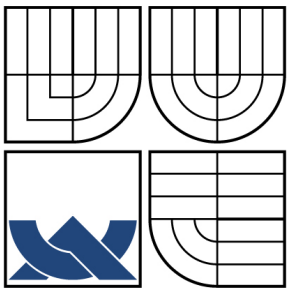
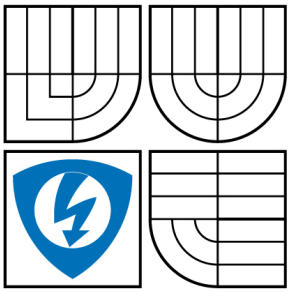


VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

ÚSTAV AUTOMATIZACE A MĚŘICÍ TECHNIKY

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

DEPARTMENT OF CONTROL AND INSTRUMENTATION

IDENTIFIKACE MODELU A MĚŘENÍ PARAMETRŮ MODELÁŘSKÉ TURBÍNY JETCAT

MODEL IDENTIFICATION AND MEASUREMENT OF PARAMETERS OF MODEL TURBINE JETCAT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE — Ing. JIŘÍ TLUSTOŠ

AUTHOR

VEDOUCÍ PRÁCE — Ing. STANISLAV KLUSÁČEK

SUPERVISOR

BRNO 2010

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřicí techniky

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor
Automatizační a měřicí technika

Student:	Ing. Jiří Tlustoš	***ID:***	41753
Ročník:	3	***Akademický rok:***	2009/2010

NÁZEV TÉMATU:

Identifikace modelu a měření parametrů modelářské turbíny JetCAT

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Navrhněte měřící řetězec pro zjištění dílčích parametrů modelářského motoru P80 firmy JetCat USA (parametry kompresoru, charakterisitka spalovací komory, parametry turbíny mapa, tah motoru, průtok paliva atd.). Proveďte literární rešerší měřících metod v dané problematice. Navrhněte nejvhodnější koncepci s ohledem na dostupnost komponent a cenu. Realizujte meření průtoku vzduchu. Ověřte metodu měřením na realném modelářském elektro-dmychadle a porovnáním s vhodnou referenční metodou. Analyzujte použitelnost této metody pro měření na modelařském turbínovém motoru P80 firmy JetCAT. Postupujte dle pokynů vedoucího a konzultanta.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

[1] ĎAĎO, S-KREIDL, M. Senzory a měřící obvody. Vydání druhé. Praha: ČVUT Praha, 1999. 215 stran. ISBN 80-01-02057-6

[2] COHEN, H.-ROGERS, F.C.-SARAVANAMUTTO, H.I.H. Gas Turbine Theory. 4th Edition. Cornwall: T. J. Press, 1996. 442 stran. ISBN 0-582-23632-0

[3] OMEGA: Flow & Level Measurement. Handbook, Putman Publishing Company and OMEGA Press LLC, 2001. 113s. Dostupné z: <http://www.omega.com/literature/transactions/Transactions_Vol_IV.pdf>

Termín zadání:	8.2.2010	***Termín odevzdání:***	31.5.2010

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček

prof. Ing. Pavel Jura, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Vysoké učení technické v Brně

Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií

Ústav automatizace a měřící techniky

Identifikace modelu a měření parametrů modelářské turbíny JetCAT

Bakalářská práce

Studijní obor: Automatizace a měřící technika

Student: Ing. Jiří Tlustoš

Vedoucí práce: Ing. Stanislav Klusáček

Abstrakt :

Bakalářská práce seznamuje s problematikou měření parametrů modelářských turbínových motorů. Součástí práce je analýza této problematiky s ohledem na řízení turbínových motorů, použití naměřených dat pro identifikaci modelu a na sestavení charakteristik jednotlivých fukčních bloků motoru. Jsou zde uvedeny možné metody měření příslušných parametrů, včetně volby, instalace senzorů a automatického sběru naměřených dat. Detailně je zde zpracována problematika měření průtoku vzduchu turbínovým motorem. Navrhovaná metoda měření průtoku vzduchu je zde popsána včetně jejího ověření na konkrétním případě. Kalibrace je provedena na základě referenčního měření s využitím měřící tratě s plynulým nastavováním průtoku vzduchu. V závěru práce je metoda zhodnocena a jsou zde uvedena doporučení pro realizaci měření průtoku vzduchu na modelářském motoru P80 JetCAT.

Klíčová slova:

FADEC, Identifkace modelu, měření parametrů motoru, charakteristiky motoru, měření průtoku vzduchu, proudový motor, turbodmychadlový motor, modelářská turbín, měící trať, normalizovaná clona

Brno University of Technology

Faculty of Electrical Engineering and Communication

Department of Control, Measurement and Instrumentation

Model identification and measurement of parameters of model turbine JetCAT

Bachelor's thesis

Study specialization: Automation and Measurement
Student: Ing. Jiří Tlustoš
Supervisor: Ing. Stanislav Klusáček

Abstract :

The bachelor's thesis deals with measurement of microturbine engine parameters. The first part of the thesis covers theory of microturbine parameters measurement, data analysis, interpretation and utilization for model identification, engine control, individual functional block charts and characteristics generation. All possible methods for engine parameters measurement, sensors selection and installation, data acquisition are analyzed here. The focus is on the engine air flow measurement. Selected method of the air flow measurement is described here in detail and verified for the specific case. The Calibration was carried out by means of measuring route with continuous air flow adjustment. In the final part is concept evaluation and recommendation for air flow measurement in the real application on the model turbine JetCAT.

Keywords:

FADEC, model identification, engine parameters measurement, engine charts and characteristics, air flow measurement, turbojet engine, turbofan engine, model turbine, measurement route, orifice plate

Bibliografická citace

TLUSTOŠ, J. *Identifikace modelu a měření parametrů modelářské turbíny JetCAT*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2010. 73 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Stanislav Klusáček.

Prohlášení

„Prohlašuji, že svou bakalářskou práci na téma Identifikace modelu a měření parametrů modelářské turbíny JetCAT vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené bakalářské práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této bakalářské práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení § 152 trestního zákona č. 140/1961 Sb.“

V Brně dne: **28. května 2010** ……
podpis autora

Poděkování

Děkuji vedoucímu bakalářské práce Ing. Stanislavu Klusáčkovi za účinnou metodickou, pedagogickou a odbornou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

Dále děkuji konzultantovi bakalářské práce Ing. Miroslavu Krupovi za odbornou a věcnou pomoc a další cenné rady při zpracování mé bakalářské práce.

V Brně dne: **28. května 2010** ……
podpis autora

1. ÚVOD 9
2. FADEC 12
2.1 Základní charakteristika 12
2.2 Funkce 13
2.3 Požadavky na bezpečnost a spolehlivost 14
2.4 Použití 15
2.5 Hardwarové provedení a struktura 17
2.6 Zhodnocení 18
3. IDENTIFIKACE SYSTÉMU 19
3.1 Metodika popisu systému 21
3.2 Analogie mezi reálným motorem a modelářským motorem 22
3.3 Parametry turbínového motoru 24
3.3.1 Parametry charakterizující okolní prostředí 25
3.3.2 Stavové parametry plynu a paliva v jednotlivých stupních motoru 26
3.3.3 Mechanické parametry 26
3.4 Hlavní měřené parametry 26
4. DÍLČÍ PARAMETRY MOTORU P80 JETCAT 28
4.1 Základní popis motoru 28
4.2 Kompresorová mapa 30
4.3 Charakteristika spalovací komory 32
4.4 Turbínová mapa 33
4.5 Tah motoru 35
4.6 Průtok paliva 36
5. MĚŘENÍ MOTORU P80 JETCAT 37
5.1 Měření teploty 37
5.2 Měření tlaku 38
5.3 Měření průtoku paliva 39
5.4 Měření průtoku vzduchu 39
5.4.1 Kalorimetrický způsob měření průtoku vzduchu 40
5.4.2 Měření průtoku vzduchu prostřednictvím tlakové diference 40
5.5 Měření otáček motoru 44

5.6 Měření tahu 44
5.7 Automatizovaný sběr dat 44
6. MOŽNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU 45
6.1 Rozsahy průtoků 45
6.2 Měřící trať 46
6.3 Porovnání rozsahů průtoků 47
6.4 Analýza možností měření 47
6.4.1 Měřící trubice pro elektro-dmychadlo 48
6.4.2 Měřící trubice pro modelářský turbomotor 49
6.4.3 Zhodnocení navrhovaných alternativ 51
7. REALIZACE MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU 52
7.1 Popis použité metody. 52
7.2 Návrh měřící trubice 52
7.3 Popis měřící trubice 53
7.4 Příprava měřícího zařízení 56
7.5 Měření 59
7.6 Zpracování výsledků 60
7.7 Přesnost měření 62
7.7.1 Přesnost měření průtoku 62
7.7.2 Přesnost měření tlaku 62
7.7.3 Přesnost měření proudu 62
7.7.4 Celková přesnost nepřímého měření 62
8. MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU MOTOREM 63
9. ZÁVĚR 65
10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY 67
11. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ 68
12. SEZNAM TABULEK 71
13. SEZNAM OBRÁZKŮ 71
14. SEZNAM GRAFŮ 73

1. ÚVOD

Moderní elektronické systémy řízení přispívají k zvýšení jakosti, funkčnosti, spolehlivosti a dalších vlastností řízených objektů. Vlastnosti řídícího systému do značné míry ovlivňují funkci řízeného stroje, zařízení nebo procesu. Z toho vyplývají požadavky kladené na tyto systémy.

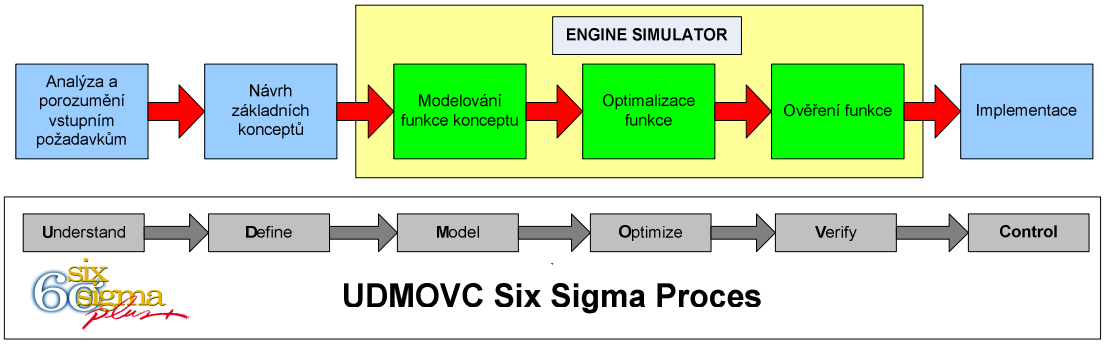
Divize Aerospace Engineering & Technology firmy Honeywell se zabývá zejména vývojem, analýzou a verifikací komunikačních, naváděcích a navigačních systémů, systémů řízení letu, digitálních elektronických řídících jednotek a avioniky. Brněnský tým se účastní mnoha projektů ve spolupráci s kolegy v USA. Vzhledem k charakteru aplikací je nutné respektovat letecké předpisy a požadavky dohlížecích institucí. Při vývoji jsou požívány optimalizační metody Six Sigma. Pro vývoj software se používá převážně jazyk C/C++ a standardní produkty jako OrCAD nebo Mentor pro vývoj hardware. V raných fázích vývoje se provádí simulace funkce vyvíjených zařízení a systémů a v závěrečných fázích vývoje slouží simulace k ověření a verifikaci požadovaných vlastností a funkcí.

Skupina Digital controllers se zaměřuje na vývoj software pro řízení proudových motorů a dalších zařízení např. řízení tlaku v kabině. Dále je zde zpracovávána technická a vývojová dokumentace a také dokumentace pro certifikaci. Pro řízení motorů se využívá jednotek FADEC (Full Authority Digital Engine Control). Jedná se o velice komplexní a sofistikovaný řídící systém a jsou na něho kladeny vysoké požadavky na spolehlivost, odolnost proti poruše, kvalitu a přesnost regulace. Správná funkce řídících jednotek musí být ověřena prostřednictvím simulace. Vzhledem k povaze řízeného systému, kterým je proudový motor nelze provádět ověřování funkce na reálném objektu a to zejména z důvodu vysokých nákladů na realizaci, nebezpečí poškození motoru, popřípadě vzniku ohrožení osob. Ověření funkce řízení při různých provozních režimech, by bylo nutné provádět při skutečném letu, aby byly vytvořeny okolní podmínky, které představují vstupní proměnné ovlivňující stav řízeného systému. Provádění těchto zkoušek je obtížně realizovatelné vzhledem k důsledkům při nesprávné funkci řízení. Při vývoji leteckých motorů se jejich ověřovací testy provádějí v reálných letových

podmínkách. Data naměřená při těchto testech, lze mimo jiné také použít k nastavení parametrů FADECu. V běžných průmyslových aplikacích automatického řízení, lze provádět ověřování funkce řídícího systému přímo na konkrétním zařízení. Při zkouškách je nutno zachovávat přísná bezpečnostní opatření, případně provést výkonová omezení a úpravy na řízeném objektu, aby bylo zabráněno vzniku nebezpečných stavů. Také jednotky FADEC ověřené prostřednictvím simulátoru se testují s reálnými motory Honeywell ve Phoenixu v USA.

Detailní informace, specifikace funkce, vstupů, výstupů, řídících algoritmů jednotek FADEC jsou tajné, jsou chráněné zákony USA. Toto know-how je vlastnictvím Americké divize a pro verifikace funkce jsou poskytovány pouze definice chování výstupů jednotky FADEC na určitý vektor vstupních parametrů. Tento způsob verifikace je nedostatečný a nepokrývá komplexně problematiku testování a verifikaci těchto jednotek.

Při vývoji je implementován systém DFSS (Design For Six Sigma), postup UDMOVC (Understand, Define, Model, Optimize, Verify, Control). Tento proces je zřejmý z **Obr. 1-1**. K jeho efektivní aplikaci je v tomto případě nutná detailní znalost chování řízeného systému, jímž je proudový motor, požadavky na jeho funkci atd. Dále je možné přistoupit k vývoji konceptů, jejich porovnání a výběru nejvhodnějšího konceptu. Následují fáze modelování, optimalizace, verifikace (ověření funkce).

