

Karol BOGUCKI

Military Aviation Works No. 4 JSC (Wojskowe Zakłady Lotnicze nr 4 S.A.)

MAGNETIC TESTS OF SNA - HP-59A KINEMATIC CONNECTION DETAILS IN THE RD-33 ENGINE

Badania magnetyczne detali połączenia kinematycznego SNA - HP-59A w silniku RD-33

Abstract: *Aspects of assessing the technical condition of selected elements of the kinematic system in the renovation of RD-33 engines have been presented. In the beginning, typical operational problems have been discussed, and the test object was defined. Then, the theoretical foundations of three non-destructive testing methods based on magnetic field measurement were discussed. Next, the preliminary results of the research of a defective gear obtained by the magnetic metal memory method are presented. Finally, the conclusions have been made.*

Keywords: transport, power unit, gear, non-destructive testing

Streszczenie: *W artykule przedstawiono aspekty oceny stanu technicznego wybranych elementów układu kinematycznego w remoncie silników RD-33. Na początku przybliżono typowe problemy eksploatacyjne i zdefiniowano obiekt badań. Następnie przedstawiono podstawy teoretyczne trzech metod badań nieniszczących bazujących na pomiarze pola magnetycznego. Dalej przedstawiono wstępne wyniki badań zbrakowanego koła zębatego uzyskane metodą magnetycznej pamięci metalu. W końcu przedstawiono wnioski.*

Słowa kluczowe: transport, zespół napędowy, przekładnia zębata, badania nieniszczące

1. Introduction

Gearboxes are a critical component of the kinematic system of ground, sea and air machines and equipment [3] and a source of fatigue problems (fig. 1).

Aviation gears (single-stage, multi-stage, planetary, etc.) and hydro-mechanical gears are exposed to the resultant impact of transmitted power / operating moments as well as angular and linear accelerations resulting from aircraft movement [10]. The damage flux in the gearbox is also affected by:

- quality of lubrication of tribological pairs during gear operation,
- the method of the maintenance and storage of the gears during long periods of non-use,
- the production quality of transmission components,
- quality of the renovation.

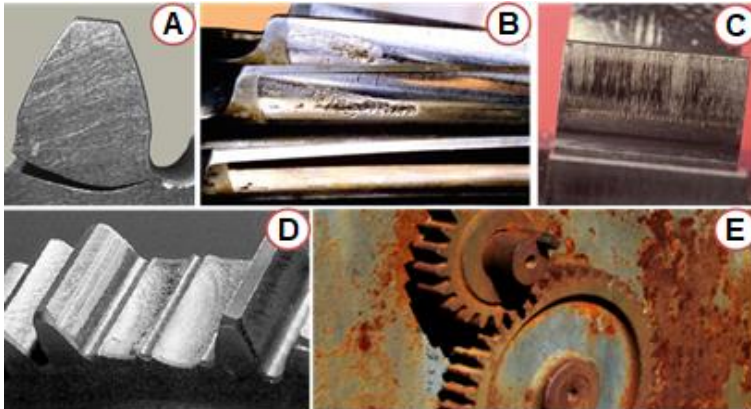


Fig. 1. Examples of tooth damage: A – crack, B – pitting, C – chafing, D – tooth fracture, E – corrosion [3]

To ensure safe operation of aircraft, various methods are used to assess the current technical condition of critical transmission components, including:

- filing sensors mounted in an oil system [18],
- vibration sensors mounted near bearings cooperating with excessive vibration monitoring and signalling system [9],
- registration and analysis of functional parameters of the power unit and power transmission, among others engine speed, torque, pressure and oil temperature, aircraft speed, altitude and acceleration [9].

Periodically after stopping the engine, oil samples are drained, on which laboratory tests are performed for the presence of tribological products and physicochemical changes in the oil [6]. During quality control of production and repair of transmission elements, non-destructive testing methods are used, including magnetic (MT), ultrasonic (UT) and penetration (PT) methods [5].

The article discusses issues related to checking the technical condition of details of the kinematic connection of the accessory gearbox (SNA) and the HP-59A fuel pump. Preliminary results of tests on the existing magnetization of elements - sources of new diagnostic information were also presented.

2. Test object

The test objects are the gears made by steel 12H2NWF4-WD and the torsional shaft made by steel 18H2N4WA. Both details are ferromagnetic, exhibit permanent residual magnetization, which allows assessing their technical health using magnetic methods [2].

3. Magnetic tests

The fundamental principle of magnetic research is the observation that the magnetic properties of ferromagnetic material (described for example by relative magnetic permeability μ_r , coercion H_c , remanence B_r , and the linear magnetostriction λ) [16] are very sensitive to change by [8, 16]:

- chemical composition of the material,
- microstructure, among others, per % phase share, grain size, number and distribution of inclusions,
- the density of dislocation and other defects of the crystal lattice resulting from the quality of production and the history of material exploitation,
- exploitation and residual stresses $\sigma = \sigma_a + \sigma_r$,
- external magnetic field H,
- temperature T.

Magnetic tests performed in a constant or alternating magnetic field make it possible to determine the state and distribution of material magnetization, detect discontinuities of the structure and identify magnetic properties of the material.

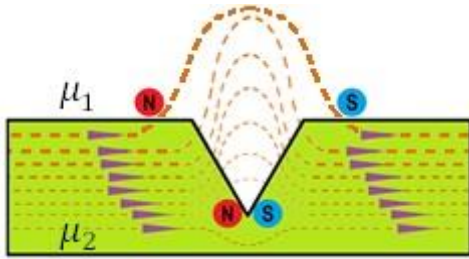
In periodic non-destructive testing and monitoring systems of the technical condition of ferromagnetic elements, three magnetic methods are used.

3.1. Magnetic Flux Leakage (MFL)

The MFL method [5] involves the detection of the outflow of magnetic induction flux over the surface of the tested element in places where a "structure defect" of different magnetic permeability occurs. At the boundary of the media of different magnetic permeability, local magnetic polarization (anomaly) appears and magnetic field lines are deflected (fig. 2). The flow of the magnetic field line above the surface of the element is

recorded by sensors (magnetometers). The tested elements are subjected to a strong magnetic field produced by the magnetometer (powered coil with a ferromagnetic core or permanent magnet), in order to:

- excite a controlled magnetic flux in the material, with known parameters,
- homogenize the magnetic permeability of the material in order to eliminate erroneous indications and improve the probability of diagnosis.



