

Univerzita Hradec Králové  
Přírodovědecká fakulta

## **Diplomová práce**

2015

Lucie Janoušková

Univerzita Hradec Králové

Přírodovědecká fakulta

Katedra fyziky

## **Diagnostické metody letadlových motorů**

Diplomová práce

Autor: Bc. Lucie Janoušková  
Studijní program: N 1701 Fyzika  
Studijní obor: Fyzikální měření a modelování  
Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Hradec Králové

2015

**Univerzita Hradec Králové**  
Přírodovědecká fakulta

## **Diagnostické metody letadlových motorů**

**Autor:** **Bc. Lucie Janoušková**

Studijní program: N1701 Fyzika

Studijní obor: Fyzikální měření a modelování

**Název závěrečné práce:** **Diagnostické metody letadlových motorů**

Název závěrečné práce AJ: Diagnostic methods of aircraft engines

**Cíl, metody, literatura, předpoklady:**

Doporučená osnova práce:

Garantující pracoviště: Katedra fyziky, Přírodovědecká fakulta

Vedoucí práce: doc. RNDr. Jan Kříž, Ph.D.

Konzultant:

Oponent: Ing. Karol Radocha, Ph.D.

Datum zadání závěrečné práce:

Datum odevzdání závěrečné práce:

# **Prohlášení**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracovala (pod vedením vedoucího diplomové práce) samostatně a uvedla jsem všechny použité prameny a literaturu.

V Hradci Králové dne 31. 5. 2015

# Anotace

JANOŠKOVÁ, Lucie. *Diagnostické metody letadlových motorů*. Hradec Králové: Přírodovědecká fakulta Univerzity Hradec Králové, 2015. 63s. Diplomová práce.

Cílem této práce je popsat údržbové metody technické diagnostiky bezdemontážní a monitorovací.

Teoretická část navazuje na předchozí bakalářskou práci a je zaměřena na popis diagnostických metod, pracovních postupů a diagnostického pracoviště. Součástí teorie je popis jednotlivých diagnostických metod letadlových motorů, prováděných jak za provozu, tak při odstávce. Vysvětluje, na jakých fyzikálních principech tyto metody fungují a jaká jsou používaná snímací zařízení. Konkrétně popisuje, jak a čím lze měřit diagnostické veličiny a jaké jsou výstupy měření.

Praktická část poskytuje náhled do měření různých veličin, do předpisů a postupů při vyšetřování objektu.

V závěru lze nalézt ukázky z praxe.

Klíčová slova: technická diagnostika, metody technické diagnostiky, veličiny technické diagnostiky, senzory, motory, měření

## **Annotation**

JANOŠKOVÁ, Lucie. *Diagnostic methods of aircraft engines*. Hradec Králové: Faculty of Science, University of Hradec Králové, 2015, 63pp. Master Degree Thesis.

The goal of this thesis is to describe methods of maintenance of technical diagnostics - non-invasive diagnostics measuring procedures and monitoring.

The theoretical part is a continuation of Bachelor Thesis, methods of diagnostics, workflows and workspace for diagnostics are described. The description of particular diagnostics methods of aircraft engines during operation and during maintenance of engines are included. In this part, it is also explained, on which physical principles these methods are based and which sensors are used. In particular, the way, how to measure diagnostic quantities as well as the measurement outputs are described.

The preview of measurement of various quantities, standards and processes during investigation of subject is provided in the practical part.

Review of this thesis describes process of diagnostic methods in practice.

Keywords: Technical diagnostics, Methods of technical diagnostics, Technical diagnostics quantities, Sensors, Engines, Measurement.

## OBSAH

Seznam zkratek .....	9
Úvod.....	10
1. Letadlové motory.....	12
1.1 Princip činnosti letadlových motorů .....	12
1.2 Typy letadlových motorů .....	13
2. Technická diagnostika .....	14
2.1 Historie technické diagnostiky a údržby letadlové techniky.....	14
2.2 Technická diagnostika před uvedením objektu do provozu.....	15
2.3 Technická diagnostika během technického života objektu.....	15
2.3.1 Rozdělení TD podle způsobu pracovních postupů .....	16
2.3.2 Diagnostické prostředky .....	17
2.3.3 Technická dokumentace .....	18
2.4 Pracoviště TD.....	18
3. Diagnostické modely .....	20
3.1 Analytické modely .....	20
3.2 Logické a topologické modely .....	21
4. TD za provozu - monitorovací systém .....	22
4.1 Historie monitorovacích systémů.....	22
4.2 Senzory motoru .....	23
4.2.1 Měření teploty.....	24
4.2.2 Měření tlaku .....	25
4.2.3 Měření otáček .....	25
4.2.4 Měření vibrací.....	26
4.3 Zpracování diagnostických signálů.....	26
4.3.1 Druhy signálů.....	27

5.	Údržbové metody technické diagnostiky .....	28
5.1	Vibrodiagnostika .....	28
5.1.1	Druhy vibrací, veličiny a základní vztahy .....	28
5.1.2	Způsoby vibrodiagnostiky .....	30
5.2	Hluková diagnostika.....	30
5.2.1	Akustické veličiny a jejich vztahy .....	31
5.2.2	Zvukoměry .....	32
5.3	Vizuální defektoskopie.....	32
5.3.1	Podmínky vizuální zkoušky .....	32
5.3.2	Diagnostická zařízení.....	33
5.4	Termografie.....	34
5.4.1	Dotykové snímání teploty .....	34
5.4.2	Bezdotykové snímání teploty.....	35
5.5	Kapilární defektoskopie .....	35
5.5.1	Kapilární jevy .....	35
5.5.2	Pracovní postupy při kapilární zkoušce .....	36
5.5.3	Kapilární měrky .....	38
5.6	Magnetická defektoskopie .....	39
5.6.1	Veličiny v magnetické defektoskopii .....	39
5.6.2	Pracovní postupy v magnetické defektoskopii .....	39
5.6.3	Způsoby magnetizace .....	40
5.6.4	Zařízení pro magnetickou defektoskopii .....	41
5.6.5	Měrky v magnetické defektoskopii.....	42
5.6.6	Magnetická defektoskopie - elektrická metoda .....	42
5.7	Defektoskopie vířivými proudy .....	42
5.7.1	Princip metody vířivými proudy.....	43
5.8	Ultrazvuková defektoskopie.....	43



5.8.1	Ultrazvukové vlnění.....	44
5.8.2	Ultrazvukové sondy .....	45
5.9	Defektoskopie prozařováním .....	46
5.9.1	Zdroj ionizujícího záření.....	46
5.10	Tribodiagnostika .....	47
5.10.1	Tribodiagnostické metody .....	48
6.	Příklady provádění TD v praxi - měření.....	50
6.1	PSPM-01 .....	50
6.1.1	Výsledky měření .....	52
6.2	Rozbor oleje .....	53
6.2.1	Rozbor oleje - záznam .....	53
6.3	Snímací box.....	55
6.3.1	Další zkoušky a senzory .....	57
7.	Příklady provádění TD před uvedením motoru do provozu.....	59
	Závěr .....	61
	Seznam použité literatury .....	62

## Seznam zkratek

- AD - Airworthiness Directives - směrnice údržby
- ADC - Air Data Computers – systém pro zpracování dat
- AIDS - Aircraft Integrated Data System – letadlový data systém
- AMM - Aircraft Maintenance Manual – příručka pro údržbu letadla
- ARINC – Aeronautical Radio Incorporated – systém pro přenos a úložiště dat letadlo/vzduch
- AWM - Aircraft Wiring Manual – složka elektrických schémat
- BAAA - Bureau of Aircraft Accidents Archives - archiv leteckých nehod
- CMR - Certification Maintenance Requirements - soubor certifikačních požadavků na údržbu
- ECU - Engine Control Unit - kontrolní jednotka motoru
- EGT - Exhaust Gas Temperature – teplota spalin
- EIU - Engine Interface Unit – jednotka zajišťující propojení mezi ECU a ostatními systémy letadla a datovými sběrnicemi
- EVMU – Engine Vibration Monitoring Unit – jednotka monitorující vibrace na motoru
- FADEC - Full Authority Digital Electronic Control - elektronický řídicí systém
- ICAO - International Civil Aviation Organization - mezinárodní organizace pro civilní letectví
- IPC - Illustrated Parts Catalogue – ilustrovaný katalog náhradních dílů
- MRB - Maintenance Review Board (Report) - dokument plánování údržby
- PMUX - Propulsion Multiplexer – elektrické zařízení pro zpracování signálu
- RTD - Resistive Thermal Device – snímače měřící teplotu na základě změny odporu
- SB - Service Bulletin - servisní věstník
- TCC - Thrust Control Computer - řídicí systém
- TEO – Engine Oil Temperature – teplota oleje
- TRF – Turbine Rear Frame – snímač pro měření vibrací

## Úvod

Slovo doprava je charakterizováno jako *"účelný a zamýšlený pohyb dopravních prostředků po dopravních cestách."* [1] Od počátků člověka je primárním způsobem dopravy chůze. Avšak s tím, jak se vyvíjel člověk, jeho schopnosti, inteligence a dovednosti, přestala chůze a s ní spojené přenášení věcí stačit. Lidé začali obchodovat, bylo potřeba převážet objemnější náklady, vydávat se za obchodem do vzdálených krajů. Navíc, s urychlujícím se tempem života, bylo potřeba urychlit i způsoby dopravy. Různé etapy vyvíjející se civilizace představují různé druhy dopravy, od vynalezení kola, přes lodní, vlakovou a automobilovou přepravu, až po tu moderní, leteckou. Dnešní doba vyžaduje možnost přepravit objemné náklady, ale i osoby za krátkou dobu, bezpečně a s nízkými náklady. Letecká doprava je tedy nezbytnou součástí dopravní i ekonomické infrastruktury. Letadly se denně přepraví miliony pasažérů, tuny různého nákladu do všech koutů světa a v neposlední řadě, hrají svou důležitou roli také ve vzdušné, vojenské ochraně. Od dob prvopočátků civilní letecké dopravy a létání vůbec, se na tyto stroje vyvíjí stále náročnější požadavky. Výkon, cena, ovladatelnost, hluk, šetrnost vůči životnímu prostředí, bezpečné užívání v rozličných klimatických podmínkách a mnoho dalších parametrů hraje roli při jejich konstrukci a zdokonalování. V posledních letech, hlavně bezprostředně po leteckých neštěstích, se často diskutuje o bezpečnosti letecké přepravy. Je pravdou, že každý rok si letectví vyžádá smrtelné nehody. Avšak za loňský rok, podle BAAA (Bureau of Aircraft Accidents Archives - Archiv leteckých nehod), byl zaznamenán nejnižší počet nehod od roku 1927 v počtu 120 [2]. Dle statistiky Mezinárodní organizace civilního letectví připadá jedna smrtelná nehoda na dva milióny letů [3]. Letecká doprava je tedy v současnosti považována za nejbezpečnější způsob přepravy. Avšak dojde-li k nehodě, bývají následky katastrofální. Z tohoto důvodu je hlavním zájmem předpovídat provozuschopnost letounu, pro bezpečnost přepravovaných osob a z finančního hlediska. Provoz letounu je velice nákladný. Je-li odstaven z jakýchkoli technických nedostatků, představuje pro přepravce velkou finanční zátěž.

Aby se zabránilo katastrofálním nehodám, zbytečným finančním výdajům za náhradní součástky a dlouhým, prodělečným odstávkám, došlo k rozvoji a zdokonalení technické diagnostiky. Technická diagnostika letadlových motorů slouží k včasnému odhalování

technických nedostatků a předcházení poruch. Představuje systém přesně stanovených pracovních postupů, které se odvíjí na základě předpisů výrobce a monitoringu. Monitoring motoru se provádí, jak za provozu, tak jsou stanoveny pravidelné kontroly v pozemním, technickém zázemí. V zájmu šetření nákladů, času, životního prostředí a omezení odstávek je nutné provádět kontroly jednoduše, za nejkratší čas a v neposlední řadě pečlivě. Výrobce tedy motor zkonstruuje tak, aby technická obsluha měla snadný přístup do jeho prostor a možnost sledovat jeho chování po celou dobu provozu. Toto sledování motoru za provozu umožňují soustavy různých senzorů. Díky nim je možné přesně lokalizovat oblast poruchy a na případné opravy se předem připravit.

Sledování stavu motoru letadla probíhá nepřetržitě. Všechna naměřená data se dále zpracovávají, uchovávají, vytváří se statistiky. Podrobně popsání historie motoru pomáhá odhalit jeho postupnou degradaci a tím i celkovou životnost. Na tomto základě se plánují nejen údržby, ale tyto informace také slouží výrobcí pro další vývoj.

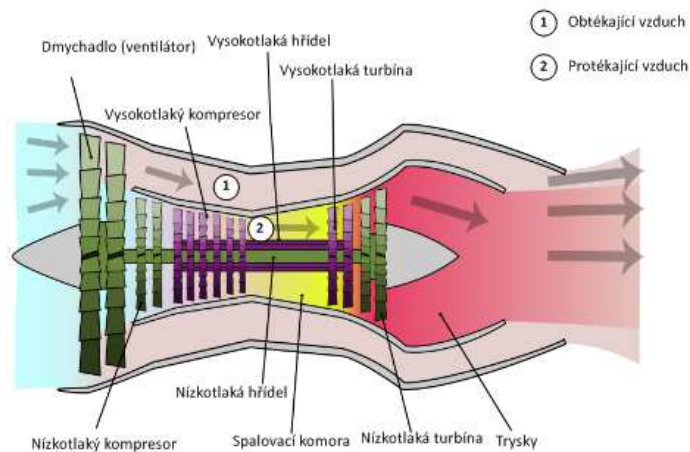
## 1. Letadlové motory

Zrod letectví můžeme datovat na začátek 20. století. Mezi typy prvních letadlových motorů patřily lopatkové motory. Ty z větší části nahradily pístové a oba typy (používají se i dnes pro malá letadla), pak proudové. Rychlý vývoj letadlových motorů ovlivnila druhá světová válka. Bylo potřeba bránit i vzdušný prostor, za pomoci rychlých, stíhacích letounů. To mělo za následek uvedení proudových motorů ve 30. letech (F. Whittle, H.von Ohain). Po válce vzrostl zájem o civilní letectví. Ze začátku byly použity vojenské letouny, předělané na dopravní.