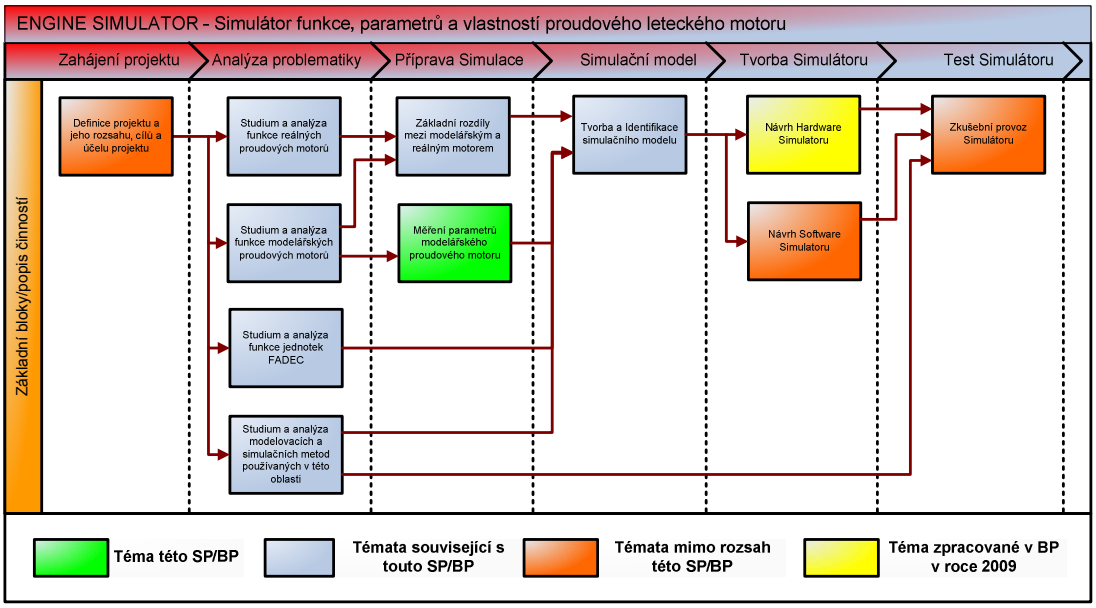


Obr. 1-1 Vývojový proces s využitím metod Six Sigma

Na základě této situace byl inicializován projekt Engine Simulator, který si klade ze cíl vytvoření simulátoru proudového motoru, který by umožňoval komplexní testování, ověřování a verifikaci funkce různých typů jednotek FADEC firmy Honeywell. Sekundární cíl je získat know-how v oblasti proudových motorů z

hlediska jejich funkce, způsobů řízení, diagnostiky a možnosti zvýšení výkonových parametrů. To ve svém důsledku zlepšuje ekonomiku provozu motoru a nezanedbatelný je také ekologický aspekt.

Jedná se o velice komplexní projekt, který integruje znalosti z různých oblastí a proto je nutné také k jeho řešení přistupovat komplexně. Rozsah projektu a rozdělení na základní bloky je zřejmé z **Obr. 1-2**



Obr. 1-2 Struktura projektu ENGINE SIMULATOR

Simulátor motoru JetCat P80 bude využit pro ověření konceptu simulátoru pro reálné motory. Parametry reálných motorů nejsou nyní dostupné, předpokládá se, že po ověření simulátoru na modelářském motoru budou data poskytnutá systémovými inženýry z USA implementována do simulátoru. Tak bude možné s dostatečnou přesností simulovat funkci reálných turbomotorů. Je zřejmé, že simulátor plně nenahradí testování FADECu na reálném motoru, integrační testy a flight testy FADECu musí být prováděny spolu s reálným motorem, který bude tímto FADECem řízen. Tento simulátor usnadní a zlevní hlavně vývoj a certifikační proces SW. Certifikace SW se provádí v širokém spektru simulovaných podmínek definovaných formou vstupů a výstupů.

V loňském roce byla zpracována bakalářská práce na téma: SIMULÁTOR LETECKÉHO MOTORU (ENGINE SIMULATOR) – NÁVRH HW. V této práci

byl navržen koncept simulátoru využívající software Matlab – Simulink s toolboxy „Real Time Windows Target“ v spolupráci s „Real Time Workshop“ a navrženým hardware je PC rozšířený o měřící karty NI PCI - 6733 (2x) a NI PCI - 6220 pro komunikaci v reálném čase. [1]

Úkolem této práce je návrh měřícího řetězce pro zjištění dílčích parametrů modelářského turbínového motoru P80 firmy JetCat USA (kompresorová mapa, charakteristika spalovací komory, turbínová mapa, tah motoru, průtok paliva) s ohledem na vybavení laboratoře firmy Honeywell, povahu měřených veličin a požadavků na přesnost měření. Dále je nutné navrhnout vhodný způsob automatizovaného sběru dat. Je nutné nejdříve měřený systém analyzovat a určit kritické parametry, které jsou nutné pro identifikaci modelu.
V úvodních kapitolách je provedena stručná analýza související problematiky.

2. FADEC

2.1 Základní charakteristika

FADEC je zkratka pro Full Authority Digital Engine Control, což volně přeloženo znamená: Plně autonomní digitální řízení motoru. Je to systém sestávající se z digitální řídící jednotky a dalšího souvisejícího příslušenství. Pro tuto jednotku se používá označení EEC (Electronic Engine Control - elektronické řízení motoru) nebo ECU (Electronic Control Unit - elektronická řídící jednotka) FADEC zohledňuje všechny aspekty chování motoru a provozní parametry. Tyto jednotky se používají pro řízení pístových i proudových motorů, jejich provedení se zásadně liší vzhledem k odlišnému způsobu řízení těchto motorů. FADEC dává povely všem systémům, které zajišťují správnou funkci moderních letadlových motorů v závislosti na poloze páky ovládání výkonu, nebo páky ovládání tahu.

Základním požadavkem na řízení motoru je, aby za daných podmínek pracoval s maximální účinností. Obtížnost tohoto úkolu odpovídá složitosti řízeného objektu. Jednotky FADEC se začali využívat v leteckém průmyslu pro řízení proudových motorů, potom však našli široké uplatnění i v dalších oblastech průmyslu. Tak vznikly různé modifikace těchto jednotek dle konkrétního použití.

K dokonalému pochopení funkce a struktury FADEC je důležité znát vývoj řídícího rozhraní leteckých motorů. Původní řídící systém leteckého motoru spočíval v jednoduché mechanické vazbě ovládané pilotem. Pohyb plynové páky byl přímo přenášen k motoru, prostřednictvím této páky pilot mohl ovládat průtok paliva do motoru a následně výkon motoru a další provozní parametry motoru. V podstatě se jednalo o analogové řízení motoru, kde řídící signál byl mechanický (posunutí, popřípadě úhel natočení).

S rozvojem systémů elektronického řízení letu FBW (Fly By Wire) se pro přenos informace o požadovaném nastavení aktuálních parametrů motoru začal využívat analogový elektrický signál. Používání tohoto principu znamenalo značné zlepšení vzhledem k mechanickému řízení, avšak přinášelo s sebou i problémy týkající se zejména vzájemného ovlivňování a rušení přenášených signálů. Tento systém byl používán například u známého nadzvukového dopravního letadla Concorde.

Dalším krokem ve vývoji v této oblasti byl přechod k digitálnímu elektronickému řízení, které přineslo další možnosti v oblasti řízení motorů. NASA a Pratt & Whitney začaly vyvíjet první jednotky FADEC. Od poloviny osmdesátých let se tyto jednotky začaly běžně používat. [2]

2.2 Funkce

Ve skutečnosti v případě Plně autonomního digitálního řízení motoru, by nesmělo být umožněno žádné ruční nouzové ovládání. Plně autonomního digitálního řízení provozních parametrů motoru je realizováno řídícím počítačem. V případě naprostého selhání FADECu, dojde následně k poruše funkce motoru. V případě digitálního elektronického řízení motoru, které umožňuje ruční nouzové ovládání se jedná pouze o EEC.

Existují různé přístupy k autonomnosti ovládání motoru. Letadla Boeing mají systém, kde signály generované pilotem mají vyšší prioritu a mohou anulovat signály řídící jednotky FADEC. Letadla Airbus využívají systém, kde FADEC má skutečně plnou autoritu a řídící jednotka ignoruje vstupy, které jsou nevhodné nebo mohou být nebezpečné. V každém případě lze konstatovat, že základní filozofií jednotek

FADEC je, že řízení motoru je plně automatizováno a je realizováno autonomní řídící jednotkou.

ECU funguje jako nezávislý systém, který nezávisle řídí všechny provozní parametry motoru dokud nedojde k vnějšímu zásahu z nadřazeného řídícího systému. ECU je částí FADECu, ale není FADEC sám o sobě.

Do FADECu vstupuje soubor vstupních proměnných obsahující informace o aktuálních letových podmínkách. Jedná se o hustotu vzduchu, polohu plynové páky, aktuální provozní teploty motoru, aktuální provozní tlaky motoru a další. Tyto vstupní data jsou analyzovány a zpracovány jednotkou ECU, cyklus zpracování probíhá obvykle 70-krát za sekundu.

Na základě těchto vstupních parametrů jsou vypočteny provozní parametry motoru jako například průtok paliva, poloha statorových lopatek, poloha odpouštěcích ventilů a mnoho dalších. Tyto provozní parametry jsou nastaveny prostřednictvím příslušných akčních členů motoru na základě signálů z FADECu.

FADEC také zajišťuje startovací a vypínací sekvenci motoru. Hlavním cílem jednotky FADEC je zajišťovat optimální účinnost funkce motoru pro dané letové podmínky. Další výhodou je, že umožňuje naprogramovat limitní parametry motoru dle doporučení výrobce a zajistit, aby nebyly překročeny, což zvyšuje životnost a spolehlivost motoru. Poskytuje také důležité informace o stavu motoru pro sledování jeho stavu a údržbu. Například pro udržení určité teploty motoru v přípustných mezích je prováděno kontinuální měření teploty a FADEC provede opatření, aby k překročení mezních hodnot nedošlo. Vše je prováděno automaticky bez zásahu pilota.

2.3 Požadavky na bezpečnost a spolehlivost

Řídící jednotky FADEC patří do oblasti řídících systémů se zvýšenými požadavky na spolehlivost jak ve smyslu vyšší funkceschopnosti, tak vyšší bezpečnosti. Jedná se o kategorii systémů odolných proti poruše FT (Fault Tolerant Systems). Vysoce spolehlivé systémy jsou realizovány jako redundantní paralelní systém. Zálohování je realizováno dvěmi oddělenými identickými digitálními kanály. Každý kanál je schopen poskytovat všechny funkce řízení motoru bez

omezení. FADEC také monitoruje celou řadu analogových, digitálních a diskrétních signálů přicházejících z jednotlivých motorových subsystémů a souvisejících leteckých systémů a realizuje FT řízení motoru. Zdvojené jsou obvykle signály potřebné pro řízení a signály zpětných vazeb. Monitorovací signály zdvojené nejsou. Systém FADEC monitoruje podmínky práce motoru a jeho okamžitý stav, je schopen identifikovat závady a poruchy, vyhodnocovat je a signalizuje doporučení pro piloty jak odstranit nebezpečné stavy. FADEC obsahuje rozsáhlý algoritmus identifikace poruchy s výběrem způsobu minimalizace vlivu závady nebo poruch na provoz. Analytický model systému má náhradní řešení pro kritické stavy a algoritmus logického výběru nejlépe pracujících okruhů. Dále systém nepřetržitě informuje piloty o vlastním stavu. Spolehlivost systému FADEC je pochopitelně vyšší než systémů hydromechanických.

Prostředky vysoké spolehlivosti:

- mechanické prvky - jednoduché, bez zálohy
- senzory - zdvojené
- konektory a elektronické vedení - zdvojené
- snímače otáček rotorů - vícenásobné
- snímače teploty spalin - jednoduché, sério-paralelní zapojení termočlánků
- ECU - zdvojená

Zabezpečení energie:

- zdvojené napětí 30 V, odebírané z pomocné energetické jednotky APU (Auxiliary Power Unit), zálohované motorovým alternátorem po spuštění motoru
- zdvojené napájení z letadlové baterie pro testování před spuštěním, během procesu spouštění a zálohování při normálním provozu
- vnější zdroj napájení slouží při zkouškách bez spouštění motoru [3]

2.4 Použití

Typické použití a funkce jednotky FADEC je vysvětleno na příkladě aplikace v civilním dopravním letadle. Pilot nejprve zadá příslušná data pro aktuální let do FMS (Flight Management System). Na základě atmosférických a okolních podmínek

jako je teplota, rychlost a směr větru, délka a stav runwaye, požadovaná letová hladina atd. FMS vypočítá výkonová nastavení pro jednotlivé fáze letu. Pro vzlet pilot posune páku ovládání tahu (která nemá žádnou mechanickou vazbu s motorem) do vzletové polohy nebo navolí automatické ovládání tahu pro vzlet, jestliže to systém umožňuje. FADEC využije informace o vzletovém tahu z FMS a nastaví ji na motoru. Pilot posílá pouze elektronický signál motorům, není zde žádná přímá vazba řídící průtok paliva. Stejný proces se opakuje při klesání, letu cestovní rychlostí a ostatních fázích letu. Během letu FADEC realizuje regulační zásahy do funkce motoru pro dosažení vysoké účinnosti pohonné jednotky. Maximální tah motorů je dostupný pro nouzové situace, avšak i v těchto režimech nedojde k překročení limitních parametrů motorů. Pilot nemá žádnou možnost manuálního ovládání motoru, a i když FADEC vykoná akci se kterou pilot nesouhlasí, musí ji akceptovat.

Jednotky FADEC jsou využívány u většiny současných proudových motorů letadel a vrtulníků a stále častěji se začínají využívat i u pístových leteckých motorů.

U turbovrtulových motorů jsou funkce systému FADEC doplněny o řízení natáčení listů vrtule a omezení jejích otáček. Ovládací páky, které generují vstupní žádané hodnoty pro FADEC, mohou být u těchto motorů i tři: výkonová, uzavírání paliva a nastavení otáček vrtule. Mezi hlavními měřenými veličinami budou otáčky vrtule a kroutící moment. Ovládání kompresoru bude záviset na jeho konstrukci.

Proudové a dvouproudé motory mají navíc například ovládání obraceče tahu a řízení radiální vůle rotorových lopatek turbíny.

U pístových leteckých motorů řízených FADECem je možné odstranit magneta, eliminovat oteplení karburátoru. Magneto je součást značně nespolehlivá a náročná na údržbu. FADEC zajišťuje řízení směsi a zapalování. Řízení každého válce motoru pro optimální vstřikování paliva a časování zapalování je nezávislé a nevyžaduje, aby pilot nastavoval a kontroloval řízení směsi. Protože nepřesné nebo nesprávné řízení směsi má zásadní vliv na životnost motoru, umožní jednotka FADEC redukovat provozní náklady a zvýšit životnost běžně používaných leteckých motorů. Testy také potvrzují možnost značných úspor paliva. Z toho je zřejmé že vyšší investiční náklady při použití jednotky FADEC mají rychlou návratnost.

2.5 Hardwarové provedení a struktura

Elektronické obvody řídící jednotky FADEC jsou umístěny ve skříni z eloxovaného hliníku, která zaručuje odolnost proti otřesům, vibracím a vlhkosti. Připojovací konektory jsou nerezové s vodivým těsněním, montážní jednotka elektronických obvodů je zapouzdřena máčením. Tato jednotka je navržena a testována pro extrémní okolní teploty od –20°C až +60°C.