$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (1)$$

$$\frac{B_{t,1}}{B_{t,2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2)$$

$$B_{n,1} = B_{n,2} \quad (3)$$

Fig. 2. The idea of the MFL method, where θ_i – the angle of incidence of the magnetic field lines at the border of the i -th center; $B_{t,i}$ and $B_{n,i}$ – tangential and normal component of magnetic induction respectively in the i -th center; μ_i – magnetic permeability of air and the tested material [5]

The MFL method is used for the inspection of large steel structures, e.g. pipelines, tank bottoms, to map corrosive and erosive cavities and wall shading. Its variety is the *Magnetic Rope Testing* (MRT), used to diagnose ropes. The MFL method is not used in the verification and repairs of details from the RD-33 engine.

3.2. Magnetic-powder method (MPI, MT)

Magnetic Particle Inspection (MPI) and *Magnetic Testing* (MT) realised according to EN ISO 9934, are based on the physical fundamentals of the MFL method, for:

- images: magnetic flux leakage and discontinuity length,
- a rough estimate of the depth of discontinuity.

Here, a ferromagnetic powder with an average particle size between 0.2 μm and 6.0 μm (dry or suspended) is used, for example, MF76F (fluorescent, yellow-green), MR153 (fluorescent, green), MR220 (black) [12]. In order to obtain the reliable test results, it is necessary to clean the tested surfaces from zendr, corrosion, grease and oil beforehand and degrease them with solvent, for example, MR85 Remover [12], which will provide for the movement and accumulation of ferromagnetic powder only around local magnetic anomalies. For the examination of smooth and sandblasted surfaces, the black and white technique is used (white base, black powder), while for treated and sensitive areas, the MT examination is carried out with ultraviolet (UV) fluorescent powder – fig. 3. Depending on the thickness and type of the tested element, direct or alternating current magnetization is used. Direct current is used to examine thick and large workpieces in

order to obtain an adequate magnetic field strength over the entire area under test, especially in places of shape change. During alternating current testing, there is skin effect, which prefers to test elements of uniform shape and constant thickness.

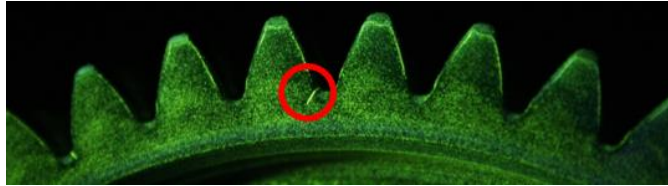


Fig. 3. Gear wheel subjected to magnetic flaw detection in UV light

The MT method is used in aviation, automotive, foundry, control of welds, quality of machining and technological processes, e.g. pressing, bending, stamping [5, 12]. It is also used in the overhaul of RD-33 engines to assess the technical condition of critical elements, such as the gear and torsional shaft (objects of research in this article).

Gears are tested using the MT method in two perpendicular directions of magnetization (fig. 4). In configuration A, it is possible to detect cracks in the wheel splines cooperating with the torsional shaft. In configuration B, it is possible to detect cracks on the teeth or rebates of the tested wheel (fig. 3).

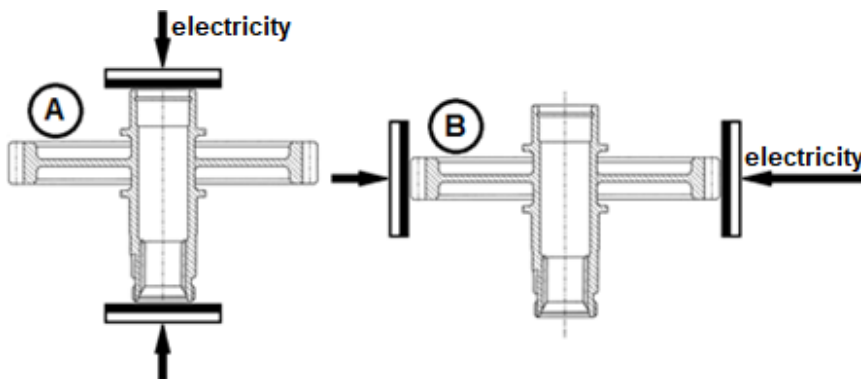


Fig. 4. Diagram of a gear wheel examination by magnetic flaw detection in two perpendicular directions

The torsion shaft is tested by the MT method in the configuration shown in fig. 5, which allows detecting defects on the surfaces of splines cooperating with the gear wheel and fuel pump NR-59A.



Fig. 5. Diagram of torsion shaft testing by magnetic testing

The MT method requires degaussing of the parts to be checked, both before and after the non-destructive testing. Material demagnetization performed prior to MT testing is designed to remove the local strong stress magnetization of the material, formed during the manufacturing process (e.g. overhauling) or operation of the tested item (e.g. stress concentration zones, oxides). Material demagnetization performed after the MT tests is aimed at reducing the risk of attraction of ferromagnetic particles and generation of scratches, which may cause poor operation and faster wear of the elements of the kinematic system [7].

In the repair of the RD-33 engine, the demagnetization of gears, torsion shafts and bearings is carried out with an alternating magnetic field with a maximum intensity of 240 A/m. The demagnetization is carried out until the residual magnetization of the workpiece does not exceed 90 A/m.

3.3. The Metal Magnetic Memory Method (MMM)

The MFL and MT methods use a strong magnetic field, which erases the existing state of magnetization of the material. This information is very valuable for diagnostics and can be used to identify and verify the actual operating conditions of the RD-33 critical kinematic pair [2] since the last overhaul and development of effective prophylaxis. So far lost diagnostic information can be read before MT tests with a cheap vector magnetometer or a group of vector magnetometers. Such non-destructive testing is based on the experience of the Metal Magnetic Memory (MMM) method [15].