Jak narůstal zájem o leteckou dopravu, vzrůstaly požadavky i na motory. Pístové motory nestačily, nahradily je turbínové, jednoproudové motory. Později začaly dvouproudové motory vytlačovat jednoproudové. Mezi dnešní hlavní požadavky patří vyšší výkon, větší spolehlivost, životnost, nižší hlučnost a nízké náklady na provoz. Tato kritéria s velkým úspěchem plní nejvíce využívané motory dvouproudové.

### 1.1 Princip činnosti letadlových motorů

Hlavní části dvouproudového motoru jsou dmyhadlo/ventilátor, nízkotlaký kompresor, vysokotlaký kompresor, spalovací komora, vysokotlaká a nízkotlaká turbína, výstupní trysky [4] - tvoří tzv. propulsní soustavu. Vzduch jde přes dmyhadlo, pak je stlačen a rozdělen do dvou proudů (viz obrázek 1.1). Část vzduchu obtéká motor a část proudí přes nízkotlaký kompresor, vysokotlaký kompresor, spalovací komoru dále vysokotlakou a nízkotlakou turbínou. Úkolem lopatkového kompresoru je stlačit vzduch. Ve spalovací komoře se stlačený vzduch mísí s leteckým palivem a hoří, přičemž se uvolňuje vnitřní energie paliva. Po opuštění spalovací komory, se spaliny smíchají se vzduchem z obtoku, a vychází tryskami ven [5]. Množství a rychlost protékajících plynů udávají velikost výkonu motoru. Podle oblasti využití daného letounu se parametry motoru mohou lišit. Například je rozdíl v použitém typu motoru pro vrtulník nebo pro stíhací letoun, ať už jde o výkon či spotřebu a podobně.



Obrázek 1.1 – Schéma dvouproudového motoru [19]

## 1.2 Typy letadlových motorů

Jak bylo popsáno výše, podle různých požadavků (výkon, spotřeba, hlučnost, velikost atd.), byly vyvinuty různé typy turbínových motorů - turbokompresorové (turbojet), turbodmychadlové (turbofan), turbohřídelové (turbohaft), turbovrtulové (turboprop) a propfan. Turbokompresorové motory jsou známější pod názvem jednoproudové. Turbodmychadlové - dvouproudové, se používají nejčastěji v moderních dopravních letadlech. Turbovrtulové motory využívají menší vrtulová letadla. Turbohřídelové se uplatňují v případě vrtulníků.



Obrázek 1.2 - Dvouproudový motor během technické údržby (zadní část) [19]

## **2. Technická diagnostika**

Technická diagnostika (dále TD) je obor, který se zabývá metodami a prostředky zjišťování stavu objektů [2]. Pojmem diagnóza se označuje vyhodnocení technického stavu zkoumaného objektu za určitých podmínek. Účelem technické diagnostiky je v první řadě zajištění bezpečnosti a provozu schopnosti motoru letadla. Provozoschopnost je takový technický stav, kdy je zkoumaný objekt schopen vykonávat požadované funkce podle stanovených podmínek. Objekt není provozu schopný, vyskytne-li se porucha [4]. Poruchy všeobecně vznikají v důsledku opotřebení, únavy nebo změny materiálu, přetížení, následné deformace (statické, dynamické – vznik vibrací, periodické). Mohou se vyskytovat za provozu, při demontáži nebo při obsluze [4]. Závada může být náhlá (není ji možné předvídat dopředu), postupná (vzniká vlivem postupné změny vlastností funkčních částí – je možné se na ni připravit pravidelnými kontrolami), havarijní (vzniká v důsledku postupné závady) nebo degradační (je příčinou postupného opotřebování). Úkolem TD tedy není pouze lokalizovat poruchu, ale také vypátrat, jaká byla příčina jejího vzniku.

### **2.1 Historie technické diagnostiky a údržby letadlové techniky**

Stejně jako se vyvíjely technologie v oblasti letadlových motorů, vyvíjela se i technická diagnostika a způsoby údržby letadel. Na počátku letectví nebyly stanoveny žádné předpisy pro postupy údržby nebo jejich plánování. Údržba se prováděla až ve chvíli poruchy. To byl však velice špatný přístup, což se projevilo na obrovském počtu nehod (viz databáze BAAA) [2]. Bylo nutné sledovat aktuální stav letounu a předvídat možná opotřebení. Přibližně na počátku 50. let minulého století začala mezinárodní organizace pro civilní letectví ICAO (International Civil Aviation Organization) a dohlédací úřady vyvíjet požadavky na výrobce motorů. Ti jsou od té doby povinni předkládat manuály pro plánování a postupy údržby [6].

## **2.2 Technická diagnostika před uvedením objektu do provozu**

Technická diagnostika se zpravidla provádí v následujících případech:

- sledování a vyhodnocení technických vlastností nově vyvinutých strojů
- TD před uvedením stroje do provozu
- během technického života stroje

Postupy TD nově vyvinutého motoru a během certifikačních zkoušek se liší od postupů TD během technického života objektu.

Průzkum nově vyvinutého stroje se zaměřuje na kvalitu výrobku, kvalitu použitých materiálů, splnění předepsaných kritérií, chování objektu za určitých podmínek - namáhání, práce při vysokých teplotách atd. a v neposlední řadě životnost. Podobný průzkum probíhá i v době před uvedením objektu do provozu, kdy je nutno objekt vyzkoušet. Příklad zkoušení motoru je uveden v kapitole 7.

Nový objekt je podroben certifikačním zkouškám. Během zkoušek se porovnávají naměřené hodnoty, například vibrací, hluku a dalších, s předepsanými normami.

## **2.3 Technická diagnostika během technického života objektu**

Pravidelnou kontrolou stroje během jeho technického života se prodlužuje životnost motoru, předchází se náhlým poruchám, s nimiž mohou být spojené náročné a neplánované údržby. Rozeznáváme dva typy údržby - preventivní a následnou. Následná údržba se provádí při odstraňování závad. Preventivní údržba zahrnuje údržby podle pevných lhůt i údržby podle stavu a Condition Monitoring (viz níže). Výrobce motoru dodává manuály, jejichž součástí jsou kromě přesně stanovených postupů TD, stanoveny i termíny kdy provádět rutinní údržbu a monitoring (například po určitém počtu nalétaných hodin). Výrobce stanovené postupy nelze libovolně měnit.

Nejen výrobce vydává předpisy pro údržbu, svrchovanější jsou předpisy vydané ICAO a dohlédacími úřady. Tato pravidla pro provádění a plánování údržby jsou zanesena do speciálních dokumentů. Těchto dokumentů je velké množství, budou tedy popsány jen některé z nich [6]:



Dokument MRB (Maintenance Review Board Report) obsahuje dva typy úkolů údržby - preventivní a nápravné. Dále informuje o prohlídkách a časových intervalech sledování a opravování dílů, detekování závad atd. MRB Report je dokument, který schvaluje dohlédací úřad státu výrobce letadlové techniky. CMR (Certification Maintenance Requirements) je soubor certifikačních požadavků na údržbu. V tomto souboru jsou zaneseny požadavky například na bezpečnostní systémy letadla. Provozovatel/výrobce musí podle těchto požadavků dokázat na základě výpočtů spolehlivost všech systémů. Směrnice AD (Airworthiness Directives) mají dva základní úkoly - nařizují provedení kontroly nebo výměny vadného dílu v určitém časovém období a případně radí, jak závadě předejít. Pracovní postupy kontroly nebo výměny jsou popsány v SB (Service Bulletin) [6].

### **2.3.1 Rozdělení TD podle způsobu pracovních postupů**

TD je možné rozdělit podle různých hledisek, například podle způsobu pracovních postupů na destruktivní a nedestruktivní, demontážní a bezdemontážní. Destruktivní metody se uplatňují při vývoji materiálů a nespádají pod běžnou údržbu. Zkoumání materiálů není předmětem této práce, tudíž se této oblasti dále nebudeme věnovat. Mezi nedestruktivní metody patří například zkoumání objektu ultrazvukem, rentgenem a podobně (více v následujících kapitolách).

V leteckém provozu je nejvýhodnější využívat bezdemontážní a nedestruktivní testování z důvodů úspor nákladů a času. Těmito metodami lze dobře sledovat aktuální stav motoru. Demontážní TD se však nelze vyhnout. Ta se provádí v případě certifikačních zkoušek, kdy se posuzuje správnost funkce jednotlivých částí motoru. Dále při překročení dovolených hodnot sledovaných veličin. A samozřejmě, v případě předepsaných prohlídek.

Systém TD je založen na diagnostických prostředcích a způsobu technické obsluhy. Podle typu kontroly se rozlišují dva způsoby obsluhy, tj. na technickou kontrolu On Condition (podle skutečného stavu) a Condition Monitoring. On Condition zahrnuje pravidelné kontroly pomocí diagnostických nebo monitorovacích prostředků, kde se technická obsluha zaměřuje na odhalování nedostatků, které by mohly přímo ovlivnit bezpečnost. Skutečný stav motoru závisí na mnoha aspektech, například na počtu

odlétaných hodin, na pracovních režimech za letu atd. Condition Monitoring se používá při sledování částí motoru, kde v případě poruchy není přímo ovlivněná bezpečnost provozu. Výskyt tohoto typu poruch bývá málo pravděpodobný.

### **2.3.2 Diagnostické prostředky**

Prostředky TD pomáhají nejen snižovat náklady na údržbu, ale slouží i ke zvýšení bezpečnosti a spolehlivosti, snížení emisí a spotřeby paliva. Hlavními cíli technické diagnostiky je identifikace a lokalizace poruchy, monitorování a posuzování aktuálního stavu motoru (zejména zkoumání rychlosti opotřebování). Posoudit stav motoru objektivně, je možné jen pokud ho budeme sledovat a porovnávat komplexně jako celek. Posuzováním jedné části by se mohla kontrola zanedbat vlivem úniku důležitých informací. To by mohlo mít později nepříznivý dopad. Za tímto účelem se využívá různých diagnostických prostředků. Tento pojem zahrnuje soubor technických zařízení (zabudované senzory, zařízení na pozemních stanovištích), nástrojů a předpisů pro provádění TD.

S podrobnými technickými kontrolami výrobce počítá. Motory jsou již při výrobě vybavovány tak, aby bylo možné snadno a rychle provádět příslušná měření a údržbu. Diagnostické prostředky se dělí na ON-LINE a OFF-LINE.

Některé části motoru lze zkoumat pouze při odstávce, to znamená, provádět pozemní technickou diagnostiku tzv. OFF-LINE. Některé oblasti je zase lépe sledovat za plného provozu. Porovnávání stavu motoru za provozu se pak označuje jako ON-LINE. V případě ON-LINE je celý systém motoru po dobu letu sledován pomocí různých senzorů. Získaná data jsou ze sběrnice dat odesílána na pozemní stanoviště. Těmito zařízeními je možné monitorovat spotřebu paliva, oleje, stav emisí, teplotu, namáhání a opotřebování jednotlivých částí motoru atd. Nepřetržitě se sledují problémové části motoru bez potřeby motorových zkoušek, které by zapříčinily delší odstávku letounu, jež by byla pro leteckého dopravce velice finančně náročná.

Monitorováním za provozu se sledují funkce motoru ve všech letových fázích (při vzletu, během stoupání, klesání atd.). Takto získané informace jsou velmi cenné, jelikož technická obsluha zná chování motoru v reálných podmínkách a nemusí jeho chování

posuzovat jen na základě simulací prováděných na zemi v laboratoři. Technická obsluha i posádka tedy zná aktuální stav všech částí motoru a v případě odchylky může předpovídat další vývoj událostí, následně pak rozhodnout o přerušení letu nebo před letem vzlet úplně zrušit. V případě výskytu problému se mohou technici údržby připravit ještě před přistáním letadla. Tím se šetří čas i finanční prostředky leteckým dopravcům.

### **2.3.3 Technická dokumentace**

Technická dokumentace se dělí dle účelu na provozní (pro posádku), pro běžnou údržbu, pro těžkou údržbu, pro inženýring a dokumentaci podpůrnou a doplňkovou. Tato sekce je opět velice rozsáhlá, proto se zaměříme jen na výběr z technické dokumentace pro vlastní běžnou údržbu. Pracovník obsluhy TD musí mít znalosti v oblasti technické dokumentace, jelikož je nezbytné, aby se v manuálech výrobce správně orientoval. Základní dokumentace zahrnuje příručky pro opravy, postupy údržby, katalogy dílů a náradí, elektrická schémata systémů atd. Například: AMM (Aircraft Maintenance Manual) je příručka pro údržbu letadla. Zde jsou popsány postupy údržby, pracovní postupy pro přezkušování, pro výměnu agregátů a limity poškození některých zařízení. IPC (Illustrated Parts Catalogue) slouží jako ilustrovaný katalog náhradních dílů. AWM (Aircraft Wiring Manual) obsahuje elektrická schémata systémů letadla [6].

Každý motor má svou složku dokumentů, jež mapují celý jeho technický život. Lze zde najít detailní záznamy o každé prohlídce, či opravě.

## **2.4 Pracoviště TD**

Pracoviště TD by mělo být vybaveno vhodnými měřicími přístroji a nástroji. Vybavení by mělo být přizpůsobeno typu diagnostikovaného objektu a rozsahu prováděných zkoušek. Místo provádění metod TD musí být dobře organizačně a prostorově navrženo. Musí být zajištěné dobré hygienické (dostatečné osvětlení, odvětrávání atd.) a bezpečnostní podmínky. Obsluha TD musí být řádně vyškolená. Vzhledem k úspoře

času během provádění metod TD a pro zajištění správných výsledku je nutné, aby obsluha TD měla také praktické zkušenosti v oblasti TD.

Konstrukce zkušeben (litý železobeton) motorů bývají dostatečně pevné, aby odolaly v případě roztrhnutí motoru. Musí být prostorné a musí k nim být snadný přístup. Zkušebny mohou být vybavené zrcadly nebo kamerami pro snadnější prohlídky.

Podrobnější popis jednotlivých pracovišť a nároků na obsluhu TD je proveden v následujících kapitolách.

