

Adrianna NIDZGORSKA ORCID 0009-0009-3528-5871,
adrianna.nidzgorska@itwl.pl – corresponding author
Mirosław WITOŚ ORCID 0000-0002-9660-4399, miroslaw.witos@itwl.pl
Jerzy PERCZYŃSKI ORCID 0000-0003-1379-6362, jerzy.perczynski@itwl.pl
Artur KUŁASZKA ORCID 0000-0002-8318-5877, artur.kulaszka@itwl.pl
Air Force Institute of Technology (Instytut Techniczny Wojsk Lotniczych), Poland

SILNIK LOTNICZY JAKO OBIEKT BADAŃ TRIBOLOGICZNYCH

Aero-engine as the object of tribological research

Streszczenie: *Podczas pracy silników lotniczych (turbinowych i tłokowych) występują procesy zużycia w węzłach tribologicznych, które w znaczny sposób wpływają na niezawodność i bezpieczeństwo eksploatacji statków powietrznych. W artykule przedstawiono aspekty diagnostyki tribologicznej silników lotniczych bazującej na okresowych badaniach próbek środka smarnego w laboratoriach. Na początku przedstawiono obiekt badań z uwzględnieniem cech konstrukcyjnych, parametrów pracy i stosowanych środków smarnych oraz podstawy teoretyczne badań tribologicznych. Następnie opisano metody badań stosowane w diagnostyce tribologicznej silników lotniczych, uwzględniając procesy starzenia i zanieczyszczenia środków smarnych, normy, metodyki badawcze i doświadczenia eksploatacyjne opisane w literaturze, w tym krzywą podatności eksploatacyjnej. Możliwości metod badawczych zobrazowano wynikami z okresowych badań tribologicznych silników turbinowych, uzyskanymi w akredytowanym laboratorium diagnostyki systemów tribologicznych. W dalszej części wskazano rolę analizy trendu i kryteriów statystycznych w procesie diagnozowania i zarządzania ryzykiem eksploatacji silników lotniczych, eksploatowanych zarówno według stanu technicznego, jak i planowanych usług technicznych (resursów). Zasygnalizowano możliwość poprawy wiarygodności diagnostyki tribologicznej silników lotniczych na bazie doświadczeń z przemysłu – monitorowania wybranych parametrów tribologicznych w czasie rzeczywistym. W podsumowaniu wskazano na wysoką efektywność i rolę diagnostyki tribologicznej w utrzymaniu bezpieczeństwa eksploatacji floty różnych typów statków powietrznych.*

Słowa kluczowe: lotnictwo, tarcie, diagnostyka, badania tribologiczne, silnik lotniczy, instalacja olejowa

Abstract: During the operation of aero-engines (turbine and piston engines), wear processes occur in tribological nodes, which significantly affect the reliability and safety of flight operations. This paper presents aspects of tribological diagnostics of aircraft engines based on periodic testing of lubricant samples in laboratories. Firstly, the object of research with its design features, operating parameters and used lubricants is presented, as well as the theoretical basis of tribological testing. This was followed by a description of the testing methods used in tribological diagnostics of aero-engines, taking into account lubricant degradation and contamination processes, standards, testing methodologies and operating experience described in the literature, including the machine failure curve. Next, the capabilities of the testing methods are illustrated with results from periodic tribological testing of turbine engines, obtained at an accredited tribological systems diagnostics laboratory. In the following section, the role of trend analysis and statistical criteria in the process of diagnosing and managing the risk of operation of aero-engines, exploited according to both their technical condition and planned maintenance, was indicated. Then, the possibility of improving the reliability of tribological diagnostics of aero-engines on the basis of experience from industry - real-time monitoring of selected tribological parameters - was signalled. In conclusion, the high efficiency and role of tribological diagnostics in maintaining the operational safety of a fleet of different aircraft types is indicated.

Keywords: aviation, friction, diagnostics, tribological testing, aero-engine, oil system

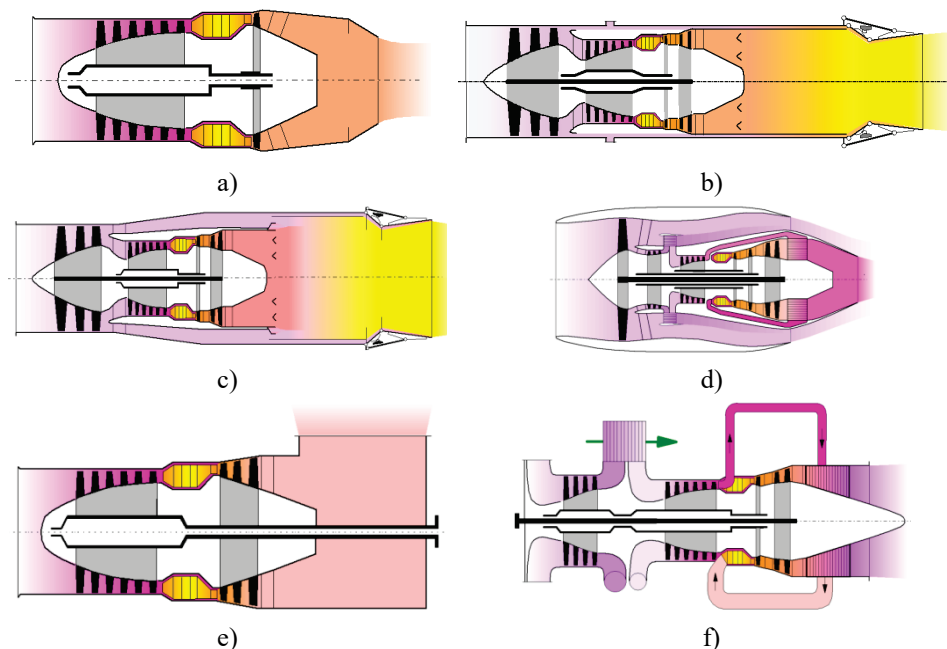
Received: July 21, 2023 / Revised: August 30, 2023 / Accepted: September 27, 2023

1. Wprowadzenie

Do napędu samolotów i śmigłowców wykorzystuje się tłokowe i turbinowe silniki lotnicze (odrzutowe, śmigłowe i śmigłowcowe), w których występują liczne węzły tarcia i strefy wysokiej temperatury. Węzły tarcia są smarowane, aby spowolnić negatywne skutki procesów tribologicznych i degradacji termicznej. W celu zapewnienia bezpiecznej ich eksploatacji wykonywane są okresowe badania tribologiczne z wykorzystaniem różnych standaryzowanych metod badań i technik pomiarowych.

Silniki turbinowe o różnej konstrukcji (Rys. 1) są powszechnie stosowane do napędu statków powietrznych, zarówno w lotnictwie cywilnym, jak i wojskowym. Ich zadaniem jest przetworzenie energii chemicznej paliwa w procesie spalania na entalpię spalin, a następnie wytworzenie:

- **siły ciągu** (silniki odrzutowe jedno- i dwuprzepływowe oraz wentylatorowe) poprzez wykorzystanie zjawiska odrzutu gazów wylotowych oraz niewielkiego momentu obrotowego niezbędnego do napędu sprężarki i agregatów lub
- **momentu obrotowego** na wale napędowym śmigła/wirnika nośnego (silniki śmigłowe i śmigłowcowe) poprzez przekształcenie entalpii w turbinie napędowej (wytwornicy gazów) oraz ciągu resztkowego w dyszy wylotowej.



Rys. 1. Przykładowe rozwiązania konstrukcyjne turbinowych silników lotniczych [1]: a) silnik turbinowy; b) silnik turboodrzutowy dwuwałowy z dopalaczem; c) dwuprzepływowy silnik odrzutowy z dopalaczem i dwoma wałami; d) silnik turbowentylatorowy trzywałowy z rekuperacją i chłodnicą; e) silnik turbowałowy śmigłowiecowy; f) silnik turbowałowy śmigłowiecowy z rekuperacją i chłodnicą

Głównymi komponentami silnika turbinowego są [2]: kanał gazodynamiczny (w tym: wlot powietrza, wentylator/sprężarka, komora spalania, turbina i dysza wylotowa), układ kinematyczny, instalacja olejowa, instalacja paliwowa oraz instalacja elektryczna. Cechą charakterystyczną konstrukcji tych silników są dwie strefy: chłodna i gorąca, co w przypadku błędów eksploatacji (m.in. braku właściwego podgrzewania i chłodzenia silnika, niewłaściwego wykonania obsługi polotowych) sprzyja wystąpieniu:

- skrzywienia termicznego wału,
- przyspieszonej degradacji zmęczeniowej łożysk i kół zębatach,
- przyspieszonej oksydacji, nitracji, sulfatacji oraz koksowaniu oleju [3].

W pracy przedstawiono wybrane metody badań tribologicznych silników lotniczych oraz typowe problemy eksploatacyjne wykrywane tymi metodami. Celem artykułu jest przedstawienie głównych aspektów diagnostyki tribologicznej na wybranych przykładach eksploatacyjnych.

1.1. Charakterystyka problemu eksploatacyjnego

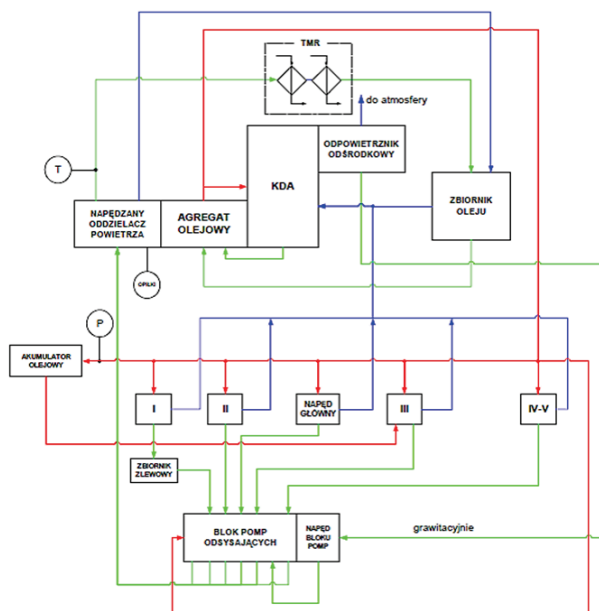
Pary tribologiczne są składowymi różnych podzespołów silnika o znanych parametrach i charakterystykach (m.in. rodzaju materiałów konstrukcyjnych, wielkości luzu, poziomu obciążeń, wydatku przepływu). Niezawodność i trwałość węzła tarcia (m.in. w łożyskach, przekładni zębatej, połączeniu wielowpustowym) decyduje o bezpieczeństwie lotu i wykonaniu misji przez załogę statku powietrznego, w związku z czym niezbędne jest jego monitorowanie [4].

Zasadniczą rolę w prawidłowym funkcjonowaniu silników lotniczych odgrywa instalacja olejowa (rys. 2), której zadaniem jest [5]:

- zapewnienie odpowiedniego smarowania i chłodzenia współpracujących par tribologicznych (rys.3),
- odprowadzenie produktów zużycia tribologicznego do zbiornika instalacji olejowej,
- filtrowanie oleju w celu zapewnienia jego czystości w magistrali tłocznej.

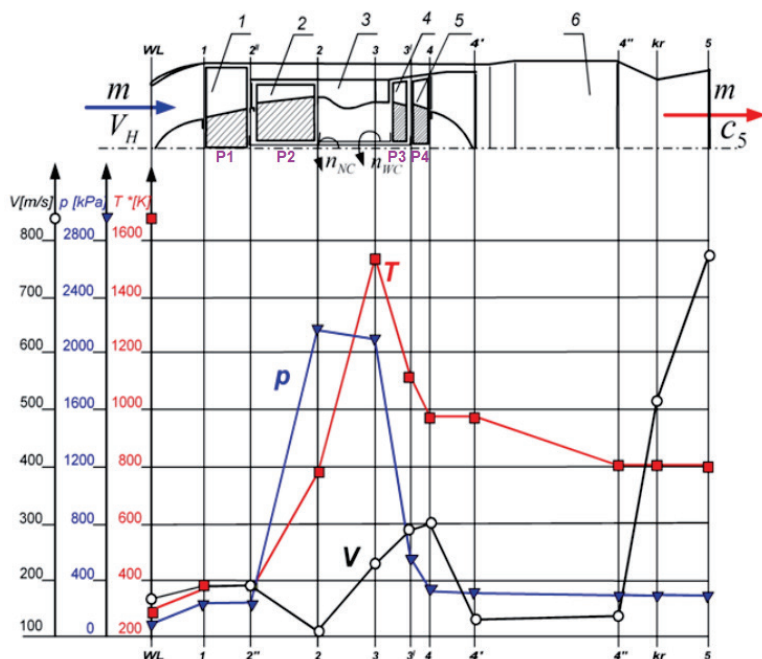
Instalacja olejowa jest wyposażona w:

- czujnik temperatury na linii niskiego ciśnienia (magistrali zlewu),
- czujnik ciśnienia oleju na linii wysokiego ciśnienia (magistrali tłoczenia),
- czujnik opiłków do wykrywania ferromagnetycznych produktów zużycia tribologicznego.



Rys. 2. Schemat instalacji smarowania i odpowietrzania przykładowego silnika odrzutowego z cyrkulacją oleju typu otwarto-zamkniętego [6]

- T – czujnik temperatury
 P – czujnik ciśnienia
 Opiłki – sygnalizator opiłków
 I, II, III, IV, V – podpory wału wirnika
 KDA – skrzynka napędu agregatów
 TMR – chłodnica paliwowo-olejowa
- — — — — linia wysokiego ciśnienia
 — — — — — linia niskiego ciśnienia
 — — — — — linia odpowietrzenia



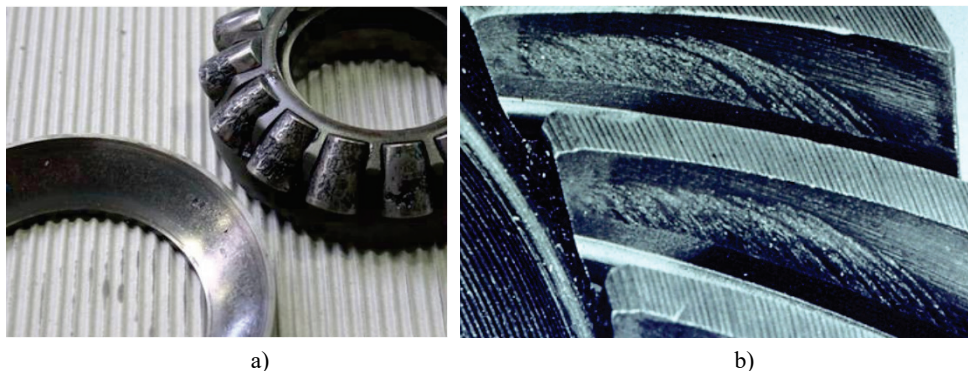
Rys. 3. Zmiana parametrów gazodynamicznych wzdłuż przekroju dwuprzepływowego silnika odrzutowego: 1 – wentylator; 2 – sprężarka wysokiego ciśnienia; 3 – komora spalania; 4 – turbina wysokiego ciśnienia; 5 – turbina niskiego ciśnienia; 6 – dopalacz; P1÷P4 – pary tribologiczne [7]

Parametry pracy węzłów tarcia wpływają na parametry ich zużycia tribologicznego – proces degradacji powierzchniowej materiałów pary kinematycznej występujący pod wpływem tarcia, podczas którego następuje ubytek masy trących elementów oraz zmiany struktury i fizycznych własności warstw wierzchnich obszarów styków (Rys. 4). Zużyciem tribologicznym są m.in.:

- zużywanie adhezyjne powierzchni trących,
- zużywanie ściernie związane z chropowatością powierzchni styku,
- zużywanie przez *scuffing* (ściernie i adhezyjne),

- zużywanie zmęczeniowe przez cyklicznie odkształcenia warstwy wierzchniej (*spalling* – zużycie przez łuszczenie; *pitting* – zużycie gruzełkowe),
- zużywanie erozyjne w wyniku uderzenia drobnych cząstek,
- zużywanie chemiczne wskutek reakcji chemicznych zachodzących między współpracującymi materiałami i środkiem smarnym,
- zużywanie cieplne w wyniku wydzielania się dużej ilości ciepła w węźle tarcia i obniżenia lepkości środka smarnego,
- zużywanie przez *fretting* [8] – proces związany ze zjawiskami mechanicznymi, cieplnymi, chemicznymi i elektrycznymi zachodzącymi w obszarze kontaktu skojarzonych elementów tarciovych [9–11].

