszcz cylindra, tulei cylindrowej ze zmontowanym tłokiem i korbowodem oraz z potrzebnych segmentów dobudowywanych do układu ssania i wydechu oraz układu chłodzenia i oleju smarnego.

W przypadku przekroczenia wartości zbiecia trzonka zaworowego może dojść do zderzenia tłoka z zaworem. W takim przypadku odłamany element / elementy powodują trwałe

uszkodzenie głowicy zaworowej, cylindra i tłoka silnika. Odłamki mogą także przedostawać się do dalszych części silnika powodując kolejne uszkodzenia.

Poniższe rysunki (Rys. nr 15 i 16) obrazują skutki przekroczenia granicznych wartości luzów zaworowych i uszkodzenia tłoka i cylindra przez urwany / odłamany element zaworu.



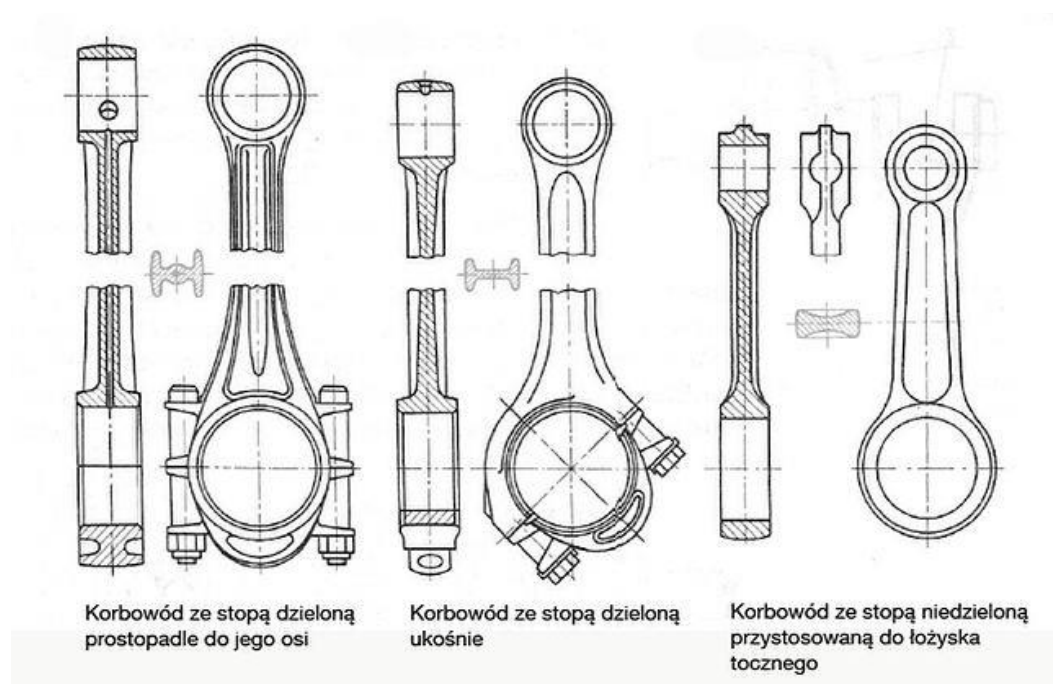
Rys. 15 Przykładowe uszkodzenie zaworów



Rys. 16 Przykładowe uszkodzenie tłoka silnika.

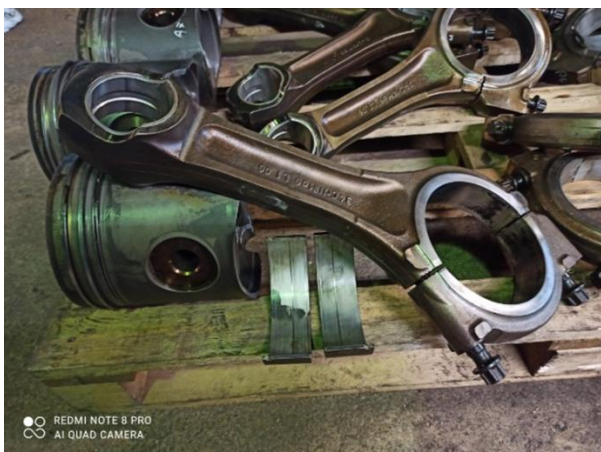
7.3.2 Układ korbowodów i panewek (półpanewek) tłoków silników.

Największe obciążenia w silniku przenoszone są przez układy korbowodowe łączące wał główny z cylindrami. Korbowód jest elementem łączącym tłok z wałem korbowym. Złożoność ruchu, jaki wykonuje, powoduje działanie na niego sił o kilku kierunkach. W wyniku przenoszenia sił gazowych od tłoka do czopu wału korbowego oraz sił bezwładności korbowód podlega siłom rozciągania, ściskania, zginania oraz wyboczenia. Tak złożony stan obciążeń powoduje, że ten element układu korbowego wymaga odpowiedniej konstrukcji i właściwej technologii wykonania. Korbowody odkuwane są ze stali niestopowej do ulepszania cieplnego lub ze stali stopowych. Odkuwane są one razem z pokrywą lub oddzielnie. Następnie poddawane są obróbce cieplnej, a potem mechanicznej. Podczas obróbki mechanicznej pokrywa zostaje odcięta lub odłamana. Odłamanie pozwala na bardziej precyzyjne ponowne złączenie pokrywy ze stopą korbowodu za pomocą śrub. W technice stosujemy kilka rodzajów korbowodów (Rys. nr 17) [44].



Rys. 17 Rodzaje korbowodów [44]

Korbowód można podzielić na kilka głównych części. Począwszy od góry pierwsza jest główka, następnie trzon, stopa i pokrywa stopy (Rys. nr 17 i Rys nr 18).



Rys. 18 Korbowody silnika typ TCG i CG

Główka.

W główkę korbowodu zazwyczaj wciśnięta jest tuleja ślizgowa, zwana panewką sworznia tłokowego, wykonana przeważnie z brązu. Jeśli mamy do czynienia ze sworzniem tłokowym pływającym (może się obracać względem główki korbowodu oraz względem piasty tłoka) lub sworzniem wciskany w piastę i obracającym się tylko względem główki korbowodu, potrzebne jest smarowanie powierzchni współpracujących. Smarowanie może odbywać się za pośrednictwem oleju pod ciśnieniem, który dostaje się przez otwór w trzonie korbowodu lub poprzez mgłą olejową.

Trzon.

Trzon łączy główkę korbowodu z jego stopą. Przeważnie ma on przekrój dwuteowy. W uproszczeniu jest to kształt rzymskiej cyfry I. Jest on korzystny z punktu widzenia wytrzymałości na zginanie i wyboczenie oraz względnie niewielkiej masy.

Stopka i jej pokrywa.

Stopa korbowodu służy do zamocowania go na wale korbowym – obejmuje czop. Może być dzielona prostopadle do osi trzonu, lub skośnie. Ukośna płaszczyzna podziału umożliwia zastosowanie większej średnicy czopa wału korbowego. Co więcej, dzięki takiemu podziałowi stopki korbowód ma mniejszą szerokość, a tym samym możliwy jest jego demontaż przez tuleję cylindra.

Ważnym elementem korbowodu są śruby łączące stopkę z jej pokrywą. Ze względu na ograniczenie wymiarów mają one niewielką średnicę, więc sposób ich obróbki musi być starannie dobrany. Przy podziale ukośnym wkręcane są one przeważnie w materiał stopy.

Stopa wyposażona jest jeszcze w łożysko ślizgowe, zwane panewką korbowodową (złożoną z dwóch półpanewek). Umożliwia ona współpracę czopu wału korbowodowego ze stopą korbowodu.

Stosowane w panewkach zamki (np. jako wyfrezowane rowki) mają na celu wskazanie właściwego osadzenia półpanewek (Rys nr 19) przy niesymetrycznym ich wykonaniu (np. gdy w jednej z nich jest wykonany otwór lub kanał olejowy). Przy składaniu pokrywy stopy

korbowodu należy pamiętać, że ułożenie półpanewek oraz zamków względem siebie jest ściśle określone.



Rys. 19 Półpanewki silnika 2,0 MWe Silnik gazowy tłokowy CG170-20 Zakład Suszec

8. Metody badań nieniszczących.

Badania nieniszczące urządzeń i konstrukcji (badania NDT–Non Destructive Testing) [4, 5, 6, 7, 8, 9, 40], stanowią grupę metod badawczych, które dostarczają informacji o własnościach materiału obiektu, nie wpływających w istotny sposób na jego właściwości strukturalne i powierzchniowe. Celem prowadzenia badań nieniszczących jest przede wszystkim wykrywanie oraz ocena wad mających charakter nieciągłości materiału. Zastosowanie badań nieniszczących uzasadniają głównie względy bezpieczeństwa oraz aspekt ekonomiczny wystąpienia nieprzewidzianej awarii. W naszym przypadku znaczenie będzie miał aspekt celowego wprowadzenia opracowanej metodologii badań, w której interpretacja wyników będzie stanowiła o wypracowaniu decyzji zmiany czasookresów przeglądów silników czyli dalszego eksploataowania urządzenia (silnika).

Wyróżniamy następujące rodzaje metod badań nieniszczących elementów maszyn:

- badania wizualne (VT) - czyli oględziny zewnętrzne, pomiary geometryczne,
- badania endoskopowe,
- badania penetracyjne (PT),
- badania magnetyczno-proszkowe (MT),
- badania ultradźwiękowe (UT),
- badania prądami wirowymi (ET),
- radiografia przemysłowa (RT)

Badanie wizualne VT (visual testing) jest metodą wykorzystywaną najczęściej jako badanie wstępne w połączeniu z inną metodą nieniszczącą. Polega ona na bezpośrednim wykryciu i ocenie nieciągłości występujących na powierzchni obiektu. W metodzie tej wykorzystuje się bezpośrednio narząd wzroku, czasami wspomagany prostą optyką (lupa). W metodzie tej wykrywane są duże nieciągłości powierzchniowe oraz wady kształtu badanego obiektu (ubytki korozyjne, porowatości, odkształcenia). Metoda ta znajduje zastosowanie między innymi do badania części statków, samolotów, pomp, wymienników ciepła, rurociągów, zbiorników turbin, wirników [6].

Badania penetracyjne są prostą i szybką metodą pozwalającą na wykrywanie nieciągłości powierzchniowych o szerokościach od 10^{-6} m, takich jak pęknięcia zmęczeniowe, pęknięcia szlifierskie, porowatości, rozwarstwienia, wżery, pęknięcia powstałe po kuciu lub po walcowaniu. Metoda ta wykorzystuje zjawisko kapilarności – wnikania (penetracji) cieczy wskazującej (penetrantu) w głąb defektów powierzchni badanej (pęknięć, szczelin, rys, porów). Po oczyszczeniu badanej powierzchni z nadmiaru penetrantu i jej osuszeniu, nanosi się na nią następnie cienką, białą warstwę wywoływacza. Wywoływacz "wyciąga" penetrant z wad i czyni je widzialnymi w formie kolorowych, liniowych lub zaokrąglonych wskazań. Najczęściej do badań penetracyjnych stosuje się penetranty barwne (czerwone) lub fluorescencyjne. W przypadku, gdy zostanie zastosowany penetrant fluorescencyjny, w celu wywołania zjawiska fluorescencji, a tym samym ujawnienia nieciągłości powierzchni badanego materiału, stosuje się lampy o promieniowaniu ultrafioletowym. Barwniki te pod

działaniem promieniowania UV świecą najczęściej kolorem żółto – zielonym i są dobrze widoczne na ciemnym tle. W metodzie tej konieczne jest zaciemnienie stanowiska badawczego w celu zwiększenia wykrywania wad. Metodę penetracyjną stosuje się w materiałach ferromagnetycznych, nieferromagnetycznych (stal, staliwo, żeliwo, miedź, mosiądz, brąz, wolfram) oraz do badań materiałów niemetalicznych (np. ceramicznych) [5].

Badania magnetyczno-proszkowe [7] są jedną z najbardziej czułych, wiarygodnych i wydajnych metod nieniszczących, służących kontroli powierzchni materiałów ferromagnetycznych, czyli wszystkich stali konstrukcyjnych z wyłączeniem stali wysokostopowych (austenitycznych). Metoda ta wykorzystuje oddziaływanie sił strumienia magnetycznego na cząsteczki ferromagnetyczne aplikowane na powierzchni badanego obiektu. W przypadku wystąpienia wady następuje rozproszenie strumienia magnetycznego oraz zmiana układu proszku magnetycznego w tej okolicy. Najlepszą wykrywalność osiąga się w sytuacji, w której kierunek ułożenia wady jest prostopadły do kierunku sił pola magnetycznego. Wraz ze zmniejszeniem tego kąta, wskazania wady są coraz to słabsze. Metoda magnetyczno-proszkowa charakteryzuje się możliwością wykrywania wąskich i płytkich nieciągłości powierzchniowych i podpowierzchniowych do około 2 mm. Stosowana jest do badania połączeń spawanych, odlewów, wałów korbowych silników spalinowych, przekładni zębatych, lin kolejek i wyciągów górskich. Zaletą tej metody jest duża szybkość wykonywanego badania oraz natychmiastowy wynik. Materiał badawczy występuje w formie barwnych lub fluorescencyjnych suchych proszków magnetycznych, zawiesin olejowych lub wodnych. Źródłami strumienia magnetycznego są jarzma (w przypadku badań małych lub trudnodostępnych obiektów) lub generatory prądu.

Metody badań nieniszczących ciągle są rozwijane i znajdują zastosowanie w różnych dziedzinach przemysłu. Ich szerokie zastosowanie wynika zarówno z potrzeby diagnozowania maszyn, utrzymania bezpieczeństwa, jak i niezawodności oraz gotowości technicznej na wymaganym poziomie.

Nieniszczące badania urządzeń i konstrukcji (NDT) znajdują szerokie zastosowanie w wykrywaniu wad w elementach mechanicznych urządzeń. Najczęściej wykrywane są takie defekty jak pęknięcia otwarte lub wewnątrz elementów poddawanych działaniom sił, np. zgniatających, rozciągających lub uszkodzeń bardzo często spowodowanych nieprawidłowym montażem, zdiagnozowanie wad kształtu na etapie produkcji oraz wykrywanie uszkodzeń wywołanych korozją urządzeń. W zależności od badanego elementu, jego przeznaczenia i budowy wykorzystujemy różne metody badań. Najchętniej i najczęściej stosowaną metodą są badania penetracyjne.

9. Zakres prac pomiarowo – badawczych i analitycznych.

Tabela nr 6 Zakres prac pomiarowo-badawczych i analitycznych

Lp.	Planowany zakres prac pomiarowo – badawczych i analitycznych
1	Wykonanie pomiarów geometrycznych zbiecia trzonków zaworowych cylindrów silników SG 1 Zakład Jastrzębie Zdrój Oddział Moszczenica oraz SG 4 Zakład Pniówek (cylindry A1 ÷ A8 i B1 ÷ B8) w celu określenia zmiany luzów zaworowych.
2	Kontrola wzrokowa / oględziny półpanewek tłoków korbowodowych silników SG 1 i SG 4 w celu określenia stopnia zużycia eksploatacyjnego.
3	Badania nieniszczące penetracyjne (PT) półpanewek tłoków korbowodowych silników SG 1 i SG 4 w celu określenia ewentualnych wad materiałowych (mikropęknięcia) mogących wystąpić w badanych elementach na skutek eksploatacji.
4	Badania nieniszczące magnetyczno-proszkowe (MT) półpanewek tłoków korbowodowych silników SG 1 i SG 4 w celu określenia ewentualnych wad materiałowych (mikropęknięcia) mogących wystąpić w badanych elementach na skutek eksploatacji.
5	Kontrola wzrokowa / oględziny korbowodów silników SG 1 i SG 4 w celu określenia stopnia zużycia eksploatacyjnego.
6	Badania nieniszczące penetracyjne (PT) korbowodów silników SG 1 i SG 4 w celu określenia ewentualnych wad materiałowych mogących wystąpić w badanych elementach na skutek eksploatacji.
7	Analiza parametrów ruchowych silników: SG 1 Zakład Jastrzębie Zdrój Oddział Moszczenica oraz SG 4 Zakład Pniówek.

9.1 Zestawienie wyników pomiarów zbiecia trzonków zaworowych cylindrów A 1 – 8 i B 1 – 8 silnika SG 1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.

Poniżej zestawiono wykonane pomiary geometryczne zbiecia trzonków zaworowych silnika SG 1 w okresie od 13.01.2019r. do 15.09.2021r. Prezentacja uzyskanych wyników w formie wykresów zbiec zaworowych głowic A 1 ÷ 8 oraz B 1 ÷ 8 pozwala na śledzenie tendencji wartości przyrostu / stabilizacji / spadku zbiecia trzonka zaworowego, zaworów zainstalowanych w poszczególnych głowicach silnika. Tym samym otrzymujemy obraz utrzymywania dopuszczalnych luzów zaworowych na bezpiecznym poziomie

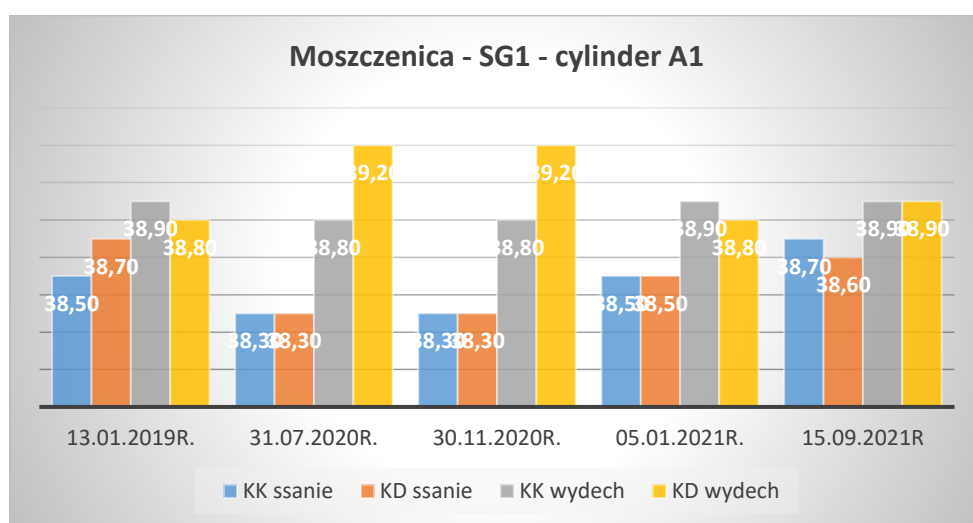
eksploatacyjnym, który wpływa korzystnie na uzyskiwane parametry pracy silnika tj. moc oraz temperaturę w cylindrach, które to parametry będą przedmiotem analizy i badań w dalszej części niniejszej pracy.

Luz na zaworze (luz zaworowy) **Wlot** wynosi: 0,3 mm

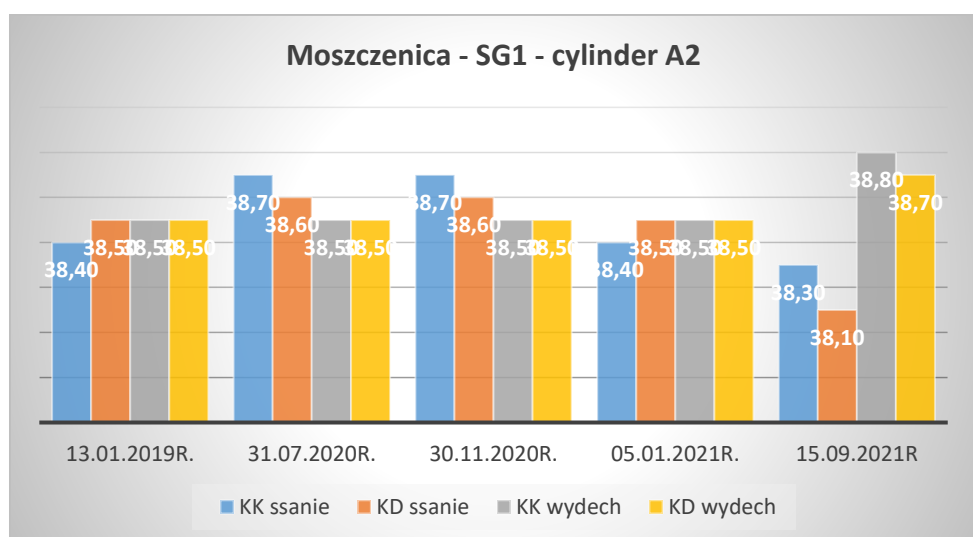
Luz na zaworze (luz zaworowy) **Wylot** wynosi: 1,3 mm

Graniczna wartość zużycia (zbięcia trzonka zaworowego), wynikającą z DTR wynosi:

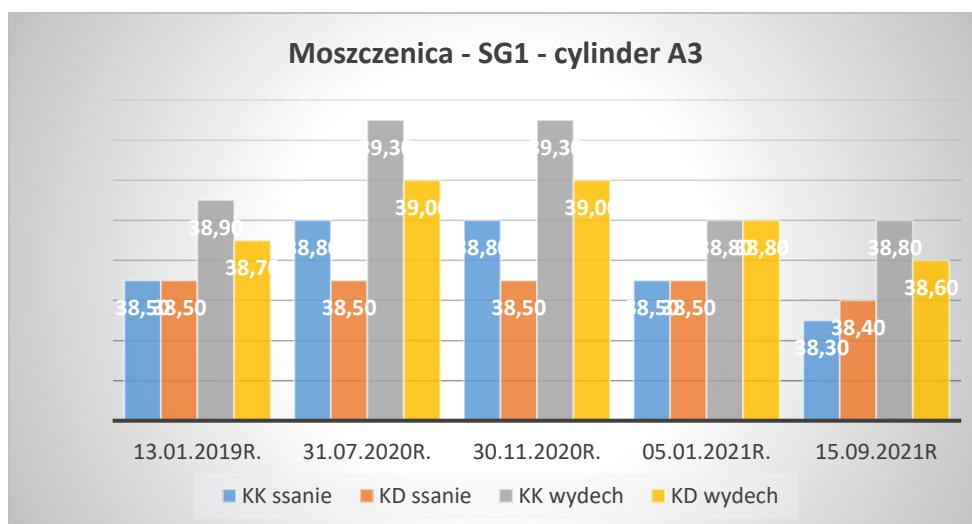
- **Wlot:** 41 mm
- **Wylot:** 41 mm



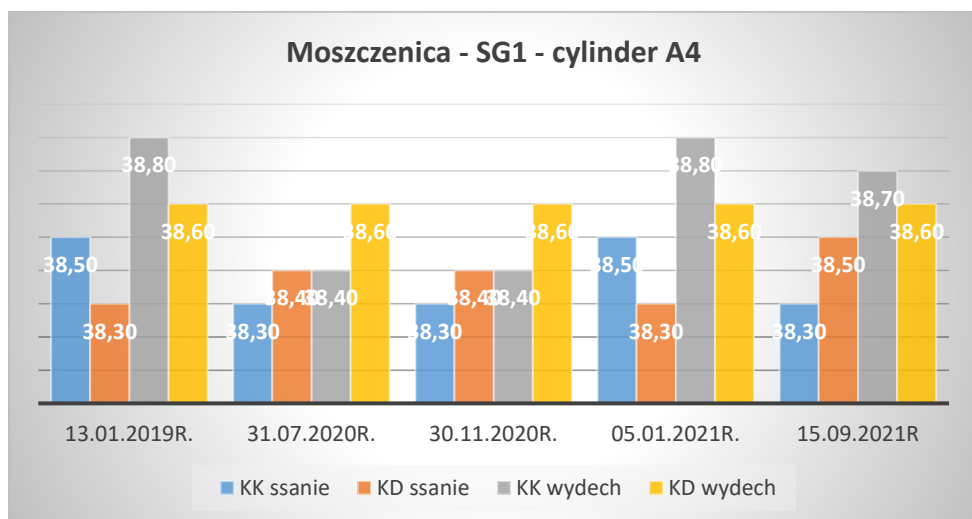
Rys. 20 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 1



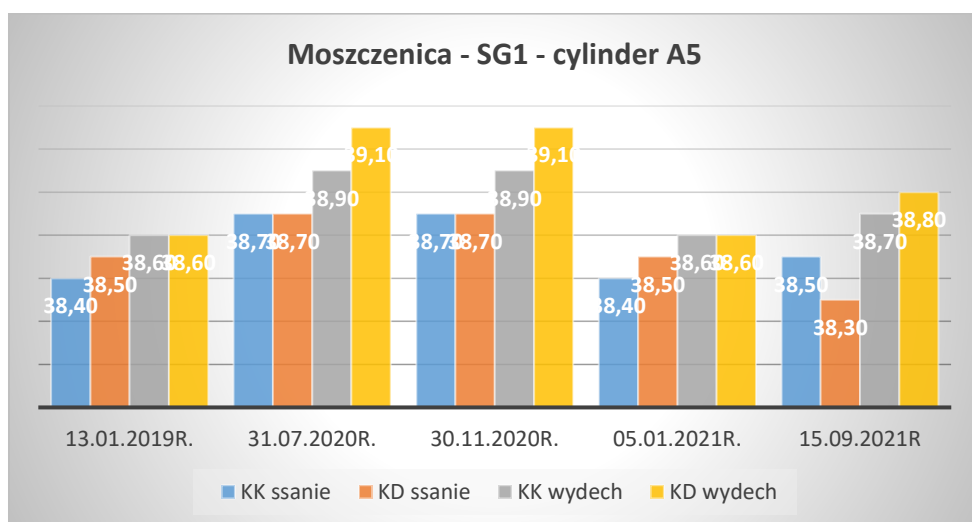
Rys. 21 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 2



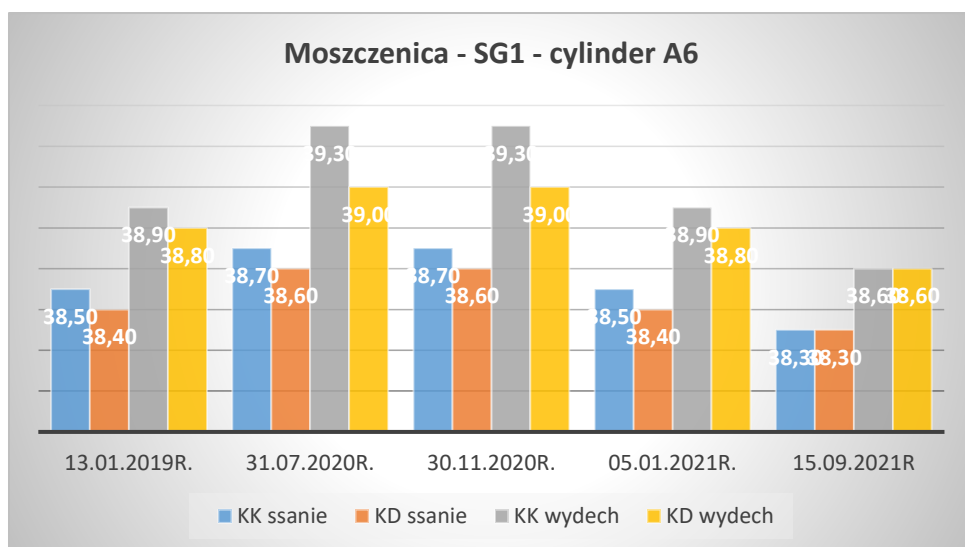
Rys. 22 Wykres zbić trzoneków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 3



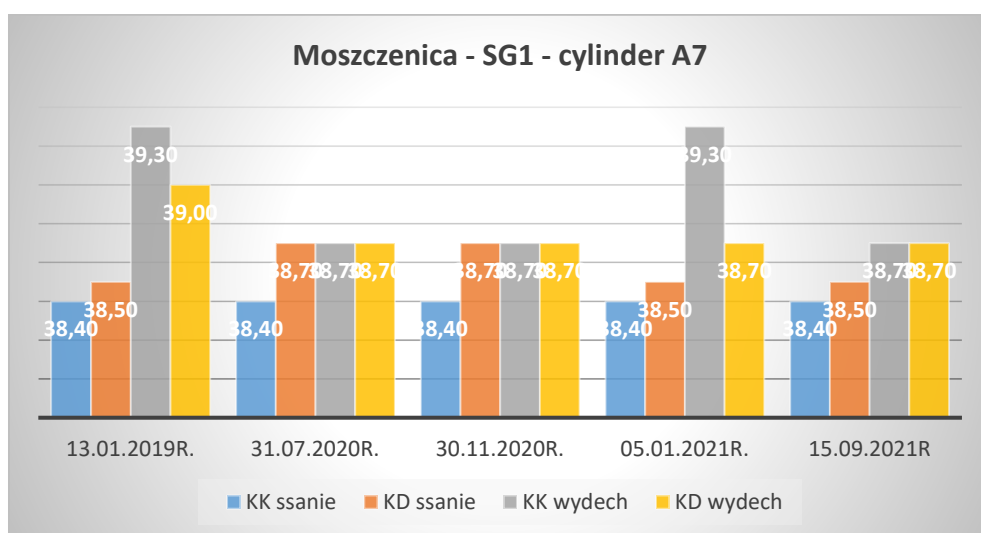
Rys. 23 Wykres zbić trzoneków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 4



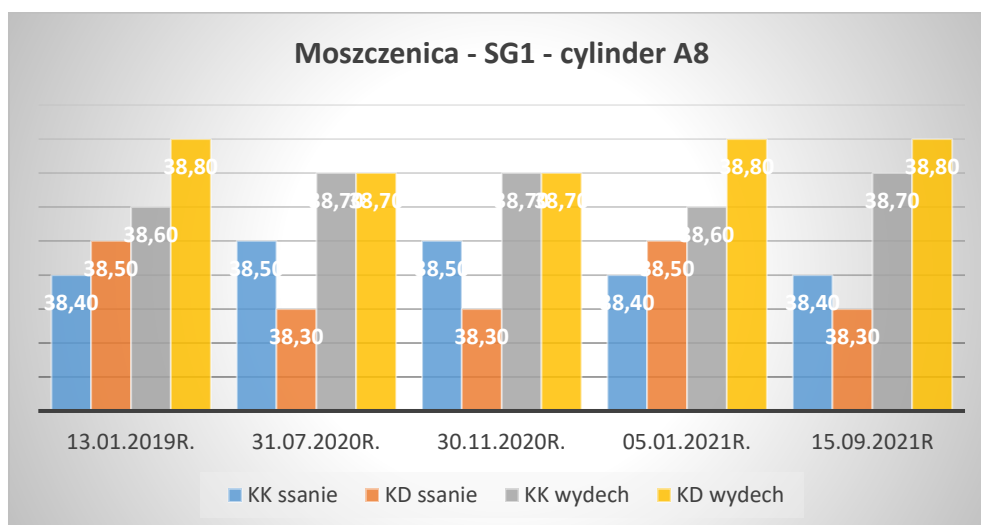
Rys. 24 Wykres zbić trzoneków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 5



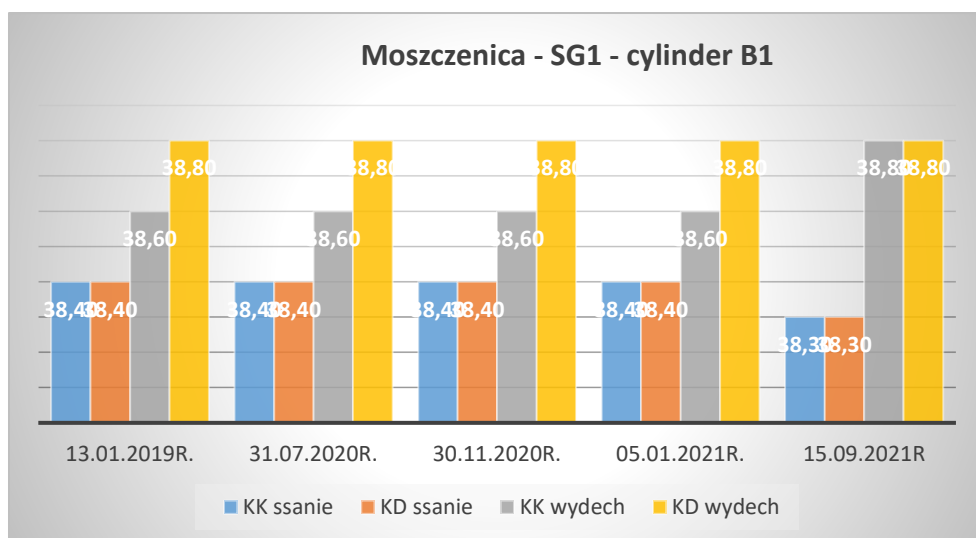
Rys. 25 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 6



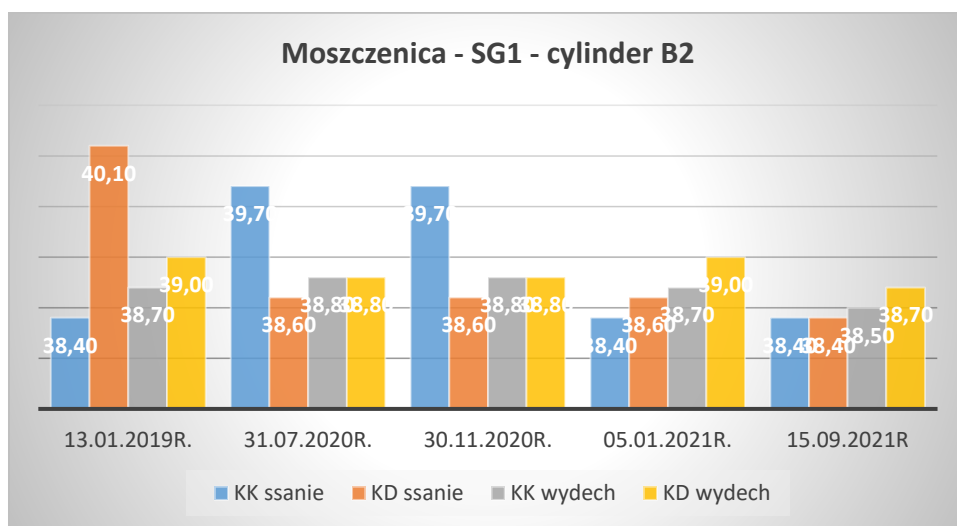
Rys. 26 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 7



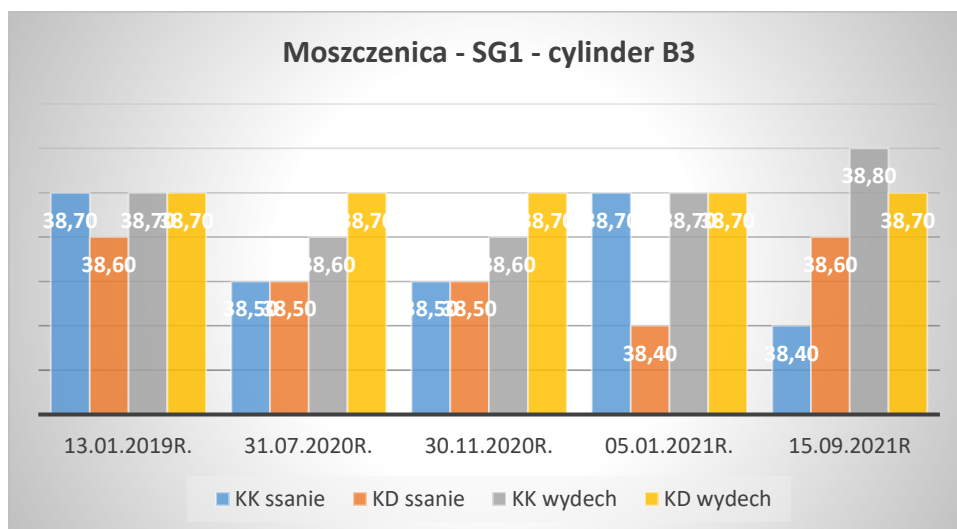
Rys. 27 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 8