The MMM method, described in ISO-24497:2007 [13] for the control of welding seams, is based on the non-linear properties of ferromagnetic and three foundations of magnetostatics [1, 8, 13, 15, 16]:

- 1) Reversible and irreversible magneto-mechanical effects (Villari Generalised Effect, First Load Cycle Effect) which allow for the recording of magnetic information about an the unknown history of operation without further user intervention. Material magnetization - a directly immeasurable parameter - contains two components, which describes the equation (4)

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \quad (4)$$

where: \mathbf{M}_i is a magnetization induced by an external magnetic field, the stresses and temperature changes of the material disappearing after the extortion has ceased; \mathbf{M}_r is a residual magnetization reproducing the unknown history of operation of the tested item and the level of structural changes (degradation) of the material

- 2) Measurements of the existing distribution of magnetic field in the vicinity of the tested element (\mathbf{B}_m or \mathbf{H}_m) for intermediate observation of the magnetization of the material indirectly. They are used:

- the relationship between the magnetization of material \mathbf{M} and measurable parameters: magnetic induction \mathbf{B} or magnetic field strength \mathbf{H} , described by equations (5)

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

where: μ_0 is magnetic permeability of vacuum, in air $\mathbf{M} = 0$;

- equations (1) – (3) describing the deflection of magnetic field lines at the border of two media.
- 3) Detection of magnetic anomalies $\Delta\mathbf{B}_a$ (6) occurring near defects and heterogeneity of structure, taking into consideration:
- the expected distribution of the magnetic field \mathbf{B}_{ref} (the trend for given geometrical and material characteristics of the tested object and its position in relation to the Earth's magnetic field) and noise/disturbance level;
 - the expected characteristics of the magnetic waveform anomalies specified for the defects in question;
 - established diagnostic criteria based on signal component gradient analysis (classical approach in MMM) or estimations obtained from preliminary processing of the measurement signal, for example by a TKEO operator [14].

$$\Delta\mathbf{B}_a = \mathbf{B}_m - \mathbf{B}_{ref} \quad (6)$$

The methodology of MMM testing according to ISO-24497 [13] is encumbered with several errors [7, 15], which were recognized and corrected in the Passive Magnetic State Observer (PMSO) developed by the Air Force Technical Institute [4, 15, 17]. PMSO is based on triaxial magnetometers and new algorithms of measurement data analysis, which ensures higher reliability of the diagnosis.

The implementation of PMSO into the RD-33 engine overhaul technology requires the development of a technology for testing selected elements and defining diagnostic criteria taking into account the level of electromagnetic interference occurring in the repair plant and carrying out implementation tests.

4. Test results

Initial testing using PMSO was performed on a missing gear wheel mounted in the lathe chuck (fig. 6), during its movement at a speed of about 15 rpm. To measure the current state of magnetization and magnetic field distribution, the AMI305-16AR magnetic scale by Aichi [11] containing 16 three-axis magneto-impedance magnetometers AMI305 in MEMS technology with 5 mm distance between consecutive magnetometers was used. Measurements were taken for two positions of the ruler: perpendicular to the

tooth tips and parallel to the axis of the gear. The measured signals are cyclic - the basic signal period is equal to 360 degrees of wheel rotation.

Examples of measurement results with sampling time $t_s = 13 \text{ ms}$ are shown in fig. 7 and fig. 8. It is noticed that cheap magnetometers (digital e-compasses with measuring range $\pm 1,2 \text{ mT}$ and resolution $0,6 \text{ }\mu\text{T}$, cost below 12 \$/piece) provide repeatable and reliable observation of magnetic field distribution near the gear under workshop conditions, as well as detection of magnetic anomalies. Symptoms of anomalies decrease exponentially as the observation distance increases.

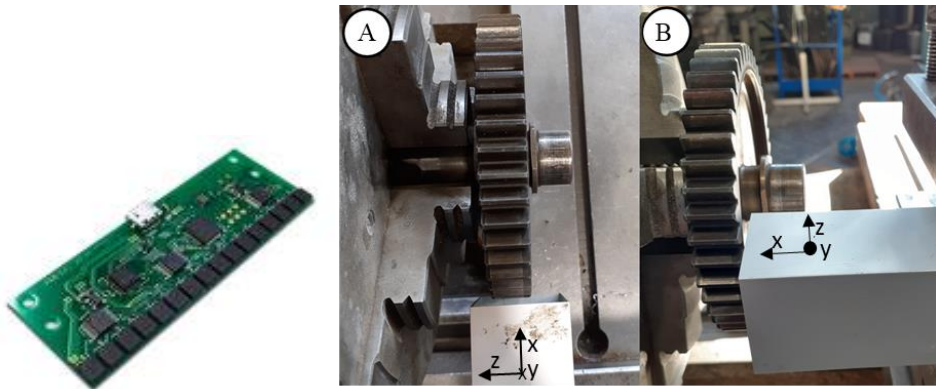


Fig. 6. AMI305-AR16 [11] and stand for measuring existing magnetization of a gear

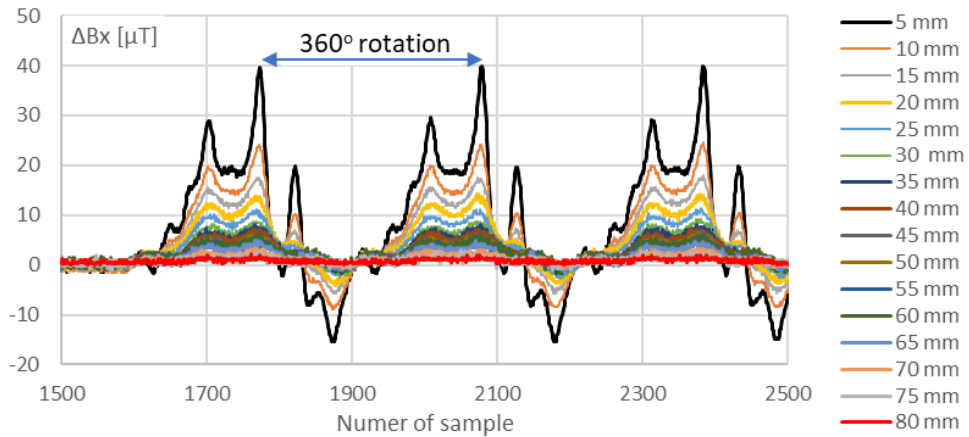


Fig. 7. Component $\Delta B_x = B_x - B_{x,offset}$ for configuration A (offset – magnetic field level near the gear before turning the lathe) – AMI305 magnetometer allows reliable detection of magnetic gear anomalies up to approx. 45 mm

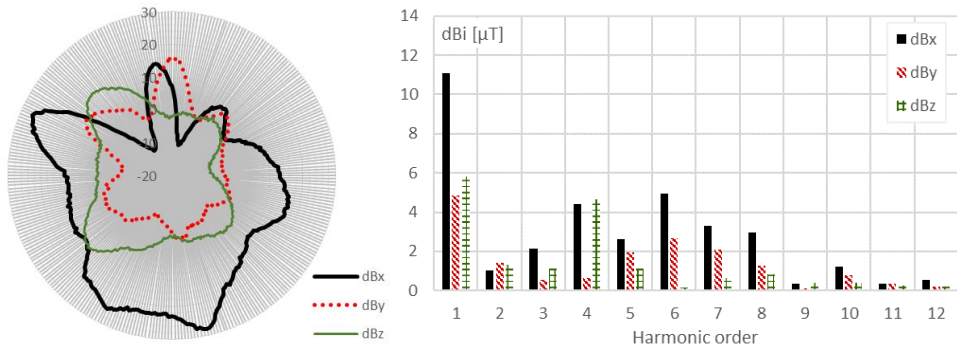


Fig. 8. Components $dB_i = B_i - B_{i,offset}$ in configuration B at a distance of 5 mm from the gear (induction value in μT) and their spectrum – all three components of the magnetic induction vector contain diagnostic information; radar chart analysis and harmonic level makes it easy to identify the cause of magnetic field disturbances

5. Summary and conclusions

Three magnetic methods used in non-destructive testing are presented, including the MT method used in the RD-33 engine overhaul, and the preliminary results of passive magnetic state observer tests.