W silnikach lotniczych najczęściej dominującym procesem tribologicznym jest zużywanie ściernie.



Rys. 4. Zużycie tribologiczne [12]: a) elementów łożyska; b) zębów koła zębatego

Oczekiwana ilość powstających zanieczyszczeń metalicznych jest opisywana przez modele ww. procesów tribologicznych, w których uwzględnia się m.in.: typ i parametry smarowania węzła tarcia, drogę i prędkość ślizgania elementów trących, obciążenie [13-15]. Z ponad 180 równań i ponad 600 zmiennych występujących w literaturze opisującej zużywanie tribologiczne [16] najczęściej używane są trzy podstawowe równania do analizy procesów zużywania ściernego: model Archarda, Rhee'a i częściowego zużycia kontaktowego w szczelinie ze środkiem smarnym (ang. *the partial-EHL model*).

Równanie zużycia Archarda (1) jest prostym modelem używanym w tribologii do opisu zużycia ślizgowego, który bazuje na teorii kontaktu asperity – nierówność powierzchni i chropowatości [13].

$$Q = K \frac{W \cdot L}{HB} \quad (1)$$

gdzie: Q – całkowita ilość wytwarzanych zanieczyszczeń związanych ze zużyciem tribologicznym; K – stała bezwymiarowa; W – całkowite obciążenie normalne; L – odległość poślizgu współpracujących elementów; HB – twardość w skali Brinella najdelikatniejszych powierzchni stykających się.

Iloczyn $W \cdot L$ jest proporcjonalny do pracy wykonanej przez siły tarcia opisane w hipotezie Reye'a. Wartość K wyznacza się z wyników eksperymentalnych i zależy od kilku czynników, m.in. jakości powierzchni, powinowactwa chemicznego między materiałem dwóch trących powierzchni, twardości powierzchni, wymiany ciepła między dwiema powierzchniami.

Bardziej złożonym modelem jest równanie zużycia Rhee'a (2), w którym k i F są współczynnikami tarcia i siłą normalną w kontakcie dwóch współpracujących ciał, natomiast współczynniki a , b , c odwzorowują empiryczne parametry specyficzne do tarcia materiału i warunków środowiska pracy [13].

$$\Delta w = k \cdot F^a \cdot v^b \cdot t^c \quad (2)$$

Model częściowego zużycia kontaktowego w szczelinie ze środkiem smarnym jest wyrażony równaniem (3):

$$dw = \frac{udt}{dA} [\delta_0 e^{-(\Delta/2u\tau)} - h]^2 \frac{\Delta}{\delta_0} \quad (3)$$

gdzie: w – straty materiału przy stałej temperaturze; A – powierzchnia zużycia; u – prędkość ślizgania; t – czas poślizgu; h – grubość filmu olejowego, δ_0 – wysokość pików chropowatości, Δ – długość falowa pików chropowatości, τ – czas opóźnienia materiału przeciwnego.

Objętość usuniętych szczątków materiału spowodowanych ścieraniem jest proporcjonalna do pracy wykonanej przez siły tarcia. Produkty zużycia tribologicznego są wypłukiwane przez środek smarny i krążą w instalacji olejowej, co wykorzystano w diagnostyce tribologicznej.

Uwzględniając ww. modele ścierania materiału w węzłach tarcia dostrzega się, że dla silników lotniczych podstawowymi danymi wejściowymi do modelowania zużycia tribologicznego i oceny trendów wyników badań tribologicznych są:

- lepkość, gęstość, czystość i poziom degradacji chemicznej oleju,
- rzeczywisty profil eksploatacji silnika, m.in.: czasy pracy (całkowity, od ostatniego remontu), liczba uruchomień, prędkość obrotowa silnika i czas pracy silnika w danym zakresie prędkości obrotowej (lub całka z prędkości obrotowej), liczba i dynamika zmian zakresów pracy z uwzględnieniem parametrów lotnych statku powietrznego i warunków otoczenia,

- profil eksploatacji statku powietrznego: wysokość i prędkość lotu, przyspieszenia liniowe i kątowe.

Parametry rzeczywistych profili eksploatacji silników i statków powietrznych są dostępne w danych z pokładowych rejestratorów parametrów lotu i są znane tylko użytkownikowi techniki lotniczej. Laboratorium wykonujące badania tribologiczne oleju z silników lotniczych uzyskuje jedynie informacje pomocnicze, m.in.: numer silnika, datę pobrania oleju, nalot, typ środka smarnego – żaden z tych parametrów nie jest zmienną w modelach zużycia tribologicznego.

W silnikach lotniczych stosuje się oleje mineralne i syntetyczne, które zawierają substancje bazowe oraz dodatki modyfikujące właściwości smarne i trwałościowe środka smarnego [17]. Substancja bazowa jest mieszaniną związków organicznych uzyskaną podczas przetwarzania ropy naftowej lub innych kopalin, oleju pochodzenia roślinnego i zwierzęcego lub produkcji oleju syntetycznego na drodze syntezy chemicznej. Do podstawowych dodatków uszlachetniających należą [18, 19]:

- AO (ang. *anti-oxidant*) – przeciwstarzeniowe, przeciwutleniacze (aminy, fenole, fosforany, siarka organiczna lub różne związki typu ditiofosforanu cynku (Zn-DTP), zwiększające żywotność środka smarnego oraz zmniejszające ilość żywici i substancji korozyjnych;
- AW (ang. *anti-wear*) – ochrona przed zużyciem ściernym, która odbywa się przez tworzenie deformowalnych warstewek reakcyjnych i polepszenie śladu dolegania;
- EP (ang. *extreme pressure*) – na wysokie naciski powierzchniowe (związki organiczne zawierające P, Cl lub S, w tym chlorowane parafiny lub aromaty, di- lub polisiarczanowe związki organiczne, siarkowane oleje mineralne, estry kwasu arylo(alkilo)fosforowego, chlorowane i siarkowane kwasy tłuszczowe lub olefiny, estry kwasu fosforowego, kwas i glikol polialkilenowy) – dodatki reagują z chropowatością metalicznego przedmiotu „obrabianego” powyżej progu wysokoenergetycznego, zapobiegając przenoszeniu mikro wiórów na powierzchnię „narzędzia” i tworzeniu się narostu na „ziarnie ściernym” (procesy odzwierciedlające tendencję do zacierania się pary czarnej). Działanie tych dodatków polega na chemicznym polerowaniu powierzchni metalu;
- inhibitory korozji – zapobiegają korozji i rdzy poprzez tworzenie warstewki antykorozyjnej na powierzchni metalu;
- polepszacze VI (ang. *viscosity index*) – wpływają na zmniejszenie zależności lepkości od temperatury.

W silnikach turbinowych są najczęściej używane oleje spełniające normę SAE AS5780, a w silnikach tłokowych oleje spełniające normy SAE J1899 lub J1966, z ograniczeniami eksploatacyjnymi wymienionymi jako nazwy marek określonych preparatów olejowych. Określenie SAE AS5780, J1899 lub J1966 bez podania marki oleju

jest również dopuszczalne, jeśli producent silnika wykazał, że każdy olej o właściwościach mieszczących się w zakresie kryteriów w specyfikacji jest dopuszczalny do stosowania w przedmiotowym silniku [20].

Jedną z cech indywidualnych środka smarnego jest lepkość kinematyczna ν i lepkość dynamiczna η , pomiędzy którymi zachodzi relacja (4), w której ρ jest gęstością środka smarnego.

$$\eta = \frac{\nu}{\rho} \quad (4)$$

Lepkość kinematyczna odwzorowuje zdolność oleju do utrzymywania płynności w normalnych i wysokich temperaturach oraz opory przepływu, jakie stawia środek smarny podczas przemieszczania się przez otwór o danej średnicy. Wartość lepkości kinematycznej jest nieliniowo zależna od temperatury i ciśnienia oleju, $\nu = f(t_o, p_o)$ (rys. 5a). Lepkość dynamiczna jest miarą oporu wewnętrznego cieczy na obciążenia dynamiczne i jest używana w analizie warunków pracy węzłów tarcia. Wartość lepkości dynamicznej jest również nieliniowo zależna od właściwości fizycznych i stanu termodynamicznego środka smarnego. Względna zmiana lepkości dynamicznej [21] opisana jest wzorem (5):

$$\bar{\eta} = \frac{\eta}{\eta_0} = \frac{\eta_{\infty}}{\eta_0} = 10^{G_0 \left(1 + \frac{t_o}{135}\right)^{-S_0} \left(1 + \frac{p_o}{2000}\right)^{D_2 - C_2 \log\left(1 + \frac{t_o}{135}\right)}} \quad (5)$$

gdzie: η – lepkość dynamiczna (absolutna) [cP]; t_o – temperatura oleju [°C]; p_o – ciśnienie [$\frac{kG}{cm^2}$]; G_0 – bezwymiarowa stała wskazująca na stopień lepkości cieczy; S_0 – bezwymiarowa stała określająca nachylenie krzywej na charakterystyce; C_2, D_2 – bezwymiarowe stałe określające wpływ ciśnienia.

W danej parze kinematycznej mogą występować różne typy tarcia, m.in. suche, mieszane, hydrodynamiczne, awaryjnego zacierania (rys. 5b i 5c), które mają różne wartości współczynnika tarcia i w różny sposób wpływają na dynamikę zużycia tribologicznego współpracujących powierzchni. Tarcie zmienia się wraz ze wzrostem prędkości przy danej lepkości i obciążeniu. Typ tarcia jest odwzorowany poprzez liczbę Herseya [22], co opisuje relacja (6):

$$\text{liczba Herseya} = \eta \frac{N_p}{P} = \nu \cdot \rho \frac{N_p}{P} \quad (6)$$

gdzie: η – dynamiczna lepkość płynu [$Pa \cdot s = N \cdot \frac{s}{m^2}$]; ν – kinematyczna lepkość płynu [$\frac{m^2}{s}$]; ρ – gęstość płynu [$\frac{kg}{m^3}$]; N_p – prędkość porywania płynu [$\frac{m}{s}$]; P – składowa normalna obciążenia na długości kontaktu tribologicznego [$\frac{N}{m}$].

Bieżąca lepkość oleju i liczba Herseya są zależne od zakresu pracy silnika lotniczego, parametrów lotu statku powietrznego i warunków otoczenia oraz początkowych właściwości fizykochemicznych oleju.

Na proces przyspieszonego zużywania tribologicznego i chemicznego wężła tarcia i przestrzeni wewnętrznej instalacji olejowej mają również wpływ typowe problemy eksploatacyjne silników lotniczych, m.in.:

- przyspieszona degradacja właściwości fizykochemicznych środka smarnego;
- obecność wody, paliwa, osadów i zanieczyszczeń zewnętrznych w instalacji olejowej,

które mogą być generowane przez błędy: szkolenia, eksploatacji silnika, remontowe czy zabezpieczenia logistycznego. Ten sam typ silników lotniczych będzie miał inne wskaźniki zużywania tribologicznego u różnych użytkowników.

Postępująca degradacja właściwości fizykochemicznych oleju – utlenianie, nitracja i zasiarczenie – ma wpływ na:

- właściwości smarne i współczynnik tarcia w parach kinematycznych,
- ryzyko i dynamikę korozji i innych procesów chemicznych na smarowanych powierzchniach,
- dobór okresu używalności oleju.

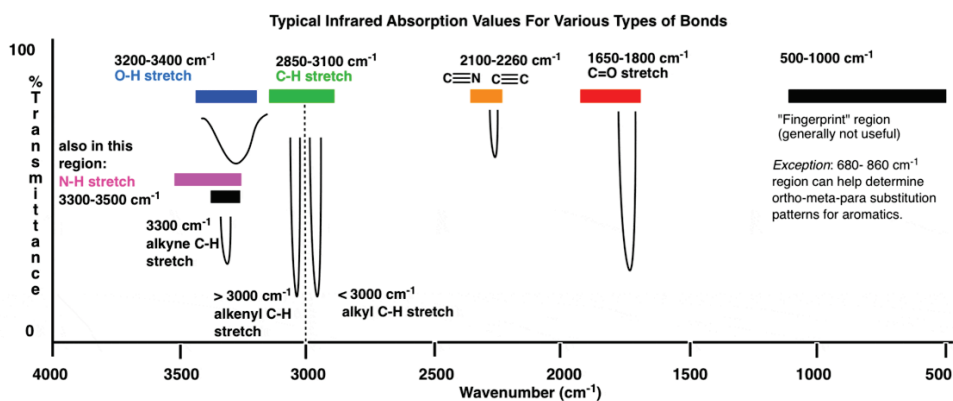
Niewłaściwe parametry fizykochemiczne środka smarnego są prekursorem: przyspieszonego zużycia tribologicznego par kinematycznych, zwiększonego ryzyka awarii i skrócenia trwałości eksploatacyjnej silnika lotniczego [23, 24].

