



# VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

## FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

## LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

# OKAMŽITÁ DIAGNOSTIKA STAVU LETADLOVÝCH PROUDOVÝCH MOTORŮ

IMMEDIATE DIAGNOSTICS OF AIRCRAFT JET ENGINES

## DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

## AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Tomáš Valuch

## VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

BRNO 2016



## Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav  
Student: **Bc. Tomáš Valuch**  
Studijní program: Strojní inženýrství  
Studijní obor: Stavba letadel  
Vedoucí práce: **Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.**  
Akademický rok: 2015/16

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č. 111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

### **Okamžitá diagnostika stavu letadlových proudových motorů**

#### **Stručná charakteristika problematiky úkolu:**

Úkolem je definovat množinu měřených veličin během provozu proudového motoru, na jejímž základě je možné co nejpřesněji provést diagnostiku jeho okamžitého stavu. Práce bude orientována na malé motory jednoduché konstrukce.

#### **Cíle diplomové práce:**

- Popis možných příčin selhání proudových motorů ( zhasnutí, požár, roztržení jádra ) včetně základního rozboru pravděpodobnosti výskytu podobných selhání.
- Stanovení diagnosticky významných parametrů a možnosti jejich zjišťování senzory, které jsou na motorech implementovány.
- Návrh diagnostické soustavy malého proudového motoru.

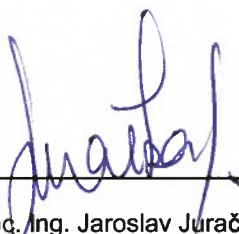
#### **Seznam literatury:**

Kocáb, J.(2000): Letadlové motory. 1. vyd Praha : Kant, 176 s. ISBN 80-902914-0.

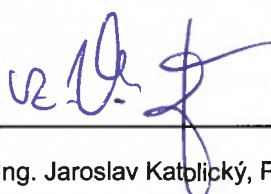
Daly, M., Guston, B. (2007): Jane's Aero - Engines, Issue Twenty-two 2007, Inc. by Jane's Information Group Limited, 776 p. ISSN 1748-2534.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16.

V Brně, dne 26. 11. 2015

  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.  
ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
doc. Ing. Jaroslav Katplický, Ph.D.  
děkan

## **ABSTRAKT**

V této diplomové práci je vypracován návrh diagnostického systému pro malé proudové motory. Cílem práce je popsat typy možných selhání proudových motorů, stanovit významné parametry charakterizující okamžitý stav pohonné jednotky a definovat způsoby měření vybraných parametrů. První část práce se věnuje popisu vybraných typů malých proudových motorů, následuje výčet a rozbor nejpoužívanějších diagnostických metod pro vyhodnocení stavu motoru za provozu. Další kapitola obsahuje výpočet tepelného oběhu motoru s charakteristikou konstrukčních modulů. Poté jsou analyzovány selhání malých motorů s popisem jejich příčin a možnostmi detekce diagnostickou soustavou. Práce pokračuje popisem měřících metod a výběrem potřebných snímačů. V závěru je navržen diagnostický systém pro monitorování okamžitého stavu motoru. Poslední část se věnuje exkurzi na zkušebně proudových motorů na Technické univerzitě v Košicích.

## **KLÍČOVÁ SLOVA**

Diagnostika, monitorování stavu, proudový motor, letectví, JetCat P80-SE, FMEA, snímače, návrh diagnostického systému

## **ABSTRACT**

In this diploma thesis is elaborated design of diagnostic system for small jet engines. The aim is to describe the types of possible failures of jet engines, to determine important parameters characterizing the immediate state of engine and define methods for measurement of selected parameters. The first part is devoted to a description of selected types of small turbojet engines, followed by a summary of the most widely used diagnostic methods for assessing the health condition of the engine during operation. The next chapter contains calculation of the engine thermal cycle with characteristics of construction components. Then there is analysis of small jet engine failures with a description of their causes and possibilities of identification by diagnostic system. Thesis continues with a description of measurement methods and selection of the required sensors. Next chapter is focused on the proposed diagnostic system for condition monitoring of the engine. The last part is devoted to an excursion in laboratory for jet engine testing at the Technical University in Kosice.

## **KEYWORDS**

Diagnostics, condition monitoring, jet engine, aerospace, JetCat P80-SE, FMEA, sensors, design of diagnostic system

VALUCH, T. *Okamžitá diagnostika stavu letadlových proudových motorů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 88 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.



Prohlašuji, že jsem svou diplomovou práci na téma „Okamžitá diagnostika stavu letadlových proudových motorů“ vypracoval samostatně, pod vedením vedoucího diplomové práce Ing. Miroslava Šplíchala, Ph.D., a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.  
V Brně dne 26.5.2016

Tomáš Valuch





Na tomto místě bych chtěl poděkovat vedoucímu Ing. Miroslavu Šplíchalovi, Ph.D. za podnětné připomínky při vytváření práce. Dále pak vděčím za cenné rady odborným konzultantům ze společnosti Honeywell a z Technické univerzity v Košicích. V neposlední řadě bych rád poděkoval své rodině, přítelkyni a přátelům, kteří mě při vytváření této práce a při studiu podporovali.

Tomáš Valuch



# OBSAH

1	Úvod .....	13
2	Cíle a metodika práce .....	14
3	Malé proudové motory .....	16
3.1	Modelářský proudový motor JetCat P-80SE .....	16
3.1.1	Parametry motoru .....	17
3.1.2	Řízení motoru .....	18
3.2	Proudový motor TJ 100 .....	18
3.2.1	Parametry .....	20
4	Diagnostika a okamžité monitorování stavu motoru .....	21
4.1	Okamžitá diagnostika .....	21
5	Diagnostické metody analýzy vzduchoplynového traktu .....	23
5.1	metody založené na modelu motoru .....	23
5.1.1	Lineární model .....	23
5.1.2	Lineární model s použitím Kalmanova filtru .....	24
5.1.3	Nelineární model .....	24
5.2	metody založené na využití prvků umělé inteligence .....	25
5.2.1	Neuronové sítě .....	25
5.2.2	Expertní systémy .....	26
5.2.3	Pravidlový expertní systém .....	27
5.3	Shrnutí diagnostických metod .....	29
6	Popis funkce konstrukčních částí a důležitých parametrů motoru .....	31
6.1	Výpočet tepelného oběhu motoru JetCat P80-SE .....	31
6.2	Vstupní ústrojí .....	35
6.3	Kompresor .....	35
6.4	Spalovací komora .....	37
6.5	Turbína .....	37
6.6	Výstupní tryska .....	39
7	Selhání malých proudových motorů .....	40
7.1	Selhání provozní .....	40
7.1.1	Pumpáž kompresoru .....	40
7.1.2	Nasátí cizího předmětu .....	41
7.2	Selhání technologická .....	41
7.2.1	Nezdařilý start .....	41
7.2.2	Ulomení lopatky kompresoru .....	42
7.2.3	Zhasnutí plamene ve spalovací turbíně za letu .....	42

7.2.4	Porucha palivové soustavy .....	43
7.2.5	Ulomení lopatky turbíny .....	43
7.2.6	Požár.....	43
7.2.7	Výšlech plamene z výstupní trysky .....	44
7.2.8	Špatná odezva motoru na přidání přípuští.....	45
7.2.9	Zadření ložiska.....	45
7.3	FMEA analýza.....	46
7.3.1	Odhadovaná pravděpodobnost výskytu poruchy .....	46
8	Diagnosticky významné parametry a možnosti jejich snímání.....	50
8.1	Měření teploty .....	50
8.1.1	Zvolený snímač teploty .....	51
8.2	Měření tlaku .....	52
8.2.1	Zvolený snímač tlaku .....	53
8.3	Měření otáček .....	54
8.3.1	Zvolený snímač otáček.....	54
8.4	Měření vibrací .....	55
8.4.1	Zvolený snímač vibrací .....	57
8.5	Měření průtoku .....	57
8.5.1	Zvolený snímač hmostnostního průtoku paliva .....	58
9	Návrh diagnostického systému .....	60
9.1	Navržený diagnostický systém.....	62
9.1.1	Modul pro diagnostiku selhání snímačů .....	62
9.1.2	Modul pro diagnostiku vzduchoplynového traktu .....	66
10	Exkurze na Technické univerzitě v Košicích.....	74
11	Závěr .....	78
12	Zdroje.....	80
13	Seznam použitých symbolů .....	84
14	Seznam obrázků .....	86
15	Seznam tabulek .....	88

# 1 ÚVOD

V dnešní době na celém světě stoupá využití letecké dopravy a s novými trendy v letectví současně rostou i nároky na vývoj leteckých motorů. Proudový motor je klíčovým prvkem dopravních letounů a jeho vývoj se během posledních let velmi posunul. Důkazem tohoto vývoje je vyšší výkon a vyšší účinnost dnešních moderních motorů. Tento posun vyžadoval aplikaci moderních technologií výroby a obrábění komponentů motoru stejně jako použití pokročilých materiálů. V této oblasti už zbývá jen málo prostoru na inovace a nová technická řešení. Další snahy v oblasti inovací a zlepšování vlastností se zaměřují zejména na využití sofistikovaných elektronických a výpočetních systémů pro řízení a monitorování stavu motoru. S pomocí těchto systémů lze zlepšovat nejen požadované parametry motoru a účinnost jednotlivých komponentů, ale také jejich spolehlivost.

Se zvyšujícími se nároky na bezpečnost je potřeba jednak vyrábět součásti, které v extrémních podmínkách vydrží bez poruchy, ale také mít schopnost co nejrychleji detekovat poruchu, dle snímaných veličin ji okamžitě diagnostikovat a umět předčasně predikovat. K tomuto účelu slouží diagnostický systém.

U proudových motorů velkých dopravních letadel je tento systém velice propracovaný a komplikovaný a je přímo propojený s řídicí jednotkou FADEC<sup>1</sup>. U malých proudových motorů však diagnostická soustava chybí.

S pokrokem a větší dostupností obráběcích technologií se dnes vyrábějí proudové motory menšího měřítka, které se s oblibou používají pro modelářská letadla, bezpilotní letouny a ty výkonější dokonce jako záložní pohon kluzáků či jako pohon experimentálních letadel. Další využití se pro tyto motory našlo v univerzitních laboratořích, kde se zkoumají konkrétní termodynamické děje. Slouží také k výzkumu možností použití alternativních druhů paliva a aplikace prvků umělé inteligence pro řízení chodu motoru. Výhodou těchto malých motorů je poměrně jednoduchá konstrukce a nízká pořizovací cena. Nevýhodou však je absence diagnostického systému, který by mohl zabránit jejich selhání. V současné době tak jsou odkázány na poměrně častou pravidelnou údržbu pro zajištění bezpečného chodu. Tato diplomová práce se zabývá návrhem diagnostické soustavy právě pro kategorii malých proudových motorů.

---

<sup>1</sup> Full Authority Digital Engine Control (Samostatná řídicí jednotka motoru)

## 2 CÍLE A METODIKA PRÁCE

Cílem této diplomové práce je popsat možné příčiny selhání malých proudových motorů, analyzovat pravděpodobnost výskytu jednotlivých typů poruch a stanovit významné parametry pro identifikaci daných poruch pomocí implementovaných senzorů.

Diplomová práce byla vypracována ve spolupráci se společností Honeywell s.r.o. Bude sloužit jako podklad pro výzkum a vývoj zjednodušené řídicí a diagnostické jednotky malého proudového motoru.

Byl proveden popis konstrukčních modulů pohonné jednotky a spočítány termodynamické parametry v jednotlivých sekcích pro režim maximálního tahu motoru. Hodnoty těchto veličin byly dále využity k určení měřicích rozsahů při volbě vhodných snímačů pro diagnostickou soustavu. Vypočítané parametry byly znázorněny ve vytvořeném p-V diagramu tepelného oběhu motoru. Dále byly popisem i rovnicemi vyjádřeny charakteristiky konstrukčních prvků. Rozbor různých typů selhání a jejich možných příčin byl vypracován na základě hledání podobných znaků s velkými proudovými motory, pro které přímo výrobci těchto motorů uvádějí možné krizové situace a doporučení pro piloty, jak se s danou situací vypořádat. Vycházelo se také z výročních zpráv a doporučení vládních bezpečnostních agentur letectví. Významným zdrojem informací byla dále modelářská fóra, kde uživatelé malých proudových motorů řeší vzniklé problémy přímo se zákaznickou podporou výrobců těchto malých pohonných jednotek. Z uvedených fór byla vyhodnocena četnost jejich výskytu.

Při vypracování základní pravděpodobnosti poruch se vycházelo z databází RIAC<sup>2</sup> a SPIDR<sup>3</sup>, kde byly vyhledány intenzity poruch jednotlivých konstrukčních celků. Přesto, že těchto dat nebylo mnoho a byla špatně dohledatelná, podařilo se získat alespoň informace z kategorie vojenských letadel. Hodnoty intenzity poruch se v některých případech velmi lišily, proto byly vybrány takové hodnoty, které se vyskytovaly častěji. Nicméně s ohledem na dosažení konzervativnějšího stanoviska bylo přihlíženo ke kritičtějším číslům.

Pro shrnutí a uvedení jednotlivých typů poruch s intenzitami jejich nastoupení byla vytvořena analýza FMEA<sup>4</sup>.

Pro okamžitou diagnostiku stavu proudových motorů bylo zapotřebí definovat množinu měřených veličin, které definují funkci a účinnost jednotlivých konstrukčních celků. Po uvedení a vysvětlení těchto parametrů byly popsány metody jejich snímání přímo na motoru. Byly zvoleny konkrétní typy snímačů použité pro diagnostický systém motoru JetCat P80-SE.

Pro vyhodnocení naměřených informací během provozu motoru je důležitá diagnostická metoda, která hraje kritickou roli v rozhodovacím procesu detekce a identifikace vzniklé poruchy. Diagnostická metoda na základě různých algoritmů dokáže vyhodnotit okamžitý stav pohonné jednotky. Existuje mnoho typů těchto metod od nejjednodušších po velmi komplexní. V práci byly popsány nejdůležitější a nejpoužívanější druhy.

V rámci vypracování této diplomové práce byla také uskutečněna exkurze na Leteckou fakultu Technické univerzity v Košicích, kde mají zkušebnu malých proudových motorů. Zabývají se zde problematikou vývoje řízení a diagnostiky dané kategorie proudových

---

<sup>2</sup> Reliability Information Analysis Center (Centrum informací pro analýzu spolehlivosti)

<sup>3</sup> System and Part Integrated Data Resources (Integrovaná databáze zdrojů pro systémy a součásti)

<sup>4</sup> Failure Mode and Effect Analysis (Analýza poruchových stavů a důsledků)

motorů. Proběhlo zde setkání s doc. Ing. Rudolfem Andogou PhD. a Ing. Ladislavem Fózó PhD., se kterými byla vedena diskuze na téma diagnostického algoritmu používaného na proudových pohonných jednotkách a možnostech aplikace na kategorii malých proudových motorů. Dále byla probírána volba vhodné vyhodnocovací diagnostické metody včetně potřebných snímačů veličin. Načerpal jsem zde cenné rady a doporučení pro sestavení návrhu diagnostického systému.

Návrh diagnostického systému spočíval ve výběru důležitých parametrů pohonné jednotky, volbě vhodných snímačů a jejich zástavbě na modelářskou turbínu JetCat P80-SE. Dalším důležitým krokem byla selekce ideální vyhodnocovací diagnostické metody.

Klíčové poznatky jsou shrnuty v kapitole Závěr spolu s návrhem dalších kroků a možností uplatnění navrhované diagnostické soustavy pro reálnou aplikaci.

### 3 MALÉ PROUDOVÉ MOTORY

V rámci této kapitoly týkající se malých proudových motorů budou popsány dva proudové motory: JetCat P80-SE a PBS TJ100, a to s ohledem na parametry motoru a způsobu jeho řízení. Pro větší pochopení bude nastíněna také funkce konstrukčních částí a důležitých parametrů motorů.

Tyto dva motory byly vybrány z následujících důvodů. Motor JetCat P80-SE je typickým a nejrozšířenějším představitelem modelářských pohonných jednotek a motor TJ 100 je řazen do vyšší výkonnostní kategorie, jelikož je používán jako pohon malých letadel a zároveň patří do kategorie malých proudových motorů, což poskytuje vhodné srovnání. Výsledně navržený diagnostický systém pro motor JetCat P80-SE by mohl být případně v budoucnu použit také pro vyšší kategorii malých proudových motorů.

Vzhledem k podobnosti jednotlivých motorů a rozsahu práce nebyly dále rozebrány další typy.

#### 3.1 MODELÁŘSKÝ PROUDOVÝ MOTOR JETCAT P-80SE

Malý proudový motor P80-SE vyrábí německá firma JetCat. Patří mezi nejznámější motory dané kategorie, používá se běžně pro pohon modelářských letadel, a také pro testovací bezpilotní letouny (UAV<sup>5</sup>). Poněkud kuriózní použití motorů JetCat letcem Yvesem Rossym [1] je na Obr. 1.



*Obr. 1 Příklad zajímavého využití motorů JetCat letcem Yvesem Rossym [1]*

Konstrukčně se jedná o jednoproudový motor s jednostupňovým radiálním kompresorem, jedním hřídelem a jednostupňovou axiální turbínou.

Funkce motoru je prakticky totožná s funkcí motorů používaných v civilním letectví. Odlišnosti jsou zejména ve zjednodušené konstrukci. Soustavy motoru jsou jen základní pro stabilní fungování motoru nebo nejsou přítomny vůbec. Chybí zde olejová soustava, která u velkých motorů představuje poměrně složitý systém s vlastními snímači průtoku oleje, tlaku

---

<sup>5</sup> Unmanned Aerial Vehicle (bepilotní letoun)



a detekcí kovových částic. Zároveň jsou však ložiska daleko více namáhána, protože kvůli malým rozměrům vstupního průměru je zapotřebí mnohem vyšších otáček pro dosažení potřebného stlačení vzduchu. Dostatečné mazání ložisek rotačních soustav je klíčovým předpokladem pro správnou funkci motoru, proto se do paliva přidává 5 % syntetického turbínového oleje [2]. Palivo prochází přes škrtící ventil, který přes škrtící jehlu rozvádí palivo do dvou větví. Palivo procházející přes škrtící jehlu je první větví vedeno do prostoru ložisek, kde je určeno k mazání. Průměr škrtící jehly určuje jaké množství paliva poslouží k mazání. Zbytek paliva, kterého je podstatně více, putuje druhou větví do palivových trysek. Vzhledem k tomu, že pro rozprášení hustého paliva by bylo zapotřebí velkého tlaku palivového čerpadla, používá se u tohoto typu motoru odpařovacích trubek.

Dalším specifikem pro tuto kategorii motorů je způsob startování turbíny. Pomocí elektrického startovacího motoru se roztočí rotorová soustava. Po dosažení 5 000 ot/min se elektrický startér vypne a nejprve se jako palivo použije propan-butan. Motor běží na propan-butan dokud teplota nedosáhne 350-400 °C a otáček okolo 20 000 ot/min. Poté se pozvolně přepne přívod paliva na kerosin, teplota stoupne na 500 °C a otáčky na přibližně 30 000 ot/min, později dosáhne automaticky ještě na rychlost otáčení 55 000 ot/min, a následně otáčky pozvolna klesnou na hodnotu, při které běží turbína na volnoběh [2]. Od startování propan-butanem se pomalu upouští a za pomoci lepších žhavicích svíček a zdokonalených elektronických řídicích jednotek ECU<sup>6</sup> je možné startovat přímo na kerosin, což je případ jednotky JetCat P80-SE. Nicméně roztočení rotorové soustavy na požadované otáčky se musí provést elektrickým startem.



*Obr. 2 Modelářský motor JetCat P80- SE [vlastní zpracování]*

### **3.1.1 PARAMETRY MOTORU**

Základní parametry motoru jsou důležité pro charakteristiku a určení vhodného použití motoru. Z parametrů uváděných výrobcem můžeme správně určit typy a rozsahy snímačů, které se používají pro měření.

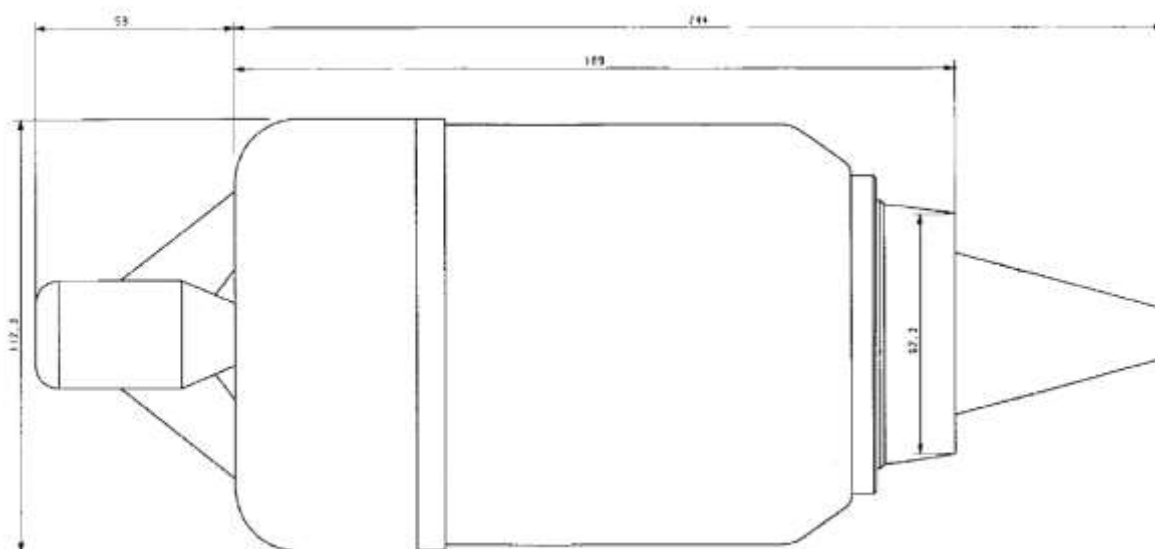
---

<sup>6</sup> Electronic Control Unit (Elektronická řídicí jednotka)

Níže uvedený obrázek zachycuje rozměry motoru a tabulka obsahuje přehled parametrů, viz. Obr. 3

Tabulka 1 Přehled parametrů JetCat P80-SE [vlastní zpracování,2]

Parametr	Jednotky SI
Tah motoru	98 N při 125 000 min <sup>-1</sup>
Hmotnost (včetně startéru)	1,32 kg
Vnější průměr	112,3 mm
Délka (včetně startéru)	297 mm
Rozsah otáček	(35 000 ÷ 125 000) min <sup>-1</sup>
Teplota výstupních plynů	(580 ÷ 700) °C
Spotřeba paliva (při plném výkonu)	0,255 kg.min <sup>-1</sup>
Interval údržby	25 hodin



Obr. 3 Základní rozměry motoru JetCat[2]

### 3.1.2 ŘÍZENÍ MOTORU

Motor je řízen pomocí jednoduché elektronické kontrolní jednotky (ECU), která reguluje přívod paliva do motoru (FF<sup>7</sup>). Řídicí jednotka ovládá palivové čerpadlo napětím. Vstupující signály zpětné vazby pro ECU jsou otáčky rotorové soustavy (RPM<sup>8</sup>) a teplota výstupních plynů (EGT<sup>9</sup>). ECU monitoruje, aby nebyly překročeny maximální možné otáčky a maximální teplota. Otáčky jsou limitovány zejména pevnostními charakteristikami rotorů kompresoru a turbíny a také životností ložisek. Kvůli teplotní roztažnosti a degradaci materiálových vlastností při teplotním namáhání by neměla EGT překročit hodnotu 700 °C.

## 3.2 PROUDOVÝ MOTOR TJ 100

Motor TJ 100 patří také do kategorie malých jednoproudových motorů, avšak je konstruován pro vyšší výkony i větší provozní nároky, zároveň vykazuje vyšší životnost než modelářské motory. Rozsah použití těchto motorů je velmi široký. Používají se především pro pohon bezpilotních prostředků, které slouží k celé řadě aplikací. Pro vojenské účely se vyrábějí cvičné terče pro výcvik pilotů bojových letounů a instalují se také do pozorovacích UAV. Svě

<sup>7</sup> Fuel Flow (Průtok paliva)

<sup>8</sup> Rotation per Minute (Otáčky za minutu)

<sup>9</sup> Exhaust Gas Temperature (Teplota výstupních plynů)

uplatnění mají i v civilním sektoru pro UAV monitorující lesní požáry, stav plynovodů a ropovodů a používají je také meteorologové.

Motor TJ 100 má mimo bezpilotních prostředků využití i pro pohon pilotovaných letadel třídy Experimental a také jako záložní pohon větroňů. Jeho výhoda před konkurencí tkví v malých rozměrech, nižší hmotnosti a delší životnosti [3].

Na následujících obrázcích je názorné použití motoru TJ 100 na letounech. Obr. 4 a Obr. 5



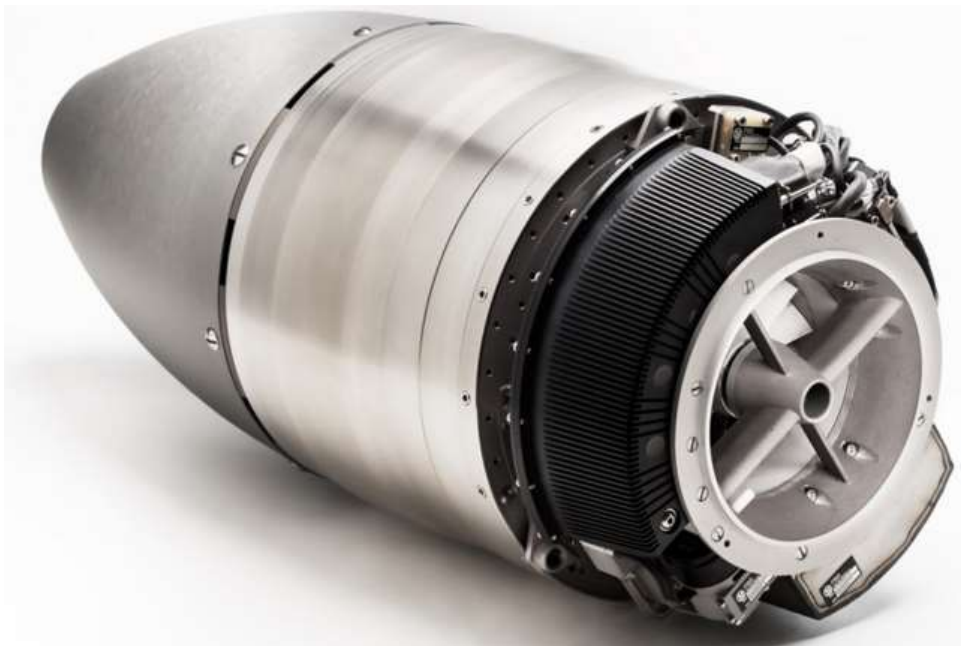
*Obr. 4 Motor TJ 100 na letounu Super Salto [4]*



*Obr. 5 Aplikace motoru TJ 100 na experimentálním letounu SubSonex [5]*

Tento motor se skládá z jednostupňového radiálního kompresoru, radiálního i axiálního difuzoru, prstencové spalovací komory a jednostupňové axiální turbíny. I přesto, že konstrukce je poměrně jednoduchá a obdobná jako u modelářského motoru, obsahuje celou řadu vylepšení a komplexnějších prvků

Obr. 6. Pro vyšší spolehlivost a delší životnost je instalována integrovaná olejová soustava, která zajišťuje lepší mazání ložisek rotačních komponentů. Řízení motoru obstarává mnohem propracovanější elektronická jednotka než je tomu u modelářských motorů. Motor disponuje integrálním startérem a systémem chlazení motoru po jeho odstavení [6].



*Obr. 6 Vizualizace motoru PBS TJ 100 [6]*

### 3.2.1 PARAMETRY

Uvedená tabulka znázorňuje základní parametry motoru TJ 100 uvedené výrobcem PBS.