Preliminary results of the gear wheel tests performed by PMSO method in the workshop conditions showed the possibility of applying this NDT method to RD-33 engine repair technology and analysing new diagnostic information.

- effects of the unknown history of exploitation of tested elements, recorded and stored as magnetic information in a ferromagnetic material.

Magnetic testing with PMSO requires metrological care because:

- a) the amplitude of signals decreases exponentially as the distance,
- b) of the magnetometer from the surface of the component being tested increases,
- c) the misalignment of the gear generates clear symptoms of PMSO,
- d) the expected distribution of the magnetic field depends on the spatial position of the test item relative to the Earth's magnetic field.

In the next stage of research, statistically reliable gear population will be measured, and PMSO results will be verified with other testing methods, including laboratory methods.

Acknowledgment

The experimental tests were carried out with the help of the staff and apparatus of the Air Force Institute of Technology.

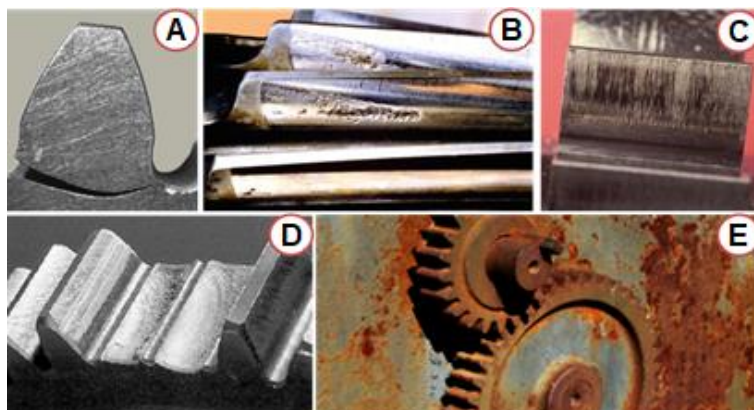
6. References

1. Altherton D.L., Jiles D.C.: Effects of stress on magnetization. *NDT International*, Vol. 19, No 1, 1986.
2. Bogucki K.: Reliability analysis of critical kinematic pair of the RD-33 engine. *Journal of KONBiN*, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0071.
3. Boiadjev I., Witzig J., Tobie T., Stahl K.: Tooth Flank Fracture – Basic Principles and Calculation Model for a Sub-Surface-Initiated Fatigue Failure Mode of Case-Hardened Gears. *Issue of Gear Technology*, August 2015.
4. Cottrell A.H.: *The Mechanical Properties of Matter*. John Wiley and Sons Inc., New York 1964.
5. Czuchoryj J., Sikora S.: *Metody i techniki badań nieniszczących złączy spawanych*. Wyd. I, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2016.
6. Deliś M., Kłysz S., Spychała J., Zboiński S.: Diagnostowanie lotniczego turbinowego silnika śmigłowego na podstawie analiz oleju smarowego. *Wisła* 2012, DOI: 10.13140/RG.2.1.5106.1923.
7. Dubow A.A., Dubow Al.A., Kolokolnikow S.M.: *Method of metal magnetic memory and inspection instruments*. Training handbook. ZAO Tisso, Moscow 2008.
8. Ewing J.A.: *Magnetic induction in iron and other metals*. The Electrician Printing and Publishing, London 1900.
9. Gębura A.: *Metoda modulacji częstotliwości napięcia prądnic pokładowych w diagnozowaniu zespołów napędowych*. Wyd. ITWL, Warszawa 2010.
10. Gębura A., Kłysz S., Tokarski. T.: Monitoring wear of gear wheel of helicopter transmission using the FAM-C and FDM-A methods. *Procedia Structural Integrity*, Vol. 16, 2019, DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.039.
11. <https://www.aichi-mi.com/>
12. <https://www.mr-chemie.de/en>.
13. ISO-24497-1:3:2007, Non-destructive testing - Metal magnetic memory.
14. Randall R.B.: A new interpretation of the Teager Kaiser energy operator. *Conference on Vibrations in Rotating Machinery*, Manchester, September 2016.
15. Roskosz M., Witoś M., Zieja M.: Examination of Technical Gear with the Help of Magnetic Passive Observer Status. *The 11th European Conference on Non-Destructive Testing*, October 6th-10th 2014, Prague.
16. Vandebossche L.: *Magnetic hysteretic characterization of ferromagnetic materials with objectives towards non-destructive evaluation of material degradation*”, PhD Thesis, Universiteit Gent, 2009.
17. Witoś M.: The reference signal of geomagnetic field for MMM expert systems. *Key Engineering Materials*, Vol. 518, 2012.
18. www.tc.gc.ca “Chip Detectors in Aircraft Engines, APU's, Transmissions and Reduction Gearboxes”, *Airworthiness Notice - B009 Edition*, June 1993, Canada.

BADANIA MAGNETYCZNE DETALI POŁĄCZENIA KINEMATYCZNEGO SNA - HP-59A W SILNIKU RD-33

1. Wprowadzenie

Przekładnie są krytycznym podzespołem układu kinematycznego maszyn i urządzeń naziemnych, morskich i lotniczych [3] oraz źródłem problemów zmęczeniowych (rys. 1).



Rys. 1. Przykładowe uszkodzenia zębów: A – pęknięcie, B – pitting, C – przetarcia, D – złamanie zęba, E – korozja [3]

Lotnicze przekładnie zębate (jednostopniowe, wielostopniowe, planetarne itp.) i hydromechaniczne są narażone na wypadkowy wpływ przenoszonych mocy/momentów eksploatacyjnych oraz przyśpieszeń kątowych i liniowych wynikających z ruchu statku powietrznego [10]. Na strumień uszkodzeń w przekładni mają również wpływ:

- jakość smarowania par tribologicznych podczas pracy przekładni,
- sposób konserwowania i przechowywania przekładni podczas długotrwałego postoju,
- jakość produkcji elementów składowych przekładni,
- jakość remontu.