### 3. Diagnostické modely

Modelem se myslí zjednodušené zobrazení originálu. Diagnostické modely jsou zpracovány na základě simulace chování jak částí, tak i větších celků motoru například při pozemních letových zkouškách. Používají se ke zkoumání relačních struktur - vazeb mezi množinou elementárních prvků charakterizující zkoumaný objekt s prvky okolního prostředí. Pod vazbou je možné si představit například silové působení. Elementární prvky reprezentují jednotlivé části motoru. To znamená, že relační strukturu může představovat například model interakce namáhaných částí motoru silovým působením vyvolaným vnějším prostředím. Modely slouží k simulaci vad [7].

Diagnostické modely rozdělujeme na hmotné fyzikální a abstraktní matematické. Pod pojmem fyzikální model si lze představit například zmenšený model přístrojové desky, model hydraulického zařízení a podobně. Matematické modely tvoří matematické vztahy mezi diagnostickými veličinami. Diagnostická veličina představuje informaci o technickém stavu diagnostikovaného objektu. Z těchto modelů se odvíjí statistiky, na které navazuje plánovaná TD. Ze vztahů mezi diagnostickými veličinami se následně určuje pravděpodobnost poruchy. Hodnota pravděpodobnosti, se kterou se porucha může vyskytnout, udává spolehlivost zkoumaného objektu [7]. Matematické modely lze rozdělit na analytické, logické a topologické.

#### 3.1 Analytické modely

Jak už bylo popsáno výše, analytické modely spadají pod matematické modely. Půjde tedy o vyjadřování vztahů mezi diagnostickými veličinami za pomoci rovnic a nerovnic. Podle typu rovnic, oblastí použití a dalších kritérií se dělí na různé třídy a podtřídy - analytické modely statistické, dynamické, lineární a nelineární, spojité a diskrétní, parametrické a neparametrické, deterministické, stochastické a další. Využitím těchto modelů je pak možné sestavit počítačový program na zpracování dat. Díky tomu lze sledovat tzv. degradaci motoru - rychlost opotřebovávání motoru.

Statistické analytické modely se opírají o soustavy algebraických rovnic. Vyjadřují závislost mezi vstupními a výstupními veličinami. V tomto případě nezávisí na čase.

Dynamické analytické modely jsou popsány na základě diferenciálních a diferenčních rovnic. Vyjadřují dynamické vlastnosti objektu. Mohou být typem rovnic s parametry časově závislých - nestacionární a nebo nezávislých - stacionární.

Parametrický matematický model má přesně určené schéma. Soustavy rovnic mají jasně určené koeficienty - parametry. V tomto případě je nutné přesně znát uspořádání diagnostikovaného objektu (u neparametrického to není třeba - neparametrický model ovšem není směrodatný prostředek pro získání konečných výsledků) a jeho relační struktury. Parametry se stanovují na základě experimentování s reálným objektem - například z měření. Analytický model, který zobrazuje lineární dynamický systém lze vyjádřit maticově [7].

Deterministický model je možné použít v oblasti, kdy je možné vztahy mezi vstupy a výstupy jednoznačně popsat. Tento model slouží ke zkoumání oblastí objektu, kde se nevyskytují poruchy nebo je lze zanedbat [8].

Stochastický matematický model je opakem deterministického, v tomto případě není možné vztahy mezi vstupy a výstupy jednoznačně popsat. Tyto vztahy se vyjadřují na základě pravděpodobnosti a statistiky, jelikož stále stejný vstup nemusí dávat stejné výstupy. Vstupní, výstupní, poruchové funkce jsou náhodné funkce času [8].

### **3.2 Logické a topologické modely**

Logické modely se opírají o matematickou logiku. Zde se nepracuje s proměnnými, jen s vstupními a výstupními veličinami, které nabývají binárních hodnot. Porucha nabývá hodnoty 0. Bezchybný chod pak hodnoty 1.

Topologický model je vyjadřován orientovaným grafem, který může tvořit trojice nebo dvojice množin. Používá se v případě vyšetřování složitějších systémů. Vrcholy grafu tvoří stavy, důsledky poruch, příčiny atd. Hrany grafu vyjadřují vztahy mezi příčinami vad a jejich důsledky.

## 4. TD za provozu - monitorovací systém

Monitoring motoru zahrnuje sledování hned několika oblastí - vzduchoplynového traktu, mazací soustavy, vibrací a dalších veličin zároveň. Ze všech získaných informací je pak možné objektivně posoudit aktuální stav motoru.

U malých letadel zaznamenává naměřené hodnoty posádka letadla do připravených formulářů v různých dobách letu (např. při vzletu, při určité letové hladině a podobně). Velká, dopravní letadla jsou vybavena snímači a automatickými zapisovači. Výrobce motoru dodává také programy na zpracování dat. Tyto programy pracují na základě matematického modelu (viz výše kapitola 3). Moderní dopravní letadla jsou vybavena elektronickým řídicím systémem FADEC (Full Authority Digital Electronic Control). Tento systém monitoruje stav motoru a ovládá motor na základě pokynů pilota i autopilota. FADEC tvoří dvě kontrolní jednotky – ECU a EIU. ECU (Engine Control Unit - kontrolní jednotka motoru) sleduje a vyhodnocuje stav motoru na základě informací přijatých od senzorů. EIU (Engine Interface Unit) je jednotka, jež zajišťuje propojení mezi ECU a ostatními systémy letadla, včetně datové sběrnice ARINC [6].

Monitorovací systém tvoří soustavy senzorů. Takto získané informace jsou prostřednictvím elektronického zařízení PMUX (Propulsion Multiplexer) odeslány ve formě signálu na sběrnici dat ARINC a dále putují do letadlového systému AIDS (Aircraft Integrated Data System) [11, 19].

### 4.1 Historie monitorovacích systémů

Vývoj monitorovacích systémů lze shrnout do čtyř generačních období (nulté, první, druhé a nejnovější třetí).

Nultá generace je datována do roku 1940. V tuto dobu bylo letectví téměř v plenkách. Stejně jako téměř neexistovaly předpisy pro údržbu motoru (viz výše), neexistovaly prakticky ani žádné monitorovací systémy. Letecké přístroje byly většinou mechanického charakteru [9].

První generace (období 1940 – 1960) zaznamenává vývoj leteckých přístrojů, které fungovaly na analogovém elektrickém principu. Stejně jako technologie motorů, se vyvíjely i monitorovací systémy na základě požadavků vojenského letectví za druhé světové války [9].

Přístroje druhé generace v období 1960 – 1975 zaznamenávaly již velký počet veličin, jak na draku, tak na motoru letadla. V této době narostly i požadavky na odolnost přístrojů a přesnost měření. Letadla začala být vybavována palubními zapisovači. Během 70. let začaly postupně analogové přístroje ustupovat číslicovým počítačům [9].

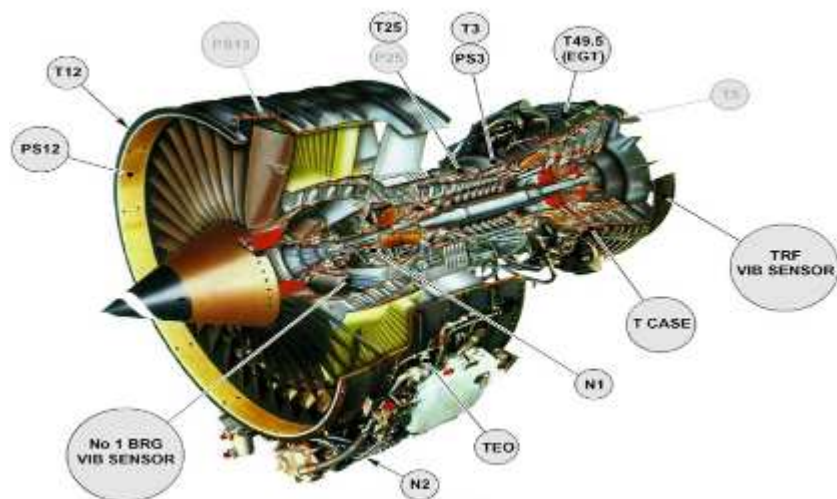
Třetí generace nastupuje po roce 1975. V této době dochází k vývoji složitých integrovaných systémů, k rozšíření použití číslicových systémů, využití mikroprocesorů a počítačů [9].

#### **4.2 Senzory motoru**

Za pomoci senzorů se sledují různé fyzikální veličiny, nejčastěji tlaky a teploty, ale i další. Mezi nejdůležitější patří teplota vystupujících spalin - (označení EGT), otáčky nízkotlakého kompresoru (N1), otáčky vysokotlakého kompresoru (N2), dále pak hodnoty vibrací, teplota vzduchu na vstupu do motoru, teplota na vstupu a výstupu z vysokotlakového kompresoru, nízkotlaké turbíny, teplota oleje, tlak na vstupu a tlak na výstupu za vysokotlakým kompresorem, tlak na vstupu a výstupu z nízkotlaké turbíny a na výstupu z dmyhadla, průtok paliva atd.

Snímače jsou instalovány v různých oblastech motoru (viz obr 4.1). Bývají velice silně namáhány vysokou teplotou i mechanicky. Pro zajištění optimálních funkcí senzorů a eliminaci vlivu okolního prostředí, jsou měřicí čidla zabezpečena proti vibracím a znečištění.





Obrázek 4.1 – Umístění snímačů: N1 snímač otáček nízkotlakého kompresoru, N2 snímač otáček vysokotlakého kompresoru, senzor T12 a T25 snímá teplotu vzduchu na vstupu vysokotlakého kompresoru, T3 měří teplotu vzduchu na výstupu vysokotlakého kompresoru, senzory teplot na vstupu do nízkotlaké turbíny T49.5 a výstupu T5, senzor TEO pro teplotu oleje, snímač měřící výstupní tlak PS3 z vysokotlakého kompresoru, PS12 měří celkový vstupní tlak na ventilátoru, PS13 slouží k měření výstupního tlaku na ventilátoru, P25 měří tlak na vstupu do vysokotlakého kompresoru, No 1 BRG sleduje vibrace na ventilátoru, TRF monitoruje vertikální zrychlení rotorů [19]

#### 4.2.1 Měření teploty

K měření teploty se nejčastěji používají RTD snímače - měření teploty změnou odporu a termočlánky [6]. Zřídka se také používá elektrický radiační pyrometr. Odporový způsob měření je založen na principu změny odporu v závislosti na teplotě. Pro měření se používá odpor známé hodnoty, který je umístěn v prostředí, jehož teplotu měříme. Odporové senzory se používají například k měření teploty paliva a oleje [7]. Motor se během své činnosti dostává do velkých rozsahů teplot (až 1000 °C - teplota spalin). Pro měření je vhodné použít soustavy termočlánků. Jedním z nejdůležitějších snímačů je EGT (Exhaust Gas Temperature - pro teplotu spalin). Ukazatel EGT slouží k posuzování stavu motoru po celou dobu letu [19].

### 4.2.2 Měření tlaku

Snímače měří tlak statický, dynamický, diferenciální. Podle toho a podle oblasti měření se vybírá druh snímacího zařízení. Převod hodnoty naměřeného tlaku na elektrický signál může probíhat nejčastěji přímo, případně mezipřevodem (tento způsob není vhodný, nastávají chyby měření). Snímačů tlaku je celá řada, odporový (použití při měření vysokých tlaků), piezoelektrický a další. Odporový senzor – odporový tenzometr – pracuje na principu mechanického namáhání. Měření v dynamické oblasti probíhá prostřednictvím piezoelektrických snímačů. Sensory bývají označeny písmenem P (viz obr. 4.1). Informace zpracovává ECU [19].

### 4.2.3 Měření otáček

Měření otáček zajišťují senzory s označením N1, N2. Hodnoty z N1 jsou důležité pro optimální výkon motoru. Řídicí systém TCC (Thrust Control Computer) vypočítává mezní hodnotu otáček, tj. maximální využitelný tah motoru na N1, kdy nedojde k poškození motoru. Tyto výpočty probíhají po celou dobu letu na základě i dalších parametrů - výška letu, rychlost letadla, tlak a teplota vzduchu a další. Údaje o rychlosti otáček umožňuje pilotovi sledovat stav motoru a v případě odchylky se připravit na případné omezení, např. vysazení jednoho z motorů. Pokud dojde ke ztrátě jednoho z motorů, ten druhý musí pracovat při vyšším výkonu. Tato situace může nastat. Výrobce s tím počítá, motory jsou nevrženy tak, aby letadlo mohlo bezpečně přistát i s nefunkčním motorem. Hodnoty otáček hlídá FADEC[19].

Pro měření otáček se používají snímače s magneto-indukčním převodníkem (malá letadla) nebo impulsní snímače otáček (moderní dopravní letouny) či optické snímače. Impulsní snímače otáček pracují na principu Faradayova zákona indukce. Snímač je opatřen zuby z feromagnetického materiálu, které se otáčejí kolem permanentního magnetu. Tím nastane stav, kdy se indukční tok s časem mění. Následně se indukuje napětí do snímací cívky. Indukované napětí má periodický průběh. Otáčky se měří z frekvence indukovaného napětí.

V případě optického snímače se jedná o soustavu LED dioda, fototranzistor, rotor s otvorem. Na jedné straně je umístěn fototranzistor, na druhé LED dioda, světlo z diody

prochází otvorem v rotoru a je detekováno fototranzistorem. Během jedné otáčky je fototranzistor zapnut dvakrát. Fototranzistor je připojen k obvodu, kde se signál dále zpracovává [13].

#### **4.2.4 Měření vibrací**

Na obr. 4.1 je možné vidět umístění například senzoru vibrací s označením No 1 BRG v přední části motoru, který sleduje vibrace na ventilátoru. V zadní části umístěný TRF senzor monitoruje vertikální zrychlení rotorů [10]. Tyto snímače mají za úkol měřit výchylku, kdy je hodnota vibrací nejvyšší, rychlost a zrychlení kmitů. Jsou umístěny v oblasti závěsů motoru nebo co nejbližší ke sledovanému místu. Snímání vibrací zajišťuje soustava několika snímačů propojených kabelem. Naměřené hodnoty jsou přiváděny na konektor s elektrickým výstupem. Tyto senzory by měly dosahovat malých rozměrů, hmotností a bývají opatřené tlumiči, aby bylo zajištěno přesné měření snímaných vibrací bez šumů [7,19].