*Tabulka 2 Přehled parametrů PBS TJ 100 [vlastní zpracování, 6]*

<b>Parametr</b>	<b>Jednotky SI</b>
<b>Tah motoru</b>	<b>1300 N</b>
<b>Hmotnost (včetně příslušenství)</b>	<b>19,5 kg</b>
<b>Vnější průměr</b>	<b>272 mm</b>
<b>Délka (včetně startéru)</b>	<b>625 mm</b>
<b>Spotřeba paliva (při plném výkonu)</b>	<b>0,255 kg.min<sup>-1</sup></b>
<b>Interval údržby</b>	<b>100 hodin</b>

## 4 DIAGNOSTIKA A OKAMŽITÉ MONITOROVÁNÍ STAVU MOTORU

Technická diagnostika je vědní obor, který se zabývá metodami, prostředky a postupy zjišťování technického stavu objektu [7]. Ve většině případů se jedná o bezdemontážní a nedestruktivní postupy. Smyslem technické diagnostiky je objektivní poznání stavu sledovaného objektu a zajištění jeho schopnosti vykonávat požadovanou funkci za stanovených podmínek, a to nejen v daném okamžiku, ale i v budoucnosti [8].

V závislosti na tom, jaký časový úsek provozu objektu sledujeme, definujeme tři typy úloh pro určení technického stavu zkoumaného předmětu.

- Diagnóza je vyhodnocení provozuschopnosti objektu v okamžitém stavu. Diagnóza vede k řešení dvou základních úkolů. První úlohou je detekce a identifikace poruchy objektu nebo jeho části. Přičemž rozlišujeme stav poruchový a bezporuchový z hlediska použitelnosti objektu. Druhou úlohou je potom lokalizace poruchy, s ní souvisí diagnostické rozlišení, které udává počet detekovatelných poruch.
- Geneze je analýza příčin poruch nebo předčasného zhoršení stavu objektu.
- Prognóza (neboli predikce) je určení budoucího vývoje technického stavu předmětu. Vychází se přitom ze statistického vyhodnocení pravděpodobnosti bezporuchového stavu [9]. Pro predikci stavu motoru v čase je potřeba uchovávat a analyzovat velkou spoustu naměřených dat, aby bylo možné vypořizovat určitý trend.

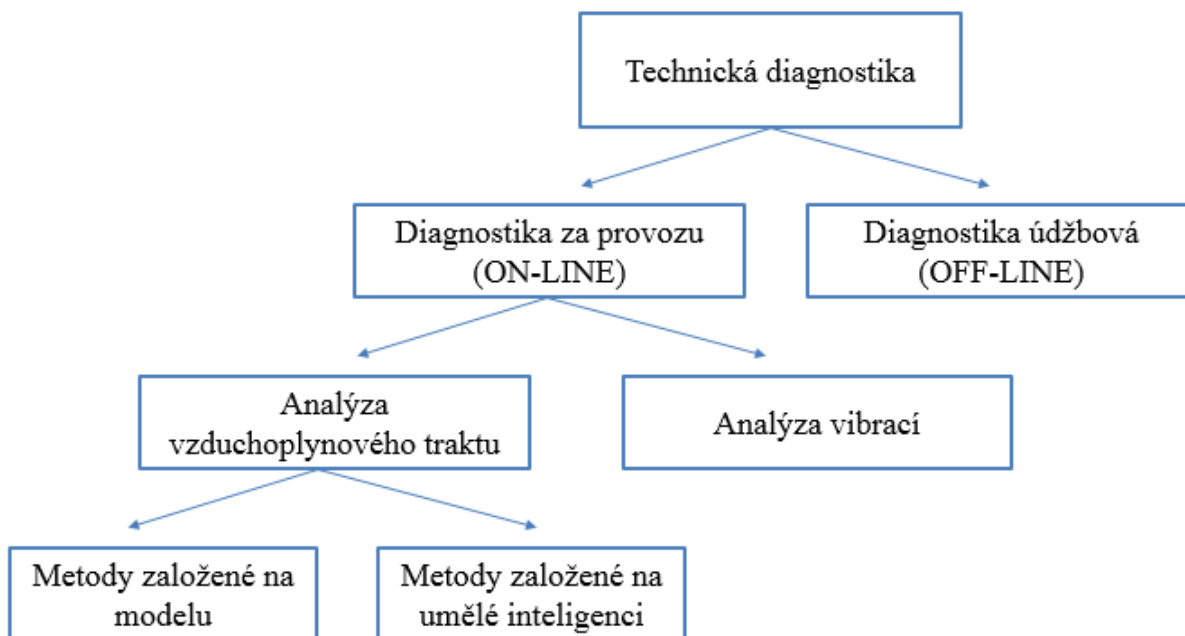
### 4.1 OKAMŽITÁ DIAGNOSTIKA

Okamžitá diagnostika stavu proudového motoru je schopnost odvodit, v jakém stavu jsou jednotlivé konstrukční části motoru bez toho, aby se musel motor odmontovat a rozebrat. Data jsou shromažďována během provozu za letu a diagnostický systém je schopen detekovat případné selhání některého prvku. Na základě této informace je možné provést potřebnou akci pro zabránění vzniku dalších škod [10].

Vývoji leteckých proudových motorů následoval vývoj technologií diagnostiky, vzniklo tak mnoho přístupů k monitorování stavu motoru a diagnostice poruch. Pro příklad lze uvést analýzu oleje, vizuální inspekci, inspekci boroskopem, vibrodiagnostiku apod. Používá se několik technik pro vyvození stavu motoru či vypořizování nějaké změny, některé z nich (například monitorování vibrací) jsou součástí počítačově řízeného systému pro získávání dat, který umožňuje on-line monitorování a třídění velkého množství výkonostních dat. Zato odhalení poruchy nebo zhoršení stavu dané součásti je založeno na pozorování, ke kterému je zapotřebí přímého přístupu k součásti a motor je tudíž třeba rozebrat [11].

Je potřeba zmínit, že změna v měřených parametrech nemusí vždy znamenat chybu přímo u toho daného prvku, může jít o kombinaci poškození, které vznikly na jiném komponentu a tato změna byla pouze důsledkem. Chceme-li mít přístup k proměnným, které mají diagnostické informace, je zásadní simulace motoru založená na modelu. Termodynamické analytické metody využívají modely chování motoru, aby bylo možné zpracovat naměřená data za účelem diagnostiky změn ve fungování komponentů, které mohou být spojeny s degradací, stárnutím nebo vznikající poruchou [10].

Níže je znázorněno rozdělení diagnostiky pro malý proudový motor Obr. 7. Téma práce je zaměřeno na okamžitou diagnostiku stavu motoru, proto nejsou údržbové metody v práci popisovány. Jsou uvedeny jen metody, které budou použity pro návrh diagnostické soustavy malého proudového motoru.



Obr. 7 Schéma rozdělení diagnostických metod

## 5 DIAGNOSTICKÉ METODY ANALÝZY VZDUCHOPLYNOVÉHO TRAKTU

Diagnostika stavu motoru je založena na tom, že proudový motor, jako tepelný stroj pracuje na základě nám známých termodynamických zákonů, dle kterých víme jaké parametry a hodnoty by měl motor při daném režimu práce vykazovat. Dle těchto fyzikálních zákonů je také navržena přesná geometrie součástí, proto jakákoli změna geometrie vlivem poruchy má dopad na ovlivnění proudu vzduchu a plynů, s čímž souvisí pokles účinnosti práce jednotlivých akčních členů. Navržené a vypočítané hodnoty a charakteristiky následně diagnostický systém porovnává s naměřenými veličinami přímo na motoru [10]. Posouzení přesného a okamžitého stavu motoru je poněkud komplikované, uvážíme-li poměrně malý počet snímačů, které jsou k dispozici pro měření potřebných parametrů a chyby v měření způsobené šumem a nepřesnostmi snímačů. Vztah mezi měřeními a charakteristickými parametry výkonu je analyticky definován následující rovnicí:

$$z = h(x, w) + v + b \quad (5.1)$$

Kde  $z$  je vektor měřených dat,  $x$  vektor charakteristických parametrů výkonu,  $w$  je vektor parametrů okolního prostředí a nastavení tahu motoru,  $v$  je vektor šumu měření,  $b$  je vektor systematické chyby měření a  $h()$  je vektor hodnocené nelineární funkce [12].

Porovnávání a následné vyhodnocení probíhá za pomoci metod, které budou popsány v této kapitole.

Vyhodnocovací metody lze rozdělit do dvou skupin, a to na metody založené na fyzikálním modelu motoru a metody založené na využití prvků umělé inteligence.

### 5.1 METODY ZALOŽENÉ NA MODELU MOTORU

Pro schopnosti diagnostiky okamžitého stavu pohonné jednotky jsou zapotřebí modely chování motoru. V této podkapitole budou představeny nejpoužívanější typy modelů, jimiž jsou lineární model, lineární model s použitím Kalmanova filtru a nelineární model.

#### 5.1.1 LINEÁRNÍ MODEL

U termodynamických dějů jsou závislosti mezi parametry nelineární. Ovšem pro zjednodušení simulačního modelu se využívá lineární aproximace těchto závislostí [11]. Vychází se zde z předpokladu, že pro daný provozní režim (maximální nebo cestovní režim) jsou odchylky poměrně malé a řídicí rovnice je možné linearizovat [10]. Tyto linearizované rovnice je možné vyjádřit opět v maticovém tvaru [12] :

$$z = H \cdot x \quad (5.2)$$

Vztah mezi měřitelnými a neměřitelnými parametry motoru popisuje matice  $H$ , nazývá se matice ovlivňujících koeficientů.

Odchylka charakterizujících parametrů motoru může být vypočítána dle následujícího vztahu:

$$x = H^{-1} \cdot z \quad (5.3)$$

Matice  $H^{-1}$  je inverzní k matici  $H$  a nazývá se matice chybových koeficientů. Invertovat matici  $H$  je možné pouze v případě, že počet charakterizujících parametrů je menší nebo roven počtu měřených parametrů, což je pro reálné aplikace poněkud limitující.

- Výhody této metody jsou v rychlém vyhodnocení okamžitého stavu, izolaci potenciální poruchy a schopnosti odhalit větší počet možných poruch najednou [11].
- Mezi hlavní nevýhody lze zařadit: vyžaduje velký počet měřených parametrů, nepočítá s vlivem šumu a nepřesnostmi měřících přístrojů, spoléhá na lineární závislosti a je použitelná jen pro malé rozsahy provozních režimů [12].

### 5.1.2 LINEÁRNÍ MODEL S POUŽITÍM KALMANOVA FILTRU

Metoda založená na lineárním modelu byla zdokonalena aplikací Kalmanova filtru [11]. Z použití této metody je možné do výpočtů zahrnout také vliv šumu a chyby snímačů.

- Výhoda této metody je v poskytnutí odhadu chyby po každém měření parametrů charakterizujících stav systému. Filtr dobře reaguje na jednorázové změny v měření.
- Limity metody založené na lineárním modelu s použitím Kalmanova filtru jsou dle Zeddy [13] následující: pro správné používání je nezbytná základní zkušenost se systémem a neustálé zdokonalování na základě získaných dat. Vzhledem k tomu, že Kalmanův filtr slouží k redukci šumu, může se stát, že potenciální poruchu bude brát pouze jako odchylku měření a problém se tak neodhalí. Je složitá také detekce poruchy konkrétního elementu. Stále je zde omezení založené na lineární aproximaci řídicích rovnic.

### 5.1.3 NELINEÁRNÍ MODEL

Tento typ diagnostické metody je založen na přesném modelu chování proudového motoru. Termodynamické rovnice jsou zde použity bez zjednodušení a je tak možné zlepšit přesnost detekce poruchy a předpověď stavu motoru. Při podmínkách ustáleného stavu lze závislé a nezávislé parametry proudového motoru vyjádřit nelineárním vztahem ve tvaru [11]:

$$z = F(x) + v \quad (5.4)$$

Vektor reálného parametru komponentu motoru  $x$  stanovuje výkonové charakteristiky motoru, které představuje vektor měřených dat  $z$ . S počátečním odhadem vektoru parametru  $x^{\wedge}$  simulační model motoru poskytuje předpokládaný vektor  $z^{\wedge}$ . Do algoritmu je aplikován optimalizační přístup, aby minimalizoval tzv. účelovou funkci (OF<sup>10</sup>) danou vztahem:

$$OF = \sum \phi(\|z_i - z_i^{\wedge}\|) \quad (5.5)$$

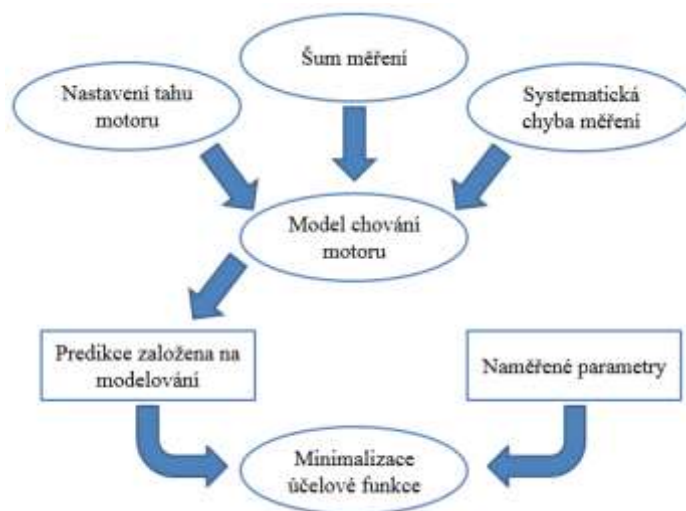
Objektivní funkce je funkcí rozdílu mezi reálným vektorem naměřených dat  $z$  a předpokládaným  $z^{\wedge}$ . Minimalizace je prováděna iteračním postupem dokud není dosažen nejlepší  $z^{\wedge}$  pro reálný  $z$  [11].

Základní princip je uveden na blokovém diagramu (Obr. 8):

---

<sup>10</sup> Objective Function (Účelová funkce)





Obr. 8 Schéma diagnostiky na základě nelineárního modelu [vlastní zpracování]

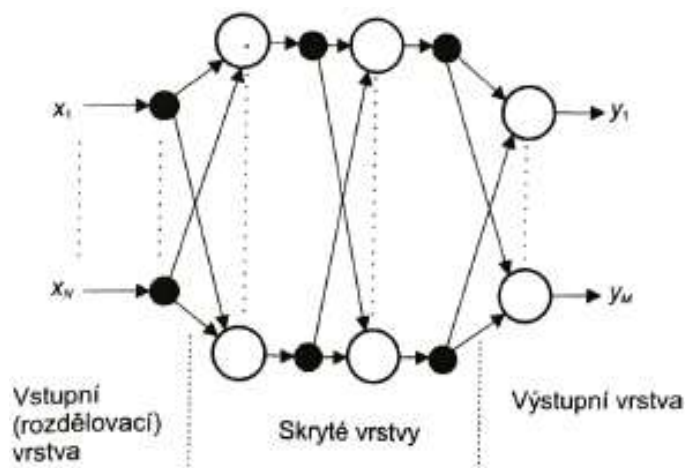
- Metoda založená na nelineárním modelu je výhodná pro její schopnost odvodit vícenásobnou poruchu systému, poskytuje přesný odhad a je robustní. Není tak náročná na vytvoření jako metody založeny na umělé inteligenci [10].
- Použití nelineárního modelu má následující limitace: výpočetní zátěž je náročnější než u jiných odhadních metod vzhledem k tomu, že nelineární model je vytvořen pro všechny provozní režimy, které jsou definovány termodynamickými rovnicemi [13]. Další nevýhodou jsou vysoké nároky na přesnost modelu.

## 5.2 METODY ZALOŽENÉ NA VYUŽITÍ PRVKŮ UMĚLÉ INTELIGENCE

Využití umělé inteligence se dostává do popředí zejména pro svou schopnost rychlého vyhodnocení stavu motoru. Níže je popsáno využití neuronových sítí a nejpoužívanějších typů expertního systému.

### 5.2.1 NEURONOVÉ SÍŤ

Princip neuronových sítí je inspirován způsobem jakým biologický nervový systém zpracovává informace. Systém je složen z velkého množství navzájem propojených elementů (neurony), které společně pracují na vyhodnocení specifického problému [10]. Tak jako se lidský mozek učí na základě podnětů zpracovávat informace, neuronové síť se musí učit rozpoznat nestandardní parametry a vhodně na ně reagovat. Proces učení probíhá tak, že jsou neuronové síť předkládány dvojice vstup-požadovaný výstup z trénovací množiny dat. Požadovaný výstup obsahuje informaci jak má síť na příslušný vstup zareagovat. Po předložení vstupu je vypočten aktuální výstup sítě, který se porovná s požadovaným výstupem. Učící algoritmus pak upraví hodnoty vah neuronů tak, aby rozdíl mezi skutečným a požadovaným výstupem byl minimální [38].



Obr. 9 Obecná struktura vícevrstvé sítě s dopředným šířením [30]

Neuronové sítě pracují ve dvou fázích, první fáze je učící, která byla popsána výše, druhá fáze potom operační, kde se provádí nejčastěji modelování výkonnosti a chování motoru a detekce a klasifikace poruchy [10].

Pro diagnostiku proudových motorů se nejčastěji používá vícevrstvá síť s dopředným šířením a pravděpodobnostní neuronové sítě na základě Bayesovské teorie [12].

- Mezi hlavní výhody neuronových sítí patří rychlý výpočetní čas oproti ostatním metodám. Dále pak jakmile je neuronová síť dobře naprogramována a adaptována na konkrétní motor je možné ji snadno aplikovat i na jiný motor, pokud je zabezpečen dostatečný počet potřebných vstupních parametrů. Neuronové sítě jsou schopny určit nestandardní chování motoru i z komplikovaných a nepřesných dat na základě vytvořených vzorů vývojového trendu [10].
- Systém neuronových sítí má však i své nevýhody. Neuronové sítě nejsou schopny přinést spolehlivou diagnostiku selhání v případě, že nastane chybová situace, pro kterou nebyl systém trénován. S tím souvisí také problém, že neexistuje způsob, jakým bychom mohli sledovat proces vyhodnocování informací uvnitř sítě, lze pouze kontrolovat a analyzovat její výstupy [12]. Další nevýhodou je, že pro fázi učení je potřeba velký objem dat, zkušenosti a znalosti jaké chybové stavy mohou nastat a vysoká časová náročnost [14].

### 5.2.2 EXPERTNÍ SYSTÉMY

Expertní systém je možné definovat jako počítačový program, simulující rozhodovací činnost experta při řešení složitých úloh a využívající vhodně zakódovaných, explicitně vyjádřených znalostí, převzatých od experta, s cílem dosáhnout ve zvolené problémové oblasti kvality rozhodování na úrovni experta [15].

Expertní systém se skládá z následujících složek:

**Báze znalostí**- obsahuje specifické znalosti pro rozpoznávání problémů, jedná se o matematickou logiku, pravidla a rozhodovací stromy, hodnoty konkrétních parametrů, historická data.

**Inferenční mechanismus-** jsou v něm zahrnuty obecné algoritmy schopné řešit problémy na základě zadaných faktů pomocí manipulace se znalostmi z báze znalostí. Důležitou schopností interferenčního mechanismu je zpracování neurčitosti. Neurčitost je dána nepřesností, nekompletností a nekonzistencí vstupních dat, tak jako nejistou znalostí a neznámými typy chyb.

**I/O rozhraní-** uživatelské, které informuje pilota o vzniklé situaci, vazby na jiné systémy- měřící přístroje a elektronická řídicí jednotka.

**Modul pro akvizici znalostí-** vstupy zadávaných dat [15]

Pro diagnostiku proudových se nejčastěji používají 3 typy expertních systémů: Pravidlový ES, Bayesovské sítě a ES založen na fuzzy logice.

### 5.2.3 PRAVIDLOVÝ EXPERTNÍ SYTÉM

Znalosti v tomto typu systému jsou reprezentovány a zpracovávány pomocí pravidel ve tvaru matematické logiky programování: IF- THEN se spojkami AND a OR.

- Výhody tohoto systému jsou v modularitě, uniformitě a přirozenosti rozhodování.
- Možné nevýhody pak zahrnují nebezpečí nekonečného řetězení, modifikace existujících pravidel, neefektivnost a neprůhlednost [15].

### BAYESOVSKÉ SÍTĚ

Bayesovské sítě řeší problém neurčitosti na základě pravděpodobnosti. Systém se dá graficky znázornit jako orientovaná soustava uzlů a vazeb mezi nimi. Každý uzel má dva a více módů, které reprezentují stavy parametrů, ke kterým se vztahují. Ke každému uzlu je přiřazena tabulka rozdělení pravděpodobnosti výskytu daného stavu. Vazby představují kauzální závislosti mezi uzly.

Nezávislé parametry označujeme jako uzly předchůdců (parent nodes) a podmíněně závislé parametry potom jako uzly následníků (child nodes). Pro účely diagnostiky rozlišujeme tyto uzly na uzly příčin a důsledků.

První realizaci Bayesovské sítě pro účely diagnostiky proudového motoru provedl Romessis a spol. [25] Experiment prokázal, že systém byl schopen odhalit 96% simulovaných poruchových stavů.

- Výhody této metody jsou zejména v rychlém výpočetním čase, použití neomezeného množství uzlů tak, že systém je schopen odhalit stejnou chybu z více zdrojů a jakmile je síť správně nastavená, lze ji aplikovat na různé motory [11].
- Mezi nevýhody patří dlouhá příprava pro získání informací pro správné nastavení sítě a zpřesňování pravděpodobnosti nastoupení jednotlivých stavů [12].

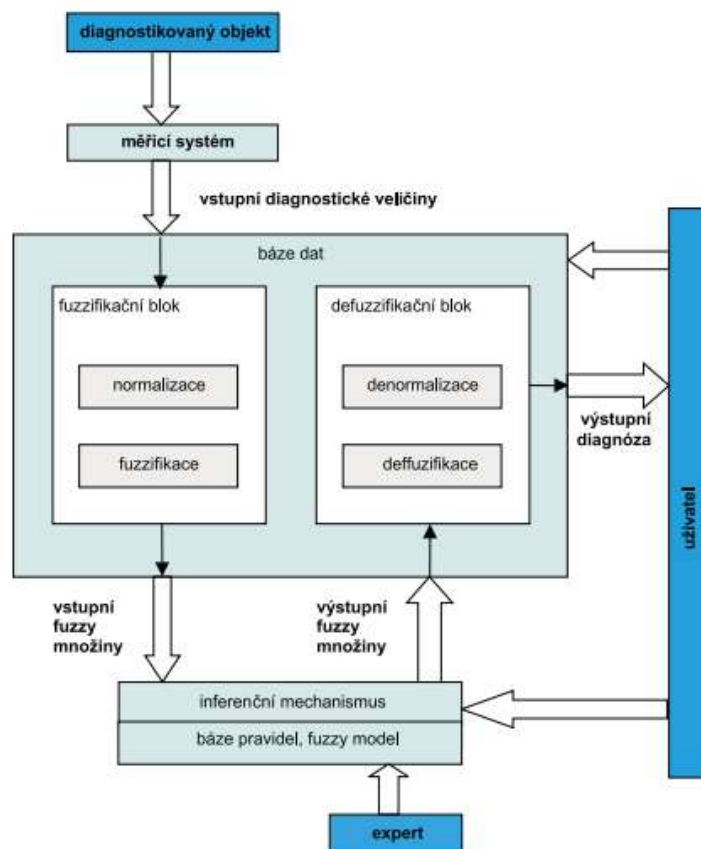
### EXPERTNÍ FUZZY SYSTÉMY

Expertní systémy pracují na principu fuzzy logiky. To je metoda, která se snaží napodobit lidskou schopnost rozhodování na základě odhadu nejistoty. Pomocí fuzzy logiky lze zpracovávat znalosti, které nejsou uváděny v numerických hodnotách, ale v jazykové podobě..

System je tak schopen spojit symbolickou a numerickou reprezentaci dat [11]. Princip funkce fuzzy systému je znázorněn na Obr. 10 .

Typický fuzzy systém se skládá ze :

- **znalostní báze dat**- na základě zkušeností a znalostí experta je báze naplněna daty a pravidly, které umožňují, aby ostatní části systému správně fungovali. Jsou zde definovány diagnostické veličiny reprezentující stav diagnostikovaného motoru
- **fuzzifikačního bloku**- v procesu fuzzifikace se přiřadí každé ostré hodnotě vstupní veličiny stupeň příslušnosti do jedné nebo více fuzzy množin dle daných pravidel.
- **inferenčního mechanismu**- ke své činnosti využívá fuzzy pravidla ve tvaru: IF (fuzzy výrok) THEN (fuzzy výrok). Levá část se nazývá antecedent a tvoří podmíněnou část pravidla, pravá část je konsekvent, což je důsledek, nebo závěr pravidla
- **defuzzifikačního bloku**- cílem defuzzifikace je získat z výstupní fuzzy množiny opět ostrou hodnotu dané veličiny. Výstupní ostrá hodnota představuje například procentuelní opotřebení sledovaného prvku [16].



Obr. 10 Schéma fuzzy systému [40]

- Expertní fuzzy systém je schopen vyvodit závěry a odhalit poruchu i za použití malého počtu snímačů, dle [17] systém využívá pouze 4 základní snímače pro detekování a izolaci poruchy některého z pěti komponentů motoru s 95% přesností, přičemž při přidání jednoho senzoru teploty nebo tlaku navíc vzroste přesnost detekce až na 98 %. Výhodou je také možnost řešit problémy, které nemají numericky jasně definovanou příslušnost, ale vyhodnocení je na základě lingvistických znaků.
- Jako ostatní metody založené na umělé inteligenci je jednou z nevýhod skutečnost, že fuzzy systémy nedokáží rozpoznat s vysokou přesností poruchy, které nemají ve své znalostní databázi [12]. Další nevýhodou je velká komplexita procesů a v některých případech dlouhá výpočetní doba. Vkládání pravidel do znalostní báze dat závisí na znalosti a vhodné interpretaci informací daným expertem. Tento proces je velmi složitý, expert by měl totiž pomoci co nejmenšího počtu pravidel definovat co největší počet možných selhání. Dva různí lidé, tak mohou stejný problém řešit odlišným způsobem, přičemž není zaručeno, že řešení bude stejné.

### 5.3 SHRNUTÍ DIAGNOSTICKÝCH METOD

V předchozích kapitolách byly stručně popsány nejpoužívanější vyhodnocovací metody diagnostiky. Vývojově nejstarším typem jsou metody založené na lineárním modelu, dochází tam ke zjednodušení chování modelu a tudíž k nepřesnostem. První typy nedokázali pracovat s vlivem šumu a nepřesnostmi měření, to se zlepšilo použitím lineárních modelů s Kalmanovými filtry. Obě tyto metody byly vhodné zejména pro simulaci chování motoru v jednom provozním režimu. Pro diagnostiku vícero režimů byly vyvinuty metody založené na nelineárním modelu. Řídící termodynamické rovnice už zde nejsou zjednodušeny a dokáží lépe vyhodnotit aktuální stav pohonné jednotky. Hlavní nevýhodou metod založených na modelu jsou dlouhé výpočetní časy. S pokrokem umělé inteligence přišly na řadu metody s aplikací neuronových sítí. Neuronové sítě jsou schopny monitorovat stav s použitím malého počtu senzorů, protože jsou schopny na základě naučených dat odhadnout jaké hodnoty by měly mít ostatní parametry, limitujícím aspektem je dlouhá doba učení a nevyzpytatelnost chování v případě, kdy dojde k neznámé závadě. Další diskutovanou metodou jsou expertní systémy, které jsou rozděleny na 3 typy dle principu rozhodování. Mezi obecné benefity použití expertních systémů patří rychlá časová odezva, široká aplikovatelnost, použití malého počtu snímačů. Limitujícími vlastnostmi jsou potom náročnost sběru dat, velká komplexita a špatná predikce vyhodnocení při neznámé poruše.