Oksydacja (utlenianie) oleju jest naturalnym procesem jego starzenia i zużywania w trakcie eksploatacji. Podczas oksydacji następuje łamanie długich wiązań węglowodorowych (rys. 6) i pojawiają się produkty chemiczne pogarszające własności smarne i ochronę antykorozyjną, np. kwasy karbonylowe i substancje żywiczne oraz węgle w postaci grafitu [25]. Główną przyczyną przyspieszonej oksydacji oleju jest jego przegrzewanie, np.:

- podczas pracy silnika w zakresie startowym, gdy w gorącej części silnika są najwyższe wartości temperatur spalania paliwa i spalin,
- po wyłączeniu silnika bez wcześniejszego chłodzenia, gdy gorąca część silnika stygnie przy braku cyrkulacji środka smarnego.

W tribologii przyjmuje się, że zmiana temperatury oleju powyżej temperatury pracy zalecanej przez producenta silnika o każde 10 K skraca dwukrotnie żywotność oleju oraz zmienia warunki pracy wężła tarcia, obniżając jego trwałość.

Poziom oksydacji oleju można precyzyjnie monitorować metodą spektrometrii w podczerwieni. Miarą diagnostyczną jest zmiana widma FTIR (ang. *Fourier-Transform InfraRed Spectroscopy*) zaabsorbowanego promieniowania elektromagnetycznego w paśmie widma podczerwonego wywołana przez produkty oksydacji (rys. 7). Bieżące wyniki badań FTIR i trendu parametrów oksydacji umożliwiają zaplanowanie wymiany oleju czy smaru w ramach normalnych czynności obsługowych. Od pewnego momentu oksydacja postępuje lawinowo, dlatego wychwycenie skoku dynamiki oksydacji pozwala ustalić optymalny okres wymiany oleju przed pojawieniem się negatywnych skutków w parze kinematycznej, np. wzmożonego zużycia ciernego, opiłkowania i korozji.



Rys. 7. Typowe wartości absorpcji w promieniowaniu IR dla różnych typów wiązań chemicznych [27]

Kolejnym procesem degradacji oleju jest nitracja – niepożądany proces nasycenia oleju rozpuszczalnymi lub nierozpuszczalnymi związkami tlenku azotu, w wyniku którego powstają dwa rodzaje związków azotowych: azotany organiczne i związki nitrowe. Azotany organiczne, stanowiące największą grupę związków azotu w zużytym oleju, przyczyniają się do:

- tworzenia szlamu i nagarów w instalacji olejowej i parach kinematycznych,
- skrócenia trwałości precyzyjnych par kinematycznych i żywotności filtrów.

Zwiększone stężenia związków nitrowych (świadczące o obecności nieprzereagowanych gazów z tlenkami azotu) zagęszczają nienaturalnie olej i przyspieszają wytworzenie się osadów i szlamu. Nitracja występuje w silnikach tłokowych oraz turbinowych z rekuperacją. Poziom nitracji oleju mierzy się spektrometrem FTIR w odpowiednim paśmie widma podczerwonego.

Siarka w oleju napędowym ma duży wpływ na poziom i rodzaj emisji spalin, własności korozyjne paliwa oraz trwałość, wydajność i sprawność katalizatorów. W silniku lotniczym

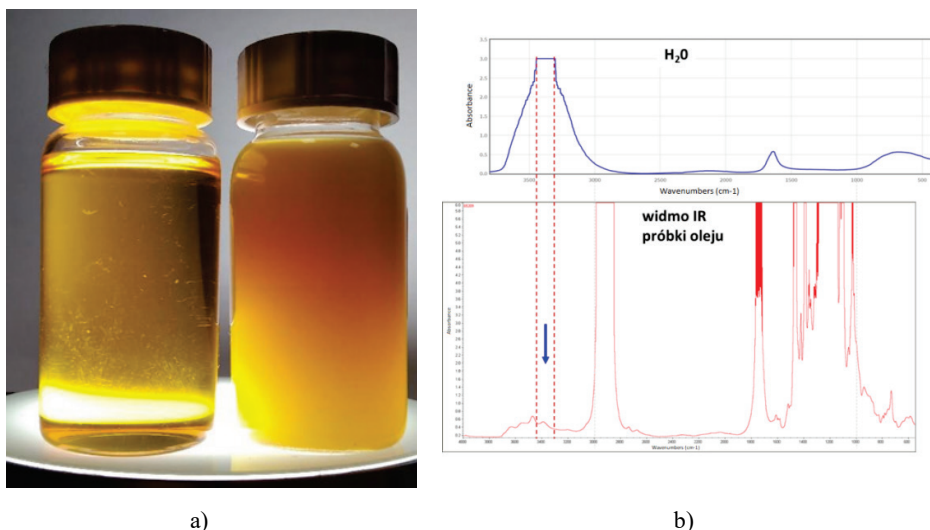
zmiany zasiarczenia środka smarnego są generowane przez smog i zanieczyszczenia chemiczne powietrza, które jest zasysane do silnika, węzłów tarcia i instalacji olejowej. Dlatego celowe jest badanie poziomu zasiarczenia oleju jako prekursora korozji.

Do podstawowych problemów eksploatacji silników lotniczych należą również: jakość dostaw świeżego oleju, obecność wody i paliwa w oleju oraz pozatribologiczne zanieczyszczenia oleju (wewnętrzne i zewnętrzne), np. laki odkładające się w zbiorniku, pyły przenikające z powietrza, rozpuszczone produkty uszczelnień. Ten problem jest wykrywany na podstawie:

- niezgodności z widmem wzorcowym FTIR oleju danego typu,
- obecności w oleju nietypowych pierwiastków lub poziomu pierwiastków niegenerowanych przez zużywanie tribologiczne.

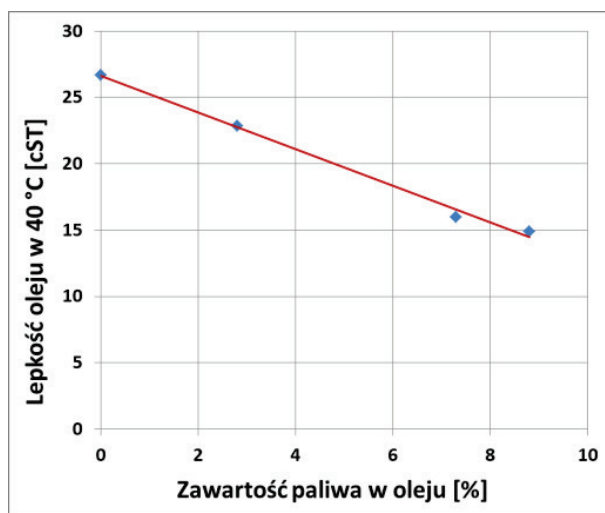
Problem związany z jakością dostaw świeżego oleju wynika m.in. z niewłaściwego składowania zbiorników oraz czystości pomieszczeń i instalacji w procesie produkcji. Należy mieć na uwadze, że nie zawsze nowy olej jest czysty [28]. Do zanieczyszczenia instalacji olejowej silnika lotniczego może dochodzić również podczas uzupełniania instalacji nowym olejem, szczególnie gdy ta czynność jest wykonywana w warunkach polowych.

Obecność wody w oleju związana jest ze skraplaniem się pary wodnej z powietrza podczas długotrwałego postoju (przy zmianach temperatury otoczenia) i podczas stygnięcia silnika po jego wyłączeniu. Woda przenika przez uszczelnienia wałków i zawory drenażowe. Do oceny zawartości wody w oleju wykorzystuje się m.in. metodę wizualną i analizę widma IR pobranej próbki (rys. 8).



Rys. 8. Widok: a) próbek czystego i zawodnionego oleju; b) widmo IR zawodnionego oleju

Paliwo może przedostawać się do oleju w chłodnicy paliwowo-olejowej poprzez wewnętrzne nieszczelności (produkcyjne lub eksploatacyjne) oraz w skrzynce napędu agregatów poprzez uszczelnienie podzespołów napędzających. Zawartość paliwa w oleju ma wpływ na lepkość kinematyczną – wraz ze wzrostem zawartości paliwa w oleju maleje lepkość kinematyczna (rys. 9).

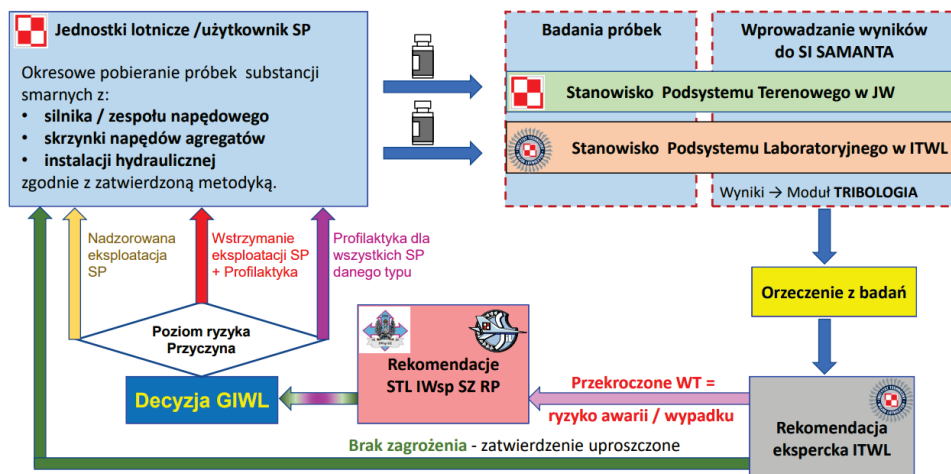


Rys. 9. Zależność pomiędzy zawartością paliwa w oleju a jego lepkością kinematyczną

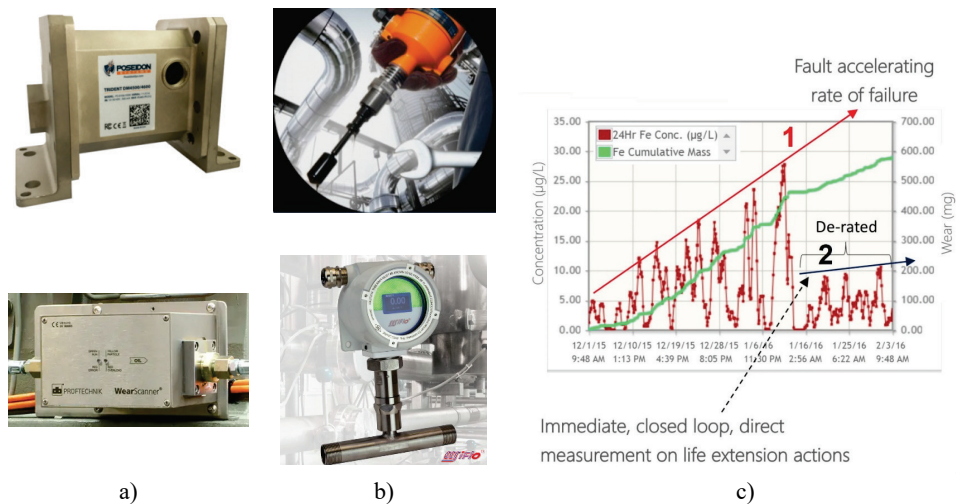
Diagnostyka tribologiczna jest jednym z podstawowych narzędzi wsparcia eksploatacji różnych maszyn i urządzeń, w tym statków powietrznych i silników lotniczych. Poprzez:

- okresowe monitorowanie bieżącego stanu technicznego badanej cieczy roboczej,
- wykrywanie skutków różnych procesów, m.in. w instalacji olejowej silnika i węzłach tarcia,
- wiarygodną diagnozę z badań tribologicznych

użytkownik uzyskuje dodatkowe informacje możliwe do wykorzystania w zarządzaniu ryzykiem awarii i wypadków oraz optymalizacji kosztów eksploatacji. Na rys. 10 zobrazowano przykład wykorzystania informacji z okresowej diagnostyki tribologicznej do zarządzania ryzykiem eksploatacji silników lotniczych i wojskowych statków powietrznych w Siłach Zbrojnych RP.



Rys. 10. Obieg informacji z badań tribologicznych i analizy stanu technicznego silników lotniczych w lotnictwie Sił Zbrojnych RP – zarządzanie ryzykiem jest realizowane przez użytkownika silników lotniczych na bazie rekomendacji z laboratorium badań tribologicznych, z uwzględnieniem aktualnego stanu wiedzy na świecie i akceptowalnych poziomów ryzyka



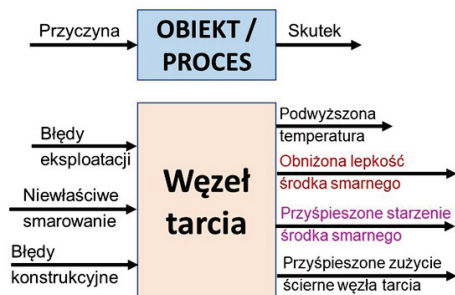
Rys. 11. Przykładowe rozwiązania proaktywnego sterowania zużyciem tribologicznym: a) czujnik cząstek metalicznych TRIDENT DM4500 [29] (górze) oraz licznik cząstek paramagnetycznych i ferromagnetycznych WEARSCANNER [30]; b) czujnik lepkości [31] (górze) i zawartości wody [32]; c) proaktywne sterowanie zużyciem tribologicznym elementów maszyny poprzez: 1) bieżące monitorowanie poziomu i dynamiki zmian koncentracji zanieczyszczeń metalicznych; 2) niewielkie zmiany parametrów pracy maszyny [33]

Diagnostyka tribologiczna może być realizowana również na bieżąco, podczas pracy maszyn i urządzeń, co umożliwi użytkownikowi: skuteczne proaktywne sterowanie niekorzystnymi procesami, znaczną poprawę bezpieczeństwa eksploatacji maszyn, wydłużenie trwałości maszyn i obniżenie kosztów eksploatacji. Takie rozwiązania diagnostyki tribologicznej w czasie rzeczywistym (uwzględniające współczesne możliwości metrologiczne i analityczne oraz teorię badań tribologicznych) stosuje się w przemyśle (rys. 11). W przemyśle coraz częściej stosowane są również dodatki do środków smarnych, m.in. wykonane w nanotechnologii, które zmniejszają tarcie w parach kinematycznych oraz zabezpieczają maszynę przed sytuacją awaryjną – suchym tarcie w przypadku braku oleju.

2. Podstawy teoretyczne badań tribologicznych

Diagnostyka tribologiczna silników lotniczych bazuje na:

- podstawach teoretycznych analizy przyczynowo-skutkowej, co odzwierciedla rys. 12;
- uznanych metodach diagnostycznych i międzynarodowych standardach [34], stosowanych również do diagnostyki tribologicznej innych maszyn i urządzeń [35];
- zaleceniach producentów silników lotniczych i dobrych praktykach opisanych w JOAP (ang. *Joint Oil Analysis Program*) [36], które uwzględniają cechy konstrukcyjne i specyfikę eksploatacji silników lotniczych (m.in. lot z przeciążeniami liniowymi i kątowymi podczas wykonywania średniego i wyższego pilotażu, lot odwrócony) oraz skutki ujawnienia krytycznego stanu technicznego podczas lotu (ryzyko awaryjnego lądowania samolotu w terenie przygodnym, katastrofy lotniczej, nieplanowanych napraw awaryjnych);
- procedurach badawczych [37] akredytowanych laboratoriów wykonujących diagnostykę tribologiczną silników turbinowych, z uwzględnieniem wskaźników niezawodnościowych i dopuszczalnego poziomu ryzyka stanu awaryjnego zaakceptowanego przez właściciela/użytkownika silników turbinowych, odwzorowanych w kryteriach diagnostycznych i częstości wykonywania badań.