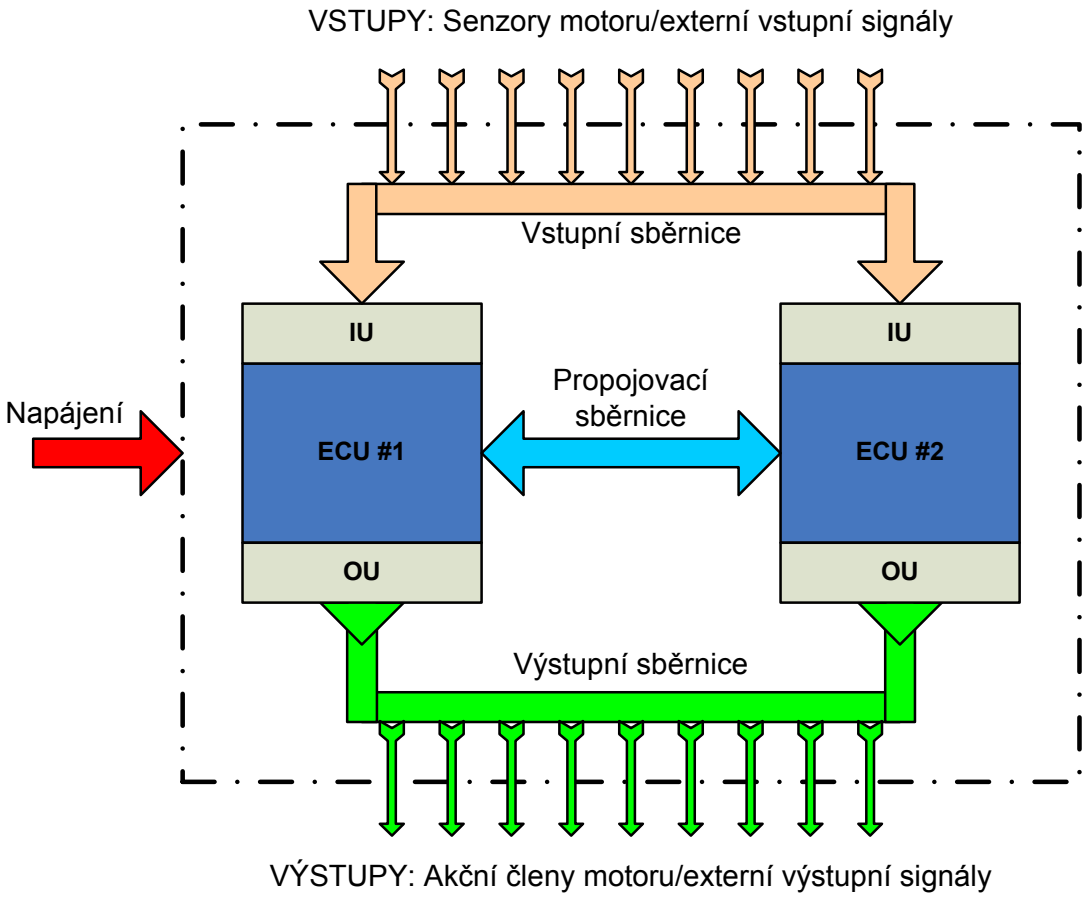
U jednotky jsou prováděny klimatické zkoušky dle příslušných norem. Prověřuje se vodotěsnost, odolnost proti ledu, vlhkosti, proti korozi.

Možné provedení jednotky je na **Obr. 2-1**

Obr. 2-1 Příklad provedení jednotky FADEC

Vnitřní struktura je naznačena na **Obr. 2-2**. Na sběrnici vstupů jsou přivedeny signály ze senzorů instalovaných na motoru a externí signály z letadlových systémů. Tyto signály jsou paralelně zpracovávány vstupními jednotkami IU (Input Unit) obou ECU, které spolu komunikují prostřednictvím propojovací sběrnice.

Výstupní signály příslušné aktivní ECU jsou prostřednictvím výstupní jednotky OU (Output Unit) přivedeny na výstupní sběrnici. Tyto signály jsou přivedeny na příslušné akční členy, které generují vlastní akční zásahy potřebné pro řízení motoru. Další skupinu výstupních signálů tvoří zpětné signály pro letadlové systémy. Napájení jednotky je realizováno z několika nezávislých zdrojů.



Obr. 2-2 Blokové schema vnitřní struktury jednotky FADEC

2.6 Zhodnocení

Výhody:

- Lepší účinnost spalování
- Automatická ochrana motoru proti provozu v pásmu mimo provozní parametry
- Zvýšená bezpečnost zajištěná vícekanálovým provedením FADECu a zálohováním senzorů
- Snadnější ovládání motoru s garantovanými hodnotami nastavení tahu

- Možnost použití pro široký rozsah požadovaného tahu pouhým přeprogramováním jednotky FADEC
- Zajišťuje poloautomatický start motoru
- Lepší integrace řízení motoru do letadlových systémů
- Poskytuje stálou, dlouhodobou kontrolu a diagnostiku stavu motoru a provozních podmínek, lokalizaci poruch včetně včasného upozornění na potřebu údržbových prací
- Využívání většího počtu externích a interních parametrů při regulačních procesech
- Snižuje zatížení posádky během letu, protože redukuje počet parametrů, které musí posádka sledovat
- Díky monitorování velkého množství parametrů, FADEC poskytuje FT systém (tento systém pracuje bezpečně a spolehlivě i při poruše díky jistým vnitřním opatřením při poruchových stavech
- Podporuje odezvy motoru a letadla na nouzové stavy (např.: automaticky zvýší tah při ztrátě rychlosti)

Nevýhody:

- Náročnější proces při návrhu, výrobě, instalaci a údržbě senzorů, které indikují letové a motorové parametry využívané vlastním řídícím systémem
- Náročnější proces při návrhu, implementaci a testování SW využívaného v těchto řídících systémech s vysokými požadavky na bezpečnost
- Vyšší cena zařízení ve srovnání s konvenčními technologiemi řízení motorů

3. IDENTIFIKACE SYSTÉMU

Řízeným systémem je v tomto případě proudový motor. V současné době pohánějí převážnou většinu dopravních letounů dva hlavní typy turbínových motorů: turbovrtulové a dvouproudé. Turbohřídelové motory jsou pohonnými jednotkami vrtulníků. Tahová síla pohonné jednotky, jejímž základem je turbínový motor, vzniká

silovým působením propulsní soustavy pohonné jednotky na propulsní látku a je využita pro urychlení pohybu letounu.

Vysoké účinnosti a výkonů moderních tryskových motorů bylo dosaženo stálými snahami soustředěnými na technologická zlepšení jednotlivých komponentů motorů a materiálů, z kterých jsou tyto komponenty vyráběny. Nyní je zřejmé že není další prostor ke zlepšení v této oblasti a že bylo dosaženo limitů současných technologií. Nicméně existuje další možnost vedoucí ke zlepšení parametrů motorů a to prostřednictvím využití sofistikovaných způsobů řízení motorů. Současné motory pracují s dostatečnými činitely bezpečnosti, jako například bezpečnostní pásma teplot od limitních hodnot a bezpečnostní pásma tlaků od limitních hodnot pumpáže beroucí v úvahu variace parametrů jednotlivých motorů, zhoršení jejich vlastností během provozu vlivem opotřebení, chyby akčních členů a senzorů apod. V případě, že provozní parametry motoru jsou přesně identifikovány, řídící systém umožní redukci šířky bezpečnostních pásem a zlepšení výkonových parametrů motoru prostřednictvím využití těchto skrytých rezerv motoru. Identifikace systému (motoru) hraje velice důležitou roli v těchto sofistikovaných řídících systémech, a stane se velice důležitou součástí nové generace řídících jednotek FADEC [4]

Moderní metody návrhu řídících systémů jsou téměř výhradně postaveny na znalosti chování řízeného objektu či procesu ve formě fyzikálního modelu. V některých případech jsme schopni využít fyzikální zákony k odvození formálních matematických modelů. Proces vytváření modelu na základě apriorní informace se nazývá modelováním. Může se ovšem stát, že vzhledem ke složitosti systému či jiným okolnostem apriorní informace o chování modelovaného objektu chybí nebo je neúplná. V tomto případě lze zahájit experimenty na systému, pokud je tento systém dostupný. Tento postup nelze použít pro analýzu systémů, které jsou v procesu vývoje, a neexistuje doposud jejich fyzická realizace. Měřením se získávají odezvy na různé uměle vytvořené testovací signály, kterými systém budíme, nebo měříme jeho chování přímo za provozu jako pasivní pozorovatelé. Místo metod modelování se používají metody Identifikace, tj. zpracování naměřených dat z procesu s cílem najít vhodný typ modelu, zjistit jeho strukturu a nakonec identifikovat jeho parametry z naměřených dat. Identifikace se nepoužívá jen pro účely simulace a

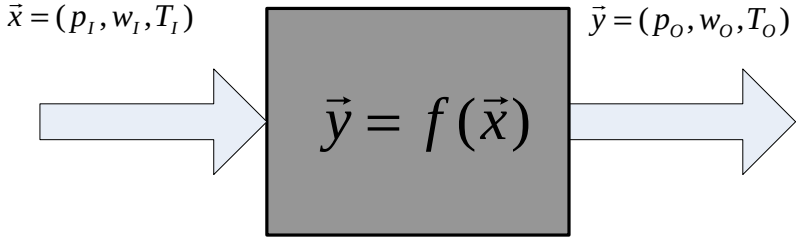
návrhu řídících systémů, používá se také v dalších oblastech, kde formální modely s parametry získanými z dat umožní hlubší poznání systémů, predikci jejich chování do budoucna či změnu konstrukce nebo optimalizace funkce, pokud se jedná o inženýrský systém. [5]

Tvorba modelu turbomotoru v Matlabu je mimo rámec této práce, která je zaměřena na analýzu systému (turbomotoru) a zvolení parametrů nutných pro jeho identifikaci. Dále je nutné navrhnout optimální metody pro měření vybraných parametrů.

3.1 Metodika popisu systému

Turbínový motor je v podstatě tepelný motor využívající vzduch jako pracovní látku k produkci tahu. K dosažení tahu je nutné urychlit vzduch proudící skrz motor. To znamená, že rychlost respektive kinetické energie vzduchu musí být zvýšena. V průběhu pracovního cyklu motoru je do proudícího vzduchu přidáváno palivo a vzduch je zahříván, proto se označuje jako plyn a tato turbína se také nazývá plynová turbína. Během cyklu motoru je v kompresoru zvýšena tlaková energie plynu a následně je energie systému navýšena dodáním tepelné energie před tím než je ve výstupní trysce energie systému konvertována na kinetickou energii ve formě plyny proudícího vysokou rychlostí výstupní tryskou. Tento proces je kontinuální čímž je dosaženo plynulého chodu a vysoké účinnosti tohoto motoru. [6]

Během činnosti plynové turbíny plyn procházející jednotlivými stupni přijímá a odevzdává teplo a dochází ke změnám stavových parametrů plynu což jsou teplota, tlak a objem. Vzhledem k tomu že se jedná o kontinuální proces je lépe pro popis systému využít místo objemu hmotnostní průtok plynu. Transformační blok, kterým je možno modelovat jednotlivé komponenty systému motoru je naznačen na **Obr.3-1**

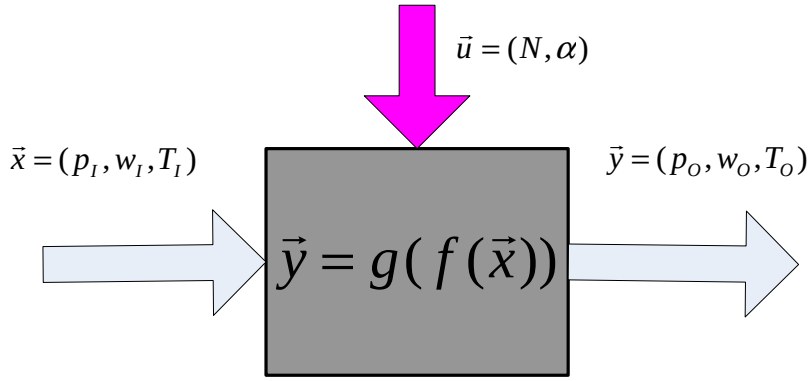


Obr. 3-1 Termodynamický transformační blok

Tento způsob modelování je značným zjednodušením fyzikální reality, která je poměrně složitá. Pro popis jednotlivých komponentů a výsledného chování systému je plně postačující. Základní předpoklady této metody jsou:

- Průtok plynu je jednodimensionální
- Specifické teplotní konstanty se nemění v závislosti na tlaku a teplotě
- Pracovní látka je modelována ideálním plynem
- V kompresoru a turbíně probíhá adiabatický děj (isoentropický)

Systém je modelovaný pomocí funkčních transformačních bloků propojených v sérii. Ve funkčním bloku dochází k nelineární transformaci stavového vektoru plynu vstupujícího do bloku. [7]



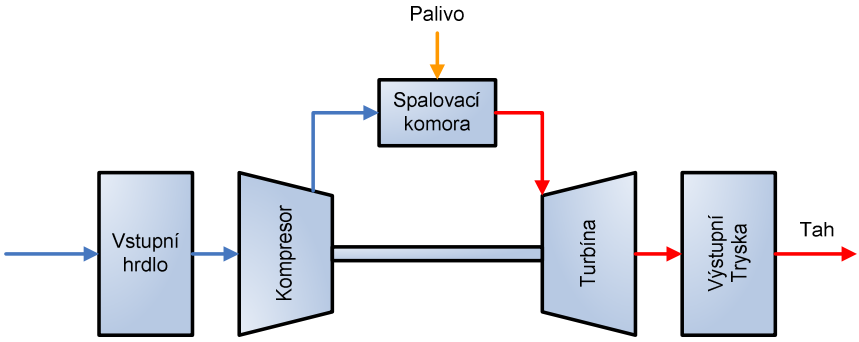
Obr. 3-2 Termodynamický parametrický transformační blok

Některé komponenty simulačního řetězce jsou parametrické a umožňují plynule nebo skokově měnit podmínky transformace. Příkladem tohoto bloku je například kompresor, jehož aktuální funkční parametry jsou parametrizované otáčkami rotoru, popřípadě změnou jeho geometrie. Do tohoto bloku vstupuje navíc vektor řízení $\vec{u}$, který obsahuje tyto řídící parametry. Příklad tohoto bloku je zobrazený na **Obr. 3-2**.

3.2 Analogie mezi reálným motorem a modelářským motorem

Modelářský turbínový motor je principielně analogický reálnému turbínovému motoru. Na **Obr. 3-3** je blokové schema modelářského turbomotoru. Vzduch vstupuje vstupním hrdlem do jednostupňového kompresoru, kde dojde k jeho stlačení. Ve spalovací komoře je do stlačeného vzduchu vstřiknuto palivo které je zapáleno. Plyn za spalovací komorou roztáčí turbínu, která je na společné

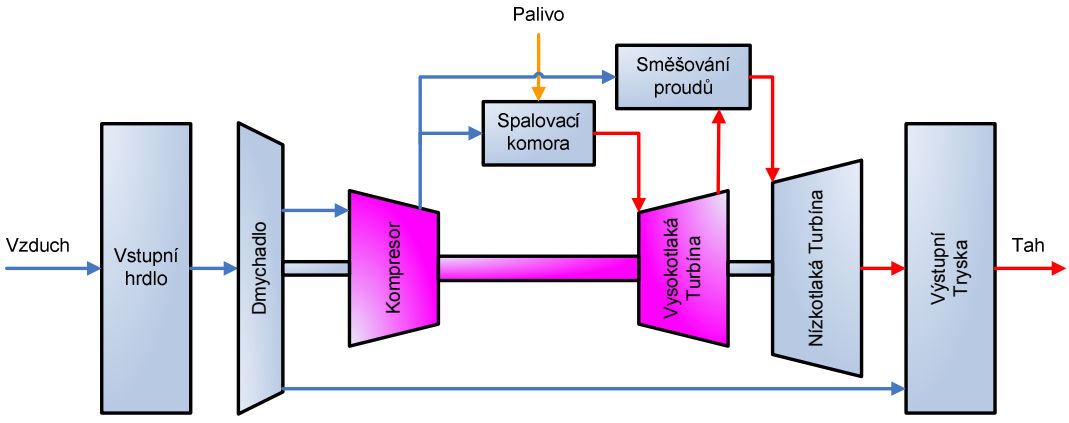
hřídeli kompresorem, dále pokračuje do výstupní trysky. Plyn vystupující vysokou rychlostí z výstupní trysky produkuje tah motoru.