Informace o výskytu a hodnotách vibrací udávají aktuální stavu motoru. Podle charakteru vibrací se vyhodnocuje stav opotřebení motoru. Informace získané ze senzorů se ukládají na sběrnici a vytváří se tak databáze historie měření. Z těchto záznamů je možné vyčíst vývoj opotřebení (například na okamžité výchylce), včas odhalit nedostatky a naplánovat údržbu.

### **4.3 Zpracování diagnostických signálů**

Měření neelektrických veličin probíhá prostřednictvím tzv. měřicího řetězce. Tento systém lze popsat jako cestu informace přes snímač - zesilovač - převodník - indikátor. Tato soustava, převede vstupní neelektrickou veličinu naměřenou čidlem na elektrický, výstupní signál. Monitorovací systémy jsou vybavené počítačem, je tedy třeba přijatý analogový signál převést na digitální, tj. například naměřené napětí převést na číslo. To je možné prostřednictvím A/D převodníku. Mezi nejpoužívanější typy patří aproximační a integrační převodníky.

Metody zpracování číslicových signálů je možné rozdělit na on-line a off-line. Při on-line metodách je informace signálu čtena ihned. V případě off-line se informace čte ze škály vzorků nabraných za určitou dobu [7].

Při procesu zpracovávání signálu je třeba uvážit také výskyt šumů. Šumy mohou vznikat následkem vnějších vlivů, jež na snímače působí, například různé teploty za provozu, síly vzniklé vlivem přetížení atd. Rušivé šumy zakrývají důležité informace, tím dochází k nepřesnosti měření [11]. Pro odstranění těchto rušení se používají číslicové filtry. Ty využívají předpokladu, že šum se nachází na frekvencích lišících se od frekvence užitečného signálu.

Výsledné signály jsou tedy složené z mnoha opakujících se prvků, harmonických signálů o různých frekvencích a šumů. Pro objektivní vyhodnocení je nutné provést spektrální analýzu signálu. K selekci jednotlivých signálů se využívají frekvenční spektra. Frekvenční spektra jsou získávána pomocí Fourierovy transformace signálu. Díky spektrální analýze je možné velmi přesně odhalit místa defektů na motoru [15]. Fourierova transformace se velmi často používá ke zkoumání periodických signálů. Některé signály je výhodnější popisovat v závislosti na čase a jiné zase v závislosti na frekvenci [17].

#### **4.3.1 Druhy signálů**

Signály lze rozdělit podle různých hledisek. Podle časového průběhu do dvou základních skupin na deterministické (pod tuto skupinu patří periodické - harmonické signály o frekvencích, jež jsou násobkem frekvence základní, kvaziperiodické - harmonické o frekvencích, jež jsou násobky dvou a více základních frekvencí, přechodné - impulzy a pseudonáhodné signály) a náhodné (stacionární - nemění se s časem, nestacionární - mění se s časem, cyklostacionární - cyklicky se mění) [7].

Z hlediska energie signálu se dělí na energetické a výkonové.

## 5. Údržbové metody technické diagnostiky

Tato kapitola zahrnuje popis metod prováděných na pozemním stanovišti. Níže uvedené metody se uplatňují v případě poruch nebo certifikačních zkoušek.

### 5.1 Vibrodiagnostika

Vibrodiagnostika se zabývá zkoumáním vibrací částí motoru. Tuto metodu nelze nahradit jinými metodami.

Vibrace či jiným slovem kmitání, lze ji popsat jako pohyb hmotného bodu kolem rovnovážné polohy. Kmitání vzniká důsledkem působení sil vnějších, ale i vnitřních. Vlastnosti těchto sil (velikost, směr, frekvence) ovlivňují hodnoty veličin výsledného kmitání. Zkoumaný mechanický systém má celkem šest stupňů volnosti. Zkoumají se pohyby (posuny) v ortogonální soustavě souřadnic  $x$ ,  $y$ ,  $z$  a rotace kolem os  $x$ ,  $y$ ,  $z$ . Stav kmitů se v daném čase popíše amplitudou a fází. V praxi není možné izolovat jeden hmotný bod od okolí. Vlivem kmitání jedné části (jednoho hmotného bodu) a přenosu energie, dochází ke kmitání dalších částí - vznikají vlny. Současně se tedy vyskytují vibrace i vlny zároveň. Mechanické vibrace mohou být způsobeny také rázy – vznik rázových vln. Takový jev nastává při střetu dvou navzájem se pohybujících těles, například odtržením součástky. Rázy vyvolají v tělese přechodový kmitavý jev, který v tělese vybudí postupnou rázovou vlnu. V TD se ráz uměle vytváří pomocí diagnostického kladívka, které je vybaveno snímačem síly [7].

Vibrace jsou příčinou dynamického namáhání součástek motoru - hřídele, ložisek atd. Jejich vlivem vznikají trhliny, lomy, dochází k celkovému opotřebení.

#### 5.1.1 Druhy vibrací, veličiny a základní vztahy

Zpravidla se rozlišují vibrace periodické, neperiodické a náhodné. Nejčastěji se vyskytují složené.

Složené vibrace vznikají ve chvíli, kdy těleso koná více pohybů najednou. Dochází tedy k superpozici harmonických vibrací. Složené vibrace mohou mít periodický i neperiodický průběh. Pokud jsou poměry složek složených vibrací v poměru daném iracionálními čísly, bude jejich průběh neperiodický. V opačném případě, v případě periodického průběhu, bude tento poměr vyjádřený čísly racionálními.

Náhodné vibrace mohou vznikat například při turbulencích. Mezi náhodné vibrace lze zařadit šумы.

Hodnoty diagnostických veličin (výchylka  $y$ , rychlost  $v$ , zrychlení  $a$ ) se u periodických harmonických vibrací po uplynutí určité doby opakují. Lze je popsat vztahy [12]:

$$a = \frac{dv}{dt} = \frac{d^2x}{dt^2} = -\omega v_{\max} \sin(\omega t + \varphi) = -\omega^2 X \sin(\omega t + \varphi) = A \sin(\omega t + \varphi)$$

$$v = \frac{dx}{dt} = \omega X \cos(\omega t + \varphi) = v_{\max} \cos(\omega t + \varphi)$$

$$x = X \sin(\omega t + \varphi)$$

kde  $\omega = 2\pi f = 2\pi \frac{1}{T}$  udávaná v  $s^{-1}$  je úhlová frekvence,

$T$  značí periodu kmitů,  $f$  frekvenci,  $A$  je amplituda zrychlení a  $X$  amplituda výchylky.

Podle těchto veličin se pak snímače dělí na snímače výchylky, rychlosti a zrychlení. Pro zjišťování výchylky se používá tzv. sonda přiblížení Proximity Probe. Tato sonda pracuje na základě vířivých proudů. Měří výchylku v řádech  $\mu\text{m}$ - $\text{mm}$ . Pro rychlost se užívají senzory rychlosti (velometry). Fungují na principu indukce napětí na koncích vodiče pohybujícího se v magnetickém poli. Snímače zrychlení (akcelerometry) se dále dělí na piezoelektrické, piezorezistivní a akcelerometry s proměnnou kapacitou [12].

Na základě znalostí hodnot výše uvedených veličin je možné posuzovat jednotlivé části motoru - deformace, trhliny a podobně. Pomocí výchylky se mohou udávat velikosti vůlí mechanismů.

Vibrace se dále dělí na absolutní - pohyb zkoumaného tělesa se vztahuje k pevnému bodu (k tíhovému poli Země) a relativní - volí se vhodný vztažný bod. Z toho vyplývá,

že senzory vibrací se podle konstrukce a druhu vibrací rozlišují na absolutní a relativní senzory vibrací [8].

Více o rozdělení absolutních a relativních senzorech viz bakalářská práce [19].

### **5.1.2 Způsoby vibrodiagnostiky**

Vibrodiagnostika se provádí dvěma způsoby – pásmovou vibrodiagnostikou a spektrální.

Pásmová diagnostika slouží jako orientační. Je založena na principu zjišťování velikosti vibrací v určitém frekvenčním pásmu. Existují zařízení, která pracují s takzvanými pásmovými filtry a naměřená data ukládají. Filtr může být širokopásmový a úzkopásmový. Měření přes úzkopásmový filtr je přesnější, lze ho použít na měření vibrací specifických částí [11, 15,19].

Spektrální vibrodiagnostika je přesnější metoda pro určování skutečného stavu motoru.

## **5.2 Hluková diagnostika**

Diagnostika na základě posuzování hlučnosti patří mezi nedestruktivní způsoby diagnostiky. Tato metoda je úzce spojena s vibrodiagnostikou.

Technický stav objektu lze tedy posoudit i na základě zvuku - hluku, který se od objektu šíří. Hluk je definován jako nestandardní, nežádoucí, rušivý zvuk. Tento zvuk může nabývat frekvence 20 Hz až 20 kHz. Vzniká vibracemi částí stroje nebo jeho povrchu. Hluk může být důsledkem vzájemného styku poškozených částí, nerovnoměrného proudění plynů a podobně. Zvuk vzniká rozkmitáním tělesa, energie vzniklých kmitů se šíří pružným prostředím ve formě vlny. Tímto prostředím může být pevná látka, kapalina i plyn. Pokud částice kmitají ve směru šíření vlnění, vzniká podélná vlna - v případě kapalin a plynů. Pokud částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění, vzniká příčná vlna.

### 5.2.1 Akustické veličiny a jejich vztahy

Zdroj zvuku bývá malých rozměrů. V prostoru mezi měřicím zařízením a zdrojem zvuku se zvuku šíří všemi směry - vzniká kulová vlna. Výpočty pro kulovou vlnu by byly příliš náročné, proto je nutné kulovou vlnu aproximovat. Aproximací vzniká rovinná vlna. Na rovinnou vlnu je možné aplikovat následující vztahy mezi akustickými veličinami.

Zvukové vlnění lze primárně charakterizovat veličinami akustická výchylka  $y$  a akustická rychlost  $v$ . Akustickou výchylku pro šíření ve směru  $x$  lze popsat vztahem:

$y = A \sin \omega(t - \frac{x}{c})$     Rychlost  $v$ :  $v = A \omega \cos \omega(t - \frac{x}{c})$ , kde  $c$  je rychlost šíření vlnění v daném prostředí.

Procházející vlnění prostředím vyvolá tzv. akustický tlak. Pro akustický tlak  $p$  platí:

$p = \rho c v = \rho c A \omega \cos \omega(t - \frac{x}{c})$ , kde  $\rho$  je hustota prostředí.

Další důležitá veličina používaná při hlukové diagnostice je hladina akustického tlaku  $L$ , kde

$L = 20 \log \frac{p}{p_{ref}}$ , kde referenční akustický tlak  $p_{ref} = 20 \mu\text{Pa}$  reprezentuje práh slyšitelnosti při kmitočtu 1 kHz.

Akustický tlak a hladina akustického tlaku jsou nejpoužívanější veličiny v hlukové diagnostice.

Další veličina vyskytující se v hlukové diagnostice je střední hodnota měrného akustického výkonu (intenzita zvuku)  $I$ . Lze ji popsat vztahem:

$I = \frac{dP}{dS}$ , kde  $P = pSv$  je akustický výkon a  $S$  plocha kolmá ke směru šíření vlnění,

$$I = \frac{1}{T} \int_0^T \frac{p^2(t)}{\rho c} dt = \frac{1}{2} \rho c \omega^2 A^2 = \frac{p_A^2}{2 \rho c}$$

Hodnoty  $I$  mohou posloužit při lokalizaci zdroje zvuku.



### 5.2.2 Zvukoměry

Pro získávání hodnot akustických veličin se používají zvukoměry, měřicí zařízení, jehož hlavní součástí je mikrofon. Nejčastěji se využívají kondenzátorové mikrofony. Tento typ pracuje na principu kondenzátoru s proměnnou kapacitou. Jeho hlavní části jsou dvě elektrody. Jedna elektroda je pevná, druhá je tvořena tenkou membránou. Membrána pak kmitá podle nárazu tlakové vlny. Střídavé elektrické napětí na elektrodách je funkcí měřeného akustického tlaku [7].

Další používaný zvukoměr je tzv. dvoumikrofonová sonda. Jež podle názvu tvoří dva spojené mikrofony. Její využití je vhodné pro určení hodnot intenzity zvuku  $I$ . S tímto typem lze dobře stanovit směr šíření zvukového vlnění.

## 5.3 Vizuální defektoskopie

Vizuální, či optická metoda je základní diagnostická metoda odhalování povrchových defektů. Tento způsob diagnostiky má několik výhod – je nedestruktivní, dá se snadno a poměrně rychle provádět, v případě přímého zkoušení s ní nejsou spojené žádné náklady (není potřeba detekčních prostředků atd.), je možno ji využít na zkoumání všech materiálů.

Při přímé vizuální zkoušce se defekty posuzují pouhým okem, případně lupou, zrcátkem nebo mikroskopem. Nepřímá vizuální zkouška se provádí v místech, kam je nemožné se dostat – vzduchoplynový trakt motoru, trubky a další vnitřní prostory motoru. Je tedy nutné použít vhodná zobrazovací zařízení (endoskopy).

### 5.3.1 Podmínky vizuální zkoušky

Obsluha TD provádějící vizuální zkoušku nemusí být speciálně vyškolená, ale měla by mít znalosti a zkušenosti v oblasti defektoskopie. Požadavky se kladou na dobrý zrak pracovníka (nutné pravidelné lékařské kontroly) a dobrou psychickou kondici (pracovník nesmí být unavený a nesmí být na něho vyvíjen nátlak). Pracoviště, kde je zkouška prováděna, musí být dobře osvětleno - vhodná intenzita a směr osvětlení. Doporučená intenzita osvětlení je přibližně 500 lx (nesmí oslňovat). Diagnostikovaný

objekt musí být před zkouškou očištěn. Prohlížet objekt je doporučeno pod úhlem větším než 30°, ideálně 90°.