W celu zapewnienia bezpiecznej eksploatacji statków powietrznych stosowane są różne metody bieżącej oceny stanu technicznego krytycznych elementów przekładni, m.in.:

- czujniki opółkowania montowane w instalacji olejowej [18],

- czujniki drgań mocowane w pobliżu łożysk współpracujące z układem monitorowania i sygnalizacji nadmiernych drgań [9],
- rejestracja i analiza parametrów funkcjonalnych zespołu napędowego i transmisji mocy, m.in. prędkości obrotowych silnika, momentu obrotowego, ciśnienia i temperatury oleju, prędkości, wysokości i przyspieszeń statku powietrznego [9].

Okresowo po zatrzymaniu silnika zlewane są próbki oleju, na których wykonywane są badania laboratoryjne na obecność produktów tribologicznych i zmian fizykochemicznych oleju [6]. Podczas kontroli jakości produkcji i remontu elementów przekładni stosowane są metody badań nieniszczących, m.in. metoda magnetyczna (MT), ultradźwiękowa (UT) i penetracyjna (PT) [5].

W artykule przybliżono zagadnienia związane z kontrolą stanu technicznego detali połączenia kinematycznego skrzynki napędów agregatów (SNA) i pompy paliwowej HP-59A. Przedstawiono również wstępne wyniki badań zastanego namagnesowania elementów – źródła nowej informacji diagnostycznej.

2. Obiekt badań

Obiektem badań są: koło zębate wykonane ze stali 12H2NWF-A-WD oraz wałek skrętny ze stali 18H2N4WA. Oba elementy są ferromagnetyczne i wykazują trwałe namagnesowanie resztkowe, co pozwala oceniać ich stan techniczny metodami magnetycznymi [2].

3. Badania magnetyczne

Fundamentem badań magnetycznych jest spostrzeżenie, że właściwości magnetyczne materiału ferromagnetycznego (opisywane m.in. przez: względną przenikalność magnetyczną μ_r , koercję H_c , remanencję B_r i magnetostrykcję liniową λ) [16], są bardzo wrażliwe na zmianę [8, 16]:

- składu chemicznego materiału,
- mikrostruktury, m.in. na procentowy udział faz, wymiar ziarna, liczbę i rozmieszczenia wtrąceń,
- gęstości dyslokacji i innych wad sieci krystalicznej wynikających z jakości produkcji i historii eksploatacji materiału,
- naprężeń eksploatacyjnych i szczytkowych $\sigma = \sigma_a + \sigma_r$,
- zewnętrznego pola magnetycznego H ,
- temperatury T .

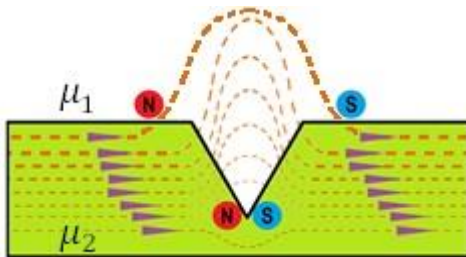
Badania magnetyczne wykonywane w stałym lub zmiennym polu magnetycznym umożliwiając: określenie stanu i rozkładu namagnesowania materiału, wykrycie nieciągłości struktury i identyfikowanie właściwości magnetycznych materiału.

W okresowych badaniach nieniszczących i systemach monitorowania stanu technicznego elementów ferromagnetycznych stosowane są trzy metody magnetyczne.

3.1. Metoda wypływu strumienia magnetycznego (MFL)

Metoda MFL (ang. *Magnetic Flux Leakage*) [5] polega na detekcji wypływu strumienia indukcji magnetycznej nad powierzchnią badanego elementu w miejscach występowania „defektu struktury” o odmienniej przenikalności magnetycznej. Na granicy ośrodków o różnej przenikalności magnetycznej pojawia się lokalna polaryzacja magnetyczna (anomalia) i linie pola magnetycznego ulegają ugięciu (rys. 2). Wypływ linii pola magnetycznego nad powierzchnią elementu jest rejestrowany przez czujniki (magnetometry). Badane elementy są poddawane działaniu silnego pola magnetycznego wytwarzanego przez magnesnicę (zasilaną cewkę z rdzeniem ferromagnetycznym lub magnes stały) w celu:

- wzbudzenia w materiale kontrolowanego strumienia magnetycznego o znanych parametrach,
- ujednorodnienia przenikalności magnetycznej materiału w celu wyeliminowania błędnych wskazań i poprawienia prawdopodobieństwa diagnozy.



$$\frac{\tan \theta_1}{\tan \theta_2} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (1)$$

$$\frac{B_{t,1}}{B_{t,2}} = \frac{\mu_1}{\mu_2} \quad (2)$$

$$B_{n,1} = B_{n,2} \quad (3)$$

Rys. 2. Idea metody MFL, gdzie θ_i – kąt padania linii pola magnetycznego na granicę i -tego ośrodka, $B_{t,i}$ i $B_{n,i}$ – odpowiednio: składowa styczna i normalna indukcji magnetycznej w i -tym ośrodku, μ_i – przenikalność magnetyczna powietrza i badanego materiału [5]

Metoda MFL jest stosowana do kontroli dużych konstrukcji stalowych, np. rurociągów, den zbiorników, w celu mapowania ubytków korozyjnych, erozyjnych oraz pocienienia ścianek. Jej odmianą jest metoda MRT (ang. *Magnetic Rope Testing*), używana do diagnostyki lin. Metoda MFL nie jest używana w weryfikacji i remoncie detali pochodzących z silnika RD-33.