Obr. 3-3 Blokové schema modelářského turbomotoru

Turbínové motory se vyskytují v celé řadě modifikací, v každé konfiguraci je však obsažena základní jednotka Kompresor-Spalovací komora-Turbína. Modifikace motorů spočívá v různém uspořádání rotorových soustav a vedení jednotlivých proudů plynu a jejich směšování. Konečné uspořádání je závislé na aplikaci motoru, některé varianty umožňují i vektorové řízení tahu. Blokové schema turbodmychadlového motoru je uvedeno na **Obr. 3-4**. Tento motor má dvě rotorové soustavy, s rozdílnými provozními otáčkami. Kompresor, spalovací komora a vysokotlaká turbína vykonává stejnou funkci jako v případě zjednodušeného modelářského motoru. Turbodmychadlové motory se používají u větších civilních letadel, kde je tento způsob pohonu vzhledem k cestovní rychlosti velice efektivní.

Lze konstatovat, že modelářský motor reprezentuje základní funkci reálného turbomotoru, proto ho lze úspěšně použít k ověření simulátoru a identifikaci modelu, který bude pro simulaci použit.



Obr. 3-4 Blokové schema reálného turbodmychadlového motoru

Modelářské turbínové motory jsou často využívány pro výzkumné a didaktické účely na univerzitách. Na univerzitě v Liège v Belgii využívají modelářský motor SR-30 Turbotechnology Ltd. s maximálním tahem 140 N. Tento motor slouží k podpoře výuky propulsních soustav, původně se ovládal pouze manuálně. Tento motor byl doplněn řadou senzorů, které umožňují studentům získat zkušenosti s měřením, sběrem dat a jejich interpretací. Dále byla doplněna elektronická řídící jednotka motoru, která využívá systém adaptivní regulace. Pro zkoumání chování motoru v různých provozních režimech bylo nutno měřit a řídit průtok vzduchu na vstupu do motoru, proto byl před vstup do kompresoru doplněno rozváděcí lopatkový kolo s manuálním nastavováním. Pro studium chování motoru v závislosti na průřezu výstupní trysky byla původní výstupní tryska prodloužena a opatřena klapkami, které umožňují redukovat výstupní průřez trysky v rozsahu 0 ÷ 20 %. Nastavování je manuální popř. pomocí DC motoru, který je součástí řídící smyčky. [8]

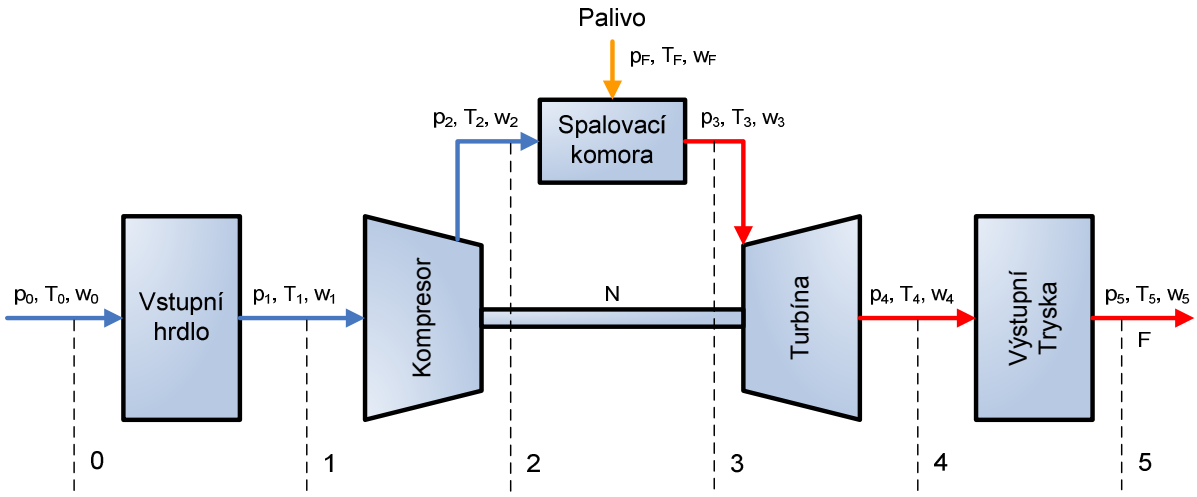
Na Crandfieldské univerzitě, Bedfordshire v Anglii byla prováděna simulace vlivu odpouštění vzduchu z motoru na jeho funkci a dynamiku. Simulace byla prováděna metodou sledování změny objemů mezi jednotlivými stupni (komponenty motoru) v MATLAB/Simulink. Výsledky simulace byly experimentálně ověřeny prostřednictvím AMT (Advanced Micro Turbine) Olympus z Holandska, což je malý proudový motor s maximálním tahem 190 N. Je to motor s radiálním kompresorem, axiální turbínou, jednou rotorovou soustavou. Výsledky zjištěné simulací se liší maximálně o 5% od experimentálně zjištěných výsledků, při nominálních podmínkách odpouštění vzduchu. [9]

3.3 Parametry turbínového motoru

Na **Obr. 3-5** jsou uvedeny stavové parametry plynu na jednotlivých stupních motoru, dále tlak, teplota a hmotnostní průtok paliva. Mechanické parametry jsou otáčky rotorové soustavy, tah motoru.

Z hlediska řízení a monitoringu motoru rozlišujeme primární a sekundární parametry turbomotoru.

Primární parametry jsou: Teplota výstupních plynů EGT (Engine Gas Temperature), Otáčky Rotorové soustavy RPM (Revolutions Per Minute), Průtok paliva FF (Fuel Flow) Mezi sekundární parametry patří teploty a tlaky v jednotlivých motorových stupních.



Obr. 3-5 Parametry jednotlivých stupňů motoru

Pro modelování a identifikaci turbínového motoru lze parametry rozdělit do několika skupin:

3.3.1 Parametry charakterizující okolní prostředí

- Okolní tlak (atmosférický tlak) p_0
- Okolní teplota T_0
- Relativní hustota atmosféry
- Rychlost zvuku
- Specifická a relativní vlhkost

Výkonové a další provozní parametry motorů jsou uváděny za předpokladu že motor pracuje ve standardní atmosféře ISA (The International Standard Atmosphere), která je definována Americkou normou MIL210

Pro motory testované na zemi definuje ISO 2533, norma tyto podmínky:

p_0 = 101,325 kPa (na úrovni moře)

T_0 = 15 °C

Relativní vlhkost 60%

Nulové tlakové ztráty způsobené instalací motoru

Charakteristiky motorů, nebo jejich subsystémů (kompresory, turbíny) jsou uváděny pro provoz za těchto podmínek. Pro jiné okolní podmínky je třeba přepočítat průtok, otáčky atd. pomocí korekčních vzorců na takzvané redukované hodnoty (v anglické literatuře označované „corrected values“)

3.3.2 Stavové parametry plynu a paliva v jednotlivých stupních motoru

- Teploty vzduchu, plynu, paliva
- Objem/hmotnostní průtok vzduchu, plynu, paliva
- Tlak vzduchu, plynu, paliva

3.3.3 Mechanické parametry

- Otáčky rotorové soustavy
- Tah motoru

3.4 Hlavní měřené parametry

Z předchozí kapitoly je zřejmé, že i v případě zjednodušené varianty reálného turbomotoru, kterou je modelářský motor by bylo nutno měřit velké množství parametrů. Pro řízení popř. identifikaci motoru to však není nutné. Dále je také nutné vzít v úvahu, že měření průtoku v jednotlivých stupních nelze realizovat. Průtok lze měřit pouze na vstupu motoru a za výstupní tryskou. I v těchto případech je měření obtížně realizovatelné.

Vzhledem k tomu, že v případě modelářského motoru je vstupní hrdlo krátké a v podstatě tvoří plášť kompresoru, lze tento prvek v modelovacím řetězci zanedbat, protože zde nedochází ke změně teploty ani průtoku a tlaková ztráta je v tomto případě zanedbatelná.

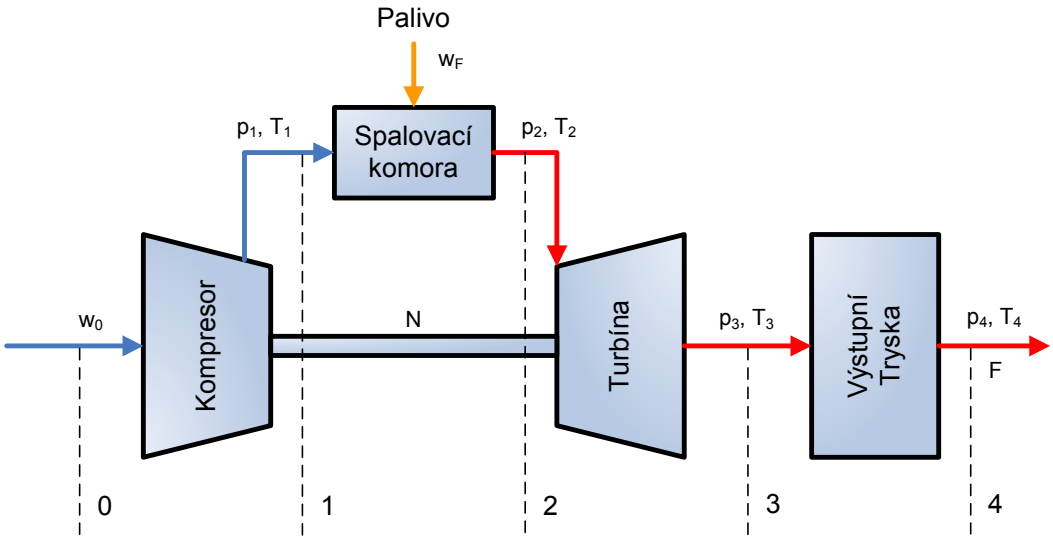
Hlavní měřené parametry modelářského motoru jsou uvedeny v **Tabulce 3-1** a jejich rozložení je zřejmé z **Obr. 3-6**.

Tlak a teplota před a za kompresorem jsou důležité pro určení jeho charakteristik. Stejné je to i u turbíny. V některých případech však není možné měřit teplotu a tlak za turbínou (bod 3 v obrázku) a místo toho se používají hodnoty na výstupu z motoru (bod 4 v obrázku). Do jaké míry je toto zjednodušení přípustné závisí na provedení výstupní trysky. Teploty T_3 a T_4 se nebudou zásadně lišit. Tlaky

p_3 a p_4 jsou však odlišné a charakterizují výstupní trysku. V některých reálných aplikacích na modelářských motorech je teplota na výstupu motoru EGT z konstrukčních důvodů pro umístění senzoru měřena mezi body 3 a 4.

Stupeň	Parametr	Označení		Jednotky
0	Množství vzduchu nasávaného do motoru	w_0		[$kg.s^{-1}$]
1	Teplota vzduchu za kompresorem	T_1		[℃]
	Tlak vzduchu za kompresorem	p_1		[Pa]
2	Teplota plynu před turbínou	T_2		[℃]
	Tlak plynu před turbínou	p_2		[Pa]
3	Teplota plynu za turbínou	T_3		[℃]
	Tlak plynu za turbínou	p_3		[Pa]
4	Teplota plynu na výstupu motoru	T_4	EGT	[℃]
	Tlak plynu na výstupu motoru	p_4		[Pa]
/	Množství paliva vstupujícího do spalovací komory	w_F	FF	[$kg.s^{-1}$]
/	Otáčky rotorové soustavy Kompresor-Turbína	N	RPM	[min^{-1}]
/	Tah motoru	F		[N]

Tabulka 3-1 Hlavní měřené parametry motoru



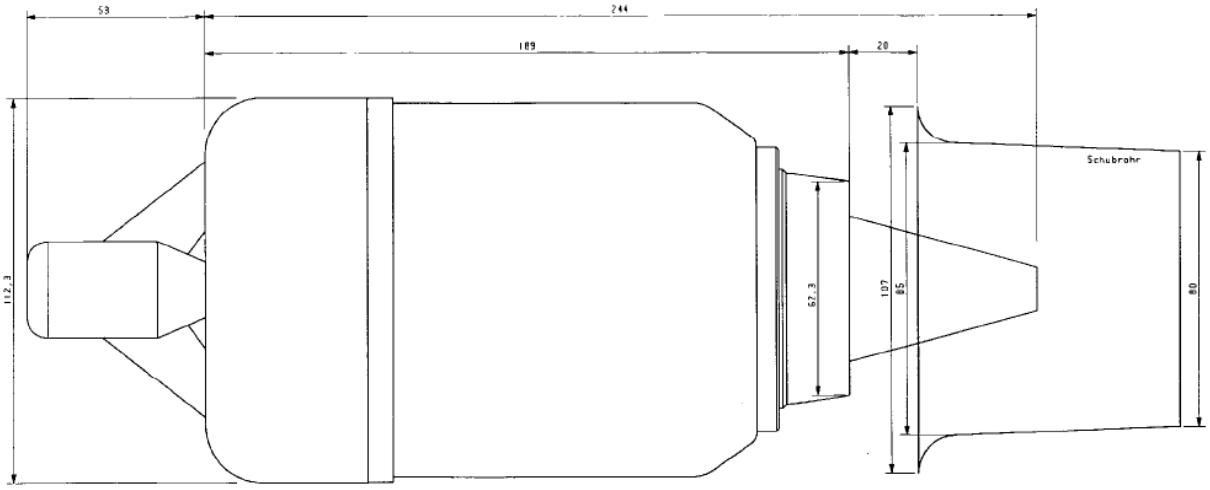
Obr. 3-6 Hlavní měřené parametry motoru

4. DÍLČÍ PARAMETRY MOTORU P80 JetCAT

4.1 Základní popis motoru

Jedná se o modelářsky turbínový motor který vyrábí německá firma JetCAT pod typovým označením P-80SE. **Obr. 4-1** Tento motor se běžně používá pro pohon modelů letadel a někdy i lodí. Je to motor s jedním proudem a jednou rotorovou soustavou, radiálním kompresorem a axiální turbínou. Rozměry a tvar motoru je zřejmý z **Obr. 4-2**. Funkce motoru a jeho obsluha a řízení je do značné míry analogická funkci a řízení reálného turbínového motoru, pouze některé subsystémy motoru jsou zjednodušené nebo se nepoužívají vůbec. Například reálný turbínový nebo turbodmychadlový motor obsahuje relativně složitý mazací subsystém, ve kterém je instalováno několik senzorů tlaku a průtoku pro monitorování správné funkce tohoto systému. Dostatečné mazání ložisek rotačních soustav a dalších pohyblivých komponentů je základním předpokladem pro správnou funkci motoru a dosažení vysoké účinnosti a životnosti celého zařízení. V případě modelářského motoru je tato funkce zajištěna pouze přidáním 5% syntetického turbínového oleje do paliva. Tento motor bude sloužit pro seznámení se s funkcí a obsluhou turbínových motorů a následně na něm bude prováděno měření potřebné pro identifikaci modelu.