Rys. 12. Węzeł tarcia jako źródło informacji diagnostycznej o procesie eksploatacji [38]

Poprzez monitorowanie stanu technicznego oleju (bazy i dodatków uszlachetniających) oraz poziomu jego zanieczyszczenia możliwe jest:

- zapobieganie pierwotnym przyczynom awarii silnika,
- wykrywanie błędów eksploatacji, niewłaściwego smarowania (niskiej jakości środka smarnego lub nadmiernego zanieczyszczenia instalacji),
- wykrywanie ukrytych błędów konstrukcyjnych, produkcyjnych i remontowych.

Monitorowanie narastającego zużycia ciernego (poziomu koncentracji pierwiastków metalicznych i ich trendu) umożliwia bezpieczną eksploatację maszyn i wykonanie dodatkowych zaplanowanych prac serwisowych w celu wymiany lub naprawy komponentów przed awarią / wypadkiem.

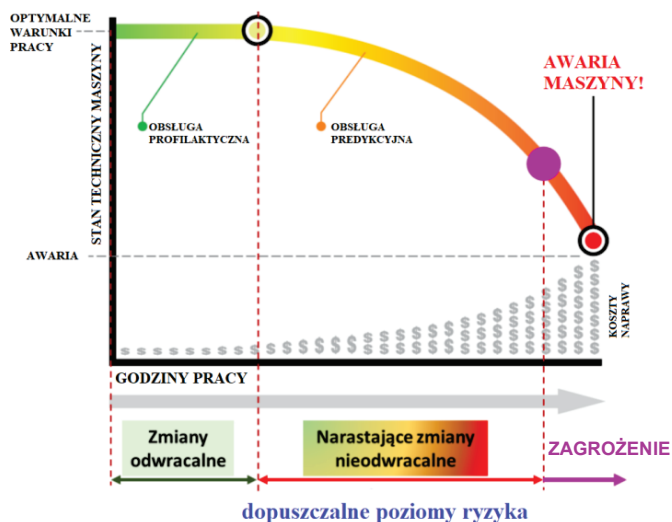
Idea badań tribologicznych silników lotniczych bazuje na:

- **oczekiwanych właściwościach** fizykochemicznych oleju i oczekiwanych źródłach pochodzenia pierwiastków w środku smarnym:
 - metale stopów konstrukcyjnych: Fe, Cr, Ni, Al, Cu, Pb, Sn, Cd, Ag, V,
 - pierwiastki dodatków uszlachetniających olej: Mg, Ca, Ba, P, Zn,
 - pierwiastki zanieczyszczeń: Si, Na, K,
 - metale pochodzące z innych źródeł: Ti, Mo, Sb, Mn, Li, B;
- **wymaganej klasie czystości** oleju, uwzględniającej zalecenia producenta silników i luzu w parach kinematycznych;
- **modelach numerycznych** procesów degradacji węzłów tribologicznych i degradacji produktów smarnych, odwzorowujących nieznane procesy stochastyczne występujące podczas eksploatacji silników u różnych użytkowników (zagadnienie antropotechniczne);
- **okresowej obserwacji** ilościowej i jakościowej parametrów środka smarnego pobranego z instalacji silnika, w tym poziomu koncentracji metalicznych produktów zużycia par tribologicznych oraz niemetalicznych pierwiastków obecnych w środku smarnym i na powierzchniach kontaktowych;
- **analizie numerycznej** wyników badań laboratoryjnych;
- **wnioskowaniu diagnostycznym**: ocenie bieżącego stanu technicznego układów tribologicznych i prognozie poziomu ich zużycia – informacji niezbędnej użytkownikowi silników lotniczych do zarządzania ryzykiem eksploatacji statków powietrznych na podstawie krzywej podatności eksploatacyjnej (rys. 13).

Analiza krzywej podatności eksploatacyjnej uświadamia, że wraz z upływem czasu eksploatacji silnika lotniczego:

- postępuje ukryta degradacja jego składowych, w tym par kinematycznych,
- rosną koszty ewentualnych napraw po wystąpieniu awarii,

co ma bezpośredni wpływ na bezpieczeństwo eksploatacji techniki lotniczej.



Rys. 13. Krzywa podatności eksploatacyjnej [39]

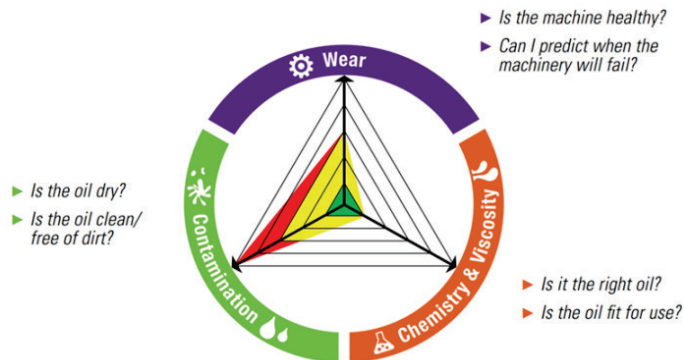
Na wczesnym etapie eksploatacji silnika (typowo w okresie gwarancji producenta) wystarczająca jest tylko obsługa profilaktyczna, a niekorzystne procesy występujące w eksploatacji są odwracalne, o ile zostaną wykryte i usunięte ich przyczyny, co zatrzyma proces przyspieszonego zużycia elementów krytycznych silnika. Wraz ze zwiększaniem czasu eksploatacji, w silniku pojawiają się narastające zmiany nieodwracalne, w tym zużycie tribologiczne. W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji silnika i statku powietrznego wymagana jest obsługa predykcyjna, bazująca m.in. na wynikach badań tribologicznych środków smarnych. Wiarygodność diagnozy z badań tribologicznych i dopuszczalny minimalny poziom wskaźnika podatności eksploatacyjnej, uwzględniający dopuszczalny poziom ryzyka wystąpienia awarii, definiuje punkt na osi czasu, od którego eksploatacja silnika jest bardzo ryzykowna. Poprawa wiarygodności diagnozy umożliwi bezpieczne wydłużenie czasu eksploatacji silnika, natomiast mało wiarygodna diagnoza skutkuje przedwczesnym wycofaniem silnika z eksploatacji i zwiększonymi kosztami eksploatacji.

Na podstawie wyników badań tribologicznych identyfikowane są wskaźniki (rys. 14):

- zużycia tribologicznego (ang. wear),
- parametrów chemicznych i lepkości środka smarnego (ang. chemistry & viscosity),
- zanieczyszczeń środka smarnego (ang. contamination)

oraz otrzymuje się odpowiedzi na wiele pytań wspomagających eksploatację silników. Postawiona diagnoza jest trójwymiarowa, co umożliwi wykrywanie prekursorów przyspieszonego zużycia tribologicznego (tj. obniżona jakość środka smarnego, wysoki poziom zabrudzeń niemetalicznych oleju) i proaktywne niwelowanie zagrożenia

przyspieszonej degradacji silnika lotniczego przed wystąpieniem zwiększonego poziomu zanieczyszczeń metalicznych w oleju świadczących o zmianach nieodwracalnych.



Rys. 14. Obszary badań tribologicznych i pytania użytkownika silników lotniczych [40]

Użytkownik silników lotniczych oczekuje, że w wyniku wykonywania okresowych badań tribologicznych próbki środka smarnego uzyska następujące korzyści:

- wydłużenie czasu bezawaryjnej pracy,
- poprawa niezawodności i bezpieczeństwa lotów,
- wydłużenie żywotności,
- optymalizacja okresów między wymianami oleju,
- redukcja kosztów eksploatacji.

Korzyści te osiąga się tylko w przypadku wiarygodnej diagnozy z badań tribologicznych. Gdy postawiona diagnoza jest mało wiarygodna, to może nastąpić odwrotny efekt:

- realizowana będzie pozorna diagnostyka i profilaktyka,
- zwiększone będzie ryzyko awarii silnika i wypadku lotniczego,
- zwiększone będą koszty eksploatacji silników, m.in. przez niewiarygodne i częste badania tribologiczne.

2.1. Pobór środka smarnego do badań tribologicznych

Podstawowym warunkiem uzyskania wiarygodnych wyników badań tribologicznych jest prawidłowe pobieranie próbek oleju z instalacji silnika. Podczas tych czynności należy przestrzegać zasad określonych w procedurach badawczych (czas od wyłączenia silnika, miejsce i częstość pobierania próbek oleju, czystość urządzenia do pobierania itp.). Próbki oleju pobierane są najczęściej z króćców zlewowych oleju z przekładni dolnej silnika oraz rozrusznika turbinowego (rys. 15). Szczegółowy tryb i metodyka pobierania próbek oleju do badań laboratoryjnych różnią się między różnymi typami silników. Obowiązuje wspólna

zasada, że próbki oleju powinny być pobierane w jak najkrótszym czasie od momentu wyłączenia silnika, w celu ograniczenia skutków:

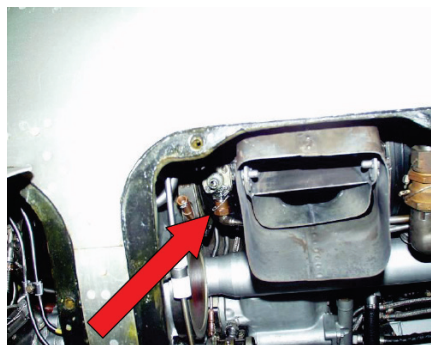
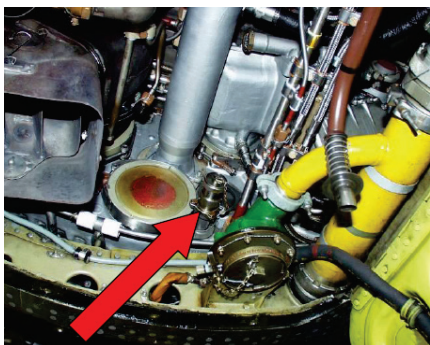
- **sedymencacji** – osadzania się produktów stałych z oleju na ściankach elementów instalacji olejowej,
- **flokulacji** – wypadania osadów z koloidów,
- **koagulacji** – łączeniu cząstek fazy rozproszonej koloidu w większe agregaty tworzące fazę ciągłą o nieregularnej strukturze) oraz zapewnienia dużej wiarygodności badań tribologicznych.

2.2. Metody badań laboratoryjnych stosowane w diagnostyce tribologicznej

Badania tribologiczne wykonuje się dla olejów i cieczy roboczych (paliwa, cieczy hydraulicznych, chłodziwa) różnych maszyn i urządzeń, w tym silników lotniczych. Najczęściej są to okresowe badania laboratoryjne obejmujące: sprawdzenie parametrów fizykochemicznych środka smarnego, analizę zanieczyszczeń środka smarnego oraz analizę produktów zużycia ściernego. W tym celu stosuje się:

- kilka metod badań laboratoryjnych z częściową redundancją zakresu badań (tabela 1);
- tabele opisujące relacje pomiędzy stanem technicznym, symptomami diagnostycznymi i metodami badawczymi (tabela 2),

co zwiększa prawdopodobieństwa poprawnej diagnozy i zmniejsza poziom błędów I i II rodzaju. W efekcie, obniża się poziom ryzyka poważnej awarii i koszty eksploatacji maszyn i urządzeń. Większy zbiór informacji diagnostycznych pozyskany z danej próbki cieczy smarującej (zakres badań tribologicznych) oraz analiza danych z uwzględnieniem populacji danego typu maszyn i urządzeń stwarza również podstawy do wiarygodnej identyfikacji przyczyn przyspieszonej degradacji elementów krytycznych i zagrożeń awarii, a nie tylko wykrywanie negatywnych skutków.



Rys. 15. Widok miejsc pobierania próbek cieczy roboczych

Tabela 1

Metody podstawowe i pomocnicze analizy oleju [34]

METODA ANALIZY OLEJU	STAN UKŁADU SMAROWANIA													
	Zanieczyszczenia cząsteczkowe	Detekcja zużycia tribologicznego	Analiza zużycia tribologicznego	Nieprawidłowa lepkość	Wilgoć (zawodnienie)	Wyczerpanie dodatków	Stabilność oksydacyjna	Zanieczyszczenie glikolem	Rozcieńczenie paliwem	Sadza	Rezerwa zasadowa	Niewłaściwy olej	Zużycie termiczne	Korozja
Badanie liczby cząstek	P	S	S											
Badanie lepkości				P	S		S	S	S	S		P	P	
TAN / TBN				S		S	P				P	S		P
Spektroskopia FTIR				S	P	P	P	S	P	P		P	S	S
Badanie gęstości żelaza		P	S											
Ferrografia analityczna	S		P											
Badanie stabilności oksydacyjnej RPVOT							P					S		
Tester wilgoci					P									S
Spektroskopia elementarna	S	P	P		S	P		P	S			P		S
Test temperatury zapłonu				S					P			S	P	

P – metoda podstawowa S – metoda pomocnicza

Badania parametrów fizykochemicznych środka smarnego obejmują ocenę: klasy czystości, rozkładu wielkości cząstek produktów tribologicznych, współczynnika zużycia środka smarnego: TAN (ang. *Total Acid Number*) i TBN (ang. *Total Base Number*), gęstości, lepkości, zawartość wody i paliwa oraz koloru.

TAN jest miarą zakwaszenia oleju przez wpływ utleniania, nitracji i sulfatacji – procesów, które nasilają się podczas kontaktu oleju z podwyższoną temperaturą, wodą, katalizatorami (np. cząstkami miedzi), spalinami i związkami siarki. W procesach utleniania i nitrowania mogą powstawać słabe kwasy organiczne. Są one częściowo zobojętniane dzięki alkalicznym właściwościom środka smarnego. Jeśli środek smarny ma jeszcze wystarczającą rezerwę alkaliczną, to liczba kwasowa TAN obejmuje tylko słabe kwasy.

Metoda TBN jest miarą rezerwy alkalicznej środka smarnego, czyli jego zdolności do pochłaniania kwaśnych produktów oksydacji lub sulfatacji. TBN jest pomocna do kontroli zużycia korozyjnego. W trakcie użytkowania środka smarnego rezerwa alkaliczna zmniejsza się na skutek wchodzenia w reakcje z kwasami. Kwasy są końcowymi produktami reakcji zachodzących w procesie spalania oraz reakcji starzenia/utleniania i nitrowania [41]. Relację pomiędzy TAN i TBN oraz kryterium odstawienia oleju przedstawiono na rys. 16.