Názorný přehled hlavních charakteristik jednotlivých metod ukazuje Tabulka 3, kde X značí, že je vlastnost zahrnuta.

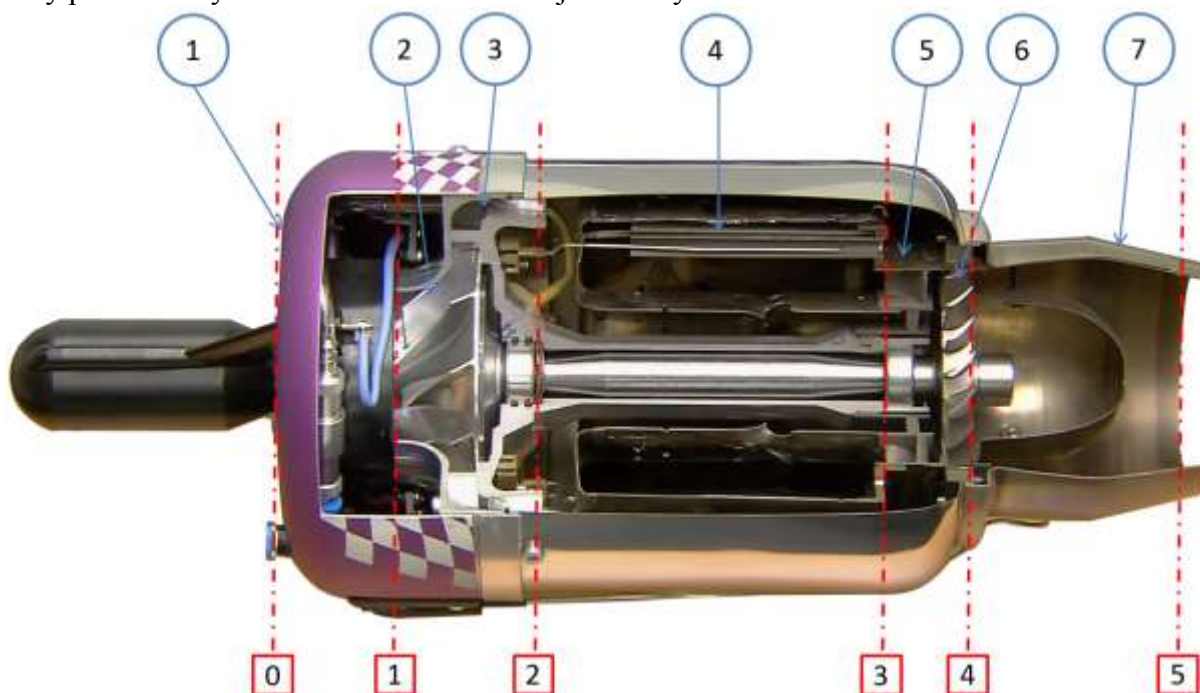
Tabulka 3 Hlavní charakteristiky diagnostických metod [vlastní zpracování]

Diagnostická metoda	založena na modelu	umělá inteligence	komplexita	výpočetní rychlost	zahrnutí vlivu šumu	zahrnutí vlivu chyby snímače	M snímačů, N parametrů
Lineární model	X		nízká	vysoká			$M \geq N$
Lineární model s použitím Kalmanova filtru	X		nízká	vysoká	X	X	$M \geq N$
Nelineární model	X		střední	střední	X	X	$M < N$
Neuronové sítě		X	vysoká	vysoká	X	X	$M < N$
Pravidlový expertní systém		X	vysoká	vysoká	X	X	$M < N$
Bayesovské sítě		X	vysoká	vysoká	X		$M < N$
Expertní fuzzy systém		X	vysoká	vysoká	X	X	$M < N$

## 6 POPIS FUNKCE KONSTRUKČNÍCH ČÁSTÍ A DŮLEŽITÝCH PARAMETRŮ MOTORU

Za účelem stanovení nejdůležitějších parametrů pohonné jednotky JetCat P80-SE, které se budou sledovat a vyhodnocovat diagnostickým systémem, je potřeba určit charakteristiky jednotlivých konstrukčních modulů. Na obrázku

Obr. 11 je znázorněn řez motorem, na kterém lze přehledně vidět jednotlivé funkční prvky a řezy pro termodynamickou charakteristiku jednotlivých sekcí.



Obr. 11 Řez motorem s popisem hlavních konstrukčních částí a s vyznačenými řezy pro výpočty v jednotlivých sekcích [vlastní zpracování]

- 1) vstupní ústrojí
- 2) rotor kompresoru
- 3) stator kompresoru- difuzor
- 4) spalovací komora
- 5) stator turbíny
- 6) rotor turbíny
- 7) výstupní tryska

### 6.1 VÝPOČET TEPELNÉHO OBĚHU MOTORU JETCAT P80-SE

Proudový motor jako tepelný stroj koná práci podle Braytonova cyklu [18], funkci jednotlivých prvků tak popisují stavové rovnice plynů, které v daných částech konají nebo odevzdávají práci. Výpočet pracovních tlaků a teplot bude sloužit pro zjištění vhodných měřících rozsahu pro volené snímače. Výsledný tepelný cyklus je jen pro jeden operační režim motoru a to režim maximálního tahu, aby byly určeny nejvyšší možné hodnoty snímaných veličin. Výpočet byl proveden v programu MATLAB. Programovací skript je v příloze práce pod názvem Výpočet Braytonova cyklu v programu MATLAB.

Potřebné parametry motoru pro výpočet oběhu byli zjištěny z technických dat pro model JetCat P80-SE [2]. Vztahy pro výpočty stavových veličin v jednotlivých sekcích motoru byly čerpány z literatury [19], [20], [21].

- 1) Výpočet celkového stavu plynů v okolní atmosféře před vstupem do motoru. Tlak  $p_0$ , teplota  $T_0$  byly určeny dle MSA pro výšku 0 m nad hladinou moře. Veličina  $v_c$  představuje celkový měrný objem, který je počítán v každém řezu.

$$p_{0c} = p_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right)^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}} \quad (6.1)$$

$$T_{0c} = T_0 \cdot \left(1 + \frac{\kappa - 1}{2} \cdot Ma^2\right) \quad (6.2)$$

$$v_{1c} = \frac{R \cdot T_{1c}}{p_{1c}} \quad (6.3)$$

- 2) Výpočet stavu plynu po průchodu vstupním hrdlem v řezu 1. Náporové stlačení vzduchu ve vstupní soustavě je zanedbáno z důvodu malé rychlosti a součinitel zachování celkového tlaku vstupní soustavy je odhadnut na  $\sigma_{vst} = 0.985$  podle [19].

$$p_{1c} = p_{0c} \cdot \sigma_{vst} \quad (6.4)$$

$$T_{1c} = T_{0c} \quad (6.5)$$

- 3) Parametry vzduchu po průchodu kompresorem v řezu 2. Izoentropická účinnost kompresoru byla odhadnuta podle [19]  $\eta_{kc} = 0.80$ .

$$p_{2c} = \pi_{kc} \cdot p_{1c} \quad (6.6)$$

$$T_{2c} = T_{1c} \cdot \left(1 + \frac{\frac{\kappa - 1}{\pi_{kc}^{\frac{\kappa}{\kappa - 1}}} - 1}{\eta_{kc}}\right) \quad (6.7)$$

- 4) Výpočet stavu plynu na výstupu ze spalovací komory, kde byl součinitel zachování celkového tlaku ve spalovací komoře odhadnut  $\sigma_{sk} = 0.90$

$$p_{3c} = p_{2c} \cdot \sigma_{sk} \quad (6.8)$$

$$T_{3c} = 1030 \text{ K} \quad (6.9)$$

- 5) Stav plynů po expanzi na turbíně, vychází se z předpokladu, že příkon kompresoru se rovná práci turbíny a platí:  $Q_m = Q_{pl}$ . Mechanická účinnost rotorové soustavy je zde určena  $\eta_m = 0.98$  dle [20]. Pro výpočet tlaku se počítá s účinností turbíny  $\eta_{tc} = 0.85$ .

$$T_{4c} = T_{3c} - \frac{c_{pv}}{c_{ppl} \cdot \eta_m} \cdot (T_{2c} - T_{1c}) \cdot \frac{Q_m}{Q_{pl}} \quad (6.10)$$

$$p_{4c} = p_{3c} \left[1 - \left(1 - \frac{T_{4c}}{T_{3c}}\right) \cdot \frac{1}{\eta_{tc}}\right]^{\frac{\kappa'}{\kappa' - 1}} \quad (6.11)$$



- 6) Výpočet parametrů plynu po průchodu výstupní tryskou v řezu 5. Podle [20] je součinitel ztráty rychlosti na výstupní trysce  $\varphi_{tr}=0,98$ . Získáme tak výsledný stav plynu na výstupu z motoru.  $T_{5ad}$  je adiabatická teplota v kritickém průřezu trysky.  $T_5$  je statická teplota ve výstupní dýze.

$$T_5 = T_{4c} \left( \frac{2}{\kappa' + 1} \right) \quad (6.12)$$

$$T_{5ad} = T_{4c} - \left( \frac{T_{4c} - T_5}{\eta_{vd}} \right) \quad (6.13)$$

$$T_{5c} = T_{4c} \quad (6.14)$$

$$p_{5c} = p_{4c} \left( \frac{T_{5ad}}{T_{4c}} \right)^{\frac{\kappa'}{\kappa'-1}} \quad (6.15)$$

Ze stavů plynů na výstupu z trysky je možné spočítat výstupní rychlost spalín a specifický tah a posléze maximální tah motoru:

$$c_5 = \varphi_{tr} \cdot \sqrt{2 \cdot c_{ppl} \cdot T_{4c} \left( 1 - \left( \frac{p_0}{p_{4c}} \right)^{\frac{\kappa'-1}{\kappa'}} \right)} \quad (6.16)$$

$$F_m = c_5 - c_0 \quad (6.17)$$

$$F_t = Q_m \cdot F_m \quad (6.18)$$

Vypočítané hodnoty celkových tlaků  $p_c$ , celkových termodynamických teplot  $T_c$  a celkových měrných objemů  $v_c$  v jednotlivých řezech motoru jsou vyneseny do následující tabulky 4.

Tabulka 4 Vypočítané hodnoty termodynamických veličin v jednotlivých řezech [vlastní zpracování]

řez	$p_c [Pa]$	$T_c [K]$	$v_c [m^3 \cdot kg^{-1}]$
0	101 325	288,0	0,8160
1	99 805	288,0	0,8285
2	239 530	390,3	0,4678
3	215 580	1030,0	1,3731
4	138 800	939,4	1,9451
5	69 613	939,4	3,8793

Z výše uvedených hodnot v tabulce byl sestaven p-v diagram tepelného cyklu motoru (Obr. 12). Výpočtem tepelného oběhu jsou určeny termodynamické stavy– body 0 až 5. Tyto body jsou spojeny pro znázornění dějů. Děj 0->1 určuje náporové stlačení, které je proloženo přímkou. Děj 1->2 znázorňující stlačení kompresoru probíhá po polytropické křivce. Následuje děj 2->3, dodání energie plynu přidáním a hořením paliva ve spalovací komoře, reprezentován v p-V diagramu opět přímkou. Děj 3->4->5 představující průběh expanze plynů před a za turbínou, probíhá po polytropě. Poslední děj 5->0 je expanze plynů za výstupním ústrojím, probíhající izobaricky po přímce.

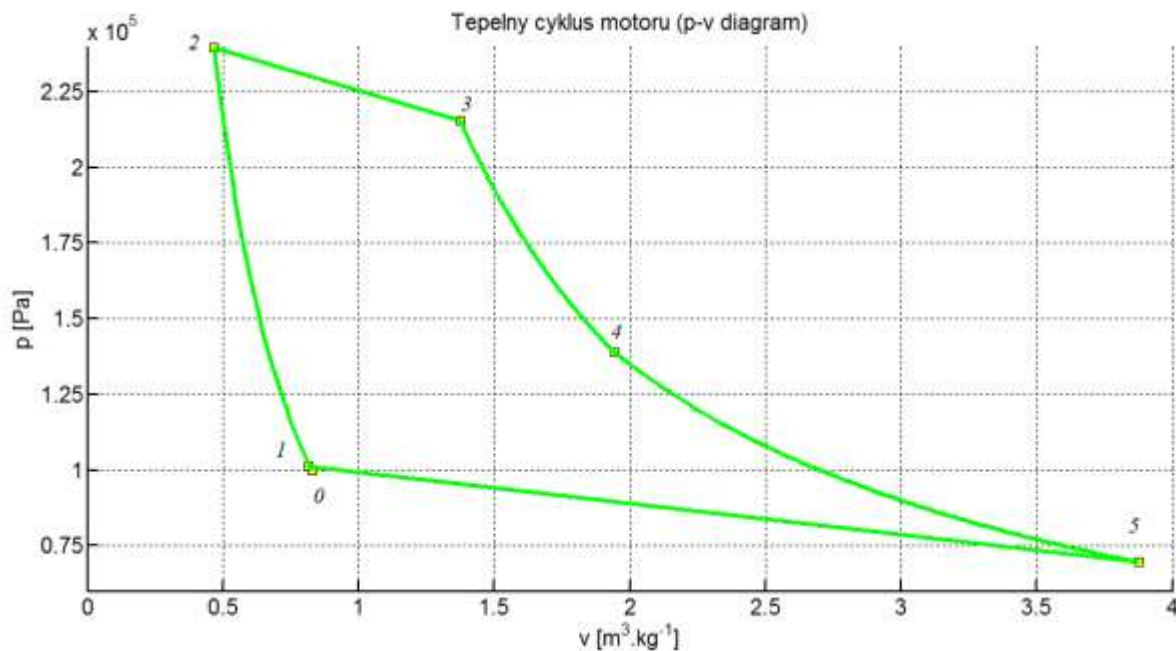
Pro vykreslení polytropické křivky je nutno určit exponent polytropy. Ten se určí ze známých stavů 1 a 2 pomocí vzorce z lit. [18]:

$$n_{1-2} = \frac{\log \frac{p_1}{p_2}}{\log \frac{v_2}{v_1}} \quad (6.19)$$

Polytropická křivka je poté vykreslena bod po bodu ze závislosti:

$$p = p_1 \cdot \left(\frac{v_1}{v}\right)^{n_{1-2}} \quad (6.20)$$

kde  $(v_1, p_1)$  jsou souřadnice počátečního bodu a  $(v, p)$  jsou souřadnice vykreslované křivky stlačení kompresu. Nápodobně je vykreslena i polytropická křivka expanze na turbíně.



Obr. 12 p-v diagram vypočteného Braytonova cyklu [vlastní zpracování]

Pro ověření výsledků hodnot, vypočítaných matematickým modelem tepelného oběhu motoru je zapotřebí hodnoty srovnat s reálnými hodnoty, které uvádí výrobce.

Důležité veličiny, které byly porovnány jsou teplota plynů na výstupu turbíny a maximální tah motoru. Výrobce [2] uvádí  $T_{4c} = 973 \text{ K}$  vypočítaná hodnota je  $T_{4c} = 939,4 \text{ K}$ , což představuje rozdíl 3,47 %. Maximální tah výrobcem je dán  $F_t = 98 \text{ N}$  vypočítaný tah motoru je  $F_t = 99,04 \text{ N}$ , rozdíl je zde tedy 1,06 %.

Pro přesnou validaci by bylo vhodné porovnat i ostatní parametry motoru, nicméně výrobce neuvádí více informací ohledně stavových veličin. Pro přibližné určení maximálních hodnot tlaků a teplot v jednotlivých sekcích je tento matematický model dostačující. Vypočítané hodnoty uvedené v Tabulka 4 jsou použity pro určení měřících rozsahů použitých snímačů.

## 6.2 VSTUPNÍ ÚSTROJÍ

Vstupní ústrojí musí zabezpečit dostatečný přísun vzduchu ve všech fázích letu a při libovolném režimu pohonné jednotky. Dále musí zajistit minimální ztrátu celkového tlaku přiváděného vzduchu, stabilizovat a nasměrovat proud správně do kompresoru. Je nezbytné, aby mělo minimální čelní odpor a zároveň bránilo vstupu cizích předmětů do motoru [22].

Parametry vstupního ústrojí jsou teplota a tlak vzduchu:

$$p_{1c} = p_{0c} \cdot \sigma_{vst} \quad (6.21)$$

$$T_{1c} = T_{0c} \quad (6.22)$$

Kde  $\sigma_{vst}$  je součinitel zachování celkového tlaku vstupní soustavy

## 6.3 KOMPRESOR

Funkcí kompresoru je stlačit vzduch a přivést ho do spalovací komory, protože spalování paliva za přítomnosti vzduchu při normálním tlaku neposkytne dostatek energie z rozpínajících plynů pro vyvození tahu. Pro správnou činnost motoru musí kompresor splňovat následující požadavky:

- vysoký stupeň stlačení;
- široký rozsah pracovních otáček s vysokou účinností a malým sklonem k pumpáži,
- rovnoměrná dodávka vzduchu do spalovací komory,
- minimální rozměry a hmotnost
- jednoduchá konstrukce a vysoká provozní spolehlivost [22].

Mezi hlavní charakteristiky kompresoru patří závislost stlačení a účinnosti na hmotnostním průtoku. Tyto veličiny jsou zobrazeny pomocí kompresorových map níže na Obr. a Obr.

Stlačení  $\pi_{kc}$  se řídí rovnicí :

$$\pi_{kc} = \left[ 1 + \frac{(\pi'_{kc})^{\frac{\kappa-1}{\bar{n}}}-1}{\frac{W'_e}{(W_e)_{opt}} \cdot \frac{\eta'_{kc}}{(\eta_{kc})_{max}}} \cdot \frac{W_e}{(W_e)_{opt}} \cdot \frac{\eta_{kc}}{(\eta_{kc})_{max}} \right]^{\frac{\kappa}{\kappa-1}} \quad (6.23)$$

Kde  $\frac{W_e}{(W_e)_{opt}}$  je poměrná efektivní práce.

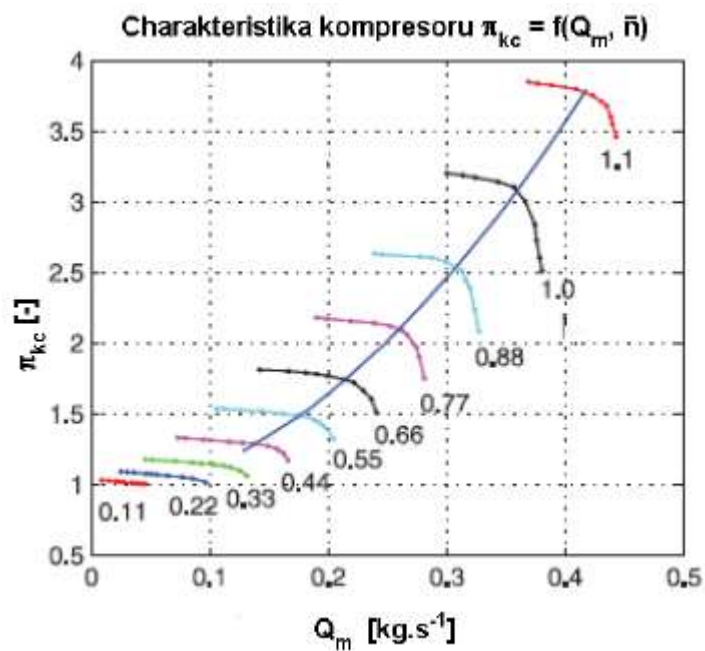
Hmotnostní průtok  $Q_m$  je dán vztahem:

$$Q_m = \frac{Q'_m}{\hat{c}'_a} \cdot \hat{c}_a \cdot \sqrt[3]{\frac{\pi_{kc}}{\pi'_{kc}}} \quad (6.24)$$

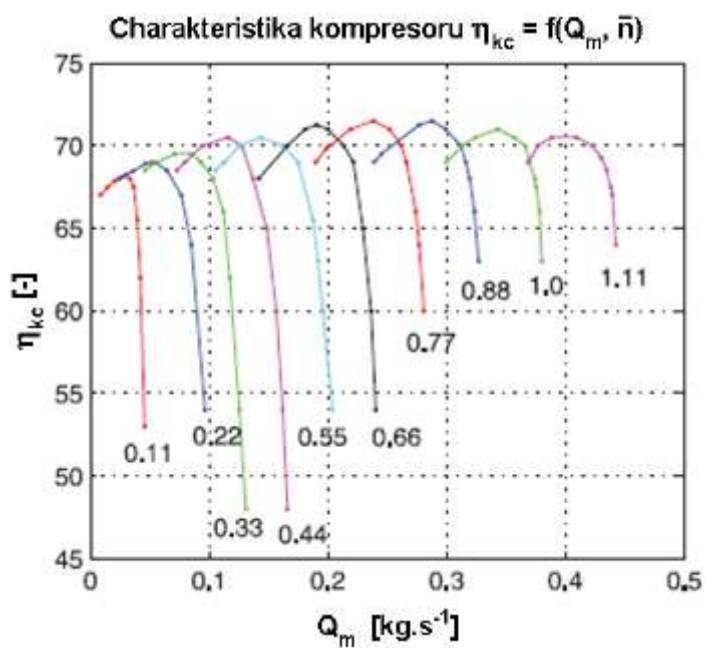
Kde  $\hat{c}_a$  je bezrozměrná axiální rychlost

Účinnost  $\eta_{kc}$  je vyjádřena rovnicí:

$$\eta_{kc} = (\eta_{kc})_{výp} \cdot \frac{(\eta_{kc})_{max}}{(\eta_{kc})_{výp}} \cdot \frac{\eta_{kc}}{(\eta_{kc})_{max}} \quad (6.25)$$



Obr. 13 Závislost stlačení kompresoru na hmotnostním průtoku pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování].



Obr. 14 Závislost účinnosti kompresoru na hmotnostním průtoku pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování].

## 6.4 SPALOVACÍ KOMORA

Základní funkcí spalovací komory je vytváření proudu horkých plynů pro pohon turbíny a výstupní trysky. Právě zde je přidávána energie do oběhu motoru ve formě spalování paliva [23]. Jedná se o konstrukčně složitou součást, protože musí splňovat vysoké nároky na efektivitu spalování, která úzce souvisí se ekonomikou provozu. Mezi další požadavky kladené na spalovací komoru patří stabilita hoření a rovnoměrnost teplotního pole na vstupu do turbíny v obvodovém směru i po výšce lopatky. Měla by také zaručovat minimální hydraulické ztráty a mít přiměřenou životnost [22].

Právě stabilita hoření a nezhasnutí plamene je složitý úkol, zejména proto, že vzduch opouští kompresor rychlostí až 140 m/s, přičemž rychlost šíření plamene v palivové směsi je cca 30 m/s [24]. Proto je před komorou difuzor, který zpomalí proud vzduchu zhruba na 1/3 při dalším nárůstu tlaku, ovšem i tak je rychlost stále vysoká a proud tak musí být rozdělen na dvě části. Primární proud vzduchu, asi 20 %, vstupuje přímo do plamence, kde je ještě zpomalen a rozvířen a účastní se hoření. Sekundární proudí mezi plamencem a pláštěm spalovací komory a ochlazuje stěny plamence, poté se mísí s primárním proudem a vytváří zpětné proudění, potřebné pro správné hoření. Teplota hoření je ve spalovací komoře je až 2000 K [24].

Důležitou charakteristikou, která se sleduje u spalovací komory je:

Změna teploty:

$$\Delta T_{34} = \sigma_{sk} \cdot \frac{Q_{m,pal}}{Q_3} \cdot \frac{LHV}{c_p} \quad (6.26)$$

Kde  $LHV$  je výhřevnost paliva

## 6.5 TURBÍNA

Právě turbína dala tomuto druhu motoru jméno. Jedná se o nejdůležitější modul proudového motoru. Turbína je tepelný stroj, v němž dochází první k transformaci tepelné energie plynů na kinetickou, a poté k přeměně kinetické energie na mechanickou práci, která je určena k pohonu kompresoru [24].

U malých proudových motorů jsou použity axiální turbíny. Skládají z jednoho stupně, přičemž jeden stupeň je složen ze dvou částí: statoru a rotoru. Stator je tvořen pevnými rozváděcími lopatkami a turbínovou skříní. Rotor představuje disk rotujících lopatek. [22]

Turbíny lze dělit do dvou skupin na akční a reakční.

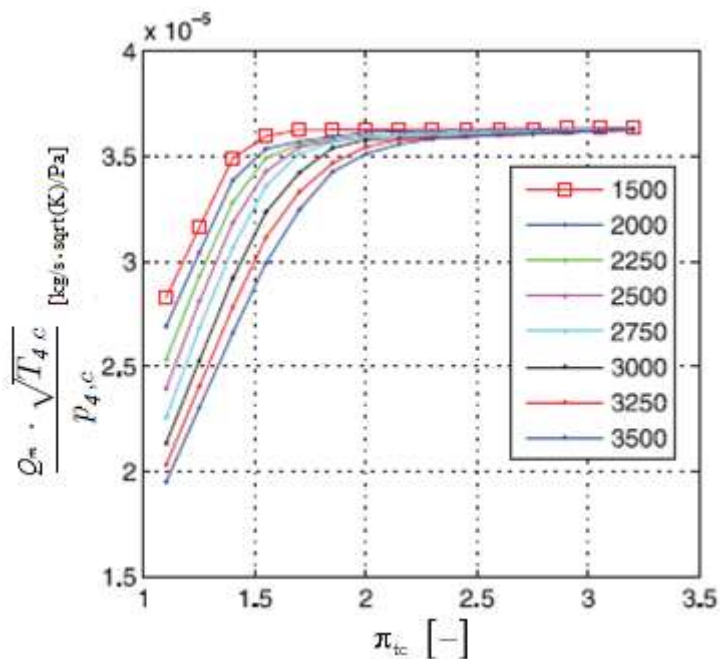
U akční turbíny nastává expanze plynů pouze ve statoru. Zúžující se tvar kanálu mezi lopatkami snižuje tlak a teplotu spalin a urychluje a směřuje proudění k oběžným lopatkám rotoru [24]. V reakční turbíně expanze spalin probíhá jak ve statoru, tak i v rotoru. To znamená, že ke snížení tlaku i teploty dochází i v kanálu mezi rotorovými lopatkami a urychlující se proudění vyvolává reakci, která pohání oběžné kolo turbíny [23]. K přeměně tepelné energie na kinetickou tedy dochází ve statoru a v rotoru se mění kinetická energie na mechanickou práci [24].

Oběžné lopatky turbíny čelí vysokým teplotám a velkému mechanickému zatížení, což se děje vlivem plynových sil a odstředivé síly a také oxidací a korozi. Kvůli těmto nárokům jsou vyráběny ze špičkových materiálů jako jsou super slitiny chromu, kobaltu, niklu, titanu, wolframu a uhlíku.

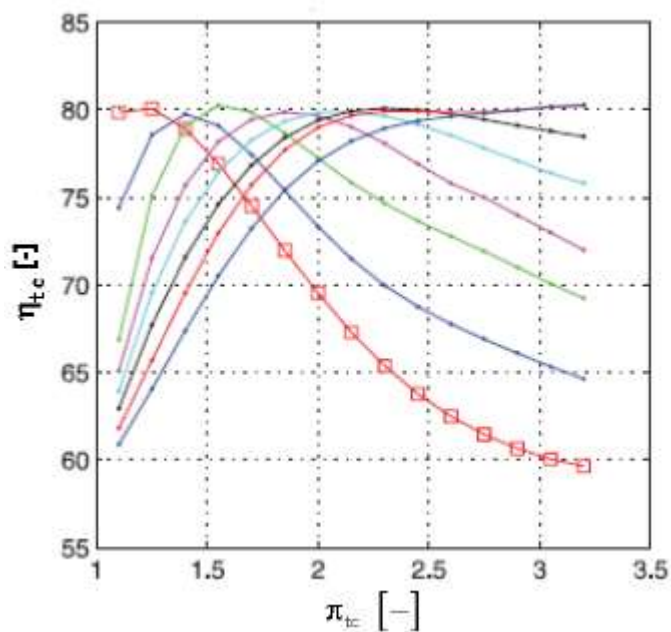
Mezi důležité turbínové charakteristiky patří závislosti korigovaného tlakového poměru a účinnosti turbíny na stlačení. Tyto veličiny pro různé poměrné otáčky jsou vyjádřeny pomocí turbínových map na Obr. 15 a Obr. 16.