Obr. 4-1 Modelářsky turbínový motor P-80SE



Obr. 4-2 Modelářsky turbínový motor P-80SE – základní rozměry

Motor je řízen prostřednictvím regulace množství přiváděného paliva do motoru FF, signály zpětné vazby představují otáčky rotorové soustavy RPM a teplota výstupních plynů EGT. Tyto parametry nepřímo reprezentují aktuální tah motoru. Otáčky rotorové soustavy jsou limitovány maximálními provozními otáčkami, které jsou určeny s ohledem na pevnost rotorů a maximální obvodové rychlosti listů rotorů. Teplota výstupních plynů je limitována použitými materiály s ohledem na jejich pevnost a mechanické vlastnosti a teplotní roztažnosti v závislosti na teplotě.

Parametr	SI jednotky	US jednotky
Tah motoru	98 N při 125 000 min^{-1}	22lb @ 125 000 RPM
Hmotnost (včetně startéru)	1,32 kg	2,9 lb
Rozsah otáček	(35 000 ÷ 125 000) min^{-1}	(35 000 ÷ 125 000) RPM
Teplota výstupních plynů	(580 ÷ 690) ℃	(1076 ÷ 1274) ℉
Spotřeba paliva (při plném výkonu)	0,255 $kg.min^{-1}$	9 $oz.min^{-1}$
Palivo	Kerosin 1-K, Jet A1	
Mazání	5% syntetického turbínového oleje v palivu	
Interval údržby	25 hodin	

Tabulka 4-1 Parametry motoru JetCat P80

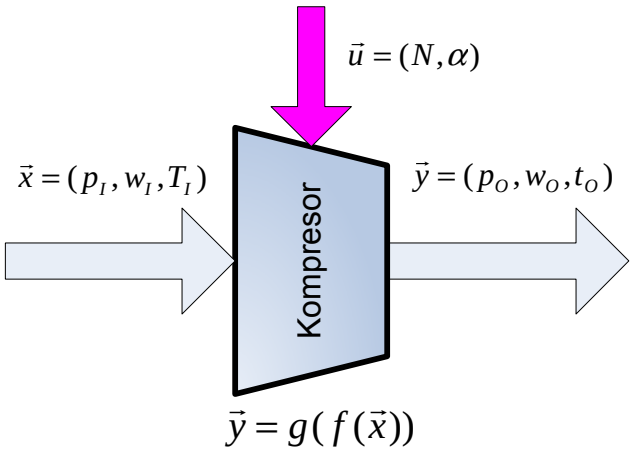
Základní parametry tohoto motoru jsou uvedeny v **Tabulce 4-1.** V našem případě jsou mimo jiné důležité pro správné určení typů a rozsahů použitých senzorů. Zvláště kritické jsou teploty, které dosahují až 700°C, tlaky nejsou extrémní, ale je nutno vzít v úvahu vysoké teploty při instalaci tlakových senzorů. Statické tlaky

měřené v jednotlivých stupních motoru lze vyvést pomocí trubiček ven z motoru, kde tlakový senzor nebude vystaven extrémním teplotám.

V následujících kapitolách je popis jednotlivých základních komponentů (funkčních bloků) turbomotoru a jejich charakteristik. Dále je vysvětlen tah motoru, který je jeho základním parametrem a také průtok paliva, který má na aktuální tah motoru zásadní vliv a u modelářských motorů představuje akční zásah, kterým je funkce motoru řízena.

4.2 Kompresorová mapa

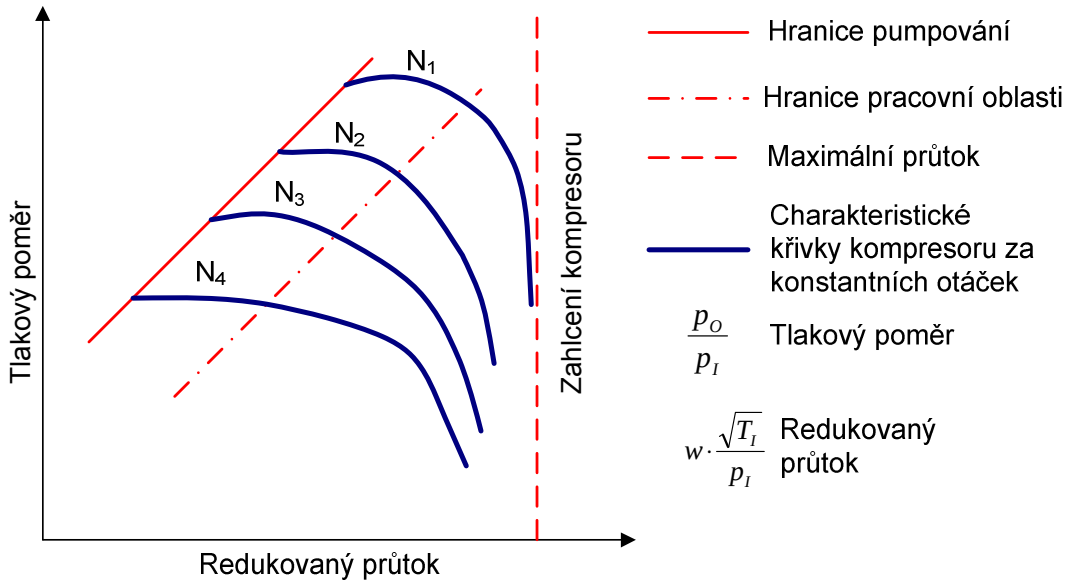
Kompresor je zařízení, které transformuje mechanickou energii na tlakovou energii plynu. Z **Obr. 4-3** je zřejmé jak dochází ke změně stavových parametrů plynu vstupujícího do kompresoru. Tuto měnu lze ovlivňovat pomocí vektoru řízení $\vec{u}$, který obsahuje otáčky kompresoru N, v případě kompresorů s variabilní geometrií statorových nebo rotorových lopatek obsahuje také úhel natočení lopatek.



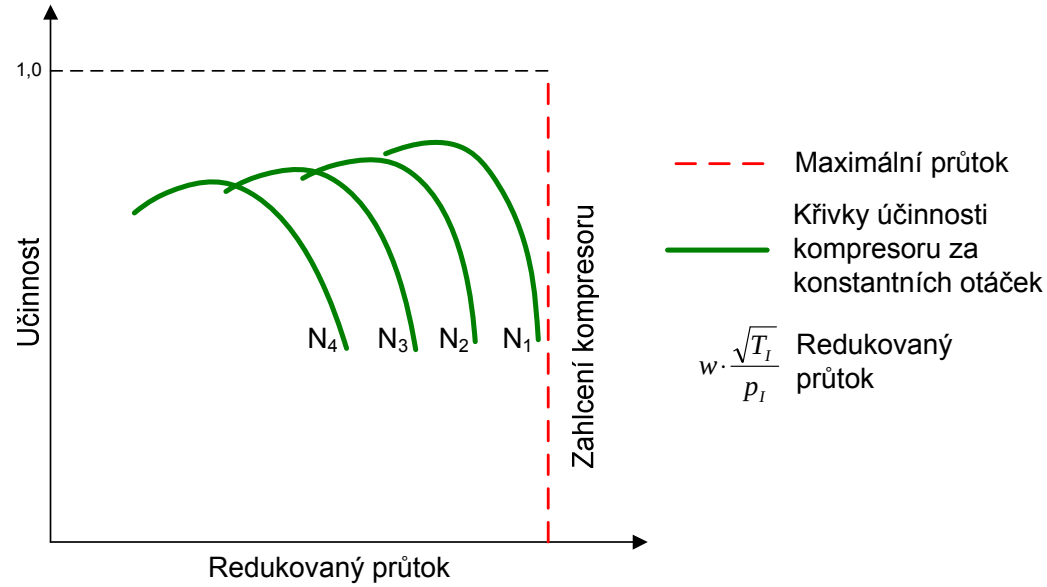
Obr. 4-3 Kompresor – transformační blok

Vlastnosti kompresoru a jeho chování v různých provozních režimech se uvádí pomocí tzv. Kompresorové mapy neboli Charakteristických křivek kompresoru. Na **Obr. 4-4** jsou charakteristické křivky vyjadřující závislost tlakového poměru na průtoku při různých provozních otáčkách. Na dalším **Obr. 4-5** jsou uvedeny charakteristické křivky účinnosti také při různých provozních otáčkách. V některé literatuře se obě charakteristiky uvádí v jednom grafu, tento způsob

zobrazení není však příliš vhodný vzhledem k značné nepřehlednosti tohoto zobrazení, obsahuje však stejné informace. [6]



Obr. 4-4 Charakteristické křivky: Tlakový poměr/průtok

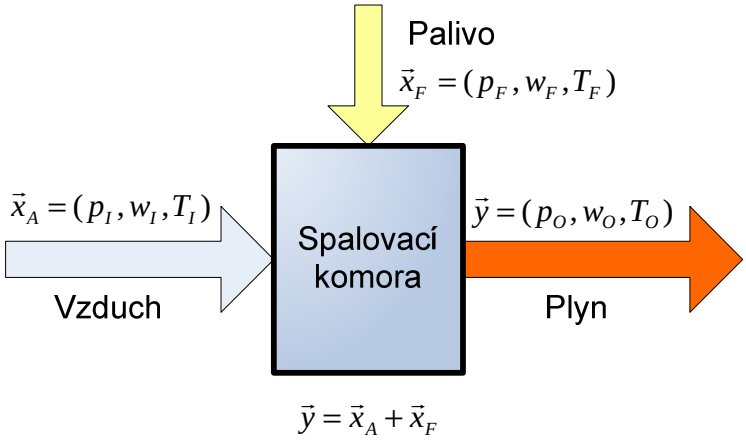


Obr. 4-5 Charakteristické křivky účinnosti

Pro konstrukci těchto křivek je nutné měřit tlak a teplotu na vstupu a výstupu z kompresoru, průtok vzduchu kompresorem, jeho otáčky, popř. nastavení jeho geometrie.

4.3 Charakteristika spalovací komory

Spalovací komora turbínového motoru je zařízení, ve kterém probíhá transformace chemické energie paliva na energii tepelnou, vzniklou hořením paliva smíšeného se vzduchem dle **Obr. 4-6.** Tato energie se projeví zvýšením teploty vzduchu vstupujícího do spalovací komory T_I na teplotu výstupního plynu T_O.



Obr. 4-6 Spalovací komora – transformační blok

Hmotnostní průtok na výstupu w_O je dán součtem průtoku vzduchu na vstupu w_I a průtoku paliva w_F. dle vzorce (1).

$$w_0 = w_I + w_F \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{ }] \qquad (1)$$

Charakteristika spalovací komory se nevyjadřuje pomocí charakteristických křivek a map jako je tomu v případě kompresoru a turbíny. Jednotlivé proměnné spalovací komory se však výrazně projeví v charakteristikách motoru. [10] Velice důležitým parametrem je hmotnostní průtok paliva vstupujícího do spalovací komory. Dále je důležitý hmotnostní průtok vzduchu. Spotřeba paliva je velmi významný technický údaj o motoru. Důležitý je také směšovací poměr FAR (Fuel Air Ratio) který je vyjádřen vztahem (2).

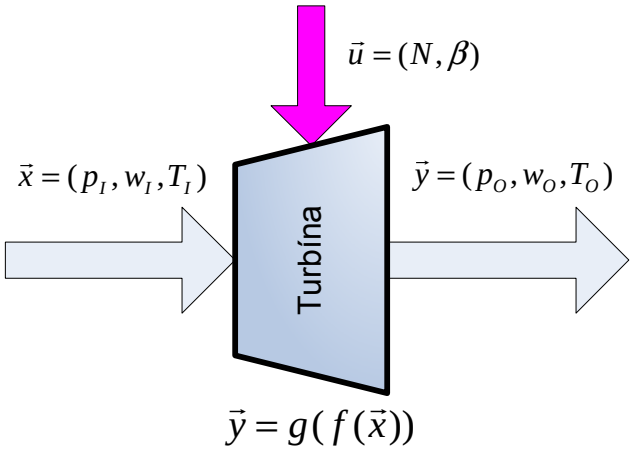
$$FAR = \frac{w_F}{w_I} = \frac{w_F}{w_A} \qquad [\text{ - }] \qquad (2)$$

Pro zjištění funkčních vlastností spalovací komory je třeba měřit tlak a teplotu na vstupu a výstupu spalovací komory, průtok vzduchu spalovací komorou, hmotnostní

průtok paliva. Tlak a teplota paliva nejsou v tomto případě rozhodující parametry, u reálných turbínových motorů se však měří i tyto hodnoty. [11]

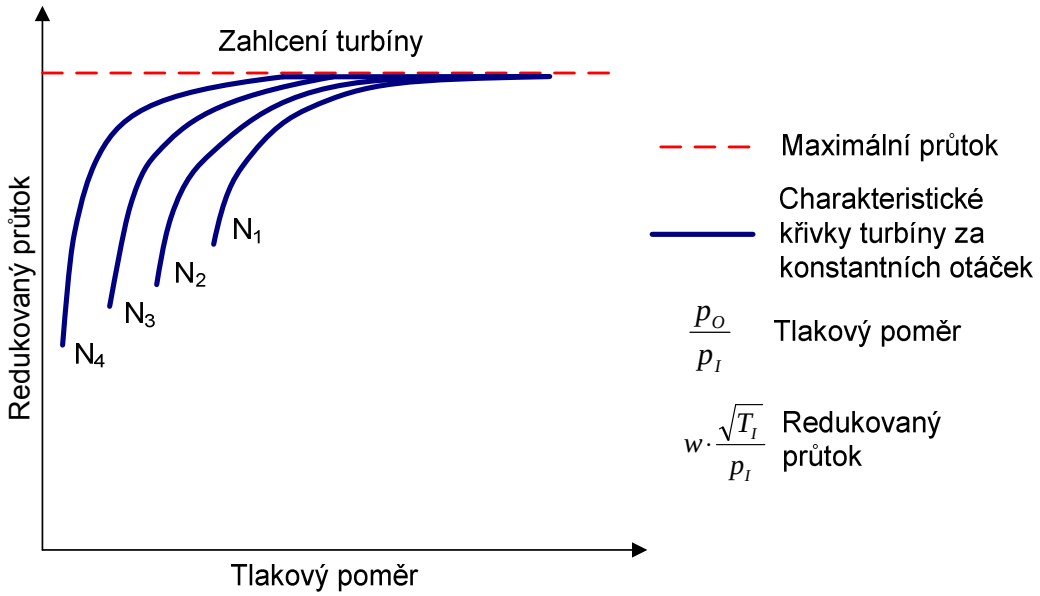
4.4 Turbínová mapa

Turbína je zařízení, které transformuje tlakovou energii plynu na mechanickou energii. (Její funkce je inverzní k funkci kompresoru) Z **Obr. 4-7** je zřejmé jak dochází ke změně stavových parametrů plynu vstupujícího do turbíny. Tuto měnu lze ovlivňovat pomocí vektoru řízení $\vec{u}$, který obsahuje otáčky turbíny N, v případě turbín s variabilní geometrií statorových lopatek obsahuje také úhel natočení lopatek.