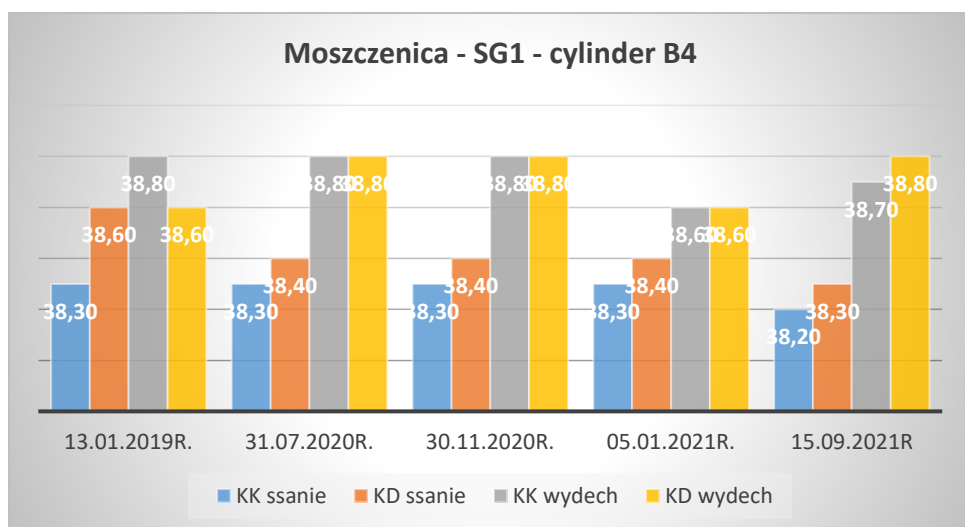
Rys. 28 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 1



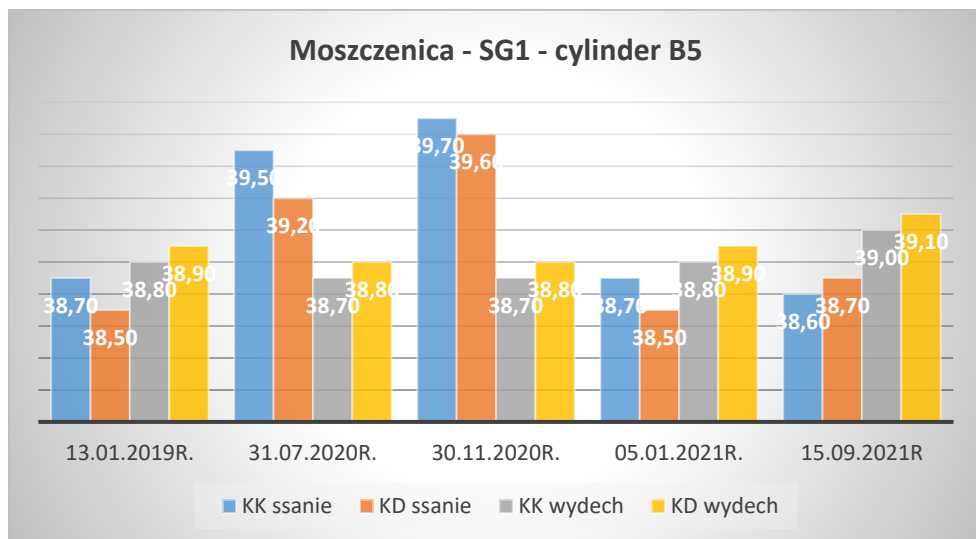
Rys. 29 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 2



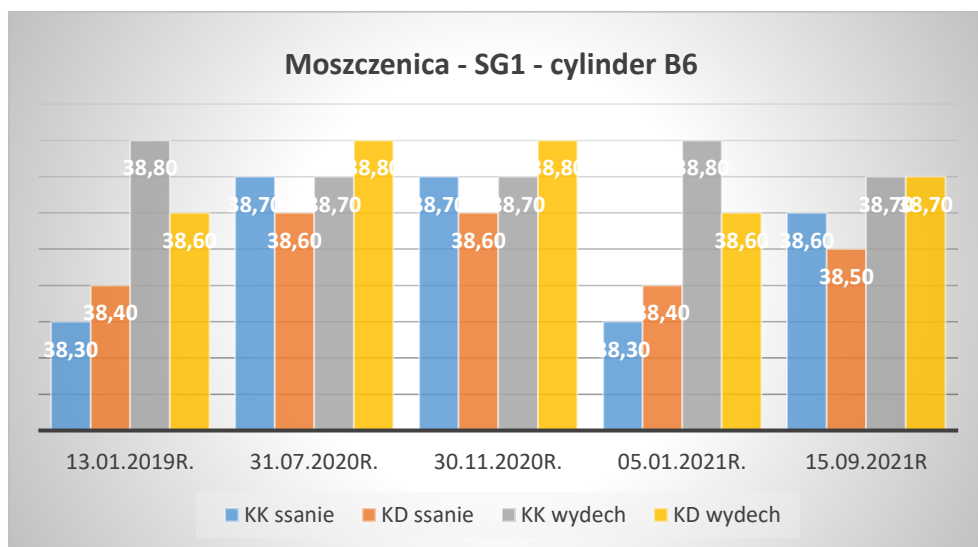
Rys. 30 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 3



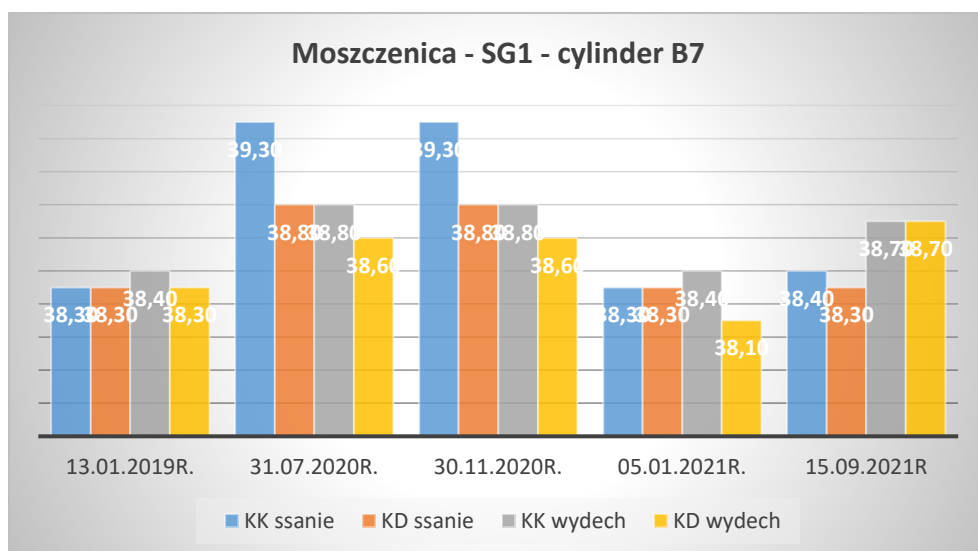
Rys. 31 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 4



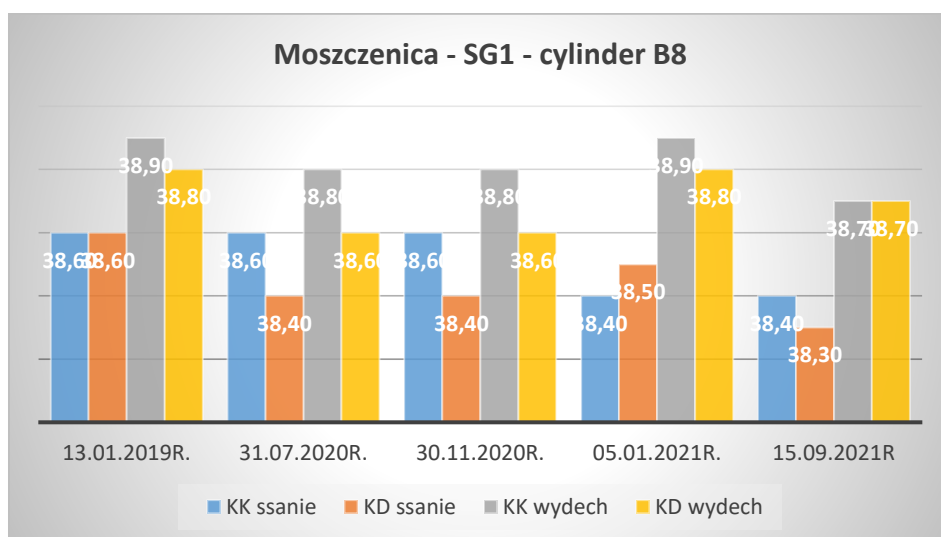
Rys. 32 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 5



Rys. 33 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 6



Rys. 34 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 7

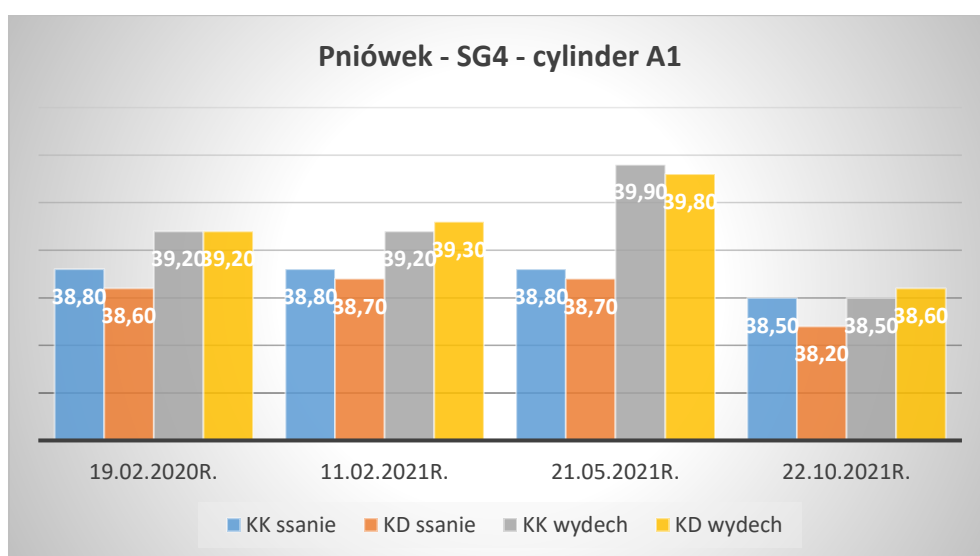


Rys. 35 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 8

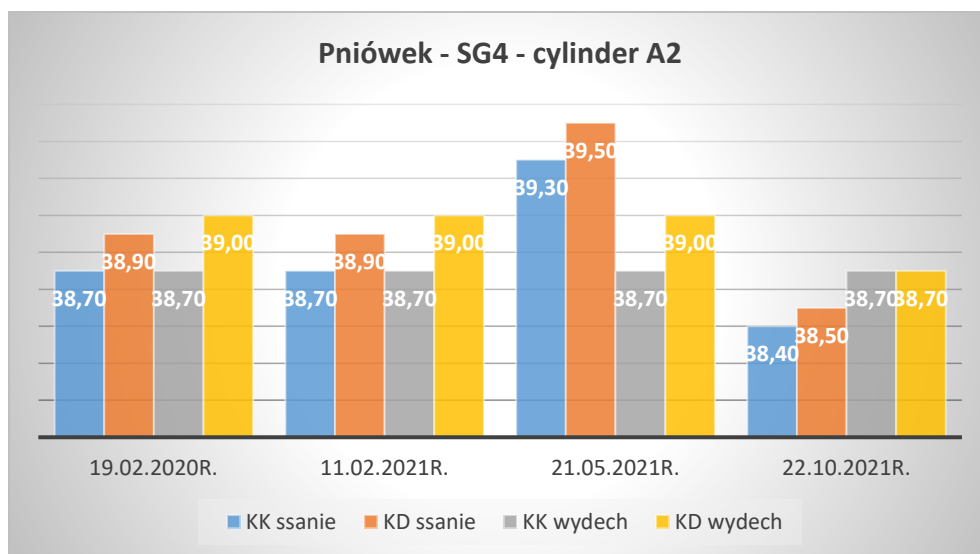
Powyższe wykresy (silnik SG 1) obrazują trend związany ze zmieniającymi się wartościami zbić trzonków zaworowych w ponad dwuletnim horyzoncie czasowym. Fizyczne wykonanie pomiarów i badań, związane jest z koniecznością odstawienia silnika oraz jego wystudzenia. W związku z powyższym tylko w okresach wykonywania planowych przeglądów, jak i ewentualnych dłuższych postojów silnika, spowodowanych zdarzeniami awaryjnymi, możliwe było dokonanie pomiarów badanych elementów. Nie należy zapominać, że silniki jako „stanowiska badawcze” obarczone były i w dalszym ciągu są zadaniami, związanymi z produkcją energii elektrycznej i ciepła. Zaobserwowano tylko w jednym przypadku przekroczenie wartości 40,00 mm (Rys. nr 29), co świadczy o dbałości i szybkiej reakcji służb ruchowych na występujące przypadki zbliżania się do wartości granicznej zbitcia trzonka zaworowego. Można także zauważyć, że w okresie 2019 / 2020 roku wartości pomiarowe zbitcia trzonków zaworowych dla ok. 80% głowic, są wyższe niż w roku 2021.

9.2 Zestawienie wyników pomiarów zbiecia trzonek zaworowych cylindrów A 1 – 8 i B 1 – 8 silnika SG 4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.

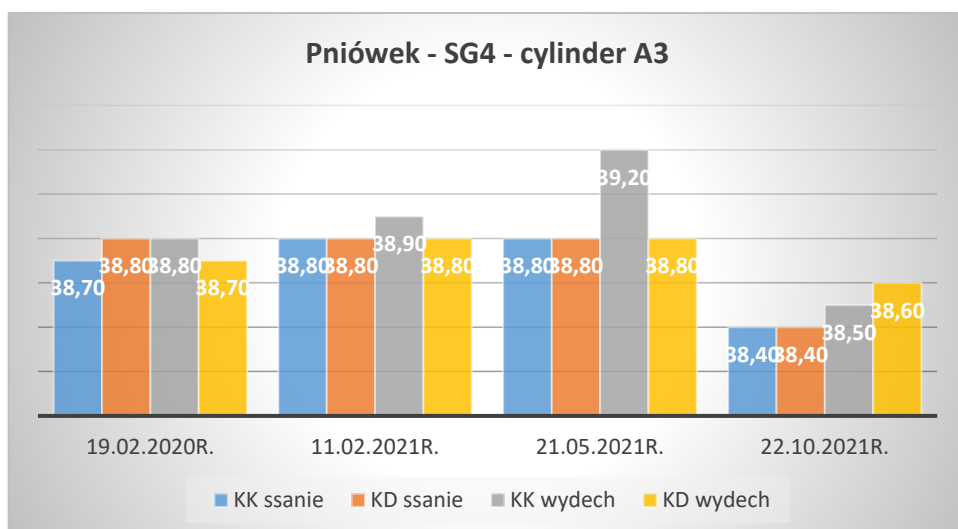
Poniżej zestawiono wykonane pomiary geometryczne zbiecia trzonek zaworowych silnika SG 4 w okresie od 19.02.2020r. do 22.10.2021r. Analogicznie jak w przypadku silnika SG1 prezentacja uzyskanych wyników w formie wykresów zbiec zaworowych poszczególnych głowic A 1 ÷ 8 oraz B 1 ÷ 8 pozwala na śledzenie tendencji wartości przyrostu / stabilizacji / spadku zbiecia trzonka zaworowego, zaworów zainstalowanych w poszczególnych głowicach silnika. Otrzymujemy obraz utrzymywania dopuszczalnych luzów zaworowych na bezpiecznym poziomie eksploatacyjnym, który wpływa korzystnie na uzyskiwane parametry pracy silnika tj. moc oraz temperatura w cylindrach, które to parametry będą przedmiotem analizy i badań w dalszej części niniejszej pracy.



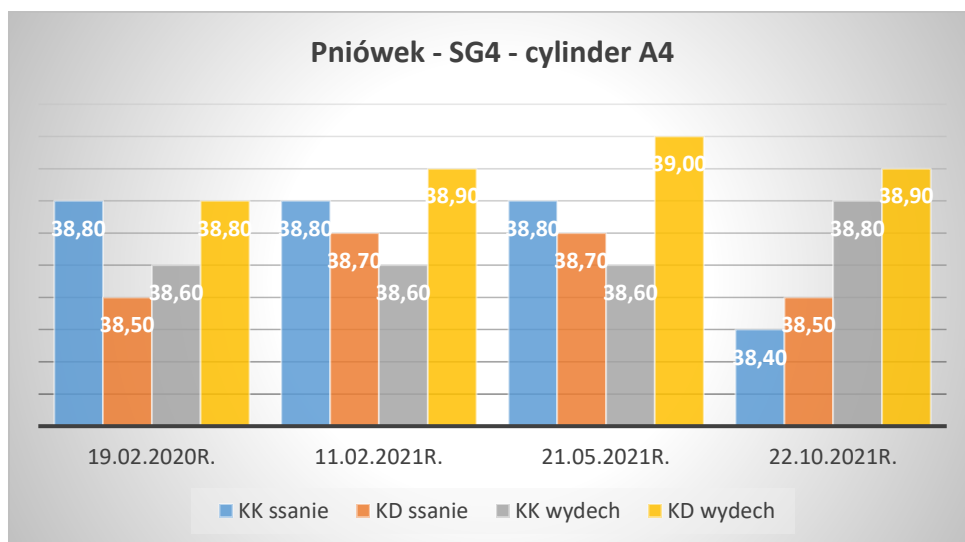
Rys. 36 Wykres zbiec trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 1



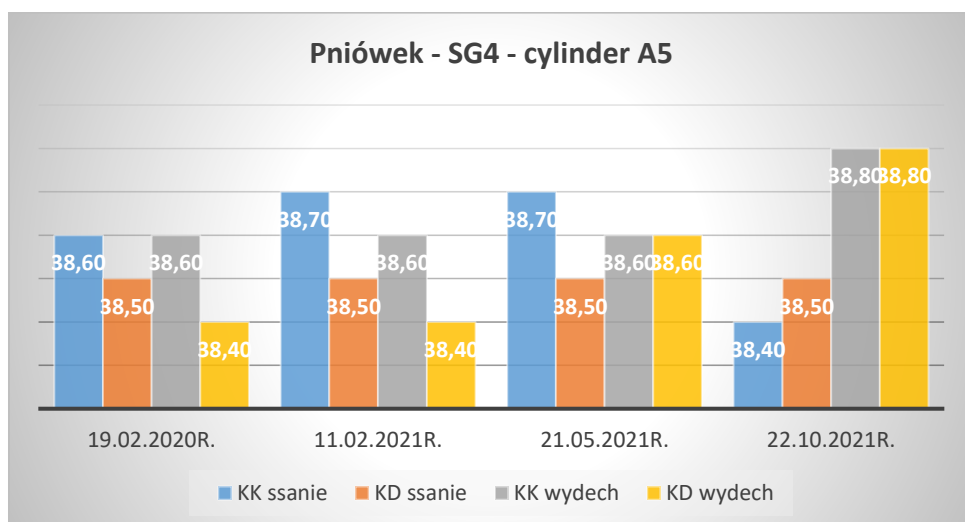
Rys. 37 Wykres zbiec trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 2



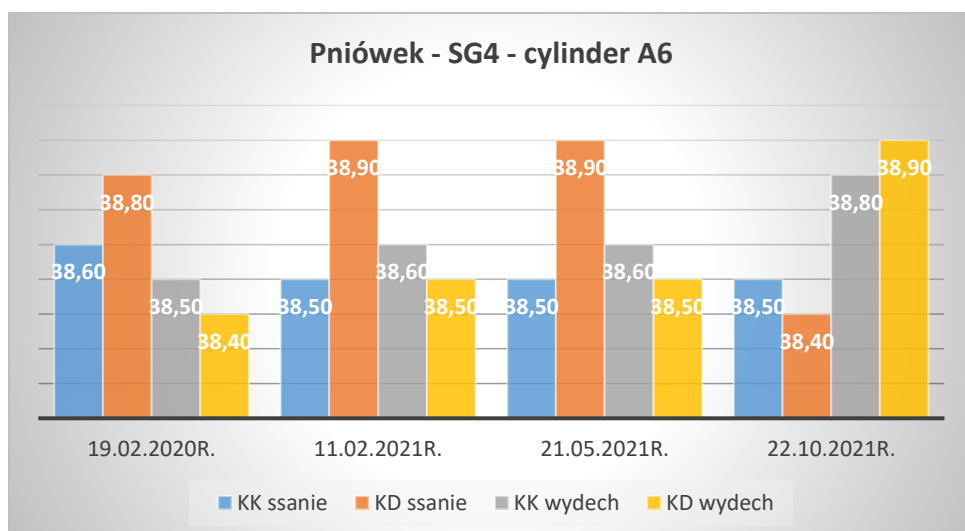
Rys. 38 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 3



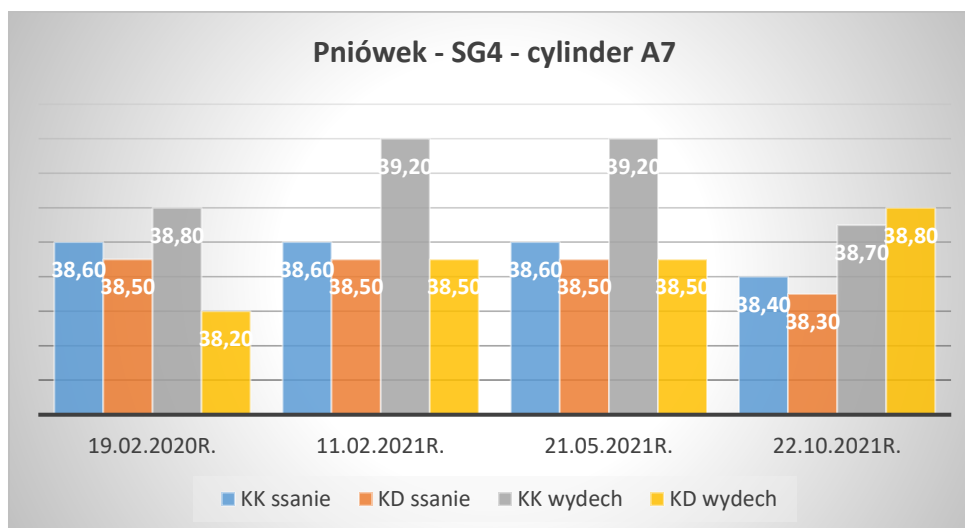
Rys. 39 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 4



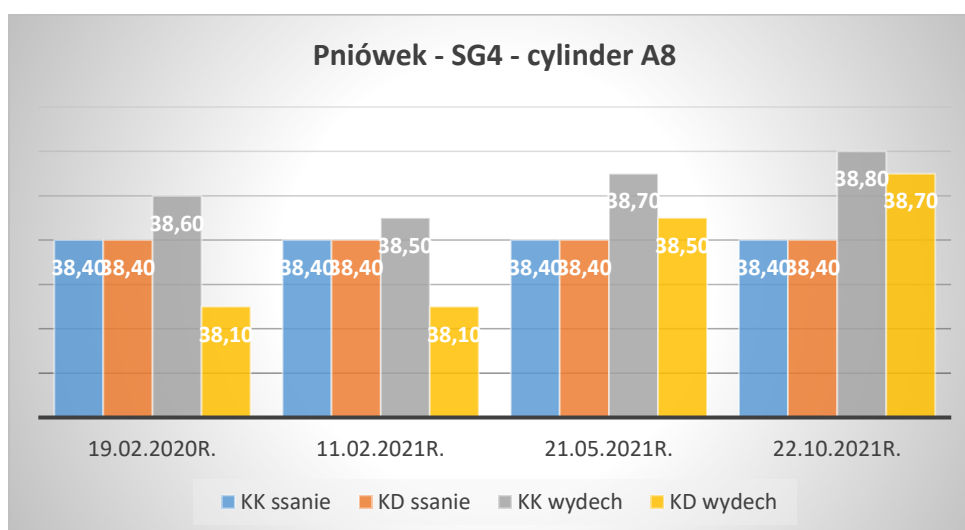
Rys. 40 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 5



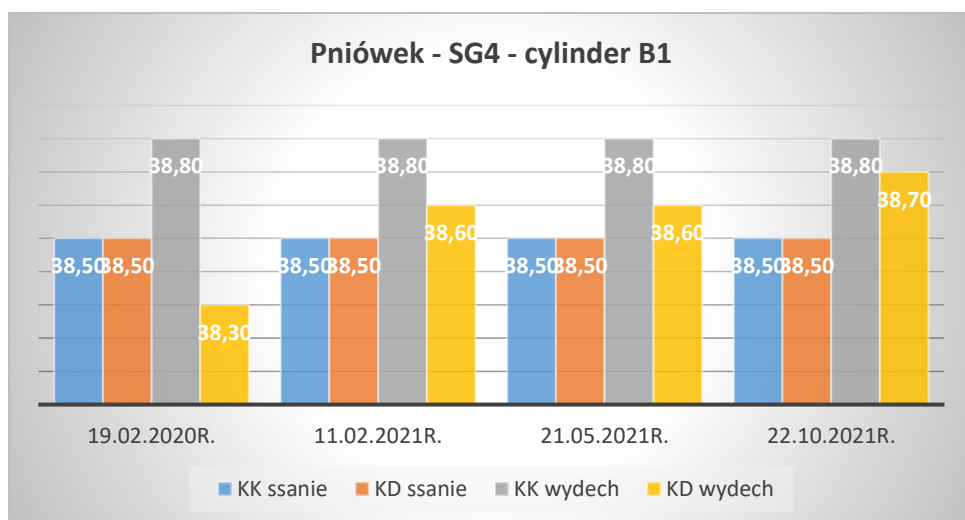
Rys. 41 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 6



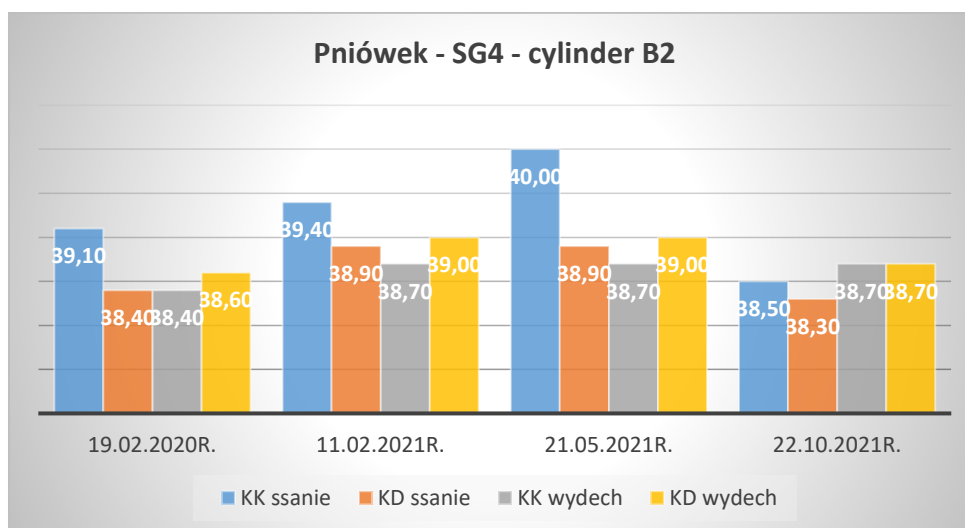
Rys. 42 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 7



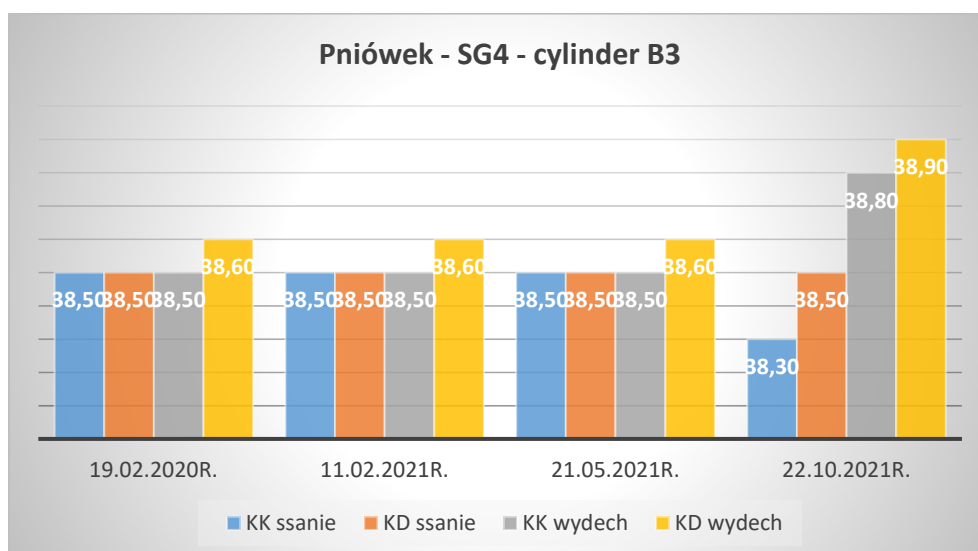
Rys. 43 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 8



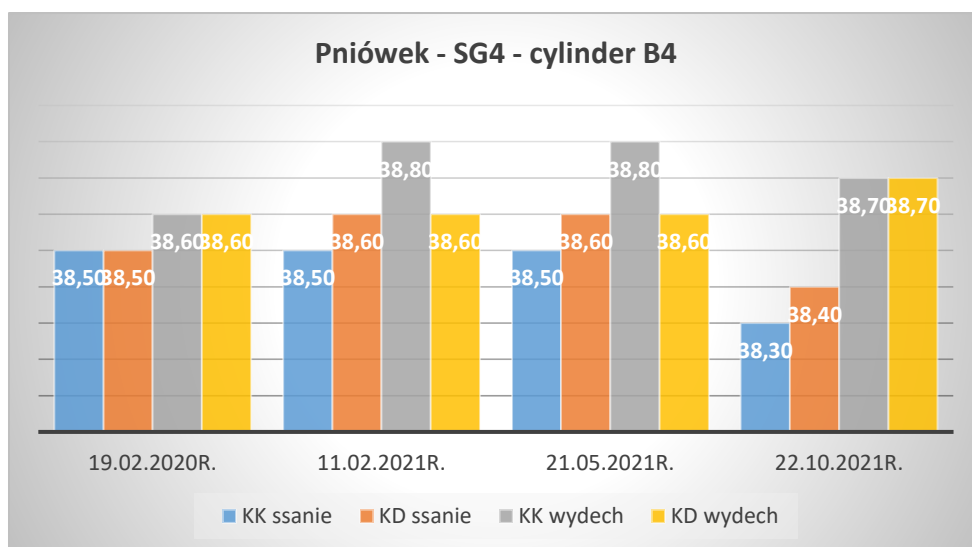
Rys. 44 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 1



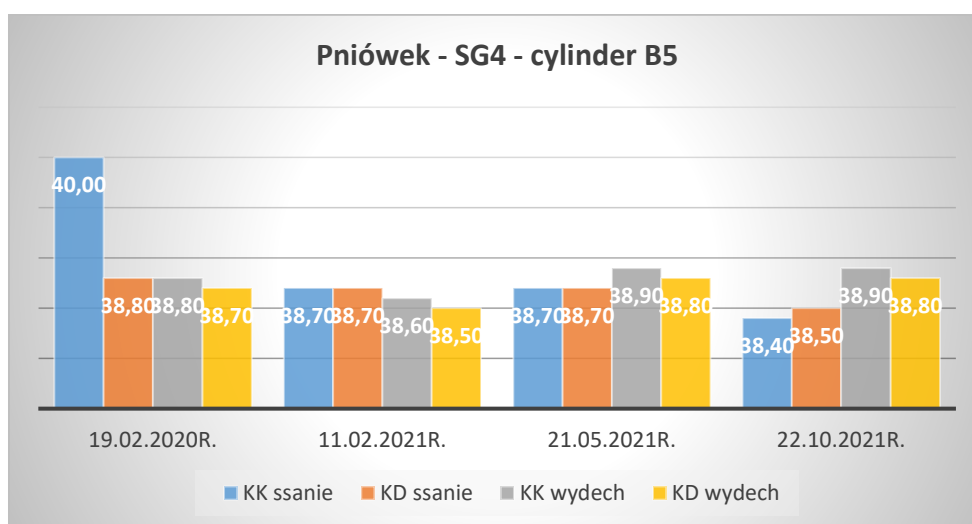
Rys. 45 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 2



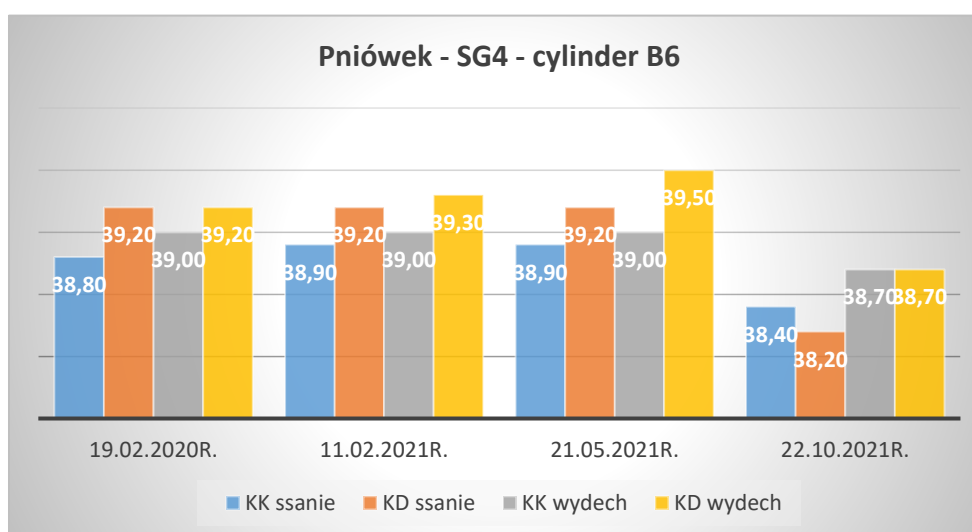
Rys. 46 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 3



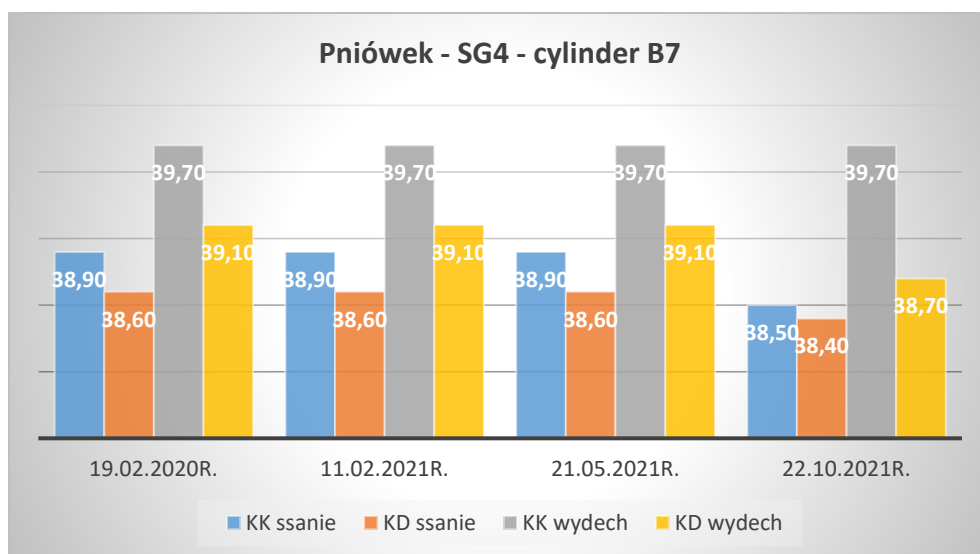
Rys. 47 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 4



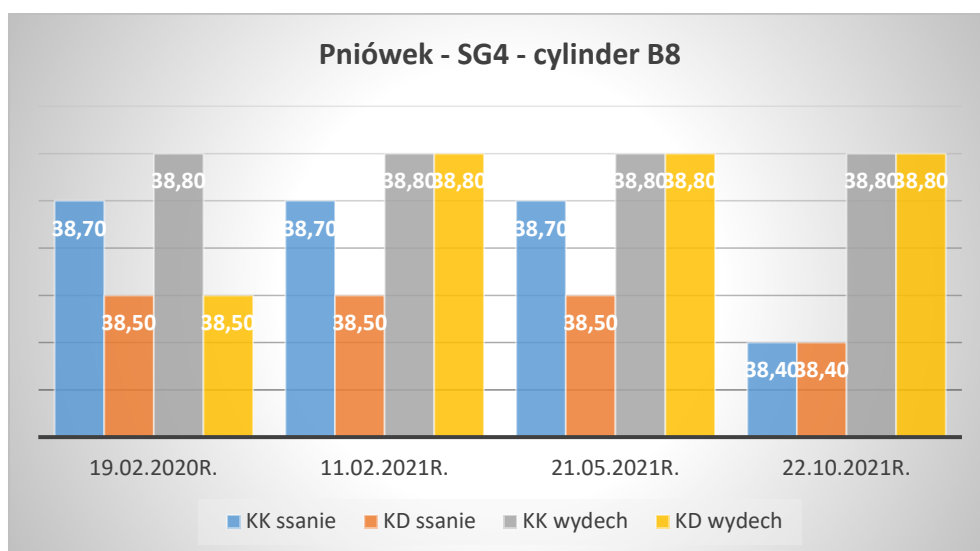
Rys. 48 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 5



Rys. 49 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 6



Rys. 50 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 7



Rys. 51 Wykres zbić trzonek zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 8

W przypadku silnika SG 4 zainstalowanego w Zakładzie Pniówek, wykresy obrazują trend związany ze zmieniającymi się wartościami zbić trzonek zaworowych w okresie ok. dwóch lat. W dwóch przypadkach, zbić trzonek zaworowych osiągnęło wartość 40,00 mm (Rys. nr 45 oraz Rys. nr 48). Nie przekroczono jednak wartości granicznej tj. 41,00 mm. Pomiary zanotowano w różnych okresach czasowych.