3.2. Metoda magnetyczno-proszkowa (MPI, MT)

Metody MPI (ang. *Magnetic Particle Inspection*) i MT (ang. *Magnetic Testing*) wykonywane wg EN ISO 9934 bazują na podstawach fizycznych metody MFL, przy czym do:

- zobrazowania: wycieku strumienia magnetycznego i długości nieciągłości,

- zgrubnego oszacowania głębokości nieciągłości,

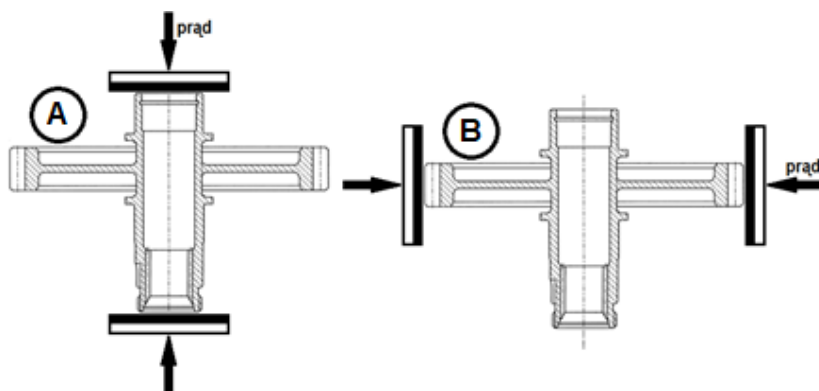
używany jest proszek ferromagnetyczny o średniej średnicy cząstek od 0,2 μm do 6,0 μm (suchy lub w zawieszynie), np. MF76F (fluorescencyjny, żółtozielony), MR153 (fluorescencyjny, zielony), MR220 (czarny) [12]. W celu uzyskania wiarygodnych wyników badań wymagane jest wcześniejsze oczyszczenie badanych powierzchni z zendr, korozji, smarów i olejów oraz odtłuszczenie przy pomocy rozpuszczalnika, np. MR85 Remover [12], co zapewni przemieszczanie i gromadzenie się proszku ferromagnetycznego tylko wokół lokalnych anomalii magnetycznych. Do badania powierzchni gładkich i piaskowanych wykorzystuje się technikę białą-czarną (biały podkład, czarny proszek), natomiast w miejscach obrobionych i do badań wymagających dużej czułości wykonuje się test MT proszkiem fluorescencyjnym w świetle ultrafioletowym (UV) – rys. 3. W zależności od grubości i rodzaju badanego elementu stosuje się magnesowanie prądem stałym lub przemiennym. Prąd stały jest używany do badania grubych i dużych detali, tak aby uzyskać odpowiednie natężenie pola magnetycznego na całym badanym obszarze, zwłaszcza w miejscach zmiany kształtu. Podczas badania prądem przemiennym występuje efekt naskórkowości, co preferuje badanie elementów o jednolitym kształcie i stałej grubości.



Rys. 3. Koło zębate poddane defektoskopii magnetycznej w świetle UV

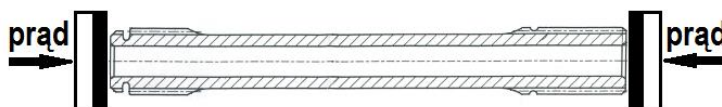
Metoda MT jest stosowana w lotnictwie, motoryzacji, odlewnictwie, kontroli: spoin, jakości obróbki skrawaniem i procesów technologicznych, m.in. wciskania, gięcia, tłoczenia [5, 12]. Jest również stosowana w remoncie silników RD-33 do oceny stanu technicznego elementów krytycznych, m.in. koła zębatego i wałka skrotnego (obiektów badań w niniejszym artykule).

Koła zębata bada się metodą MT w dwóch prostopadłych kierunkach magnesowania (rys. 4). W konfiguracji A możliwe jest wykrycie pęknięć na wielowypustach koła, współpracujących z wałkiem skrotnym. W położeniu B możliwe jest wykrycie pęknięć znajdujących się na zębach lub wrębach badanego koła (rys. 3).



Rys. 4. Schemat badania koła zębatego metodą defektoskopii magnetycznej w dwóch prostopadłych kierunkach

Wałek skrętny bada się metodą MT w konfiguracji przedstawionej na rys. 5, co pozwala wykryć wady na powierzchniach wielowypustów współpracujących z kołem zębatym i pompą paliwa NR-59A.



Rys. 5. Schemat badania wałka skrętnego metodą defektoskopii magnetycznej

Metoda MT wymaga rozmagnesowania sprawdzanych detali, zarówno przed, jak i po zakończeniu badań nieniszczących. Rozmagnesowanie materiału wykonywane przed badaniami MT ma na celu usunięcie lokalnego silnego namagnesowania naprężeniowego materiału, powstałego w procesie wytwarzania (np. przehartowania) lub eksploatacji badanego elementu (np. strefy koncentracji naprężeń, tlenki). Rozmagnesowanie materiału wykonywane po zakończeniu badań MT ma na celu ograniczenie ryzyka przyciągania drobin ferromagnetycznych i generowania rys, co może wywołać złą pracę i szybsze zużycie elementów układu kinematycznego [7].

W remoncie silnika RD-33 rozmagnesowanie kół zębatych, wałków skrętnych i łożyska przeprowadza się zmiennym polem magnetycznym o maksymalnym natężeniu równym 240 A/m. Rozmagnesowanie przeprowadza się do chwili, gdy namagnesowanie resztkowe detalu nie przekracza 90 A/m.

3.3. Metoda magnetycznej pamięci metalu (MMM)

Metody MFL i MT używają silnego pola magnetycznego, które kasuje zastany stan namagnesowania materiału – informację bardzo cenną dla diagnosty, pomagającą zidentyfikować i zweryfikować rzeczywiste warunki pracy krytycznej pary kinematycznej silnika RD-33 [2] od ostatniego remontu i opracować skuteczną profilaktykę. Dotychczas

gubiona informacja diagnostyczna może zostać odczytana przed badaniami MT za pomocą taniego magnetometru wektorowego lub grupy magnetometrów wektorowych. Takie badania nieniszczące bazują na doświadczeniach defektoskopii metodą magnetycznej pamięci metalu (MMM) [15].

Metoda MMM, opisana w normie ISO-24497:2007 [13] w zakresie kontroli spoin spawalniczych, bazuje na właściwościach nieliniowych ferromagnetyka i trzech fundamentach magnetostatyki [1, 8, 13, 15, 16]:

- 1) Odwracalnych i nieodwracalnych efektach magneto-mechanicznych (uogólniony efekt Villariego, efekt pierwszego cyklu obciążenia), umożliwiających zapisanie informacji magnetycznej o nieznannej historii eksploatacji detalu bez dodatkowej ingerencji użytkownika. Magnetyzacja materiału – parametr bezpośrednio niemierzalny – zawiera dwie składowe, co opisuje równanie:

$$\mathbf{M} = \mathbf{M}_i + \mathbf{M}_r \quad (4)$$

gdzie: \mathbf{M}_i jest magnetyzacją indukowaną przez zewnętrzne pole magnetyczne, naprężenia i zmiany temperatury materiału, zanikającą po ustaniu wymuszenia; \mathbf{M}_r jest magnetyzacją resztkową odwzorowującą nieznaną historię eksploatacji badanego elementu i poziom zmian struktury (degradacji) materiału.