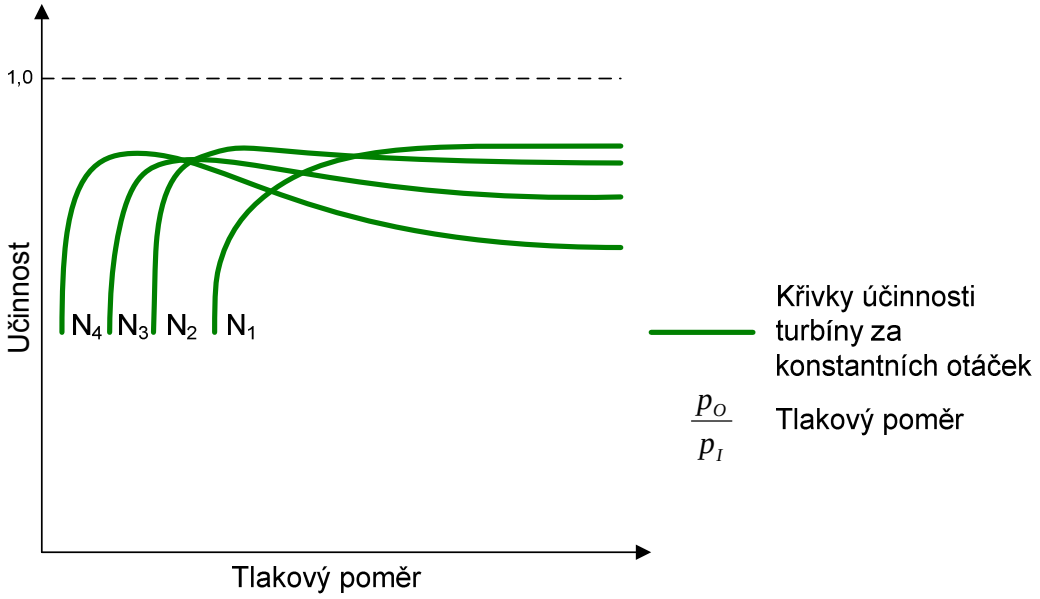


Obr. 4-7 Turbína – transformační blok

Vlastnosti turbíny a její chování v různých provozních režimech se uvádí pomocí tzv. Turbínové mapy neboli Charakteristických křivek turbíny. Na **Obr. 4-8** jsou charakteristické křivky vyjadřující závislost průtoku na tlakovém poměru při různých provozních otáčkách. Na dalším **Obr. 4-9** jsou uvedeny charakteristické křivky účinnosti také při různých provozních otáčkách. V některé literatuře se stejně jako u kompresorů obě charakteristiky uvádí v jednom grafu, tento způsob zobrazení není však příliš vhodný vzhledem k značné nepřehlednosti tohoto zobrazení, obsahuje však stejné informace. [6]



Obr. 4-8 Charakteristické křivky: Průtok/Tlakový poměr



Obr. 4-9 Charakteristické křivky účinnosti

Pro konstrukci těchto křivek je nutné měřit tlak a teplotu na vstupu a výstupu z turbíny, průtok plynu turbínou, její otáčky, popř. nastavení geometrie statorových lopatek.

4.5 Tah motoru

Tah motoru je síla vyvozená motorem, která vzniká jako důsledek zvýšení hybnosti vzduchu a paliva protékajícího motorem. Vzorec (3) je obecný vztah pro tah, kde první část vyjadřuje hrubý tah viz. (4) Čistý tah je vyjádřen vzorcem (5), kde je hrubý tah zmenšen o relativní hybnost vzduchu tvořenou průtokem vzduchu motorem a rychlostí letu. V případě, že je tlak výstupních plynů vyšší než okolní tlak vzniká další přídavná složka tahu, která je daná tlakovou diferencí na výstupní trysce a její plochou.

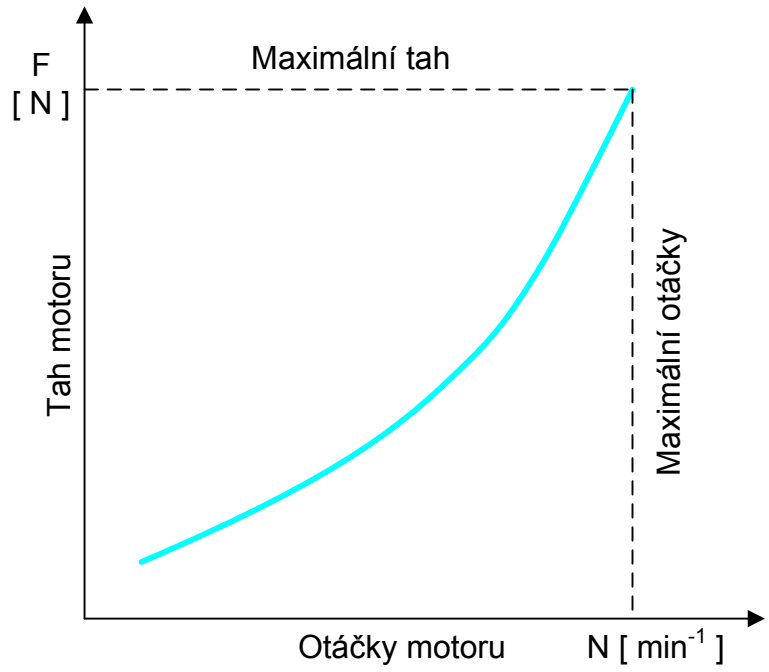
$$F = (w_0 + w_F)\cdot v_4 - w_0 \cdot v_A + (p_4 - p_0)\cdot S_4 \qquad [\,\mathrm{N}\,] \qquad (3)$$

$$F_G = (w_0 + w_F)\cdot v_4 \qquad [\,\mathrm{N}\,] \qquad (4)$$

$$F = (w_0 + w_F)\cdot v_4 - w_0 \cdot v_A \qquad [\,\mathrm{N}\,] \qquad (5)$$

V případě měření tahu motoru v laboratorních podmínkách, nebo ve zkušebnách, kde je rychlost motoru vzhledem k okolí $v_A = 0$ se vztah (3) zredukuje na tvar (6).

$$F = (w_0 + w_F)\cdot v_4 + (p_4 - p_0)\cdot S_4 \qquad [\,\mathrm{N}\,] \qquad (6)$$

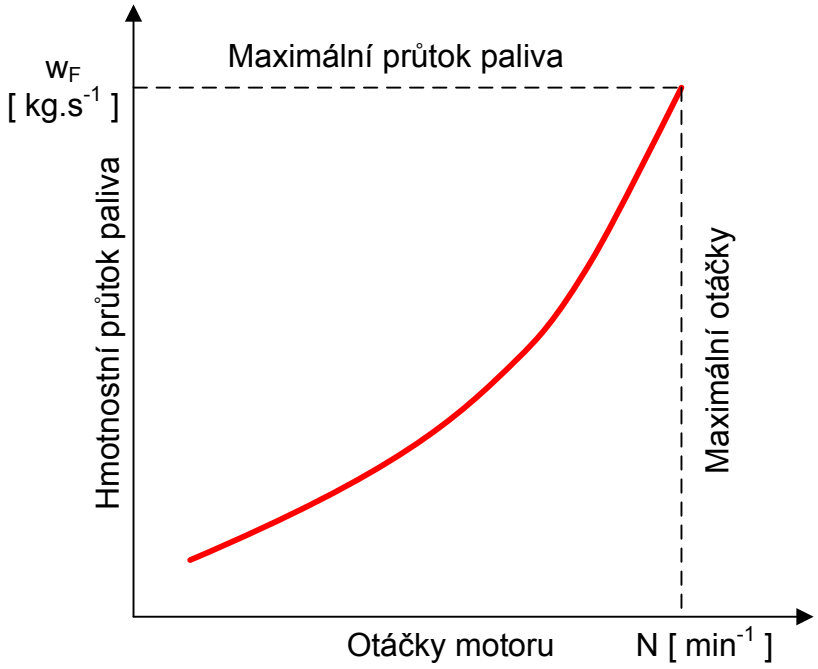


Obr. 4-10 Závislost tahu na otáčkách motoru

Jako charakteristika motoru se obvykle uvádí závislost tahu F na otáčkách rotorové soustavy N. Tvar charakteristiky se liší podle typu motoru a je ohraničen maximálními provozními otáčkami rotorové soustavy a tomu odpovídá maximální tah motoru. Příklad této závislosti je uveden na **Obr. 4-10**.

4.6 Průtok paliva

Hmotnostní průtok paliva v podstatě reprezentuje množství energie přiváděné do motoru a je jedním ze základních řídících parametrů motoru. Měření okamžitého průtoku paliva slouží jako zpětná vazba pro palivový systém reálných turbomotorů. U modelářských turbín se tato hodnota neměří. Často se jako charakteristika motoru uvádí spotřeba paliva na jednotku tahu. Graficky se zobrazuje závislost průtoku paliva na otáčkách motoru dle **Obr. 4-11**. a je také ohraničen maximálními provozními otáčkami rotorové soustavy a tomu odpovídá maximální průtok paliva vstupující do spalovací komory.



Obr. 4-11 Závislost průtoku paliva na otáčkách motoru

5. MĚŘENÍ MOTORU P80 JetCat

Vzhledem k současnému stavu projektu ENGINE SIMULATOR nebylo měření na motoru zatím dokončeno, byly navrženy senzory a provedeny úpravy motoru pro jejich umístění. V následující kapitole je uveden přehled používaných senzorů a měřících metod používaných v případě modelářských motorů, pro srovnání je zde uvedeno jakým způsobem se tyto veličiny měří u reálných turbomotorů. Jednotlivé tlaky, teploty, otáčky a průtok paliva lze měřit prostřednictvím standardních senzorů, které jsou běžně na trhu. Jako problematické se jeví měření hmotnostního průtoku vzduchu na vstupu do turbomotoru, z tohoto důvodu je věnována pozornost zejména této problematice.

5.1 Měření teploty

Teplota na vstupu do motoru odpovídá teplotě okolního vzduchu, při stlačení vzduchu v kompresory dojde ke zvýšení teploty vzduchu, tato teplota však nepřevyšuje 100°C, proto lze v těchto bodech využít k měření teploty například Platinový odporový teploměr Pt100. Principem odporových kovových teploměrů je závislost odporu kovu na teplotě. Standardní hodnotou tohoto senzoru je R=100 Ω pří 0°C. Platina se vyznačuje chemickou netečností, časovou stálostí a vysokou teplotou tání.

Teploty plynů ve spalovací komoře a v zadní části motoru dosahují teploty až 800°C. Pro tyto měření se používá termoelektrických převodníků - termočlánků. (Jsou založeny na Seebeckovu jevu, na převodu tepelné energie na elektrickou). Pro tuto aplikaci je nejvhodnější použít Termočlánek typu K, který je tvořen dvojicí kovů NiCr-NiAl CHROMEL-ALUMEL. Pro rozsah teplot od -50°C do +1000°C je střední hodnota konstanty K_T = 42 μV/°C. [12]

U modelářských motorů se používá k měření EGT také termočlánek typu K a jeho výstup je vyhodnocován prostřednictvím ECU. Na **Obr. 5-1** je na levé straně zobrazeno umístění termočlánků v jednotlivých motorových stupních, v pravé část je termočlánek měřící EGT.

U velkých proudových motorů se používá většího počtu paralelně, nebo serioparalelně spojených termočlánků umístěných rovnoměrně po obvodu turbíny, aby jejich údaj odpovídal průměrné teplotě.

Při umísťování teplotního čidla je nutné vzít v úvahu tlak v místě instalace, dále je nutné zvolit místo s ohledem na rozložení teplotního pole v měřené oblasti.

Obr. 5-1 Měření teploty plynů v motoru a na jeho výstupu

Velice důležitým parametrem z hlediska životnosti a spolehlivosti motoru je teplota rotorových lopatek turbíny, která se u reálných motorů měří pomocí pyrometru. Jedná se o bezdotykové měření, založené na snímání infračerveného záření, jehož zdrojem je povrch lopatek turbíny, zahřátých na měřenou teplotu. Nevýhodou této metody je složitost a závislost správného výsledku měření na dodržení podmínek měření, jedná se o konstantní emisivitu povrchu lopatek, konstantní světelnou propustnost optické cesty. Obě tyto vlastnosti se mohou během provozu motoru změnit. Přes tyto nevýhody se tato pyrometrická metoda jeví jako perspektivní. [3]

5.2 Měření tlaku

Měření tlaku lze provádět standardními tlakovými senzory vhodně zvolenými s ohledem na rozsahy pracovních tlaků v dané oblasti motoru. Vzhledem k tomu, že se jedná o měření statického tlaku, odvádí se tlak z měřeného místa do vhodnějšího prostoru, kde se umísťuje tlakový senzor, který pak není ovlivněn teplotou popřípadě

vibracemi z motoru. Lze využít tlakové senzory kapacitní, piezoelektrické popřípadě optoelektronické. [12]

5.3 Měření průtoku paliva

Měření hmotnostního průtoku paliva se měří převážně objemovou metodou pomocí dávkovacího objemového průtokoměru, jehož příklad je uveden na **Obr. 5-2**. V principu se jedná o variantu rotačního čerpadla, které při jedné otáčce dodává definované množství paliva, je vyhodnocován počet otáček a objemový průtok je prostřednictvím známé hustoty paliva přepočítáván na hmotnostní průtok paliva.

U reálných turbomotorů, kde se jedná o větší průtoky se využívá turbínkových snímačů průtoku paliva, které obsahují i hustotní kompenzaci a mnohdy snímají i celkovou spotřebu paliva. Což je v podstatě integrál okamžitého hmotnostního průtoku.

Obr. 5-2 Objemový průtokoměr

5.4 Měření průtoku vzduchu

Jak již bylo uvedeno v předchozích kapitolách, měření průtoku vzduchu motorem je problematické, velké zkušebny leteckých motorů disponují složitým zařízením, které umožňuje průtok vzduchu měřit, v některých případech je přímo požadované množství vzduchu dodáváno dmychadlem do testovací komory.

V případě modelářských motorů se tento parametr většinou neměří, pouze na univerzitách, kde jsou tyto motory využívány pro analýzu vlivu určitých provozních podmínek nebo experimentální ověření hypotéz a tento parametr je nezbytný, se průtok vzduchu měří.

Na trhu jsou běžně dostupné pouze anemometry, měřící rychlost proudění vzduchu nebo měřiče průtoku, které se instalují do potrubí a slouží například k měření spotřeby vzduchu v pneumatických systémech. Tyto způsoby měření nejsou pro tuto aplikaci použitelné.