9.3 Badania nieniszczące wytypowanych elementów silnika SG1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz silnika SG 4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.

Zdemontowane elementy silników SG 1 i SG 4 (Rys. nr 52) takie jak półpanewki oraz korbowody zostały poddane badaniom nieniszczącym w celu zweryfikowania ich stanu technicznego.



Rys. 52 Zdemontowane elementy silnika SG4

Przebadano zdemontowane 16 szt. półpanewek silnika SG 1 oraz 16 szt. półpanewek silnika SG4 (Rys. nr 53). Ponad roczne przekroczenie czasookresu wykonania przeglądu E-70 obu silników, w stosunku do planowanego terminu przeglądu powinno nieść za sobą teoretycznie większe zużycie badanych części. Wykonane oględziny wizualne badanych elementów (Rys nr 53) nie wykazały wad materiałowych czy też innych uszkodzeń o charakterze ciągłym lub miejscowym. Półpanewki nosiły ślady normalnego zużycia eksploatacyjnego tj. niewielkie rysy powierzchniowe i miejscowe odbarwienia. Nie odnotowano w badanych elementach żadnych wad lub niepokojących odkształceń świadczących o uszkodzeniu lub technicznej degradacji części.



Rys. 53 Półpanewki silnika SG1 i SG4.

Poddano ocenie wizualnej 16 szt. zdemontowanych korbowodów silników SG1 i SG4 (Rys nr 54) Oględziny korbowodów oraz części wchodzących w ich skład tj. główki, śruby oraz stopy nie wykazały defektów, pęknięć czy też ubytków materiałowych, które dyskwalifikowałyby badane elementy do dalszej eksploatacji. Ocena wizualna w przypadku korbowodów wypadła pozytywnie. Elementy nie nosiły śladów zużycia eksploatacyjnego



Rys. 54 Korbowód wraz ze śrubami, główka i stopa korbowodu silnika SG 1

Poddano ocenie wizualnej zdemonstrowane nakrętki. Nakrętki są elementami małymi i powtarzalnymi. Jednocześnie w czasie wieloletniej eksploatacji silników nie zdarzyło się aby ten element był odpowiedzialny za jakąkolwiek usterkę silnika / silników. Niemniej jednak zdecydowano się na przebadanie tych elementów, w celu potwierdzenia braku wad elementów złącznych. Wizualna ocena części wypadła pozytywnie. Elementy złączne nie nosiły żadnych śladów zużycia eksploatacyjnego. Wyniki zestawiono w Tabeli nr 7.

Tabela nr 7 Wyniki badań wizualnych (VT) zdemontowanych elementów silników SG 1 i SG 4

Lp.	Badany element	Ilość szt.	Wynik
1	Półpanewki silnika SG1	16	Pozytywny
2	Półpanewki silnika SG1	16	Pozytywny
3	Korbowody silnika SG1	16	Pozytywny
4	Korbowody silnika SG1	16	Pozytywny
5	Nakrętki silnika SG1	64	Pozytywny
6	Nakrętki silnika SG4	64	Pozytywny

Przeprowadzono badania nieniszczące penetracyjne (PT) elementów silnika SG 1 i SG 4. Do badań użyto dedykowanego zestawu badawczego, zawierającego:

- Penetrant MR68C,
- Zmywacz MR79,
- WywoływaczMR70.

Celem badania było wykrycie defektów materiałowych elementów silnika, takich jak: pęknięcia zmęczeniowe, porowatości, rozwarstwienia, wżery.

Badaniu penetracyjnemu (PT) poddano taka sama ilość elementów jaka była poddana badaniom wizualnym (VT) (Rys. nr 55 i Rys. nr 56).



Rys. 55 Badanie penetracyjne półpanewek silnika SG1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą penetrantu)



Rys. 56 Badanie penetracyjne półpanewki silnika SG 1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą wywoływacza)

Dodatkowo półpanewki korbowodów silników SG1 i SG4 poddano badaniu magnetyczno-proszkowemu (Rys. nr 57), w celu weryfikacji i potwierdzenia wyników badań penetracyjnych. Powyższa metoda badań cechuje bardzo dużą dokładność i wiarygodność uzyskanych wyników pomiarowych.

Badanie wykonano przy zastosowaniu procedury badawczej PB.03.LMB:6/10.2020. Użyto miernika światła białego MK-VI nr fab. 6931, Defektoskopu Pfinder 15-0 nr fab. 1505052, Miernika GM04 nr fab. GM0855. Wykorzystano proszek magnetyczny czarny typ MR-76S seria B:76S/1243A przy użyciu kontrastu z podkładu białego typ MR-72 seria: B:72/1281A. Natężenie pola wynosiło 3,4 kA/m. Rodzaj magnetyzacji - bezpośredni przepływ strumienia magnetycznego. Przebadano część zewnętrzną oraz wewnętrzną półpanewek z wynikiem pozytywnym.



Rys. 57 Badanie magnetyczno-proszkowe (MT) półpanewki silnika SG 1 i SG4

Badania korbowodów silników SG1 oraz SG4 przeprowadzono również metodą penetracyjną (PT) (Rys. nr 58) w celu weryfikacji stanu technicznego kluczowego elementu konstrukcyjno-eksploatacyjnego silników po przekroczeniu zakładanego czasu użytkowania.





Rys. 58 Badanie penetracyjne korbowodów silnika SG 1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą penetrantu i wywoływacza)

Przeprowadzono badania penetracyjne elementów złącznych (Rys. nr 59)



Rys. 59 Elementy złączne korbowodów silników SG1 i SG4 – nakrętki.

Wyniki przeprowadzonych badań zestawiono w Tabeli nr 8.

Tabela nr 8 Wyniki badań penetracyjnych (PT) zdemontowanych elementów silników SG1 i SG4

Lp.	Badany element	Ilość szt.	Wynik
1	Półpanewki silnika SG1	16	Pozytywny
2	Półpanewki silnika SG1	16	Pozytywny
3	Korbowody silnika SG1	16	Pozytywny
4	Korbowody silnika SG1	16	Pozytywny
5	Nakrętki silnika SG1	64	Pozytywny
6	Nakrętki silnika SG4	64	Pozytywny

9.4 Podsumowanie wyników badań.

Przeprowadzone badania wizualne (VT), penetracyjne (PT), magnetyczno-proszkowe (MT) wytypowanych / wybranych elementów silników SG 1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz SG 4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek, a także uzyskane wyniki nie wykazały oznak ponadnormatywnego zużycia eksploatacyjnego. Pomimo wydłużenia czasu eksploatacji, z uwagi na przesunięte główne przeglądy silników E-70, elementy nie nosiły śladów mikropęknięć, ubytków czy też innych wad, które mogłyby wskazywać na ich zniszczenie, konieczność natychmiastowej wymiany lub ich dyskwalifikację z technicznego punktu widzenia. Wyniki badań, wybrane i zastosowane metody badawcze, charakteryzujące się dostępnością, niskimi kosztami wykonania oraz wystarczającą pewnością i dokładnością inżynierską, pozwoliły na sformułowanie wniosków końcowych i zaleceń, co do możliwości wydłużenia czasookresów wykonywania przeglądów silników, których paliwem jest metan pochodzący z kopalń JSW S.A.

Wykonane badania pomiarów geometrycznych zbici trzonków zaworowych silników SG1 i SG4 oraz uzyskane wyniki, nie mogą stanowić jednoznacznej bazy do wypracowania ewentualnych wniosków i zaleceń, co do możliwości wydłużenia okresów między przeglądami silników. Wyniki, które uzyskano w trakcie pomiarów, wskazują na utrzymywanie ruchowe, eksploatacyjne silników na dobrym poziomie inżynierskim. Powyższe pozwala na kontrolę zużycia trzonków zaworowych, a tym samym kontrolę luzów zaworowych, co przekłada się bezpośrednio na szybkość reakcji służb remontowych i dokonywane wymiany głowic cylindrów. Należy przyjąć, że głowice powinny być traktowane jako „części zamienne”, których wymiany należy dokonywać w miarę potrzeb ruchowych (zbliżanie się do granicy wartości zbiccia trzonków zaworowych) lub ich wymiana powinna być wykonywana podczas przeglądów zalecanych w DTR silnika. Uzyskane wyniki zbici trzonków zaworowych, mogą posłużyć jako dane pomocnicze, których zestawienie z wynikami badań nieniszczących oraz skorelowanie z analizą parametrów ruchowych może zwiększyć dokładność sformułowanych wniosków końcowych i zaleceń.

10. Analiza parametrów ruchowych silników SG1 i SG4.

Poniżej dokonano analizy parametrów ruchowych silników: SG 1 (TCG 2032V16 - MN 2208931) zlokalizowanego w Zakładzie Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz SG 4 (TCG 2032V16 - MN 2208930) zlokalizowanego w Zakładzie Pniówek. Oba silnik zostały zabudowane w 2011 roku. Ich główne przeglądy / remonty o oznaczeniu E-70 zaplanowano, zgodnie z DTR, po 64 000,00 rbh pracy, co oznaczało, po uwzględnieniu rzeczywistej pracy silników (awarie, odstawienia planowe z ruchu, odstawienia związane z wykonywaniem planowanych przeglądów pośrednich E-50 (13 dni) i E-60 (21 dni), itp.), że powinny być wykonane w n/w okresie:

- SG 1 (TCG 2032V16 - MN 2208931) – planowany przegląd E-70 - **maj 2020** roku
- SG 4 (TCG 2032V16 - MN 2208930) - planowany przegląd E-70 - **lipiec 2020** roku

Ze względu na przedterminowe rozwiązanie umowy przez realizatora obu inwestycji polegających na zabudowie w/w silników, główne przeglądy (remonty kapitalne) silników SG 1 i SG 4 nie zostały wykonane w planowanych terminach. Powyższa, niejako „wymuszona” sytuacja, wpłynęła na decyzje dotyczącą dalszej eksploatacji jednostek silnikowych z jednoczesnym procedowaniem wykonania głównych przeglądów siłami własnymi po zakupieniu wymaganych w DTR części zamiennych, służących do przeprowadzenia remontów kapitalnych obu silników. Zakup odpowiednich komponentów (głowice, korpus z wałem głównym, etc.) oraz prace przygotowawcze skutkowało wykonaniem remontu E-70 obu silników w n/w terminach:

Rzeczywisty termin rozpoczęcia przeglądu E-70 (remont kapitalny):

- SG 1 (TCG 2032V16 - MN 2208931) – 23.08.2021 po **75 739,00** rbh pracy.
- SG 4 (TCG 2032V16 - MN 2208930) – 22.10.2021 po **75 560,00** rbh pracy.

Jak łatwo zaobserwować przesunięcie (opóźnienie) terminu wykonania głównych przeglądów E-70 w/w silników wyniosło:

- SG 1 (TCG 2032V16 - MN 2208931) – 489 dni.
- SG 4 (TCG 2032V16 - MN 2208930) – 482 dni.

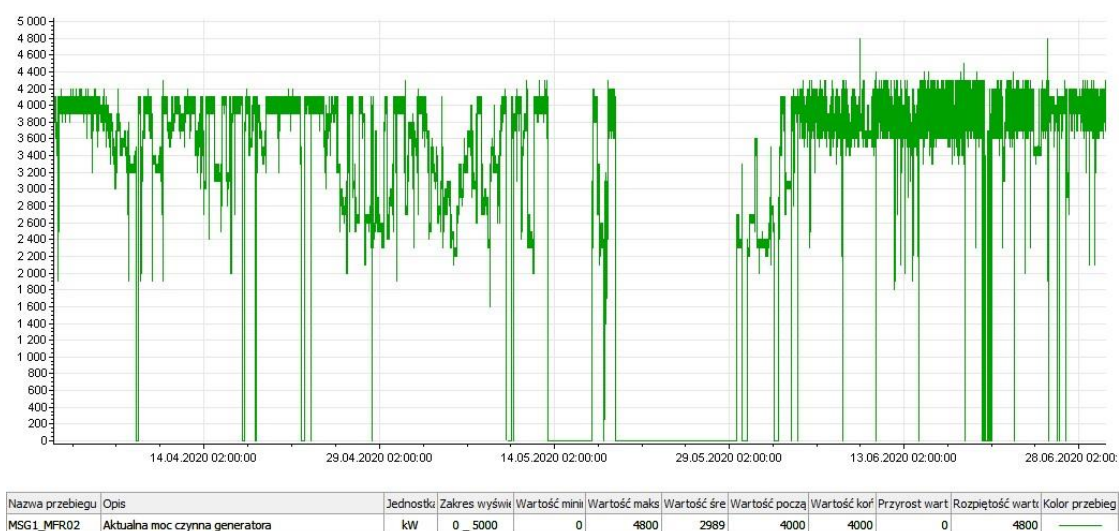
W okresie oczekiwania na wykonanie głównych remontów, silniki były eksploatowane w normalnym reżimie pracy, zapewniając ciągłe przychody przedsiębiorstwu poprzez produkcję energii elektrycznej oraz ciepła.

10.1 Analiza parametrów ruchowych silnika SG1 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.

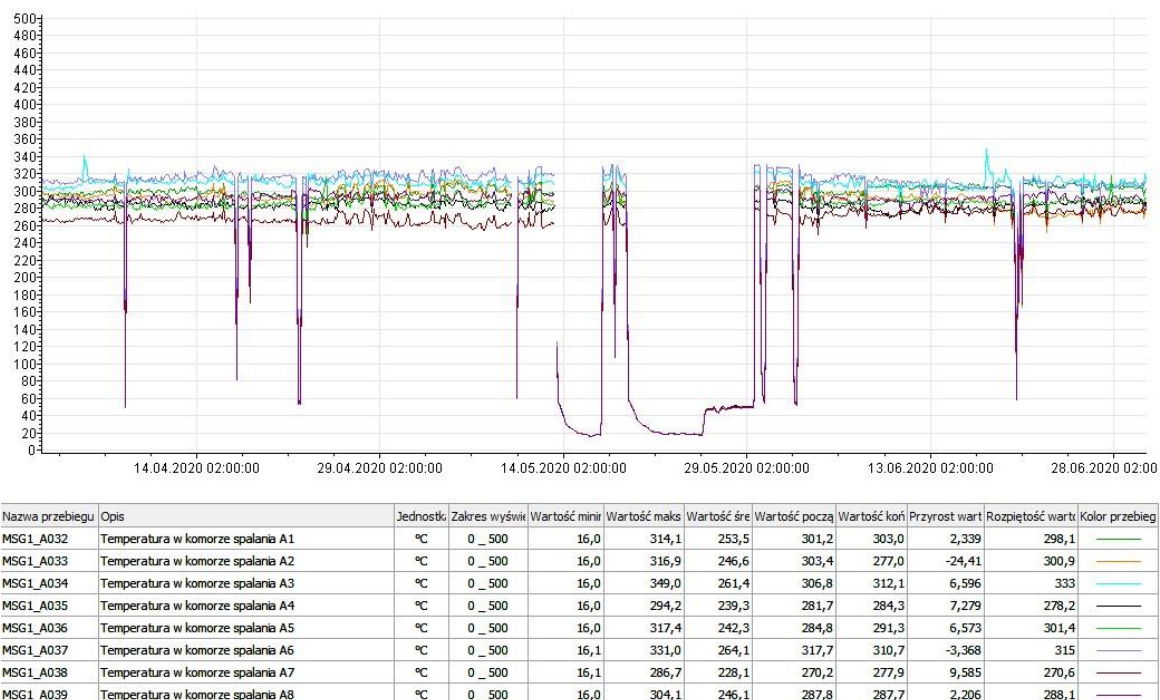
Wykonanie remontu kapitalnego silnika o oznaczeniu technologicznym SG 1 (TCG 2032V16 - MN 2208931):

- planowany termin przeglądu E-70: **maj 2020** roku
- wykonany przegląd E-70: **23.08.2021 – 06.10.2021.**
- przesunięcie czasookresu przeglądu: **489 dni**

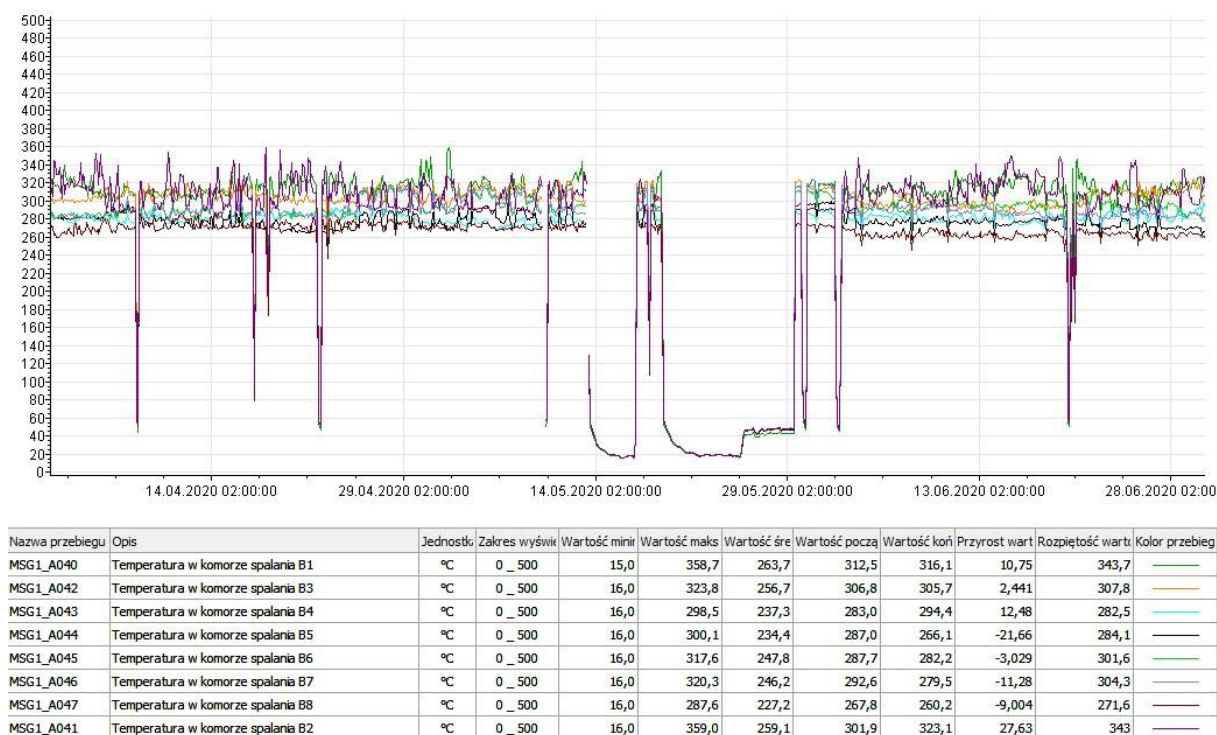
Poniżej zestawiono i przeanalizowano parametry ruchowe silnika SG 1 w okresie od maja 2020 do grudnia 2021, tj. od czasu planowanego wykonania przeglądu / remontu głównego silnika E-70 do okresu po wykonanym remoncie (31.12.2021). Do zebrania danych posłużono się istniejącym systemem wizualizacji, nadzoru i agregacji danych ASIX. Do analizy przyjęto takie dane jak: moc silnika oraz temperatury spalania w poszczególnych cylindrach silnika: A1 ÷ A8 oraz B1 ÷ B8. Dane te najpełniej obrazują procesy zachodzące w komorach cylindrów silników spalinowych, w szczególności obciążenia temperaturowe, jakim poddawane są zawory silników spalinowych. Obciążenia mechaniczne oraz termiczne mają decydujący wpływ na żywotność poszczególnych elementów, dlatego wzajemne powiązanie i interpretacja poszczególnych wykresów zarejestrowanych parametrów prowadzi do ostatecznych wniosków i konkluzji będących tematem niniejszej pracy. Przedstawione poniżej wykresy wykonane są w okresie kwartalnym, w celu zobrazowania jak najdłuższego, przekrojowego czasookresu osiągniętych parametrów pracy silnika. Zakres ten pozwala zwizualizować osiągnięte parametry silnika. Bardzo duża ilość danych analitycznych, rzeczywistych parametrów ruchowych silnika, wymagała zastosowania analizy uśrednionych danych, które swoim poziomem wartości nie odbiegają od danych rzeczywistych przy jednoczesnym zachowaniu dokładności danych wykorzystanych w niniejszej analizie.



Rys. 60 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.



Rys. 61 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.



Rys. 62 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.

Przeanalizowany okres pracy silnika SG 1 (01.04 ÷ 30.06.2020.), który w maju 2020r. miał być poddany pracom związanym z przeglądem głównym E-70, wskazuje na poprawność działania urządzenia przy zachowaniu parametrów związanych z osiąganą mocą elektryczną

oscylującą na poziomie 4,0 MWe (Rys. nr 60). Zarejestrowane temperatury pracy w poszczególnych cylindrach A 1 ÷ 8 (Rys. nr 61) nie odbiegają od wartości średnich, obserwowanych podczas eksploatacji silnika w okresach wcześniejszych. Średnia wartość temperatur mieści się w zakresie 260,00°C ÷ 350,00°C. Jest to normalna temperatura osiągana w cylindrach silników gazowych, których paliwem jest mieszanka gazu z odmetanowania kopalń z powietrzem. Wartość maksymalnej temperatury w cylindrze nie przekroczyła wartości dopuszczalnej czyli 450°C. Wartości uzyskiwanych temperatur w cylindrach B 1 ÷ 8 (Rys. nr 62) także kształtowały się poprawnie, nie odbiegając od parametrów uzyskiwanych w okresach wcześniejszej eksploatacji silnika SG 1 (260,00°C ÷ 350,00°C). Krótkotrwałe postoje w dniach 08.04.2020r. oraz 18.04.2020r. wynikały z czynności serwisowo - konserwacyjnych (przegląd E-40 oraz usunięcie nadmiaru smaru z łożysk generatora). Zaobserwowany postój silnika SG1 w okresie 27.05 ÷ 04.06.2020r. wynikał z awarii układu podgrzewania wstępnego oleju silnika. Po usunięciu awarii silnik uruchomiono i przekazano do eksploatacji.

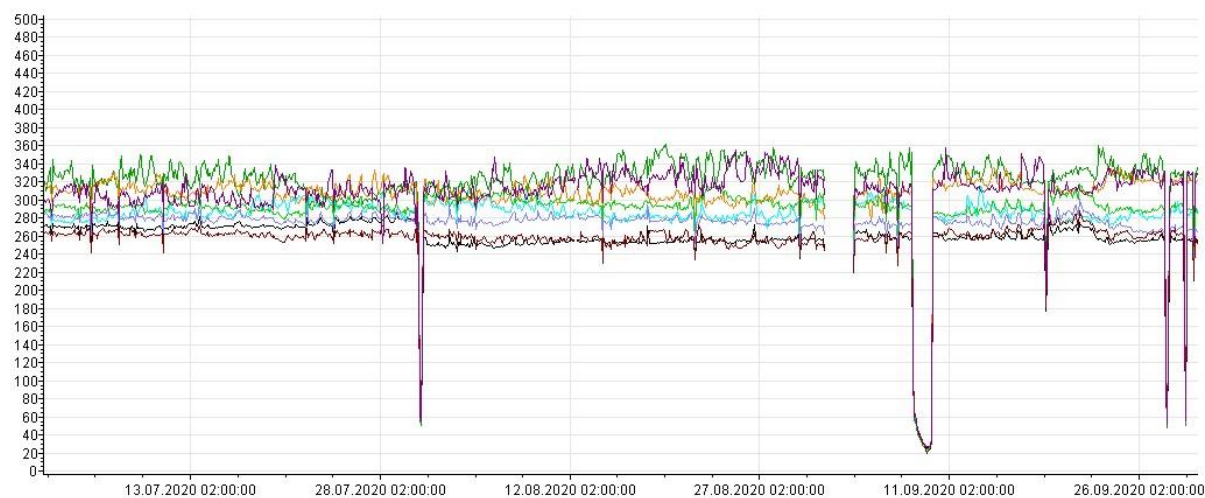


Rys. 63 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020



Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śred	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
MSG1_A032	Temperatura w komorze spalania A1	°C	0 _ 500	26,0	319,6	297,1	302,9	306,4	2,265	293,6	—
MSG1_A033	Temperatura w komorze spalania A2	°C	0 _ 500	26,0	305,8	268,7	278,6	290,6	13,72	279,8	—
MSG1_A034	Temperatura w komorze spalania A3	°C	0 _ 500	27,4	344,2	303,9	308,2	297,8	-8,617	316,9	—
MSG1_A035	Temperatura w komorze spalania A4	°C	0 _ 500	20,5	326,5	288,4	289,3	284,1	-2,925	306,1	—
MSG1_A036	Temperatura w komorze spalania A5	°C	0 _ 500	27,3	319,8	290,4	294,3	296,3	3,561	292,5	—
MSG1_A037	Temperatura w komorze spalania A6	°C	0 _ 500	27,1	333,7	300,9	308,0	308,0	-0,9181	306,6	—
MSG1_A038	Temperatura w komorze spalania A7	°C	0 _ 500	21,2	293,0	269,7	279,6	268,5	-11,68	271,9	—
MSG1_A039	Temperatura w komorze spalania A8	°C	0 _ 500	26,2	292,9	273,3	284,9	283,1	-0,4444	266,7	—

Rys. 64 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020.



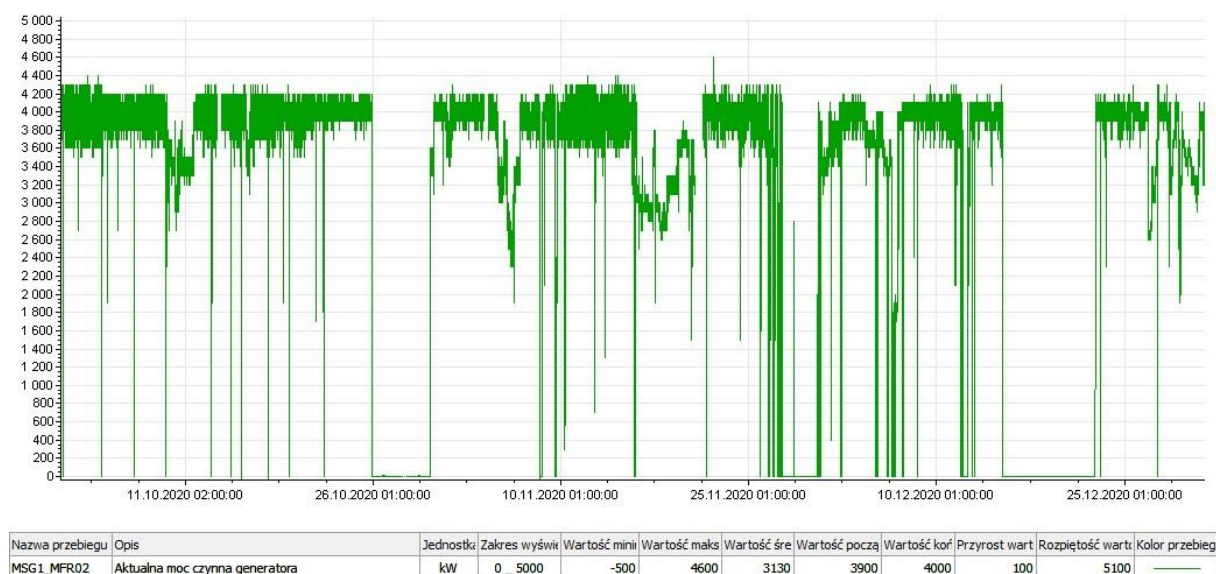
Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śred	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
MSG1_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	24,0	361,3	319,4	316,2	334,9	20,3	337,3	—
MSG1_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	27,0	337,1	303,6	315,6	322,1	9,154	310,1	—
MSG1_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	27,0	314,9	281,6	290,9	287,2	-4,379	287,9	—
MSG1_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	25,3	285,2	256,5	272,1	255,7	-13,2	259,9	—
MSG1_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	19,9	319,4	288,4	288,8	286,1	-1,96	299,6	—
MSG1_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	26,2	301,1	271,8	285,1	265,4	-17,11	274,9	—
MSG1_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	19,5	287,6	255,2	261,1	253,4	-8,157	268,2	—
MSG1_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	26,6	357,6	308,4	300,1	329,1	26,66	331	—

Rys. 65 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020

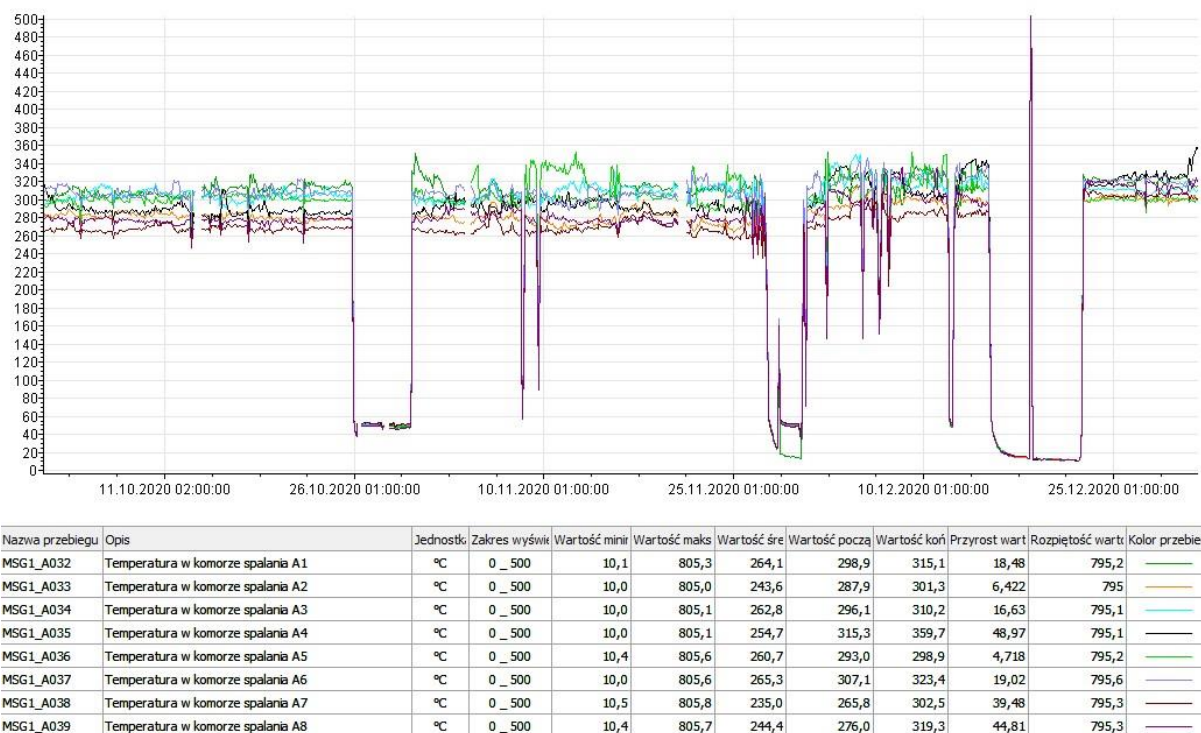
W dalszym, analizowanym okresie pracy silnika od 01.07 ÷ 30.09.2020., nie zaobserwowano rażących anomalii ruchowych związanych z eksploatacją silnika (Rys. nr 63). Zarejestrowane temperatury spalania w cylindrach A 1 ÷ 8 (Rys. nr 64) i B 1 ÷ 8 (Rys. nr 65) kształtowały się w granicach 260,00°C ÷ 350,00°C, tj. w granicach normalnych wartości

eksploatacyjnych. Uwagę zwraca większa amplituda uzyskiwanych wartości temperatur w cylindrach B 1 ÷ 8 niż w głowicach A1 ÷ 8 w analizowanym przedziale czasu.

Po skorelowaniu wykresu Rys nr 65 z rejestrem wykazem usterek / awarii badanego silnika (Tabela nr 9) stwierdzono, że przyczyną zaobserwowanej, zwiększonej rozbieżności była awaria spowodowana przedostawaniem się niewielkich glikolu (czynnik chłodzący cylindry silnika) spod zaworów głowic B2, B4, B5, B6, B8 do komór spalania cylindrów. Usterka nie miała wpływu na osiąganą moc silnika. Zauważono okresowo zwiększoną temperaturę spalania w głowicy B1 dochodzącą krótkotrwale do wartości ok. 360,00°C. Po obserwacji i stabilizacji temperatury w głowicy oraz analizie pozostałych parametrów ruchowych silnika zdecydowano o dalszej eksploatacji urządzenia z uwagi na planowane wymiany głowic, strony B silnika, po ok. 69 500,00 rbh pracy urządzenia.



Rys. 66 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.