Tabela 2

Metody badawcze stosowane w diagnostyce tribologicznej silników lotniczych [37]

	Parametr	Silniki tłokowe	Silniki turbinowe	Metoda badawcza	
Zużycie tribologiczne w silniku	Drobne metalowe elementy zużycia	tak	tak	spektroskopia z wirującą elektrodą dyskową (RDE)* [42], spektroskopia z plazmą wzbudzaną indukcyjnie (ICP) [43], ferrografia [44]	
	Duże metalowe elementy zużycia	opcja	tak	fluorescencja rentgenowska z filtrem FPQ (<i>Combined Particle Quantifier</i>) [45], metoda ICP z rozkładem próbki przez trawienie w kwasach [46], ferrografia [44]	
	Liczba i rozkład wymiarowy cząstek	opcja	tak	blokowanie i rozpraszanie światła laserowego [47], analizator cząstek LaserNet Fines (LNF) [48]	
	Analiza kształtu cząstek	nie	tak	analizator cząstek LaserNet Fines (LNF) [48], ferrografia [44]	
	Klasyfikacja cząstek	opcja	tak	ferrografia [44]	
Zanieczyszczenie	Rozpuszczona i wolna woda/wilgoć	tak	tak	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49], miareczkowanie Karla Fischera (KF) [50], metoda wizualna [51]	
	Piasek i brud	tak	opcja	blokowanie i rozpraszanie światła laserowego [47], analizator cząstek LaserNet Fines (LNF) [48]	
	Rozcieńczenie paliwem	tak	opcja	detektor paliwa [52], chromatografia gazowa (GC) [53], grawimetria [54]	
	Glikol/płyn chłodzący	tak	opcja	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
	Sadza	tak	opcja	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49], grawimetria [54]	
	Wyczerpanie dodatków przeciwwz. z.	opcja	opcja	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
	Obcy płyn	opcja	opcja	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
Degradacja oleju	Utlenianie	tak	tak	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
	Nitrowanie	tak	nie	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
	Zasiarczanie	tak	nie	spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]	
	Lepkość	tak (313K i/lub 373K)	tak 313 K	metoda kapilarna (lepkościomierz) [55]	
	Całkowita liczba kwasowa (TAN)	tak – naturalne silniki gazowe (CNG)	nie – silniki gazowe i diesel	tak	miareczkowanie [56], spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]
		nie – silniki gazowe i diesel			
Całkowita liczba zasadowa (TBN)	tak	nie	miareczkowanie [56], spektroskopia w podczerwieni (IR) [49]		

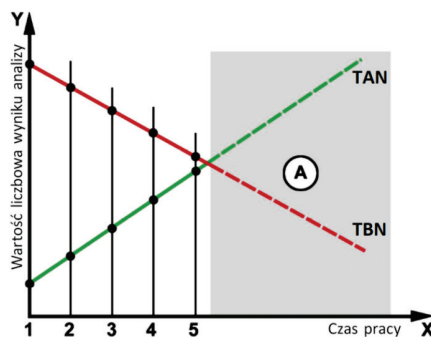
Detekcja poziomu koncentracji N_p pierwiastków obecnych w oleju (zbiór Ω):

- rozpuszczonych i związanych chemicznie w świeżym oleju (bazie i dodatkach uszlachetniających) – zbiór A,
- związanych chemicznie w produktach degradacji oleju, m.in. oksydacji, nitracji i sulfatacji – zbiór B,
- rozpuszczonych i związanych chemicznie w wyniku kontaktu gorącego oleju z powierzchniami instalacji olejowej i układu kinematycznego silnika – zbiór C,
- wynikających ze składu chemicznego opiłków i innych produktów zużycia tribologicznego węzłów tarcia silnika – zbiór D,
- obecnych w różnych typach zanieczyszczeń zewnętrznych – zbiór E,

musi być realizowana kilkoma różnymi, wzajemnie uzupełniającymi się metodami badawczymi (o różnym zakresie i rozdzielczości pomiarowej), ponieważ składowe zbiory A, B, C, D i E zbioru Ω są częściowo zależne. Poziom zależności zbiorów A, B, C, D i E jest inny dla silników tłokowych i dla silników turbinowych, co wynika z różnic w składzie chemicznym stosowanego oleju, jego dodatków uszlachetniających oraz materiałów konstrukcyjnych silników i zanieczyszczeń zewnętrznych (otoczenia pracy silnika). Zbiór Ω opisuje relacja (7) – zastosowanie tylko pojedynczej metody badawczej nie pozwala:

- rozróżnić źródła pochodzenia rejestrowanych pierwiastków,
- jednoznacznie zidentyfikować symptomów diagnostycznych,
- postawić wiarygodnej diagnozy i prognozy stanu technicznego silnika – celu głównego tego zakresu badań tribologicznych.

$$\Omega = A + B + C + D + E \quad (7)$$



Rys. 16. Zasada wykorzystania informacji diagnostycznej metod TAN i TBN do oceny stanu środka smarnego i prognozowania czasu jego wymiany. Obszar A: niedopuszczalny w eksploatacji, bo liczba kwasowa zawsze musi być mniejsza od liczby zasadowej; pozycje 1–5: kolejne pobrania oleju do badań tribologicznych; 5: wartość graniczna – wymagana wymiana oleju, ponieważ prognoza wartości TAN i TBN dla kolejnego pobrania próbki znajduje się w obszarze A [41]

W diagnostyce produktów zużycia tribologicznego silników lotniczych najczęściej stosowane są [57, 58]:

- **Spektroskopia emisji atomowej z obrotową elektrodą dyskową (RDE-AES)** – metoda umożliwia wykrywanie i oznaczanie ilościowe pierwiastków wynikających ze zużycia i zanieczyszczenia, od materiałów rozpuszczonych po cząstki o wielkości ok. 10 μm , z rozdzielczością 0,01 mg/kg (ppm masy). Metoda nie ma na celu ilościowego odniesienia wartości określonych jako cząstki nierozpuszczalne do rozpuszczonych metali. Wyniki analityczne zależą od wielkości cząstek. Niskie wartości koncentracji można uzyskać również dla pierwiastków obecnych w próbkach zużytego oleju w postaci dużych cząstek [59].
- **Spektroskopia fluorescencji rentgenowskiej z dyspersją energii (EDXRF)** – metoda będąca wartościowym narzędziem analizy pierwiastkowej produktów naftowych, która zapewnia szybką analizę wielopierwiastkową w oleju, smarach i surowcach stałych. Kilka metod ASTM opiera się na technikach EDXRF, w tym D4294 [60], D6445 [61], D6481 [62] i D7212 [63]. Metoda EDXRF jest przeznaczona przede wszystkim do monitorowania dodatków w olejach smarowych, przy czym jeżeli badane oleje o matrycach znacznie różniących się od materiałów kalibracyjnych określonych w normie ASTM D7751, to przy interpretacji wyników należy przestrzegać ostrzeżeń i zaleceń zamieszczonych w sekcji 6 cyt. normy. Ograniczenia EDXRF obejmują:
 - 1) podatność na zakłócenia pierwiastkowe ze względu na stosunkowo słabą rozdzielczość energetyczną,
 - 2) niską granicę wykrywalności w zakresie od 5 do 10 ppm dla siarki, chloru i fosforu w niskiej matrycy liczb atomowych, która nie jest odpowiednia do analizy na poziomie śladowym.
- **Automatyczne zliczanie cząstek stałych** – metoda bazująca na normie ISO 4406 zlicza ilość cząstek rozpraszających światło lasera o rozmiarach 4, 6, 14, 21, 38, 70 oraz > 100 mikronów, bez rozróżniania czy są to cząstki paramagnetyczne, czy ferromagnetyczne. Nowoczesne liczniki wykorzystują technologię eliminacji pęcherzyków (głównego źródła zafałszowania wyników badań), cyfrowe obrazowanie wyników badań oraz coraz częściej zaawansowane algorytmy sortujące cząstki według zużycia zmęczeniowego, zużycia tnącego i zużycia ślizgowego, co wspomaga identyfikację przyczyn zwiększonej ilości cząstek stałych w oleju.
- **Ferrografia** – dwie różne metody badań zanieczyszczeń w oleju:
 - 1) Ferrografia płytkowa [64]: cząstki stałe są segregowane manualnie według właściwości magnetycznych i wymiarów, przy mikroskopowym wsparciu obrazowania wyników badań. Wyróżnia się następujące kategorie materiałów: stal wysokostopowa, stal niskostopowa, żeliwo, ciemne tlenki metali, czerwone tlenki, białe metale nieżelazne (zwykle stopy aluminium lub

chromu), miedź, babbit (stop zawierający cynę i ołów używany m.in. w łożyskach ślizgowych), włókna z filtrów mechanicznych, zanieczyszczenia: niemetaliczne (brud, pyły i osady). Przyrządy ferrograficzne są czułe na produkty o wymiarach liniowych cząstek: $1\div 300\ \mu\text{m}$, przy czym cząstki metaliczne o wymiarach powyżej $30\ \mu\text{m}$ uważa się za „nietypowe”, mogące świadczyć o stanach awaryjnych lub ukrytych zjawiskach rezonansowych w układzie kinematycznym lub układzie smarowania;

- 2) Ferrografia o bezpośrednim odczycie – metoda wykrywa tylko cząstki ferromagnetyczne (metale i tlenki metali) i automatycznie zlicza ich ilość oraz wyznacza histogram i generuje umowne wskaźniki stanu technicznego: DS dla cząstek o rozmiarach do $5\ \mu\text{m}$ i DL dla cząstek większych od do $5\ \mu\text{m}$.

Wyniki badań poszczególnych pierwiastków i cząstek stałych są zmiennymi losowymi, stąd ww. zbiory danych są opisywane przez rozkłady o bliżej nieznanym parametrach, które można porównywać pod względem podobieństwa do rozkładu normalnego Gaussa $N(\bar{x}, \sigma)$ przy pomocy m.in. skośności i kurtozy. Analiza danych pomiarowych, opracowanie kryteriów diagnostycznych i rozdzielenie zbioru Ω na składowe zbiory A, B, C, D, E oraz postawienie wiarygodnej diagnozy bazuje na:

- metodach statystycznych i podstawowych zasadach wykonywania operacji matematycznych (dodawania, odejmowania, mnożenia) na zbiorach zawierających rozkłady, w celu uzyskania nowych rozkładów zawierających żądane symptomy diagnostyczne;
- funkcji wpływu stosowanych metod badawczych (ich cech metrologicznych, zakresu pomiarowego, rozdzielczości i powtarzalności) na poszczególne zbiory danych.

2.3. Analiza wyników badań laboratoryjnych

Wynikiem bieżących badań laboratoryjnych próbki oleju jest zbiór wartości kontrolowanych parametrów, określonych z zamawiającym badania z uwzględnieniem kosztów badań, o liczebności wielokrotnie większej niż liczba N_m używanych metod badawczych. Dla każdego badanego parametru w laboratorium zdefiniowane są progi diagnostyczne, na podstawie których ocenia się, czy bieżący wynik danego parametru jest: zgodny z warunkami technicznymi, obniżony lub podwyższony. W tej surowej postaci wynik badań próbki oleju jest mało przydatny użytkownikowi silników lotniczych, dlatego w niektórych laboratoriach generowana jest również informacja przetworzona o poziomie trzech składowych obszaru badań tribologicznych (rys. 14). W tym celu bazuje się na teorii dyskretnej układów MIMO (ang. *Multi Input Multi Output*) i modelu numerycznym (8), w którym:

- liczba sygnałów wejściowych N_{in} jest sumą liczby parametrów wyznaczonych z badań próbki oleju N_{oil} i liczby parametrów opisujących proces eksploatacji silnika lotniczego, z którego pobrano próbkę do badań;
- liczba sygnałów wyjściowych $N_{out} = 3$; sygnały wyjściowe są wskaźnikami: zużycia tribologicznego, jakości środka smarnego oraz poziomu zanieczyszczeń środka smarnego niewynikających ze zużycia tribologicznego.

$$\mathbf{OUT} = \mathbf{G} \cdot \mathbf{IN}^T \quad (8)$$

gdzie: $\mathbf{IN}^T = [Par_1 \quad \dots \quad Par_{N_{in}}]$ – wektor wyników badań laboratoryjnych próbki oleju z uwzględnieniem kryteriów diagnostycznych dla N_{in} parametrów; $\mathbf{OUT} = [Diag_1 \quad Diag_2 \quad Diag_3]$ – wektor diagnozy bieżącego stanu; \mathbf{G} – macierz przejścia o rozmiarze $N_{in} \times 3$ uwzględniająca wpływ danego parametru wyników badań próbki oleju z diagnozą cząstkową.

Wyniki okresowych badań tribologicznych dla poszczególnych parametrów badanego silnika są dyskretnymi w czasie szeregami czasowymi (9) o nierównomiernym próbkowaniu (szeregami czasowymi rozmytymi) [65].

$$X_i = \{X_{i,1}, X_{i,2}, \dots\} \quad \text{gdzie } i \in \langle 1; N_m \rangle \quad (9)$$

Do każdej próbki środka smarnego pochodzącego z danego silnika lotniczego przypisywane są najczęściej trzy podstawowe parametry:

- numer bieżącego badania,
- data pobrania próbki,
- czas nalogu od początku eksploatacji.

Powyższe dane nie zawierają informacji o intensywności eksploatacji silnika, która jest podstawową daną wejściową do modelowania procesów zużycia tribologicznego – diagnoza z laboratoryjnych badań tribologicznych próbki oleju jest tylko rekomendacją dla użytkownika silników lotniczych. W celu poprawy wiarygodności diagnozy warto powyższą listę parametrów o obiekcie badań rozszerzyć o dodatkowe dane, m.in. o:

- czas pracy silnika z uwzględnieniem pracy na ziemi,
- czas kalendarzowy od ostatniego remontu głównego,
- data uzupełnienia instalacji olejowej i ilość zalanego środka smarnego,
- wykonane czynności specjalne, np. płukanie instalacji olejowej,
- ekstremalne wartości przeciążeń liniowych i kątowych z ostatniego lotu.

Szeregi czasowe poszczególnych parametrów diagnostycznych odwzorowują monitorowany proces stochastyczny – jakość i skutki procesu eksploatacji silników lotniczych:

- oczekiwane – opisane przez modele składowych procesów, m.in. typowe zużycie tribologiczne węzłów tarcia, typ szumu kolorowego typowego procesu eksploatacji silników,
- nieoczekiwane – np. sytuacje awaryjne, błędy użytkownika przez pilota, błędy obsługi przez personel techniczny, błędy logistyczne.

Pojawienie się niekorzystnego trendu dla pojedynczego parametru lub grupy parametrów lub zmiana relacji pomiędzy parametrami zależnymi jest sygnałem informującym o pojawiającym się zagrożeniu.