Jako vhodné se jeví dva koncepty nepřímého měření průtoku vzduchu turbínou:

5.4.1 Kalorimetrický způsob měření průtoku vzduchu

Tento způsob měření spočívá v ochlazování topného elementu proudem vzduchu, intenzita ochlazování tohoto elementu odpovídá rychlosti proudění vzduchu, v případě proudění uzavřeným kanálem s rovnoměrným rychlostním profilem odpovídá jeho průtoku. Je zřejmé, že intenzita ochlazování je ovlivněna dalšími faktory, zejména teplotou proudícího vzduchu. Tyto faktory by museli být měřícím systémem korigovány.

5.4.2 Měření průtoku vzduchu prostřednictvím tlakové diference

Tento způsob měření vychází z tlakové diference, která vzniká vlivem proudění média uzavřeným kanálem, kde dochází vlivem místní nebo délkové tlakové ztrátě. Tento způsob měření se používá také u kapalin. Pro zvýšení tlakové diference se do průtočného kanálu vkládají normalizované clony, popřípadě se tyto kanály vhodně tvarují (Venturiho dýza). [13]

Princip měření vychází z Bernoulliho rovnice (7), která vyjadřuje zákon zachování energie v tekutině. Součet kinetické, potenciální a tlakové energie je konstantní. V našem případě sledujeme změnu energie mezi bodem **a**, který je umístěn dostatečně daleko před vstupem do trubice, a jeho rychlost je nulová a bodem **b**, který je uvnitř trubice a pohybuje se rychlostí **v** dle **Obr. 5-3**.

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 + m \cdot g \cdot h + \Delta p \cdot V = konst. \qquad [\,J\,] \qquad (7)$$

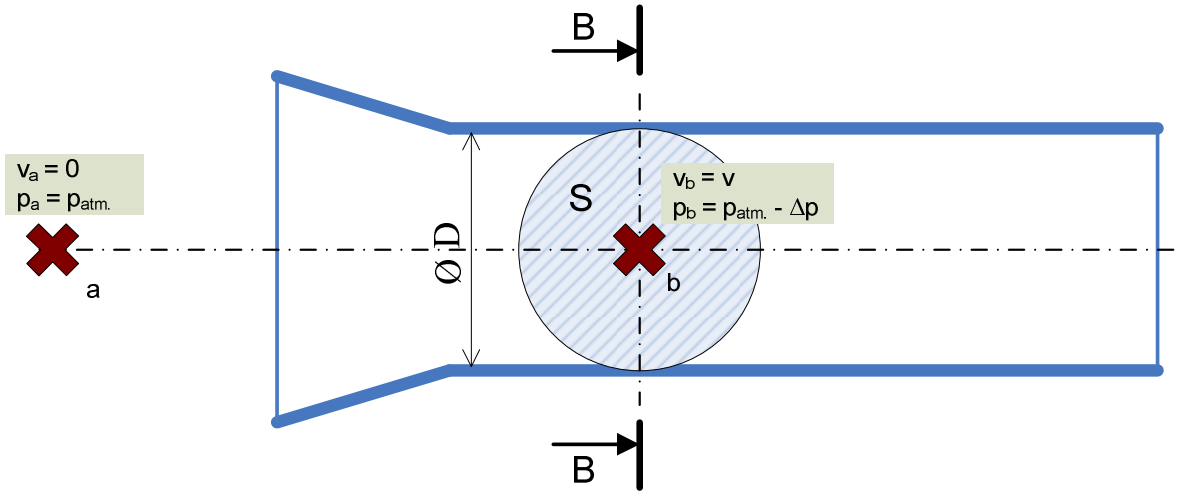
Potenciální energie v bodech a, b je stejná, dochází ke změně tlakové energie na kinetickou dle vztahu (9).

Po dosazení definičního vztahu pro hustotu (8) lze ze vztahu (9) odvodit vztah pro rychlost proudění v daném profilu B-B (10)

$$\rho = \frac{m}{V} \qquad [\ \mathrm{kg.m^{-3}}\ ] \qquad (\ 8\ )$$

$$\frac{1}{2} m \cdot v^2 = \Delta p \cdot V = \Delta p \cdot \frac{m}{\rho} \qquad [\ \mathrm{J}\ ] \qquad (\ 9\ )$$

$$v = \sqrt{\frac{2 \cdot \Delta p}{\rho}} \qquad [\ \mathrm{m.s^{-1}}\ ] \qquad (\ 10\ )$$



Obr. 5-3 Princip měření - změna energie

Hmotnostní průtok vzduchu lze pak určit ze vztahu (11), kde D je známý průměr měřící trubice, jemuž odpovídá průtočná plocha S. V případě kapalin je hustota ρ konstantní a tento způsob měření poskytuje dostatečně přesné výsledky.

$$w_0 = v \cdot S \cdot \rho = v \cdot \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot \rho \qquad [\ \mathrm{kg.s^{-1}}\ ] \qquad (\ 11\ )$$

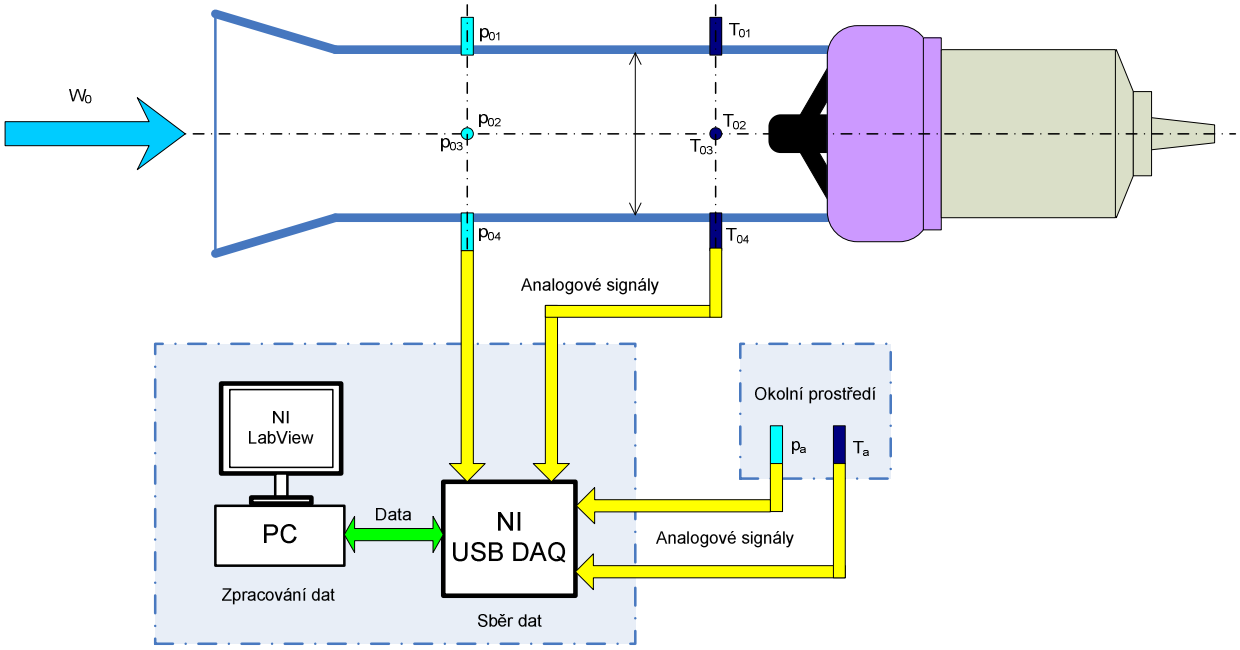
V tomto případě se hustota vzduchu ρ mění. Za předpokladu ideálního plynu lze vycházet ze stavové rovnice f = (p, V, T) = 0, vyjadřující vztahy mezi stavovými veličinami plynu (12), kde r je plynová konstanta [$\mathrm{J.kg^{-1}.K^{-1}}$]

$$p \cdot V = m \cdot r \cdot T_K \qquad [\ \mathrm{J}\ ] \qquad (\ 12\ )$$

Z této rovnice po dosazení definičního vztahu pro hustotu (8) lze odvodit vztah pro výpočet hustoty v závislosti na tlaku a teplotě. (13) Prostřednictvím této závislosti lze provádět korekci aktuální hustoty vzduchu v měřeném průřezu a tím eliminovat chybu ve výpočtu rychlosti. Také při výpočtu hmotnostního průtoku je nutné znát aktuální hustotu, pro tento výpočet bude také použita aktuální vypočtená hodnota hustoty vzduchu.

$$\rho = \frac{p}{r \cdot T_K} \qquad [\ \mathrm{kg.m^{-3}}\ ] \qquad (13)$$

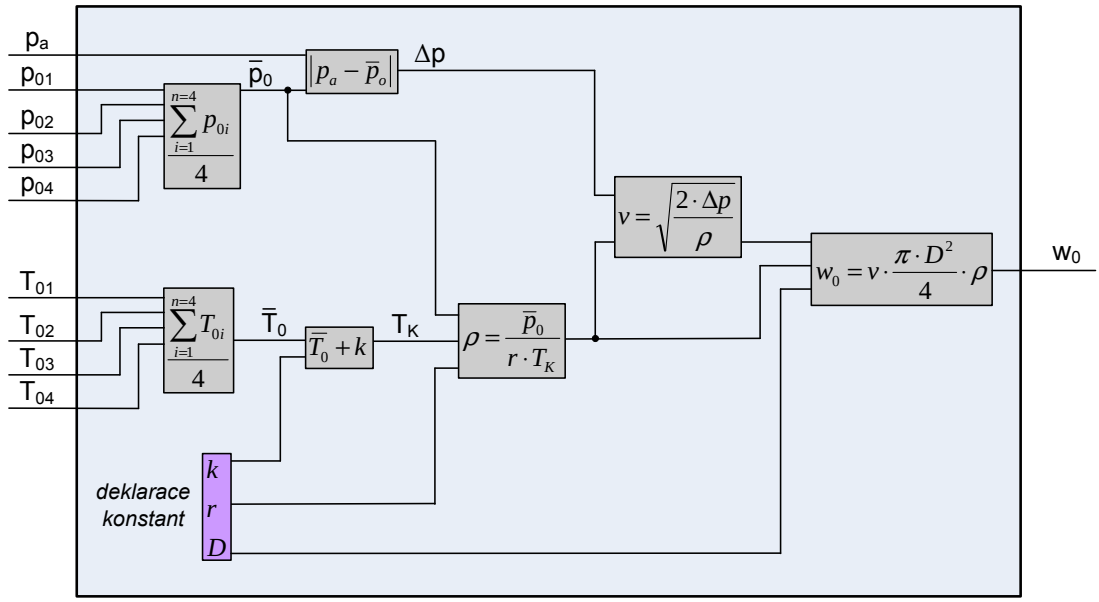
Na následujícím obrázku **Obr. 5-4** je principielní návrh měřícího řetězce pro realizaci tohoto měření. Před vstupem do motoru je nainstalována měřící trubice se známým vnitřním průměrem, který je v celé střední části trubice konstantní. Přechod mezi koncem trubice a vstupem do motoru musí být utěsněn, aby nedocházelo k přisávání dalšího vzduchu do motoru a aby všechen vzduch vstupující do motoru procházel měřící trubicí. Vstupní část trubice je vhodně upravena pro eliminaci vlivu vstupní hrany na proudění uvnitř trubice. V místě dostatečně vzdáleném od vstupu, kde je již rychlostní profil rovnoměrný jsou umístěny čtyři tlakové snímače po 90° na obvodu trubice. Toto uspořádání má zajistit zjištění průměrné hodnoty tlaku v trubici. Před vstupem do motoru je ve stejné konfiguraci umístěna čtveřice teplotních snímačů, které slouží k měření průměrné hodnoty teploty v trubici, tato hodnota je využívána pro výpočet aktuální hodnoty hustoty vzduchu v měřící trubici.



Obr. 5-4 Návrh měřícího řetězce

V okolí motoru ve vhodném místě kde nepůsobí rušivé vlivy (zdroje tepla, ventilátory, apod.) jsou umístěny snímače měřící tlak a teplotu okolního prostředí. Hlavní význam má hodnota tlaku, která je referenční hodnotou pro výpočet tlakové diference a má zásadní vliv na přesnost měření. Analogové výstupní signály těchto

snímačů jsou zpracovávány prostřednictvím měřící karty řady DAQ od firmy National Instruments. Naměřená data jsou prostřednictvím sběrnice předávány do PC, kde jsou v prostředí LabVIEW zpracovány, vyhodnocovány a výstupní hodnoty jsou uchovávány. Toto uspořádání co do konfigurace, HW a SW je kompatibilní s celkovým systémem pro měření motoru a lze ho snadno do tohoto systému integrovat. Na **Obr. 5-5** je ve formě blokového diagramu navržen algoritmus vyhodnocení naměřených hodnot, který bude naprogramován v prostředí LabVIEW.



Obr. 5-5 Algoritmus vyhodnocování naměřených hodnot

Z hodnot tlaků je vypočtena průměrná hodnota, která se využívá k výpočtu tlakové diference a také k výpočtu aktuální hustoty vzduchu. Z hodnot teplot je také vypočtena průměrná teplota, která je převedena na termodynamickou teplotu a slouží také k výpočtu aktuální hustoty vzduchu. Z hustoty a tlakové diference je vypočtena rychlost proudění, která slouží společně s hustotou a průměrem měřící trubice k určení hmotnostního průtoku vzduchu.

Detailní analýza tohoto konceptu a jeho zpracování, popřípadě ověření bude předmětem navazující bakalářské práce. K ověření je také nutné provést referenční měření jinou metodou a na základě naměřených výsledků provést úpravu navrženého konceptu, popřípadě zavést korekci pro eliminaci rušivých vlivů a zpřesnění výsledků měření.

5.5 Měření otáček motoru

Otáčky motoru představují otáčky rotorové soustavy, v případě modelářských motorů se jedná otáčky jedné soustavy, někteří výrobci umísťují senzor otáček před kompresor do aerodynamického krytu, který zabraňuje negativnímu ovlivňování proudu vzduchu na vstupu do motoru. V tomto místě není senzor vystaven působení vysokých teplot ani tlaků. V případě P80 JetCat je senzor umístěn v přední části motoru v oblasti kompresoru. Otáčky motory se měří prostřednictvím indukčnostních senzorů, Hallovy sondy, nebo optické závory. Otáčky se vyhodnocují prostřednictvím vyhodnocování frekvence pulzů ze snímače.

5.6 Měření tahu

Měřený motor musí být vhodně umístěn tak, aby byly eliminovány odporové síly působící proti jeho pohybu. Větší motory se umísťují na podvozky opatřené kvalitními ložisky pro minimalizaci tření při pohybu. Menší motory se zavěšují, nebo umísťují přímo na nosník, který slouží přímo jako deformační ohybový element

Měření se provádí převážně pomocí tenzometrů umístěných na deformačním elementu, který je namáhán tahem nebo ohybem. Před začátkem měření je nutné tenzometr kalibrovat pomocí závaží zavěšených přes kladku, která vyvíjejí tahovou sílu ve směru předpokládaného tahu motoru. U velkých motorů lze využít nepřímého měření, kde se tahová reakční síla motoru převádí prostřednictvím lineárního hydromotoru na tlak a ten se potom vyhodnocuje.