Rys. 67 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG I w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020

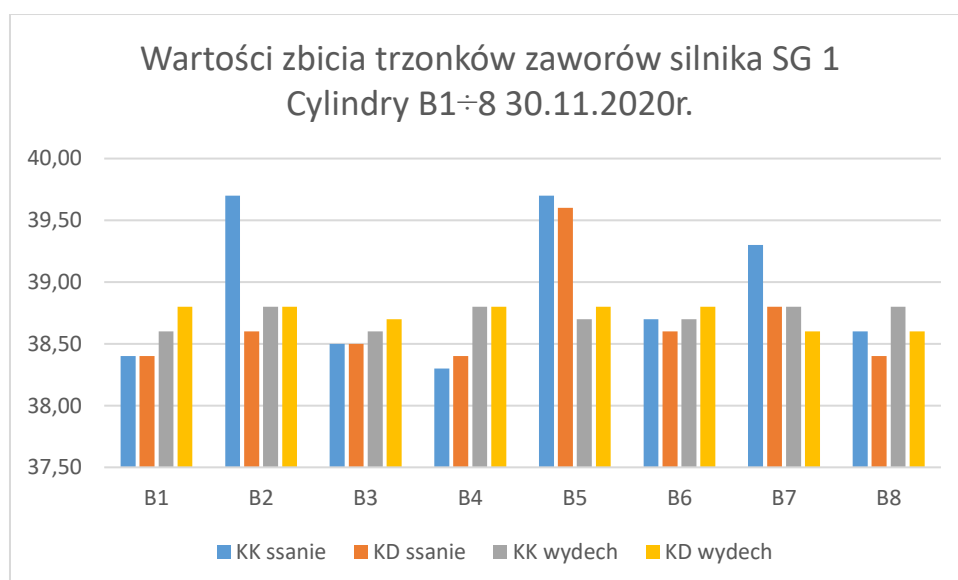


Rys. 68 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG I w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020

Analiza pracy silnika w okresie 01.10 ÷ 31.12.2020r. (Rys. nr 66) nie wykazała anomalii ruchowych związanych z eksploatacją silnika. Temperatury spalania w cylindrach A 1 ÷ 8 (Rys. nr 67) kształtowały się w granicach 260,00°C ÷ 350,00°C, tj. w granicach normalnych wartości eksploatacyjnych. Jednocześnie utrzymywał się trend, zwiększonej amplitudy uzyskiwanych wartości temperatur w cylindrach B 1 ÷ 8 (Rys. nr 68) w analizowanym

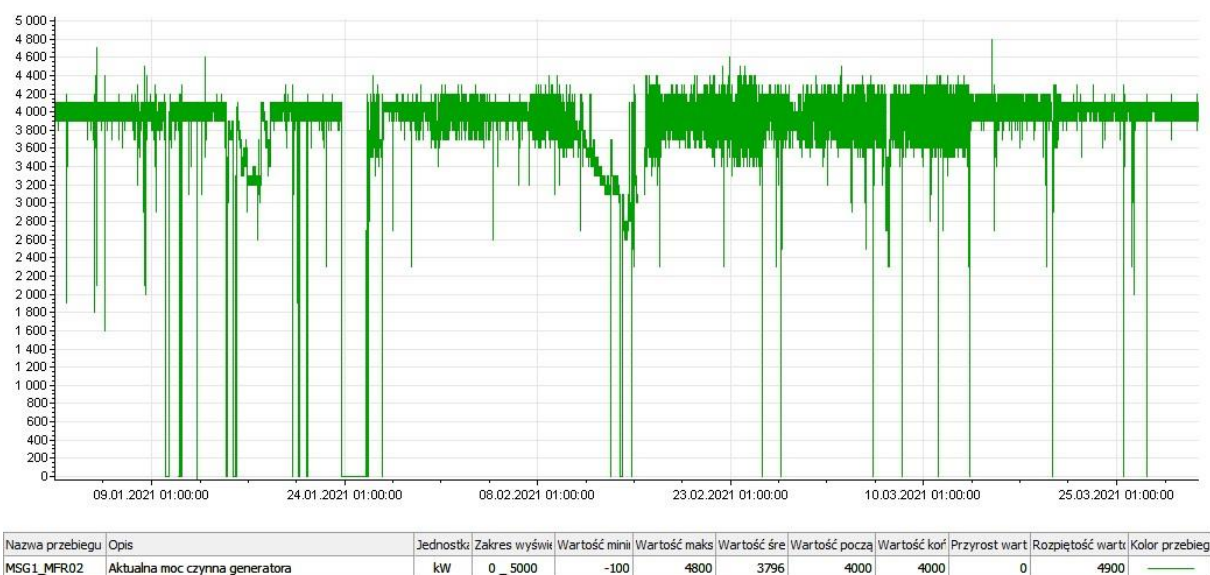
przedziale czasu. Temperatura w głowicach cylindra B1 i B3 dochodziła do wartości $380 \div 400,00^{\circ}\text{C}$, co nie jest wartością krytyczną (dopuszczalna temperatura wynosi $450,00^{\circ}\text{C}$), jednak takie symptomy pracy, wymagały wzmożonej obserwacji i szukania przyczyn wzrostu temperatury, tak aby nie dopuścić do powstania potencjalnego trwałego uszkodzenia elementów cylindra lub tłoka.

W początkowych dniach listopada 2020 (01.11. ÷ 04.11.2020) odstawiono silnik z eksploatacji (decyzja ruchowa). Przy okazji postoju przeprowadzono diagnostykę przyczyn zwiększonej temperatury w cylindrze B1 i B2. Przeprowadzono badanie endoskopowe cylindrów strona B, silnika SG 1. Oględziny nie wykazały niepokojących symptomów mogących świadczyć o uszkodzeniach głowic, zaworów lub cylindrów. Podczas oględzin stwierdzono zabrudzenie przerywaczy płomienia cylindrów A 1 ÷ 8 i B 1 ÷ 8 oraz zabrudzenie chłodnicy mieszanki gazowo-powietrznej. Uruchomiono silnik i przekazano do eksploatacji. W dniu 27.11.2020 nastąpiło wyłączenie silnika. Czynnikiem inicjującym wyłączenie było przekroczenie maksymalnej temperatury w komorze cylindra B2, co uruchomiło zadziałanie systemu zabezpieczeń silnika. W dniu 30.11.2020 wykonano przegląd E-40 oraz dokonano pomiaru zbicia trzonków zaworowych w celu kontroli luzu zaworowego.

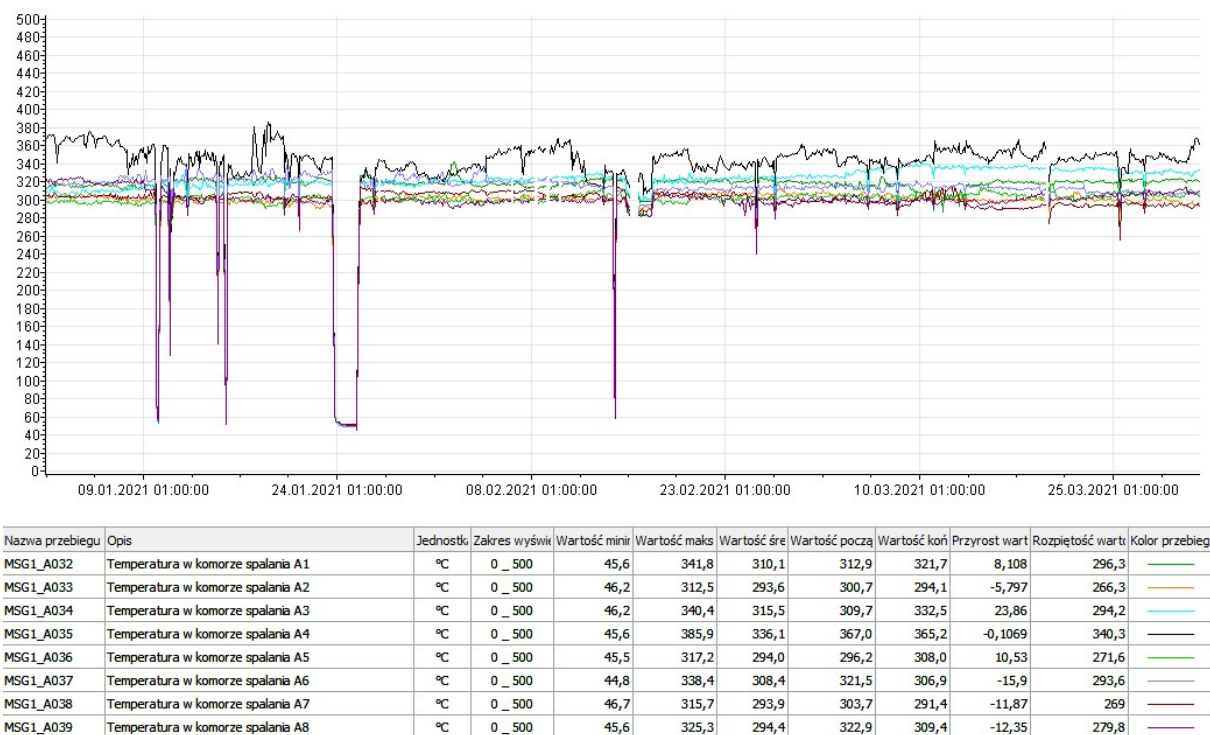


Rys. 69 Wartość zbicia trzonków zaworów silnika SG 1 Cylindry B 1 ÷ 8 30.11.2020r.

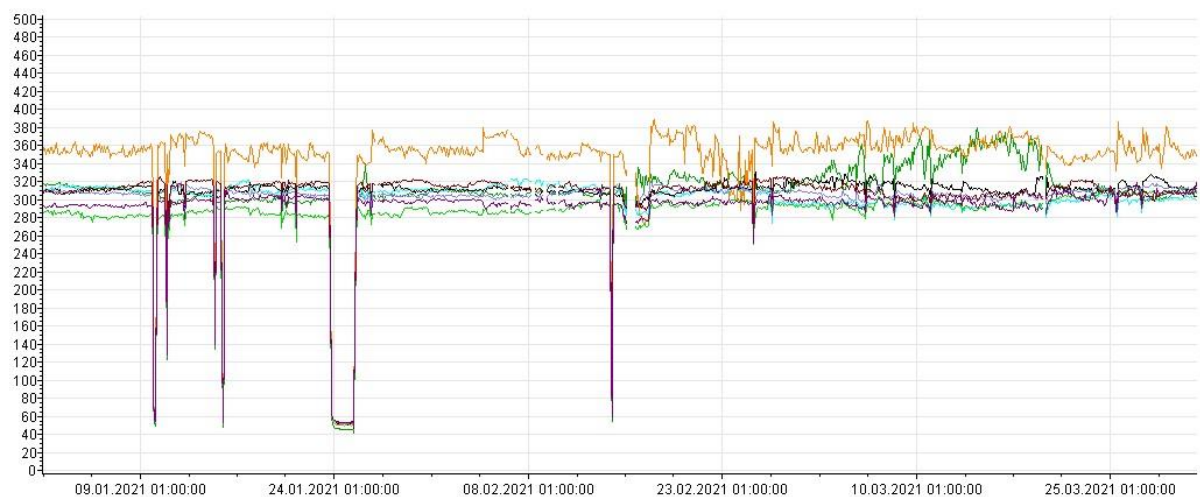
Wykonane pomiary (Rys. nr 69) nie wykazały przekroczenia wartości granicznej zbicia trzonków zaworowych, tj. 41 mm, co świadczyło o zachowaniu wymaganego luzu zaworowego w cylindrach B 1 ÷ 8. Wymieniono głowice cylindrów B1, B2, B3. Silnik uruchomiono w dniu 27.12.2020 i przekazano do eksploatacji. Po uruchomieniu zwrócono uwagę na utrzymującą się podwyższoną temperaturę w cylindrze B2. W pozostałych cylindrach temperatury spadły oraz dało się zaobserwować zmniejszenie amplitudy (rozjazd) temperatur między poszczególnymi cylindrami.



Rys. 70 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021



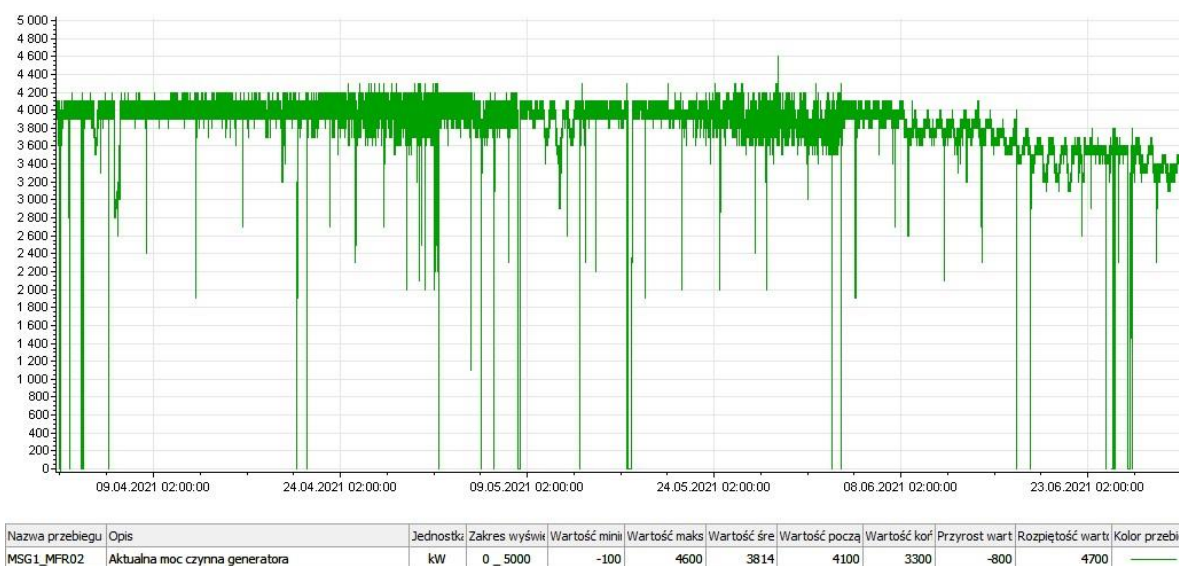
Rys. 71 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021



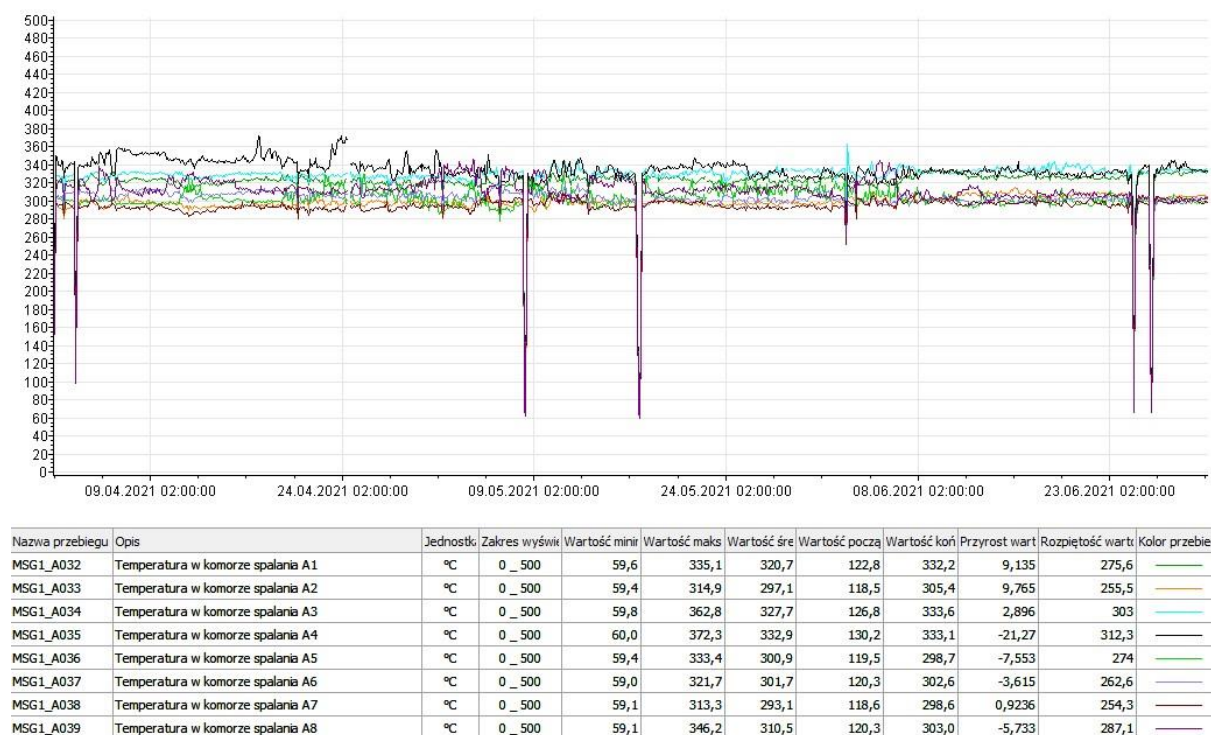
Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śr	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
MSG1_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	41,8	380,2	307,9	317,8	309,4	-7,864	338,4	—
MSG1_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	45,9	388,3	346,5	351,8	345,7	-7,197	342,4	—
MSG1_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	47,1	323,5	297,3	309,5	300,9	-8,171	276,4	—
MSG1_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	47,0	330,1	304,2	310,2	311,7	0,6931	283,2	—
MSG1_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	47,6	314,4	284,1	286,2	306,0	19,66	266,8	—
MSG1_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	47,8	320,2	299,5	310,2	310,4	-0,2736	272,4	—
MSG1_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	48,4	325,4	304,6	310,2	303,2	-5,999	277	—
MSG1_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	47,9	319,5	290,2	290,9	316,6	24,1	271,5	—

Rys. 72 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021

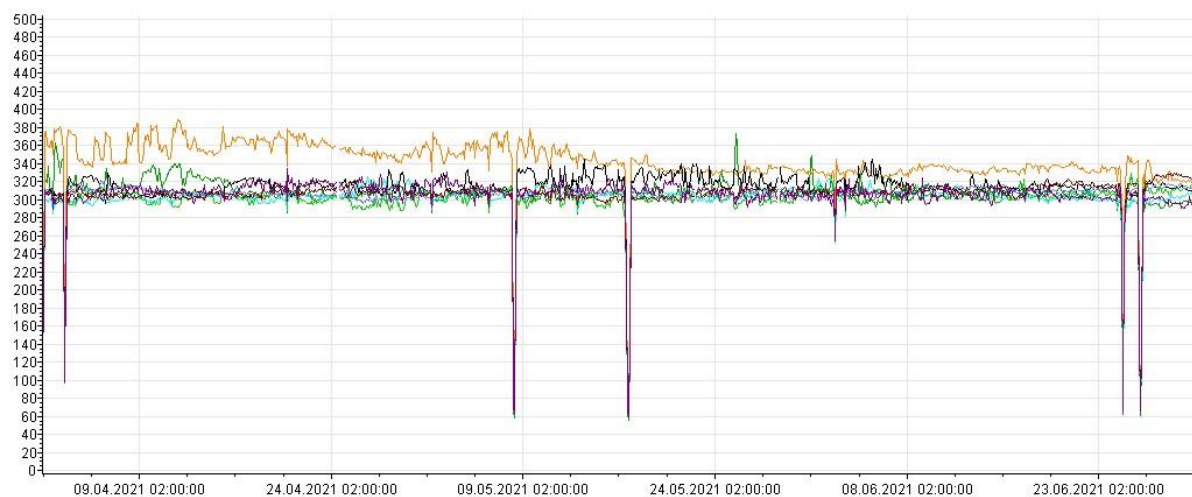
W okresie 01.01 - 31.03.2021r. (Rys. nr 70) nie odnotowano zakłóceń parametrów ruchowych silnika które świadczyły by o pogarszającym się stanie technicznym urządzenia. W okresie 25 - 27.01.2023 wystąpiła awaria związana z rozszczelnieniem rurociągu gazowego, którym jest dostarczane paliwo do silników (gaz z odmetanowania kopalń). Awaria skutkowała odstawieniem silników SG 1 i SG 2 zlokalizowanych w Zakładzie Jastrzębie oddział Moszczenica. W tym samym okresie czasu odnotowano awarię czujnika na ścieżce sterowniczej silnika SG 1, co opóźniło rozruch urządzenia. Po usunięciu nieszczelności rurociągu uruchomiono silniki i przekazano do eksploatacji. Zaobserwowano w stosunku do poprzedniego okresu badawczego (01.10 ÷ 31.12.2020r.) stabilizację parametrów (mniejsza amplituda / różnica temperatur), związanych z temperaturami spalania mieszanki paliwowo – powietrznej w cylindrach B 1 ÷ 8 (Rys. nr 72). Jednocześnie, w dalszym ciągu obserwowano podwyższoną temperaturę w cylindrach A4 (Rys. nr 71) oraz B2 (Rys. nr 72). Osiągane temperatury nie przekraczały wartości dopuszczalnych i nie powodowały zadziałania zabezpieczeń technologicznych silnika.



Rys. 73 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021



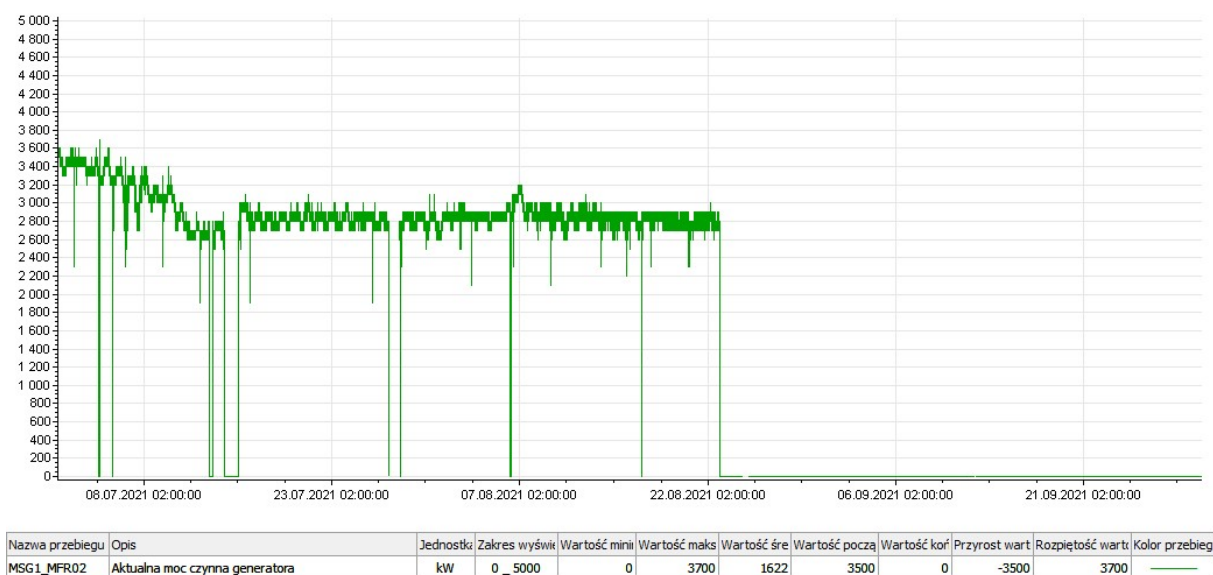
Rys. 74 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021



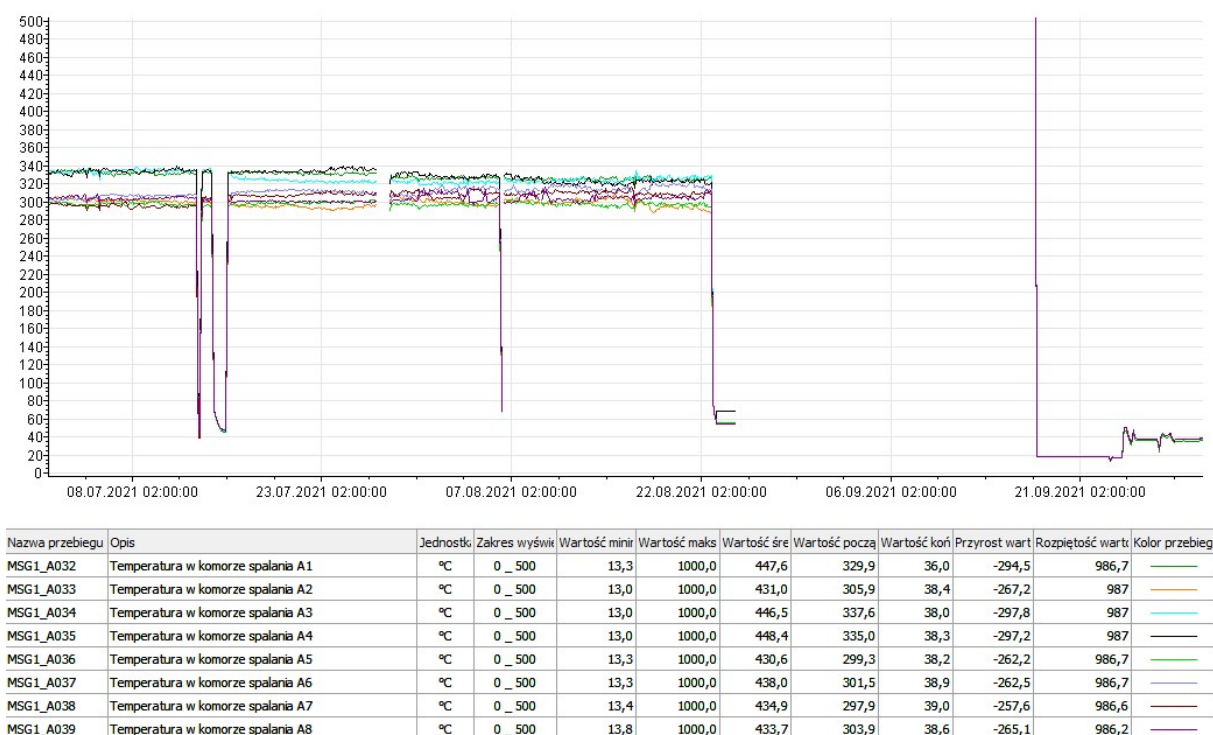
Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śred	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
MSG1_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	55,6	373,9	305,2	118,6	297,7	-9,654	318,4	—
MSG1_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	59,4	388,3	341,7	132,4	317,8	-30,14	328,9	—
MSG1_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	59,8	325,8	302,4	119,7	311,3	7,356	266	—
MSG1_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	60,0	345,6	313,3	122,1	309,3	-2,989	285,6	—
MSG1_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	59,2	330,3	301,4	120,6	319,4	9,342	271,1	—
MSG1_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	59,4	321,2	305,0	121,3	312,3	1,297	261,8	—
MSG1_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	59,4	330,0	306,6	120,1	321,8	12,54	270,5	—
MSG1_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	59,7	334,4	305,4	120,9	289,3	-17,18	274,7	—

Rys. 75 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021

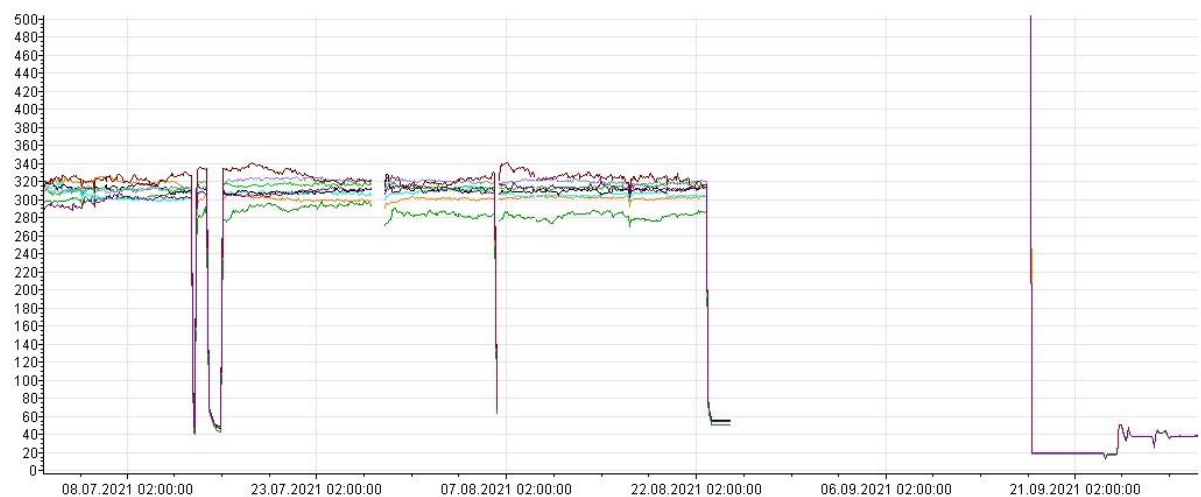
Analiza pracy silnika SG1 w okresie 01.04 - 30.06.2021r. (Rys. nr 73) wykazała odchylenie od normalnej pracy silnika w odniesieniu do poprzednich okresów analitycznych. W badanym okresie dokonano diagnostyki i wymiany czujnika pomiaru temperatury (27.04.2021r.) głowicy A4 (Rys. nr 74). Wymiana skutkowała przywróceniem prawidłowych wskazań w zakresie pomiaru temperatury. Jednocześnie odnotowano stabilizację temperatury w głowicy cylindra B2 (Rys. nr 75) z wartości średnich ok. 380,00°C do wartości rzędu 340,00°C. Od ok. 12.06.2021r. odnotowano spadek osiągniętej mocy silnika pomimo zachowania pozostałych parametrów ruchowych poddawanych analizie na normalnym poziomie eksploatacyjnym. Temperatury w cylindrach pozostawały na niezmiennym poziomie. Przeanalizowano przyczyny, które miały wpływ na spadek mocy silnika w okresie badawczym. Z uwagi na wyciągnięte wnioski końcowe, analiza przyczyn obniżenia mocy silnika stanowi jeden z kluczowych czynników skutkujących wypracowaniem zaleceń remontowo – eksploatacyjnych i zostanie przedstawiona poniżej, w dalszej części niniejszej pracy.



Rys. 76 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021



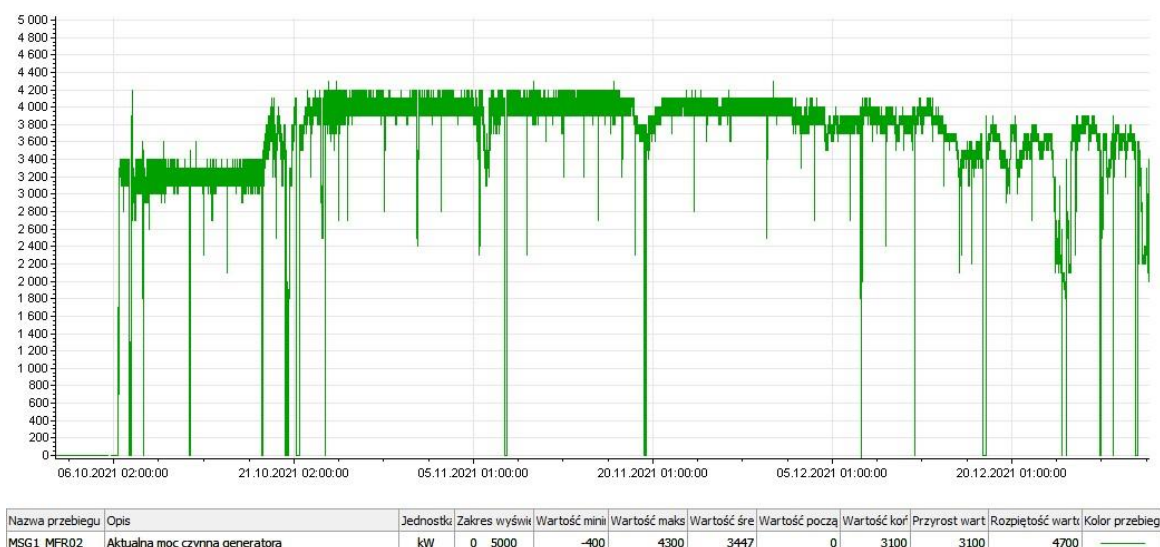
Rys. 77 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021



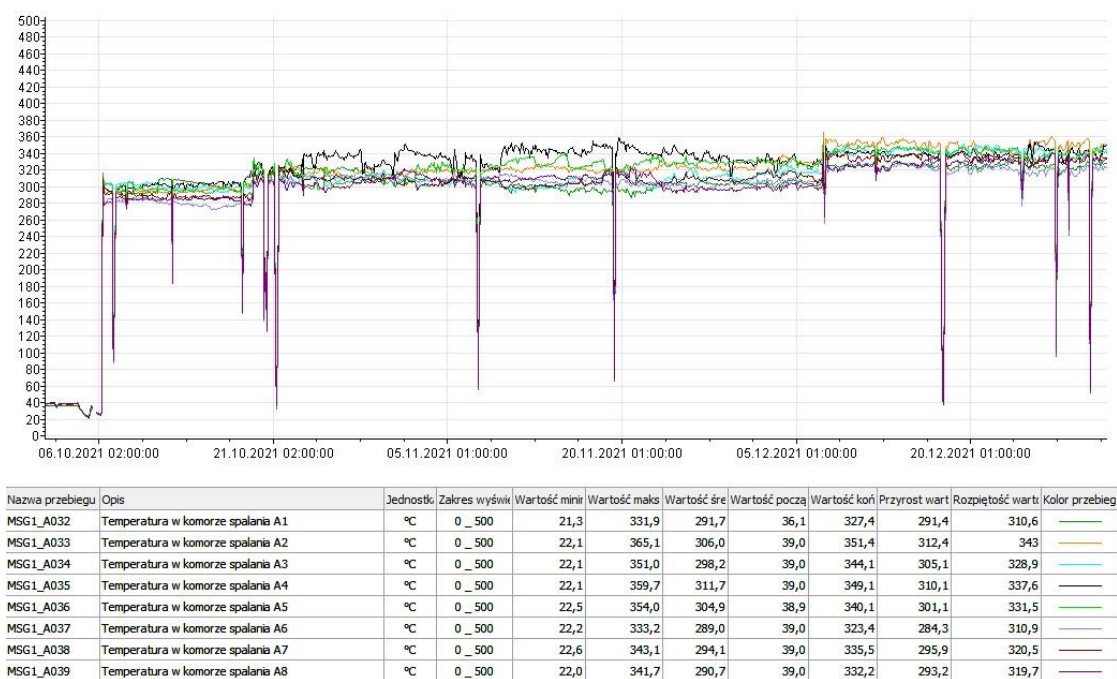
Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śred	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebieg
MSG1_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	13,2	1000,0	425,6	297,4	38,0	-260	986,8	—
MSG1_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	13,0	1000,0	434,9	318,5	38,9	-274,6	987	—
MSG1_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	13,0	1000,0	435,3	320,2	39,0	-283,5	987	—
MSG1_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	13,0	1000,0	437,9	315,0	39,0	-274,1	987	—
MSG1_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	13,1	1000,0	439,6	309,7	39,0	-270,8	986,9	—
MSG1_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	13,3	1000,0	441,9	308,1	39,0	-271,1	986,7	—
MSG1_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	13,4	1000,0	445,6	319,3	39,0	-281,5	986,6	—
MSG1_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	13,4	1000,0	436,4	291,6	39,1	-256,3	986,6	—

Rys. 78 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021

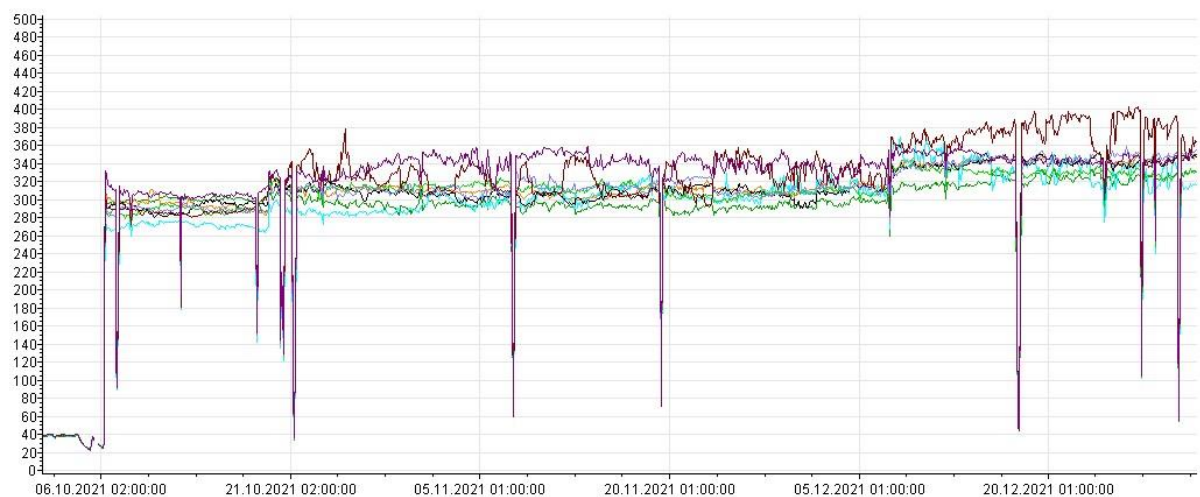
Z uwagi na odstawienie silnika z ruchu, w dniu 23.08.2021r., analiza pracy silnika SG1 obejmuje okres pracy urządzenia 01.07 ÷ 23.08.2021r. (Rys. nr 76). W celach porównawczych, zakres wykresu pozostał niezmienny, tj. obejmuje jeden kwartał. Analiza pracy wykazała dalszy spadek mocy silnika do wartości średniej 2,8 MW. W dniu 23.08.2023 odstawiono silnik z ruchu i rozpoczęto przegląd główny E-70. W tym momencie przesunięcie między terminem planowym, a rzeczywistym terminem wykonania przeglądu głównego wyniosło 489 dni, tj. ponad 16 miesięcy. W analizowanym okresie zaobserwowano stabilizację parametrów temperaturowych w cylindrach A1 ÷ 8 (Rys. nr 77) i B1 ÷ 8 (Rys. nr 78). Osiągane wartości temperatur w cylindrach strona A i B, oscylują w zakresie 280,00°C ÷ 340,00°C.