Korigovaný bezrozměrný hmotnostní průtok je dán vztahem:

$$\frac{Q_m \sqrt{T_{4,c}}}{p_{4,c}} = K \cdot \sqrt{1 - \left(\frac{p_{5,c}}{p_{4,c}}\right)^{1,8}} \quad (6.27)$$



Obr. 15 Závislost korigovaného hmotnostního průtoku turbíny na stlačení pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování]



Obr. 16 Závislost účinnosti turbíny na stlačení pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování].

## 6.6 VÝSTUPNÍ TRYSKA

U proudových motorů je turbína konstruována tak, aby absorbovala jen tolik energie proudících plynů, kolik je zapotřebí pro pohon kompresoru. Hlavním úkolem výstupního ústrojí je přeměna zbytku potenciální energie plynů na energii kinetickou, potřebnou pro generování tahu. Toho je dosaženo zejména změnou tvaru geometrie [23].

Vlastnosti, které sledujeme u výstupní trysky jsou:

Rychlost výstupního proudu :

$$c_5 = \sqrt{2 \cdot c_p \cdot (T_{4c} - T_{5c})} \quad (6.28)$$

Měrný tah, vztažen ke hmotnostnímu průtoku 1 kg/s:

$$F_m = c_5 - c + \frac{A_5}{Q_m} (p_{5c} - p_0) \quad (6.29)$$

Kde  $A_5$  je průřez dýzy a  $c$  rychlost letu.

## 7 SELHÁNÍ MALÝCH PROUDOVÝCH MOTORŮ

Pro získání přehledu typických poruch proudových motorů a zpracování pravděpodobnosti výskytu byly prozkoumány statistiky civilního letectví a to zejména NTSB (National Transportation Safety Board), ICAO (International Civil Aviation Organization), ATSB (Australian Transport Safety Bureau) a EASA (European Aviation Safety Agency). Ze zveřejněných zpráv vyšetřování leteckých nehod, výročních zpráv a doporučení pro civilní letectví byl vypracován přehled možných poruch, které jsou aplikovatelné i na malé jednoproudové motory jednoduché konstrukce. Nicméně provést pravděpodobnost selhání jednotlivých komponentů z uvedených zdrojů není možné vzhledem k odlišnosti předpisů a zákonů v různých zemích o tom, jaké poruchy se musí hlásit příslušným úřadům. Tyto údaje jsou nejen nedostatečné, ale také velmi nepřesné.

Takové záznamy o poruchách jednotlivých komponentů si vedou provozovatelé letadel nebo přímo výrobci motorů. Na základě shromážděvaných dat mohou predikovat interval údržby a životnost jednotlivých součástí. V rámci získávání těchto informací byly nezávisle osloveny nejvýznamnější firmy v oblasti výroby malých proudových motorů jako PBS Velká Bíteš, JetCat Germany, JetCat USA, KingTech Turbines, Wren Power Systems Ltd a AMT Netherlands. Z důvodu citlivosti údajů a zachování konkurenční výhody zmíněné firmy nemohly požadované data poskytnout. Slouží jim pouze pro interní použití a jsou tudíž neveřejné.

Malé proudové motory mají poměrně specifické použití a také poněkud odlišnou konstrukci. Proto se zde vyskytují mimo selhání, která jsou analogická s těmi u dvouproudových letadlových motorů, také jiné poruchy. Při tvorbě přehledu a četnosti poruch u motoru JetCat P80 SE byly analyzovány informace z více jak 2 000 příspěvků modelářského fóra RCUniverse [26]. Uživatelé zde píšou své problémy s provozováním motorů a formou diskusního fóra dostávají odpověď na řešení situace od přímé podpory společnosti JetCat.

U kategorie malých proudových motorů nemá selhání takové katastrofické důsledky jako u velkých proudových letadel, nicméně může způsobit přinejmenším vysoké škody. Situace se však mění při instalaci motoru např. na kluzák či experimentální letadlo, kdy by porucha mohla ohrozit život pilota. V této kapitole si přiblížíme možné typy selhání, jejich příčiny a důsledky. Nejčastější poruchy jsou rozděleny do dvou částí na poruchy způsobené vlivem okolního prostředí, které lze nazvat selhání provozní a na poruchy technologického charakteru. Byl proveden také rozbor četnosti jednotlivých poruch, dle výskytu na modelářských fórech [26] je možné uvedené poruchy rozdělit dle toho, zda je jejich četnost vysoká, střední nebo nízká.

### 7.1 SELHÁNÍ PROVOZNÍ

K tomuto typu selhání dochází při nevýpočtových režimech motoru, což může být silný vítr, turbulence, nadměrná vlhkost prostředí aj. Do této skupiny se řadí poruchy, které lze stěžejně diagnostikovat a predikovat, kdy se vyskytnou a jaké budou mít důsledky.

#### 7.1.1 PUMPÁŽ KOMPRESORU

Při nevýpočtových režimech motoru může dojít k pumpáži. V případě, že se zmenší průtok vzduchu na výstupu z kompresoru, zvýší se tlak, ovšem poklesne absolutní rychlost vzduchu. Mění se úhel náběhu proudu na jednotlivé lopatky, až dojde k jeho utržení [22]. Kompresor



tak neplní funkci a může dojít až k obrácení proudu vzduchu. Pumpáž poznáme tak, že dojde k silné ráně a vibracím, prudkému nárůstu teploty výstupních plynů a ke snížení tahu [2]. Může dojít k několika typům pumpáže:

- Jednorázová, se samoobnovením funkce kompresoru
- Vícenásobná, se samoobnovením funkce
- Vícenásobná, která pro obnovení funkce potřebuje zásahu pilota
- Funkce kompresoru není obnovena- motor se musí odstavit z chodu [25].

K pumpáži a nestabilní práci kompresoru může dojít z následujících důvodů:

- Nadměrný přívod paliva
- Provoz motoru nad nebo pod navrhovanými otáčkami
- Turbulentní nebo narušený proud vzduchu na vstupu do motoru [24]

Využitím analýzy vzduchoplynového traktu lze vyhodnotit vzniklé změny parametrů při chodu motoru, nelze však dané selhání predikovat.

**Četnost selhání:** střední

### **7.1.2 NASÁTÍ CIZÍHO PŘEDMĚTU**

Rozlišují se dva typy nasátí cizího předmětu, prvním je průchod součástky motoru vzduchoplynovým traktem. Může se jednat o uvolněný spojovací materiál nebo úlomek konstrukce motoru. Druhým typem je nasátí cizího předmětu [22]. U kategorie velkých letadel je za letu nejběžnější nasátí předmětu do motoru, vzhledem k velkým rozměrům a vysokým rychlostem jsou motory navrhovány tak, aby tento případ nenarušil chod motoru a při výrobě jsou na to přímo testovány.

U malých motorů tato možnost téměř nehrozí, kvůli malému průměru vstupu do motoru. K nasátí cizího předmětu nastává nejčastěji v blízkosti země, kdy může motor nasát drobná tělesa z povrchu dráhy, ovšem i malé části mohou malý motor vážně poškodit. Pokud tomu nebrání zástavba motoru do letounu, dá se nasátí cizího předmětu u kategorie malých motorů zabránit přidáním drátové sítě před vstup do motoru.

S ohledem na skutečnost, že nasátí cizího předmětu je náhodná událost a nedá se žádným způsobem predikovat, diagnostika může odhalit pouze důsledek této poruchy analýzou změny efektivity motoru.

**Četnost selhání:** střední

## **7.2 SELHÁNÍ TECHNOLOGICKÁ**

Tyto závady vznikají poruchou některého z prvků pohonné jednotky. Mohou to být vadné díly již z výroby a nebo vady způsobené cyklickým únavovým zatížením, opotřebením, korozi a oxidací. Při vyhodnocení diagnostikovaných dat výkonu motoru je, alespoň částečně, možné predikovat jejich stav a na základě změny parametrů naplánovat prohlídku.

### **7.2.1 NEZDAŘILÝ START**

U modelářských proudových motorů je častým problémem nepovedený start. Komplikace nastávají zejména při přechodu z paliva LPG na kerosin. Nejběžnější příčinou je špatná nebo

zpožděná reakce elektronické řídicí jednotky na vstupní signály pro řízení dodávky paliva nebo závada na škrtícím palivovém ventilu. Dalším důvodem bývá porucha palivového čerpadla, selhání některého ze senzorů měřených parametrů nebo zadření ložisek.

Zdokonalením elektronické řídicí jednotky a přidáním diagnostického systému je možné odhalit poruchu ještě na zemi a nepokoušet se tak o opětovné startování motoru, což může vést k většímu poškození nebo následnému selhání za letu [26].

**Četnost selhání:** vysoká

### 7.2.2 ULOMENÍ LOPATKY KOMPRESORU

Právě nasátí cizího předmětu může způsobit ulomení lopatky kompresoru a způsobit další škody v motoru. Další příčinou může být vysokocyklová či nízkocyklová námaha kompresorového kola nebo skrytá vada materiálu [23].

Tato porucha je velmi těžko detekovatelná a sledovat můžeme jen otáčky rotoru, aby nedošlo k překročení limitů. Popřípadě je vhodné měřit tlak vzduchu na výstupu z kompresoru, změnou geometrie se totiž změní účinnost kompresoru a tedy i poměr stlačení.



*Obr. 17 Ulomená lopatka kompresoru [27]*

**Četnost selhání:** nízká

### 7.2.3 ZHASNUTÍ PLAMENE VE SPALOVACÍ TURBÍNĚ ZA LETU

Pokud zhasne plamen ve spalovací komoře, nedochází k zažehnutí paliva a motor tak přestává plnit svou funkci. Ke zhasnutí může dojít v případě poruchy palivového čerpadla, nesprávnou dávkou paliva, kdy je do spalovací komory dodávána chudá směs. Dalším případem, kdy může dojít ke zhasnutí plamene v plamenci je, když běží motor na nízké otáčky a přitom do motoru vstupuje velké množství vzduchu vysokou rychlostí, což se stává zejména při střemhlavém letu při malé příпустi paliva [26].

Zde by bylo možné selhání předejít měřením průtoku paliva.

**Četnost selhání:** vysoká

#### 7.2.4 PORUCHA PALIVOVÉ SOUSTAVY

Pokud nastane zástava palivového čerpadla, dojde k přerušení dodávky paliva a motor tak neběží. Jde tudíž o zásadní problém, který ovlivňuje správný chod motoru. Může dojít také k nefunkčnosti uzavíracího ventilu nebo k ucpání palivového filtru. Diagnostický systém je schopen na základě měření průtoku paliva odhalit selhání palivové soustavy.

**Četnost selhání:** vysoká

#### 7.2.5 ULOMENÍ LOPATKY TURBÍNY

Na lopatky rotoru turbíny působí statické napětí, způsobené tahem od odstředivé síly, ohybem a krutem od odstředivé síly a od plynových sil [28].

Dále je turbína dynamicky namáhána kmitáním a tepelným pnutím vznikajícího nerovnoměrným teplotním polem v lopatce [22].

K zatížení od aerodynamických sil se mohou přidat také aeroelastické jevy, jako například třepetání (flutter) [28].

V důsledku těchto zatížení a vystavení vysokým teplotám ze spalovací komory se lopatky pomalu poškozují. Vznikají mikrotrhlínky, které se postupně zvětšují až může dojít ke ztrátě pevnosti. Může tak dojít ke ztrátě účinnosti turbíny nebo k úplné ztrátě funkčnosti. Chybějící lopatky navíc způsobí rozvážení motoru s následnými vibracemi [24].

Mezi hlavní parametry turbíny, které je třeba kontrolovat, patří vibrace rotoru a teplota plynů vstupujících na turbínu, jež by neměla přesáhnout kritickou hodnotu.



*Obr. 18 Ulomení lopatky turbíny [26]*

**Četnost selhání:** nízká

#### 7.2.6 POŽÁR

Turbína jako tepelný stroj pracuje za velmi vysokých teplot, proto je zde riziko vzniku požáru. Přesto, že spalovací turbína je z žáruvzdorného materiálu inconel, při překročení maximální kritické teploty nadměrným přívodem paliva může dojít k ovlivnění vysokou teplotou ostatních částí motoru a ke vznícení. Častým důvodem vzniku požáru jsou také netěsnosti u přívodů paliva, kdy se unikající palivo může vznítit mimo prostor spalovací

komory a způsobit tak značné škody ostatních komponentů.

Požáru je možno předcházet pečlivou kontrolou palivové soustavy a snímáním teploty výstupních plynů.



*Obr. 19 Spalovací komora po poškození požárem [26]*

**Četnost selhání:** nízká

### **7.2.7 VÝŠLECH PLAMENE Z VÝSTUPNÍ TRYSKY**

Příčiny tohoto selhání jsou obdobné jako u vzniku požáru. Výšlech plamene z výstupní trysky obvykle předchází požáru, ovšem zastavením přívodu paliva lze kritickému stavu předejít.

Malé proudové motory nemají požární soustavu, jako je tomu u motorů komerčních letadel, z toho důvodu je důležité monitorovat a diagnostikovat především správný průtok paliva a teplotu výstupních plynů EGT.



Obr. 20 Zachycení šlehání plamenů z výstupní trysky u modelu JetCat P80-SE [26]

**Četnost selhání:** vysoká

### 7.2.8 ŠPATNÁ ODEZVA MOTORU NA PŘIDÁNÍ PŘÍPUSTI

Pokud je třeba zvýšit nebo naopak snížit výkon, ovládá se přírust paliva. Řídící jednotka na základě měřených parametrů reguluje dodávku paliva, pokud je dodávka nedostatečná motor nemůže dosáhnout požadovaného tahu.

Příčina této poruchy je většinou v chybném nastavení nebo v poruše elektronické řídicí jednotky. Její špatná činnost ovlivňuje v základu celé ovládání motoru a její porucha je tudíž pro motor kritická. Dalším možným důvodem je selhání snímače otáček nebo teploty výstupních plynů. ECU tak ztrácí potřebné informace pro řízení chodu motoru a reaguje nepředvídatelně. [26]

Využitím navrhovaného diagnostického systému je možno eliminovat selhání snímačů, na základě lepšího odhadu okamžitého stavu motoru lze docílit také přesnějšího řízení dodávky paliva.

**Četnost selhání:** vysoká

### 7.2.9 ZADŘENÍ LOŽISKA

Ložiska jsou silně namáhána vlivem vysokých otáček až 125 000 ot/min [2] a vibracemi. Vibrace vznikají v důsledku špatného vyvážení celé rotorové soustavy. Může jít o rozvážení kompresorového kola, nebo turbíny, buďto ulomením části nebo celé lopatky a nebo postupným nerovnoměrným opotřebením těchto komponentů. Ložiska mají poměrně malou životnost a jsou tak nejčastěji vyměňovanou součástí malých proudových motorů [26]. Nízká životnost je způsobena především již zmíněným velkým namáháním a nedostatečným

mazáním. Doporučená pravidelná údržba a výměna ložisek je předepsána po 25 letových hodinách, přičemž počet startů se nebere v úvahu. K poškození nebo zadření ložiska ovšem může dojít i dříve.

Zkušební uživatelé modelářských motorů poznají čas na výměnu ložiska dle specifického drnčivého zvuku při startu turbíny. Nicméně toto zjišťování je velmi subjektivní a v mnoha případech, při využití malých motorů pro náročnější aplikace jako pohon ultralehkých letadel nebo kluzáků, zcela nevhodný.

Pro vhodné diagnostikování této závady je třeba průběžně snímat a vyhodnocovat vibrace rotorové soustavy.

**Četnost selhání:** vysoká

### 7.3 FMEA ANALÝZA

FMEA (Failure Mode and Effect Analysis) v překladu analýza poruchových stavů a důsledků je systematická metoda pro uvážení možných problémů při návrhu, výrobě a provozu daného výrobku. Původně byla vyvinuta v NASA pro zvýšení spolehlivosti součástí pro vesmírný průmysl. Metoda identifikuje možné poruchové stavy, vztahy mezi příčinami a důsledky poruch jednotlivých funkčních částí a uvádí předpovídanou nebo naměřenou intenzitu poruch [30].

Dle intenzity poruch lze snadno identifikovat prvky, které jsou často postiženy poruchou a je třeba jejich stav diagnostikovat.

#### 7.3.1 ODHADOVANÁ PRAVDĚPODOBNOST VÝSKYTU PORUCHY

Přesto, že z uvedených zdrojů [26] byl získán poměrně velký soubor použitelných informací, lze u uvedených poruch pouze konstatovat, jak často se vyskytují. Nicméně pro určení intenzity poruchy je zapotřebí vědět nejen četnost poruchy, ale také dobu provozu do výskytu poruchy. Informace o době provozu jsou dohledatelné pouze zřídka a proto by jejich použití vedlo k nepřesným výsledkům.

Pro účely zjištění intenzity poruchy byla analyzována databáze RIAC (Reliability Information Analysis Center) a SPIDR (System and Part Integrated Data Resource). Uvedená data jsou záznamem intenzity poruch vojenských letadel amerických vzdušných sil. Vzhledem ke skutečnosti, že se intenzity poruch u různých typů letadel a aplikací liší, byly pro statistiku vybrány spíše vyšší hodnoty intenzity poruchy, aby bylo výsledné stanovisko více konzervativní.

Je však třeba zdůraznit, že intenzity poruch uvedené v tabulce nemusí platit pro modelářský motor JetCat P80-SE. Konkrétní intenzity poruch je nutno spočítat na základě dlouhodobého zaznamenávání selhání jednotlivých prvků motoru na dostatečně velké vzorku dat. Intenzita poruchy  $\lambda$  představuje počet poruch na jednu hodinu letu a všechny uvedé čísla jsou krát  $10^{-6}$

Hodnoty v tabulce slouží spíše pro základní přehled. Na

Obr. 21 lze vidět jednotlivé prvky motoru, které jsou očíslovány pro popis v Tabulka 5.





Obr. 21 Očíslování prvků pro popis v tabulce FMEA [vlastní zpracování]

Tabulka 5 FMEA [vlastní zpracování]

Označení prvku	Název prvku	Popis funkce	Způsob poruchy	Příčina poruchy	Důsledek poruchy	hodnocení	popis	Intenzita poruchy $\lambda \cdot 10^{-6}$
					fáze letu			
1	Rotor kompresoru	Stlačování vzduchu na vstupu do motoru	Pumpáž kompresoru	Odtržení proudu na lopatkách/vlhkost a hustota vzduchu	všechny	major	nestabilní práce kompresoru, snížení účinnosti, vibrace, poškození dalších částí	neznámá
			Poškození lopatek kompresoru	Nasátí cizího předmětu		major		2314,82
			Poškození lopatek kompresoru	Vysokocyklová námaha		major		111,223
2	spalovací komora	spalování směsi stlačeného vzduchu a paliva/uvolnění energie paliva	praskliny	vysoká dodávka paliva	všechny	major	překročení maximální teploty, požár	104,623
			vyhasnutí plamene	nízká dodávka paliva		major	zastavení motoru	2741,573
3	hřídel rotoru	spojení turbíny a kompresoru/pohon kompresoru	trhlina/ulomení	krutové namáhání/teplotní pnutí	všechny	major	roztržení jádra motoru	6,217
4	ložisko	uložení rotorové soustavy	zadření/mech porucha	Vysokocyklová námaha/nízká životnost	všechny	major	zpomalení rotačního pohybu soustavy až zastavení	neznámá



Označení prvku	Název prvku	Popis funkce	Způsob poruchy	Příčina poruchy	Důsledek poruchy			Intenzita poruchy $\lambda \cdot 10^{-6}$
					fáze letu	hodnocení	popis	
5	Rotor turbíny	Využití energie plynů a pohon kompresoru	Poškození lopatek turbíny	Nasátí cizího předmětu	všechny	major	nestabilní práce motoru, snížení účinnosti, vibrace	1415,6285
				Vysokocyklová námaha		major		142,899
				Nízkocyklová námaha		major		
6	výstupní tryska	efektivní nasměrování proudu plynů pro využití kinematické energie pro pohon	praskliny/deformace	překročení max teploty/ mechanické poškození	všechny	minor	snížení účinnosti motru	17,944
7	svíčka/zapalovač	zapálení směsi stlačeného vzduchu a paliva	elektrické/mechanické selhání	vysoké napětí/ nízká životnost	všechny	minor	zhasnutí plamene	283,126
8	uzavírací ventil	uzavření přívodu paliva do motoru	zadření/netěsnost	mechanická závada	všechny	major	špatná dodávka paliva/požár	5436,72
9	palivové čerpadlo	dodává palivo do motoru	elektromotor čerpadla neplní funkci	elektrické/mechanické selhání motoru čerpadla	všechny	major	špatná dodávka paliva	5455,206
10	ECU	řídí dodávku paliva do motoru	nepřesné příkazy pro dodávku paliva	resetování dat za letu	všechny	major	snížená kontrola řízení motoru/ ztráta kontroly	116,918
				selhání snímače otáček		major		6,539
				selhání snímače teploty výstupních plynů		major		8,972
			elektrická porucha	vyhoření elektrického obvodu		major		17,944

## 8 DIAGNOSTICKY VÝZNAMNÉ PARAMETRY A MOŽNOSTI JEJICH SNÍMÁNÍ

Pro účely řízení motoru se snímají pouze dvě veličiny, těmi jsou již zmiňované otáčky rotorové soustavy a teplota výstupních plynů. Pro diagnostickou soustavu by bylo vhodné použít také snímání teploty a tlaku vzduchu výstupu z kompresoru. Dále by byla vypovídající hodnota hmotnostního průtoku paliva a veličina měřených vibrací.

Dle vypočítaných termodynamických veličin, rozsahu otáček a tahu motoru byly zvoleny patřičné měřicí zařízení, které budou schopny snímat parametry důležité pro diagnostiku okamžitého stavu provozovaného objektu.

### 8.1 MĚŘENÍ TEPLOTY

Teplota je významný parametr, který velkou měrou ovlivňuje výkon a hlavně životnost komponentů proudového motoru. K měření se využívá několika metod v závislosti jaké rozmezí teplot sledujeme, jakou potřebujeme dosáhnout přesnost a také dle dostupnosti umístění senzoru. Používají se: kovové odporové senzory teploty, termoelektrické články a pyrometry.

Principem kovových odporových snímačů je, jak již název napovídá, teplotní závislost odporu kovu. Základním parametrem odporových snímačů teploty je poměr odporů čidla  $R_{100}$  při teplotě  $100^{\circ}\text{C}$  a  $R_0$  při teplotě  $0^{\circ}\text{C}$ . Tento poměr se označuje písmenem  $W$  podle vztahu:

$$W = \frac{R_{100}}{R_0} \quad (8.1)$$

Základní materiálovou konstantou je teplotní součinitel odporu  $\alpha$  pro jehož střední hodnotu platí vztah:

$$\alpha = \frac{R_{100} - R_0}{100R_0} \quad (8.2)$$

Pro malý rozsah teplot v intervalu od  $0^{\circ}\text{C}$  do  $100^{\circ}\text{C}$  lze používat lineární závislost

$$R_t = R_0(1 + \alpha t) \quad (8.3)$$

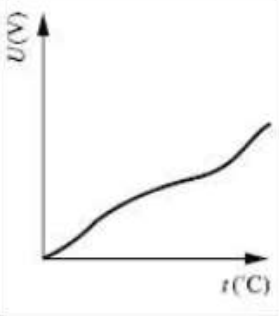
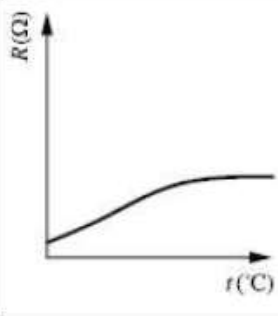
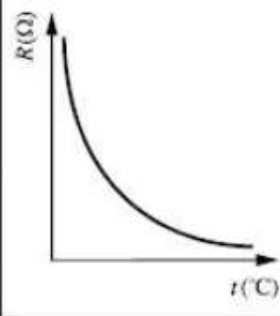
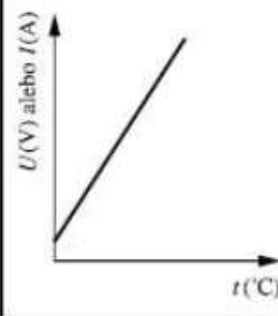
Nejčastěji se pro výrobu tohoto typu snímače používají materiály jako platina, nikl, měď a slitina Ni-Fe [30].

Funkce termoelektrických článků je založena na Seebeckově jevu. Tento jev spočívá v převodu tepelné energie na elektrickou. Termoelektrické články jsou složeny vždy ze dvou vodičů, nebo polovodičů, rozlišuje se několik druhů snímačů dle použitých materiálů, odolnosti proti korozi, chemickým vlivům a ionizačnímu záření.

Posledním možným typem je bezdotykové měření teploty, také označované jako pyrometrie. Měření povrchové teploty těles spočívá na základě detekce elektromagnetického záření vysílaného tělesem [30]. Poskytují nám možnost měřit teplotu rotujících částí a také jsou

schopny zachytit velmi rychlé změny teplot. Využívají se u velkých dvouproudových motorů k měření povrchové teploty lopatek turbíny.

Obr. 22 ukazuje hlavní charakteristiky, výhody a nevýhody použití jednotlivých metod.

Termočlánky	Kovové odporové snímače	Polovodičové odporové snímače (termistory)	Infračervené snímače
<i>Statická charakteristika</i>			
			
<i>Vyhodnocuje se</i>			
• napěťový výstupní signál	• změna odporu snímače	• změna odporu snímače	• napěťový výstupní signál
<i>Výhody</i>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• vlastní napájení</li> <li>• jednoduché</li> <li>• robustní</li> <li>• levné</li> <li>• široká paleta vyhotovení</li> <li>• velký teplotní rozsah</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• stabilní</li> <li>• přesné</li> <li>• lineárnější průběh než u termočlánků</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vysoký výstupní signál</li> <li>• rychlé</li> <li>• dvou vodičové měření odporu</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nejlineárnější</li> <li>• nejvyšší výstupní signál</li> <li>• levné</li> </ul>
<i>Nevýhody</i>			
<ul style="list-style-type: none"> <li>• nelineární</li> <li>• nízké napětí</li> <li>• nejméně citlivé</li> <li>• nejméně stabilní</li> <li>• potřeba referenční teploty</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• drahé</li> <li>• vyžadován zdroj proudu</li> <li>• malý měrný odpor</li> <li>• zahřívají se</li> <li>• malá změna odporu v závislosti na teplotě</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• nelineární</li> <li>• omezený teplotní rozsah</li> <li>• křehké</li> <li>• vyžadován zdroj proudu</li> <li>• zahřívají se</li> </ul>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• vyžadován zdroj napětí</li> <li>• pomalé</li> <li>• zahřívají se</li> <li>• omezená paleta vyhotovení</li> </ul>

Obr. 22 Porovnání vlastností různých druhů snímačů teploty [30]

### 8.1.1 ZVOLENÝ SNÍMAČ TEPLoty

Měřič teploty výstupních plynů je standartně instalován na motoru a jeho výstupy vyhodnocuje řídicí jednotka ECU. Jedná se termočlánek typu K, který je pro toto použití vhodný, jelikož je schopen zaznamenávat vysoké teploty až do 1350 °C, přičemž, teplota na výstupu z trysky je kolem 700 °C na Obr lze vidět snímač teploty na motoru JetCat.



*Obr. 23 Měření teploty výstupních plynů na motoru JetCat P-80-SE [vlastní zpracování]*

Pro měření teploty na výstupu z kompresoru se volí platínový odporový snímač teploty typ Pt100, který je vhodný pro jeho měřicí rozsah, přesnost a jeho lineární průběh od počátku měření.