Postawienie wiarygodnej diagnozy z badań tribologicznych nie jest zadaniem prostym, bo zarówno prosty addytywny model sygnału diagnostycznego SA opisany wzorem (10), jak i multiplikatywny model sygnału diagnostycznego SM opisany wzorem (11) zawierają trzy składowe. Każda składowa sygnału diagnostycznego:

- A – trend,
- P – składowa periodyczna/sezonowa (np. wpływ okresowego uzupełniania instalacji środkiem smarnym, długotrwałe postoje statku powietrznego w okresie zimowym lub wykonywanie obsług lub napraw, zwiększona intensywność lotów w okresie letnim, okresowa eksploatacja statku powietrznego na obcym lotnisku),
- I – szum kolorowy i zakłócenia odwzorowujące wpływ nieznanymi czynników eksploatacji silnika (np. loty ze średnim i wyższym pilotażem) oraz cechy metrologiczne toru pomiarowego (m.in. rozdzielczość i stabilność temperaturowa pomiarów),

zawiera użyteczną informację diagnostyczną, która może wspomagać użytkownika silników lotniczych w realizowanej działalności profilaktycznej i optymalizacji kosztów eksploatacji.

$$SA = A + P + I \quad (10)$$

$$SM = A \cdot P \cdot I \quad (11)$$

Obecność składowych P i I znacznie utrudnia analizę trendu z surowych danych pomiarowych dla większości metod badań laboratoryjnych. Całościowe wykorzystanie zarejestrowanej informacji diagnostycznej, w tym:

- wiarygodne wyznaczenie trendu parametrów badanego środka smarnego,
- postawienie wiarygodnej diagnozy o stanie technicznym silnika,

wymaga stosowania odpowiednich metod analizy numerycznej wyników badań, w tym: numerycznej filtracji, analizy widmowej, regresji i analizy statystycznej. Dobór właściwych metod analizy szeregów czasowych i zasad tworzenia kryteriów diagnostycznych wymaga:

- znajomości warunków początkowych zawartych w specyfikacji badanych środków smarnych, m.in. oczekiwanych pierwiastków i ich koncentracji w czystym środku smarnym, lepkości, koloru,
- znajomości podstawowej wiedzy z analizy statystycznej i analizy sygnałów,

- przyjęcia założeń upraszczających dotyczących analizowanego procesu i szeregów czasowych.

Na etapie rozwiniętej diagnostyki pomocna jest również znajomość składu chemicznego materiałów konstrukcyjnych silnika mających kontakt ze środkiem smarnym, co umożliwia identyfikację źródła sytuacji awaryjnej.

Pierwszym i najważniejszym krokiem analizy danych pomiarowych jest wydzielenie trzech składowych sygnału z uwzględnieniem założonego modelu sygnału (10) lub (11). W tym celu najczęściej stosuje się funkcję DETREND dostępną m.in. w Matlabie [66], R [67], Pythonie [68], która bazuje na aproksymacji i regresji wielomianowej. W wąskim oknie analizy danych stosowana jest regresja liniowa. Aproksymacja i regresja bazuje na metodzie najmniejszych kwadratów [58, 69]. Rozdzielenie składowych sygnałów SA i SM możliwe jest również przy pomocy banku filtrów wąskopasmowych: trend jest sygnałem wolnozmiennym, składowa periodyczna zawiera się w paśmie częstotliwości $\langle f_1, f_2 \rangle$ identyfikowanym eksperymentalnie, a szum jest najczęściej składową wysokoczęstotliwościową. W sporadycznych przypadkach stosowana jest analiza widma z wykorzystaniem dyskretnej transformaty Fouriera czy periodogramu. Natomiast coraz częściej w procesie wnioskowania używane są algorytmy bazujące na sztucznej inteligencji: nauczaniu maszynowym/głębokim i sztucznych sieciach neuronowych [70, 71].

Dekompozycja sygnału SA i SM na trzy składowe A, P, I ujawnia składową szumu: (12) dla modelu SA i (13) dla SM , ale nie identyfikuje ilościowo i jakościowo parametrów szumu kolorowego. To zadanie realizują funkcje obliczające wariancje Allana i Hadamarda dla szeregów czasowych równomiernie próbkowanych oraz interpretacja uzyskanych wyników analizy na bazie prawa potęgowej gęstości widma mocy, PSD, co opisuje relacja (14) [72–74]. Dla szeregów czasowych nierównomiernie próbkowanych wymagane jest przetworzenie danych, np. poprzez interpolację z uwzględnieniem kryterium Nyquista.

$$I = SA - T - P \quad (12)$$

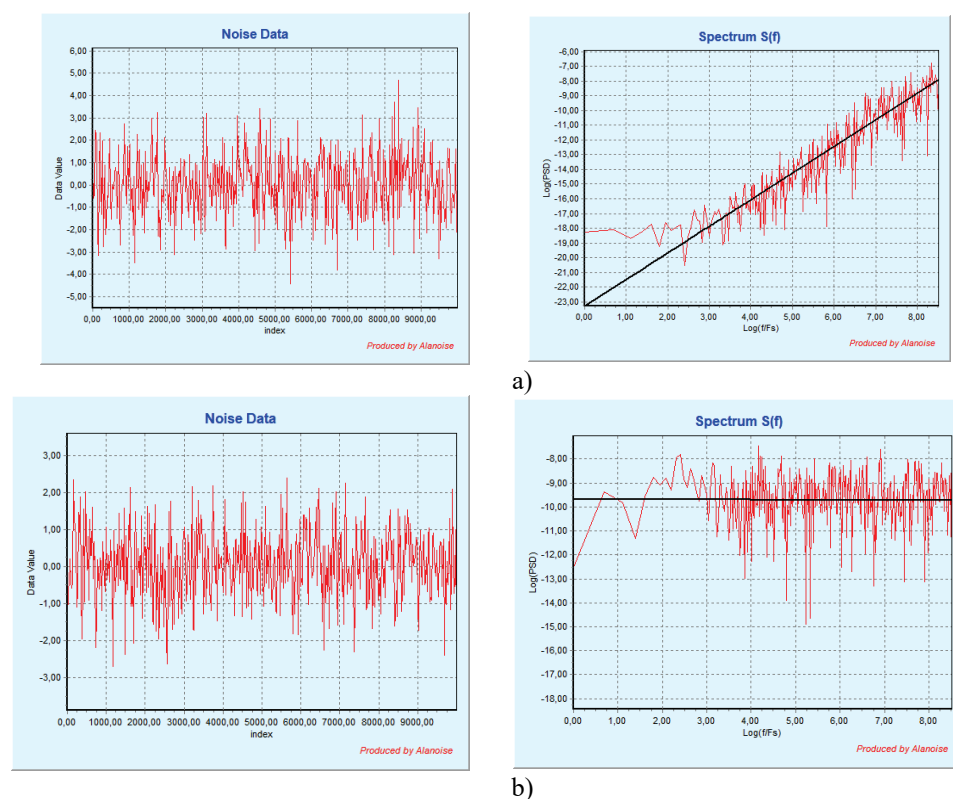
$$I = \frac{SM}{T \cdot P} \quad (13)$$

$$S(f) = f^a \quad (14)$$

gdzie: $a = 2$ dla szumu białego modulacji fazy (ang. *white PM*), zwanego szumem fioletowym; $a = 1$ dla szumu migotania modulacji fazy (ang. *flicker PM*), zwanego szumem niebieskim; $a = 0$ dla szumu białego modulacji częstotliwości (ang. *white FM*); $a = -1$ dla szumu migotania modulacji częstotliwości (ang. *flicker FM*), zwanego szumem różowym; $a = -2$ dla losowego spacerowania modulacji częstotliwości (ang. *random walk FM*), zwanym szumem czerwonym; $a = -3$ dla

migotania spaceru modulacji częstotliwości (ang. *flicker walk FM*); $a = -4$ dla losowych zmian modulacji częstotliwości (ang. *random run FM*).

Na rys. 17 zobrazowano dwa sygnały szumu kolorowego, które mają podobne przebiegi czasowe, ale zasadniczo różne widma PSD, na podstawie których dobiera się parametry i algorytmy filtracji sygnału. Tylko gdy $a = 0$ (szum biały) średnia arytmetyczna przyjmuje wartość zero i nie zależy od długości okna uśredniania danych pomiarowych, co jest wykorzystywane w filtracji dolnoprasmowej. Dla pozostałych typów szumu (gdy $a \neq 0$) filtracja dolnoprasmowa szumu kolorowego generuje pozorną składową wolnozmienną, która jest zależna od długości okna uśredniania i przenika do składowej trendu sygnałów SA i SM, co może być przyczyną błędnej diagnozy w badaniach tribologicznych. W celu zapewnienia wysokiej wiarygodności diagnozy badań tribologicznych silników lotniczych należy analizować widmo szumu kolorowego.



Rys. 17. Zobrazowano szeregi czasowe szumu kolorowego i ich widmo gęstości mocy: a) white PM; b) white FM

2.4. Wnioskowanie diagnostyczne

Dla populacji danego typu silnika lotniczego zakłada się, że zbiór danych pomiarowych i -tego parametru środka smarowego o liczebności $n_i \geq 30$ jest opisany przez symetryczny rozkład Gaussa $X_i \sim N(\bar{x}_i, \sigma_i^2)$ [69] [75], w którym:

- \bar{x}_i – wartość oczekiwana (średnia arytmetyczna) i -tego parametru z pominięciem wyników pomiaru znacznie odbiegających od trendu,
- σ_i^2 – wariancja i -tego parametru z pominięciem wyników pomiaru znacznie odbiegających od trendu,
- $x_i(k) \geq 0$ – parametr diagnostyczny środka smarowego zmierzony w dyskretnym czasie k .

Do wyznaczenia wartości \bar{x}_i i σ_i^2 korzysta się z algorytmu 2-2-3 sigma. W przypadku mniejszej liczebności zbioru danych pomiarowych bazuje się na rozkładzie t-Studenta i założonym poziomie ufności.

Na podstawie cech rozkładu Gaussa definiuje się podstawowe kryteria automatycznej klasyfikacji wyników badań tribologicznych silnika:

- **stanu bieżącego** (najczęściej używa się czterech poziomów zagrożenia), których kryteria opisują relacje (15)–(18):

– normalny (poziom bieżący),
 K_{1B} : $x_i(k) \leq \bar{x}_i + \sigma_i$ (15)

– podwyższony (poziom bieżący), K_{2B} : $\bar{x}_i + \sigma_i < x_i(k) \leq \bar{x}_i + 2\sigma_i$ (16)

– wzmożony (poziom bieżący),
 K_{3B} : $\bar{x}_i + 2\sigma_i < x_i(k) \leq \bar{x}_i + 3\sigma_i$ (17)

– awaryjny (poziom bieżący),
 K_{4B} : $x_i(k) > \bar{x}_i + 3\sigma_i$ (18)

- **prognozowanego stanu** przy następnej kontroli.

Oczekiwany poziom i -tego parametru diagnostycznego w kolejnym badaniu tribologicznym wykonanym po upływie czasu Δt_s pracy silnika wyznacza się na podstawie regresji liniowej (19) uwzględniającej tylko kilka ostatnich wyników badań (w wąskim oknie czasowym analizy), z jednoczesnym monitorowaniem wartości:

- współczynnika determinacji R^2 obliczanej ze wzoru (20) – miary dopasowania modelu liniowego (wyznaczanego na bazie metody najmniejszych kwadratów) do danych eksperymentalnych. Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość R^2 jest bliższa jedności;

- współczynnika zbieżności $\varphi^2 = 1 - R^2$: miary określającej jaka część zmiennej objaśnianej nie pasuje do modelu liniowego (mieści się w jego błędzie). Dopasowanie modelu jest tym lepsze, im wartość φ^2 jest bliższa zeru.

$$x_i(k+1) \approx \hat{x}_i(k) + a_i(k) \cdot \Delta t_s \quad (19)$$

$$R^2 = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - \bar{y})^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \in (0,0; 1,0) \quad (20)$$

gdzie: $\hat{x}_i(k)$ – aproksymowana wartość trendu i -tego parametru diagnostycznego (bez składowej periodycznej i szumu) w bieżącym badaniu tribologicznym; $a_i(k)$ – współczynnik kierunkowy prostej wyznaczony z regresji liniowej kilku ostatnich wyników badań; y_i – i -ta obserwacja zmiennej y ; \hat{y}_i – wartość teoretyczna zmiennej objaśnianej (z przyjętego modelu); \bar{y} – średnia arytmetyczna empirycznych wartości zmiennej objaśnianej.

Uwzględniając zależności (15)–(18), wyróżnia się cztery poziomy prognozowanego zagrożenia tribologicznego (21)–(24):

$$\begin{aligned} & \text{– normalny (poziom prognozowany),} \\ & K_{1P}: \quad x_i(k+1) \leq \bar{x}_i + \sigma_i \quad (21) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{– podwyższony (poziom} \\ & \text{prognozowany), } K_{2P} \quad \begin{aligned} & \bar{x}_i + \sigma_i < x_i(k+1) \\ & \leq \bar{x}_i \\ & + 2\sigma_i \end{aligned} \quad (22) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{– wzmożony (poziom} \\ & \text{prognozowany), } K_{3P}: \quad \begin{aligned} & \bar{x}_i + 2\sigma_i < x_i(k+1) \\ & \leq \bar{x}_i \\ & + 3\sigma_i \end{aligned} \quad (23) \end{aligned}$$

$$\begin{aligned} & \text{– awaryjny (poziom prognozowany),} \\ & K_{4P}: \quad x_i(k+1) > \bar{x}_i + 3\sigma_i \quad (24) \end{aligned}$$

Czas Δt_s do kolejnej kontroli tribologicznej środka smarnego ulega skróceniu, gdy:

- bieżący poziom zagrożenia tribologicznego jest inny niż w poprzednim badaniu;
- prognozowany poziom zagrożenia tribologicznego jest inny niż bieżący.

Krotność skrócenia podstawowego okresu pobierania próbek środka smarnego zależy od wagi parametru diagnostycznego, na którym wystąpiło przekroczenie poziomu diagnostycznego.

Zmiana częstości wykonywania badań tribologicznych z uwzględnieniem bieżącego i prognozowanego poziomu zagrożenia zapewnia wymagany poziom bezpieczeństwa eksploatacji silnika lotniczego przy jednoczesnej odporności algorytmu wnioskującego na ewentualne błędy poboru próbki środka smarnego do badań tribologicznych.