Rys. 79 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021



Rys. 80 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021



Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl	Wartość min	Wartość maks	Wartość śred	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
MSG1_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	22,0	334,5	284,9	38,1	332,4	294,1	312,5	—
MSG1_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	22,4	352,6	298,4	39,0	347,8	308,8	330,2	—
MSG1_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	22,5	368,9	288,3	39,0	315,9	276,8	346,4	—
MSG1_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	22,6	352,3	295,9	39,0	346,0	306,9	329,6	—
MSG1_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	23,0	340,2	294,9	39,0	330,1	291	317,3	—
MSG1_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	22,5	359,1	298,8	39,2	354,0	314,1	336,6	—
MSG1_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	22,5	403,5	313,5	39,2	364,4	324,5	380,9	—
MSG1_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	22,4	361,2	316,1	39,6	348,5	308,5	338,8	—

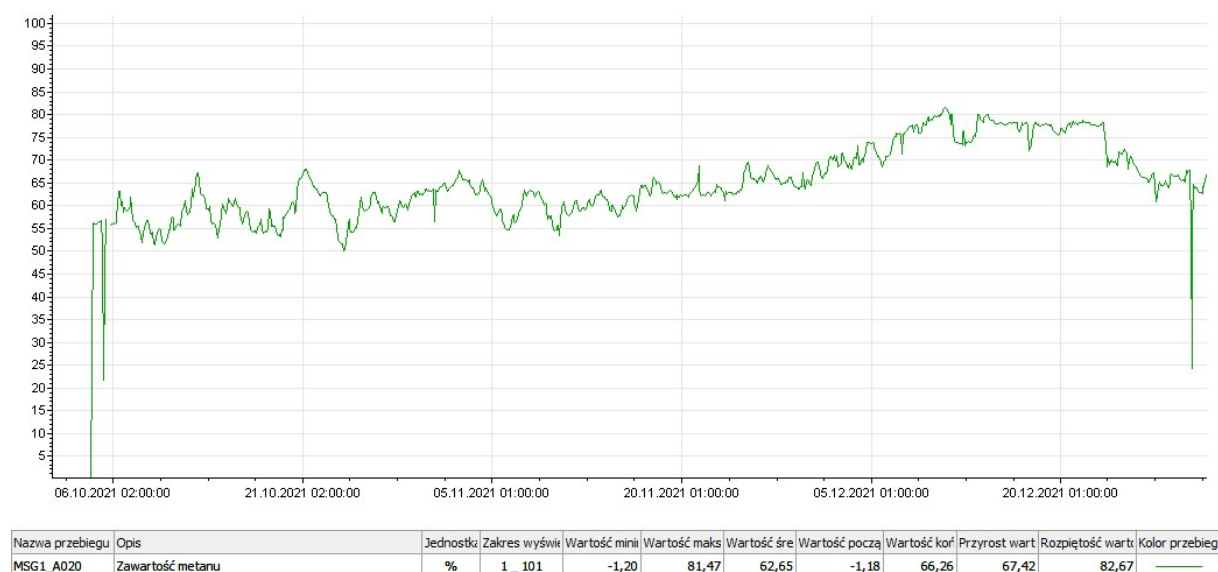
Rys. 81 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG I w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021

Po wykonanym przeglądzie głównym E-70, który zakończył się w dniu 06.10.2021 silnik został uruchomiony i przekazany do eksploatacji. Przegląd E-70 charakteryzuje się największym zakresem technicznym prac. Wymieniane są wszystkie, główne podzespoły silnika, takie jak: wał korbowy, tłoki, korbowody, łożyska główne, kompensatory, etc. Remont główny przeprowadzany jest w ten sposób, że zamawiany i montowany jest kompletny nowy blok silnika, tzw. „Short block” uzbrojony w tłoki, korbowody, etc., który jest montowany w miejsce „zużytego / wyeksploatowanego” bloku. Poniższy rysunek (Rys. nr 82) obrazuje główną idę remontu / przeglądu E-70.



Rys. 82 Remont E-70 montaż nowego „short blocku”.

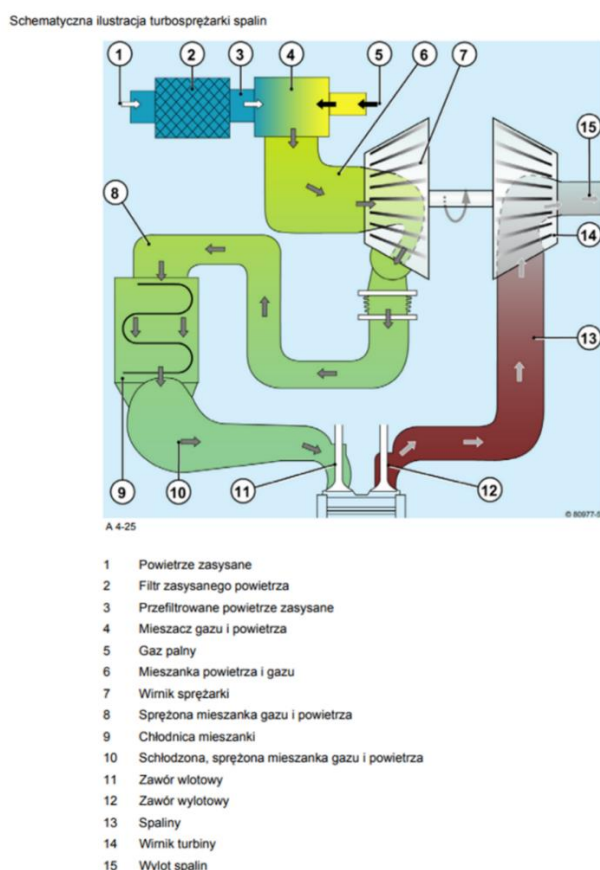
Na uwagę zasługuje fakt, że początkowe, osiągnięte parametry silnika SG1 odbiegały od parametrów nominalnych w zakresie osiągniętej mocy generatora (Rys. nr 79) jak i w zakresie temperatur spalania mieszanki paliwowo-powietrznej w cylindrach silnika strona A (Rys. nr 80) oraz strona B (Rys. nr 81) silnika SG 1. Przyczyn takiego zachowania możemy dopatrywać się w dość dużych wahaniami, związanych z koncentracją metanu w gazie z odmetanowania kopalń JSW S.A. w okresie od 06.10.2021 ÷ 25/26.10.2021r. (Rys. nr 83). Dodatkowym aspektem jest także sprawdzenie ruchowe wszystkich podzespołów, które podlegały wymianie w czasie remontu. Obciążanie silnika do mocy znamionowej i doregulowanie odbywa się w sposób kontrolowany, tak aby rejestrować wszelkie zauważone nieprawidłowości w tej fazie eksploatacji silnika. Takie podejście, wypracowane na bazie wieloletnich doświadczeń eksploatacyjnych, pozwala na szybką reakcję obsługi w przypadku zaobserwowania jakichkolwiek anomalii parametrów ruchowych silnika. Oczywiście można stwierdzić, że nad całością pracy silnika czuwa system pomiarów i sterowania, jednak nie należy zapominać, że silnik jest zbiorem złożonych instalacji, które są demontowane i powtórnie montowane / wymieniane w czasie przeglądu. Zachowanie poprawności i staranności montażu jest niezbędnym elementem do bezproblemowego uruchomienia i eksploatacji silnika, jednak należy wziąć pod uwagę mogące zdarzyć się błędy montażowe lub ukryte usterki w dostarczonych podzespołach. Czynniki te przy mogą doprowadzić do nieodwracalnych uszkodzeń, które mogą skutkować opóźnieniem w przekazaniu silnika do eksploatacji lub w najbardziej niekorzystnym przypadku, całkowitym unieruchomieniem jednostki produkcyjnej.



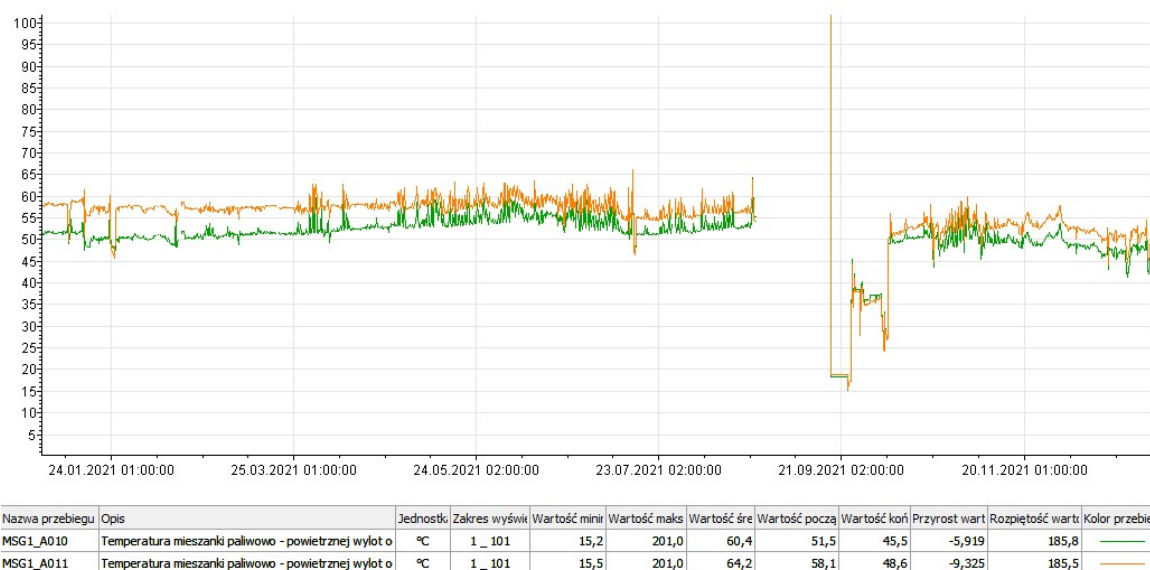
Rys. 83 Wykres zawartość metanu w gazie dostarczonym z kopalń JSW S.A. do silnika SG 1

Jak wspomiano wcześniej, analiza pracy silnika SG1 w okresie 01.04 - 30.06.2021r. wykazała odchylenie (spadek mocy silnika) od normalnej pracy silnika, w odniesieniu do poprzednich parametrów obserwowanych we wcześniejszych okresach analitycznych. W badanych okresach: czerwiec / lipiec 2021, odnotowano spadek mocy z wartości średniej 4,0 MWe do wartości średniej 3,5 MWe (Rys. nr 74). W następnym okresie badawczym zaobserwowano dalszy spadek mocy silnika do wartości średniej 2,8 MWe w okresie: lipca / sierpnia 2021 (Rys. nr 77). Wytypowano i przeanalizowano obszary, które mogły mieć wpływ na obniżenie mocy silnika, przy uwzględnieniu ponad rocznego przesunięcia głównego przeglądu E-70. Jednym z obszarów, parametrów jest temperatura mieszanki paliwowo – powietrznej silnika SG1. Mieszanka paliwowo – powietrzna po przejściu przez mieszacz gazu i turbinę turbosprężarki, schładzana jest w chłodnicy mieszanki oznaczonej na (Rys. nr 85 poz. 9). Zabrudzenie chłodnicy powoduje gorszą wymianę ciepła, a co za tym idzie mieszanka paliwowo – powietrzna nie osiąga pożądanej temperatury schłodzenia, co powoduje obniżenie mocy silnika, w związku z mniejszą ilością dostarczonego powietrza do poszczególnych cylindrów.

Poniżej na Rys. nr 84, zaprezentowano ogólny schemat działania turbosprężarki, w której czynnikiem napędowym są gazy wylotowe z silnika.



Rys. 84 Schematyczna ilustracja działania turbosprężarki



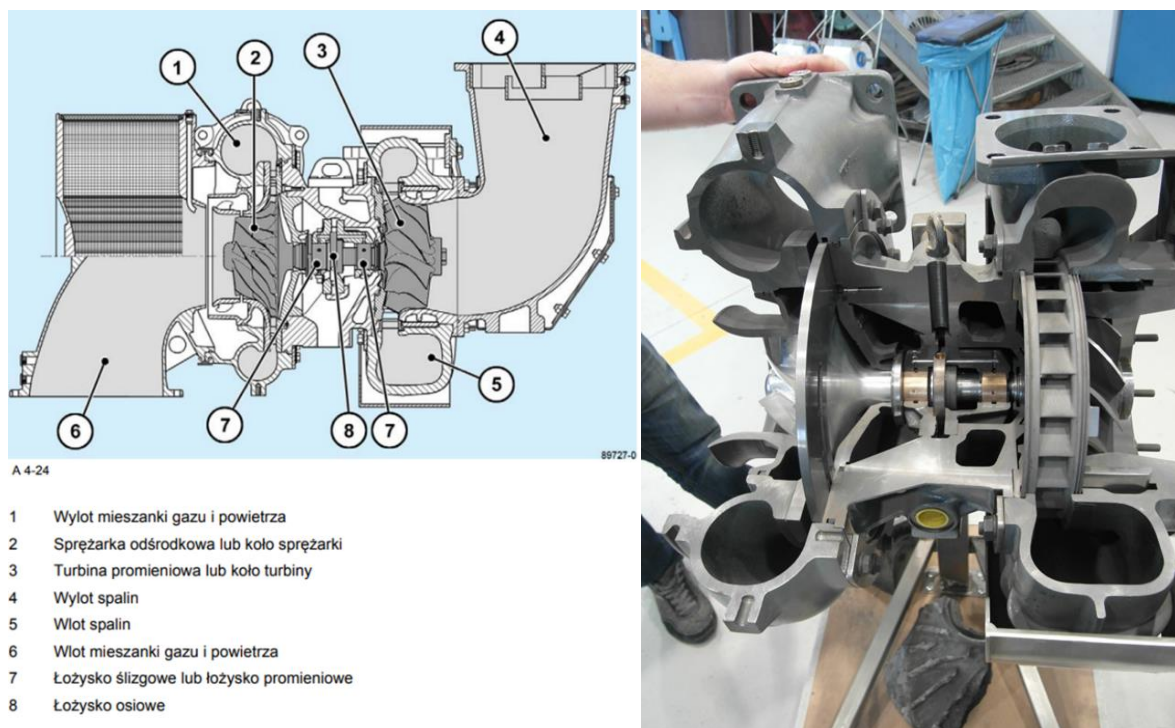
Rys. 85 Wykres temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021

Zaobserwowany wzrost temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej o ok. 5°C (Rys. nr 85) strona A i B silnika, odpowiada za spadek mocy silnika. Z uwagi na zbliżający się termin wykonania planowanego przeglądu E-70, w czasie którego zostają wymienione chłodnice mieszanki paliwowo-powietrznej, zaniechano odstawienia silnika z ruchu do wykonania czyszczenia chłodnic mieszanki. W praktyce można zaryzykować stwierdzenie, że takie podejście jest niejako wyrażeniem zgody przez Eksploatującego na produkcję mniejszego wolumenu energii elektrycznej przez okres ok. 2 miesięcy. Wbrew pozorom, z punktu widzenia ekonomii, przy wysokich cenach energii elektrycznej na Towarowej Giełdzie Energi (TGE) decyzja nie jest bezpodstawna i pozbawiona sensu. Należy zaznaczyć, że czyszczenie chłodnic mieszanki jest procesem czasochłonnym (kilkudniowym), wymagającym demontażu dwóch chłodnic (strona prawa i strona lewa) i zastosowania chemicznych lub mechanicznych metod czyszczenia. Niejednokrotnie czyszczenie mechaniczne, bardziej inwazyjne od czyszczenia chemicznego, powoduje uszkodzenie orurowania chłodnicy, co skutkuje koniecznością naprawy lub najczęściej zaślepieniem uszkodzonej rurki. Uszkodzenie chłodnicy / chłodnic, wiąże się z odstawieniem silnika z ruchu, co automatycznie wyklucza produkcję energii elektrycznej i ciepła. Tak więc widzimy, że kwestia opłacalności ekonomicznej sprzedaży energii elektrycznej i uzyskania przychodów dla spółki z tytułu sprzedaży energii elektrycznej, mimo obniżonego wolumenu produkcji jest w tym przypadku kluczowa. Należy także uwzględnić eliminację ryzyka, związanego z możliwością uszkodzenia chłodnicy, a tym samym całkowitą utratą jakichkolwiek przychodów z tytułu braku produkcji energii elektrycznej i ciepła.



Rys. 86 Wykres ciśnienia mieszanki paliwo-powietrze oraz ciśnienia doładowania silnika SG 1

Kolejną zaobserwowaną i przeanalizowaną kwestią jest parametr ciśnienia doładowania mieszanki paliwowo-powietrznej silnika SG 1. Spadek ciśnienia doładowania, a tym ciśnienia mieszanki paliwowo-powietrznej świadczy o nieprawidłowej pracy turbosprężarek silnika SG1. Należy zaznaczyć, że zespół turbosprężarek składa się z dwóch jednostek, które dostarczają mieszankę paliwowo-powietrzną do cylindrów silnika (jedna turbosprężarka na stronie A silnika, druga na stronie B silnika). Na Rys. nr 86, obserwujemy powolny spadek ciśnienia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz ciśnienia doładowania od ok. 12.06.2021r., co pokrywa się z faktem redukcji mocy przez silnik SG 1 oraz wzrostem temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej z uwagi na zanieczyszczone chłodnice mieszanki paliwowo-powietrznej dostarczanej do silnika. Wartość ciśnienia przy normalnej pracy turbosprężarek wynoszą ok. 3,8 - 4,0 bar. W analizowanym przypadku widzimy spadek ciśnienia do wartości ok. 2,7 – 3,0 bar, co świadczy o znaczącej redukcji ciśnienia zasilania cylindrów silnika paliwem. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest, analogicznie jak w przypadku chłodnic mieszanki paliwowo-powietrznej, zaniechanie przeglądu turbosprężarek z uwagi na zbliżający się termin przeglądu E-70. Turbosprężarki silników (Rys. nr 88) pracują z obrotami rzędu 30 tys. obr./min. Są to urządzenia niezwykle precyzyjne, wymagające okresowych przeglądów łożysk, korpusów, wirników. Pomimo stosowania filtrów powietrza, które jest zasysane do turbosprężarki i łączone z gazem w mieszance gazu, drobne frakcje pyłu działają erozyjnie na elementy turbosprężarki. Wszelkiego rodzaju zabrudzenia znajdujące się czy to w powietrzu czy też w gazie z odmetanowania kopalń, działają destrukcyjnie na elementy szybkoobrotowe turbosprężarki (Rys. nr 87). W silnikach, które są zainstalowane w spółce, stosowane są turbosprężarki produkcji ABB typu A140-H. Przegląd / remont turbosprężarek wykonywany jest okresowo, co 30,00 tys. roboczogodzin pracy.



Rys. 87 Turbosprężarka silnika typ TCG i CG

Poniżej na Rys. nr 88, widzimy zanieczyszczenia wewnątrz turbosprężarki silnika SG 1 powodujące spadek ciśnienia doładowania mieszanki paliwowo-powietrznej. Zanieczyszczenia oprócz działania erozyjnego, związanego z wycieraniem się elementów szybkoobrotowych, powodują niedowagę poprzez osadzanie się na elementach obrotowych, co z kolei prowadzi do nadmiernego zużycia łożyskowania turbosprężarki. W ekstremalnym przypadku możemy poprzez brak kontroli i nadzoru doprowadzić do trwałego uszkodzenia elementów turbosprężarki, a co za tym idzie doprowadzić do długotrwałego odstawienia jednostki produkcyjnej z ruchu. Koszt naprawy turbosprężarki silników typ TCG lub CG liczony jest w setkach tysięcy złotych. W sporadycznych sytuacjach koszt naprawy jest nieopłacalny w stosunku do zakupu i montażu nowych turbosprężarek, dedykowanych do danego typu silnika.



Rys. 88 Elementy szybkoobrotowe turbosprężarka SG1 silnik TCG (widoczne zanieczyszczenia)

10.2 Wykaz usterek / awarii SG 1 TCG 2032V16 MN 2208931 Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.

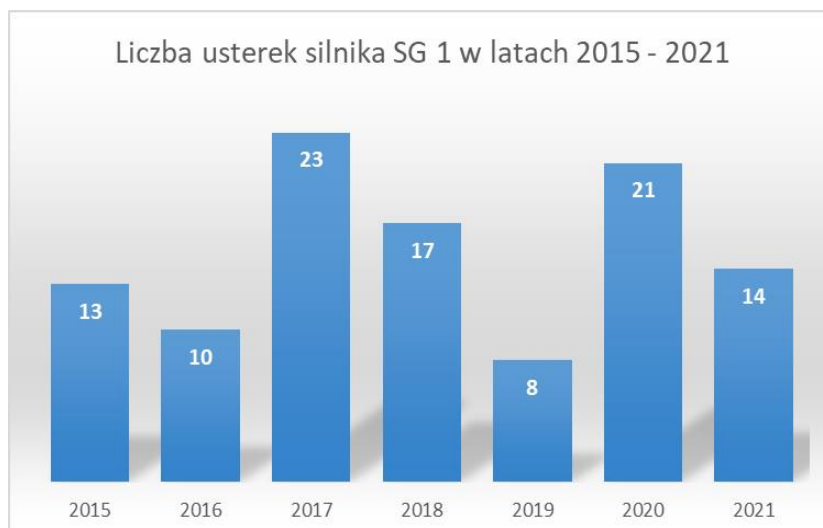
Tabela nr 9 Rejestr awarii silnika SG 1 w okresie 2020 roku

Lp.	Data	Lokalizacja	Silnik	dotyczy
1	06.02.2020	Moszczenica	S-1	Regulacja zaworu przełączającego (obniżono temperaturę spalin)
2	08.04.2020	Moszczenica	S-1	Przegląd E-40 + wymiana 6 sprężyn zaworowych
3	18.04.2020	Moszczenica	S-1	Czyszczenie kanałów nadmiaru smaru generatora S-1
4	22.04.2020	Moszczenica	S-1	Awaria rozrusznika - wymiana elektrozaworu w pilocie rozrusznika
5	27.05.2020	Moszczenica	S-1	Diagnostyka i naprawa układu podgrzewania wstępnego oleju silnika TCG nr 1 , wymiana filtra wstępnego
6	20.06.2020	Moszczenica	S-1	Awaria -usuwanie awarii zabezpieczenia silnika urządzenia obrotowego
7	24.07.2020	Moszczenica	S-1	Usunięcie awarii układu spalinowego komina silnika - rozszczelnienia kłapa eksplozyjna komina w rejonie dachu
8	31.07.2020	Moszczenica	S-1	Przegląd silnika - 67123 h - wymiana sprężyny na głowicy A4 (wymian filtrów gazowych)
9	02.09.2020	Moszczenica	S-1	Awaria – usterka systemu - brak odczytów i komunikacji generatora (wymiana na nowy)
10	08.09.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - wycieki glikolu spod gniazd zaworowych B2,B4,B5,B6,B8
11	28.09.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - przedmuch na kompensatorze mieszanki paliwowej (wymiana uszczelki) oraz wymiana głowicy A-3 (glikol na tłoku)
12	28.09.2020	Moszczenica	S-1	Kontrola kłapy przepustnicy (zaczyna się przy stanie 65% położenia) - stwierdzono opory na łożyskach kłapy
13	29.09.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - usterka siłownika kłapy przepustnicy (wymiana na nowy siłownik)
14	08.11.2020	Moszczenica	S-1	Problem z rozrusznikiem - po diagnostyce i wymianie czujnika obrotów silnik uruchomiono
15	09.11.2020	Moszczenica	S-1	Awaria rozrusznika - wymiana elektrozaworu w pilocie rozrusznika
16	20.11.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - falowanie temperatur układu chłodzenia silnia - usterkę usunięto
17	27.11.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - wybicia z powodu temp. komór spalania. Diagnostyka (stwierdzono płyn chłodniczy w komorach spalania B1,B2,B3)
18	28.11.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - wymiana głowic B1,B2,B3 (69765h)
19	30.11.2020	Moszczenica	S-1	Przegląd E-40 - regulacja , pomiary zbić trzonków zaworowych.

20	15.12.2020	Moszczenica	S-1	Awaria - brak mocy - zdemontowano turbiny do remontu , czyszczenie przerywaczy płomienia pod głowicami , czyszczenie chłodnic mieszanki , wymiana wszystkich filtrów oleju, gazu i powietrza (8 dni)
21	22.12.2020	Moszczenica	S-1	Uruchomienie po naprawie silnika

Tabela nr 10 Rejestr awarii silnika SG 1 w okresie 2021 roku

Lp.	Data	Lokalizacja	Silnik	dotyczy
1	10.01.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - czujnik ciśnienia skrzyni korbowej
2	14.01.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - ciśnienie skrzyni korbowej - 32 mbar - wymiana regulatora ciśnienia na używany
3	25.01.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - nieszczelny rurociąg gazowy przymusowy postój silników - podczas uruchomienia silnika nr 1 awaria ścieżki sterowniczej.
4	17.02.2021	Moszczenica	S-1	Dokręcono klapę eksplozyjną na kominie spalinowym silnika (poluzowane śruby)
5	17.05.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - blokada klapy przepustnicy (błąd kalibracji) po uruchomieniu zacięcie zaworu upustowego (70% pozycja) PR.
6	26.06.2021	Moszczenica	S-1	Przegląd E-40 (74462h) - (wymiana filtrów powietrza i gazowych , czyszczenie filtrów generatora) stwierdzono wycieki glikolu w głowicach A6,7 i B 1,2)
7	23.08.2021	Moszczenica	S1	Przegląd E-70 - ROZPOCZĘCIE 75739 rbg
8	06.10.2021	Moszczenica	S-1	Zakończenie przeglądu E-70 - Uruchomienie silnika
9	18.10.2021	Moszczenica	S-1	Usunięcie nieszczelności na wylocie z turbo mieszanki do chłodnicy (naprawa gwintu na kolanie)
10	20.10.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - utrata mocy do 45% - regulacja i optymalizacja silnika (osiągnięto 80%)
11	21.10.2021	Moszczenica	S-1	Przegląd E-10 po przeglądzie kapitalnym
12	23.10.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - zablokowany zawór trójdrogowy układu chłodzenia awaryjnego NK - po interwencji i regulacji krańcówek działa
13	25.10.2021	Moszczenica	S-1	Problem z dociążeniem do pełnej mocy silnika - diagnostyka i regulacja
14	17.12.2021	Moszczenica	S-1	Awaria - uszkodzony napęd klapy przepustnicy (wymieniono na używany z S-1 TBG z PNI STG 30)



Rys. 89 Wykres liczby usterek silnika SG 1 w latach 2015 – 2021

10.3 Podsumowanie analizy parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208931) Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica.

Analiza wykresów osiąganych parametrów ruchowych silnika SG 1 w okresie od planowanego przeglądu (maj 2020) do rzeczywistego wykonania przeglądu (23.08 – 06.10.2021) wskazuje na jego zadawalającą pracę w badanym i analizowanym okresie czasu. Zaobserwowana liczba usterek czy też problemów ruchowych prowadzących do włączeń lub obniżenia mocy silnika utrzymywała się na niskim poziomie w stosunku do zarchiwizowanych usterek z lat poprzednich 2015 – 2020 (Rys. nr 89). Ograniczenie mocy silnika SG1, wynikało ze wzrostu temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej na skutek zanieczyszczenia chłodnicy mieszanki strona A i B silnika oraz nieprawidłowej pracy turbosprężarek strona A i B silnika (zanieczyszczenia). Wystąpienie tych dwóch czynników oraz podjęcie decyzji ruchowych, związanych z zaniechaniem, wykonania przeglądów / czyszczeń chłodnicy mieszanki paliwowo-powietrznej oraz turbosprężarek z uwagi na planowany przegląd E-70, spowodowały ograniczenie produkowanej mocy silnika.

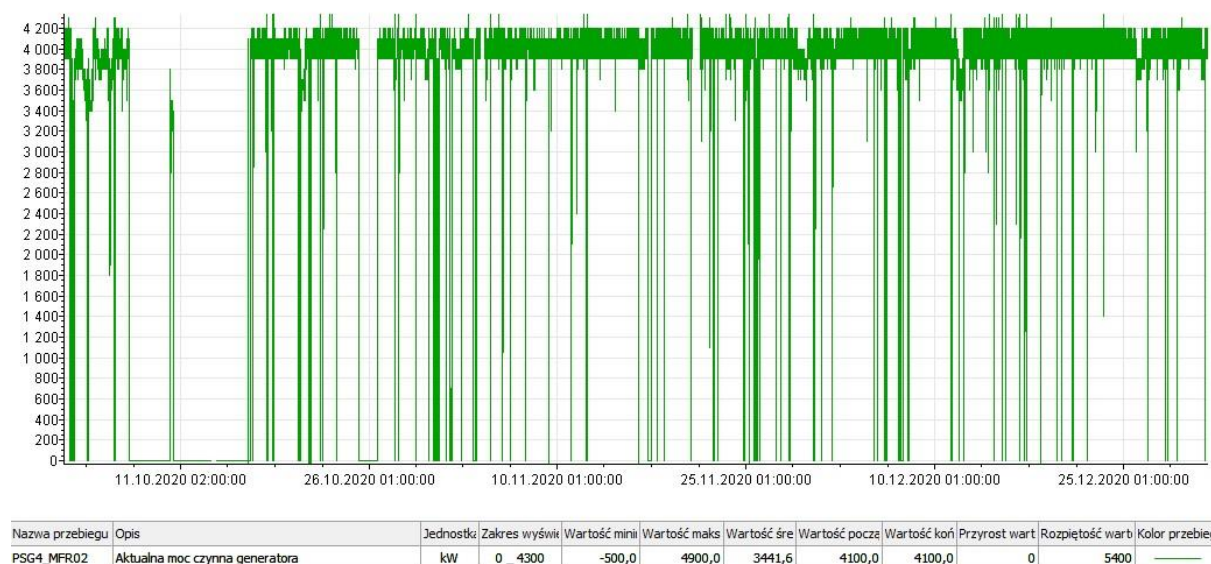
10.4 Analiza parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.

Wykonanie remontu kapitalnego silnika o oznaczeniu technologicznym SG 4 (TCG 2032V16 - MN 2208930):

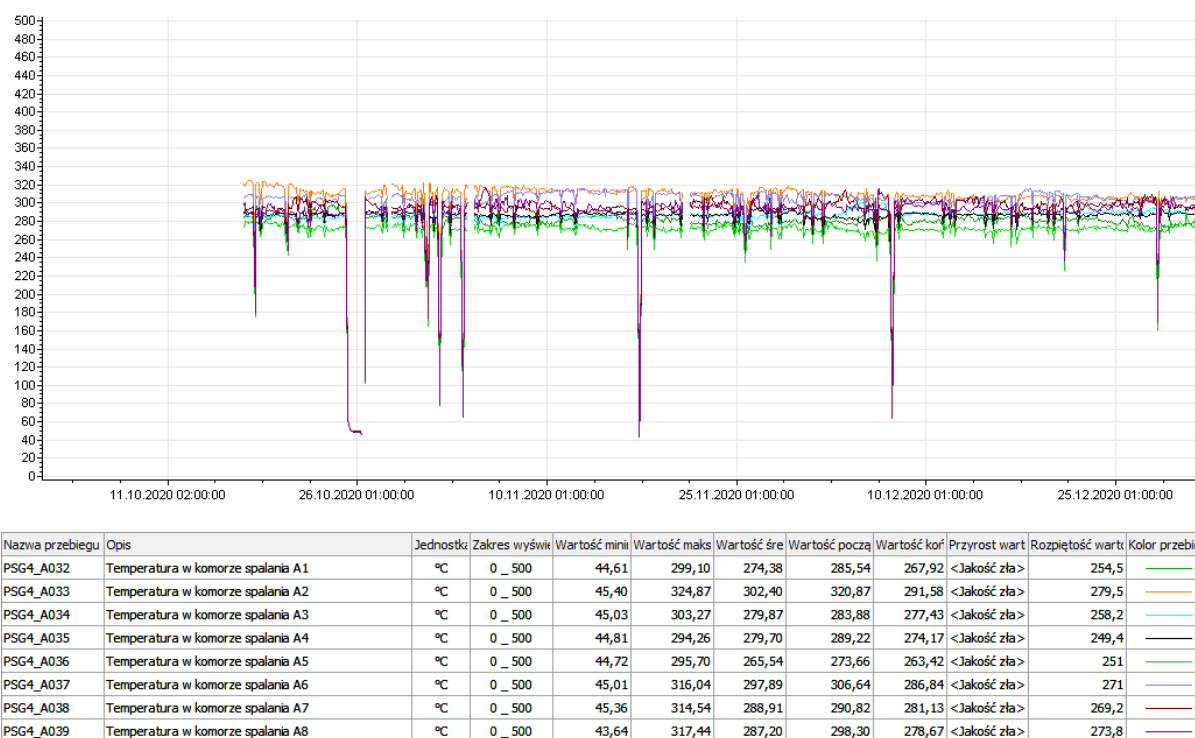
- planowany termin przeglądu E-70: **lipiec 2020** roku
- wykonany przegląd E-70: **22.10.2021 – 04.12.2021.**
- przesunięcie czasookresu przeglądu: **482 dni**

Poniżej zestawiono i przeanalizowano parametry ruchowe silnika SG4 w okresie od października 2020 do grudnia 2021. Do zebrania danych posłużono się istniejącym systemem

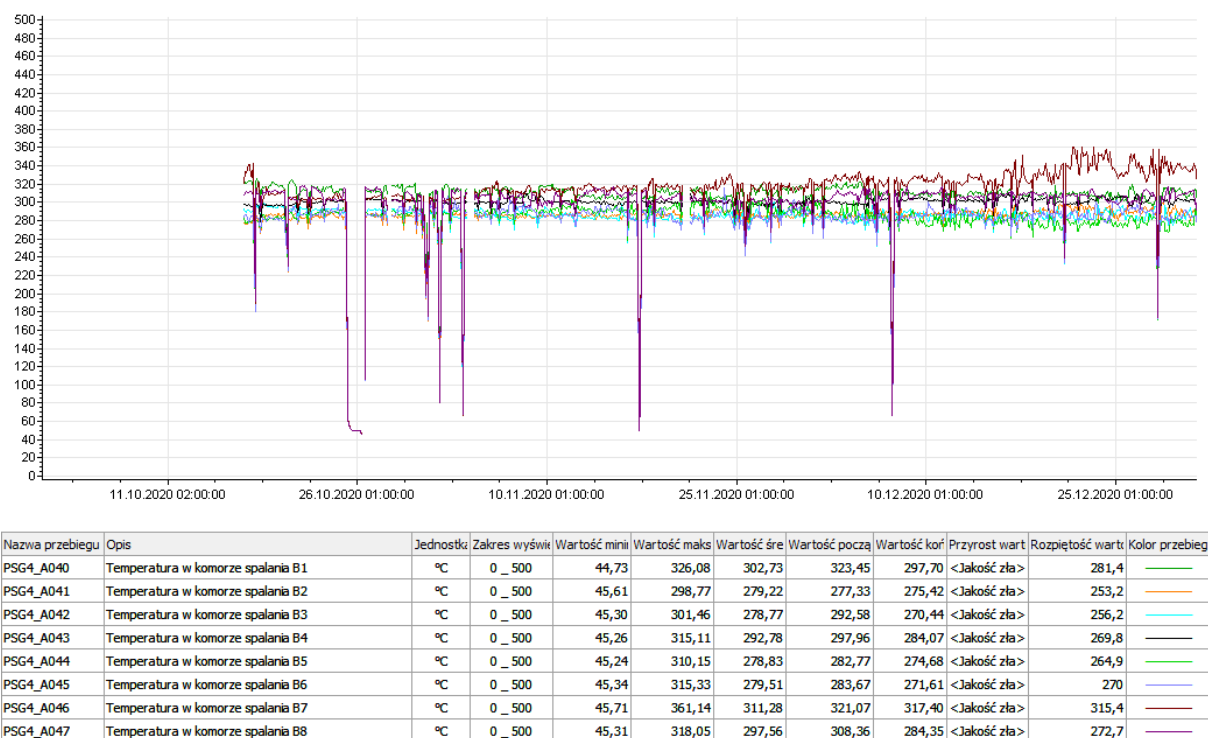
wizualizacji, nadzoru i agregacji danych ASIX. Do analizy przyjęto analogicznie, jak w przypadku silnika SG 1 zlokalizowanego w Zakładzie Jastrzębie Oddział Moszczenica, takie dane jak: moc silnika oraz temperatury spalania w poszczególnych cylindrach silnika: A1 ÷ A8 oraz B1 ÷ B8.