Po dlouhém zhodnocování vhodnosti použití měření teploty před vstupem na turbínu, bylo rozhodnuto, že dodatečný snímač, nebude mít vysokou přidanou hodnotu pro celý diagnostický systém. Implementace tohoto senzoru by byla komplikovaná, navíc za spalovací komorou je velmi vysoká teplota a možnost oxidace v důsledku spalin. Jednalo by se pak spíše o kontrolní prvek, který není nezbytný. Pokud při možném testování diagnostického systému v praxi bude zapotřebí další měřicí prvek, použití termočlánku typu K se jeví jako dobré řešení.

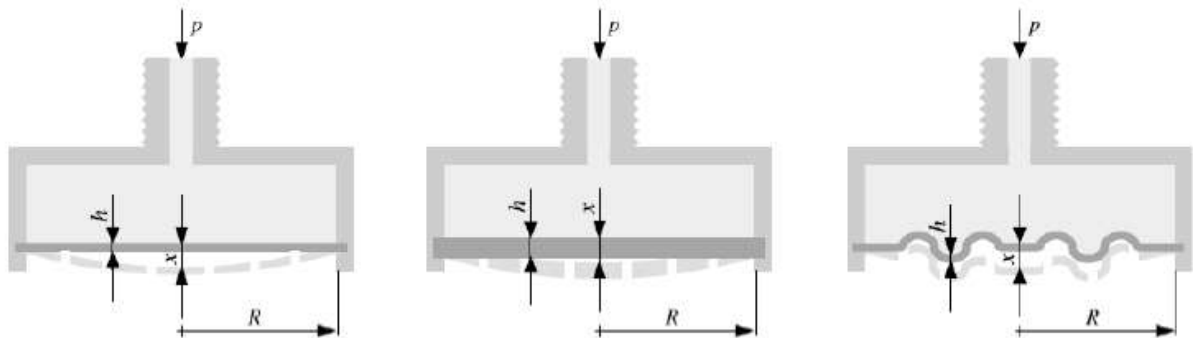
## **8.2 MĚŘENÍ TLAKU**

Pomocí měření tlaku na výstupu z kompresoru a před vstupem na lopatky turbíny můžeme zjistit závislost účinnosti a výkonu motoru na otáčkách, čehož se využívá k nastavení vhodných otáček pro požadovaný režim.

Tlak prostředí je definován poměrem elementu síly  $dF$  působící na element plochy  $dS$  ve směru normály, jelikož je vždy možné vystavit působení tlaku známou plochu, lze tak převést měření tlaku na měření síly. Využívá se tak měření deformace [34]. Snímače tlaku je možné rozdělit na dvě skupiny:

- snímače s deformačním členem
- snímače s elektricky aktivním tělesem

Snímače s deformačním členem měří velikost tlaku nepřímo. Jako deformační prvek se používá nejčastěji tenká či tuhá membrána, vlnovec apod.. Relativní nebo absolutní deformace použitého deformačního prvku se snímá elektrickým snímačem a transformuje se na výstupní napěťový či proudový signál. Patří sem tenzometrické, odporové, kapacitní, indukční snímače. Na obr. lze vidět deformační prvky.



Obr. 24 Deformační prvek zleva: tenká membrána, tuhá membrána a vlnovec [31]

Snímače s elektricky aktivním tělesem obsahují citlivý prvek, který na tlak reaguje změnou svých elektrických vlastností. Pracuje tedy přímo, bez deformačního členu. Do této skupiny snímačů spadají piezoelektrické snímače, kapacitní, odporové a také některé snímače s optickými vlákny. Piezoelektrické snímače mají výhodu v širokém rozsahu měření, dobré citlivosti a vysoké přesnosti. Vyznačují se také dlouhou životností a dostupnou cenou. Nicméně pro účel měření tlaku na motoru se tento typ příliš nehodí, protože je citlivý na vibrace a docházelo by tak k nepřesnostem.

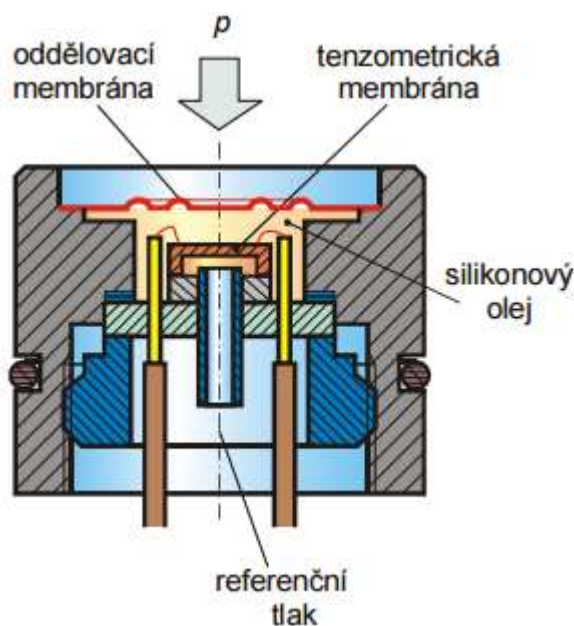
Vhodný senzor tlaku se volí s ohledem na rozsah pracovních tlaků a možnosti instalace, tak aby nebyl ovlivěn vysokou teplotou a vibracemi motoru.

### 8.2.1 ZVOLENÝ SNÍMAČ TLAKU

Pro účely diagnostického systému se jako nejvhodnější způsob snímání tlaku jeví využití tenzometrického manometru s křemíkovou membránou. Tlakový senzor bude použit na měření tlaku na výstupu z kompresoru.

Tenzometry obecně při své činnosti měří relativní deformaci deformačního prvku a ta je převedena na výstupní napěťový signál. Jsou to kovové, či polovodičové prvky, jejichž odpor se díky působící deformaci mění. Upevňují se přímo na deformační člen do míst s největší relativní deformací. Tenzometr musí být připojen k elektrickému zařízení, které zpracuje jejich signál. V dnešní době jsou již dostupné tlakové snímače ve formě integrovaných obvodů. Signál na výstupu, se ale z důvodu nepřesností musí dále kalibrovat pomocí převodníku tlaku [31], na

Obr. 25 je schéma tohoto snímače.



Obr. 25 Schéma tenzometrického manometru s křemíkovou membránou [32]

Předností tohoto typu tenzometrického manometru je vysoká citlivost, reakce na změnu je přibližně 0,2s, malé rozměry (činná plocha je  $2 \text{ mm}^2$  a šířka 0,8 mm) a nízká hmotnost. Vhodným snímačem tlaku je model JOFRA IPI 015G (TECTRA), který pracuje s nejistotou 0,05 % z rozsahu 200 kPa [33].

### 8.3 MĚŘENÍ OTÁČEK

U velkých proudových motorů vypočítává řídicí systém TCC (Thrust Control Computer) mezní hodnotu otáček pro maximální využitelný tah motoru, tak aby nedošlo k poškození motoru. I u malých proudových motorů je naměřená hodnota otáček důležitým vstupem do ECU pro řízení dodávky paliva.

Otáčkoměry je možné rozdělit do dvou skupin na:

-kontaktní- snímací zařízení je spojeno s rotorem měřeného objektu. Tento způsob se pro způsob snímání otáček u proudových motorů nepoužívá, dochází totiž k odporovým ztrátám při překonávání pasivního odporu měřidla [34]. Vzhledem k vysokým otáčkám by také neměl velkou životnost.

- bezkontaktní- jedná se o impulsní senzory úhlové rychlosti, které vycházejí ze vztahu pro určení rychlosti z podílu dráhy  $dx$  vykonané za časový interval  $dt$ . V zásadě jde o detekci polohy značky na rotujícím tělese. Jako detektory se používají senzory [35]:

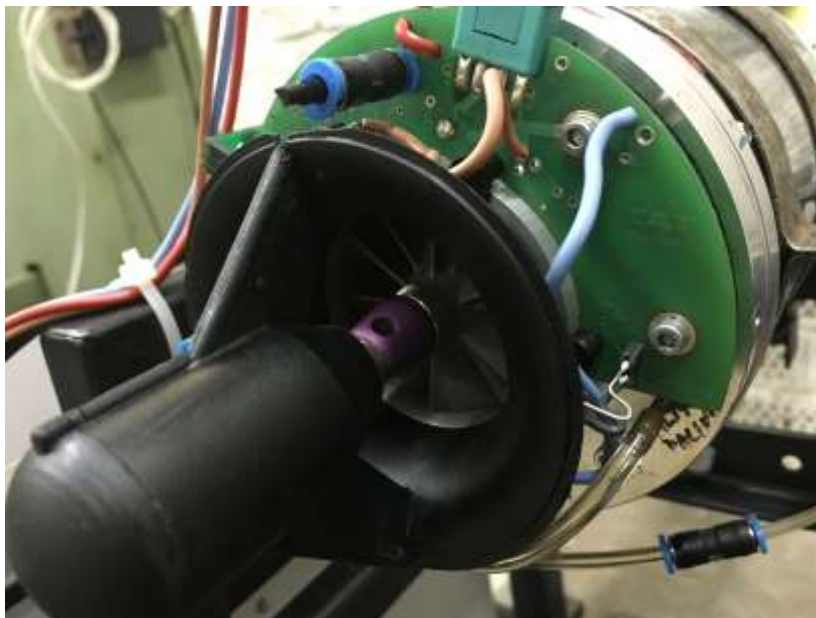
- Elektrokontaktní- ovládané magnetickým polem- Hallovy senzory nebo jazýčková relé
- Indukční (rotuje stálý magnet) nebo indukčnostní (rotuje feromagnetický výstupek)
- Na principu vířivých proudů
- Optoelektronické- detekce průchozího nebo odráženého světla pomocí fototranzistoru

#### 8.3.1 ZVOLENÝ SNÍMAČ OTÁČEK

V případě motoru JetCat P80 je snímač otáček již zabudován do vstupního ústrojí motoru a měřený signál slouží jako vstup do elektronické řídicí jednotky. Otáčky turbíny i otáčky



kompresoru jsou totožné, protože tvoří jednu rotorovou soustavu. Používá se zde optoelektrický snímač pro měření otáček je umístěn před kompresor v aerodynamickém krytu tak, aby neovlivňoval negativně proudění vzduchu, zároveň zde není vystaven vysokým teplotám ani tlakům. Funguje na principu optické závory. Polovodičová dioda vysílá světelný signál otvorem v náboji kompresorového kola. Tento světelný signál dopadá přerušovaně na fototranzistor, který jej převádí na elektrický signál. Tento způsob měření je dostatečně přesný pro účely řízení a diagnostiky motoru. Na Obr. 26 je vidět otvor v náboji kompresorového kola a zapojení diody.



Obr. 26 Měření otáček na motoru JetCat P80-SE [vlastní zpracování]

## 8.4 MĚŘENÍ VIBRACÍ

Měření vibrací je velmi důležité zejména u velkých proudových motorů, u malých motorů nejsou tyto snímače standardně instalovány. Pomocí měření vibrací můžeme včas odhalit poruchu ložisek nebo nevyváženost rotorové soustavy. Pokud by daná chyba nebyla včas rozpoznána může se daný problém stupňovat a vést až k poškození celého motoru.

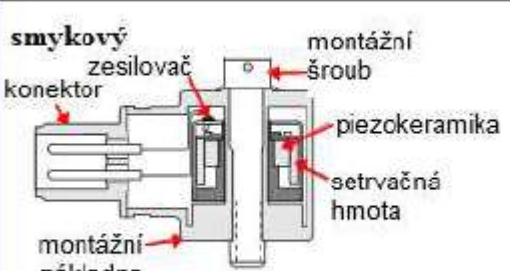
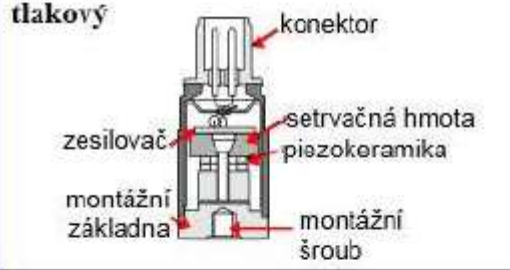
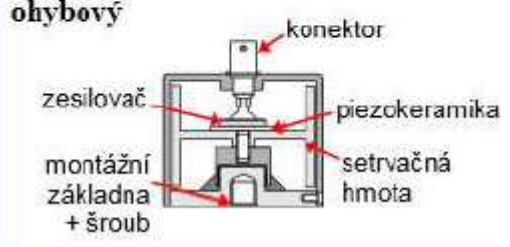
Vibrace jsou definovány jako amplitudově modulované zrychlení. K měření vibrací tudíž využíváme snímač zrychlení jako neelektrické veličiny. Snímače se nazývají akcelerometry a jejich základním úkolem je pak převedení neelektrické veličiny na veličinu elektrickou a následně zpracování a vyhodnocení této informace.

Informaci o zrychlení tělesa můžeme získat také měřením časového průběhu výchylky (pomocí čidla polohy) nebo časového průběhu rychlosti (čidlem rychlosti). Výstupní signál z těchto čidel je třeba derivovat. Pro měření vibrací proudového motoru se tyto dva způsoby nevyužívají z důvodu ovlivnění vnějšími vlivy jako je měnící se teplota a tlak měřeného zařízení.

Dle fyzikálního principu měření lze rozdělit akcelerometry do několika skupin [36].

- a) Odporové- potenciometry, tenzometry- měří se mechanická deformace oboustranně vetknutého nosníku, zatíženého setrvačnou hmotou, na který působí zrychlení

- b) Indukční- na základě Faradayova zákona se pohybem snímací cívky v radiálním poli z permanentního magnetu indukuje napětí úměrné rychlosti pohybu cívky. Derivací se získá signál úměrný zrychlení měřených vibrací [35].
- c) Magnetoelastické
- d) Kapacitní- Při zrychlení se střední elektroda přiblíží k některé z pevných desek. To způsobí nerovnost kapacit elementárních kondenzátorů. Nerovnost kapacit má za následek nenulové napětí na střední pohyblivé desce. Amplituda výstupního signálu je závislá na velikosti působícího zrychlení, jeho fáze pak díky protifázovému buzení pevných desek vypovídá o směru působící síly [16]. Na tomto principu fungují i mikromechanické akcelerometry MEMS.
- e) Piezoelektrické- mechanická deformace piezokeramiky zrychlením je převedena na elektrický signál, na
- f) Obr. 27 jsou různé typy snímačů s popisem jejich výhod a nevýhod.
- g) Fotoelektrické

Typ akcelerometru	výhody	nevýhody
<p><b>smykový</b></p> 	<p>široký frekvenční rozsah</p> <p>relativně odolný</p> <p>nízký teplotní vliv</p>	<p>menší citlivost</p>
<p><b>tlačový</b></p> 	<p>široký frekvenční rozsah</p> <p>odolný na rázy</p>	<p>náchylný na teplotní vlivy</p> <p>náchylný na deformaci základny</p>
<p><b>ohybový</b></p> 	<p>měří velmi nízké frekvence</p> <p>má velmi vysokou citlivost</p>	<p>křehký, citlivý na rázy</p>

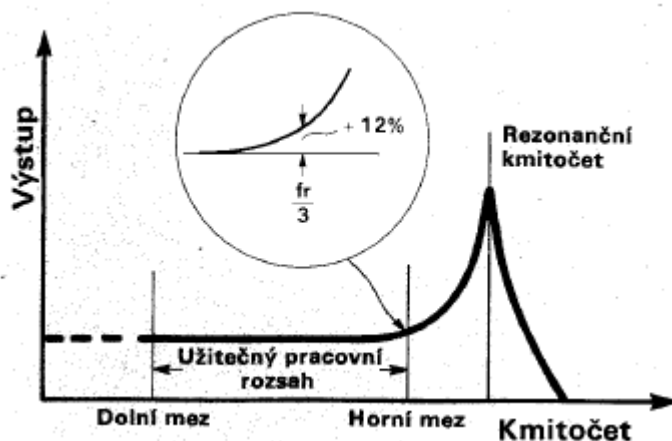
Obr. 27 Typy a vlastnosti piezoelektrických snímačů [37]



### 8.4.1 ZVOLENÝ SNÍMAČ VIBRACÍ

Pro navrhovaný diagnostický systém byl pro měření vibrací zvolen jako nejvhodnějším piezoelektrický snímač smykového typu. Senzor funguje tak, že při deformaci destičky z piezoelektrického materiálu vznikne elektrický náboj, jehož velikost se odvíjí právě od velikosti deformace. Destička (nejčastěji keramická) je umístěna mezi dvěma hmotami, z nichž se jedna nazývá seismická setrvačná hmota a druhá je pevně spojena s pouzdem snímače [39]. Když měřený stroj kmitá, vibruje také hmota, která je pevně spojená s pouzdem snímače, zatímco seismická hmota zůstává v klidu. Tím vznikne deformace piezoelektrického prvku a tak dochází ke vzniku elektrického náboje.

Elektrický signál se dále zpracovává. Výstupy z měření vibrací se vyhodnocují metodou FFT<sup>11</sup>. Aby snímač měřil správně pouze vibrace motoru a výsledky měření nebyly ovlivněny celkovými vibracemi letounu aplikuje se do vyhodnocovacího systému pásmový filtr [39]. Z měření se zjistí jaké hodnoty motor vykazuje za normálního provozu. Při výběru je potřeba se řídit kmitočtovým rozsahem snímače Obr. 28.



Obr. 28 Kmitočtový rozsah snímače [38]

Malý proudový motor totiž dosahuje velmi vysokých otáček až 125 000 ot/min, což představuje otáčkovou frekvenci  $f_{rot} = 2,1$  kHz, aby bylo možné zaznamenat nějakou nevyváženost rotační soustavy musí být kmitočtový rozsah daleko vyšší. Pokud by tuto podmínku nespĺňoval, mohlo by dojít k saturaci dat, kdy jsou výsledky nevyhovující. Nebo by se mohl poškodit samotný senzor vibrací. Tuto podmínku splňuje snímač Endevco 751-10, který má dynamický rozsah  $\pm 500g$  a kmitočtový rozsah 50 kHz.

### 8.5 MĚŘENÍ PRŮTOKU

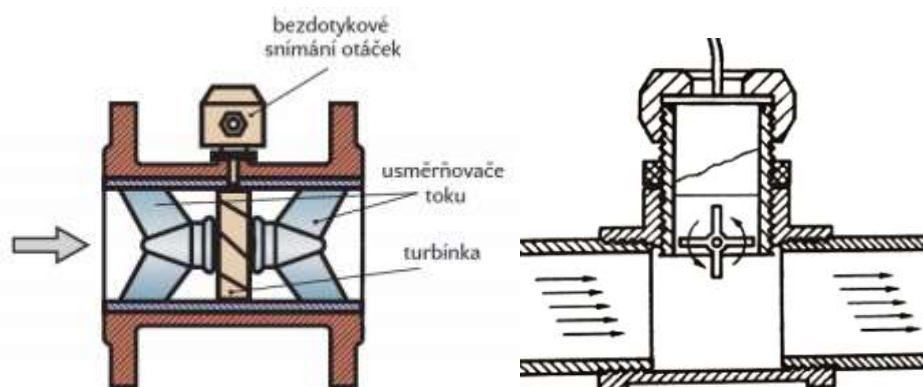
Pro měření přesné aktuální spotřeby paliva je zapotřebí snímat průtok paliva. Rozlišují se 3 základní metody měření průtoku dle, kterých se také používají různé druhy průtokoměrů:

- Objemová metoda- měří se zde objemový průtok tekutiny  $Q_v$ , který vyjadřuje objem tekutiny  $V$ , který proteče daným průřezem průtokového kanálu za jednotku času  $t$ . Používají se průtokoměry:
  - Turbínkové
  - Lopátkové

<sup>11</sup> FFT- Fast Fourier Transformation- Rychlá Fourierova transformace

- Oválné
- S oběžnými koly
- Rychlostní metoda – při použití této metody se měří rychlost proudící tekutiny. Je nezbytné znát průřez potrubí, ve kterém průtok měříme, dle toho se pak vypočítá objemový průtok  $Q_v$ . Typickými zástupci rychlostní metody měření jsou průtokoměry:
  - Průřezové
  - Indukční
  - Ultrazvukové
- Hmotnostní metoda- měří se veličiny přímo úměrné hmotnostnímu průtoku tekutiny  $Q_m$ . Je možné měřit průtokoměry:
  - Coriolisův
  - Hmotnostní termoanemometr [40]

V letectví se nejvíce využívají průtokoměry turbínkové či lopatkové Obr. 29, princip jejich funkce spočívá v roztočení turbíny nebo lopatkového kola silovým účinkem proudící kapaliny. Frekvence otáčení je úměrná okamžitému průtoku, celkový počet otáček souvisí pak s proteklým množstvím tekutiny. [41] Pro vyhodnocení průtoku se snímají otáčky turbíny, nejčastěji indukčními snímači [38].



Obr. 29 Znárodnění objemových průtokoměrů, zleva: turbínkový a lopatkový [38]

### 8.5.1 ZVOLENÝ SNÍMAČ HMOTNOSTNÍHO PRŮTOKU PALIVA

Vzhledem k tomu že průtok paliva je hlavním ovládacím prvem řízení motoru JetCat P80, je vhodné snímat průtokoměrem okamžitou spotřebu paliva. Snímáním tohoto parametru je možno diagnostikovat selhání palivové soustavy.

Pro účely diagnostiky pohonné jednotky JetCat P80-SE je nejvhodnější jednoduchý turbínkový průtokoměr. Jedná se o objemový průtokoměr, při známé hustotě paliva se snadno vypočítá hmotnostní průtok paliva. Je přesný i pro malé průtoky, přičemž relativní chyba je 0,1-2% z měřicího rozsahu. Vyrábí se ve spoustě variantách a je cenově dostupný. Nevýhodou je necitlivost při počátku měření, kdy nemá okamžitou odezvu [41]. Použitý typ průtokoměru je na Obr. 30.



*Obr. 30 Průtokoměr instalovaný na palivové soustavě motoru JetCat P80-SE [vlastní zpracování]*

## 9 NÁVRH DIAGNOSTICKÉHO SYSTÉMU

Pro vlastní návrh diagnostického systému je nejprve potřeba definovat některé používané pojmy a popsat, co obecně považujeme za diagnostický systém a jeho součásti.

### Diagnostický systém proudového motoru

Diagnostický systém proudového motoru je organizovaný systém umožňující realizaci technické diagnostiky proudového motoru. Je tvořen diagnostikovaným objektem, diagnostickým pozadím, diagnostickými prostředky a lidským činitelem [30].

Cílem činnosti diagnostického systému je určení aktuálního technického stavu diagnostikovaného objektu. Na základě této diagnózy je dále možné zhodnotit průběh předchozího technického stavu, popřípadě analyzovat změny, které nastaly a nalézt jejich příčinu (genezi) a predikovat, jakým způsobem se bude vyvíjet technický stav v budoucnu (prognózu), a na základě toho plánovat pravidelné intervaly údržby [9].

### Diagnostikovaný objekt

V našem případě se jedná o malý proudový motor s jednou rotorovou soustavou, u kterého diagnostikujeme jeho okamžitý stav.

### Diagnostické pozadí

Diagnostické pozadí je okolí diagnostikovaného objektu, což představuje teplotu a tlak vzduchu před vstupem do motoru.

### Diagnostické prostředky a zařízení

Tyto prostředky a zařízení jsou tvořeny souborem diagnostických zařízení (příkladem mohou být měřicí přístroje, komunikační infrastruktura, kabely a komunikační protokoly) a diagnostickými metodami (porovnávací modely, softwarové vybavení). Diagnostické prostředky umožňují vyhodnocení technického stavu diagnostikovaného objektu na základě sběru dat, zpracování signálu a sestavení modelu [30].

Rozlišujeme ON-LINE a OFF-LINE diagnostické prostředky. Pod pojmem OFF-LINE se rozumí diagnostikování objektu mimo provoz, což je údržba motoru odmontovaného z letadla.

V práci budou aplikovány ON-LINE prostředky, díky nimž můžeme monitorovat stav motoru za provozu.

### Diagnostická veličina (diagnostický signál)

Diagnostická veličina je nositelem informace o technickém stavu diagnostikovaného objektu. Její hodnota je získána měřením diagnostikovaného objektu v reálném čase a porovnávána s hodnotami vyjadřujícími předpokládaný technický stav objektu. Jsou to jakékoli změřitelné fyzikální veličiny, ze kterých je možno získat potřebnou informaci pro vyhodnocení technického stavu motoru. Tyto naměřené veličiny se převedou na elektrický signál, který se pak dále vyhodnocuje. Skutečnou hodnotu diagnostické veličiny se snažíme získat a ověřit diagnostickým měřením podle předem definované metody. Pro dostatečnou věrohodnost výsledku je nutné provést více měření za přesně definovaných podmínek. Teprve dostatečný počet takových měření nám umožní získat nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny. Obvykle je vyjádřena jako aritmetický průměr naměřených hodnot a definováním možných chyb při měření. Tak získáme **naměřenou hodnotu** diagnostické veličiny [9].

## Doplňková diagnostická veličina

Veličina, která určuje stav diagnostického pozadí, které při měření působí na diagnostický objekt. Bývá získána měřením současně s měřením diagnostické veličiny.

Klasifikujeme různé druhy diagnostického systému, jsou to zejména staniční, palubní a komplexní, který je kombinací systému staničního a palubního.

Pro zjišťování okamžitého stavu motoru se bude využívat palubní diagnostický systém [9].

## Návrh diagnostického systému

Návrh a realizace diagnostického systému je náročný proces, který závisí na složitosti celého systému, počtu měřených veličin, počtu snímačů, přenosu měřeného signálu, způsobu zpracování a vyhodnocení signálu a dalších aspektech systému.

Návrh diagnostického systému probíhá v několika etapách, každé z této etap bude věnována pozornost pro popsání a zdůvodnění vybraných prvků pro diagnostický systém modelářského motoru JetCat P-80.

Při sestavování diagnostického systému je potřeba vzít v úvahu:

- výběr vhodných diagnostických veličin s předpokládaným informačním potenciálem (správný výběr diagnostických veličin je rozhodující pro fungování celého diagnostického systému)
- výběr vhodných měřicích míst pro sledování vybraných veličin, případná úprava objektu pro měření těchto veličin
- výběr vhodných měřicích metod pro provozní podmínky diagnostikovaného objektu
- určení možného vývoje a případných změn diagnostických veličin v závislosti na provozování diagnostického objektu, případně na vlivu stárnutí (degradace) objektu
- experimentální ověření chování diagnostických veličin na reálném objektu nebo na jeho modelu
- určení konkrétních hraničních hodnot všech diagnostických veličin, tzn. zejména jejich mezních a předkritických hodnot
- návrh optimálního diagnostického postupu dle požadavků, tzn. způsob určení technického stavu, detekce a lokalizace možných poruch, možnosti prognózování apod.
- možnosti zajištění vyhodnocovacího systému [9]
- způsob ukládání měřených dat pro diagnostiku a analýzu OFF-LINE
- pořizovací a provozní náklady celého diagnostického systému

Na diagnostický systém jsou kladeny náročné požadavky, aby správně plnil svoji funkci. Správně sestrojený diagnostický systém by měl:

- být co nejvíce automatizovaný a provádět tak veškeré akce od kolekce dat až po diagnostické rozhodování nezávisle na lidském faktoru
- být robustní ve smyslu odolnosti vůči šumu a detekce chyb
- mít co největší pokrytí detekovatelných poruchových stavů
- mít možnosti prognostiky ve smyslu plánování údržby
- umět odvodit informace s vysokou mírou jistoty (užitečným benefitem, používaným u některých velkých proudových motorů je schopnost odvodit stejný závěr o chybovém stavu pomocí dvou na sobě nezávislých diagnostických metod).
- průběžně získávat potřebné informace z co nejmenšího počtu měřidel, které by zároveň měly být co nejjednodušší s ohledem na požadovanou přesnost [10].