Záznam o zkoušce je zapsán do protokolu, součástí protokolu může být fotografie objektu s označenými defekty. Podle stanovených předpisů se objekt buď po opravě vrátí, nebo je definitivně odstraněn a nahrazen jiným. Pokud je vizuální zkouška nedostačující nebo je podezření na hlubší poruchy materiálu, provádí se další defektoskopické metody (viz níže).

### **5.3.2 Diagnostická zařízení**

Detekce vad v nepřístupných prostorech se provádí za pomoci různých endoskopů. Endoskopy jsou optické přístroje, které převádí obraz na monitor. Konstrukce sond jsou navrženy tak, aby byly odolné vůči prostředí (provádění prohlídek olejových a palivových ústrojí). Tato zařízení jsou vybavena osvětlovacím prvkem (halogenové nebo xenonové zdroje světla). Endoskopy se dělí na dva typy – pevné a ohebné.

Typem pevných, neohebných endoskopů jsou boroskopy. Používají se například ke kontrole lopatek turbín, kompresorů atd. Boroskop se skládá ze systému čoček, zrcadel, z objektivu na jednom konci trubkovitého těla a okuláru na konci druhém. Je vybaven zdrojem světla, pro osvětlení zkoumaného místa. Pořízený obraz je možné detailně zvětšovat. Nedá se použít v místech s ohyby, proto na motoru bývají umístěné otvory pro snadnější kontrolu. Boroskopickou prohlídku je nutné provádět až po úplném vychladnutí motoru.

Fibroskop je ohebný endoskop. Je možné ho použít všude tam, kam se boroskop nedostane. Pořizování obrazu fibroskopem se uskutečňuje prostřednictvím optických vláken. Konec sondy je možné ovládat - natáčet, což umožňuje prohlídku zakřiveného prostoru. Stejně jako u boroskopu, je nutné, aby byl motor před zkouškou vychladlý (použití do max. 80 °C) [7].

Videoskop je také ohebný endoskop navíc vybavený CCD čipem na hrotu sondy. Umožňuje ještě lepší rozlišení než předešlé dva typy endoskopů. Délky těchto zařízení dosahují až desítek metrů, konec sondy je možné natáčet, některé sondy pořizují 3D obraz, digitální technologie umožňují dobré rozlišení barev, funkci ZOOM a další.

Videoskopy mají bohaté příslušenství, krom standardního zdroje osvětlení to mohou být senzory teploty nebo nástroje na vyjmutí objektů z měřené oblasti [7].

## **5.4 Termografie**

Termografie je další ze skupiny nedestruktivních postupů TD. Je možné ji také zařadit do skupiny bezdemontážních metod. Touto metodou se posuzuje především teplota povrchu zkoumaného objektu - zobrazuje se a vyhodnocuje teplotní pole. Výsledkem měření je termogram, tj. technický záznam o rozložení teploty v dané oblasti.

Teplotu lze snímat dotykově nebo bezdotykově.

### **5.4.1 Dotykové snímání teploty**

Jestliže bude teplota snímána dotykově, budou pro tento účel využity například indikátory na bázi kapalných krystalů a záznam pořízen CCD kamerou [7].

Vyhodnotit teplotní pole lze také na základě hodnot ze senzorů umístěných v dané oblasti. Výsledky takového měření je možné vidět v tabulce protokolu. Jsou zde uvedené čtyři hodnoty pořízené senzory. Tyto hodnoty slouží k popisu teplotního pole – rozložení teplot ve sledované oblasti. V závěru protokolu se sice zprůměrují, nicméně, pro konečný posudek je nutné znát všechny čtyři hodnoty zvlášť. Pro měření teploty se nejčastěji používají termočlánky (typ chromel-alumel) nebo termistory. Více o senzorech teplot viz bakalářská práce [19].

Indikovat teplotu lze také na základě použití tepelně citlivých barev. Diagnostikovaný objekt se natře tepelně citlivou barvou a následně zahřeje. Působením teploty se barva změní. Použité barvy se vybírají podle rozsahu teplot. Metoda použití tepelně citlivých barev úzce souvisí se zkoumáním žáruvzdornosti materiálu – posuzuje se například materiál použitý na konstrukci spalovací komory.

### **5.4.2 Bezdotykové snímání teploty**

Bezdotykovou termografií je možné provádět prostřednictvím termografické kamery. Všechna tělesa – tj. tělesa o teplotě vyšší než absolutní nula, vyzařují infračervené záření. Infračervené záření je elektromagnetické záření s vlnovou délkou větší než viditelné světlo a menší než vlnění mikrovlnné. Na základě tohoto poznatku je možné infračervené záření snímat. Termokamera snímá záření, nasnímané záření se dále dopočítává s ohledem na vnější podmínky. Vyhodnocením je termogram ve formě snímku teplotního pole, kde je možné vidět barevně rozložení teploty. Nejteplejší místa mají bílou a červenou barvu, naopak nejchladnější černou a modrou. Je tedy možné sledovat teplotní rozdíly na základě přechodů barev. Termokamera pracuje v oblasti tzv. atmosférického okna. Za atmosférické okno je považováno pásmo infračerveného záření, které nabývá takových hodnot vlnových délek, jež dobře prochází vzduchem. Pro defektoskopii materiálu se využívá infračervené záření o vlnových délkách od 2  $\mu\text{m}$  do 5  $\mu\text{m}$  (krátkovlnná oblast) a od 7  $\mu\text{m}$  do 13  $\mu\text{m}$  (dlouhovlnná oblast) [7].

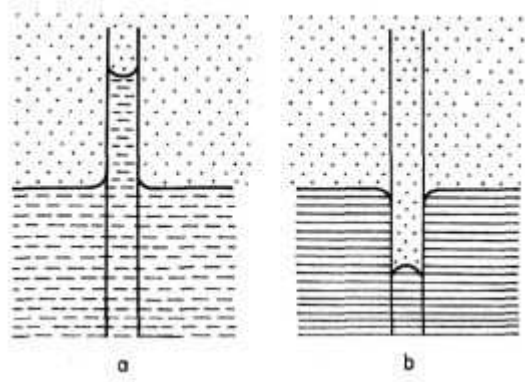
## **5.5 Kapilární defektoskopie**

Kapilární defektoskopie je další z nedestruktivních metod. Používá se k odhalování povrchových vad a trhlin. Je možné ji uplatnit na kovové i nekovové součástky. Tato metoda je založena na principech kapilárních jevů.

### **5.5.1 Kapilární jevy**

Kapilární jevy charakterizují vlastnosti kapalin. S tím souvisí fyzikální veličiny kapilární tlak, povrchové napětí, kapilární elevace, viskozita a další. V případě kapilárních jevů je možné pozorovat dva případy - kapilární elevaci a kapilární depresi. Na obrázku 5.1 je možné pozorovat, že hladina kapaliny v kapiláře vystoupá nad úroveň hladiny kapaliny v kádince. To je možné pouze u kapalin, které smáčí povrch nádoby (kapiláry), a právě takové kapaliny se využívají v kapilární defektoskopii.

V případě kapilární deprese je tomu právě naopak.



Obrázek 5.1 - Kapilární elevace (a) a kapilární deprese (b) [20]

### 5.5.2 Pracovní postupy při kapilární zkoušce

Aby byly výsledky zkoušky co nejpřesnější, je nutné zkoumaný objekt na kapilární zkoušku připravit. V první řadě je tedy nutné povrch objektu očistit, tj. objekt obrousit, očistit brusným papírem, důkladně umýt s použitím chemických rozpouštědel atd.

Na obrázku 5.2 vidíme pracoviště kapilární defektoskopie. Na snímku je ultrazvuková myčka, zde se součástky důkladně očišťují.



Obrázek 5.2 – Pracoviště kapilární defektoskopie LOM (Letecké opravny Malešice)

Po očištění objektu následuje penetrace. Podle použité metody se nanese buď barevný, nebo fluorescenční penetrant. Tyto látky jsou ropné produkty s přidáním barvivem nebo luminoforem. V případě fluorescenční metody se na objekt nanáší emulgační penetrant. Penetrant je možné nanášet natíráním, poléváním, stříkáním anebo namáčením. Na obrázku 5.2 vlevo je vidět pult pro namáčení dílů do penetrantu. Je třeba, aby se tekutina dostala dobře do případných trhlin, proto proces penetrování může probíhat v řádech minut, ale i hodin.

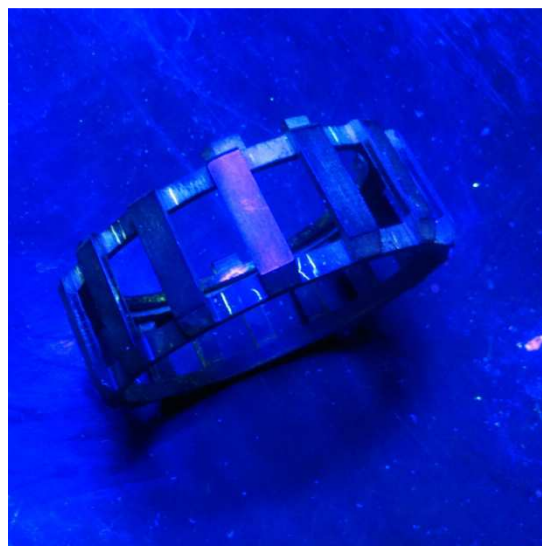
Po penetraci je potřeba objekt zbavit přebytků penetrantu. Nejprve se tedy objekt otře hadrem nebo houbou, následně umyje vodou, případně nějakým čisticím (záleží na složení penetrantu) a usuší. Během mytí je potřeba pohlídat, aby se penetrant nevymyl z trhlin.

Po usušení se na objekt nanese vývojka. Vývojky mohou být suché nebo mokré. Nejčastěji se používají oxidy – zinečnatý, hořečnatý, uhličitany – hořečnatý, vápenatý, kaolin a jiné. Úkol vývojky je napomáhat vzlínání penetrantu z trhlin (tím trhliny zviditelňuje). Nanáší se natíráním, namáčením nebo stříkáním. Na obrázku 5.3 je vidět pult pro nanášení vývojky, v tomto případě se vývojka na objekt rozprašuje. Vpravo na obrázku vidíme aplikační pistoli, jejíž pomocí se vývojka ve formě jemného prášku nanáší.

Indikace trhlin se provádí vizuálně okem nebo s pomocí lupy. V závislosti na použitém penetrantu se trhliny barevně zvýrazní při běžném osvětlení nebo fluoreskují při detekci UV-A zářením (viz obrázek 5.4). Vyhodnocení se provádí dvakrát. Jednou bezprostředně po aplikaci vývojky, kdy dochází ke zvýraznění velkých vad a podruhé asi po 10-15 minutách. Při druhé detekci se zvýrazní jemnější trhliny. Závěrečné hodnocení bývá popsáno slovně v protokolu, přiložena může být fotografie dílu.



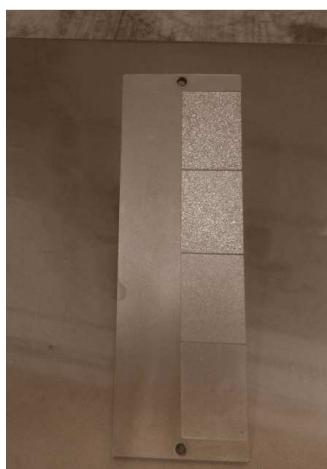
Obrázek 5.3 – Pult pro nanášení vývojky



Obrázek 5.4 – Fluoreskující trhliny

### 5.5.3 Kapilární měrky

Pro směrodatné výsledky však nestačí mít jen správně připravený objekt zkoumání. Je potřeba znát také vlastnosti vývojky, penetrantu a čisticího prostředku. Tyto prostředky se tedy před kapilární zkouškou prověřují. Pro tyto účely se používají kapilární měrky (viz obrázky 5.5 a 5.6). Vyobrazená měrka je vhodná pro barevné i fluorescenční penetranty. Je vyrobena z ocelového plechu s vrstvou chromu. Na jedné straně jsou vyraženy hvězdicové otvory různých velikostí (na obrázku špatně viditelné). Na straně druhé je pás s různorodou hrubostí povrchu. Na tomto pásu se hodnotí omyvatelnost penetrantu [7].



Obrázek 5.5 – Kapilární měrka



Obrázek 5.6 – Měrka - detail hvězdicovitých otvorů

## 5.6 Magnetická defektoskopie

Magnetická metoda je nedestruktivní metoda, která slouží k odhalování povrchových a těsně podpovrchových (maximální hloubka pod povrchem kolem 5mm) vad a trhlin. Tuto, na rozdíl od kapilární metody, nelze použít pro zkoumání nemagnetických materiálů. Tento způsob TD je postaven na základě deformace směru toku magnetického pole. V místě vady pak vzniká tzv. magnetické rozptylové pole vady.

### 5.6.1 Veličiny v magnetické defektoskopii

Jestliže stojí magnetická metoda na principech magnetického pole, je nutné použít k jeho popisu následující vztahy.

Veličina důležitá pro popis magnetického pole je hustota magnetického indukčního toku  $\Phi$ :

$\Phi = \mathbf{B} \cdot \mathbf{S}$ , kde  $S$  obsah plochy kolmé na směr indukčního toku.

Vektorovou veličinu intenzitu magnetického pole lze vyjádřit vztahem:

$\mathbf{H} = \frac{\mathbf{B}}{\mu\mu_0}$ , kde  $\mu$  je relativní permeabilita prostředí a  $\mu_0$  permeabilita vakua ( $\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$  Hm<sup>-1</sup>)[14, 7].

### 5.6.2 Pracovní postupy v magnetické defektoskopii

Než se na objektu začne provádět magnetická metoda detekce trhlin, zbavuje se objekt větších nečistot. Čistota objektu však není tak striktní jako u metody kapilární.

Po očištění se objekt magnetuje a pokrývá detekčním prostředkem. Tento prostředek musí být feromagnetický, z magneticky měkkého materiálu. Může být ve formě prášku nebo suspenze (barevné nebo fluorescenční). Prášek představuje čisté železo nebo oxidy železa. Pokud se metoda provádí na sucho, je objekt poprášen práškem. Pokud na mokro, smíchá se prášek s vhodnou kapalinou (voda, petrolej, olej). Metoda na mokro se používá častěji. Stejně jako u kapilární metody se detekční prášek používá pro lepší



kontrast – zvýraznění vad. Existují barvy černá, červená a šedá. Možné je také použít prášek s luminoforem. V tomto případě, stejně jako u kapilární metody, po osvětlení UV světlem defekty fluoreskují (viz obrázek 5.7).