Rys. 90 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020



Rys. 91 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020

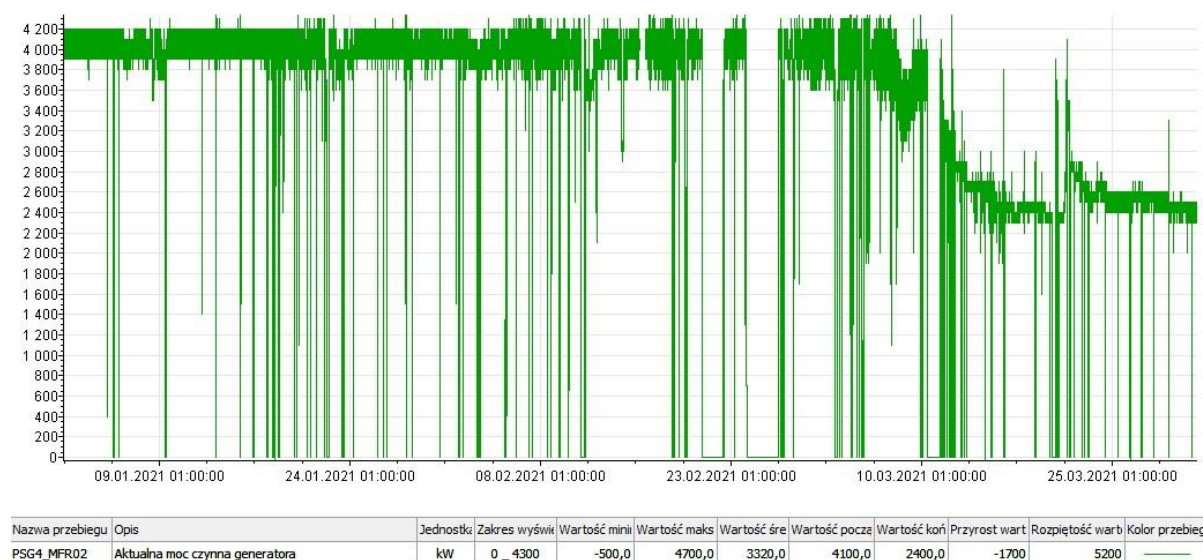


Rys. 92 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020

W początkowym, analizowanym okresie od 01.10.2020r. do 20.10.2020r. system Asix nie rejestrował danych uśrednionych związanych z temperaturami występującymi w cylindrach silnika. Przeanalizowany okres pracy silnika SG 4 (01.10 - 31.12.2020r.), który w lipcu 2020r.

mał być poddany pracom związanym z przeglądem głównym E-70, wskazuje na poprawność działania urządzenia przy zachowaniu parametrów związanych z osiąganą mocą elektryczną oscylującą na poziomie 4,0 MWe (Rys. nr 90). Zarejestrowane temperatury pracy w poszczególnych cylindrach A1 ÷ 8 (Rys. nr 91) nie odbiegają od wartości średnich, obserwowanych podczas eksploatacji silnika w okresach wcześniejszych. Średnia wartość temperatur mieści się w zakresie 260,00°C ÷ 330,00°C. Wartości uzyskiwanych temperatur w cylindrach B1 ÷ 8 (Rys. nr 92) także kształtuje się na poprawnym poziomie, nie odbiegając od parametrów uzyskiwanych w okresach wcześniejszej eksploatacji silnika SG 1 (260,00°C ÷ 350,00°C). Uwagę zwraca temperatura w cylindrze B7, która w okresie od 15.12.2020 wzrasta do poziomu maksymalnego ok. 360°C, stabilizując się pod koniec okresu analitycznego. Odnotowana wartość temperatury znajduje się poniżej maksymalnej dopuszczalnej temperatury w cylindrze, tj. 450°C. Obserwowane są także częste odstawienia silnika SG4, związane z występującymi usterkami, które znajdują odzwierciedlenie w Tabeli nr 11. Rejestr awarii silnika SG4 w okresie 2020 roku. Te częste, krótkotrwałe postoje są wynikiem szeregu usterek występujących w okresie poprzedzającym remont silnika SG4. Jednakże analizując przyczyny można stwierdzić, że ok. 50% przyczyn zanotowanych usterek ma charakter konserwacyjno-utrzymawczy. Przeważają usterki związane z wymianą filtrów gazu, czyszczeniem ścieżek gazowych, przeglądami oraz czyszczeniem filtroseparatorów, uzupełnieniem oleju. W wykazie znajdują się także uszkodzenia / usterki, których przyczyny leżą po stronie mechanicznej lub elektromechanicznej (np. awaria elektrozaworu w układzie olejowym, etc.).

W dniu 07.10.2020r. wykonano przegląd E-40 wraz z kontrolą luzów zaworowych, który nie wykazał nieprawidłowości.



Rys. 93 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021



Nazwa przebiegu	Opis	Jednostka	Zakres wyświetl	Wartość mini	Wartość maks	Wartość śr	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
PSG4_A032	Temperatura w komorze spalania A1	°C	0 _ 500	20,00	962,78	272,92	276,79	267,87	-9,482	942,8	—
PSG4_A033	Temperatura w komorze spalania A2	°C	0 _ 500	20,00	323,61	284,15	305,41	323,24	17,34	303,6	—
PSG4_A034	Temperatura w komorze spalania A3	°C	0 _ 500	20,00	305,47	268,87	290,22	288,62	-1,787	285,5	—
PSG4_A035	Temperatura w komorze spalania A4	°C	0 _ 500	20,00	302,77	271,32	289,01	291,62	2,26	282,8	—
PSG4_A036	Temperatura w komorze spalania A5	°C	0 _ 500	20,00	305,97	252,54	275,18	262,49	-11,43	286	—
PSG4_A037	Temperatura w komorze spalania A6	°C	0 _ 500	20,00	311,05	279,50	304,21	294,86	-10,31	291	—
PSG4_A038	Temperatura w komorze spalania A7	°C	0 _ 500	20,00	320,58	274,44	296,21	283,40	-11,35	300,6	—
PSG4_A039	Temperatura w komorze spalania A8	°C	0 _ 500	20,00	332,10	277,33	298,86	285,58	-14,86	312,1	—

Rys. 94 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021

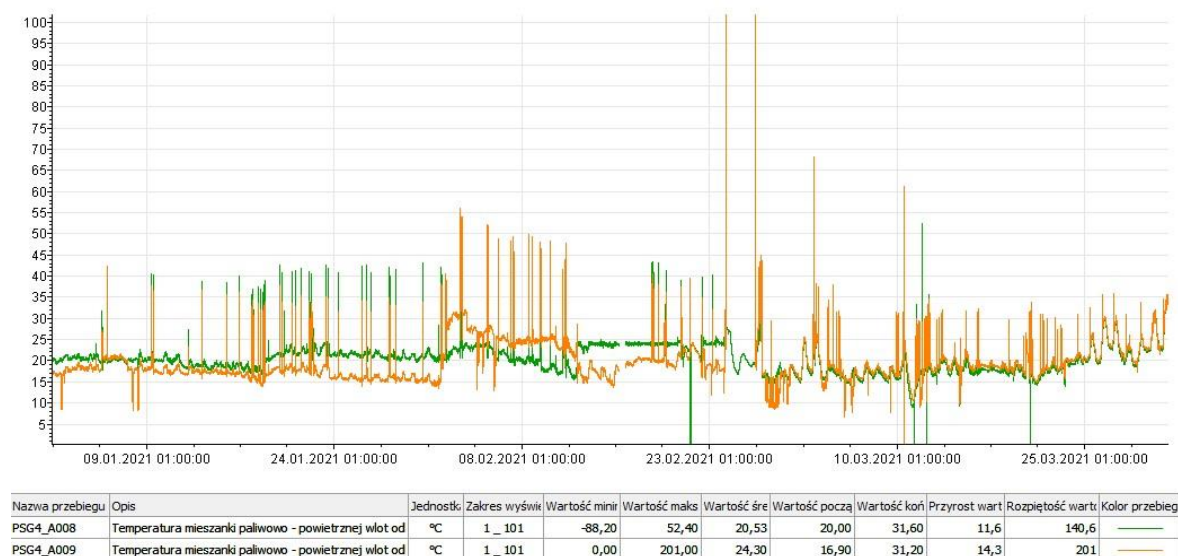


Nazwa przebiegu	Opis	Jednostka	Zakres wyświetl	Wartość mini	Wartość maks	Wartość śr	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
PSG4_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	21,00	705,55	292,53	306,38	315,46	7,546	684,6	—
PSG4_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	21,00	311,73	268,06	285,39	283,44	-4,123	290,7	—
PSG4_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	21,26	307,03	273,66	292,51	298,65	10,57	285,8	—
PSG4_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	21,41	324,06	278,46	300,81	289,46	-11,05	302,6	—
PSG4_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	21,70	325,78	264,72	275,74	276,87	-0,7925	304,1	—
PSG4_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	21,78	315,11	268,81	288,52	284,99	-2,863	293,3	—
PSG4_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	21,12	369,70	292,72	336,42	296,64	-38,33	348,6	—
PSG4_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	21,00	337,98	281,02	309,93	288,26	-22,98	317	—

Rys. 95 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021

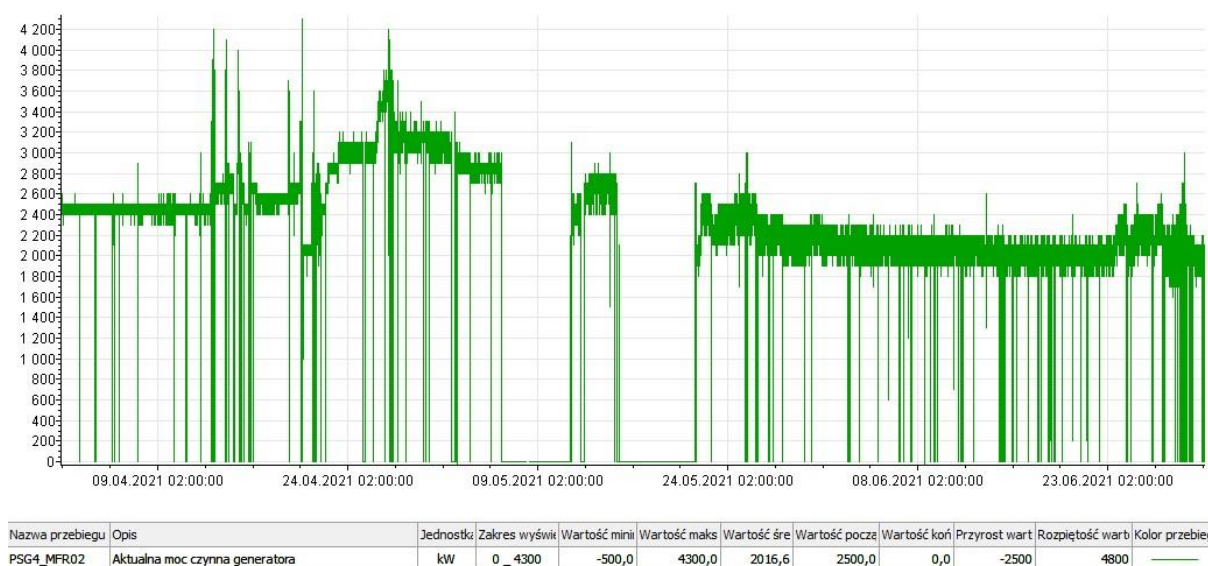
Badany okres czasu od 01.01.2021r. od 31.03.2021r. wykazał stabilizację temperatury w cylindrze B7 (Rys. nr 95). Średnia moc osiągnięta przez silnik SG 4 do dnia 14.03.2021r. wynosiła 4,0 MWe (Rys. nr 93). Po tym okresie od ok. 14.03.2021r., nastąpiło trwałe

ograniczenie mocy silnika. Średnia osiągnięta przez silnik moc wynosiła 2,5 MWe. Jednocześnie nie odnotowano żadnych ponadnormatywnych i niepokojących sygnałów w zakresie przekroczenia temperatur w cylindrach silnika A 1 ÷ 8 (Rys. nr 94) jak i B 1 ÷ 8 (Rys. nr 95). Parametry temperaturowe utrzymywały się w granicach 260 ÷ 340°C. Wyjątek stanowi temperatura w głowicy B7, która w początkowym okresie analitycznym osiągnęła wartość ok. 370°C, by w późniejszym okresie ustabilizować się na poziomie ok. 320°C. W dniach 24 - 26.02.2021r. odstawiano silnik w celu usunięcia nieszczelności chłodnicy mieszanki paliwowo-powietrznej. Zaślepieno jedną rurkę chłodnicy mieszanki strona B silnika. Poniższy Rys. nr 96, obrazuje okres w którym została wyłączona z ruchu chłodnica strony B silnika.

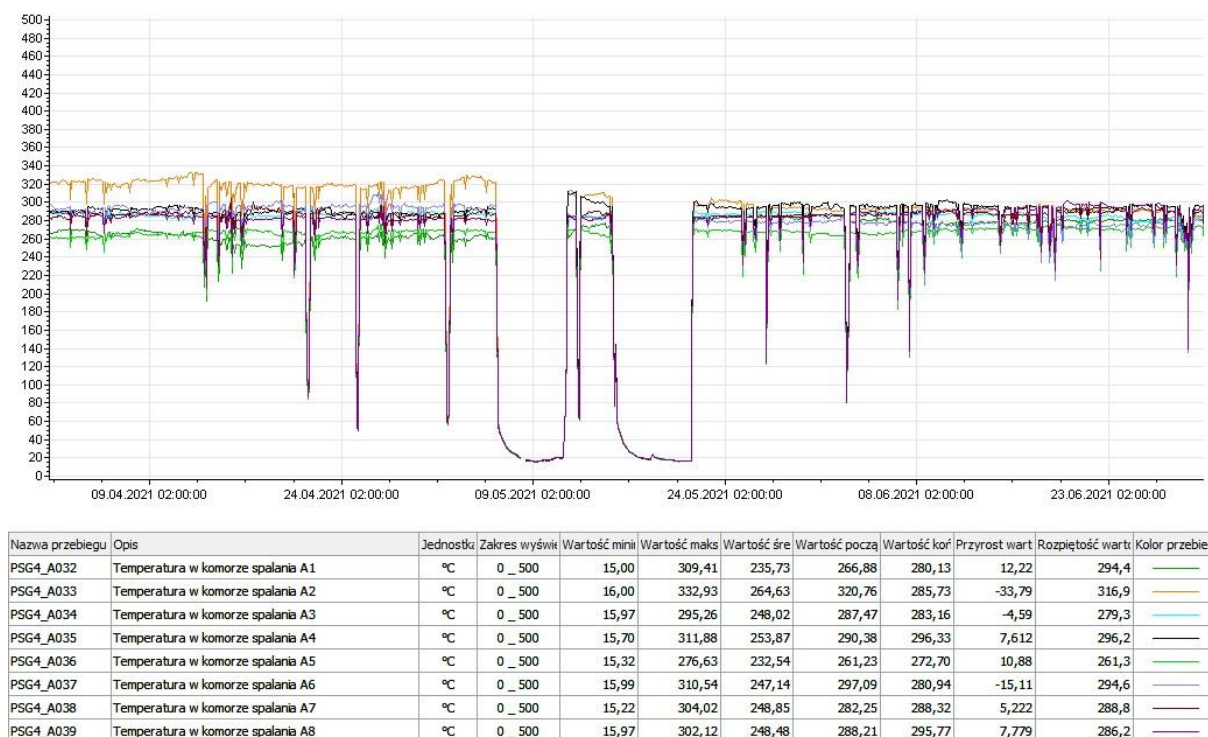


Rys. 96 Wykres temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej SG 4 (strona A i B)

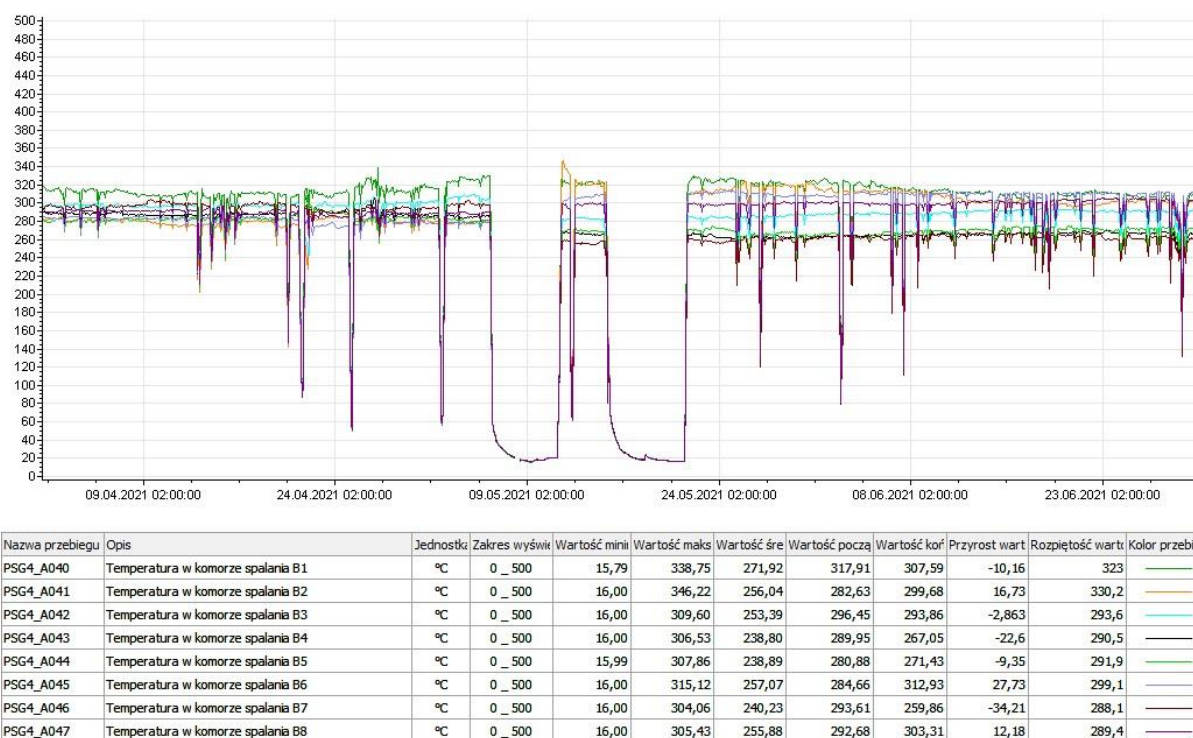
W dniu 10.03.2021r. odnotowano awarię związaną z nagłym wzrostem temperatur w głowicach A1 i B1, co spowodowało wyłączenie silnika z ruchu i konieczność przeprowadzenia diagnostyki komór spalania cylindrów silnika. Przyczyną usterki okazała się karta systemowa wejście/wyjście, odpowiedzialna za przetwarzanie pomiarów temperatur głowic cylindrów silnika i transmisję danych do systemu zabezpieczeń. Po usunięciu usterki i sprawdzeniu linii kablowych silnik ponownie uruchomiono.



Rys. 97 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021

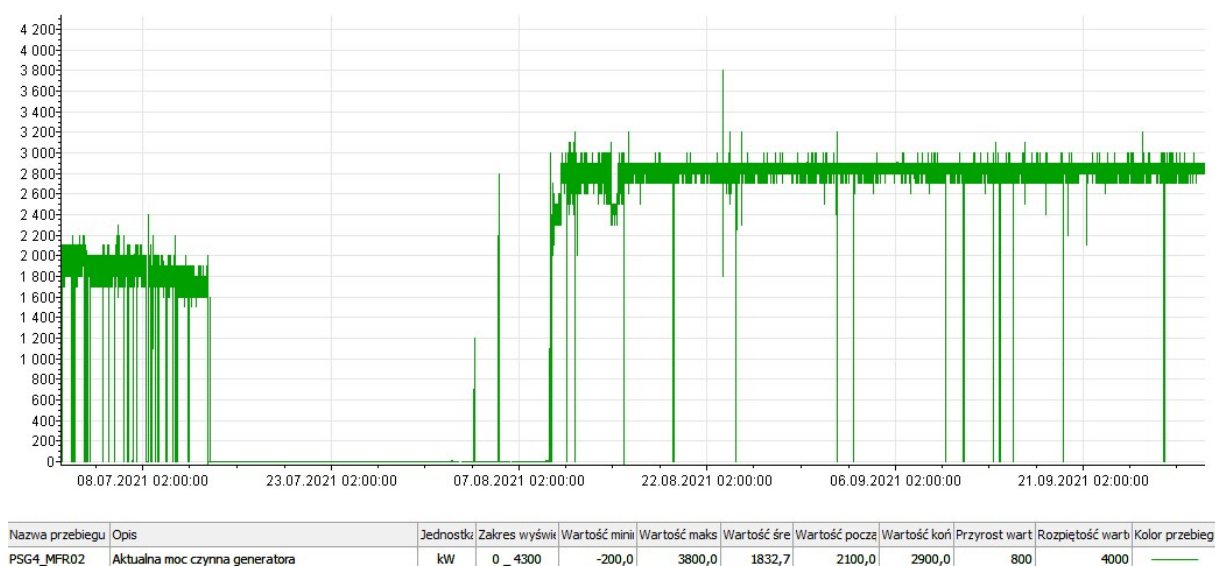


Rys. 98 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021

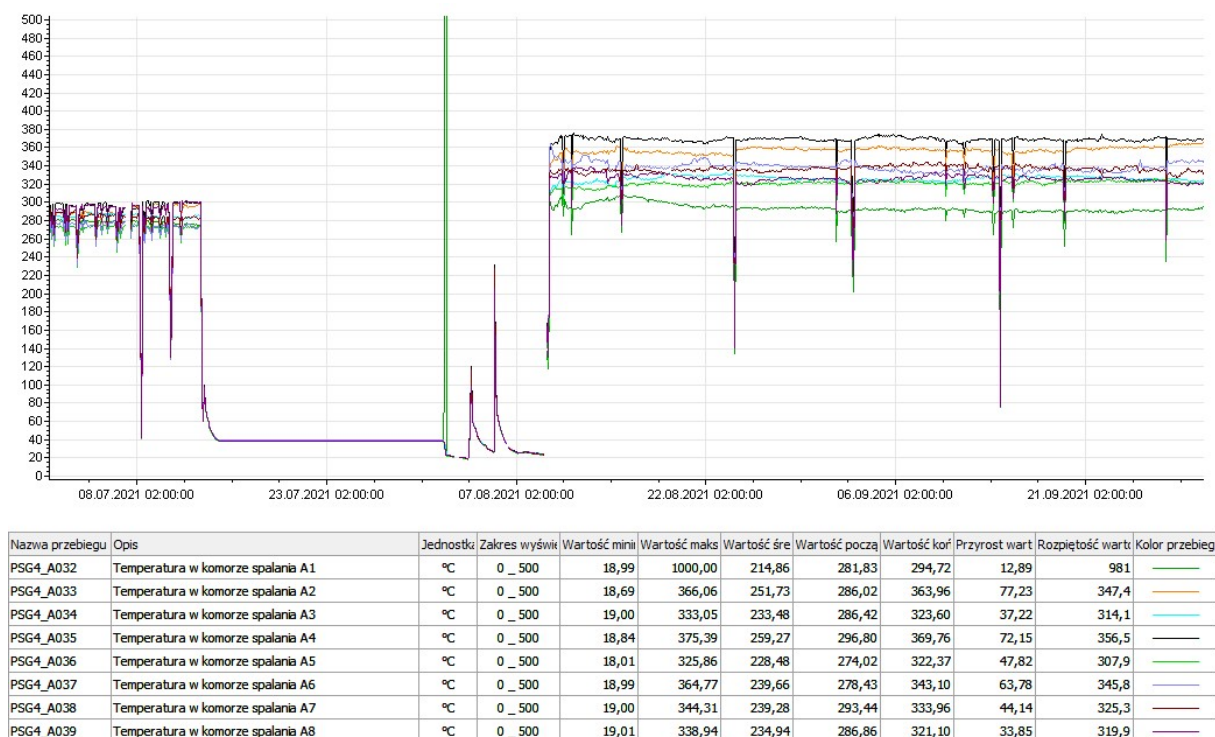


Rys. 99 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021

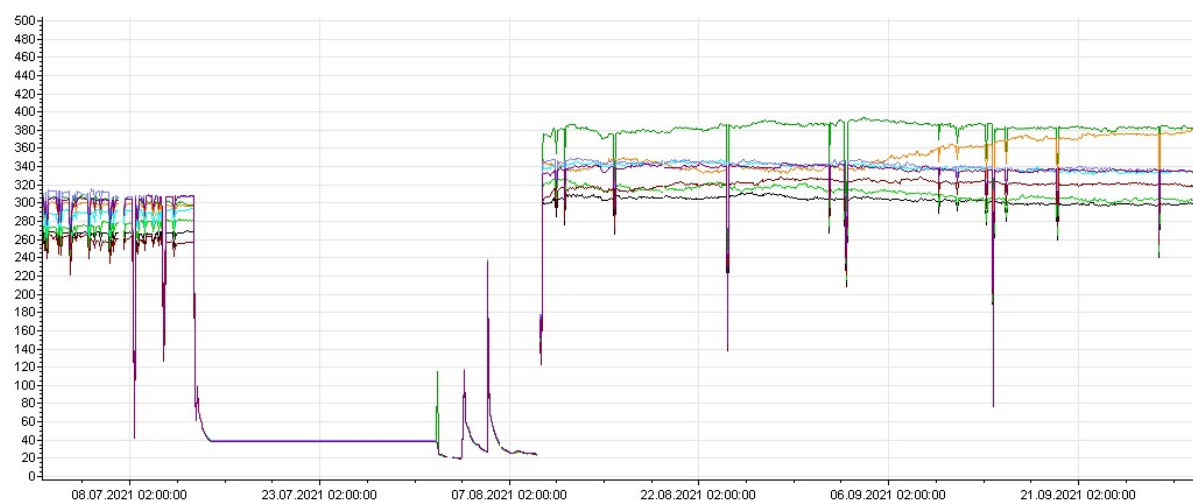
Analiza pracy silnika SG4 w okresie od 01.04.2021r. do 30.06.2021r. wykazała utrzymujący się trend związany z obniżeniem mocy silnika (Rys. nr 97). Parametry związane z osiąganymi temperaturami w cylindrach silnika strona A1 ÷ 8 (Rys. nr 98) i B1 ÷ 8 (Rys. nr 99) nie odbiegały od normatywnych wartości i mieściły się w przedziale 250 ÷ 340°C. W badanym okresie czasu podejmowano próby doregulowania silnika w celu znalezienia przyczyn trwałego ograniczenia mocy. W powyższym okresie zanotowano nieprawidłowości ruchowe, skutkujące odstawieniem silnika z ruchu. Szczególnie w okresie maja 2021 zanotowano szereg awarii skutkujących dłuższym (kilkudniowym) postojem silnika. Usterki związane były ze stwierdzoną awarią pompy w układzie chłodzenia silnika oraz spowodowaną tym faktem usterką związaną z rozszczelnieniem chłodnicy rezerwowej / awaryjnej silnika. Pomimo wymiany pompy na pompę regenerowaną oraz pracami prowadzonymi, w związku z usunięciem nieszczelności chłodnicy, po uruchomieniu silnika w dniu 21.05.2021r. nie stwierdzono poprawy, związanej z uzyskiwaną mocą silnika. Średnia moc uzyskiwana w tym okresie wynosiła 2,0 MWe, co stanowiło 50% mocy nominalnej silnika.



Rys. 100 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021



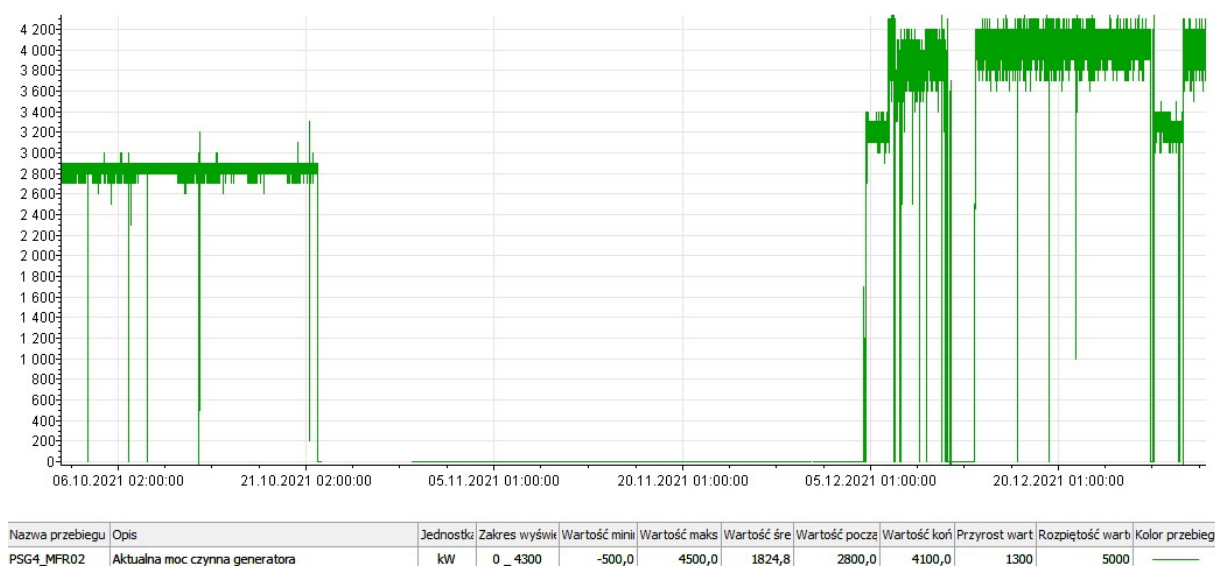
Rys. 101 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021



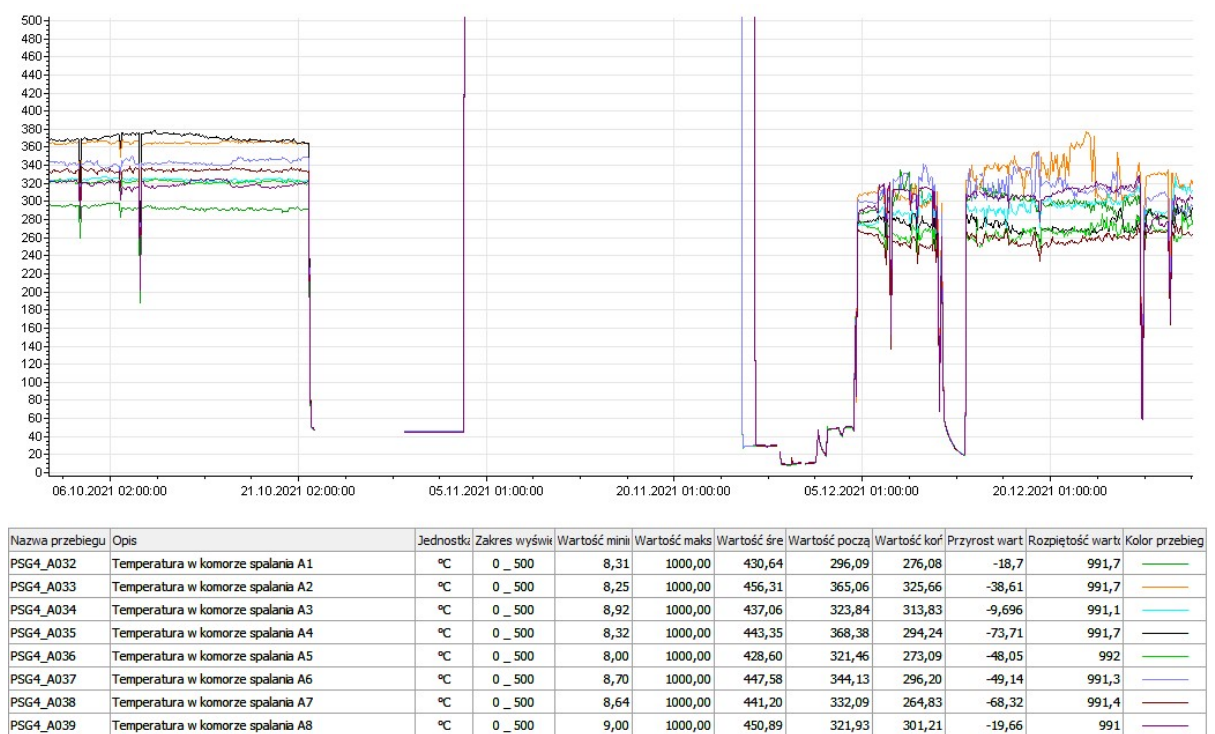
Nazwa przebiegu	Opis	Jednostki	Zakres wyświetl.	Wartość min.	Wartość maks.	Wartość śred.	Wartość początk.	Wartość końc.	Przyrost wart.	Różnica wart.	Kolor przebiegu
PSG4_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	18,99	393,47	268,29	302,56	383,10	80,65	374,5	—
PSG4_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	19,68	381,57	250,47	300,16	377,48	78,67	361,9	—
PSG4_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	19,48	347,88	241,87	291,24	334,95	42,83	328,4	—
PSG4_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	19,01	311,38	218,11	267,85	299,28	31,38	292,4	—
PSG4_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	18,99	326,62	223,89	275,29	302,68	27,23	307,6	—
PSG4_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	19,89	349,21	245,31	311,33	334,87	23,08	329,3	—
PSG4_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	19,16	328,24	227,34	263,52	319,93	57,1	309,1	—
PSG4_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	19,47	344,31	242,55	305,83	334,35	28,39	324,8	—

Rys. 102 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021

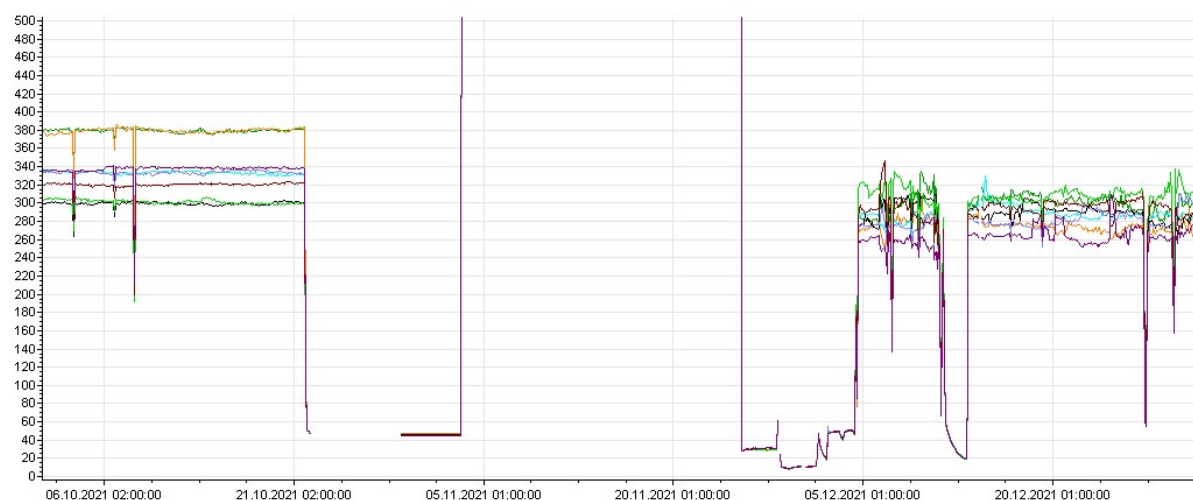
W początkowym okresie analitycznym od 01.07.2021r do 30.09.2021r. obserwowano dalszy spadek mocy silnika do wartości 1,6 MWe (Rys. nr 100). Temperatury w cylindrach strona A1 ÷ 8 (Rys. nr 101) i B1 ÷ 8 (Rys. nr 102) silnika oscylowały w granicach 240 ÷ 310°C, co jest poziomem akceptowalnym, z punktu widzenia eksploatacyjnego. W dniach 10 - 13.07.2021r. odnotowano awarię systemu TEM. System ten jest dedykowanym systemem wewnętrznym sterowania silnika, implementowanym przez producenta / dostawcę urządzenia. System dostarczany jest wraz z silnikiem i łączony jest za pomocą odpowiednich protokołów np. MODBUS / PROFIBUS z systemem nadrzędnym operatora. Obsługa silnika (zmiany parametrów ruchowych, odczyty, sterowanie, uruchamianie i włączanie) możliwa jest z systemu operatorskiego, np. ASIX lub miejscowo poprzez system TEM. Do dnia 09.08.2021r. prowadzono prace związane z usuwaniem awarii systemu oraz podejmowano próby przywrócenia silnika do ruchu. Prowadzono konsultacje z producentem i dostawcą silnika firma Caterpillar (dawniej MWM) oraz z zewnętrzną dostawcą prac, związaną z oprogramowaniem i sterowaniem CES (Centrum Elektroniki Stosowanej). Po usunięciu usterki związanej z systemem sterowania uruchomiono silnik, osiągając moc ok. 2,8 MWe. Zaobserwowano dużą amplitudę temperatur pomiędzy cylindrami A 1 ÷ 8 i B 1 ÷ 8, mieszcząca się w przedziale 280 ÷ 380°C zarówno dla strony A i B silnika. Osiągane, powyższe wartości temperaturowe, zawierały się w przedziale normalnych temperatur eksploatacyjnych silnika.