Na etapie wnioskowania diagnostycznego uwzględnia się również:

- parametry rozkładu normalnego $X_{i,k} \sim N(\bar{x}_{i,k}, \sigma_{i,k}^2)$ analizowanego szeregu czasowego dla i -tego parametru z k -tego silnika – możliwa ocena podobieństwa rozkładu w porównaniu z rozkładem populacji silników danego typu;
- pozostałe parametry rozkładu Gaussa dla populacji silników danego typu oraz konkretnego silnika, m.in. [69, 75]:
 - medianę – wartość środkową i -tego parametru diagnostycznego;
 - kurtozę – miarę kształtu rozkładu wartości analizowanej cechy, na którą decydujący wpływ ma intensywność występowania wartości skrajnych w analizowanym zbiorze danych (co się dzieje w „ogonach” rozkładu); w diagnostyce tribologicznej: dotyczy m.in. symptomów fazy docierania i zacierania węzłów tarcia; kształt rozkładu w części centralnej (typowych wartości parametrów tribologicznych) jest praktycznie bez znaczenia,
 - współczynnik skośności – miara asymetrii rzeczywistego rozkładu opisującego zbiór danych pomiarowych i -tego parametru diagnostycznego (w diagnostyce tribologicznej oczekuje się wartości większej od zera, co definiuje rozkład prawostronnie skośny, co wynika z $x_i(k) \geq 0$);
- dynamikę trendu – udostępnia bardzo wczesne symptomy diagnostyczne pojawiającego się zagrożenia tribologicznego oraz możliwości monitorowania jakości eksploatacji silników niezależnie od bieżącego poziomu zagrożenia tribologicznego;
- sezonowość składowej periodycznej – umożliwia uchwycenie przyczyny przyspieszonego zużycia tribologicznego silników, a nie tylko skutku wykrywanego na podstawie relacji (12)–(14);
- doświadczenia eksploatacyjne innych użytkowników maszyn – możliwość weryfikacji opracowanych kryteriów diagnostycznych i częstości wykonywania badań.

3. Wyniki badań

Możliwości i ograniczenia diagnostyki tribologicznej lotniczych silników turbinowych zobrazowano przykładami, dla których dane wejściowe udostępniło akredytowane Laboratorium Diagnostyki Tribologicznej ITWL w postaci statystycznie wiarygodnej reprezentacji 121 turbinowych silników odrzutowych jednego typu, eksploatowanych przez kilka lat u różnych użytkowników. Przekazany plik danych

zawierał 2114 rekordów wyników badań próbek oleju metodą spektroskopii emisji atomowej z obrotową elektrodą dyskową (RDE-AES), realizowanych zgodnie z normą ASTM D6595-17 [76]. W laboratorium ITWL identyfikowane są poziomy koncentracji 19 pierwiastków [77, 78], ale w udostępnionym zbiorze jawnych danych było tylko 15 pierwiastków (Ag, Al, B, Cr, Cu, Fe, Mg, Mo, Na, Ni, Pb, Si, Sn, Ti, Zn). Udostępnione wyniki badań w sposób niepełny identyfikują źródło pierwiastków w silnikach odrzutowych, m.in.:

- stale łożyskowe, np. 100Cr6 [79] – brak informacji o Mn oraz resztkowo P i S,
- stale używane na koła zębate, np. 12H2NWFA-WD [80] – brak informacji o Mn, P, S, V, W,
- stale stopowe – m.in. brak informacji o Cd, Mn, V,
- dodatki uszlachetniające w oleju i ich przereagowanie [81] – brak informacji o Ca, Ba, P,
- zanieczyszczenia zewnętrzne (brak informacji o K),
- inne materiały konstrukcyjne (brak informacji o Sb, Mn, Li).

Metoda RDE-AES umożliwia wczesne wykrywanie postępującej degradacji węzłów tarcia silników lotniczych i środka smarnego, ale wiarygodna identyfikacja źródła wykrywanych pierwiastków jest znacznie utrudniona bez map materiałowych obiektu badań i odniesienia do:

- innych metod diagnostyki tribologicznej,
- wzorcowych próbek czystego oleju.

Przed przystąpieniem do analizy wyników badań tribologicznych przeprowadzono dwuetapową weryfikację jakości otrzymanych danych. Po pierwszym etapie weryfikacji odrzucono 31 rekordów (1,47% populacji danych), w których całkowity poziom koncentracji ww. pierwiastków wynosił zero – błędne rekordy danych dotyczyły lat 2013 (trzy rekordy) oraz 2014. Na kolejnym etapie weryfikacji wrywkowo sprawdzono spójność danych opisowych obiektów badań z informacjami o ich eksploatacji zawartych w systemie informatycznym SAMANTA [82, 83]:

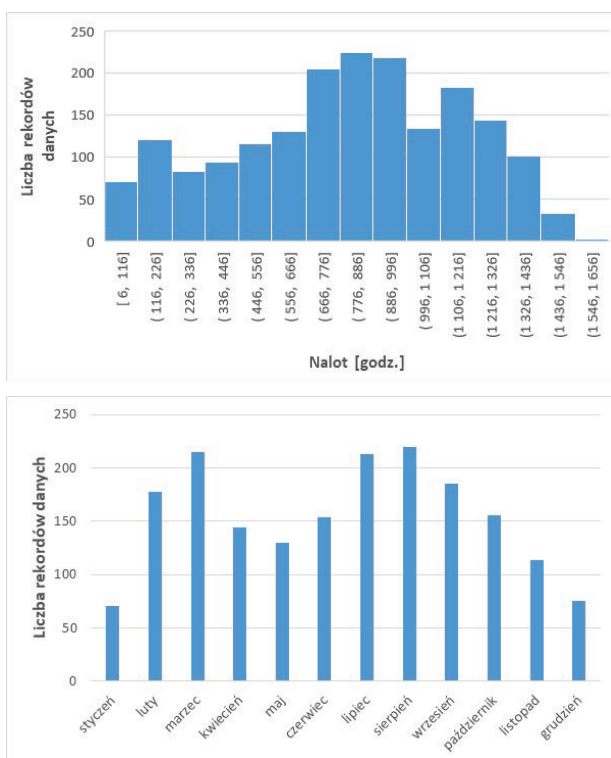
- odrzucono 18 rekordów danych (0,85% początkowej populacji danych), w których stwierdzono, że pobranie próbki oleju do badań tribologicznych nie było poprzedzone uruchomieniem silnika (naruszenie procedury badawczej po stronie użytkownika silników) i wynik badań tribologicznych nie jest wiarygodny. Wszystkie rekordy dotyczyły jednego silnika;
- oflagowano 61 rekordów danych (2,89% początkowej populacji danych), w których stwierdzono niespójność czasu pracy 14 silników przy poprawnej wartości koncentracji badanych pierwiastków. Rekordy te pominięto podczas analizy wpływu czasu pracy silników na trend badanych pierwiastków.

Wydzielono również podzbiór rekordów danych zawierający wyniki badań tribologicznych świeżego oleju przed zalaniem do silnika.

Cechy zweryfikowanego zbioru danych tribologicznych zobrazowano na rys. 18 i 19. Parametry statystyczne zbioru wejściowego:

- liczba rekordów: 1855
- liczba silników: 112
- zakres nalotu silników: 6 – 1577 godz.
- średnia wartość nalotu: 803,74 godz.
- mediana nalotu: 842,00 godz.
- odchylenie standardowe nalotu: 373,47 godz.
- kurtoza nalotu: -0,78826
- skośność nalotu: -0,25103
- poziom ufności (95%): 17,01.

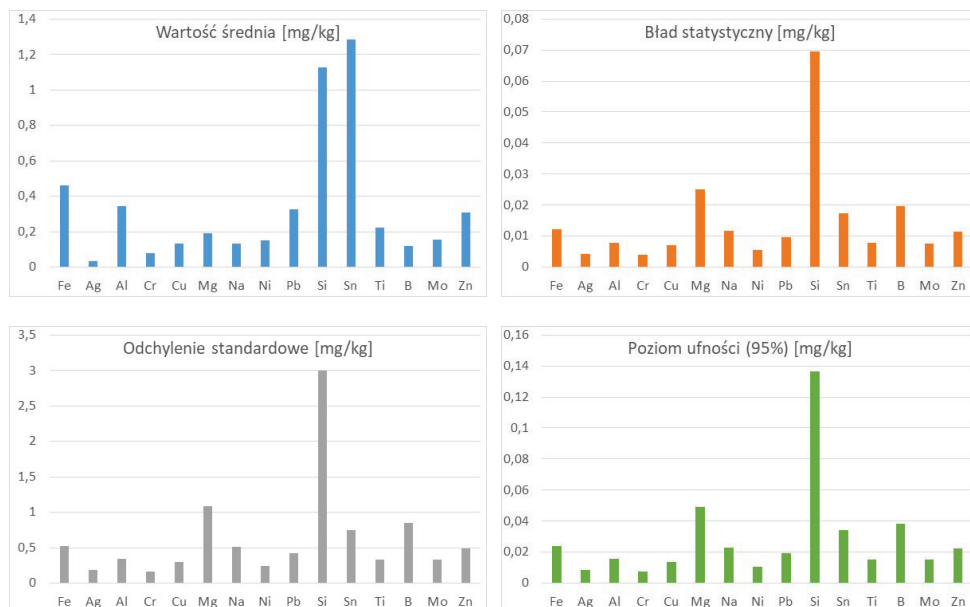
Na rys. 20 zobrazowano przykładowy wynik kolejnych etapów wyznaczania parametrów statystycznych opisujących wypadkowy wpływ degradacji oleju i silnika.



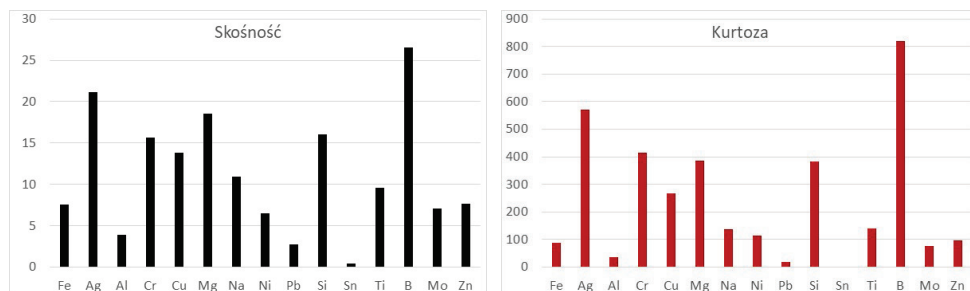
Rys. 18. Histogram nalotu 112 silników w zweryfikowanym zbiorze surowych danych tribologicznych metody RDE-AES

Wyznaczone parametry statystyczne zbioru danych tribologicznych metody RDE-AES z populacji 112 silników zawierają momenty statystyczne zdefiniowane wg Karla Pearsona wzorem (25), w którym uwzględnia się wartość średnią \bar{x} i odchylenie standardowe σ zbioru wartości analizowanego parametru. Momentem pierwszego rzędu ($s = 1$) jest średnia arytmetyczna. Momentem drugiego rzędu ($s = 2$) jest wariancja (odchylenie standardowe podniesione do drugiej potęgi). Momentem trzeciego rzędu ($s = 3$) jest skośność. Momentem czwartego rzędu ($s = 4$) jest kurtozą (miara koncentracji wyników) wyznaczana w odniesieniu do rozkładu normalnego. Obliczone parametry statystyczne wskazują, że w surowych danych pomiarowych metody RDE-AES występują zarówno błędy grube, jak i dane odwzorowujące symptomy degradacji oleju i silników. Do wydzielenia błędów grubych zastosowano algorytm 2-2-3 sigma.

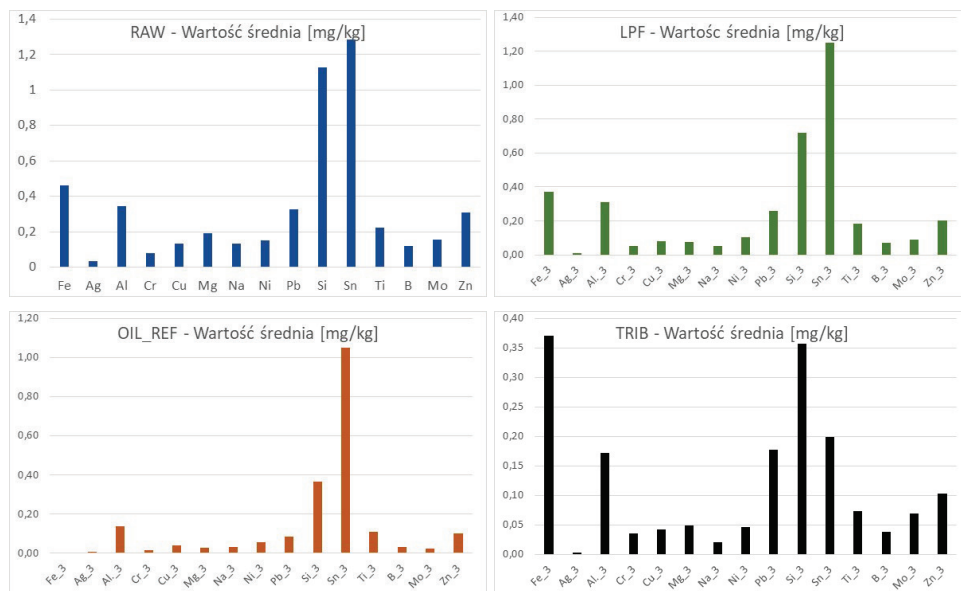
$$\mu_s = \left(\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n (x_i - \bar{x})^s \right) / \sigma^s \quad (25)$$



Rys. 19. Parametry statystyczne 15 pierwiastków obecnych w oleju 112 silników. Źródło danych: zweryfikowany zbiór surowych danych tribologicznych metody RDE-AES



Rys. 19 cd. Parametry statystyczne 15 pierwiastków obecnych w oleju 112 silników. Źródło danych: zweryfikowany zbiór surowych danych tribologicznych metody RDE-AES



Rys. 20. Kolejne etapy wyznaczania wartości jednej ze składowych statystycznych (średniej arytmetycznej) wiarygodnych symptomów diagnostycznych na bazie metody RDE-AES i analizowanego zbioru danych: RAW – surowe dane z próbek silnikowych, LPF – dane z próbek silnikowych po teście 2-2-3 sigma; OIL_REF – pierwiastki obecne w czystym oleju; TRIB – wypadkowy poziom produktów zużycia oleju i 112 silników

4. Podsumowanie

Diagnostyka zużywania tribologicznego silników lotniczych i degradacji środka smarnego jest efektywnym narzędziem wspierania bezpiecznej eksploatacji silników lotniczych i floty statków powietrznych.

Wczesne wykrycie niekorzystnych procesów tribologicznych, przed wystąpieniem stanów alarmowych, umożliwia podjęcie dodatkowej działalności profilaktycznej i obniżenie kosztów eksploatacji silników lotniczych, z jednoczesnym zwiększeniem niezawodności i bezpieczeństwa eksploatacji statków powietrznych.

Na podstawie przeprowadzonej analizy wyników badań tribologicznych metody RDE-AES i analizy SWOT dostrzeżono słabe strony istniejącego systemu obiegu informacji pomiędzy użytkownikiem wojskowych silników lotniczych i laboratoriami badań tribologicznych, które utrudniają wykrywanie ewentualnych błędów ludzkich i weryfikację spójności logicznej surowych danych opisowych próbek, wyników badań oraz postawionej diagnozy i prognozy stanu technicznego silnika i oleju z innymi danymi eksploatacyjnymi obecnymi w bazie systemu informatycznego SAMANTA.