Obrázek 5.7 - Viditelné trhlinky po magnetické defektoskopii

Po ukončení zkoušky se objekt musí odmagnetovat. Stav objektu se vyhodnotí vizuálně, podrobně se popíše do protokolu, případně se přiloží fotografie.

### 5.6.3 Způsoby magnetizace

Dva hlavní způsoby magnetování objektu jsou podélné a příčné magnetování. Podle toho, jakým způsobem je magnetování prováděno se odhalují vady příčné nebo podélné. Záleží tedy na směru indukčních čar vůči trhlíně – např. příčné trhliny se zjišťují podélným magnetováním. V případě podélného magnetování jde o tzv. pólové magnetování. V druhém případě o proudové (cirkulární) magnetování.

Podélné magnetování se provádí tak, že je objekt vložen do cívky, která je napájena proudem nebo se přiloží permanentní magnet, či elektromagnet k povrchu tělesa.

Cirkulární magnetování se provádí průchodem elektrického proudu tělesem nebo indukci proudu v tělese. Pokud je zkoumaný objekt prstencového nebo trubkového tvaru, je možné do něho vložit vodič s protékajícím elektrickým proudem [7].

Výše uvedené způsoby se mohou kombinovat – podélné i příčné magnetování se provádí najednou s rozdílným časovým průběhem magnetických polí [7]. Tento způsob je výhodný vzhledem k současné detekci příčných i podélných trhlin.

Při magnetování se využívá proud stejnosměrný (magnetické pole se dostane do hloubky – detekce podpovrchových vad) i střídavý. Magnetická defektoskopie využívá elektrický proud o hodnotách v rozmezí 100 – 10000 A [7].

#### 5.6.4 Zařízení pro magnetickou defektoskopii

Přístroje pro realizaci magnetické defektoskopie mohou být přenosné nebo stacionární. Pro časté a důkladné diagnostikování objektů je lépe použít stacionární magnetizační přístroj (viz obrázek 5.8). Detekční stanoviště by mělo být vybaveno zařízením pro provádění pólového i cirkulárního magnetování, soustavou pro aplikaci detekčního prostředku, vhodným osvětlovacím zařízením a zařízením pro odmagnetování objektu [15].



Obrázek 5.8 – Vybavení pro provádění magnetické defektoskopie

### 5.6.5 Měrky v magnetické defektoskopii

Aby byly výsledky zkoušky správné, je nutné před zkouškou prověřit několik parametrů. Před zkouškou se tedy například hodnotí intenzita magnetického pole, velikost hloubky případné trhliny, kterou lze ještě detekovat a kvalitu použitého magnetického prášku. Tyto parametry se testují na vhodných měrkách (viz obrázky 5.9, 5.10 a 5.11).



Obrázky 5.9, 5.10, 5.11 – Měrky v magnetické defektoskopii

### 5.6.6 Magnetická defektoskopie - elektrická metoda

Magnetickou defektoskopii lze provádět také prostřednictvím senzorů. Při této metodě se nepoužívá indikační prostředek. Sensory snímají změny magnetického pole (změny směru magnetických indukčních čar) v místě vady. Sensory vady detekují na základě změn napětí. Výhodou tohoto měření jsou směrodatné výsledky bez zatížení lidským faktorem - tj. odpadá vizuální zkouška.

## 5.7 Defektoskopie vířivými proudy

Metoda vířivými proudy je nedestruktivní metoda odhalování povrchových a bezprostředně podpovrchových vad. Tuto metodu lze provádět pouze na objektech z magnetického a vodivého materiálu. Na rozdíl od předešlých metod kapilární a magnetické defektoskopie, není nutné v tomto případě objekt důkladně očišťovat před zkouškou, ani aplikovat kontrastní detekční prostředek [7].

### 5.7.1 Princip metody vířivými proudy

Základem měřicího zařízení je budící a měřicí cívka. Budící cívka se umísťuje blízko povrchu zkoumaného objektu. Cívka vybudí elektromagnetické pole, které prostupuje objektem. Magnetická složka pole  $\mathbf{H}$  (intenzita magnetického pole) indukuje v materiálu objektu elektrický tok (vířivé proudy). Hustota proudů  $\mathbf{J}$  klesá s hloubkou. Pro hustotu proudů  $\mathbf{J}$  platí [7]:

$$\operatorname{rot} \mathbf{H} = \mathbf{J}.$$

Jestliže je v materiálu objektu vada (nevodivá oblast), vířivé proudy ji obtékají. Čím víc se jejich dráha prodlužuje, tím víc se zmenšuje velikost hustoty proudů  $J$ .

Hloubku vnikajícího elektromagnetického pole  $\delta$  lze popsat vztahem:

$$\delta = \sqrt{\frac{2}{\gamma\mu\omega}},$$

kde  $\gamma$  je konduktivita materiálu,  $\mu$  permeabilita materiálu a  $\omega = 2\pi f$ , kde  $f$  je frekvence snímače.

Vířivé proudy vytváří magnetické pole. Podle Lenzova zákona platí, že pole vybuzené cívkou je kolmé na pole vzniklé vířivými proudy. Tato pole se vektorově skládají - v měřicí cívce je indukováno napětí.

Chceme-li dostat dobré rozlišení povrchových vad, je třeba použít vysokou budící frekvenci. V případě zjišťování vad podpovrchových se použije nízká budící frekvence.

### 5.8 Ultrazvuková defektoskopie

Ultrazvuková defektoskopie je nedestruktivní metoda prováděná za účelem odhalování vnitřních, podpovrchových vad. Je postavena na vlastnostech ultrazvukového vlnění. Jejimi velkými výhodami jsou použitelnost pro všechny druhy materiálů, rychlost provedení, detekce skrytých vad ve větších hloubkách materiálu (lokalizace, velikost trhliny), hygienická nezávadnost (bez použití ionizujícího záření). Pomocí této metody je možné zjistit i tloušťku materiálu. Ultrazvukové přístroje mají výstupy pro propojení s počítačem, který je vybaven příslušným softwarem pro zpracování signálu a úložištěm

dat. V letectví se používají i přenosná detekční ultrazvuková zařízení. V defektoskopii se využívá ultrazvukové vlnění o frekvencích od 0,1 MHz do 50 MHz (v některých případech až do 200 MHz) [7].

### 5.8.1 Ultrazvukové vlnění

Podle toho, jak se pohybují částice prostředí vůči směru šíření ultrazvukového vlnění, lze popsat čtyři typy ultrazvukových vln - podélné (částice kmitají ve směru šíření vlnění), příčné (částice kmitají kolmo na směr šíření vlnění), povrchové (částice se pohybují po elipsách v hloubkách menších než je vlnová délka  $\lambda$ ) a deskové (ultrazvukové vlny se šíří v desce o tloušťce rovné velikosti vlnové délky  $\lambda$ ).

Ultrazvukové vlnění lze popsat různými akustickými veličinami (viz kapitola 5.2 Hluková diagnostika). Nejdůležitější veličinou v tomto případě je akustický tlak  $p$ . Rychlost šíření ultrazvukového vlnění  $c$  je funkce veličin, jež charakterizují prostředí. Mezi tyto veličiny patří hustota, modul pružnosti v tahu a smyku, adiabatická stlačitelnost.

Ultrazvukové vlnění se v defektoskopii využívá pro své dobré šíření v pevných látkách. Při dopadu ultrazvukového vlnění na rozhraní dvou prostředí dochází k odrazu a průchodu vlnění. Při dopadu vlny na rozhraní pevné a plynné látky, dochází ke stoprocentnímu odrazu. Díky tomuto jevu je možné zjistit i minimální trhlinky. Má to však i své nevýhody. Kvůli zamezení odrazu, nesmí být mezi sondou a zkoumaným povrchem objektu vzduchová vrstva. Na objekt je třeba aplikovat vazební prostředek (vazelína, olej atd.).

Při kolmém dopadu vlnění se k popisu užívají koeficienty odrazu  $R$  a průchodu  $D$ . Koeficient  $R$  je dán poměrem:

$$R = \frac{p_1}{p}, \text{ kde } p_1 \text{ je odražený akustický tlak a } p \text{ dopadající akustický tlak.}$$

Koeficient  $D$  je dán poměrem:

$$D = \frac{p_2}{p}, \text{ kde } p_2 \text{ je prošlý akustický tlak.}$$

Pro akustický odpor  $Z$  pak platí [6]:

$$p = p_A \cos \omega(t - \frac{x}{c}) = \rho_1 c_1 v_1 = Z_1 v_1$$

$$p_1 = p_{A1} \cos \omega(t + \frac{x}{c_1}) = -\rho_1 c_1 v_1 = -Z_1 v_1 \text{ (záporné znaménko určuje směr šíření vlnění)}$$

$$p_2 = p_{A2} \cos \omega(t - \frac{x}{c_2}) = \rho_2 c_2 v_2 = Z_2 v_2$$

kde  $p_A$  je amplituda akustického tlaku,  $\rho$  hustota prostředí,  $c$  rychlost ultrazvukové vlny. Pokud vycházíme z předpokladu, že v místě počátku vlny, kde  $x = 0$  platí  $p_2 = p - p_1$ , pak:

$$\frac{p_{A2}}{Z_2} = (p_A - p_{A1}) \frac{1}{Z_1},$$

to znamená, že  $R = \frac{p_{A1}}{p_A} = \frac{Z_2 - Z_1}{Z_2 + Z_1} = \frac{1 - m}{1 + m}$  a zároveň  $D = \frac{p_{A2}}{p_A} = \frac{2}{1 + m} = 1 + R$ , z toho

vyplývá, že  $m = \frac{Z_1}{Z_2}$  je poměr akustických odporů a pokud bude  $m = 1$ , pak nedochází k

odrazu na rozhraní dvou prostředí [7].

### 5.8.2 Ultrazvukové sondy

Ultrazvuková sonda je zařízení, které, zjednodušeně řečeno, pracuje na principu přeměny elektrické energie na mechanickou (vyslání signálu) a zpět mechanické energie na elektrickou (přijmutí odraženého signálu). V generátoru ultrazvukového zařízení se generuje impulz o vysoké frekvenci, následně se upraví na ultrazvukový. Impulz projde prostředím, a pokud dopadne na místo vady nebo protějščí stěnu, odrazí se. Odražené vlnění zachytí přijímač sondy. Takto vzniklý slabý elektrický signál jde přes zesilovač a poté je zaznamenán na obrazovce [15].

Sondy ultrazvukových zařízení jsou piezoelektrické sondy - tenké destičky sondy se deformují a vytváří mechanické kmitání vlivem dopadajících elektrických impulzů a opačně [7]. Podle směru vyslaného signálu sondou lze sondy rozdělit na tři základní typy - přímá sonda, úhlová sonda, dvojitá sonda.

## 5.9 Defektoskopie prozařováním

Prozařovací nedestruktivní metoda se provádí na základě ozáření objektu ionizujícím zářením. Stejně jako ultrazvuková metoda, slouží i tato k detekci vnitřních vad a trhlin. Výhodou této metody je její použití na všechny materiály. Nevýhodou je náročnost provádění diagnostiky a nebezpečí ozáření, proto se v letectví běžně neprovádí. Zkoumaný objekt je vystaven průchodu ionizujícího záření, které je následně zachyceno na citlivý film - vzniká radiogram (vyobrazení, na němž tmavé oblasti představují nižší prostupnost záření a světlé vyšší). Celá metoda tedy spočívá ve vyhodnocení zeslabení prostupujícího záření hmotou. Dle ČSN EN 1330-3 je zeslabení definováno jako snížení intenzity svazku rentgenového nebo gama záření při průchodu látkou, způsobené absorpcí a rozptylem[7]. Intenzitu a zeslabení ionizujícího záření lze popsat vztahem [7]:

$\frac{dI}{I} = -\mu dx$ , kde  $I$  je intenzita záření,  $\mu$  koeficient zeslabení,  $x$  dráha záření v materiálu.

Zeslabení lze z tohoto vztahu pak vyjádřit jako:

$$I_x = I_0 e^{-\int \mu(x) dx} \Rightarrow I_x = I_0 e^{-\mu \Delta x} \Rightarrow \mu = \frac{1}{\Delta x} \ln \frac{I_0}{I_x}$$

V defektoskopii se nejčastěji využívá nejčastěji rentgenové záření (záření X) o vlnové délce  $\lambda$  v rozmezí od  $10^{-14}$  m do  $10^{-9}$  m a gama záření o vlnové délce  $\lambda$  v rozmezí od  $5 \cdot 10^{-13}$  m do  $10^{-10}$  m.

Prozařovací metoda může být prováděna dvěma způsoby - radiografií a radioskopií. V případě radiografie je vytvářen obraz na radiografický film. Při radioskopii je dopadající záření přeměňováno na optický nebo elektrický signál a vzniklý obraz je možné prohlížet na obrazovce monitoru.

Další moderní metodou v této oblasti je počítačová rentgenová tomografie.

### 5.9.1 Zdroj ionizujícího záření

Nejčastěji používaným zdrojem rentgenova záření je rentgenka. Rentgenka je skleněná vakuová trubice, jejíž základní části jsou katoda a anoda. Katodu tvoří wolframové

vlákno zakroucené do spirály. Při průchodu proudu se toto vlákno rozžhaví a termoemisí se začnou uvolňovat elektrony. Urychlené elektrony dopadají na anodu z těžkého kovu, na níž se zabrzdí. V této fázi se přeměňuje značná kinetická energie elektronu na teplo a na elektromagnetické záření - rentgenové záření. Toto záření představuje pouze 1 % z původní kinetické energie.

Jako další zdroj ionizujícího záření mohou být použity radionuklidy.