Rys. 103 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021



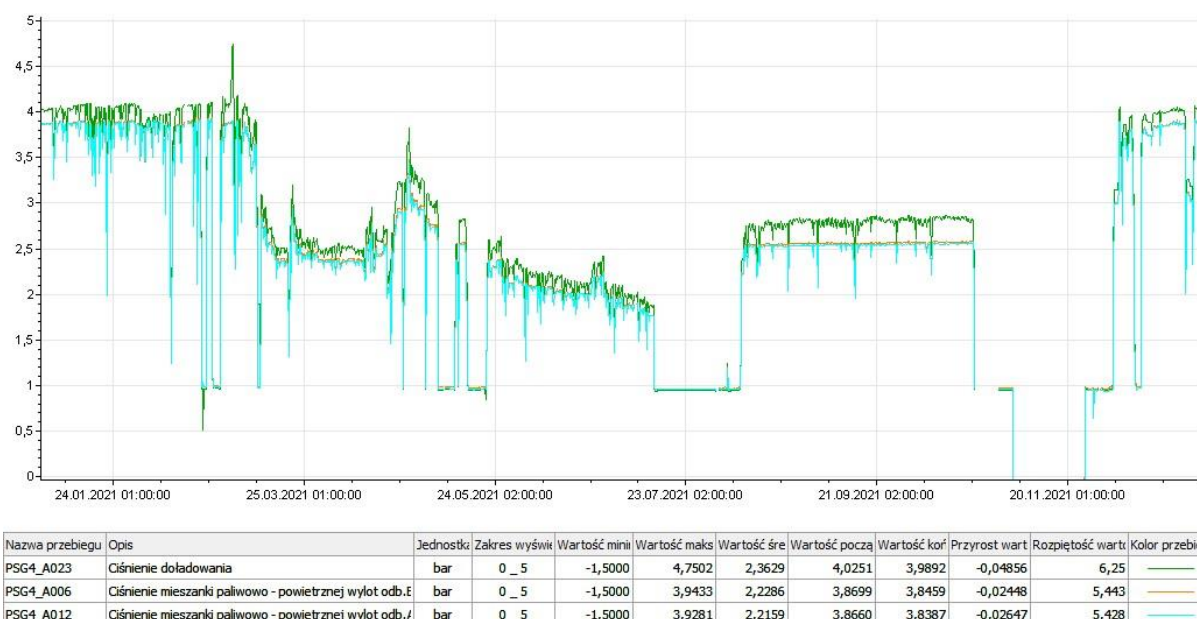
Rys. 104 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021



Nazwa przebiegu	Opis	Jednostka	Zakres wyświetl.	Wartość minii	Wartość maks	Wartość śre	Wartość począ	Wartość koń	Przyrost wart	Rozpiętość wart	Kolor przebiegu
PSG4_A040	Temperatura w komorze spalania B1	°C	0 _ 500	8,03	1000,00	452,56	379,47	296,02	-81,71	992	—
PSG4_A041	Temperatura w komorze spalania B2	°C	0 _ 500	8,98	1000,00	445,44	378,98	275,58	-103,7	991	—
PSG4_A042	Temperatura w komorze spalania B3	°C	0 _ 500	8,94	1000,00	437,70	335,35	284,62	-51,06	991,1	—
PSG4_A043	Temperatura w komorze spalania B4	°C	0 _ 500	8,76	1000,00	429,77	298,95	298,44	-1,047	991,2	—
PSG4_A044	Temperatura w komorze spalania B5	°C	0 _ 500	8,59	1000,00	435,97	303,54	309,73	6,974	991,4	—
PSG4_A045	Temperatura w komorze spalania B6	°C	0 _ 500	9,00	1000,00	435,58	333,49	289,55	-45,83	991	—
PSG4_A046	Temperatura w komorze spalania B7	°C	0 _ 500	8,97	1000,00	436,50	320,03	288,14	-31,51	991	—
PSG4_A047	Temperatura w komorze spalania B8	°C	0 _ 500	9,00	1000,00	431,69	336,02	272,63	-62,72	991	—

Rys. 105 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021

W bezpośrednim okresie (01.10 - 22.10.2021r.), poprzedzającym wykonanie przeglądu E-70 analiza parametrów ruchowych oprócz obniżonej mocy, sięgającej wartości 2,8 MWe (Rys. nr 103) nie wykazała anomalii ruchowych w zakresie osiąganych temperatur w cylindrach silnika. Po wykonanym przeglądzie E-70 silnika oraz turbosprężarek, parametry ruchowe silnika wróciły do normalnych wartości eksploatacyjnych, tj. moc 4,0 MWe oraz normalny poziom temperatur w cylindrach strona A1 ÷ 8 (Rys. nr 104) i B1 ÷ 8 (Rys. nr 105) silnika. Po uruchomieniu wystąpiła awaria powodująca nagłe zmiany mocy silnika. Analiza usterki wykazała, że powodem była utrata komunikacji systemu TEM ze stacją operatorską obsługi silnika (Tabela nr 12). Przez krótki okres czasu, po usunięciu wymienionej powyżej awarii, utrzymywała się podwyższona temperatura w cylindrze A2, jednak w dalszym okresie czasu zaobserwowano spadek i stabilizację wartości osiąganej temperatury w cylindrze do poziomu 320°C.



Rys. 106 Wykres ciśnienia mieszanki paliwo-powietrze oraz ciśnienia doładowania silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.12.2021

Analogicznie jak w przypadku silnika SG 1 zlokalizowanego w Zakładzie Jastrzębie Oddział Moszczenica wytypowano i przeanalizowano obszary, które mogły mieć wpływ na obniżenie mocy silnika, przy uwzględnieniu ponad rocznego przesunięcia głównego przeglądu E-70. Zaobserwowano znaczny spadek ciśnienia doładowania, a tym samym ciśnienia mieszanki paliwowo-powietrznej, świadczący o nieprawidłowej pracy turbosprężarek silnika SG 4 (Rys. nr 106). Na rysunku zaobserwowano powolny spadek ciśnienia mieszanki paliwowo-powietrznej oraz ciśnienia doładowania od ok. 12.03.2021r., co pokrywa się z odnotowanym faktem redukcji mocy przez silnik SG 4. Wartość ciśnienia przy normalnej pracy turbosprężarek wynoszą ok. 3,8 - 4,0 bar. W analizowanym przypadku widzimy spadek ciśnienia w okresie marzec / kwiecień do wartości ok. 2,5 bar, co świadczy o znaczącej redukcji ciśnienia zasilania cylindrów silnika paliwem. W następnym okresie czasu – kwiecień 2021r. obserwujemy nieznaczny wzrost ciśnienia doładowania, którego skutków możemy dopatrywać się w doraźnych działaniach obsługi (przegląd – wyczyszczenie kanałów dolotowych do turbosprężarek). W okresie od maja do lipca 2021r. obserwujemy dalszy spadek ciśnienia doładowania do wartości 1,8 bar, co skutkuje obniżeniem osiąganego przez silnik mocy. Przyczyną takiego stanu rzeczy jest zaniechanie / przesunięcie przeglądu turbosprężarek z uwagi na zbliżający się termin przeglądu E-70. Doraźne działania polegające na usunięciu zanieczyszczeń pochodzących z powietrza oraz gazu z odmetanowania kopalń bez kompleksowego przeglądu, pozwoliły na krótkotrwałą poprawę ciśnienia do wartości 2,7 bar, co skutkowało podwyższeniem osiąganego przez silnik do poziomu 2,8 MWe.

10.5 Wykaz usterek / awarii SG 4 TCG 2032V16 MN 2208930 Zakład Pniówek.

Tabela nr 11 Rejestr awarii silnika SG 4 w okresie 2020 roku

Lp.	Data	Lokalizacja	Silnik	dotyczy
1	16.01.2020r	Pniówek	S-4	Awaria - niestabilna praca silnika (skoki mocy) - wymiana filtrów gazu, zawór szybkozamykający str. B
2	03.02.2020r	Pniówek	S-4	Awaria - rozrusznika
3	14.02.2020r	Pniówek	S-4	Przegląd E-40 - wymiana filtrów gazowych , wymiana filtrów UPF ,czyszczenie filtrów generatora
4	08.03.2020	Pniówek	S-4	Usterka krytyczna
5	14.04.2020	Pniówek	S-4	Awaria - falowanie mocy silnika (komora spalania B-7) - przegląd ścieżek gazowych (czyszczenie + wymiana filtrów)
6	30.04.2020	Pniówek	S-4	Awaria - odchyłka regulacji temp. Komór spalania - kontrola ścieżek gazowych , diagnostyka silnika , naprawa zaworu szybkozamykającego str. B
7	31.05.2020	Pniówek	S-4	Awaria - silnika nr 4 - przegląd ścieżki gazowej str. A oraz kontrola mieszalnika gazu, str. A - usunięcie awarii, uruchomienie silnika
8	01.06.2020	Pniówek	S-4	Awaria - silnika nr 4 - kontrola silnika , diagnostyka , kontrola zaworów szybkozamykających, czyszczenie ścieżek gazowych - uruchomienie
9	10.07.2020	Pniówek	S-4	Diagnostyka silnika nr 4 - obniżona moc
10	21.07.2020	Pniówek	S-4	Przegląd E-40 + wymiana 2 sprężyn B-5 i B-2 oraz przegląd ścieżek gazowych i filtroseparatora (wymiana wkładów), czyszczenie filtrów generatora oraz wymiana wszystkich świec zapłonowych na nowe
11	08.08.2020	Pniówek	S-4	Awaria - problem z rozrusznikiem złe obroty przy starcie (zbyt szybki start) - wymiana czujnika obrotów - start silnika
12	12.08.2020	Pniówek	S-4	Kontrola silnika podczas pracy (utrata mocy) - po kontroli stwierdzono przedmuch na kompensatorze kanału spalin pomiędzy B-4 i B-5
13	20.08.2020	Pniówek	S-4	Awaria - usterka układu spalinowego (uszczelnienie „komina” na kolektorze spalin w rejonie głowicy B-4)
14	22.09.2020	Pniówek	S-4	Awaria - usterka krytyczna (nagły spadek koncentracji gazu). Czyszczenie ścieżek gazowych - uruchomienie
15	28.09.2020	Pniówek	S-4	Awaria - spadek poziomu oleju w misce (30% stanu) - skontrolowano silnik , dopompowano ręcznie olej do silnika do 70 %
16	07.10.2020	Pniówek	S-4	Przegląd E-40 - Kontrola luzów zaworowych .

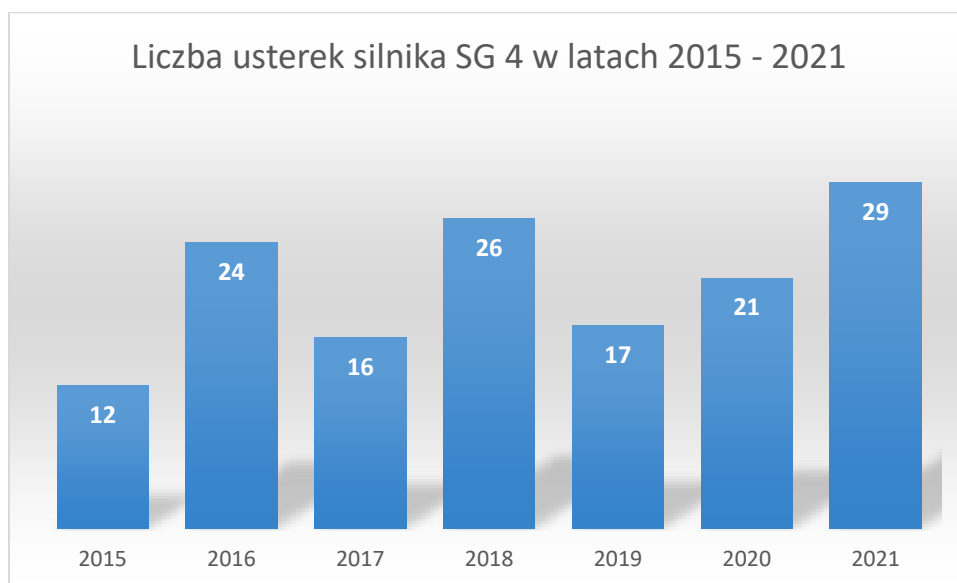
17	15.10.2020	Pniówek	S-4	Uzupełnienie oleju po czyszczeniu wymiennika olejowego
18	16.10.2020	Pniówek	S-4	Uruchomienie silnika po postoju z uwagi na wymiennik olejowy (czyszczenie i wymiana płyt)
19	31.10.2020	Pniówek	S-4	Awaria - zablokowany elektrozawór ścieżki gazowej str. A - awarię usunięto
20	03.11.2020	Pniówek	S-4	awaria - uszkodzony elektrozawór na układzie oleju - uzupełnienie stanu oleju w silniku z 49% do 75% - ręcznie
21	22.11.2020	Pniówek	S-4	Wymiana uszkodzonej cewki elektrozaworu uzupełniania oleju

Tabela nr 12 Rejestr awarii silnika SG 4 w okresie 2021 roku

Lp.	Data	Lokalizacja	Silnik	dotyczy
1	22.01.2021	Pniówek	S-4	Awaria - pompa obiegu MK - wymiana pompy
2	01.02.2021	Pniówek	S-4	Usterka - awaria systemu uzupełniania oleju świeżego (po zdjęciu napięcia z cewek instalacja zaczęła pracować)
3	09.02.2021	Pniówek	S-4	Awaria - uszkodzony regulator ciśnienia skrzyni korbowej (założono awaryjnie zaworek) uruchomiono silnik
4	12.02.2021	Pniówek	S-4	Usterka układu uzupełniania oleju w silniku - po oględzinach stwierdzono uszkodzoną pompę - brak wydajności (konieczna wymiana na nową)
5	19.02.2021	Pniówek	S-4	Wymiana ciepłomierza na stałym parametrze odbioru ciepła z silnika , endoskopia komór spalania , oględziny turbo , kontrola chłodnic mieszanki , dopompowano olej do silnika
6	20.02.2021	Pniówek	S-4	Awaria - wysoka temperatura komory spalania A-1 (po wybicciu temp. Utrzymuje się na 3888 stopni) stwierdzono uszkodzoną kartę we/wy 1240 4597EE A-IN 32-1 - wymiana karty
7	24.02.2021	Pniówek	S-4	Awaria - nieszczelność chłodnicy mieszanki - lokalizacja i przygotowania do postoju. Zaślepienie jednej rurki. Montaż chłodnicy i uruchomienie silnika
8	05.03.2021	Pniówek	S-4	Kontrola układu chłodzenia mieszanki (nieznaczny wyciek pod chłodnicą) - endoskopia oraz kontrola resiverów
9	10.03.2021	Pniówek	S-4	Awaria - temperatura komory spalania 1127 stopni (po demontażu czujnika temp 588 stopni - uszkodzona karta we/wy 1240 4597EE A-IN 32-1 - silnik pozostawiony do sprawdzenia linii kablowych
10	20.03.2021	Pniówek	S-4	Wymiana oleju na nowy + wymiana filtrów olejowych i kompensatora DN 125

11	15.04.2021	Pniówek	S-4	Regulacja parametrów pracy silnika pod kątem możliwości osiągnięcia pełnej mocy, uzupełnianie i odpowietrzanie układów wodnych silnika, wymiana odpowietrzników, przegląd turbo – kanały dolotowe
12	19.04.2021	Pniówek	S-4	Prace związane z problem z temperaturą łożyska głównego
13	07.05.2021	Pniówek	S-4	Wymiana rur powietrza zasysanego (do mieszalnika gazu)
14	10.05.2021	Pniówek	S-4	Awaria - usterka przekładnika na RG
15	12.05.2021	Pniówek	S-4	Awaria - wymiana pompy na układzie chłodzenia silnika (założono zregenerowaną pompę)
16	15.05.2021	Pniówek	S-4	Awaria układu chłodzenia silnika (pompa układu awaryjnego) - odstawiono silnik do naprawy i oględzin
17	20.05.2021	Pniówek	S-4	Montaż chłodnicy awaryjnej, filtra UPF i mieszalnika gazu
18	21.05.2021	Pniówek	S-4	Montaż filtrów olejowych , wymiana oleju w silniku , skręcanie podzespołów układu chłodzenia , wymiana pompy NK na wyremontowaną - uruchomienie silnika
19	25.05.2021	Pniówek	S-4	Awaria - wybiecie silnika i problem z uruchomieniem (temp. Komór spalania < 150°C) - problem z czujnikiem ciśnienia gazu str. A - awarię usunięto , silnik pracuje
20	26.05.2021	Pniówek	S-4	Awaria - demontaż 3 wentylatorów z chłodnic awaryjnych obiegu NK silnika nr 4 (demontaż i dostawa do naprawy)
21	15.06.2021	Pniówek	S-4	Zabudowa naprawionych wentylatorów chłodnicy awaryjnej układu NK (3 szt.) , smarowanie łożysk generatorów
22	28.06.2021	Pniówek	S-4	Awaria - temperatura łożyska generatora str. B 88°C (usunięto smar z kanału nadmiarowego) - temperatura spadła do 48°C
23	30.06.2021	Pniówek	S-4	Awaria - za niskie temperatury w komorach spalania str. B - skontrolowano silnik oraz ścieżkę gazową (rozebrano i wyczyszczono zawór szybko zamykający str. B) - uruchomiono silnik
24	10.07.2021	Pniówek	S-4	Awaria - zanik napięcia 230V zasilania systemu TEM - w skutek zaniku napięcia nastąpił restart systemu i zamknięcie klap powietrznych co spowodowało zassanie rur powietrza dolotowego - uruchomienie
	13.07.2021	Pniówek	S-4	Awaria - anulowanie systemu TEM - nastąpił restart systemu i zamknięcie klap powietrznych co spowodowało zassanie rur powietrza dolotowego (system zawiesza się lub non stop restartuje) - awaria systemu TEM silnik odstawiono 74887h
	09.08.2021	Pniówek	S-4	Podmiana CPU z CAT 5 - podmiana wykonana przez CES - silnik pracuje normalnie (dowód na uszkodzony CPU z S-4 , procesor ma wgrany system 3.07 na panelu 2.10)

25	24.08.2021	Pniówek	S-4	Kontrola endoskopowa komór spalania oraz chłodnic mieszanki - kontrola pod kątem przedostawania się glikolu do oleju - nie stwierdzono przecieków
26	22.10.2021	Pniówek	S-4	Przegląd E-70 - ROZPOCZĘCIE 75560 rbg
27	03.11.2021	Pniówek	S-4	Montaż nowego CPU na silniku (wymiana na nowy pożyczonego z CAT 6 CPU i wgranie oprogramowania)
28	04.12.2021	Pniówek	S-4	Uruchomienie silnika po przeglądzie E-70 (według nowego CPU 75560 rbg)
29	11.12.2021	Pniówek	S-4	Awaria - nagłe spadki mocy silnika i rozchwiana praca - po analizach stwierdzono że przyczyną może być nagła utrata połączenia TEM stacji operatorskiej u palacza



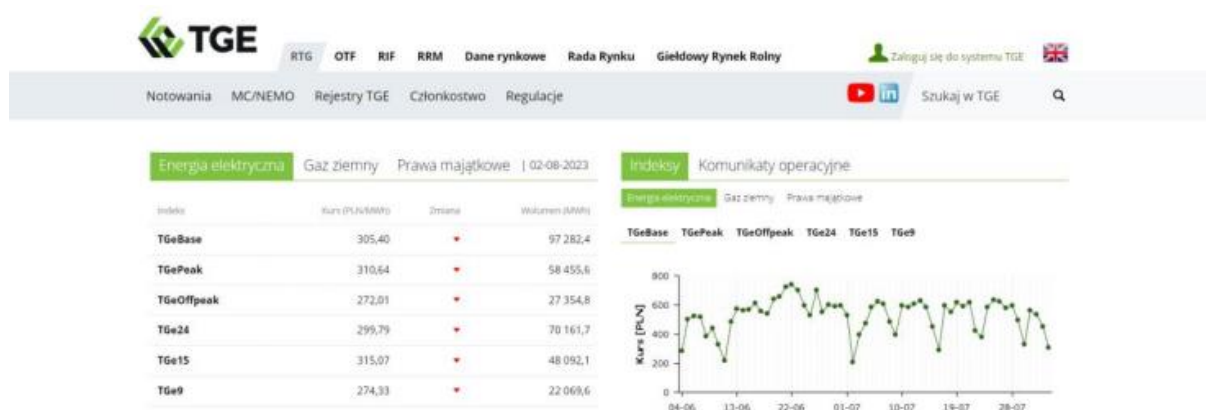
Rys. 107 Wykres liczby usterek silnika SG 4 w latach 2015 – 2021

10.6 Podsumowanie analizy parametrów ruchowych silnika SG4 (TCG 2032V16 – MN 2208930) Zakład Pniówek.

Analiza wykresów osiąganych parametrów ruchowych silnika SG 4 w okresie od planowanego przeglądu (lipiec 2020) do rzeczywistego wykonania przeglądu (22.10 - 06.10.2021) wskazuje na jego zadawalającą pracę w badanym i analizowanym okresie czasu. Zaobserwowana liczba usterek czy też problemów ruchowych prowadzących do włączeń lub obniżenia mocy silnika w niewielkim stopniu przewyższa średnią liczby usterek z lat poprzednich (2015 – 2020) (Rys. nr 107). Na uwagę zasługuje odnotowana usterka systemu sterowania, która generując najdłuższy postój, miała największy wpływ na produkcję energii elektrycznej. Stwierdzono także przeprowadzenie doraźnych działań, związanych z bardzo powierzchownym i prowadzonym w maksymalnie uproszczonym stopniu przeglądem turbosprężarek, co świadczy o podjęciu działań korekcyjnych przez Obsługę, w zakresie próby uzyskania maksymalnej produkcji energii elektrycznej z silnika SG4.

11. Porównanie ekonomiczne kosztów przeglądów silników.

Niniejszy rozdział poświęcony został analizie ekonomicznej związanej z ponoszonymi kosztami wykonywania przeglądów silników. Nie należy zapominać o fakcie, że wszystkie zagadnienia techniczne, mają przełożenie także w wymiarze ekonomicznym. Koszty, czy to planowane, czy nie planowane, stanowią znaczny udział w budżecie przedsiębiorstwa. O ile koszty planowanych przeglądów możemy przewidzieć, prognozować z mniejszą lub większą dokładnością, w oparciu o dane historyczne i np. badanie ofertowe rynku, to zdarzają się także koszty nieplanowane, będące skutkiem awarii. Dodatkowo, oprócz kosztów związanych z naprawą czy też usunięciem usterki należy uwzględnić koszty, a właściwie straty, związane z postojem silnika i brakiem produkcji energii elektrycznej czy też ciepła. W całkowitym bilansie energii elektrycznej przedsiębiorstwa nie tylko sprzedaż energii na zewnątrz do odbiorców jest startą z tytułu braku przychodu. Aspektem, który należy uwzględnić w rozważaniach ekonomicznych jest możliwość, a czasem nieunikniona konieczność, zapłaty kary za brak dostaw zakontraktowanego wolumenu energii elektrycznej do odbiorców indywidualnych, przemysłowych czy też Towarowej Giełdy Energii (TGE) (Rys. nr 108) [15].



Rys. 108 Przykładowe ceny energii elektrycznej TGE [15]

Niebagatelny jest także koszt energii elektrycznej zużywanej na potrzeby własne przedsiębiorstwa. W przypadku braku produkcji, np. z tytułu postoju urządzenia, energię trzeba kupić z zewnątrz np. na TGE aby pokryć wolumen energii wykorzystywanej na potrzeby własne przez przedsiębiorstwo. Skumulowanie się kilku dużych przeglądów silników w jednym okresie, np. jednego roku, może powodować pewnego rodzaju zachwianie stabilności finansowej i konieczność poszukiwania zewnętrznych środków finansowych na pokrycie kosztów planowanych remontów lub działalności przedsiębiorstwa. Wnioski końcowe pozwalają na inne planowanie kosztów przeglądów lub wręcz unikanie tych kosztów poprzez świadomie prowadzoną politykę zmiany / przesunięcia przeglądów, które wymagają niemałych nakładów finansowych.

Jako bazę do przeprowadzania analizy ekonomicznej przyjęto rzeczywiste, poniesione przez przedsiębiorstwo koszty wykonania przeglądów silników o oznaczeniu E-60 i E-70.

Tabela nr 13 przedstawia w ujęciu rocznym koszty wykonania przeglądów E-60 i E-70 w latach 2018 - 2023. Remonty rozliczane są jako tak zwane „Remonty kapitalizowane”.

Taki tryb, ze względu na wielkość ponoszonych kosztów, związanych z przeglądami, pozwala na rozłożenie poniesionych wydatków w czasie. Możemy określić to jako „kapitalizacja” poniesionych kosztów w czasie. W przypadku silników typu TCG i CG, okres kapitalizacji wynosi 8 lat, tj. okres czasu pomiędzy największymi kosztowo przeglądami E-70. Skumulowanie przeglądów w jednym roku obrachunkowym może wpłynąć na ostateczny wynik finansowy przedsiębiorstwa po stronie kosztów, co może w pewien sposób zafałszować obraz ekonomiczny osiąganych przez przedsiębiorstwo wyników finansowych. Możliwość takiego podejścia, uzyskana w drodze indywidualnej interpretacji podatkowej, jest dla przedsiębiorstwa energetycznego bardzo ważna w aspekcie osiąganych zysków / strat. Nie należy zapominać, że przedsiębiorstwa energetyczne kształtują swoje taryfy sprzedaży ciepła czy to dla klientów instytucjonalnych, czy też indywidualnych, w oparciu o decyzję Urzędu Regulacji Energetyki (URE), która jest wynikiem kalkulacji kosztu, zysku, amortyzacji, nakładów inwestycyjnych, etc.

Tabela nr 13 Zestawienie kosztów remontów E-60 i E-70 silników TCG i CG.

L.p.	Nazwa remontu kapitalizowanego realizowanego przez TG	Ogółem wartość remontu	Rok poniesionych wydatków					
		(netto)	2018	2019	2020	2021	2022	2023
1.	Remont kapitalizowany E-60 SG2 Moszczenica	1 634 481,14 zł	0,00 zł	1 634 481,14 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł
2.	Remont kapitalizowany E-60 SG3 Pniówek	1 697 184,47 zł	0,00 zł	1 697 184,47 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł
3.	Remont kapitalizowany E-60 SG1 Pniówek	1 523 914,80 zł	1 523 914,80 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł
4.	Remont kapitalizowany E-60 SG2 Pniówek	1 396 000,00 zł	0,00 zł	1 396 000,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł
5.	Remont kapitalizowany E-60 SG1 Suszec	1 086 429,05 zł	0,00 zł	1 086 429,05 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł
6.	Remont kapitalizowany E-70 SG1 Moszczenica	3 028 750,95 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	3 028 750,95 zł	0,00 zł	0,00 zł
7.	Remont kapitalizowany E-70 SG4 Pniówek	3 180 156,72 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	3 180 156,72 zł	0,00 zł	0,00 zł
8.	Remont kapitalizowany E-70 SG2 Moszczenica	3 573 752,34 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	0,00 zł	3 573 752,34 zł

11.1 Propozycja nowego harmonogramu przeglądów silników wraz z analizą ekonomiczną.

Poniżej przedstawiono wieloletni planowany harmonogram przeglądów silników typu TCG, CG i TBG w okresie od 2017 do 2032 roku (Tabela nr 14). Tabela nr 14 obejmuje przeglądy E-60 i E-70 z uwagi na ich wiodący, znaczny udział w kosztach przedsiębiorstwa. Harmonogram został opracowany w celu przygotowania wieloletniego planu remontowego i produkcyjnego. W rozdziale 7.1. Zalecenia DTR dotyczące przeglądów i wymian podzespołów silników, podano czasookresy wykonywania poszczególnych przeglądów. Poszczególne przeglądy niosą za sobą konieczność wyłączenia silnika, a co za tym idzie, występuje brak produkcji energii elektrycznej i ciepła. Pewnego rodzaju niebezpieczeństwem jest nachodzenie na siebie przeglądów silników w poszczególnych Zakładach / Oddziałach, co niesie za sobą konieczność ponoszenia większych nakładów finansowych w okresie danego roku, w którym

przypadają np. przeglądy główne o oznaczeniu E-70. Dodatkowym aspektem jest także większa starta z tytułu wyłączenia z produkcji, np. dwóch lub trzech silników. W takim przypadku, przyjmując produkcję energii elektrycznej na poziomie 4,0 MWe / h, dzienna utrata produkcji energii elektrycznej wynosi 96,0 MWe. Przyjmując 52 dniowy okres trwania przeglądu E-70, otrzymujemy utratę produkcji z jednego silnika na poziomie 4 992,0 MWe. Innym aspektem, który wpływa na termin wykonania obligatoryjnego przeglądu jest sezon grzewczy. Jeżeli wykonanie przeglądu po przepracowanych godzinach silnika wypada w okresie, np. grudnia, stycznia lub lutego, czyli w pełni sezonu grzewczego, czystą „niegospodarnością” było by wyłączenie silnika produkującego ciepło w skojarzeniu czyli przy największym współczynniku kogeneracji i najkorzystniejszym wskaźniku wykorzystaniu paliwa jakim jest gaz z odmetanowania kopalń.

Tabela nr 14 Wieloletni plan głównych przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar)

Lp.	Silnik oznaczenie	Lokalizacja	Nr fabryczny	Silnik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Suszec	MN 001032	S-1			E-6				E-7			E-6			E-7			E-6
2	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Suszec	MN 2205619	S-2	E-60				E-70				E-60				E-70			
3	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212189	S-5				E-60				E-70				E-60				E-70
4	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212188	S-6			E-60				E-70				E-60				E-70	
5	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200761	S-1			E-6				E-7			E-6			E-7			E-6
6	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200849	S-2			E-6				E-7			E-6			E-7			E-6
7	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2206287	S-3		E-60				E-70				E-60					E-70	
8	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2208930	SG4				E-70				E-60				E-70				E-60
9	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Moszczenica	MN 2208931	SG1				E-70				E-60				E-70				E-60
10	Silnik gazowy tłokowy CG260-16	Moszczenica	MN 2211546	S-2		E-60				E-70				E-60					E-70	
11	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Częstochowa	MN 2210197	S-1			E-60				E-70				E-60				E-70	

Jak widzimy w Tabeli nr 14, ujęto planowane przeglądy E-70 silników SG 1 w Zakładzie Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz SG 4 w Zakładzie Pniówek, których elementy zostały poddane badaniom i analizie. Rzeczywiste wykonanie przeglądów E-70 nastąpiło w roku 2021 tj., z ponad rocznym przesunięciem w stosunku do planu. Przesunięcie czasowe wykonania głównych przeglądów silników SG 1 i SG 4 zostało uwzględnione w Tabeli nr 15, w której zobrazowano nakłady finansowe na wykonanie planowanych przeglądów silników.

Przekładając powyższą tabelę (Tabela nr 14) na nakłady finansowe możemy w uproszczony sposób oszacować koszty, które będzie ponosiło przedsiębiorstwo z tytułu wykonania przeglądów silników w analizowanym okresie czasu (Tabela nr 15). W całach analitycznych przyjęto koszty przeglądów E-60 i E-70 jako najbardziej kosztotwórczych. Ograniczono się także do okresu lat: 2023 ÷ 2032. Koszty przeglądu w mln zł, przyjęto w oparciu o rzeczywiste koszty wykonania przeglądów podane w Tabeli nr 13. Zestawienie kosztów remontów E-60 i E-70 silników TCG i CG.

Przyjęto następujące koszty przeglądów:

- E-60 (E-6) – 1,7 mln zł.
- E-70 (E-7) – 3,6 mln zł.

Tabela nr 15 Wieloletni plan kosztów przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.

Lp.	Silnik oznaczenie	Lokalizacja	Nr fabryczny	Silnik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Suszec	MN 001032	S-1			E-6				3,6			1,7			3,6			1,7
2	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Suszec	MN 2205619	S-2	E-60				E-70				1,7				3,6			
3	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212189	S-5				E-60				3,6				1,7				3,6
4	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212188	S-6			E-60				3,6				1,7					3,6
5	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200761	S-1			E-6				3,6			1,7			3,6			1,7
6	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200849	S-2			E-6				3,6			1,7			3,6			1,7
7	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2206287	S-3		E-60				E-70				1,7				3,6		
8	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2208930	SG4					E-70				1,7				3,6			
9	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Moszczenica	MN 2208931	SG1					E-70				1,7				3,6			
10	Silnik gazowy tłokowy CG260-16	Moszczenica	MN 2211546	S-2		E-60				E-70				1,7	1,7			3,6		
11	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Częstochowa	MN 2210197	S-1			E-60				3,6				1,7				3,6	
12	Suma kosztów [mln zł]										18,0	3,6	5,1	8,5	5,1	1,7	21,6	7,2	7,2	8,7

Należy zwrócić uwagę, zgodnie z przyjętą metodologią, że rzeczywiste wykonanie przeglądów E-70 silników SG 1 i SG 4, spowodowało przesunięcie przewidywanych / planowanych kosztów przeglądów silników E-60 i E-70 silników poz. 8 i 9 Tabeli nr 15 o 12 miesięcy, w stosunku do planowanych przeglądów Tabela nr 14.



Rys. 109 Planowane koszty wykonania przeglądów E-60 i E-70 silników w latach 2023-2032 [mln zł]

Jak widać (Rys. nr 109), planowane nakłady finansowe na wykonanie przeglądów E-60 i E-70 oscylują w granicach kilku / kilkunastu milionów rocznie. Rok 2029 charakteryzuje się największymi, planowanymi nakładami finansowymi na wykonanie przeglądów. Nakłady wynoszą 21,6 mln zł, co jest niebagatelnym wydatkiem dla spółki. Oczywiście dość długa perspektywa czasowa teoretycznie pozwala na zabezpieczenie środków, które pokryją planowany wydatek, jednakże dynamiczne zmiany zachodzące na rynku mogą pokrzyżować plany finansowe. W takim przypadku należy szukać rozwiązania w sferze technicznej przy zachowaniu zdolności produkcyjnych przedsiębiorstwa, a co za tym idzie zabezpieczenia

płynności finansowej poprzez generowanie przychodów ze sprzedaży produkowanych mediów energetycznych. Należy dodać, że w celu uproszczenia analizy pominięto przewidywaną wartość wzrostów kosztów przeglądów o wskaźnik inflacji, prognozowane wartości zmian kursu walut obcych, które mogą wpłynąć na koszty części do wykonania głównych przeglądów i ewentualne wzrosty cen stali w analizowanej perspektywie czasowej.