- mít co nejmenší vliv na výrobní a provozní náklady pohonné jednotky

## 9.1 NAVRŽENÝ DIAGNOSTICKÝ SYSTÉM

Po diskuzi s doc. Rudolfem Andogou se došlo k názoru, že diagnostický systém by měl být složen ze dvou modulů:

- Modul pro diagnostiku selhání snímačů
- Modul pro diagnostiku vzduchoplynového traktu

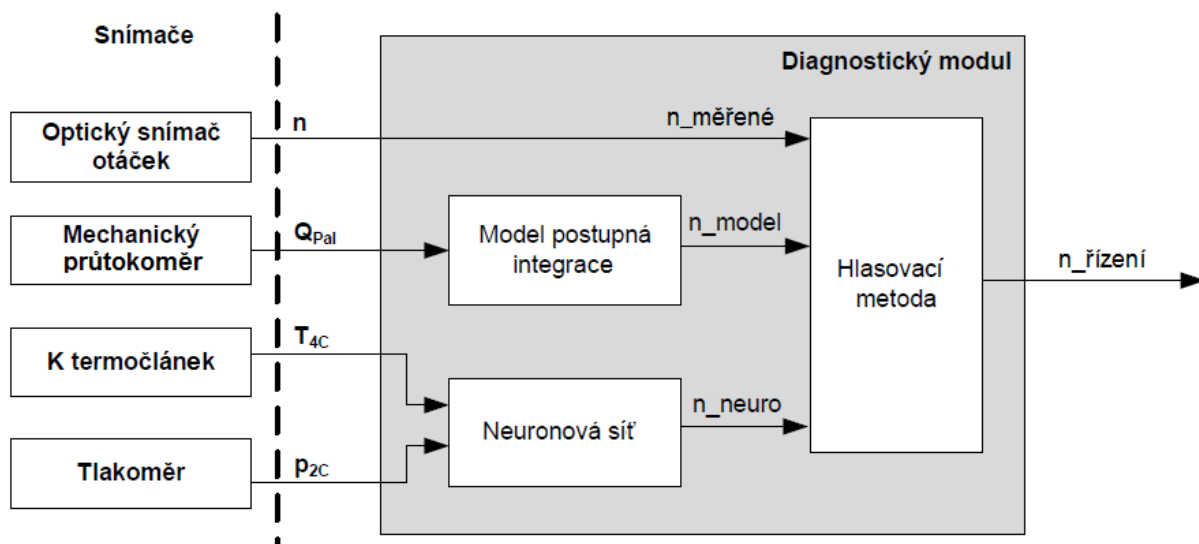
Tyto moduly jsou podrobně popsány níže

### 9.1.1 MODUL PRO DIAGNOSTIKU SELHÁNÍ SMÍMAČŮ

Modul je založen na hlasovací metodě a nepřetržitě sleduje zvolený kritický parametr. V případě výskytu chyby nebo poruchy vstupního sledovaného parametru je jeho chybová hodnota maskována a nahrazena zálohou. V situaci, kdy není možné použít ani syntetickou hodnotu, uvede se do činnosti předvolený stav zodpovědných akčních členů. Ten zabezpečí, aby se předešlo poškození motoru [42]. Ovládání motoru je pomocí hmotnostního průtoku paliva  $Q_{pal}$ , přičemž ten je řízen na základě vstupního parametru-otáček motoru. Z pohledu řízení motoru jsou otáčky nejdůležitějším parametrem. Proto je důležité provést jeho diagnostiku [43]. Primárním vstupem je měření optickým snímačem, další dva představují syntetické hodnoty vytvořené:

- Dynamickým modelem postupnou integrací
- Neuronovou sítí

Struktura diagnostického modulu je na Obr. 31 je zde vidět, že každý vstup hlasovací metody má nezávislou snímací část, to má za následek eliminace jejich vzájemného ovlivnění [42].

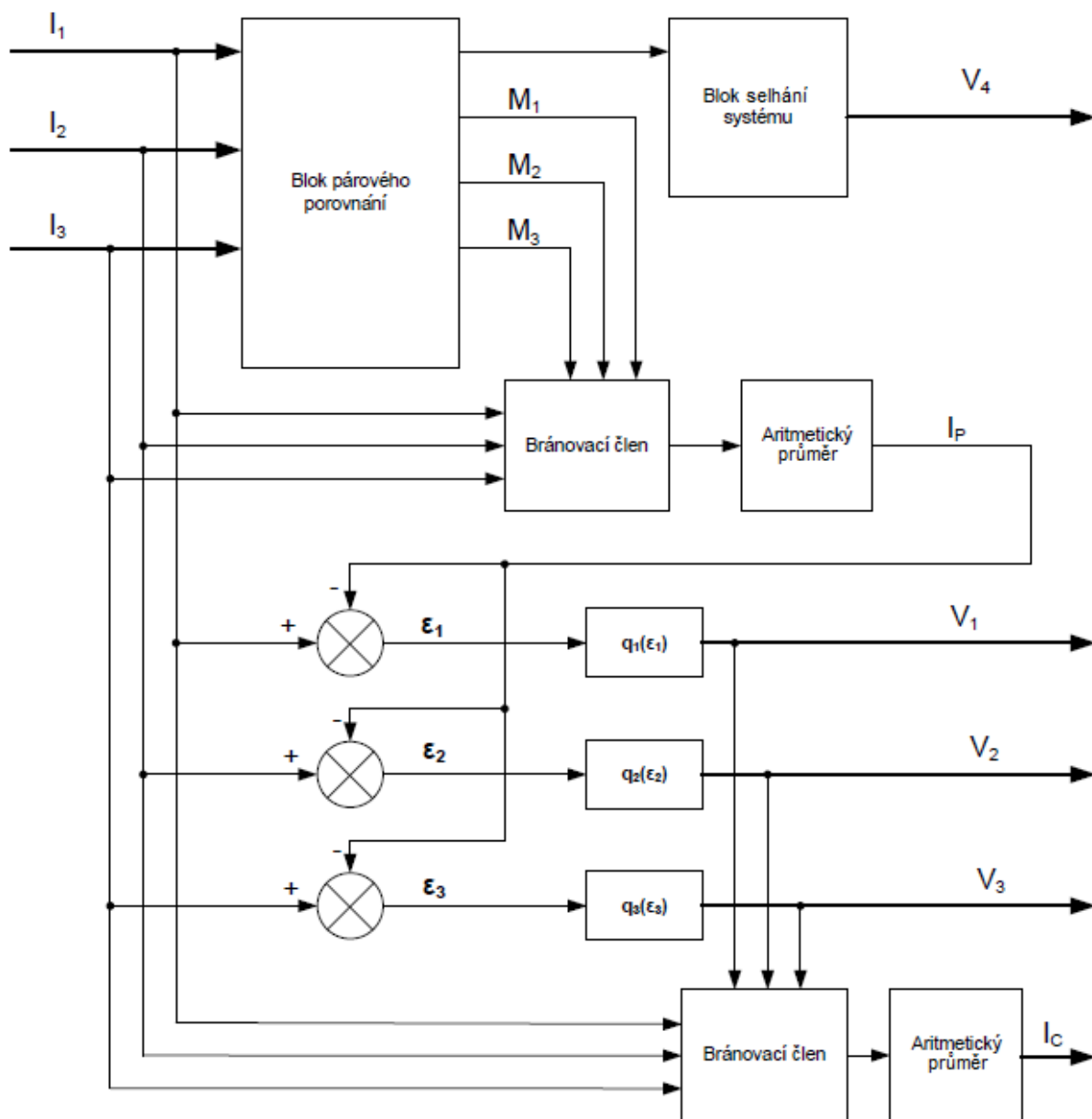


Obr. 31 Struktura diagnostického modulu [45]

Na optickém snímači mohou nastat následující typy chyb:

- Náhodná hodnota - způsobená elektromagnetickým rušením (šumem) prostředí. Průběh se vyznačuje náhodnou hodnotou v jednom měřeném vzorku (Amplituda řádově 105 až 107).

- Výpadek snímače - jehož příčinou může být náhlá ztráta napájení, ztráta komunikačního kanálu, případně přerušení světelného signálu mezi vysilací diodou a fototranzistorem jinak než optickou bránou (nečistoty apod.). Tato chyba se projevuje náhlým poklesem měřené veličiny k nulové hodnotě. Na této hodnotě následně setrvává, pokud se datový kanál neobnoví (řádově desítky sekund) nebo v případě poruchy snímače do doby jeho opravy nebo výměny [44].



Obr. 32 Schéma diagnostiky selhání snímače [42]

Funkci diagnostického modulu majoritní metodou, jejíž schéma je na Obr. 32, je možné popsat následovně:

- Na vstupu do systému se nacházejí tři vstupní veličiny představující otáčky kompresoru motoru ( $I_1$  - měření optickým snímačem,  $I_2$  - model získaný metodou postupné integrace,  $I_3$  - neuronová síť). Tyto procházejí blokem párového srovnání, kde maximální chyby pro 2 srovnávaný pár jsou definovány na základě měření vícenásobného souboru dat. Přípustná hodnota chyby je tvořena součtem dovolené

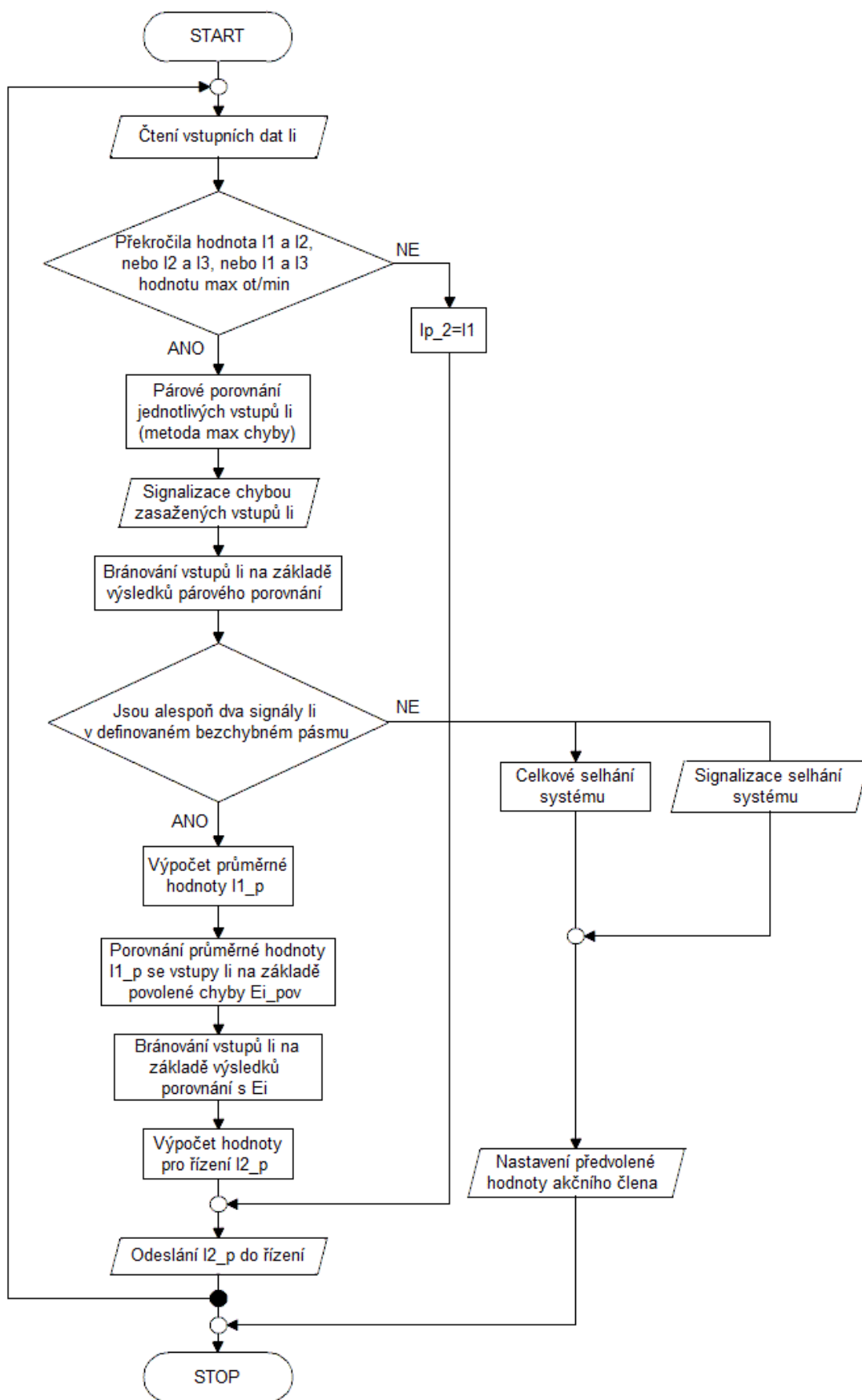
chyby pro daný pár. Pro optický snímač to představuje přesnost, s jakou pracuje v rámci pracovního rozsahu. Pro modely tato hodnota představuje max. hodnotu chyby (MAAE) vůči reálným datům při jejich testování.

- Po párovém srovnání se určí vstupy v definovaných tolerancích a nastaví se hodnoty bránovacích členů  $M_1$ ,  $M_2$  a  $M_3$ . Tyto na základě své hodnoty  $\{0,1\}$  přímo ovlivňují vstupy do průměrné hodnoty  $I_p$ .
- Pokud jsou všechny hodnoty bran nastaveny na hodnotu 0, tak dochází k aktivaci bloku "Celkové selhání" a dochází k nastavení výchozí hodnoty akčního člena a signalizaci celkového selhání.
- $I_p$  následně vstupuje do rozdílových členů, kde se generuje chybové reziduum  $\varepsilon_i$ , které prochází funkcí  $q_i$ . Tato funkce určuje, zda je daný vstup bezporuchový nebo ne. Stav se projevuje uvedením do činnosti signalizace  $V_1$ ,  $V_2$ ,  $V_3$ . Povolené odchylky vůči průměrné hodnotě  $I_p$  jsou pro použité metody určování otáček kompresoru nutny zjistit měřením a testováním [42].

Pro lepší pochopení je znázorněn diagram algoritmu diagnostiky selhání snímače po jednotlivých krocích na Obr. 33.

Uvedenou metodu lze jednoduše aplikovat pro diagnostiku selhání jakéhokoli snímače na motoru. Systém je schopen detekovat, že se nejedná o poruchu některého z komponentů motoru. Při využití syntetických hodnot produkovaných neuronovými sítěmi lze zabezpečit spolehlivý chod motoru i při poruše snímače.





Obr. 33 Diagram algoritmu diagnostiky selhání snímače [vlastní zpracování]

### 9.1.2 MODUL PRO DIAGNOSTIKU VZDUCHOPLYNOVÉHO TRAKTU

Účel diagnostiky výkonu vzduchoplynového traktu je v detekování a identifikaci změn v parametrech jednotlivých komponent zapříčiněných poruchou nebo stárnutím. Diagnostická metoda zaznamenává naměřené parametry a porovnává je s nelineárním matematickým modelem chování motoru. Za účelem formulace diagnostického postupu je motor považován za soustavu proměnných závislých na režimu motoru, který představuje vektor  $u$ . Stav komponentů je prezentován přes hodnoty parametrů, které představuje vektor  $f$ . Systém je zkoumán skrze měřené proměnné (tlaky, otáčky, teploty), ty představují vektor  $y$ . Závislost těchto veličin lze vyjádřit funkčním vztahem [45]:

$$y = F(u, f) \quad (9.1)$$

Tento vztah může být realizován počítačovým modelem schopným počítat hodnoty proměnných konkrétních konstrukčních prvků pro různé režimy letu. Může tak simulovat chování motoru za normálního nebo poruchového stavu.

Diagnostická metoda řeší opačný problém. Určuje hodnotu parametru stavu  $f$ , kdy je pro daný vektor  $u$  k dispozici vektor  $y$ .

Základní podmínkou okamžité diagnostiky vzduchoplynového traktu je přesný nelineární model chování motoru. Je požadováno, aby vypočítané parametry pro daný letový režim měly co nejmenší odchylku od měřených parametrů.

$$y_{\text{vypoč}} - y_{\text{měř}} = 0 \quad (9.2)$$

Schopnost odvodit požadované řešení pouze na základě této informace záleží na tom, jaký je poměr počtu  $M$ - nezávislých snímačů vektoru  $y$  k počtu  $N$ -neznámých parametrů  $f$ .

Když je  $M \geq N$  dostaneme jediné řešení, pokud je však  $M < N$ , existuje nekonečně mnoho řešení, protože máme k dispozici méně rovnic než neznámých. Za účelem odvození konkrétního řešení pro určení stavu motoru je vytvořena optimalizace pomocí minimalizace tzv. účelové funkce (OF-objective function) [45]:

$$OF = C_1 \cdot \sum_{i=1}^M \left[ \frac{y_{i \text{ vypoč}}(f) - y_{i \text{ měř}}}{y_{i \text{ měř}} \cdot \sigma_{y_i}} \right]^2 + C_2 \cdot \sum_{j=1}^M \left| \frac{y_{i \text{ vypoč}}(f) - y_{i \text{ měř}}}{y_{i \text{ měř}} \cdot \sigma_{y_i}} \right| \quad (9.3)$$

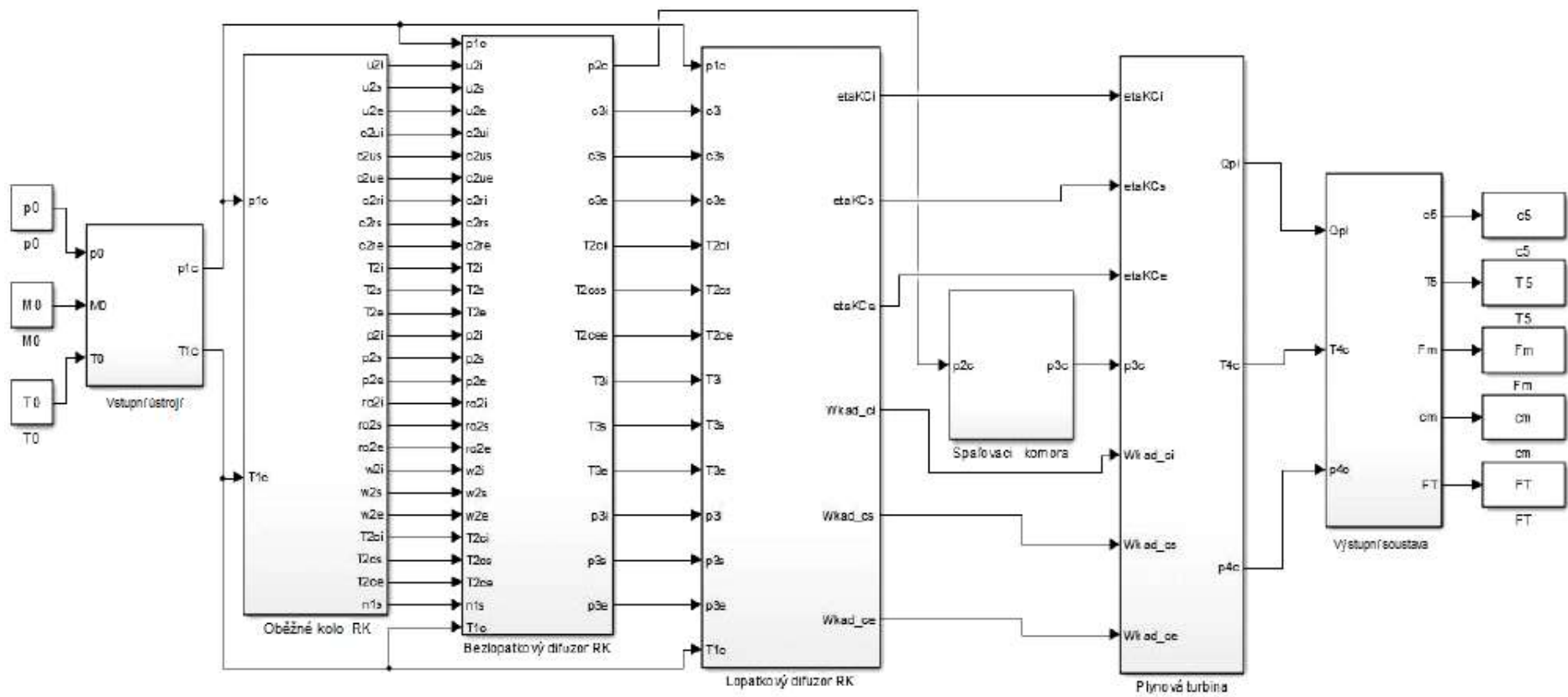
$$+ C_3 \cdot \sum_{j=1}^N \left| \frac{f_j - f_j^r}{f_j^r \cdot \sigma_{f_j}} \right| + C_4 \cdot \sum_{j=1}^N \left[ \frac{f_j - f_j^r}{f_j^r \cdot \sigma_{f_j}} \right]^2$$

První dva součty vyjadřují podmínku kompatibility měření. Druhé dva součty zajišťují, že hodnoty parametrů stavu motoru nebudou příliš odlišné od referenčních hodnot. Rozdíly  $y_{i \text{ vypoč}}(f) - y_{i \text{ měř}}$  a  $f_j - f_j^r$  jsou normalizovány směrodatnými odchylkami  $\sigma_{y_i}$  a  $\sigma_{f_j}$ . Váhové koeficienty  $C$  poskytují možnost měnit relativní důležitost jednotlivých součtů, přičemž v případě diagnostiky motoru JetCat máme k dispozici menší počet snímačů, než je počet parametrů-  $M < N$ , tudíž všechny konstanty  $C$  musí být nenulové. Referenční hodnota  $f_j^r$  představuje nejlepší odhadovanou hodnotu. Toho se dá využít při uvážení postupného opotřebení komponentů, kdy se  $f_j^r$  mění v čase [10].

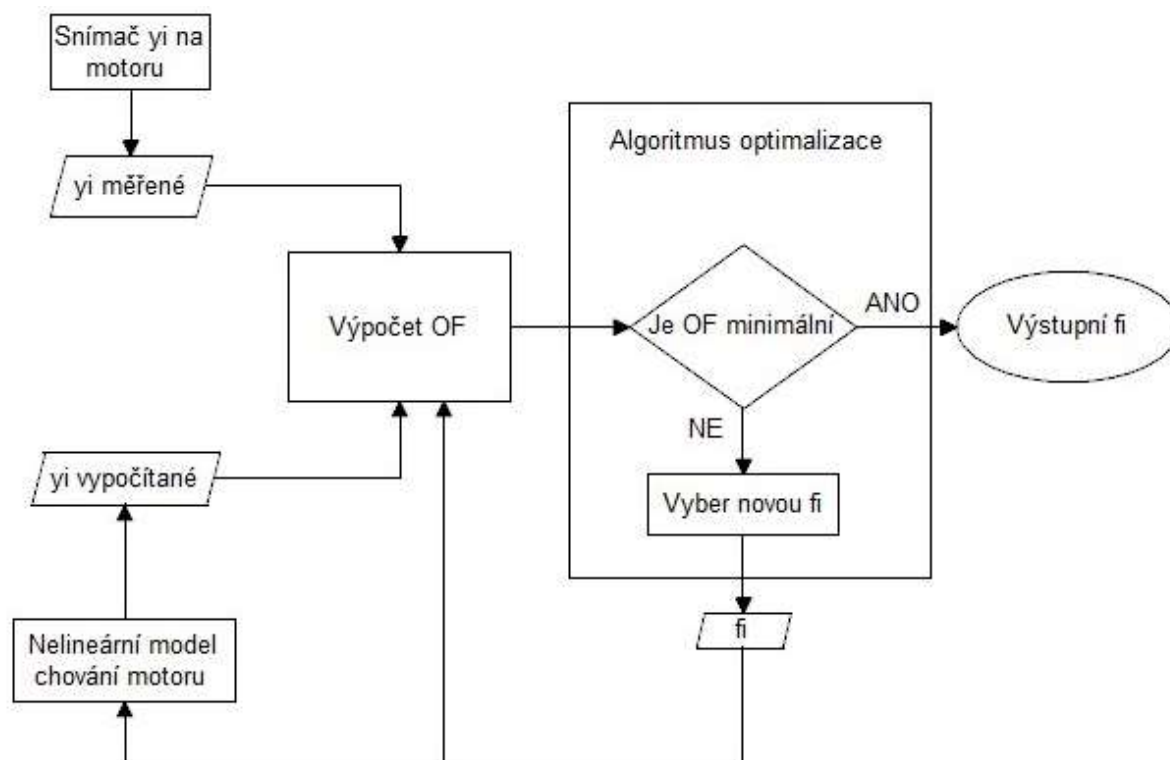
Jakmile máme k dispozici vektor naměřených dat  $y$ , hodnoty odhadovaného stavu motoru jsou počítány pomocí matematického modelu- estimátoru stavu motoru.

Důležitým kritériem je, aby model co nejpřesněji simuloval stav motoru. Příklad takového modelu je na Obr. 34, který byl vytvořen na univerzitě TUKE [46] . Pro optimalizaci a redukci šumu se zde využívá genetický algoritmus založený na minimalizaci účelové funkce OF, schéma algoritmu je na

Obr. 35.



Obr. 34 Matematický model motoru JetCat P80-SE [46]



Obr. 35 Schéma algoritmu optimalizace [vlastní zpracování]

Metodika diagnostiky se zde skládá ze dvou kroků:

- Detekce poruchy komponentu
- Odhad velikosti poruchy

Vzhledem ke skutečnosti, že měření jsou zatížena šumem, odhady založené na jednom souboru dat se mohou lišit od skutečných hodnot parametrů. Mohou být zlepšena, pokud je k dispozici více souborů dat měření. V takovém případě je získáno řešení pro každý datový soubor a také série hodnot každého parametru stavu motoru  $f_j$ . Poté je vypočítána střední hodnota odchylky  $\overline{\Delta f_j}$  a směrodatná odchylka procentuální změny od referenčního  $\Delta f_j$ . Pro izolaci prvků postižených poruchou je navrženo kritérium, které se nazývá diagnostický index (DI). Jedná se o poměr absolutní střední hodnoty  $|\overline{\Delta f_j}|$  ku směrodatné odchylce  $\sigma_{f_j}$  pro každý parametr [45].

$$DI_j = \frac{|\overline{\Delta f_j}|}{\sigma_{f_j}} \quad (9.4)$$

Přičemž platí:

$$\overline{\Delta f_j} = \frac{1}{L} \sum_{j=1}^L \Delta f_j \quad (9.5)$$

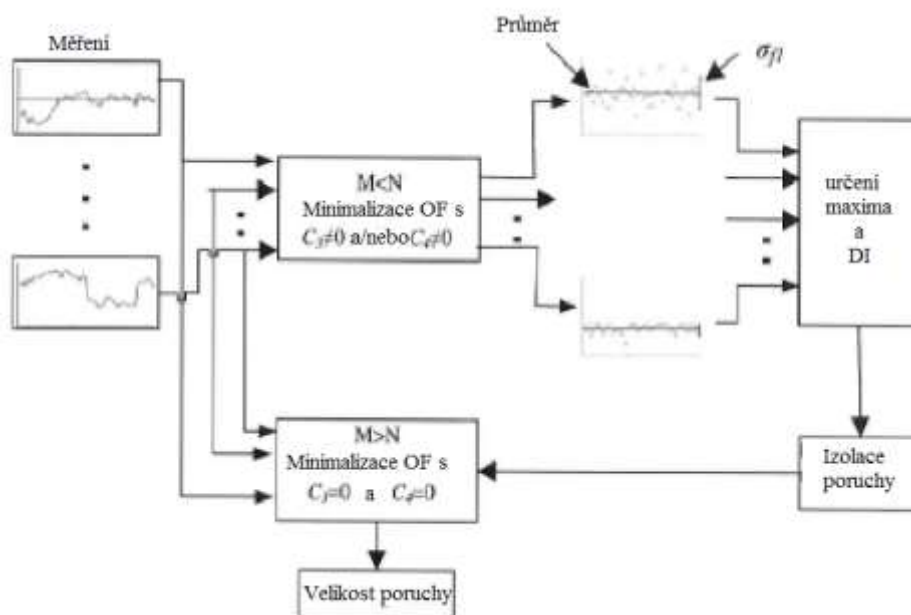
$$\sigma_{f_j} = \sqrt{\frac{1}{L-1} \sum_{j=1}^L [\Delta f_j - \overline{\Delta f_j}]^2} \quad (9.6)$$

Kde  $L$  představuje délku intervalu.