### **5.10 Tribodiagnostika**

Tribologie je nauka o procesech tření, opotřebování a mazání systémů. Tribodiagnostika spadá do skupiny bezdemontážních metod technické diagnostiky a většinou se kombinuje ještě s dalšími metodami (např. s vibrodiagnostickými metodami) pro objektivní posudek stavu motoru. Principem této metody je posuzování stavu motoru na základě rozboru odebraného oleje motoru. Zabývá se tedy posuzováním kvality maziva a jeho degradací - sleduje výskyt částic z otěrů, jejich složení, velikost a tvar. Na základě těchto výsledků vyhodnocuje trend opotřebení motoru a zjišťuje místa závad.

Stavy opotřebení se hodnotí jako normální, zvýšený nebo abnormální. Informace ze složení maziva pomáhají určit stupeň stavu opotřebení, druh a místo tření. Tření může být zapříčiněno například nevyvážeností rotoru, uložením motoru atd. Vlivem tření vznikají kovové třísky. To by mohlo být nebezpečné pro další provoz motoru, a tak je motor vybaven detektorem kovových třísek.

Informace o stavu oleje jsou tedy klíčové, proto je stav oleje monitorován jak za letu, tak na pozemním stanovišti. Za letu je monitorován snímači. Aktuální hodnoty zná posádka z palubních ukazatelů (teplota, tlak oleje). V případě odchylky je posádka, i pozemní stanoviště informováno a následuje okamžitá kontrola po přistání. Ale nejen v případě odchylky dochází k důkladné kontrole maziva. Jak už bylo popsáno výše, existují přesně předepsané postupy údržby motoru, tudíž je přesně stanoveno po kolika letových hodinách je nutné stav oleje zkontrolovat. Tyto kontroly se provádí ve speciálních laboratořích a to nejen po odebrání použitého oleje, ale i před prvním použitím oleje. Provádí se kontrola jeho chemických a fyzikálních vlastností [4, 16].



### 5.10.1 Tribodiagnostické metody

Tribodiagnostických metod existuje celá řada. V letectví se využívají nejčastěji metoda sledování úsad a částic z čističů (filtrů) a magnetických zátek, ferrografie, spektrální analýza a metoda RAMO.

Sledování úsad a částic se provádí tak, že se demontují čističe a magnetické zátky z motoru a odešlou se do laboratoře. V laboratoři se usazené částice zkoumají vizuálně - lupou, mikroskopem. Pro zjištění magnetických vlastností těchto částic se použije magnet. Výsledky se zaznamenávají do protokolu. V případě neobvyklých nálezů se provádí další tribodiagnostické metody.

Ferrografie je poměrně nenáročná a rychlá metoda, z těchto důvodů je hojně využívána. Ferrografická metoda probíhá tak, že do silného magnetického pole je umístěna skleněná destička (ferrogram) na které se usazují ferromagnetické částice. Následně se zkoumá hustota pokrytí ferrogramu (viz obrázek 5.12) - tj. celkové znečištění. Částice se dají sledovat pod mikroskopem. Dle charakteru částic se posuzuje úroveň a místa tření na motoru. Roztřídění částic podle velikostí je možné metodou ohybu laserového paprsku [4].



Obrázek 5.12 - Záznam ferrogramu

Spektrální analýza je značně rozšířená metoda pro určování rozsahu tvoření kovových částic a jejich chemického složení. Míru opotřebování jednotlivých částí lze stanovit na základě koncentrace různých chemických prvků. Spektrální analýzu lze rozdělit na atomovou absorpční spektrometrii (AAS) a atomovou emisní spektrometrii (AES).

Principem AAS metody je pohlcování záření atomy. Podle množství absorbovaného světla o určité vlnové délce lze určit přítomnost a objem určitého prvku ve vzorku. V případě AES se zkoumá množství záření o určité vlnové délce vyzářeného atomy určitého prvku [4].

Metoda RAMO (rychlá analýza motorových olejů) se provádí na základě vyvolání barevného efektu za použití vhodných činidel. Vzniklé barevné odstíny se porovnávají s příslušnými etalony a tím se rozpoznává přítomnost Fe, Cu, Pb, Al.

## 6. Příklady provádění TD v praxi - měření

Tato kapitola je věnována reálným příkladům prováděné diagnostiky, kterých jsem se zúčastnila. Krom měření popsaných v této kapitole, jsem měla možnost být u kapilární defektoskopie. Průběh této zkoušky je součástí kapitoly 5. Měření a diagnostiku vůbec, provádí pouze školený personál, který mi níže popsaná měření ukázal a vysvětlil. Tato měření se provádí s největší přesností a v přesně vymezené době. Na některá diagnostická pracoviště se také nepovolaná osoba nedostane, a to z důvodu vyzrazení know-how unikátních diagnostických metod a nových technologií. Většina měření také probíhá automaticky (viz níže) a výsledky okamžitě zpracovává počítač.

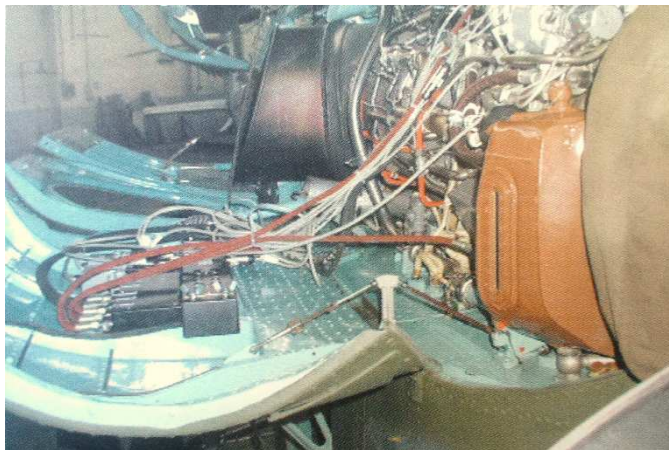
V dnešní době se v běžné praxi využívají automatizovaná zařízení pro měření, sběr dat a jejich vyhodnocování. Jedná se o systém snímačů různých veličin charakterizujících stav motoru, jejichž data se ukládají na sběrnici. Uložená data je možné dále zpracovávat a archivovat. Tato kapitola je zaměřena na popis zkoušek zaběhnutého motoru.

### 6.1 PSPM-01

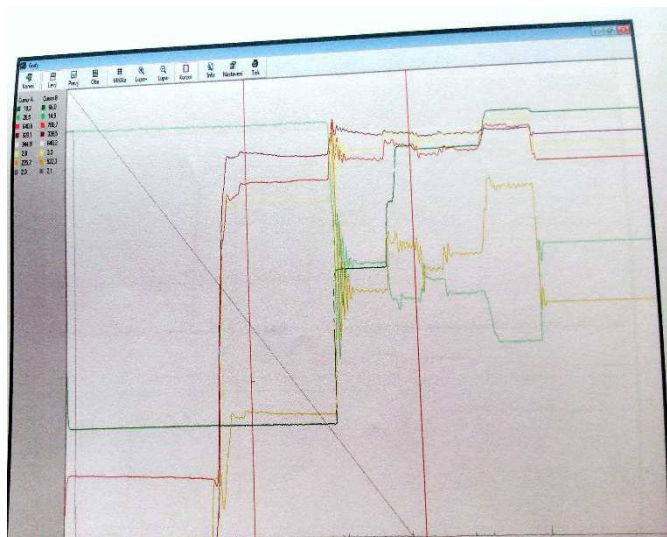
PSPM-01 je typem zařízení pro měření a sběr dat. Skládá se ze tří částí - skříň převodníků a tlakových čidel, skříň s blokem mikroprocesorů a podpůrné elektroniky, PC. Je určeno pro motorové zkoušky vrtulníku a to jak na speciálním pozemním stanovišti, tak v polních podmínkách, jelikož je možné toto zařízení napájet z palubní sítě vrtulníku (viz obrázek 6.1). Toto zařízení je schopné snímat až 32 parametrů současně. Mezi tyto veličiny patří: úhel natočení páky ovládní motoru a páky korekce regulátoru volné turbíny, úhel natočení statorových lopatek kompresoru, otevření/zavření ventilů odpouštění vzduchu, otáčky turbokompresoru a volné turbíny, tlak vzduchu za kompresorem, tlaky paliva v palivovém okruhu, tlak oleje v motoru, teplotu vstupního vzduchu, teplotu spalin před turbínou, teplotu oleje, vibrace motoru a další. Tyto hodnoty se snímají pro každý motor zvlášť. Měření a sběr dat probíhá v cyklech s periodou 200 ms. Jeden cyklus představuje změření a záznam všech

parametrů. Před zkouškou je nutné provést kalibraci čidel i kalibraci samotného systému.

Jeden z mikroprocesorů má za úkol měřit a ukládat data ze senzorů vibrací. Záznam provádí obsluha stiskem klávesy. Druhý mikroprocesor sbírá data z ostatních senzorů. Data se po jednom cyklu přenáší do PC, kde se ukládají. Obsluha TD má na obrazovce monitoru zobrazeny všechny měřené parametry (včetně redukovaných a vztažených hodnot) během zkoušky. Je tedy možné sledovat vzájemné závislosti veličin. K vyhodnocování dat slouží software AMIT (viz obrázek 6.2).



Obrázek 6.1 - Zapojení PSPM-01



Obrázek 6.2 - Vyhodnocená měření prostřednictvím AMIT

Pokud je překročena hodnota některé z veličin, automaticky se barevně zvýrazní. Systém takový moment zaznamená do speciálního souboru tzv. poruchových stavů. Tyto údaje následně slouží pro výslednou analýzu. Program, jenž celé měření vyhodnocuje, umožňuje obsluze vybrat jakýkoli moment v průběhu měření a zobrazit dané hodnoty. Tato funkce tedy umožňuje sledování funkcí motoru v určitém režimu chodu.

Záznam měření počítač archivuje, je tedy možné jej kdykoli přehrát nebo je možné pořídit snímek grafů ze záznamu. V případě grafů, je možné zobrazit všechny současně, případně grafy jednotlivých veličin pro každou samostatně. Je možné také zobrazit současně parametry obou motorů (viz příloha číslo 1,2). To může posloužit k porovnávání funkcí.

Jednotlivé veličiny jsou označeny různými barvami a zkratkami - Nrot - otáčky nosného rotoru, Nrot red - otáčky nosného rotoru přepočtené na atmosférické podmínky, Ntk - otáčky turbokompresoru, Nvt - otáčky volné turbíny, Apom - úhel nastavení páky ovládání motoru, T1 - teplota vzduchu, T3 - teplota plynů, Ppal1 - tlak paliva v 1.větvi palivového okruhu, Ppal2 - tlak paliva ve 2.větvi, Pol - tlak oleje, P2 tlak vzduchu za kompresorem, Tol - teplota oleje, Vibration - efektivní hodnota vibrací. Zkratka + označení red představuje přepočtenou hodnotu na atmosférické podmínky (viz příloha číslo 1, 2, 3, 4, 5).

### **6.1.1 Výsledky měření**

Příloha číslo 3 a číslo 4 je záznam měření prostřednictvím PSPM-01 a vyhodnocení softwarem AMIT. Příloha číslo 3 a číslo 4 zobrazují hodnoty v různých časech při spuštění motoru, příloha číslo 4 ukazuje chování motoru v režimu volnoběhu.

Příloha číslo 5 pak mapuje nadlimitní hodnoty otáček. Protokol udává minimální a maximální hodnoty otáček. Měření však odhalilo nadlimitní hodnotu. Je tedy nutné motor vrátit na dílnu, rozebrat a zjistit příčinu takto vysokých otáček.

## 6.2 Rozbor oleje

Olej nese důležité informace o stavu motoru. Na základě těchto informací lze odhalit technický stav motoru ještě před výskytem odchylek. Tím se liší od ostatních technik. V kapitole 5.10 byly popsány metody tribodiagnostiky, nyní samotné vyhodnocení.

### 6.2.1 Rozbor oleje - záznam

Záznam o vyhodnocení vlastností odebraného oleje se provádí zápisem do protokolu. V protokolu se uvádí číslo motoru, druh oleje, místo odběru, počet odpracovaných hodin, důvod provádění zkoušky, vlastní měření a vyhodnocení.

V tomto případě byl vzorek oleje odebrán v souvislosti s cizími zvuky z reduktoru. V tabulce 6.1 je uveden obsah prvků v jednotkách ppm, zjištěný spektrální analýzou.

Identifikátor vzorku	Nefiltrovaný vzorek [ppm]	Filtrovaný vzorek [ppm]
Fe	26	14,1
Cr	0,3	0
Pb	0,1	0
Cu	7	6,1
Al	0,4	0,1
Ni	0	0
Ag	0,1	0,1
Si	3,5	2,9
B	0,2	0,1
Na	0,1	0
Mg	3,7	2,9
Ca	0,1	0,1
Ba	0	0
P	4546	4337
Zn	1	0,9
Mo	0,6	1,2
Ti	0,1	0,1
V	0	0

Tabulka 6.1 - Výsledky ze spektrální analýzy [6]

Jelikož spektrální analýza odhalila vysokou koncentraci železa, byla provedena další metoda - ferrografie. Výsledky ferrografie jsou zaznamenány snímkem. Na obrázku 6.2 jsou zachyceny částice Fe, na obrázku 6.3 nemagnetická částice (pravděpodobně Mg). Zde je možné také určit velikost částic. Největší částice mají kolem 25  $\mu\text{m}$ .



Obrázek 6.3 - Ferrogram - zachycení částic Fe [6]



Obrázek 6.4 - Ferrogram - zachycení nemagnetické částice [6]

Z výsledků rozboru vyplývá, že obsah Fe překračuje kritickou koncentraci, což může značit poruchu reduktoru. Další hodnocené veličiny při rozboru oleje mohou být viskozita, bod vzplanutí, či obsah vody.



### 6.3 Snímací box

Snímací box je zkušebna, vybavena snímacím zařízením (DEWETRON) pro motorové zkoušky. Na obrázku 6.5 vidíme ovládací pult, k němuž je připojen PC. Za sklem v pozadí je zkušebna (viz obrázek 6.6). Zkouška motoru je řízena na dálku. Veškeré veličiny se snímají automaticky, výstupy jsou v digitální podobě. Obsluha zapisuje pouze poznámky o seřizování. Zařízení, které je vidět na obrázcích je zcela mobilní, lze ho složit do kontejneru a převézt. Postupy provádění zkoušky jsou opět zanesené v příslušných manuálech (viz obrázek 6.8). Tyto manuály jsou nesmírně obsáhlé, jsou zde popsána zapojení a úkony před zkouškou, dále mezní hodnoty veličin v určitých pracovních režimech atd. Je tedy nutné, aby obsluha byla řádně proškolená a byla schopná se v předpisech orientovat. Z důvodu obrovského množství informací budou popsány jen základní funkce snímacího zařízení.