Poniżej, w oparciu o:

- Pozytywne wyniki badań nieniszczących wytypowanych elementów silników (zawory dolotowe i wylotowe, półpanewki, korbowody),
- Przeprowadzoną analizę kluczowych parametrów ruchowych silników SG 1 Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica i SG 4 Zakład Pniówek (moc generatora i temperatura w cylindrach silnika) która wykazała, że przedłużenie przeglądu głównego E 70 silnika, nie wpływa na pogorszenie osiąganych parametrów eksploatacyjnych przy założeniu okresowego, zalecanego czyszczenia turbosprężarek silnika oraz chłodnicy mieszanki paliwowo-powietrznej.
- Sformułowane zalecenia eksploatacyjne, dot. wykonywania przeglądów / czyszczeń chłodnic mieszanki paliwowo-powietrznej oraz turbosprężarek,

zaprezentowano **nowy, zmodyfikowany** plan przeglądów silników TCG, CG i TBG w zakresie wykonywania głównych przeglądów E-60 i E-70 (Tabela nr 16). Poniższy harmonogram uwzględnia wnioski związane z możliwością przesunięcia przeglądów głównych silników w okresie 12 ÷ 13 miesięcy. Kolorem pomarańczowym zaznaczono proponowane przesunięcia głównych przeglądów o oznaczeniu E-70, silników zainstalowanych w przedsiębiorstwie.

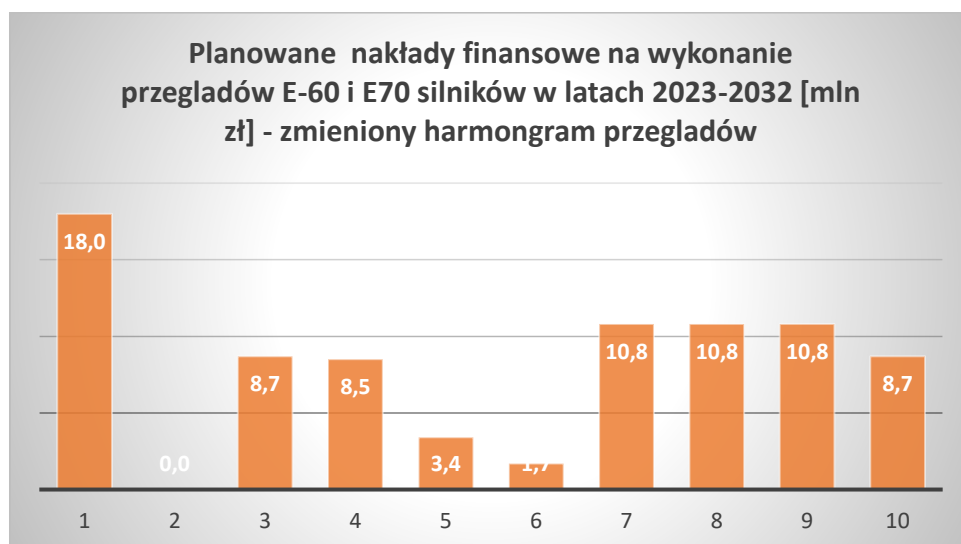
Tabela nr 16 Nowy wieloletni plan przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.

Lp.	Silnik oznaczenie	Lokalizacja	Nr fabryczny	Silnik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Suszec	MN 001032	S-1			E-6				E-7			E-6				E-70		E-6
2	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Suszec	MN 2205619	S-2	E-60				E-70				E-60				E-70			
3	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212189	S-5				E-60					E-70			E-60				E-70
4	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212188	S-6			E-60				E-70				E-60					E-70
5	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200761	S-1			E-6				E-7			E-6			E-7			E-6
6	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200849	S-2			E-6				E-7			E-6			E-7			E-6
7	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2206287	S-3		E-60				E-70				E-60					E-70	
8	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2208930	SG4					E-70				E-60					E-70		
9	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Moszczenica	MN 2208931	SG1					E-70				E-60					E-70		
10	Silnik gazowy tłokowy CG260-16	Moszczenica	MN 2211546	S-2		E-60				E-70				E-60					E-70	
11	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Częstochowa	MN 2210197	S-1			E-60				E-70				E-60				E-70	

Analogicznie jak w przypadku pierwotnego harmonogramu zastąpiono oznaczenie przeglądów silnika kosztami, co pozwala oszacować jak wysokie, i w którym okresie czasu przedsiębiorstwo będzie musiało ponieść konieczne wydatki na zapewnienie remontu urządzenia, a tym samym na zapewnienie ciągłości produkcji i przychodów (Tabela nr 17).

Tabela nr 17 Nowy wieloletni plan kosztów przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.

Lp.	Silnik oznaczenie	Lokalizacja	Nr fabryczny	Silnik	2017	2018	2019	2020	2021	2022	2023	2024	2025	2026	2027	2028	2029	2030	2031	2032
1	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Suszec	MN 001032	S-1			E-6				3,6			1,7				3,6		1,7
2	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Suszec	MN 2205619	S-2	E-60				E-70				1,7				3,6			
3	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212189	S-5				E-60					3,6			1,7				3,6
4	Silnik gazowy tłokowy CG170-20	Suszec	MN 2212188	S-6			E-60				3,6				1,7					E-70
5	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200761	S-1			E-6				3,6			1,7			3,6			1,7
6	Silnik gazowy tłokowy TBG 632V16	Pniówek	MN 2200849	S-2			E-6				3,6			1,7			3,6			1,7
7	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2206287	S-3		E-60				E-70			1,7					3,6		
8	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Pniówek	MN 2208930	SG4					E-70				1,7					3,6		
9	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Moszczenica	MN 2208931	SG1					E-70				1,7					3,6		
10	Silnik gazowy tłokowy CG260-16	Moszczenica	MN 2211546	S-2		E-60				E-70			1,7					3,6		
11	Silnik gazowy tłokowy TCG 2032V16	Częstochowa	MN 2210197	S-1			E-60				3,6				1,7				3,6	
12	Suma kosztów [mln zł]										18,0	0,0	8,7	8,5	3,4	1,7	10,8	10,8	10,8	8,7



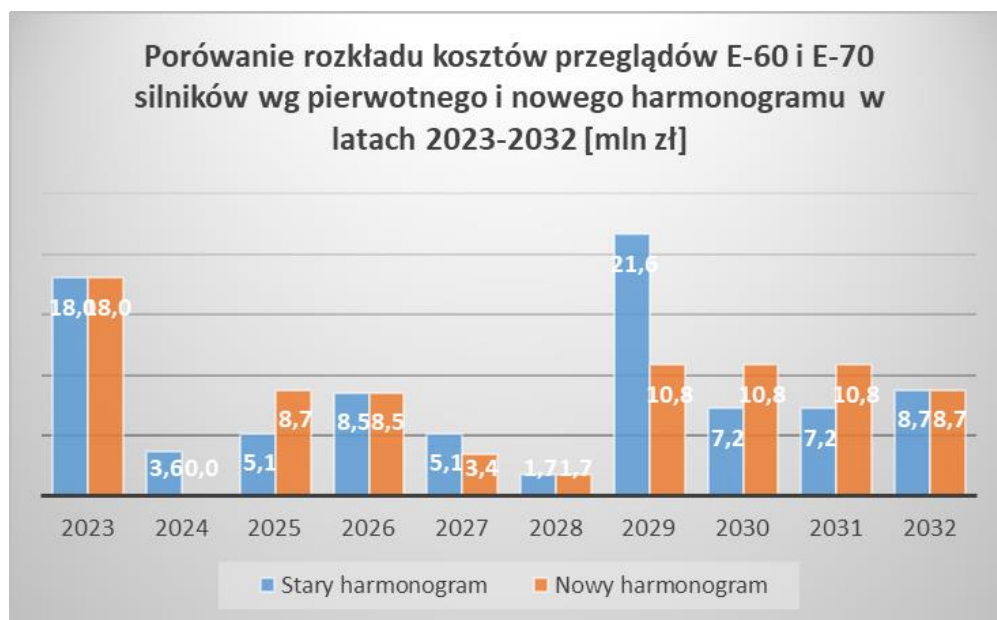
Rys. 110 Planowane koszty wykonania przeglądów E-60 i E-70 silników w latach 2023-2032 [mln zł] – zmieniony harmonogram przeglądów

Zobrazowanie graficzne planowanych do poniesienia przed przedsiębiorstwo kosztów, pozwala na sformułowanie wniosków, dotyczących rozkładu przewidywanych nakładów finansowych w czasie (Rys. nr 110).

11.2 Korzyści ekonomiczne zmienionego planu serwisowania / przeglądów silników.

Rozważane powyższe zależności w rozdziale 12.4, stanowią podstawę do sformułowania wniosków związanych z możliwością przesunięcia planowanych przeglądów w aspekcie finansowo-ekonomicznym. Uzyskane wyniki badań oraz sformułowane w oparciu o nie wnioski, umożliwiają przesunięcie w czasie założonych kosztów przeglądów, które firma musi

ponieść. W tym miejscu należy zwrócić uwagę, że realne koszty wykonania przeglądu E-60 czy też przeglądu głównego E-70 liczone są w milionach złotych. Należy dodać, że obserwowany wzrost cen związany z inflacją lub zakłóceniem łańcucha dostaw części, komponentów do remontu silników (np. COVID-19), związany z ogólnoswiatową sytuacją, stanowi dodatkowy argument za opracowaniem nowego harmonogramu przeglądu silników. W przypadku braku dostępności części zamiennych, które są niezbędne do wykonania prac związanych z planowanymi przeglądami, sformułowane wnioski dają możliwość dalszej, ciągłej pracy silników i uzyskiwania przychodów przedsiębiorstwa. Zalecenia dotyczące dokonywania dodatkowych prac, związanych z przeglądem / czyszczeniem turbosprężarek oraz pracami związanymi z utrzymaniem czystości chłodziń mieszanki paliwowo-powietrznej mimo, że obciążone kosztami wykonania prac (szacunkowe koszty wykonania czyszczenia chłodziń mieszanki oraz przeglądu turbosprężarek ok. 100,00 tys. zł) oraz kosztami braku produkcji energii elektrycznej i ciepła (szacunkowe koszty braku produkcji z tytułu postoju 240,00 tys. zł), pozwalają na dalszą eksploatację silnika / silników. Dodatkową korzyścią jest możliwość optymalizacji i niejako modelowania planowanych kosztów wykonania głównych przeglądów (Rys nr 111), co pozwala na przemyślane i świadome stosowanie rozwiązań, które często związane są z redukcją kosztów np. remontów. Porównanie rozkładu kosztów przeglądów pierwotny harmonogram vs nowy harmonogram, pozwala w sposób odpowiedzialny na podjęcie decyzji zarządczych, które mogą wpłynąć na kondycję finansową przedsiębiorstwa minimalizując ryzyko wystąpienia awarii lub zdarzeń nieprzewidzianych związanych z podstawowym parkiem produkcyjnym spółki.



Rys. 111 Porównanie rozkładu kosztów przeglądów E-60 i E-70 silników wg pierwotnego i nowego harmonogramu w latach 2023-2032 [mln zł]

Analizując Rys. nr 111, obserwujemy możliwość maksymalnej redukcji kosztów w roku 2024 związanej z przeglądami silników E-60 i E-70. Wykonywanie przeglądów silników, wg

nowego harmonogramu niejako spłaszcza planowane nakłady finansowe na ich realizację i powoduje równomierny rozkład kosztów w poszczególnych latach, które będą ponoszone przez przedsiębiorstwo. W roku 2029 ograniczono stronę kosztową o 50%, co stanowi niebagatelną pozycję w bilansie ekonomicznym przedsiębiorstwa.

12.Podsumowanie.

Elementy wybrane do badań nieniszczących

Na podstawie analizy obciążeń cieplnych i mechanicznych wytypowano takie elementy jak:

- Głowice zaworowe silników (zawory dolotowe i wylotowe).
- Układ korbowodów i panewek (półpanewek) tłoków silników.

Wyniki badań nieniszczących wytypowanych elementów

1. Przeprowadzone badania i pomiary zbiecia trzonek zaworowych głowic silnika SG 1 TCG 2032V16 MN 2208931 Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica oraz SG 4 TCG 2032V16 MN 2208930 Zakład Pniówek nie wykazały ponadnormatywnych wartości, które świadczyłyby o nieprawidłowym serwisowaniu / utrzymywaniu silnika w zakresie kontroli luzów zaworowych.
2. Przeprowadzone badania nieniszczące (NDT) nie wykazały uszkodzeń półpanewek silników SG 1 i SG 4, które dyskwalifikowałyby badane elementy do dalszej eksploatacji. Pomimo zdecydowanie dłuższej eksploatacji (12 ÷ 13 miesięcy), z uwagi na przekroczenie planowanych czasookresów przeglądów głównych o oznaczeniu E-70. Półpanewki nosiły ślady normalnego zużycia eksploatacyjnego (niewielkie rysy mechaniczne).
3. Przeprowadzone badania nieniszczące (NDT) korbowodów silników SG 1 i SG 4 nie wykazały uszkodzeń / wad / mikropęknięć, które dyskwalifikowałyby badane elementy do dalszej eksploatacji, pomimo przekroczenia wymaganego DTR czasookresu wykonania przeglądu (remontu) głównego 12 ÷ 13 miesięcy.
4. Przeprowadzone badania nieniszczące (NDT) elementów złącznych (śruby i nakrętki) stopy korbowodów silników SG 1 i SG 4 nie wykazały uszkodzeń / wad / mikropęknięć, które dyskwalifikowałyby badane elementy do dalszej eksploatacji, pomimo dłuższego czasookresu eksploatacji.

Analiza kluczowych parametrów ruchowych silnika (moc i temperatura w cylindrach silnika)

1. Analiza parametrów ruchowych silników SG 1 Zakład Jastrzębie Oddział Moszczenica i SG 4 Zakład Pniówek wykazała, że w obu przypadkach wystąpiły, charakterystyczne obniżenia mocy silników w okresie ok. 12 ÷ 13 miesięcy, po przekroczeniu terminu, w którym miał zostać wykonany przegląd główny o oznaczeniu E-70.
2. Przyczyną obniżenia mocy silników były stwierdzone, zaniżone parametry ciśnienia mieszanki paliwowo – powietrznej oraz ciśnienia doładowania, które świadczyły o nieprawidłowej pracy turbosprężarek silników SG1 i SG4 (zanieczyszczenie).
3. Wpływ na obniżenie mocy silnika SG1 miało także stwierdzone, podwyższenie parametru temperaturowego mieszanki paliwowo – powietrznej, które świadczyło o nieprawidłowej pracy chłodnic mieszanki paliwowo – powietrznej (zanieczyszczenie).

Propozycja nowego harmonogramu przeglądów wraz z uproszczoną analizą ekonomiczną.

1. W oparciu o przeprowadzone badania nieniszczące wytypowanych elementów silnika jakimi były półpanewki, korbowody i elementy złączne oraz analizę parametrów ruchowych w okresach pracy silników, w których zaniechano / opóźniono wykonanie, zalecanego DTR urządzenia przeglądu głównego o oznaczeniu E-70, stwierdzono możliwość przesunięcia czasookresów wykonania przeglądów E-70 jak i przeglądów pośrednich E-60 silników. Przesunięcie nie powinno wynosić więcej niż $12 \div 13$ miesięcy. Dodatkowym elementem pomocniczym, pozwalającym wyciągnąć w/w wniosek są wykonane pomiary geometryczne zbieżności trzonków zaworowych. Pomiary te mają charakter kontrolny związany z utrzymaniem eksploatacyjnym silnika / silników.
2. Uwzględniając analizę parametrów ruchowych w badanym okresie, w szczególności, charakterystyczne obniżenie mocy silników spowodowane przez: zaniżone ciśnienie mieszanki paliwowo-powietrznej (ciśnienia doładowania) z tytułu nieprawidłowej pracy turbosprężarek oraz podwyższenie parametru temperaturowego mieszanki z tytułu zanieczyszczonych chłodnic mieszanki paliwowo-powietrznej należy przeprowadzić okresowy przegląd (czyszczenie) w/w elementów silnika, w okresie ok. $5 \div 6$ miesięcy przed wykonaniem głównego przeglądu E-70. Wykonane prace pozwolą na osiągnięcie mocy znamionowej urządzenia, tj. maksymalizację produkcji energii elektrycznej. Należy uznać, że obszary związane z chłodnicami mieszanki paliwowo-powietrznej oraz turbosprężarkami są elementami „krytycznymi”, w zakresie utrzymania ruchu i eksploatacji silników spalinowych.

Przedstawione wyniki badań pozwalają na stwierdzenie, że postawiona teza o możliwości uzyskania wymiernych korzyści ekonomicznych poprzez zmianę systemu przeglądów silników jest prawdziwa. Możliwe jest przesunięcie głównych remontów silników o okres ok. $12 \div 13$ miesięcy, co pozwala kształtować / optymalizować roczne budżety remontowe poprzez modelowanie nakładów finansowych, które będą ponoszone na ich wykonanie. Powyżej sformułowane wnioski i zalecenia pozwolą osiągnąć zakładane efekty:

- **ekonomiczne** (oszczędności związane z kosztami eksploatacji – wydłużenie okresów pracy, zmiana rozkładu nakładów finansowych związanych z głównymi przeglądami / remontami silników),
- **środowiskowe** (optymalna praca silników gazowych oraz ich bezawaryjna długoterminowa praca zmniejszająca emisję CH_4 do atmosfery),
- **poprawy bezpieczeństwa** (spalanie gazu z odmetanowania kopalń – większa ilość zagospodarowanego metanu),

W ostatnim czasie znaczącym aspektem, niejako spajającym powyższe efekty, będące wynikiem niniejszej pracy doktorskiej jest wprowadzone rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady, w sprawie redukcji emisji metanu w sektorze energetycznym 2021/0423 (COD) [45]. Powyższe rozporządzenie nakłada na przedsiębiorstwa, szczególnie wydobywcze (kopalnie), obowiązek znacznej redukcji emisji metanu do atmosfery w perspektywie kilku

najbliższych lat. Rozporządzenie zakłada zmniejszenie emisji metanu z szybów kopalń działających i kopalń nieczynnych. Pierwotnie Komisja Europejska zaproponowała bardzo restrykcyjne parametry tj. 0,5 tony metanu/kilotonę wydobywanego węgla do 2031 r. Następnie po osiągnięciu porozumienia przez Radę ds. Transportu, Telekomunikacji i Energii (TTE), zaproponowano zmianę projektu w taki sposób, aby od 1 stycznia 2027r. obowiązywało ograniczenie emisji metanu szybami wentylacyjnymi w kopalniach węgla kamiennego emitujących powyżej 5 ton metanu/kilotonę wydobywanego węgla, a od stycznia 2031r. 3 tony metanu/kilotonę węgla w przeliczeniu rocznym na kopalnię i na operatora, jeżeli jeden podmiot prowadzi kilka kopalń. Jak widać efektywne wykorzystanie metanu, uwalnianego podczas procesu wydobywania węgla między innymi w silnikach, jest kluczowe w świetle spełnienia obowiązujących i przyszłych wymagań prawnych.

13. Spis rysunków:

Rys. 1 Schemat sieci gazowej PTEP S.A. (przebieg trasy oznaczono kolorem żółtym).....	12
Rys. 2 Skojarzony Układ Energetyczno Chłodniczy (SUECh) w KWK Pniówek – PGNiG Termika Energetyka Przemysłowa S.A.	13
Rys. 3 Silnik typ CG 260 – 16 (oznaczenie silnika).....	18
Rys. 4 Podstawowe podzespoły i elementy silnika - Strona lewa silnika	19
Rys. 5 Podstawowe podzespoły i elementy silnika - Strona prawa silnika	20
Rys. 6 Oznaczenie stron silnika, numeracja cylindrów i kierunek obrotu silnika.....	21
Rys. 7 Pomiar zbicia trzonka zaworowego [10].....	28
Rys. 8 Przyrząd do obrotu wałka rozrządu [10]	28
Rys. 9 Zwór wlotowy i wylotowy silnika spalinowego [12].....	29
Rys. 10 Układ sterowania zaworami w głowicy cylindra [10].....	29
Rys. 11 Zdjęcie układu zaworowego cylindra silnika SG 1	30
Rys. 12 Pomiar zbicia trzonka zaworowego	30
Rys. 13 Układ zaworów wlotowych i wylotowych w głowicy cylindra silnika.	32
Rys. 14 Jednostka serwisowa	33
Rys. 15 Przykładowe uszkodzenie zaworów.....	34
Rys. 16 Przykładowe uszkodzenie tłoka silnika.....	34
Rys. 17 Rodzaje korbowodów [44].....	35
Rys. 18 Korbowody silnika typ TCG i CG	36
Rys. 19 Półpanewki silnika 2,0 MWe Silnik gazowy tłokowy CG170-20 Zakład Suszec	37
Rys. 20 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 1.....	41
Rys. 21 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 2.....	41
Rys. 22 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 3.....	42
Rys. 23 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 4.....	42
Rys. 24 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 5.....	42
Rys. 25 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 6.....	43
Rys. 26 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 7.....	43
Rys. 27 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder A 8.....	43
Rys. 28 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 1.....	44
Rys. 29 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 2.....	44
Rys. 30 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 3.....	44
Rys. 31 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 4.....	45
Rys. 32 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 5.....	45
Rys. 33 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 6.....	45
Rys. 34 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 7.....	46
Rys. 35 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 1 – cylinder B 8.....	46
Rys. 36 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 1.....	47
Rys. 37 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 2.....	47
Rys. 38 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 3.....	48
Rys. 39 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 4.....	48
Rys. 40 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 5.....	48
Rys. 41 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 6.....	49
Rys. 42 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 7.....	49
Rys. 43 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder A 8.....	49
Rys. 44 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 1.....	50
Rys. 45 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 2.....	50
Rys. 46 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 3.....	50
Rys. 47 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 4.....	51
Rys. 48 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 5.....	51

Rys. 49 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 6.....	51
Rys. 50 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 7.....	52
Rys. 51 Wykres zbić trzonków zaworowych silnika SG 4 – cylinder B 8.....	52
Rys. 52 Zdemontowane elementy silnika SG4.....	53
Rys. 53 Półpanewki silnika SG1 i SG4.....	53
Rys. 54 Korbówód wraz ze śrubami, główka i stopa korbowodu silnika SG 1	54
Rys. 55 Badanie penetracyjne półpanewek silnika SG1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą penetrantu).....	55
Rys. 56 Badanie penetracyjne półpanewki silnika SG 1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą wywoływacza).....	55
Rys. 57 Badanie magnetyczno-proszkowe (MT) półpanewki silnika SG 1 i SG4.....	56
Rys. 58 Badanie penetracyjne korbowodów silnika SG 1 i SG4 (pokrycie półpanewek warstwą penetrantu i wywoływacza).....	57
Rys. 59 Elementy łączące korbowodów silników SG1 i SG4 – nakrętki.	57
Rys. 60 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.....	60
Rys. 61 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.	61
Rys. 62 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2020 – 30.06.2020.....	61
Rys. 63 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020.....	62
Rys. 64 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020.	63
Rys. 65 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2020 – 30.09.2020.....	63
Rys. 66 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	64
Rys. 67 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	65
Rys. 68 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	65
Rys. 69 Wartość zbijania trzonków zaworów silnika SG 1 Cylindry B 1 ÷ 8 30.11.2020r.	66
Rys. 70 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021.....	67
Rys. 71 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021.....	67
Rys. 72 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021.....	68
Rys. 73 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021.....	69
Rys. 74 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021.....	69
Rys. 75 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021.....	70
Rys. 76 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021.....	71
Rys. 77 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021.....	71
Rys. 78 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021.....	72
Rys. 79 Wykres mocy generatora silnika SG 1 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021.....	73
Rys. 80 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 1 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021.....	73
Rys. 81 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 1 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021.....	74
Rys. 82 Remont E-70 montaż nowego „short blocku”.....	74
Rys. 83 Wykres zawartość metanu w gazie dostarczonym z kopalń JSW S.A. do silnika SG 1	75
Rys. 84 Schematyczna ilustracja działania turbosprężarki.....	76
Rys. 85 Wykres temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej silnika SG 1 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021.....	77
Rys. 86 Wykres ciśnienia mieszanki paliwo-powietrze oraz ciśnienia doładowania silnika SG 1	78
Rys. 87 Turbosprężarka silnika typ TCG i CG	79
Rys. 88 Elementy szybkoobrotowe turbosprężarki SG1 silnik TCG (widoczne zanieczyszczenia) ...	80
Rys. 89 Wykres liczby usterek silnika SG 1 w latach 2015 – 2021	83
Rys. 90 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	84
Rys. 91 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	85
Rys. 92 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2020 – 31.12.2020.....	85
Rys. 93 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021.....	86

Rys. 94 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021	87
Rys. 95 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.03.2021	87
Rys. 96 Wykres temperatury mieszanki paliwowo-powietrznej SG 4 (strona A i B).....	88
Rys. 97 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021.....	89
Rys. 98 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021	89
Rys. 99 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.04.2021 – 30.06.2021	90
Rys. 100 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021.....	91
Rys. 101 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021	91
Rys. 102 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.07.2021 – 30.09.2021	92
Rys. 103 Wykres mocy generatora silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021.....	93
Rys. 104 Wykres temperatur w cylindrach A1 ÷ A8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021	93
Rys. 105 Wykres temperatur w cylindrach B1 ÷ B8 silnika SG 4 w okresie 01.10.2021 – 31.12.2021	94
Rys. 106 Wykres ciśnienia mieszanki paliwo-powietrze oraz ciśnienia doładowania silnika SG 4 w okresie 01.01.2021 – 31.12.2021.....	95
Rys. 107 Wykres liczby usterek silnika SG 4 w latach 2015 – 2021	99
Rys. 108 Przykładowe ceny energii elektrycznej TGE [15]	100
Rys. 109 Planowane koszty wykonania przeglądów E-60 i E-70 silników w latach 2023-2032 [mln zł]	103
Rys. 110 Planowane koszty wykonania przeglądów E-60 i E-70 silników w latach 2023-2032 [mln zł] – zmieniony harmonogram przeglądów	105
Rys. 111 Porównanie rozkładu kosztów przeglądów E-60 i E-70 silników wg pierwotnego i nowego harmonogramu w latach 2023-2032 [mln zł]	106

14. Spis Tabel:

Tabela nr 1 Podstawowa analiza metanu (wartości średnie z poszczególnych kopalń JSW S.A. lub byłych kopalń JSW S.A).	14
Tabela nr 2 Wykaz silników zabudowanych i eksploatowanych w PTEP S.A.	16
Tabela nr 3 Wykaz oznaczeń oraz zakresu prac konserwacyjnych silników typu TCG i CG [10].	23
Tabela nr 4 Wykaz oznaczeń oraz zakresu prac konserwacyjnych silników typu TBG [11].	25
Tabela nr 5 Wartości luzów zaworowych wlot i wylot oraz wartość graniczna zbiecia trzonka zaworowego silnika typ CG i TCG [DTR].....	32
Tabela nr 6 Zakres prac pomiarowo-badawczych i analitycznych.....	40
Tabela nr 7 Wyniki badań wizualnych (VT) zdemontowanych elementów silników SG 1 i SG 4	54
Tabela nr 8 Wyniki badań penetracyjnych (PT) zdemontowanych elementów silników SG1 i SG4.	57
Tabela nr 9 Rejestr awarii silnika SG 1 w okresie 2020 roku	81
Tabela nr 10 Rejestr awarii silnika SG 1 w okresie 2021 roku	82
Tabela nr 11 Rejestr awarii silnika SG 4 w okresie 2020 roku	96
Tabela nr 12 Rejestr awarii silnika SG 4 w okresie 2021 roku	97
Tabela nr 13 Zestawienie kosztów remontów E-60 i E-70 silników TCG i CG.	101
Tabela nr 14 Wieloletni plan głównych przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar)	102
Tabela nr 15 Wieloletni plan kosztów przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.	103
Tabela nr 16 Nowy wieloletni plan przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.	104
Tabela nr 17 Nowy wieloletni plan kosztów przeglądów silników TCG, CG i TBG (produkcji Caterpillar) E-60 i E-70.	105

15. Literatura:

- [1] Dyrektywa 2003/87/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dn. 13 października 2003 r. ustanawiająca system handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych w UE
- [2] Dyrektywa 2003/87/WE Parlamentu Europejskiego i Rady z dnia 13 października 2003 r. ustanawiająca system handlu przydziałami emisji gazów cieplarnianych we Wspólnocie oraz zmieniająca dyrektywę Rady 96/61/WE (Dz.U. L 275 z 25.10.2003, s. 32–46)
- [3] DECYZJA PARLAMENTU EUROPEJSKIEGO I RADY (UE) 2015/1814 z dnia 6 października 2015 r. w sprawie ustanowienia i funkcjonowania rezerwy stabilności rynkowej dla unijnego systemu handlu uprawnieniami do emisji gazów cieplarnianych i zmiany dyrektywy 2003/87/WE
- [4] J. Wilczarska.: „Zastosowanie metod ultradźwiękowych w procesie regeneracji części maszyn” – Inżynieria i Aparatura Chemiczna, nr 2/2014, ss.125 - 126.
- [5] <http://www.stalnierzewna.com/bazawiedzy/metody-badan-penetracyjnych/>
- [6] http://proeuro.pl/badaniadt/?gclid=CIHm6dabossCFfQW0wod_JUKEQ
- [7] http://www.kalla.pl/index.php?option=com_content&view=article&id=30&Itemid=6&lang=pl
- [8] <http://www.pcb.com.pl/MT-badaniamagnetyczno-proszkowe.html>
- [9] <https://www.sgs.com/pl-pl/aktualności2022/02/metody-badan-nieniszczacych>
- [10] DTR firmy Caterpillar
- [11] DTR firmy Deutz (MWM)
- [12] J. Smolczyk, B. Pachutko, E. Gralak, H. Woźniak: „Badania struktury i naprężeń własnych w grzybkach zaworów silników spalinowych” - Obróbka Plastyczna Metali vol. XXVI nr 3 (2015), s. 219–228 Metal Forming vol. XXVI no. 3 (2015), pp. 219–228
- [13] J. Merkisz, S. Radzimirski.: „Stan obecny i przewidywane zmiany w europejskich przepisach o emisji zanieczyszczeń z samochodów ciężarowych i autobusów” - Transport Samochodowy 2009, nr 2, s. 41–70
- [14] Bosch Team.: „Układy wtryskowe - Unit Injector System/Unit Pump System (UIS/UPS) - Informator Techniczny Bosch” - Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa 2014
- [15] <https://www.tge.pl> – strona główna Towarowej Giełdy Energii
- [16] P. Zajac.: „Silniki pojazdów samochodowych” Kwalifikacja MG.18 - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności Warszawa
- [17] M. Filipczak, J. Jajczyk.: „Badanie układu turbodoładowania w silnikach spalinowych ZS” - Poznań University of Technology Academic Jurnal No 92 2017
- [18] W. Serdecki.: „Badania silników spalinowych i ich układów funkcjonalnych” - Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 2001
- [19] Z. Chłopek, T. Szczepański: „Aktualny stan wiedzy i prowadzone badania na temat dynamicznych stanów pracy silników spalinowych” – XIII Konferencja Szkoleniowa „Badania Techniczne Pojazdów w Świetle Obowiązujących Przepisów – 2012”
- [20] M. Cichy: „Nowe metody badawcze silników spalinowych i środki techniczne ich realizacji” - grant badawczy KBN, 1995-1998
- [21] E. Giakoumis.: “Cylinder wall insulation effects on the first- and second law balances of a turbocharged diesel engine operating under transient load conditions” - Energy Conversion and Management 48, Wydawnictwo Science Direct 2007
- [22] E. Giakoumis, C. Rakopoulos.: “Parametric study of transient turbocharged diesel engine operation from the second-law perspective” - Paper No. 2004-01- 1679, Wydawnictwo SAE 2004,
- [23] A. Ubysz.: „Wyznaczanie kwazistacjonarnych warunków pracy silnika ZI w samochodzie” - Czasopismo Techniczne M, Wydawnictwo Politechniki Krakowskiej,
- [24] T. Rychter, A. Teodorczyk. : „Teoria silników tłokowych” - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [25] S. Luft.: „Podstawy budowy silników” - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [26] J. Wajand.: „Tłokowe Silniki Spalinowe” - WNT. Warszawa 1993.
- [27] J. Wajand.: „Tłokowe silniki spalinowe średnio i szybkoobrotowe” - WNT, Warszawa 2005.

- [28] F. Rawski, C. Bocheński.: „Układy zasilania silników spalinowych” - Wydawnictwo Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1991.
- [29] S. Radziński.: „Układy zasilania gaźnikowych silników samochodowych” – Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1985.
- [30] J. Jezierski.: „Technologia tłokowych silników wysokoprężnych” - WNT, Warszawa 1999
- [31] M. Bernhard.: „Badania trakcyjnych silników spalinowych” - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 1970
- [32] Z. Chłopek, W. Danilczyk, S. Kruczyński.: „Analiza stanów pracy silnika w warunkach eksploatacji trakcyjnej” - 23rd International Conference of Combustion Engines, Journal of KONES 1997
- [33] J. Nuskowski, G. Thompson.: “The influence of accelerator pedal position control during transient laboratory testing on heavy duty diesel engine” - Paper No. 2009-01-00619, Wydawnictwo SAE 2009
- [34] J. Jantos, J. Mamala: „Zużycie paliwa podczas ruchu samochodu ze zmienną prędkością, Konstrukcja, badania, eksploatacja, technologia pojazdów samochodowych i silników spalinowych” - PAN oddział w Krakowie, Teka Komisji Naukowo-Problemovej Motoryzacji, Kraków 1999
- [35] R. Longwic.: „Charakterystyka działania silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach swobodnego rozpędzania” - Politechnika Lubelska, Lublin 2011,
- [36] R. Longwic.: „Analiza procesu ciśnienia indykowanego silnika o zapłonie samoczynnym w warunkach nieustalonych” - Monografia. Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2005
- [37] J. Serrano i inni.: “Cycle-to-cycle diesel combustion characterization during engine transient operation” - Paper No. 2001-01-3262, Wydawnictwo SAE 2001
- [38] H. Gunther.: „Diagnozowanie silników wysokoprężnych” - Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2006
- [39] P. Zając., L.M. Kołodziejczyk.: „Silniki spalinowe” - Wydawnictwa Szkolne i Pedagogiczne, Warszawa 2001
- [40] Przepisy Polski Rejestr Statków (PRS): „Publikacja Nr 80/P – Badania nieniszczące” – lipiec 2021,
- [41] B. Woronko, T. Jeleń, A. Wojciechowski.: „Ekologiczne płyny niskokrzepnące w układach chłodzenia silników spalinowych” – Instytut Transportu Samochodowego – Journal of KONES Internal Combustion Engines 2023, vol. 10, 3-4.
- [42] Z. Chłopek.: „Ochrona środowiska naturalnego” - seria Pojazdy Samochodowe, Wydawnictwo Komunikacji i Łączności, Warszawa 2002.
- [43] J. Merksiz.: „Ekologiczne problemy silników spalinowych” - Wydawnictwo Politechniki Poznańskiej 1998
- [44] Korbowody, czyli konstrukcja i działanie układu korbowego - część 2 (autokult.pl)
- [45] Rozporządzenie Parlamentu Europejskiego i Rady w sprawie redukcji emisji metanu w sektorze energetycznym 2021/0423 (COD).
- [46] T. Hejwowski, H. Dębski, G. Koszałka.: „Analiza numeryczna przyczyn uszkodzeń głowicy i zaworów silnika o zapłonie samoczynnym” – PTNSS-2011-S.C.-195