- 2) Pomiarach zastanego rozkładu pola magnetycznego w pobliżu badanego elementu (\mathbf{B}_m lub \mathbf{H}_m) w celu pośredniej obserwacji magnetyzacji materiału. Wykorzystane są:
 - relacje pomiędzy magnetyzacją materiału \mathbf{M} i mierzalnymi parametrami: indukcją magnetyczną \mathbf{B} lub natężeniem pola magnetycznego \mathbf{H} , opisane wzorem:

$$\mathbf{B} = \mu_0(\mathbf{H} + \mathbf{M}) \quad (5)$$

gdzie μ_0 jest przenikalnością magnetyczną próżni, w powietrzu $\mathbf{M} = 0$;

- związki (1) – (3) opisujące ugięcie linii pola magnetycznego na granicy dwóch ośrodków.
- 3) Detekcji anomalii magnetycznych $\Delta\mathbf{B}_a$ (6) występujących w pobliżu defektów i niejednorodności struktury z uwzględnieniem:
 - oczekiwanego rozkładu pola magnetycznego \mathbf{B}_{ref} (trendu dla danych cech geometrycznych i materiałowych badanego obiektu i jego położenia względem ziemskiego pola magnetycznego) i poziomu szumu/zakłóceń;
 - oczekiwanych charakterystyk falowych anomalii magnetycznych określonych dla danych defektów;
 - ustalonych kryteriów diagnostycznych bazujących na analizie gradientu składowych sygnału (klasyczne podejście w MMM) lub estymatach uzyskanych z wstępnego przetworzenia sygnału pomiarowego np. przez operator TKEO [14].

$$\Delta\mathbf{B}_a = \mathbf{B}_m - \mathbf{B}_{ref} \quad (6)$$

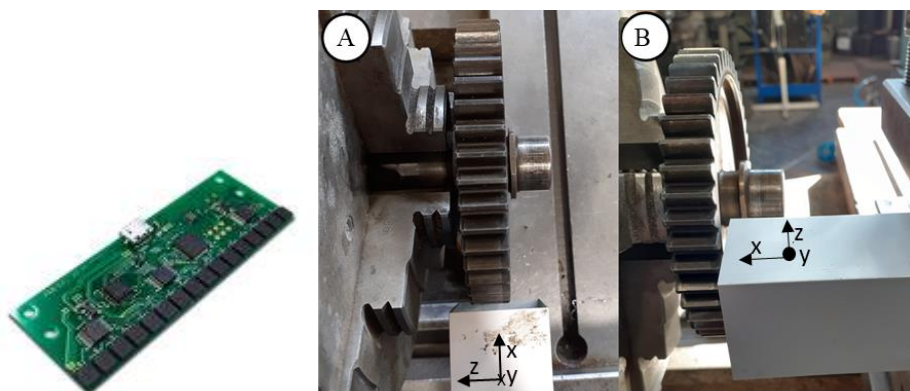
Metodologia badań MMM wg ISO-24497 [13] jest obarczona kilkoma błędami [7, 15], które zostały rozpoznane i skorygowane w Pasywnym Magnetycznym Obserwatorze Stanu (PMOS) opracowanym w Instytucie Technicznym Wojsk Lotniczych [4, 15, 17]. PMOS bazuje na trójosiowych magnetometrach i nowych algorytmach analizy danych pomiarowych, co zapewnia większą wiarygodność diagnozy.

Wdrożenie PMOS do technologii remontu silników RD-33 wymaga opracowania technologii badań wybranych elementów, określenia kryteriów diagnostycznych z uwzględnieniem poziomu zakłóceń elektromagnetycznych występujących w zakładzie remontowym oraz przeprowadzenie badań wdrożeniowych.

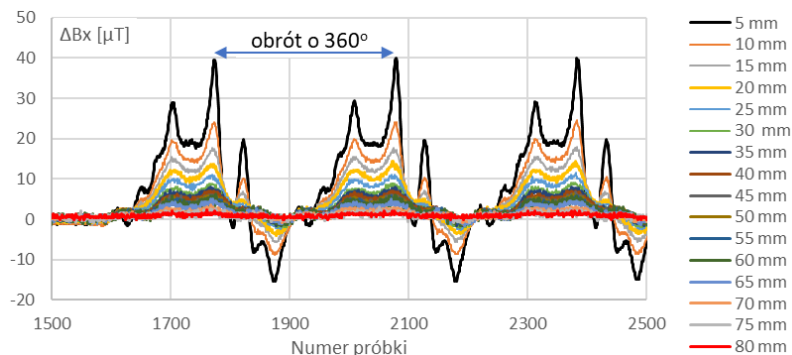
4. Wyniki badań

Wstępne badania z wykorzystaniem PMOS wykonano na zbrakowanym kole zębatym zamontowanym w uchwycie tokarki (rys. 6), podczas jego ruchu z prędkością obrotową ok. 15 obr/min. Do pomiaru zastanego stanu namagnesowania i rozkładu pola magnetycznego wykorzystano linijkę magnetyczną AMI305-16AR firmy Aichi [11] zawierającą 16 trójosiowych magnetometrów magneto-impedancyjnych AMI305 w technologii MEMS z 5 mm odstępem pomiędzy kolejnymi magnetometrami. Pomiary wykonano dla dwóch położeń linijki: prostopadle do wierzchołków zębów i równoległe względem osi koła zębatego. Mierzone sygnały są cyklostacjonarne – podstawowy okres sygnału równy jest obrotowi koła o 360 stopni.