Parametry stavu motoru, které mají malé odchylky od referenčního stavu, nebo parametry s velkými směrodatnými odchylkami, budou mít nízkou hodnotu diagnostického indexu. Naopak parametry stavu motoru s vysokými hodnotami odchylek, nebo s malými směrodatnými odchylkami, budou mít vysoký diagnostický index [10].

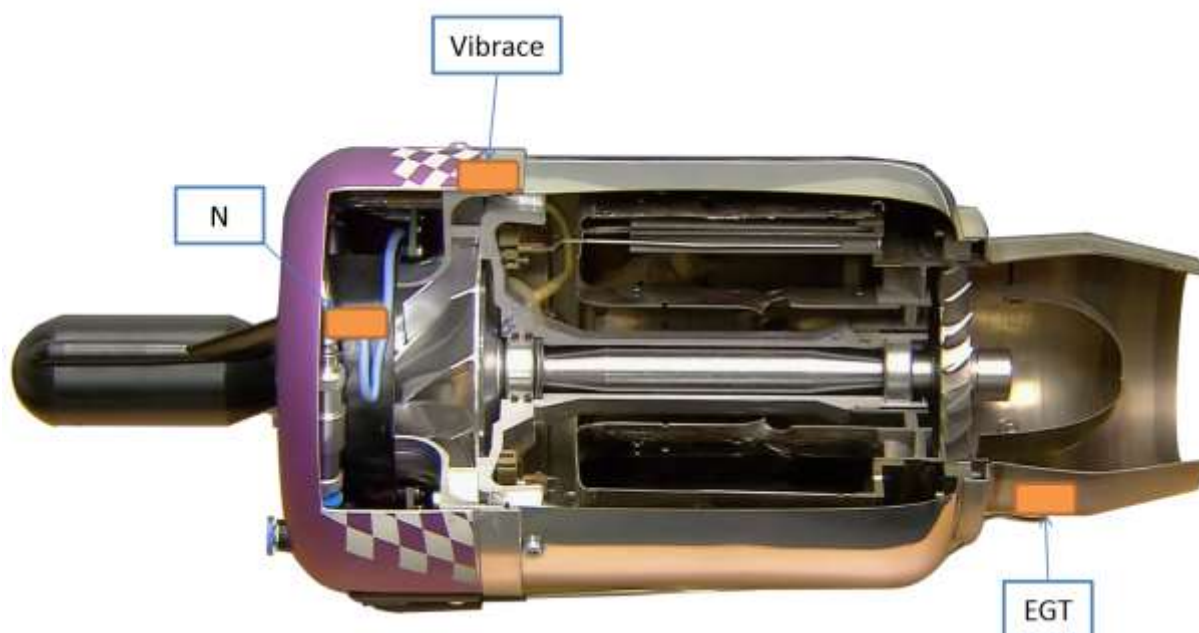
Tímto způsobem dokážeme identifikovat poruchu komponentu, u něhož je nejvyšší hodnota diagnostického indexu.

Poté co je detekována konkrétní porucha komponentu, může být realizován přesnější odhad velikosti poruchy. Optimalizace minimalizací účelové funkce je provedena znovu jen pro případ prvku, u něhož byla detekována chyba. Nyní je však problém jednodušší, v rovnici (8.3) jsou váhové koeficienty  $C_3$  a  $C_4=0$  a minimalizuje se pouze jeden z prvních dvou součtů. Po provedení série odhadů z dostupných souborů naměřených dat je získána průměrná velikost poruchy. Tento proces je vysvětlen pomocí schématu na Obr. 36.

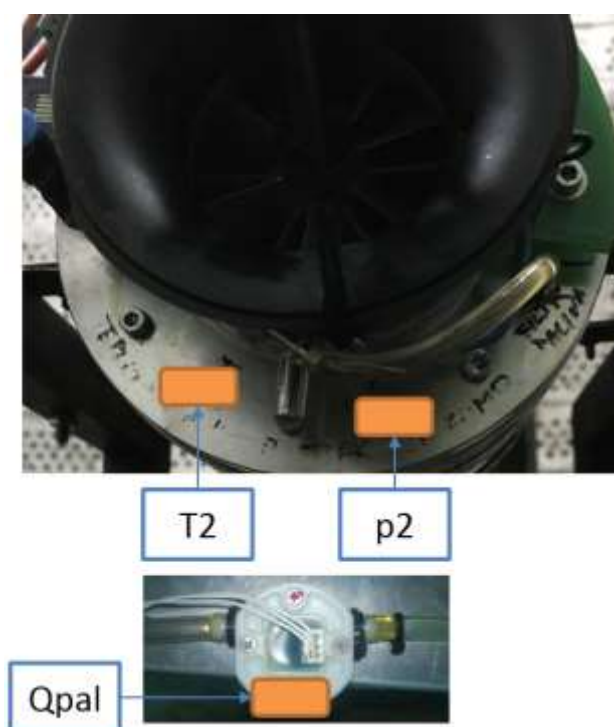


Obr. 36 Proces odhadu velikosti chyby minimalizací OF [vlastní zpracování, 45]

Pro správnou funkci diagnostického systému je potřeba nejen určit potřebné parametry pro vyhodnocení motoru, ale také na motor vhodně umístit zvolené snímače. Navrhované řešení rozmístění senzorů je na Obr. 37 a Obr. 38.



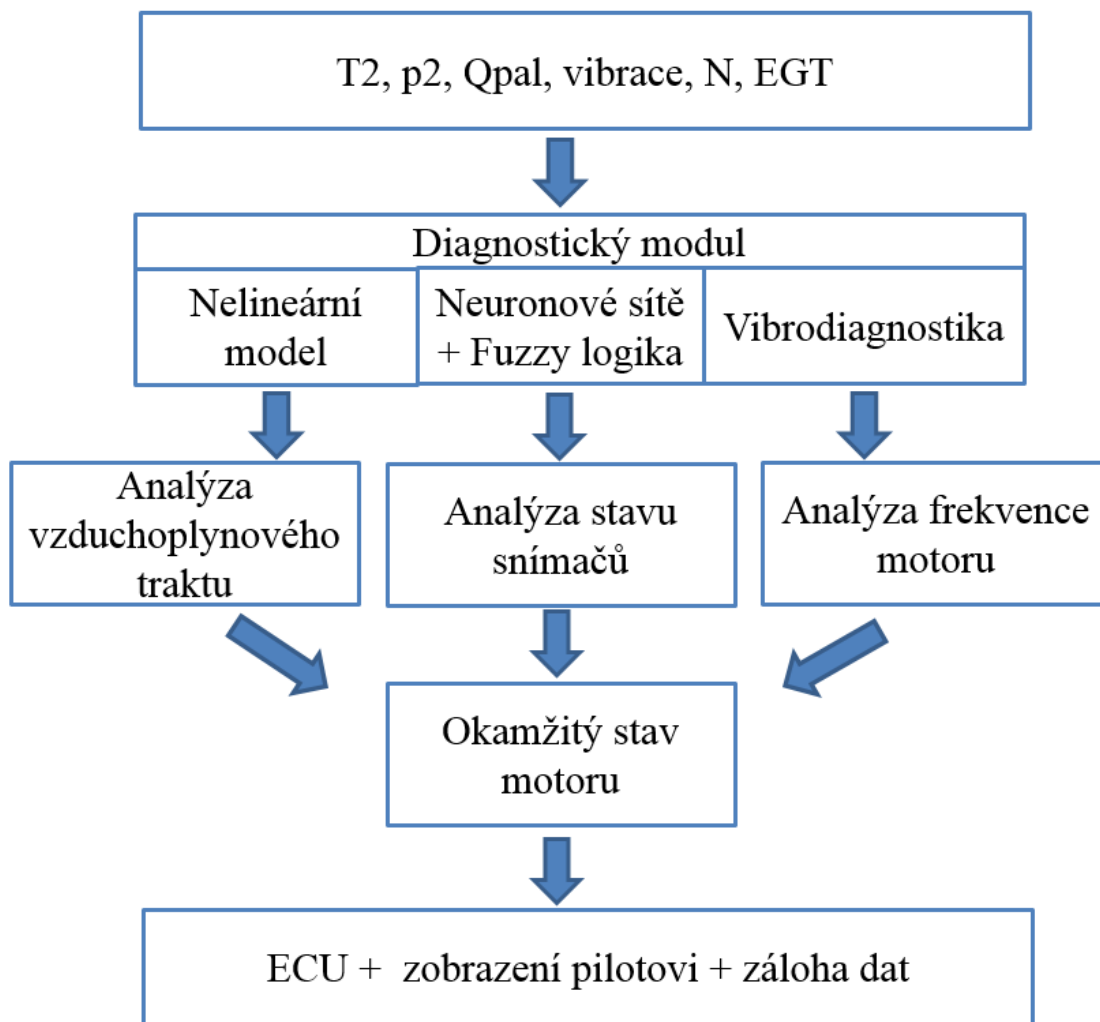
Obr. 37 Rozmístění snímačů-pohled ze strany [vlastní zpracování]



Obr. 38 Rozmístění snímačů- pohled zepředu [vlastní zpracování]

Navrhovaný diagnostický systém je kombinací obou diagnostických modulů, které spolupracují a dokáží se tímto způsobem kontrolovat navzájem. Je schopen diagnostiky okamžitého stavu motoru a detekce poruchy jednotlivých komponentů. Kombinací zvolených dvou metod vzniká hybridní systém, který využívá výhod obou metod a zároveň eliminuje nevýhody, které mají jednotlivé metody jako samostatné. Výhody a nevýhody obou metod jsou diskutovány v kapitole 5. Navrhovaná kombinace uvedených metod by měla zaručit rychlou a dostatečně přesnou detekci a kvalifikaci poruchy, při použití malého počtu senzorů.

K uvedeným diagnostickým metodám je připojen ještě modul vibrodiagnostiky, který vyhodnocuje signál ze snímače vibrací. Celá diagnostická soustava by měla mít zálohu měřených dat, aby bylo možné sledovat trendy chování a stárnutí motoru mimo provoz motoru. Vyhodnocením těchto dat se dá dále zlepšovat navrhovaný diagnostický systém a predikovat možné budoucí poruchy. Schéma systému je na Obr. 39.



Obr. 39 Schéma navrhovaného diagnostického systému [vlastní zpracování]



Výstupy z diagnostického systému budou vstupovat do ECU pro řízení motoru. Výsledky diagnostiky by měly být prezentovány pilotovi v co nejjednodušší formě, u ovládání motoru může být instalováno zařízení, které bude identifikovat stav jednotlivých komponentů pomocí barevných diod. Návrh takové vizualizace je na Obr. 40 . Další zařízení by mělo být určeno pro zaznamenávání měřených dat, takové zařízení musí mít dostatečně velkou paměť.



*Obr. 40 Vizualizace identifikace poruchy [vlastní zpracování]*

Pro realizaci vyhodnocení stavu motoru pomocí navrhované diagnostické soustavy je potřeba vytvořit program systému a ověřit jeho funkci simulací na počítači.

Další kroky jsou v aplikaci zvolených snímačů na motor a měření parametrů motoru. Po implementaci ověřeného diagnostického systému by se mělo vše otestovat a zkalibrovat. Měřením a simulacemi bude možné zrevidovat daný systém a popřípadě vylepšit modifikací vybraných metod nebo přidáním dalších snímačů.

Pro další využití diagnostické soustavy na malých proudových motorech je potřeba zjistit finanční náročnost celého zařízení a jeho přidanou hodnotu v porovnání s pravidelnou údržbou.

## 10 EXKURZE NA TECHNICKÉ UNIVERZITĚ V KOŠICÍCH

Za účelem návrhu diagnostického systému byla zorganizována návštěva Letecké fakulty na Technické univerzitě v Košicích se zástupci firmy Honeywell, kteří pracují na vývoji a programování FADEC systémů pro kategorii středně velkých dvouproudových motorů.

Letecká fakulta, konkrétně pak katedra avioniky zde disponuje zkušebnou malých proudových motorů. Měli jsme možnost seznámit se s měřicími přístroji na motorech, s jejich zapojením i s řídicím programem, pomocí kterého se motory spouští a ovládají.

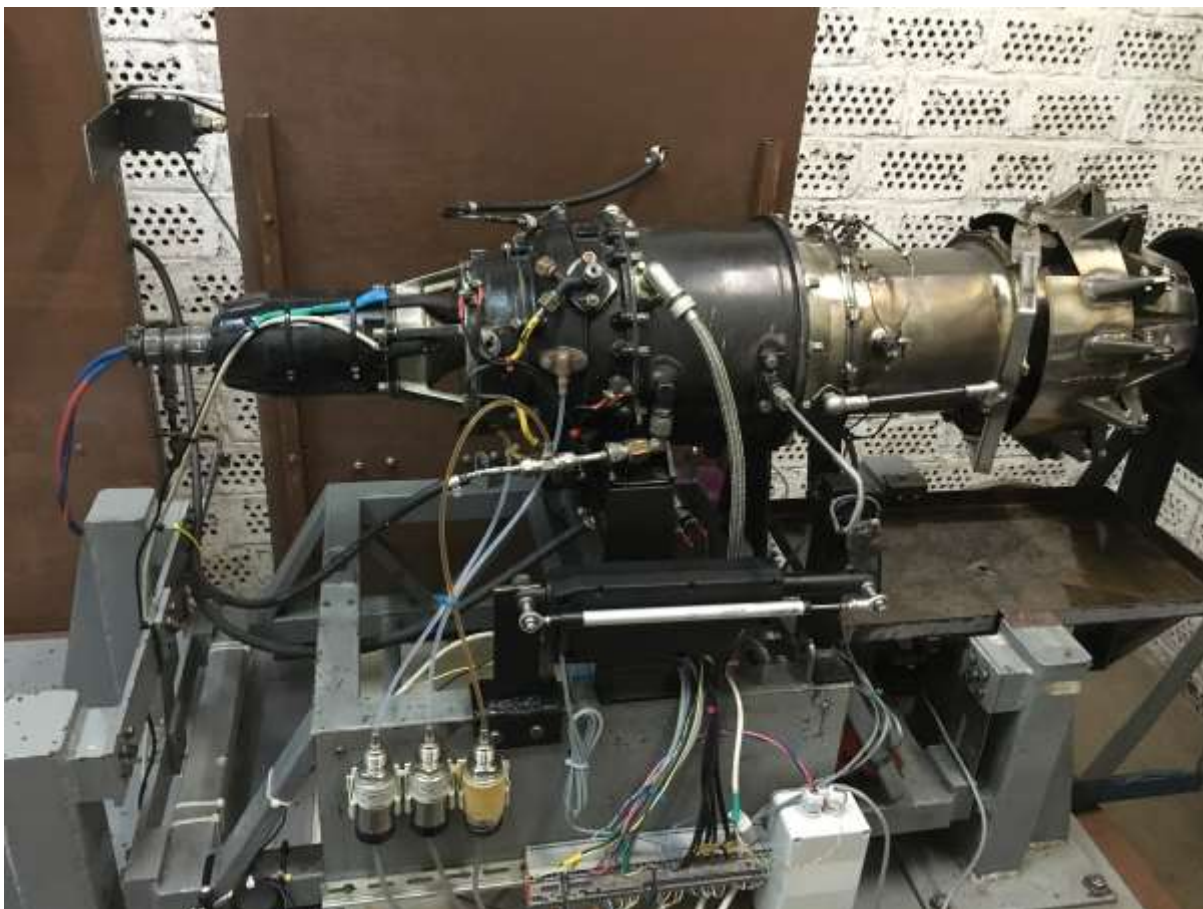
Bylo představeno spouštění a měření tří typů motorů. Jednalo se motor o MPM 20, který původně sloužil jako startovací motor dvouproudého dvouhřídelového turbínového motoru AL-7F a byl upraven pro vědecké účely na Košické univerzitě, na Obr. 42 lze vidět jakým způsobem je upevněn a jaké snímače jsou použity. Dalším měřeným exponátem byl motor TJ 100 z výroby První Brněnské Strojírny. Posledním motorem, který byl testován, je motor JetCat P-80 SE, pro který je navrhován diagnostický systém v této práci. Univerzitou nás provázela doc. Ing. Rudolf Andoga PhD. s kolegou Ing. Ladislavem Föző PhD. Se svými týmy se zde zabývají zejména vývojem řídicího a diagnostického systému pro malé proudové motory. Při návrhu experimentují s aplikací metod založených na prvcích umělé inteligence. Na Obr. 41 lze vidět řídicí program, pomocí kterého je ovládán motor MPM-20.



*Obr. 41 řídicí program motoru MPM-20 [vlastní zpracování]*

Testování malých proudových motorů slouží pro tvorbu přesných analytických a dynamických modelů a pro validaci těchto modelů. Dále se zde zabývají výzkumem použití alternativních druhů paliva.

Ve zkušebně motorů jsme byli seznámeni s postupem startování jednotlivých motorů a také s tím, jaké mohou nastat komplikace a z jakého důvodu se tak děje. Znáмым problémem je přípust' paliva, která není exaktně určena. Elektronická řídicí jednotka ovládá dodávku paliva pouze na základě dosažení určitých otáček a z naměřené teploty výstupních plynů. Vzhledem k tomu, že nevstupuje do řídicí jednotky více parametrů, není dodávka paliva optimální. Pokud se palivo ve spalovací komoře včas nezapálí, začne se hromadit a startování se musí přerušit. Palivo se nestihá dostatečně rychle odpařit. Aby nedošlo k výbuchu vypařovaného paliva při dalším spuštění, musí se motor nejprve naprázdno protočit elektrickým startérem a takzvaně profouknout, tím se spalovací komora vyčistí a spuštění může začít znova.



*Obr. 42 Uložení motoru MPM-20 s nastavitelnou výstupní tryskou [vlastní zpracování]*

U motoru MPM-20, došlo ke spuštění na druhý pokus, zde je častou příčinou vysoká dodávka paliva. Motor MPM-20 disponuje výbojovými svíčkami, pokud je ve spalovací komoře nadměrné množství paliva, kapičky obalí svíčky, vedou proud a nevznikne tak výboj, který by mohl palivo zapálit.

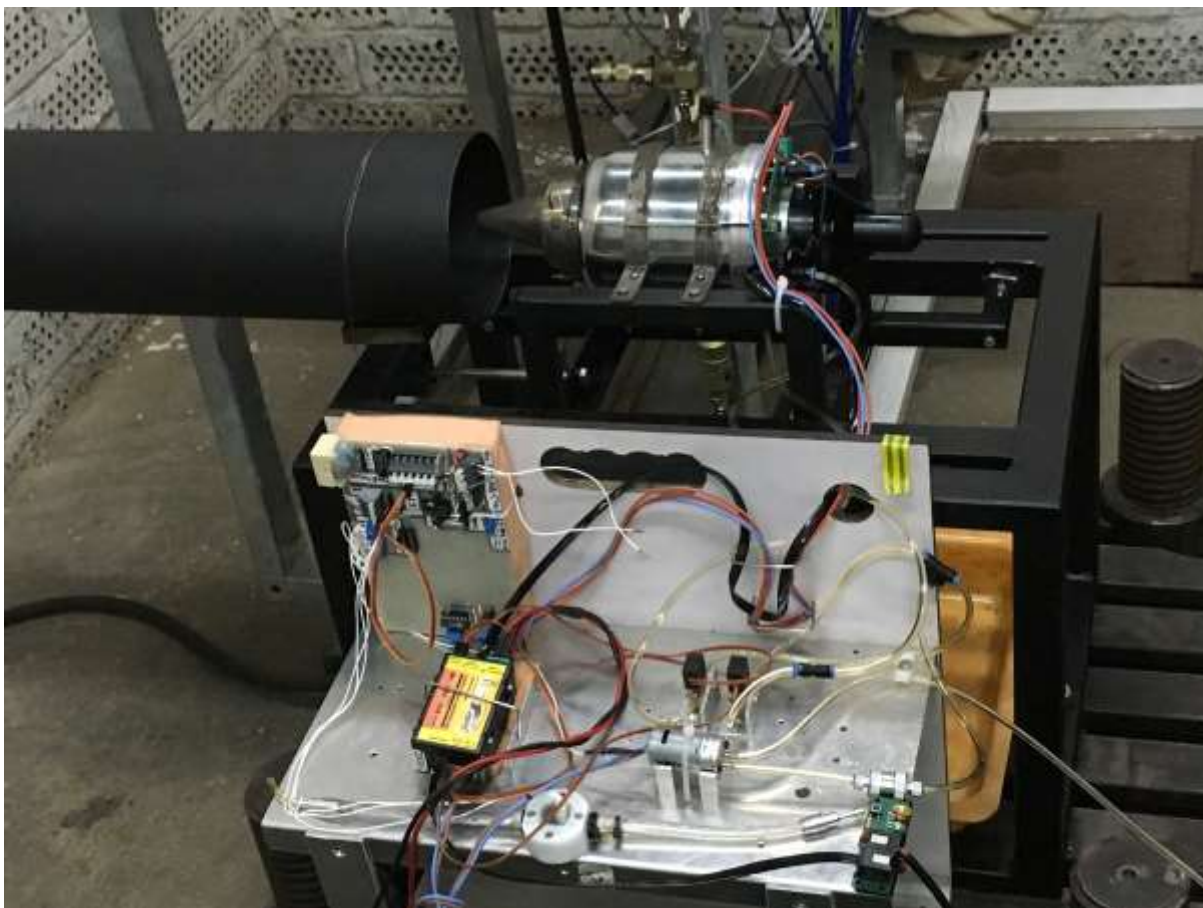
Pohonná jednotka TJ-100 se spustila bez sebemenších problémů a vykazovala hladký a stabilní chod. TJ-100 má již propracovanější řídicí systém a snímá více veličin. Na Obr. 43 je znázorněno zapojení měřících prvků na motoru.





*Obr. 43 měřicí soustava motoru PBS TJ 100 [vlastní zpracování]*

Modelářský motor JetCat P-80 startoval déle než je obvyklé, ale spuštění se povedlo napoprvé. Start doprovázelo šlehání plamenů z výstupní trysky, které je způsobeno taktéž vysokou dodávkou paliva během spouštění. Uložení motoru je na Obr. 44 .



*Obr. 44 Řídící jednotka, palivové čerpadlo a rozvod paliva s uložením motoru JetCat P-80-SE  
[vlastní zpracování]*

S doc. Andogou bylo konzultováno použití vhodných snímačů a vyhodnocovací metody diagnostické soustavy. Byly prodiskutovány výhody a nevýhody konkrétních řešení. Na základě jeho doporučení byl diagnostický systém rozdělen na dva moduly se samostatnými diagnostickými metodami, které se navzájem doplňují.

# 11 ZÁVĚR

Předložená diplomová práce se zabývá možnostmi okamžité diagnostiky proudových motorů. Je orientována zejména na malé pohonné jednotky jednoduché konstrukce. Práce bude sloužit jako podklad pro vývoj diagnostického systému, který je navrhován ve společnosti Honeywell s.r.o.

V úvodu je diskutována metodika vypracování cílů práce. Vytyčené cíle byly naplněny. V práci byly nejprve popsány reprezentativní typy dané kategorie jednoproudových motorů. Tyto motory se používají pro pohon modelářských letadel, bezpilotních prostředků a experimentálních letadel a také jako záložní motor pro kluzáky.

V další části práce byly definovány nejpoužívanější diagnostické metody pro určení okamžitého stavu proudového motoru. Tyto metody lze rozdělit na metody založené na porovnávání naměřených parametrů s parametry vypočítanými modelem chování motoru a na metody využívající prvky umělé inteligence. Byl zde probírán princip jejich funkce, jejich výhody, nevýhody a vhodnost použití. Vlastnosti jednotlivých metod jsou shrnuty do jedné tabulky v závěru kapitoly.

Pro účely návrhu diagnostického systému byly popsány funkce a charakteristiky konstrukčních modulů. Byly definovány parametry jednotlivých sekcí motoru, které jsou důležité pro diagnostiku stavu pohonné jednotky. Pro zjištění pracovních rozsahů a stavových veličin proudového motoru JetCat P80-SE byl proveden výpočet tepelného oběhu využitím programu MATLAB. Byla provedena validace modelu srovnáním vypočtených hodnot s hodnotami uváděnými výrobcem. Pro hodnotu teploty na výstupu z plynové turbíny  $T_{4c}$  byl rozdíl 3,47 % a pro maximální tah  $F_t$ , vypočtený z výsledných veličin, byl rozdíl 1,06 %. Pro přesné ověření by bylo vhodné porovnat i ostatní parametry motoru, nicméně výrobce neuvádí více informací ohledně stavových veličin. Přesné modelování chování motoru nebylo v rozsahu této práce. Pro přibližné určení maximálních hodnot tlaků a teplot v jednotlivých sekcích je tento matematický model dostačující.

Dále byl v práci vypracován přehled potenciálních typů selhání. U každé poruchy je popsána příčina, pravděpodobná četnost a možný způsob její detekce diagnostickým systémem. Pro rozbor poruch byla vypracována FMEA.

Po zjištění diagnosticky významných parametrů byly popsány způsoby jejich snímání na motoru. Byly rozebírány senzory teploty, tlaku, otáček, vibrací a hmotnostního průtoku paliva. Na základě vypočítaných hodnot byly určeny měřicí rozsahy jednotlivých snímačů. Po porovnání výhod a nevýhod zmiňovaných typů byly vybrány vhodné snímače významné pro okamžitou diagnostiku stavu motoru. Jako senzor teploty byl vybrán termočlánek typu K a odporový snímač teploty Pt 100, pro měření tlaku byl zvolen tenzometrický manometr s křemíkovou membránou, snímání vibrací by bylo vhodné pomocí smykového piezoelektrického akcelerometru. Pro měření otáček byl použit snímač s optickou závorou a pro měření průtoku paliva byl navržen tubínkový průtokoměr.

V závěru práce po získání všech potřebných informací byl vypracován návrh diagnostické soustavy pro malý proudový motor JetCat P80-SE. Bylo popsáno, kde mohou být umístěny zvolené snímače a jakými diagnostickými metodami je vyhodnocován výstupní signál. Diagnostický systém byl rozdělen na 3 moduly. Pro diagnostiku selhání snímačů byla použita hlasovací metoda s využitím neuronových sítí, jejichž výhoda tkví v tom, že i v případě poruchy některého ze snímačů je za pomoci syntetických hodnot možno zajistit správnou

funkci motoru. Pro vyhodnocení okamžitého stavu a identifikaci selhání komponentů motoru byla navržena diagnostická metoda založená na nelineárním matematickém modelu motoru, přičemž je využita optimalizace pomocí účelové funkce. Vybrané metody jsou detailně popsány rovnicemi i diagramy algoritmů funkce. Kombinace uvedených metod má zaručit rychlou a dostatečně přesnou detekci a kvalifikaci poruchy, při použití malého počtu senzorů. Třetí diagnostický modul analyzuje vibrace motoru a na základě vyhodnocení trendu je schopen odhalit možné selhání konstrukčního prvku.

Uvedený navrhovaný diagnostický systém je potřeba naprogramovat a ověřit jeho funkci simulací na počítači. Další kroky, které by měly následovat, jsou aplikace snímačů na motor, měření a kalibrace celého diagnostického systému.

V rámci vypracování práce byla uskutečněna exkurze na Technické univerzitě v Košicích, kde bylo ve zkušebně proudových motorů představeno spouštění, řízení a měření motorů JetCat P80-SE, PBS TJ100 a MPM-20. Přínosná byla také diskuze ohledně volby vhodných vyhodnocovacích metod pro návrh diagnostické soustavy malého proudového motoru.