W celu minimalizacji ryzyka i skutków błędnej diagnozy z badań tribologicznych próbek oleju oraz poprawy wiarygodnego prognozowania stanu technicznego wojskowych silników lotniczych niezbędne jest zintegrowanie informacji z badań tribologicznych (obserwacji skutków nieznanymi procesów) z:

- danymi z pokładowych rejestratorów parametrów lotu zawierającymi dane wejściowe do modeli zużywania tribologicznego krytycznych elementów silników lotniczych,
- informacjami o eksploatacji techniki lotniczej, dostępnymi obecnie w systemie informatycznym SAMANTA.

5. Literatura

1. <https://gasturb.de/> (dostęp 20.10.2022).
2. Aviation Maintenance Handbook – Powerplant, Volume I, U.S. Department of Transportation, FEDERAL AVIATION ADMINISTRATION - Flight Standards Service, 2012.
3. <https://www.machinerylubrication.com/Read/873/oil-tests> (dostęp 15.10.2022).
4. M. Zboiński, „Badania diagnostyczne układów tribologicznych w statkach powietrznych, [w:] Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej”, [red.] J. Lewitowicz, L. Lorocho, J. Manerowski, t. VI rozdz. 12, Warszawa: Wydawnictwo ITWL, 2007.
5. Aviation Maintenance Handbook – Powerplant, Volume II, U.S. Department of Transportation, Federal Aviation Administration - Flight Standards Service, 2012.
6. Silnik turboodrzutowy 88 – wytyczne w zakresie eksploatacji technicznej, czerwiec 30/95 (niepublikowane).

7. A. Kozakiewicz, „Analiza porównawcza osiągnięć turbinowych silników odrzutowych samolotów bojowych obecnie użytkowanych w RP”, *Biuletyn WAT*, 2009, vol. LVIII, nr 2, s. 65-83.
8. J. Jachimowicz, R. Kajka, J. Kaniowski, W. Karliński, „Fretting w konstrukcjach lotniczych”, *Tribologia* 3/2005 (201), s. 97-108.
9. <https://www.tribologia.eu/ptt/try/tr08.htm> (dostęp 18.10.2022).
10. http://anitaptak.edu.pl/wp-content/uploads/2017/10/TS_Scieranie.pdf (dostęp 20.10.2022).
11. D. Davis, A.F. Shah, B. Panigrahi, S. Singh, “Effect of Cr2AlC nanolamella addition on tribological properties of 5W-30 engine oil”, *Applied Surface Science*, 2019, Vol. 493, pp. 1098-1105.
12. D. Steffen, What is wear?, https://www.cjc.dk/fileadmin/root/File_Admin_Filter/doc_Articles/What_is_Wear_2007.pdf.
13. S.M.S. Mukras, “Computer Simulation/Prediction of Wear in Mechanical Components”, *Advances in Tribology*, Volume 2020, Article ID 8867351, 15 pages, DOI: 10.1155/2020/8867351.
14. J.A. Williams, “Wear modelling: analytical, computational and mapping: a continuum mechanics approach”. *Wear*, Volumes 225–229, Part 1, April 1999, Pages 1-17, DOI: 10.1016/S0043-1648(99)00060-5.
15. F. Lyu, J. Zhang, B. Xu, “Research on wear prediction of piston/cylinder pair in axial piston pumps,” *Wear*, vol. 456-457, pp. 456-457, 2020, DOI: 10.25368/2020.6.
16. H.C. Meng, K.C. Ludema, “Wear models and predictive equations: their form and content”, *Wear*, vol. 181-183, pp. 443–457, 1995, DOI: 10.1016/0043-1648(95)90158-2.
17. Á.D. Tóth, H. Hargitai, Á.I. Szabó, “Tribological Investigation of the Effect of Nanosized Transition Metal Oxides on a Base Oil Containing Overbased Calcium Sulfonate”, *Lubricants* 2023, 11(8), 337, pp. 1-19.
18. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31107/oil-lubricant-additives> (dostęp 12.10.2022).
19. J. Molenda, „Wpływ dialkyloditiofosforanu cynku i przeciwutleniania fenolowego na skuteczność nienasyconych dodatków przeciwzużyciowych”, *Tribologia* 2017, 275 (5), s. 47-55.
20. https://www.faa.gov/documentLibrary/media/Advisory_Circular/AC-20-24D.pdf (dostęp 20.11.2022).
21. <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19910021217/downloads/19910021217.pdf> (dostęp 15.10.2022).
22. <https://www.powertransmission.com/ext/resources/issues/1020/lubrication-for-life.pdf?1646351768> (dostęp 15.10.2022).

23. J. Padgurskas, D. Volskis, R. Rukuiza, A. Kupčinskas, N. Basheleishvili, S. Tuckute, "Limitary State of Heavy-Duty Engine Oils and Their Evaluation According to the Change of Tribological Properties during Operation", *Lubricants* 2023, 11(6), 236, pp. 1-14, DOI: 10.3390/lubricants11060236.
24. M. Smoliło, „Badanie odporności na utlenianie mieszanin olejów otrzymanych z regeneracji olejów przepracowanych z olejami naftenowymi”, *Nafta-Gaz* 2020, nr 6, s. 408–418, DOI: 10.18668/NG.2020.06.06.
25. <https://www.e-autonaprawa.pl/artykuly/3994/starzenie-sie-olejow-silnikowych.html> (dostęp 20.10.2022).
26. <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0043164810000669> (dostęp 15.10.2022).
27. http://www.masterorganicchemistry.com/2016/11/23/quick_analysis_of_ir_spectra/ (dostęp 24.10.2022).
28. <https://www.machinerylubrication.com/Read/31436/new-hydraulic-oil-clean> (dostęp 25.10.2022).
29. https://fluidteknologi.com/demo/wp-content/uploads/2021/06/DM4500-Brochure-3.9.18_v2.pdf.
30. <https://www.pruftechnik.com/pl-PL/Produkty-i-us%C5%82ugi/Systemy-diagnostyki-maszyn/Licznik-cz%C4%85steczek-w-smarze/> (dostęp 20.11.2022).
31. <https://hydramotion.com/en> (dostęp 24.11.2022).
32. <https://www.eesgroup.com/oil-sensor.html> (dostęp 24.11.2022).
33. <https://www.poseidonsys.com/products-and-services/products/inline-wear-debris/> (dostęp 24.11.2022).
34. Rolly Angeles Technical Training, "Tables on Oil Analysis", RSA 2003.
35. R. Bekiesiński, J. Błachnio, M. Stukonis, „Badania tribologiczne agregatów systemów paliwowych lotniczych silników turbinowych”, [w:] *Problemy badań i eksploatacji techniki lotniczej*, [red.] J. Lewitowicz, Wydawnictwo ITWL, Warszawa, 1993, s. 213-271.
36. <https://www.tinker.af.mil/Portals/106/Documents/Technical%20Orders/33-1-37-3.pdf?ver=pXaNBrFylqC-5aJpf8spzw%3D%3D> (dostęp 22.10.2022)
37. Spectro Scientific Inc., "Predictive Equipment Maintenance", *Oil Analysis Handbook Third Edition*, AMETEK, 2017.
38. M. Witoś, M. Deliś, M. Szymański, P. Danisiewicz, „System diagnostyki tribologicznej i jego rola w utrzymaniu ruchu maszyn i urządzeń”, XIV Konferencja „Teoretyczne i praktyczne aspekty stosowania środków smarnych i eksploatacyjnych w przemyśle”, 22-23.06.2022 Wisła, DOI: 10.13140/RG.2.2.26866.17604.
39. <https://blog.spectrosci.com/using-onsite-oil-analysis-to-drive-down-maintenance-cost> (dostęp 20.11.2022).
40. <https://www.spectrosci.com/product/truvu-360> (dostęp 26.10.2022).

41. <https://www.dieselmotornordic.com/wp-content/uploads/2022/01/Technical-Bulletin-tr0199990210510-en-oil-g.pdf> (dostęp 20.11.2022).
42. <https://www.azom.com/article.aspx?ArticleID=9649> (dostęp 28.10.2022).
43. <https://www.perlan.com.pl/aparatura-analityczna/spektrometria-i-spektrofotometria/spektroskopia-atomowa/icp-ms> (dostęp 28.10.2022).
44. <https://www.plantengineering.com/articles/fundamentals-of-ferrography/> (dostęp 28.10.2022).
45. <https://proteco.cl/wp-content/uploads/2022/09/Datasheet-FieldLab58.pdf> (dostęp 28.10.2022).
46. <https://www.epa.gov/sites/default/files/2015-12/documents/3031.pdf> (dostęp 30.10.2022).
47. <https://dev.caltex.com/my/business-solutions/articles/understanding-particle-counting-technologies-in-oil-analysis.html> (dostęp 30.10.2022).
48. <https://www.machinerylubrication.com/Read/383/lasernet-fines-oil-analysis> (dostęp 30.10.2022).
49. <https://www.machinerylubrication.com/Read/1109/oil-degradation-spectroscopy> (dostęp 30.10.2022).
50. <https://www.xylemanalytics.com/en/parameters/water-determination> (dostęp 5.11.2022).
51. <https://www.machinerylubrication.com/Read/301/visual-crackle-oil-test> (dostęp 5.11.2022).
52. <https://www.oilandgasonline.com/doc/fuel-sniffer-0001> (dostęp 8.11.2022).
53. <https://www.shimadzu.eu.com/sites/shimadzu.seg/files/SEG/c10ge082-GC-Basics-and-Fundamentals.pdf> (dostęp 10.11.2022).
54. <https://www.machinerylubrication.com/Read/32184/rationalization-of-lab-tests-for-measurement%20of-insoluble-contaminants-in-lube-oil> (dostęp 15.11.2022).
55. <https://www.analizyolejowe.pl/lepkosc-kinematyczna-metoda-kapilarna/> (dostęp 15.11.2022).
56. <https://testoil.com/services/oil-analysis/base-number/> (dostęp 15.11.2022).
57. A. Bagiński, J. Spychała, M. Zboiński, „Ocena stanu technicznego układów łożyskowania silników lotniczych metodami diagnostyki tribologicznej”, *Journal of KONBiN* 2011, 17 (1), s. 27-36.
58. H. Borowczyk [red.], „Problemy kompleksowego diagnozowania układu łożyskowania turbinowego silnika śmigłowego”, Warszawa: Wydawnictwo ITWL, 2011.
59. <https://www.astm.org/d6595-17.html> (dostęp 13.11.2022).
60. <https://www.astm.org/d4294-21.html> (dostęp 13.11.2022).
61. <https://www.astm.org/d6445-99.html> (dostęp 13.11.2022).

62. <https://www.astm.org/d6481-14r19.html> (dostęp 13.11.2022).
63. <https://www.astm.org/d7212-13r18.html> (dostęp 13.11.2022).
64. <https://www.machinerylubrication.com/Read/5/analytical-ferrography> (dostęp 15.11.2022).
65. I. Bylinskis, "Digital Alias-free Signal Processing", John Wiley & Soons Ltd. 2007.
66. <https://www.mathworks.com/help/matlab/ref/detrend.html>,
R [<https://anomaly.io/seasonal-trend-decomposition-in-r/index.html>]
(dostęp 15.11.2022).
67. <https://anomaly.io/seasonal-trend-decomposition-in-r/index.html>
(dostęp 18.11.2022).
68. <https://docs.scipy.org/doc/scipy/reference/generated/scipy.signal.detrend.html>
(dostęp 18.11.2022).
69. S. Brandt, „Analiza danych - Metody statystyczne i obliczeniowe”, Wyd. 2.,
Warszawa: Wydawnictwo Naukowe PWN, 1999.
70. A. Rosenkranz, M. Marian, F.J. Profito, N. Aragon, R. Shah, "The Use of Artificial
Intelligence in Tribology – A Perspective", *Lubricants* 2021, 9(1), 2,
DOI: 10.3390/lubricants9010002.
71. U.M.R. Paturi, S.T. Palakurthy, N.S. Reddy, "The Role of Machine Learning in
Tribology: A Systematic Review". *Arch Computat Methods Eng* 30, 1345–1397,
2023, DOI: 10.1007/s11831-022-09841-5.
72. Rutman J.: Characterization of phase and frequency instabilities in precision
frequency sources : fifteen years of progress. *Proceedings of the IEEE*, vol.66, n° 9,
Sept. 1978.
73. D.W. Allan, "Time and frequency (time domain) characterization, estimation and
prediction of precision clocks and oscillators". *IEEE trans. UFFC*, vol UFFC - 34,
n° 6, Nov. 1987.
74. E.S. Ferre-Pikal et al., "Draft revision of IEEE STD 1139-1988 standard definitions
of physical quantities for fundamental frequency and time metrology - Random
instabilities". *IEEE International Frequency Control Symposium*, pp. 338-357, 1997.
75. E. Fidelis, „Matematyczne podstawy oceny niezawodności”, Warszawa: PWN, 1996.
76. <https://www.astm.org/d6595-17.html> (dostęp 20.11.2022).
77. Zakres akredytacji laboratorium badawczego Nr AB 138, Polskie Centrum
Akredytacji, Warszawa 2022.
78. [https://www.dz.urz.mon.gov.pl/zasoby/dziennik/pozycje/tresc-
aktow/pdf/2023/04/bobw._poz._38-sig.pdf](https://www.dz.urz.mon.gov.pl/zasoby/dziennik/pozycje/tresc-aktow/pdf/2023/04/bobw._poz._38-sig.pdf) (dostęp 20.11.2022).
79. <https://www.theworldmaterial.com/100cr6-bearing-steel/> (dostęp 26.11.2022).
80. K. Bogucki, „Corrosion Testing of Kinematic Connection Details from the Jet Engine
in a Seawater Environment”. *Journal of KONBiN* 2021, Vol. 51, Iss. 1, pp. 173-193,
DOI 10.2478/jok-2021-0012.

81. https://zmienolej.pl/tvcmsblog/post/85/ustalanie-wartosci-granicznych-pierwiastkow-chemicznych-dla-olejow-silnikowych.html?page_type=post (dostęp 20.11.2022).
82. M. Pięgas, T. Radoń, M. Szymański, A. Krutkow, A. Przystawska, „System Informatycznego Wsparcia Eksploatacji Wojskowych Statków Powietrznych SI Samanta jako narzędzie wspomagające zarządzanie zasobami logistycznymi”, *Journal of KONBiN* 2020, Vol. 50, Iss. 4, pp. 269-286, DOI 10.2478/jok-2020-0086.
83. S. Byleń, „Systemy informatyczne wspomagające zarządzanie logistyką w Siłach Zbrojnych Rzeczypospolitej Polskiej”. Difin 2020.