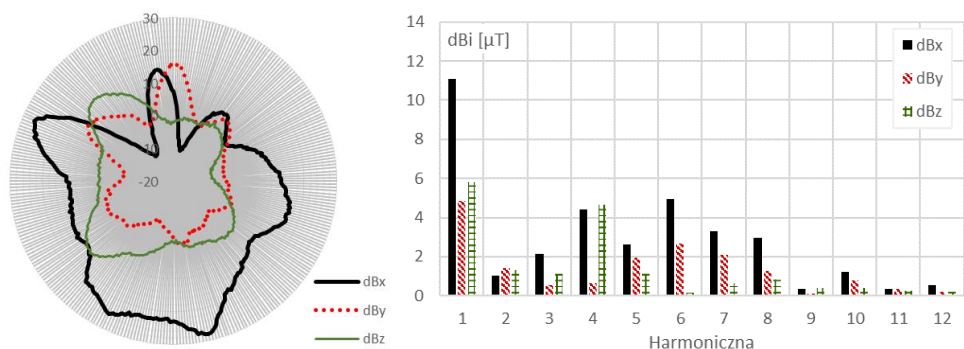
Przykładowe wyniki pomiarów z czasem próbkowania $t_s = 13$ ms przedstawiono na rys. 7 i 8. Dostrzega się, że tanie magnetometry (cyfrowe e-kompassy o zakresie pomiarowym $\pm 1,2$ mT i rozdzielczości $0,6$ μ T, koszt poniżej 50 zł/szt.) zapewniają powtarzalną i wiarygodną obserwację rozkładu pola magnetycznego w pobliżu koła zębatego w warunkach warsztatowych, a także detekcję anomalii magnetycznych. Symptomy anomalii maleją wykładniczo wraz z zwiększaniem odległości obserwacji.



Rys. 6. AMI305-AR16 [11] i stanowisko do pomiaru zastanego namagnesowania koła zębatego



Rys. 7. Składowa $\Delta B_x = B_x - B_{x,offset}$ dla konfiguracji A (offset – poziom pola magnetycznego w pobliżu koła zębatego przed uruchomieniem tokarki) – magnetometr AMI305 umożliwia wiarygodną detekcję anomalii magnetycznych koła zębatego do ok. 45 mm



Rys. 8. Składowe $dB_i = B_i - B_{i,offset}$ w konfiguracji B w odległości 5 mm od koła zębatego (wartość indukcji w μT) i ich widmo – wszystkie trzy składowe wektora indukcji magnetycznej zawierają informacje diagnostyczne; analiza wykresu radarowego i poziomu harmonicznych ułatwia identyfikację przyczyny zaburzeń pola magnetycznego

5. Podsumowanie i wnioski

Przedstawiono trzy metody magnetyczne stosowane w badaniach nieniszczących, w tym metodę MT stosowaną w remoncie silnika RD-33, oraz wstępne wyniki badań pasywnego magnetycznego obserwatora stanu.

Wstępne wyniki badań koła zębatego wykonane metodą PMOS w warunkach warsztatowych wykazały możliwość zastosowania tej metody badań nieniszczących w technologii remontu silnika RD-33 i do analizowania nowej informacji diagnostycznej

– skutków nieznannej historii eksploatacji badanych elementów, zapisanej i przechowywanej w postaci informacji magnetycznej w materiale ferromagnetycznym.

Badania magnetyczne wykonywane metodą PMOS wymagają zachowania staranności metrologicznej, ponieważ:

- a) amplituda sygnałów maleje wykładniczo wraz z zwiększaniem odległości magnetometru od powierzchni badanego elementu,
- b) niewspółosiowość koła zębatego generuje wyraźne symptomy PMOS,
- c) oczekiwany rozkład pola magnetycznego zależy od położenia przestrzennego badanego elementu względem ziemskiego pola magnetycznego.

W kolejnym etapie badań zostaną wykonane pomiary statystycznie wiarygodnej populacji kół zębatych i weryfikacja wyników PMOS z innymi metodami badawczymi, w tym metodami laboratoryjnymi.

Podziękowanie

Badania eksperymentalne zostały wykonane z pomocą personelu i aparatury Instytutu Technicznego Wojsk Lotniczych.

6. Literatura

1. Altherton D.L., Jiles D.C.: Effects of stress on magnetization. NDT International, Vol. 19, No 1, 1986.
2. Bogucki K.: Reliability analysis of critical kinematic pair of the RD-33 engine. Journal of KONBiN, Vol. 49, Iss. 3, 2019, DOI 10.2478/jok-2019-0071.
3. Boiadjev I., Witzig J., Tobie T., Stahl K.: Tooth Flank Fracture – Basic Principles and Calculation Model for a Sub-Surface-Initiated Fatigue Failure Mode of Case-Hardened Gears. Issue of Gear Technology, August 2015.
4. Cottrell A.H.: The Mechanical Properties of Matter. John Wiley and Sons Inc., New York 1964.
5. Czuchoryj J., Sikora S.: Metody i techniki badań nieniszczących złączy spawanych. Wyd. I, Instytut Spawalnictwa, Gliwice 2016.
6. Deliś M., Kłysz S., Spychała J., Zboiński S.: Diagnostowanie lotniczego turbinowego silnika śmigłowego na podstawie analiz oleju smarowego. Wisła 2012, DOI: 10.13140/RG.2.1.5106.1923.
7. Dubow A.A., Dubow A.I.A., Kolokolnikow S.M.: Method of metal magnetic memory and inspection instruments. Training handbook. ZAO Tisso, Moscow 2008.
8. Ewing J.A.: Magnetic induction in iron and other metals. The Electrician Printing and Publishing, London 1900.
9. Gębura A.: Metoda modulacji częstotliwości napięcia prądnic pokładowych w diagnostowaniu zespołów napędowych. Wyd. ITWL, Warszawa 2010.

10. Gębura A., Kłysz S., Tokarski. T.: Monitoring wear of gear wheel of helicopter transmission using the FAM-C and FDM-A methods. *Procedia Structural Integrity*, Vol. 16, 2019, DOI: 10.1016/j.prostr.2019.07.039.
11. <https://www.aichi-mi.com/>
12. <https://www.mr-chemie.de/en>.
13. ISO-24497-1:3:2007, Non-destructive testing - Metal magnetic memory.
14. Randall R.B.: A new interpretation of the Teager Kaiser energy operator. Conference on Vibrations in Rotating Machinery, Manchester, September 2016.
15. Roskosz M., Witoś M., Zieja M.: Examination of Technical Gear with the Help of Magnetic Passive Observer Status. The 11th European Conference on Non-Destructive Testing, October 6th-10th 2014, Prague.
16. Vandebossche L.: Magnetic hysteretic characterization of ferromagnetic materials with objectives towards non-destructive evaluation of material degradation”, PhD Thesis, Universiteit Gent, 2009.
17. Witoś M.: The reference signal of geomagnetic field for MMM expert systems. *Key Engineering Materials*, Vol. 518, 2012.
18. www.tc.gc.ca “Chip Detectors in Aircraft Engines, APU's, Transmissions and Reduction Gearboxes”, Airworthiness Notice - B009 Edition, June 1993, Canada.