## 12 ZDROJE

- [1] JETMAN [online]. 2016 [cit. 2016-05-18]. Dostupné z: <http://www.jetman.com>
- [2] JetCat RX Turbines with V10 ECU [online]. , 1-54 [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: [http://www.jetcat.de/downloads/rx--engines\\_manual\\_en](http://www.jetcat.de/downloads/rx--engines_manual_en)
- [3] *Vlastními silami s tahem proudového motoru - Co dává výrobku z Velké Bíteše šanci na nové trhy* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: [http://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/vlastnimi-silami-s-tahem-proudoveho-motoru-co-dava-vyrobku-z-velke-bitesse-sanci-na-nove-trhy\\_21694.html](http://www.technickydenik.cz/rubriky/archiv/vlastnimi-silami-s-tahem-proudoveho-motoru-co-dava-vyrobku-z-velke-bitesse-sanci-na-nove-trhy_21694.html)
- [4] THE MINIJETS WEBSITE: SUPER SALTO TJ100 [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.minijets.org/index.php?id=170>
- [5] *Subsonex- the personal jet* [online]. [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://www.sonexaircraft.com/subsonex/>
- [6] Proudový motor TJ100 [online]. Velká Bíteš, 2016 [cit. 2016-05-12]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/zakaznicka-odvetvi/letectvi/letecke-motory/proudovy-motor-tj-100>
- [7] LÁNSKÝ, Milan a Jan MAZÁNEK. *Diagnostika a informační diagnostické systémy I*. 1. vyd. Pardubice: Univerzita Pardubice, 1998. ISBN 80-7194-155-7.
- [8] HELEBRANT, František. *Technická diagnostika a spolehlivost: fundamentals of theory, design, and operation*. Ostrava: VŠB - Technická univerzita Ostrava, 2008. ISBN 978-80-248-1690-6
- [9] KUKLA, Pavel. *Diagnostické systémy a spolehlivost dopravních prostředků*. 1. Vyd. Ostrava: Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava/Univerzita Pardubice, 2013. ISBN 978-80-248-3274-6.
- [10] G., Anastassios, Douglas PROBERT a Riti SINGH. Engine Condition Monitoring and Diagnostics: a review. *Progress in Gas Turbine Performance* [online]. InTech, 2013, 79(1), 109-126 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.5772/54409. ISBN 978-953-51-1166-5. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://www.intechopen.com/books/progress-in-gas-turbine-performance/engine-condition-monitoring-and-diagnostics>
- [11] LI, Y G, Douglas PROBERT a Riti SINGH. Performance-analysis-based gas turbine diagnostics: a review. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* [online]. InTech, 2002-1-1, 216(5), 363-377 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.1243/095765002320877856. ISBN 978-953-51-1166-5. ISSN 0957-6509. Dostupné z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/095765002320877856>
- [12] MARINAI, Luca, Douglas PROBERT a Riti SINGH. Prospects for aero gas-turbine diagnostics: a review. *Applied Energy* [online]. 2004, 79(1), 109-126 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2003.10.005. ISSN 03062619. Dostupné z: <http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S030626190300206X>



- [13] ZEDDA, Marco a Riti SINGH. Gas Turbine Engine and Sensor Fault Diagnosis Using Optimization Techniques. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2002, 18(5), 1019-1025 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.2514/2.6050. ISSN 0748-4658. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.6050>
- [14] ZEDDA, M. a R. SINGH. Fault diagnosis of a turbofan engine using neural networks - A quantitative approach. In: *34th AIAA/ASME/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference and Exhibit* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 1998, s. - [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.2514/6.1998-3602. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/6.1998-3602>
- [15] DVOŘÁK, Jiří. Expertní systémy [online]. 2004, , 93 [cit. 2016-05-11]. Dostupné z: <http://www.uai.fme.vutbr.cz/~jdvorak/opory/expertnisystemy.pdf>
- [16] Diagnostikování stavu objektu s využitím fuzzy logiky [online]. 2001, , 52-55 [cit. 2016-05-15]. Dostupné z: <http://automa.cz/download/au110152.pdf>
- [17] GANGULI, Ranjan a Riti SINGH. Fuzzy Logic Intelligent System for Gas Turbine Module and System Fault Isolation. *Journal of Propulsion and Power* [online]. 2002, 18(2), 440-447 [cit. 2016-05-12]. DOI: 10.2514/2.5953. ISSN 0748-4658. Dostupné z: <http://arc.aiaa.org/doi/abs/10.2514/2.5953>
- [18] PAVELEK, M. *Termomechanika*, CERM, Brno, červen 2003,3. přepracované vydání, 286 stran, ISBN 80-214-2409-5
- [19] MATTINGLY, Jack D., William H. HEISER a David T. PRATT. *Aircraft engine design / Jack D. Mattingly, William H. Heiser, David T. Pratt*. 2nd ed. Reston, VA: American Institute of Aeronautics and Astronautics, c2002. ISBN 1563475383.
- [20] RŮŽEK, J.: *Teorie leteckých motorů. 2., Turbinové motory*. Vojenská akademie Antonína Zápotockého Brno, 1971. 341 p.
- [21] VÝPOČTOVÉ CVIČENIE Z TEÓRIE LETECKÝCH MOTOROV: Približný výpočet tepelného obehu jednorúrovňového leteckého turbokompresorového motora. *VÝPOČTOVÉ CVIČENIE Z TEÓRIE LETECKÝCH MOTOROV* [online]. Košice: Technická univerzita v Košiciach – Letecká fakulta, 2010 [cit. 2016-05-01]. Dostupné z: [http://www.leteckemotory.cz/teorie/PRIBLIZNY\\_VYPOCET\\_TEPELNEHO\\_OBEHU\\_JPT\\_KM.pdf](http://www.leteckemotory.cz/teorie/PRIBLIZNY_VYPOCET_TEPELNEHO_OBEHU_JPT_KM.pdf)
- [22] KOCÁB, Jindřich. *Letadlové motory*. Praha: KANT, 2000. ISBN 80-902-9140-6.
- [23] HÜNECKE, Klaus. *Jet engines: fundamentals of theory, design, and operation*. Osceola, WI, USA: Motorbooks International, 1997. ISBN 07-603-0459-9.
- [24] KRÍŽ, Josef. *Lietadlové pohonné jednotky*. V Žiline: KANT, 2004. ISBN 80-807-0342-6.
- [25] Turbofan Engine Malfunction Recognition and Response [online]. United Kingdom, 1999 [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: <http://www.b737.org.uk/enginemalfunctions.htm>

[26] JetCat Turbine Direct Support. RC UNIVERSE [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://www.rcuniverse.com/forum/sitemap/f-151.html>

[27] RCJET ADDICTION: WREN 160 FAILURES [online]. 2016 [cit. 2016-05-16]. Dostupné z: <http://www.rcjetaddiction.com/forum/topics/wren-160-failures?commentId=6490750%3AComment%3A73696>

[28] Flight Operations Briefing Notes: Handling Engine Malfunctions [online]. 2006, , 17 [cit. 2016-05-09]. Dostupné z: [http://www.airbus.com/fileadmin/media\\_gallery/files/safety\\_library\\_items/AirbusSafetyLib\\_-FLT\\_OPS-SUPP\\_TECH-SEQ07.pdf](http://www.airbus.com/fileadmin/media_gallery/files/safety_library_items/AirbusSafetyLib_-FLT_OPS-SUPP_TECH-SEQ07.pdf)

[29] YANG, Chunsheng, Sylvain LETOURNEAU, Marvin ZALUSKI a Elizabeth SCARLETT. *APU FMEA Validation and Its Application to Fault Identification* [online]. [cit. 2016-05-22]. DOI: 10.1115/DETC2010-28438. ISBN 10.1115/DETC2010-28438. Dostupné z: <http://proceedings.asmedigitalcollection.asme.org/proceeding.aspx?articleid=1611892>

[30] KREIDL, Marcel. *Měření teploty: senzory a měřicí obvody*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-145-4.

[31] BEJČEK, LUDVÍK a JAN VACULÍK. SNÍMAČE A MĚŘÍCÍ TECHNIKA: SNÍMAČE TLAKU [online]. 2011 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://automa.cz/res/pdf/42719.pdf>. FEKT VUT BRNO.

[32] KADLEC, Karel. Příprava na laboratorní práci: MĚŘENÍ A REGULACE TLAKU, KALIBRACE TLAKOMĚRŮ [online]. , 1-19 [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/LO/download/B6-priprava.pdf>

[33] KADLEC, KAREL. MĚŘENÍ A REGULACE TLAKU, KALIBRACE TLAKOMĚRŮ [online]. 1-19 [cit. 2016-05-19]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/ucebnice/LO/download/B6-priprava.pdf>

[34] ĎAĎO, Stanislav a Marcel KREIDL. *Senzory a měřicí obvody*. Vyd. 2. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1999. ISBN 80-01-02057-6.

[35] SENZORY OTÁČEK, RYCHLOSTI A ZRYCHLENÍ [online]. [cit. 2016-05-25]. Dostupné z: [http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/08\\_rychlost%20z\\_rychleni%20vibrace%20TEXT.pdf](http://measure.fel.cvut.cz/system/files/files/cs/vyuka/predmety/A3B38SME/08_rychlost%20z_rychleni%20vibrace%20TEXT.pdf)

[36] DIBLÍK, J. *Měření vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2008. 58 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Viera Biolková.

[37] HARASIM, Tomáš. *Návrh diagnostické soustavy pro malý dopravní letoun*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 88 s. Vedoucí práce doc. Ing. Karel Třetina CSc.

[38] KREIDL, Marcel a Radislav ŠMÍD. *Technická diagnostika: senzory, metody, analýza signálu*. 1. vyd. Praha: BEN - technická literatura, 2006. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-158-6.

[39] M.P. NORTON AND D.G. KARZUB. *Fundamentals of noise and vibration analysis for engineers*. 2. ed. Cambridge, UK: Cambridge University Press, 2003. ISBN 9780521499132.

[40] ĎAĎO, Stanislav, Ludvík BEJČEK a Antonín PLATIL. Měření průtoku a výšky hladiny. Praha: BEN - technická literatura, 2005. Senzory neelektrických veličin. ISBN 80-7300-156-X.

[41] Měření průtoku a proteklého množství [online]. [cit. 2016-05-04]. Dostupné z: <http://uprt.vscht.cz/kminekm/mrt/F4/F4k45-prut.h>

[42] ANDOGA, Rudolf, Ladislav FÖZÖ, Ladislav MADARÁSZ a Tomáš KAROL. *A Digital Diagnostic System for a Small Turbojet Engine* [online]. , 13 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/290529108\\_A\\_Digital\\_Diagnostic\\_System\\_for\\_a\\_Small\\_Turbojet\\_Engine](https://www.researchgate.net/publication/290529108_A_Digital_Diagnostic_System_for_a_Small_Turbojet_Engine)

[43] KYRIAZIS A., MATHIOUDAKIS K.: Gas Turbine Fault Diagnosis Using Fuzzy-based Decision Fusion, JOURNAL OF PROPULSION AND POWER Vol. 25, No. 2, March–April 2009, ISSN 0748-4658

[44] ANDOGA, Rudolf, Ladislav FÖZÖ, Ladislav MADARÁSZ, Tobiáš LAZAR a Vladimír GAŠPAR. *Innovative Approaches in Modeling, Control and Diagnostics of Small Turbojet Engines* [online]. , 19 [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: [https://www.researchgate.net/publication/286976520\\_Innovative\\_Approaches\\_in\\_Modeling\\_Control\\_and\\_Diagnostics\\_of\\_Small\\_Turbojet\\_Engines](https://www.researchgate.net/publication/286976520_Innovative_Approaches_in_Modeling_Control_and_Diagnostics_of_Small_Turbojet_Engines)

[45] MATHIOUDAKIS, K, Ph KAMBOUKOS a A STAMATIS. Gas turbine component fault detection from a limited number of measurements. *Proceedings of the Institution of Mechanical Engineers, Part A: Journal of Power and Energy* [online]. 2004-1-1, **218**(8), 609-618 [cit. 2016-05-26]. DOI: 10.1243/0957650042584302. ISSN 0957-6509. Dostupné z: <http://sdj.sagepub.com/lookup/10.1243/0957650042584302>

[46] BALUŠÍK, Boris. *MODELOVANIE MIKRO TURBOKOMPRESOROVÝCH MOTOROV*. Košice, 2016. Diplomová práce. TECHNICKÁ UNIVERZITA V KOŠICIACH. Vedoucí práce Ing. Ladislav Fözö, PhD.

## 13 SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

$z$	vektor měřených dat	[-]
$x$	vektor charakteristických parametrů výkonu	[-]
$w$	vektor parametrů okolního prostředí a nastavení tahu motoru	[-]
$v$	vektor šumu měření	[-]
$b$	vektor systematické chyby měření	[-]
$h()$	vektor hodnocené nelineární funkce	[-]
$H$	matice ovlivňujících koeficientů	[-]
$H^{-1}$	matice chybových koeficientů	[-]
$z^{\wedge}$	vektor předpokládaných hodnot	[-]
$OF$	účelová funkce	[-]
$\phi$	residuum	[-]
$c_o$	absolutní rychlost	[m/s]
$\hat{c}_a$	bezrozměrná axiální rychlost	[-]
$c_p$	měrné teplo za stálého tlaku	[J/Kg/K]
$c_{ppl}$	měrné teplo plynu za stálého tlaku	[J/Kg/K]
$F$	tah	[N]
$M$	Machovo číslo	[-]
$n$	otáčky	[ot/min]
$p$	statický tlak	[Pa]
$p_c$	celkový tlak	[Pa]
$pi$	Ludolfovo číslo	[-]
$Q_m$	hmotnostní průtok	[kg/s]
$R$	plynová konstanta	[J/Kg/K]
$T$	statická teplota plynu	[K]
$T_c$	celková teplota plynu	[K]
$W_e$	efektivní práce, energie	[J]
$\kappa$	exponent adiabaty (pro vzduch)	[J/Kg/K]
$\kappa'$	exponent adiabaty (pro plyn)	[J/Kg/K]
$\pi$	stlačení, expanzní tlakový spád	[-]
$\sigma$	součinitel zachování celkového tlaku	[-]
$\sigma$	směrodatná odchylka	[-]
$\eta$	účinnost	[-]
$\lambda$	intenzita poruchy	[-]
$\Delta$	rozdíl	[-]
$\mu$	součinitel skluzu	[-]
$v$	měrný objem	[m <sup>3</sup> /kg]
$\alpha$	součinitel odporu	[-]
$f$	frekvence	[Hz]
$f$	vektor stavu komponentů	[-]
$u$	vektor režimu motoru	[-]
$y$	vektor měřené proměnné	[-]
$C$	váhový koeficient	[-]
$\sigma$	směrodatná odchylka	[-]
$L$	délka intervalu	[-]
$\overline{\Delta f_j}$	střední hodnota odchylky	[-]
$DI$	diagnostický index	[-]

## Použité indexy

<i>ad</i>	adiabatický
<i>c</i>	celkový
<i>e</i>	vnější
<i>ef</i>	efektivní, užitečný
<i>el</i>	elektrický generátor
<i>id</i>	ideální
<i>kc</i>	kompresor
<i>m</i>	měrný
<i>max</i>	maximální
<i>opt</i>	optimální
<i>p</i>	izobarický, za stálého tlaku
<i>pal</i>	palivový
<i>pl</i>	plyn
<i>s</i>	střední
<i>sk</i>	spalovací komora
<i>t</i>	turbína
<i>tr</i>	tryska
<i>tr</i>	třecí
<i>u</i>	obvodový
<i>v</i>	vzduch
<i>vst</i>	vstupní
<i>výp</i>	výpočtový
<i>rot</i>	rotační

## 14 SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Příklad zajímavého využití motorů JetCat letcem Yvesem Rossym [1] .....	16
Obr. 2 Modelářský motor JetCat P80- SE [vlastní zpracování].....	17
Obr. 3 Základní rozměry motoru JetCat[2].....	18
Obr. 4 Motor TJ 100 na letounu Super Salto [4] .....	19
Obr. 5 Aplikace motoru TJ 100 na experimentálním letounu SubSonex [5].....	19
Obr. 6 Vizualizace motoru PBS TJ 100 [6] .....	20
Obr. 7 Schéma rozdělení diagnostických metod.....	22
Obr. 8 Schéma diagnostiky na základě nelineárního modelu [vlastní zpracování] .....	25
Obr. 9 Obecná struktura vícevrstvé sítě s dopředným šířením [30].....	26
Obr. 10 Schéma fuzzy systému [40] .....	28
Obr. 11 Řez motorem s popisem hlavních konstrukčních částí a s vyznačenými řezy pro výpočty v jednotlivých sekcích [vlastní zpracování].....	31
Obr. 12 p-v diagram vypočteného Braytonova cyklu [vlastní zpracování] .....	34
Obr. 13 Závislost stlačení kompresoru na hmotnostním průtoku pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování].....	36
Obr. 14 Závislost účinnosti kompresoru na hmotnostním průtoku pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování].....	36
Obr. 15 Závislost korigovaného hmotnostního průtoku turbíny na stlačení pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování] .....	38
Obr. 16 Závislost účinnosti turbíny na stlačení pro různé poměrné otáčky [vlastní zpracování]. .....	38
Obr. 17 Ulomená lopatka kompresoru [27] .....	42
Obr. 18 Ulomení lopatky turbíny [26] .....	43
Obr. 19 Spalovací komora po poškození požárem [26].....	44
Obr. 20 Zachycení šlehání plamenů z výstupní trysky u modelu JetCat P80-SE [26] .....	45
Obr. 21 Očíslování prvků pro popis v tabulce FMEA [vlastní zpracování] .....	47
Obr. 22 Porovnání vlastností různých druhů snímačů teploty [30] .....	51
Obr. 23 Měření teploty výstupních plynů na motoru JetCat P-80-SE [vlastní zpracování] ....	52
Obr. 24 Deformační prvek zleva: tenká membrána, tuhá membrána a vlnovec [31] .....	53
Obr. 25 Schéma tenzometrického manometru s křemíkovou membránou [32] .....	54
Obr. 26 Měření otáček na motoru JetCat P80-SE [vlastní zpracování] .....	55
Obr. 27 Typy a vlastnosti piezoelektrických snímačů [37].....	56
Obr. 28 Kmitočtový rozsah snímače [38] .....	57
Obr. 29 Znárodnění objemových průtokoměrů, zleva: turbínkový a lopatkový[38] .....	58
Obr. 30 Průtokoměr instalovaný na palivové soustavě motoru JetCat P80-SE [vlastní zpracování].....	59
Obr. 31 Struktura diagnostického modulu [45] .....	62
Obr. 32 Schéma diagnostiky selhání snímače [42] .....	63
Obr. 33 Diagram algoritmu diagnostiky selhání snímače [vlastní zpracování] .....	65
Obr. 34 Matematický model motoru JetCat P80-SE [46].....	68
Obr. 35 Schéma algoritmu optimalizace [vlastní zpracování] .....	69
Obr. 36 Proces odhadu velikosti chyby minimalizací OF[vlastní zpracování, 45].....	70
Obr. 37 Rozmístnění snímače-pohled ze strany [vlastní zpracování] .....	71
Obr. 38 Rozmístnění snímačů- pohled zepředu [vlastní zpracování] .....	71
Obr. 39 Schéma navrhovaného diagnostického systému [vlastní zpracování].....	72
Obr. 40 Vizualizace identifikace poruchy [vlastní zpracování].....	73
Obr. 41 řídicí program motoru MPM-20 [vlastní zpracování] .....	74
Obr. 42 Uložení motoru MPM-20 s nastavitelnou výstupní tryskou [vlastní zpracování] .....	75
Obr. 43 měřicí soustava motoru PBS TJ 100 [vlastní zpracování] .....	76

Obr. 44 Řídící jednotka, palivové čerpadlo a rozvod paliva s uložením motoru JetCat P-80-SE  
[vlastní zpracování] ..... 77

## 15 SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Přehled parametrů JetCat P80-SE [vlastní zpracování,2] .....	18
Tabulka 2 Přehled parametrů PBS TJ 100 [vlastní zpracování, 6] .....	20
Tabulka 3 Hlavní charakteristiky diagnostických metod [vlastní zpracování] .....	30
Tabulka 4 Vypočítané hodnoty termodynamických veličin v jednotlivých řezech [vlastní zpracování] .....	33
Tabulka 5 FMEA [vlastní zpracování] .....	48



# PŘÍLOHY

## Výpočet Braytonova cyklu v programu MATLAB

```
clc;clear;
% Zakladni udaje o obehu
% -----
pi_kc = 2.4; % [-] stlacení kompresoru
T_3c = 1030; % [K] teplota plynu za spalovací komorou
Qm = 0.25; % [kg/s] hmotnostní průtok vzduchu motorem
F_vyrobce=98; % [N] tah motoru udávaný výrobcem%
T_4_vyrobce = 973.15; %celková teplota plynu za plynovou turbínou%

% Fyzikalni vlastnosti
% -----
kappa_v = 1.4; % [-] Poissonova konstanta vzduchu
kappa_pl = 1.33; % [-] Poissonova konstanta plynu
c_pv = 1005; % [J/(kg*K)] izobarická mer. tep. kapacita vzduchu
c_ppl = 1158; % [J/(kg*K)] izobarická mer. tep. kapacita plynu
% Odhadovane a volene hodnoty
% -----
sigma_vst = 0.985; % [-] součinitel zachování celk. tlaku ve vstupní
soustave
sigma_sk = 0.90; % [-] součinitel zachování celk. tlaku ve spalovací komore
eta_kc = 0.80; % [-] celková účinnost kompresoru
eta_tc = 0.85; % [-] celková účinnost turbíny
eta_m = 0.98; % [-] mechanická účinnost rotoru
fi_tr = 0.98; % [-] součinitel ztráty rychlosti ve výstupní trysce
eta_vd=0.90; %účinnost výstupní soustavy
% Pro nadmořskou výšku H=0 platí:
p_0 = 101325; % [Pa] standardní atmosférický tlak
T_0 = 288; % [K] standardní atmosférická teplota
M_0 = 0; % [-] rychlost letu (Machovo číslo)

%VYPOCET TEPELNEHO OBEHU MOTORU

% (0)
% Celkový tlak a celková teplota vzduchu před vstupním ústrojím
p_0c = p_0 * (1 + (kappa_v-1)/2 * (M_0)^2)^(kappa_v/(kappa_v-1));
T_0c = T_0 * (1 + (kappa_v-1)/2 * (M_0)^2);
% (1)
% Parametry vzduchu na vstupu do kompresoru:
p_1c = p_0c * sigma_vst;
T_1c = T_0c;
% (2)
% Parametry vzduchu na výstupu z kompresoru:
p_2c = p_1c * pi_kc;
T_2c = T_1c * (1 + (pi_kc^((kappa_v-1)/kappa_v) - 1) / eta_kc);
% (3)
% Parametry vzduchu na výstupu ze spalovací komory:
p_3c = p_2c * sigma_sk;
% T_3c zadano
% (4)
% Expanze plynu na turbíně
T_4c = T_3c - c_pv / (c_ppl * eta_m) * (T_2c - T_1c); % rovnováha praci na
hrideli
% Adiabatická teplota plynu na výstupu z turbíny
T_4ad = T_3c - (T_3c - T_4c) / eta_tc;
p_4c = p_3c * (T_4ad / T_3c)^(kappa_pl / (kappa_pl-1));
delta_T4 = 100-((T_4c/(T_4_vyrobce))*100);
```

```

% (5)
% Expanze na vystupni trysce
% Pomer tlaku na výstupní trysce
p_dyza = p_0c/p_4c;
% Kritický poměr tlaku na trysce
p_krit = (1-(((kappa_pl-1)/(kappa_pl+1))*(1/fi_tr^2)))^(kappa_pl/(kappa_pl-1));
% Charakter proudeni na vystupu z trysky
if p_dyza<p_krit
disp('nadkriticky tlakovy spad')
else
disp('podkriticky tlakovy spad')
end
%Parametry proudu plynu pri podkritickém tlakovém spádu
% Celkove parametry plynu za turbinou
T_5 = (2/(kappa_pl+1))*T_4c;
T_5c = T_4c;
% Adiabaticka teplota plynu na vystupu z motoru
T_5ad = T_4c-((T_4c-T_5)/eta_vd);
p_5c = p_4c * (T_5ad / T_4c)^(kappa_pl / (kappa_pl-1));
%výstupní rychlost spalín
c5 = fi_tr*sqrt(2*c_pp1*T_5c*(1-((p_0c/p_4c)^((kappa_pl-1)/kappa_pl))));
%12.Specifický tah motoru%
Fm = c5;
%12.Max tah motoru%
Ft = Qm*Fm;
delta_Ft = 100-((Ft/F_vyrobce)*100);

% VYKRESLENI p-v DIAGRAMU OBEHU TURBOHRIDELOVEHO MOTORU
% -----
% Vytvoreni a popis grafu
% -----
rozsah_x = 4;
rozsah_y = 300000;
figure('Color',[1 1 1]);
axes('XGrid','on','YGrid','on','XTick',[0:0.5:rozsah_x],'XMinorTick','off',
...
'YTick',[0:25000:rozsah_y],'YMinorTick','off','LineWidth',2,...
'FontSize',16);
xlim([0,rozsah_x]);
xlabel('\fontsize{16}v [m^3.kg^{-1}]');
ylabel('\fontsize{16}p [Pa]');
title('\fontsize{16}Tepelny cyklus motoru (p-v diagram)')
hold on;

r_v = 287.1;
r_pl = 287.4;
% Urceni merneho objemu ze stavove rovnice
% -----
v_0c = r_v * T_0c / p_0c;
v_1c = r_v * T_1c / p_1c;
v_2c = r_v * T_2c / p_2c;
v_3c = r_pl * T_3c / p_3c;
v_4c = r_pl * T_4c / p_4c;
v_5c = r_pl * T_5c / p_5c;

% Vykresleni jednotlivych stavu 0-6
plot([v_0c,v_1c,v_2c,v_3c,v_4c,v_5c],[p_0c,p_1c,p_2c,p_3c,p_4c,p_5c],...
'LineStyle','none','Marker','square','MarkerSize',8,'MarkerEdgeColor',[0 0
0],...
'MarkerFaceColor',[1 1 0]);

```

```

% Dej 0->1 (Ztrata celk. tlaku vzduchu na vstupu)
plot([v_0c,v_1c],[p_0c,p_1c],'r'); % usecka

% Dej 1->2 (Stlacení vzduchu v kompresoru)
n12 = log10(p_1c/p_2c) / log10(v_2c/v_1c); % určení polytropické konst. n12
v12 = linspace(v_1c, v_2c, 100); % proměnná - delit na 100 dílů
p12 = p_1c.*(v_1c./v12).^n12; % výpočet druhé souřadnice
plot(v12,p12,'Color',[0 1 0],'LineWidth',3); % vykreslení polytropy

% Dej 2->3 (Ohřev plynu ve spalovací komoře)
plot([v_2c,v_3c],[p_2c,p_3c],'Color',[0 1 0],'LineWidth',3); % usecka

% Dej 3->4 (Expanze plynu na turbíně)
n34 = log10(p_3c/p_4c) / log10(v_4c/v_3c); % určení polytropické konst. n34
v34 = linspace(v_3c, v_4c, 100); % proměnná - delit na 100 dílů
p34 = p_3c.*(v_3c./v34).^n34; % výpočet druhé souřadnice
plot(v34,p34,'Color',[0 1 0],'LineWidth',3); % vykreslení polytropy
% Dej 4->5 (Expanze plynu z výstupní trysky)
% -----
n45 = log10(p_4c/p_5c) / log10(v_5c/v_4c); % určení polytropické konst. n45
v45 = linspace(v_4c, v_5c, 100); % proměnná - delit na 100 dílů
p45 = p_4c.*(v_4c./v45).^n45; % výpočet druhé souřadnice
plot(v45,p45,'Color',[0 1 0],'LineWidth',3); % vykreslení polytropy

% -----
plot([v_5c,v_0c],[p_5c,p_0c],'Color',[0 1 0],'LineWidth',3); %usecka

```