Obrázek 6.5 - Ovládací pult [6]



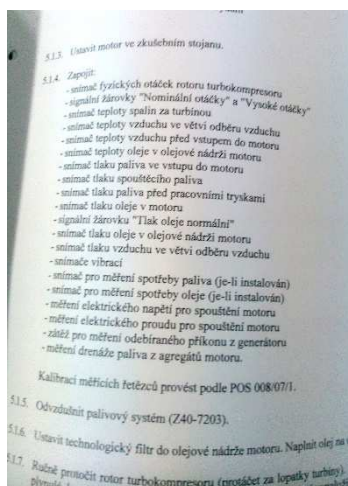
Obrázek 6.6 - Zkušebna [6]



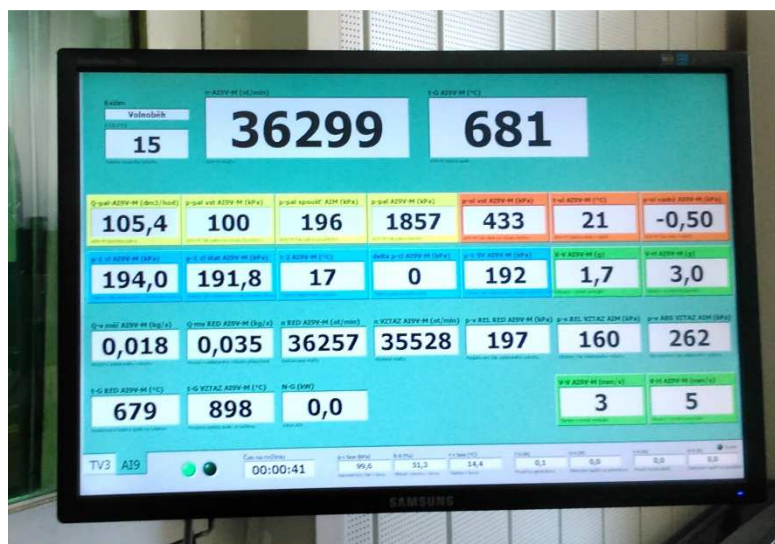


Obrázek 6.7 - Ovládací pult - ovládací prvky [6]

Toto zařízení snímá a vyhodnocuje velký počet veličin současně. Mezi základní části patří snímač otáček rotoru turbokompresoru, snímač teploty spalin za turbínou, snímač teploty vzduchu před vstupem do motoru, snímač teploty oleje, snímače tlaků paliva a oleje, snímače vibrací, snímač spotřeby paliva a další (viz obrázek 6.8). Všechny hodnoty se zobrazují na monitoru po celou dobu provádění zkoušky (viz obrázek 6.9).



Obrázek 6.8 - Manuál - zapojení snímačů [6]



Obrázek 6.9 - Snímání veličin při motorové zkoušce [6]

Žlutě vyznačené veličiny popisují stav paliva, oranžové stav oleje. Modrá barva je pro vzduch a zelená patří vibracím. Vlevo nahoře je ukazatel teploty okolního vzduchu (°C), uprostřed hodnoty otáček (ot/min), vpravo teploty spalin (°C). U paliva se pak konkrétně zobrazují tlaky (kPa), průtok paliva (dm<sup>3</sup>/h). U oleje a vzduchu tlaky (kPa) a teploty (°C). Dále je možné vyčítat vibrace (mm/s) a (g).

Toto měření je zaměřeno na vyhodnocení otáček v režimu volnoběhu. Manuál uvádí přípustnou hodnotu  $36750 \pm 475$  (ot/min). Na monitoru vidíme hodnotu 36299 ot/min. Tato hodnota je hraniční, ale stále přípustná. V normě je i teplota spalin o hodnotě 681 °C. Maximální přípustná hodnota, která je v manuálu uvedena, činí 720 °C při režimu volnoběhu.

Výsledný záznam zkoušky viz příloha číslo 5.

### 6.3.1 Další zkoušky a senzory

Během zkoušky motoru se vyhodnocuje také výkon motoru, na základě hodnot kroutícího momentu (pomocí torquemetru). Pro snímání otáček se využívají také magnetická a optická čidla.

Pro měření vibrací nábojové snímače PCB. Tyto snímače nemají běžně integrované zesilovače, jelikož se používají v oblastech o vysokých teplotách a citlivé zařízení by

takové podmínky nevydrželo. Zesilovač je až před samým měřicím systémem (RIO automat).

Pro indikace průtoků  $Q$  se užívají turbínové průtokoměry.

Pro měření teploty se používají nejčastěji termočlánky typu K a méně často typu J. Termočlánky jsou tvořeny dvojkovy. Dvojice kovu se vybírá podle rozsahu měřených teplot. U letadlových motorů se vyskytují značné rozsahy teplot. Vhodným typem termočlánku pro měření velkých rozsahů je termočlánek typu K (Svařený konec kovových drátků může být odhalený, záleží na oblasti měření). Typ J se používá pro měření teplot menších rozsahů – měření teploty na spojce.

## 7. Příklady provádění TD před uvedením motoru do provozu

Před uvedením motoru do provozu je potřeba splnit certifikační zkoušky. Certifikační zkoušky se provádí dle předpisů CS-E (volně přístupné na [www.caa.cz](http://www.caa.cz)).

Ještě než se motor dostane k certifikačním zkouškám, projde náročným vývojem a zkoušením. Tento proces představuje velice rozsáhlý popis, proto budou vybrány jen některé úkony zkoušení turbín, spalovací komory a motoru jako celku.

Při vývoji nového motoru se zkoumá žárupevnost a žáruvzdornost materiálů použitých na motoru. (Další popis je zaměřen na zkoumání motoru Walter typu M 601) [18]

Teplota ve spalovací komoře se určuje pomocí teplocitlivých barev (více informací kapitola 5.4.1). Komora se natře vhodnou barvou a vystaví teplotě. Podle změny odstínu se určuje hodnota teploty. Protože při spouštění je teplota vyšší a při volnoběhu nižší, nechá se zkouška proběhnout po delší dobu, aby byly zajištěny nezkráslené výsledky. Teploty na komoře a na turbínách se dále měří termočlánky (typ chromel-alumel). Většinou jde o soustavy termočlánků. Při vysazení jednoho termočlánku, fungují ostatní a měření může dále probíhat. Dále se proměřují teploty mezi turbínami. Na vstupu do turbíny je teplota nejvyšší o hodnotě až 1000 °C v této oblasti jsou termočlánky velice teplotně namáhané a mají nízkou životnost, obvykle se tedy měří teplota za první turbínou (teploty mezi turbínami dosahují běžně hodnot kolem 760 °C. Vlivem teplotního namáhání může dojít k trhlinám na stěnách komory a k jejímu zkroucení. Komora je proto vybavena otvory pro chlazení tzv. závojevé chlazení.

Teplotní pole se sleduje také v místě lopatek – vysokoteplotní namáhání lopatek (teplota u kořene větší než na konci. Teplotní dynamické namáhání má za následek prodloužení lopatek a ty pak mohou zasahovat do statoru. Stator je pro tento případ opatřen ochrannou vrstvou (grafit) [18].

Dále se vyhodnocují teploty oleje (použití odporových teploměrů), výfukových plynů atd. (podrobnější popis v předchozích kapitolách). Důležitým ukazatelem je také tlak, určují se tlakové ztráty komory – je nutné zabezpečit minimální ztráty. Velikost tahu se vyhodnocuje podle kroutícího momentu. Kroutící moment se určuje dvěma způsoby – tenzometricky a opticky. Měření vibrací je také jedním z nezbytných ukazatelů.

Hodnoty vibrací mohou indikovat poškození turbíny. Při poškození vzduchoplynového traktu má proud vzduchu jinou cestu – to se projeví vibracemi. Měření vibrací může probíhat ve třech směrech – vertikálním, ve směru symetrie, tangenciálně. Nejlépe provádět měření ve všech směrech současně. Vibrace se indikují akcelerometry. Sleduje se a hodnotí trend vibrací. Vibrace mohou být vyšší při záběhu motoru do provozu, pak se ustálí. Vlivem opotřebení motoru se začnou opět zvyšovat. Případná poškození se projeví ve vibračním spektru [18].

## Závěr

Nepřetržité monitorování stavu letadlových motorů, vedení přesných záznamů o jejich technickém životě a striktní dodržování předpisů pro provádění technické diagnostiky zvyšuje bezpečnost letecké dopravy a zajišťuje prodloužení správných funkcí všech částí pohonné jednotky.

Výše uvedené metody technické diagnostiky a způsoby měření spolehlivě splňují kritéria pro kontrolu stavu motoru, jak ze strany výrobců motorů, tak ze strany dohlédacích úřadů.

Snímací, kontrolní a řídicí systémy dnešních dopravních letadel mají vysokou úroveň. Dosažení takové úrovně bylo možné na základě vývoje nových technologií a také na základě předchozích nehod a poruch v praxi. Dosažení nejvyšší bezpečnosti letecké dopravy by mělo být i nadále hlavní prioritou. Bohužel se někdy setkáváme s nesprávným přístupem ze stran provozovatelů letounů, kteří při honbě za vyšším ziskem bezpečnost přehlíží.

Díky existenci velkého množství moderních metod technické diagnostiky a automatizovaných systémů, je možné téměř eliminovat chyby způsobené lidským faktorem a důkladně zkontrolovat všechny systémy motoru. V případě nejasných výsledků jedné z metod je možné použít jakoukoli další metodu a ujistit se o správnosti měření.

Během tvorby této práce jsem zjistila, že provádět některé metody nemusí důkladně vyškolení pracovníci. Myslím, že toto není správný přístup. Práce prováděné během technické diagnostiky jsou velice důležité a pomáhají zajišťovat správný chod všech částí motoru. Provozovatel by měl klást na své pracovníky ty nejvyšší nároky, jelikož se zde jedná o bezpečnost a zdraví uživatelů letecké techniky.

## Seznam použité literatury

- [1] Doprava: *Definice* [cit. 18. března 2015]. Dostupné na <http://cs.wikipedia.org/wiki/Doprava>
- [2] Archiv leteckých nehod: *Bureau of Aircraft Accidents Archives - Crashes Rate per Year* [30. března 2015]. Dostupné na <http://www.baaa-acro.com/general-statistics/crashes-rate-per-year/>
- [3] Letiště Václava Havla: *Dotazy a mýty* [cit. 18. března 2013]. Dostupné na <http://www.prg.aero/cs/o-letisti-praha/paralelni-draha/myty-o-draze/#letecka2>
- [4] Adamec J., Kocáb J.: *Letadlové motory*, Corona spol. s. r. o.: Praha 2008, 176s., ISBN 978-80-86116-54-9
- [5] Hanus D., Maršálek J.: *Studijní modul 15 Turbínový motor*, CERM s. r. o.: Brno 2004, 207 s., ISBN 80-7204-369-2
- [6] Zdroj LOM Praha
- [7] Kreidl M., Šmíd R.: *Technická diagnostika – senzory neelektrických veličin 4. díl, BEN – technická literatura*: Praha 2006, 408s., ISBN 80-7300-158-6
- [8] Vrožina M., Jančíková Z., David J.: *Identifikace systémů*, učební texty Vysoká škola báňská - Technická univerzita Ostrava 2012, 178 s., ISBN 978-80-248-2594-6 [cit. 28. dubna 2015]. Dostupné na <http://www.person.vsb.cz/archivcd/FMMI/IS/Identifikace%20systemu.pdf>
- [9] Draxler K., Fábera V., Roháč J.: *Digitální technologie/Elektronické přístrojové systémy*, CERM s. r. o.: Brno 2003, 183s., ISBN 80-7204-311-0
- [10] *Základy diagnostiky a spolehlivosti* [23. března 2013]. Dostupné na [www.rss.tul.cz/ftppub/tgd/P1a2\\_zakl\\_diag\\_a\\_spolehl.pdf](http://www.rss.tul.cz/ftppub/tgd/P1a2_zakl_diag_a_spolehl.pdf)
- [11] Lecture: Parameters definition of piston and jet propulsions, revolution measurement: *Turbofan engine*. [9. května 2013]. Dostupné na [http://measure.feld.cvut.cz/groups/lis/edu/A3M38PSL/Pred\\_3\\_AN\\_CZ.pdf](http://measure.feld.cvut.cz/groups/lis/edu/A3M38PSL/Pred_3_AN_CZ.pdf)

- [12] Surý J.: *Metody a prostředky bezdemontážní diagnostiky*, Naše vojsko: Praha 1981, 264s. ISBN 28-071-81
- [13] Tůma J.: *Diagnostika strojů*, Skripta VŠB-TU Ostrava, 2009
- [14] Hubeňák J.: *Elektrina a magnetismus*, Gaudeamus 2010: Hradec Králové 2010, 204 s., ISBN 978-80-7435-075-7
- [15] Kopec B., Šmíd R.: *Nedestruktivní zkoušení materiálu a konstrukcí*, CERM s.r.o.: Brno 2008, 571s., ISBN 978-80-7204-591-4
- [16] Vorlíček Z.: *Technická diagnostika*, SNTL -Nakladatelství technické literatury: Praha 1988, 192s., ISBN 04-218-88
- [17] Vdoleček F.: *Spolehlivost a technická diagnostika* (Text pro podporu výuky v kombinovaném studiu), VUT Brno, Fakulta strojního inženýrství, Ústav automatizace a informatiky
- [18] Zdroj VZLÚ Praha
- [19] Janoušková L.: *Technická diagnostika tepelných motorů - letadlové motory*, Bakalářská práce, Hradec Králové 2013
- [20] *Kapilární jevy*. [30. května 2015] Dostupné na [http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz\\_fyziky\\_pro\\_DS/display.php/molekul/9\\_7](http://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/9_7)