5.7 Automatizovaný sběr dat

Vzhledem ke kompatibilitě s dalšími souvisejícími částmi tohoto projektu doporučuji využít pro sběr dat měřící karty National Instruments Ltd. NI PCI-6733 a NI PCI-6220, data budou zpracována SW Matlab/Simulink s Real Time Windows Target a Real time Workshop. [1]

Další alternativou je využití stejných měřících karet a data zpracovávat prostřednictvím SW LabWIEW, který je firmou Honeywell také pro tyto účely využíván a je přímo pro tyto účely vyvinut. Volba sběru dat je v tomto případě spíše strategickým rozhodnutím s ohledem na kontext projektu.

6. MOŽNOSTI MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU

6.1 Rozsahy průtoků

Pro turbínový motor JetCAT je průtok vzduchu uveden pouze pro maximální otáčky, předpokládá se lineární závislost průtoku vzduchu na otáčkách motoru pro určení provozního rozsahu průtoku vzduchu motorem. Vzhledem k tomu že při měření průtoku vzduchu se převážně používá objemový průtok vzduchu je hmotnostní průtok přepočítán na objemový pomocí vzorce (14). Rozsahy objemových i hmotnostních průtoků jsou uvedeny v **Tabulce 6-1**.

$$Q = \frac{w}{\rho} \qquad [\ m^3.s^{-1}\ ] \qquad (\ 14\ )$$

$\rho = 1{,}2041 kg.m^{-3}$ při 20°C / 101.325 kPa

JetCAT P80			w_A [kg.s^{-1}]	Q_A [m^3.s^{-1}]	Q_A [m^3.h^{-1}]
n_{MIN}	35 000	[min^{-1}]	0,11	0,091	330
n_{MAX}	125 000	[min^{-1}]	0,40	0,332	1220

Tabulka 6-1 Průtoky vzduchu motorem

Pro elektrický dmychadlový motor nejsou uvedeny hodnoty průtoků, proto musí být vypočteny z parametrů dostupných od výrobce **Tabulka 6-2**

Vasafan 65G (motor Mega16/15/3)					
U	I	P	n	Tah	F
[V]	[A]	[W]	[min^{-1}]	[g]	[N]
11,2	19	213	31 300	513	5,03

Tabulka 6-2 Parametry elektrodmychadla

Při výpočtu hmotnostního průtoku vzduchu motorem se vychází ze vzorce pro tah motoru (4), který se v případě elektrického dmychadla zjednoduší na (15) a vztahu pro výkon motoru předaný proudícímu vzduchu (16). Protože se jedná pouze

o určení rozsahu průtoku nejsou zde neuvažovány účinnosti a další faktory, které by bylo nutno vzít v úvahu pro získání přesnějších hodnot. Po úpravě vztahů a eliminaci neznámé rychlosti proudění vzduchu $\mathbf{v_A}$ dostáváme vztah pro hmotnostní průtok vzduchu motorem (17).

$$F_E = w_A \cdot v_A \qquad [\text{N}] \qquad (15)$$

$$P = F_E \cdot v_A \qquad [\text{W}] \qquad (16)$$

$$w_A = \frac{F_E^{\,2}}{P} \qquad [\text{W}] \qquad (17)$$

Provoz motoru v oblasti nízkých otáček je značně nestabilní proto se provozuje v rozsahu od 10% do 100%. Pro tento provozní rozsah jsou určeny rozsahy průtoků v **Tabulce 6-3**.

Vasafan 65G (motor Mega16/15/3)			w_A [kg.s^{-1}]	Q_A [m^3.s^{-1}]	Q_A [m^3.h^{-1}]
n_{MIN}	3 130	[min^{-1}]	0,012	0,010	36
n_{MAX}	31 300	[min^{-1}]	0,119	0,099	360

Tabulka 6-3 Průtoky vzduchu dmychadlem

6.2 Měřící trať

Pro kalibraci navrženého systému měření průtoku se předpokládá využití měřící tratě která je k dispozici na VUT FEKT UAMT. Jedná se o uzavřenou trať pro měření průtoku vzduchu její základní parametry jsou uvedeny v **Tabulce 6-4**.

Měřící trať VUT FEKT UAMT	w_A [kg.s^{-1}]	Q_A [m^3.s^{-1}]	Q_A [m^3.h^{-1}]
Minimální průtok	0,026	0,022	80
Maximální průtok	0,200	0,160	600
Jmenovitá světlost	DN100		

Tabulka 6-4 Parametry měřící tratě

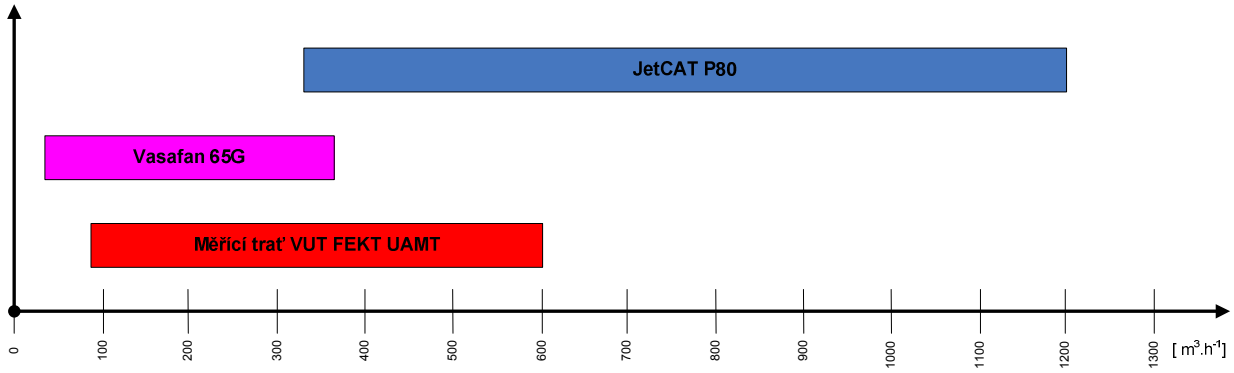
6.3 Porovnání rozsahů průtoků

Pro kalibraci navrženého systému měření průtoku se předpokládá využití měřící tratě, která je umístěna v laboratoři VUT FEKT UAMT. Jedná se o uzavřenou měřící trať, která je navržena pro kalibraci průtokoměrů. Skládá se z dmychadla, jehož otáčky jsou řízeny plynule frekvenčním měničem a lze tedy nastavovat různé průtoky. Na začátku měřící tratě je instalován referenční průtokoměr. Světlost měřící tratě je DN100, obsahuje však i jeden úsek kde je světlost redukována na DN80. V **Tabulce 6-5** jsou uvedeny rozsahy průtoků jednotlivých motorů a měřící tratě.

	Q_{MIN} [$m^3.h^{-1}$]	Q_{MAX} [$m^3.h^{-1}$]
JetCAT P80	330	1200
Vasafan 65G	36	360
Měřící trať VUT FEKT UAMT	80	600

Tabulka 6-5 Rozsahy průtoků

Pro názornost jsou tyto průtoky také zobrazeny graficky v **Grafu 6-1**



Graf 6-1 Grafické zobrazení rozsahů průtoků

6.4 Analýza možností měření

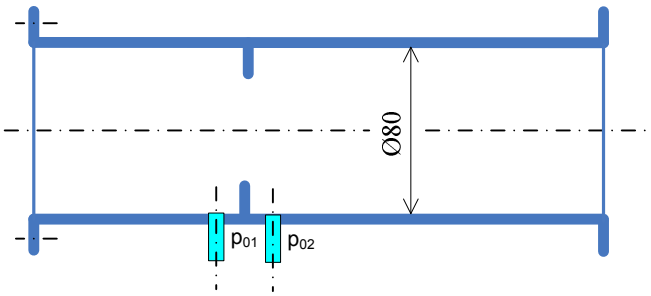
Z průzkumu možností referenčního měření průtoku vyplynulo, že firma Honeywell nedisponuje potřebným vybavením a vzhledem k současnému stavu projektu Engine Simulator není možné další vybavení zakoupit. Jako vhodná alternativa se jeví využití měřící tratě na VUT FEKT UAMT.

Původní koncept byl založen na základě měření prostřednictvím navrhované metody provedeném na elektro-dmychadle a porovnání výsledků s vhodnou referenční měřící metodou. Toto však nelze na uzavřené měřící trati úspěšně realizovat. Pro je nutno zvolit jinou strategii s ohledem na aktuální možnosti.

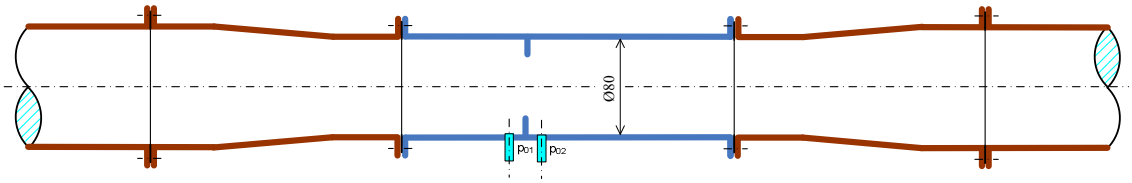
Vzhledem k tomu že měřící trať je navržena pro kalibraci průtokoměrů, je možné vyrobit měřící trubici, která bude zkalibrována a proměřena. Tato trubice může být dále nezávisle na měřící trati používána pro nepřímé měření průtoku prostřednictvím tlakové ztráty na cloně měřící trubice. Tato tlakovou diferenci je možné měřit i v laboratořích firmy Honeywell během měření na elektro-dmychadle nebo na modelářském turbomotoru. Nyní je třeba zhodnotit dvě možné alternativy.

6.4.1 Měřící trubice pro elektro-dmychadlo

Navrhovaný postup spočívá ve výrobě měřící trubice DN80, která je opatřena clonou a výstupu pro měření tlakové diference. **Obr. 6-1** Tato trubice bude prostřednictvím redukcí , které v současné době nejsou dostupné implementována do měřící tratě. **Obr. 6-2**

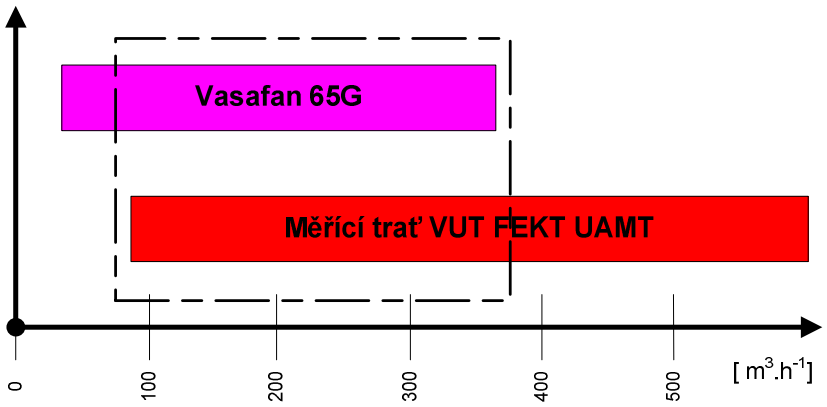


Obr. 6-1 Měřící trubice DN80



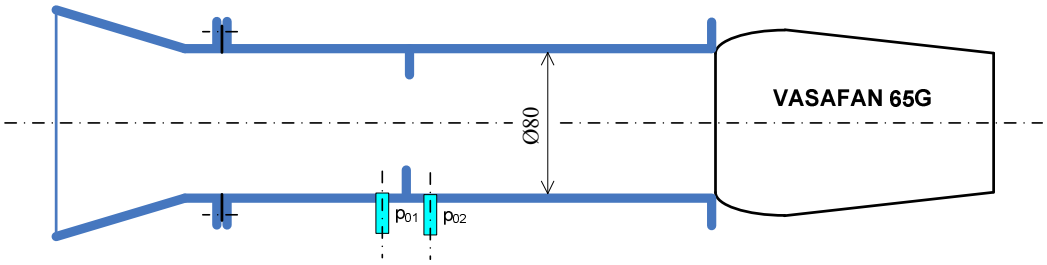
Obr. 6-2 Instalace trubice DN80 do měřící trati

Trubice bude proměřena a zkalibrována v rozsahu průtoků, které umožní měřící trať **Graf 6-2**. Výstupem měření bude převodní charakteristika měřící trubice.



Graf 6-2 Společný rozsah průtoků

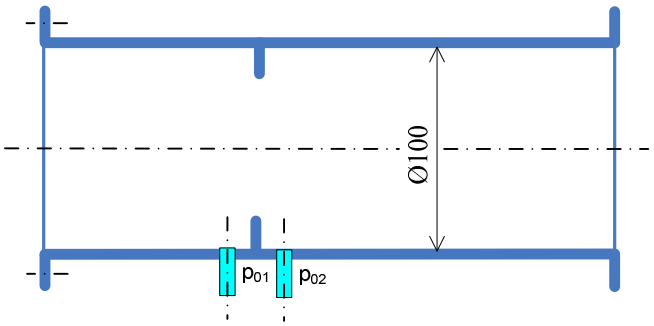
Vzhledem k rozměrům elektro-dmychadla VASAFAN 65G lze tuto měřící trubici připojit k dmychadlu a na druhé straně ji opatřit vstupním hrdlem, které eliminuje vliv nasávání vzduchu z volného prostoru a navodí podmínky ekvivalentní instalaci do uzavřeného měřícího systému. Popřípadě lze do potrubí instalovat usměrňovač průtoku pro dosažení kratší uklidňovací délky potrubí [15] **Obr. 6-3** V této konfiguraci lze realizovat měření na elektrodmychadle.



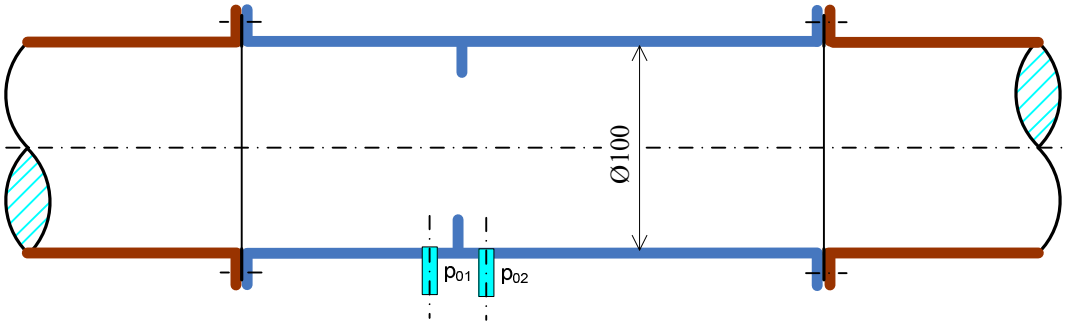
Obr. 6-3 Uspořádání měřící soustavy pro elektro-dmychadlo

6.4.2 Měřící trubice pro modelářský turbomotor

Navrhovaný postup spočívá ve výrobě měřící trubice DN100, která je opatřena clonou a výstupu pro měření tlakové diference. **Obr. 6-4** Tato trubice bude implementována do měřící tratě. **Obr. 6-5**

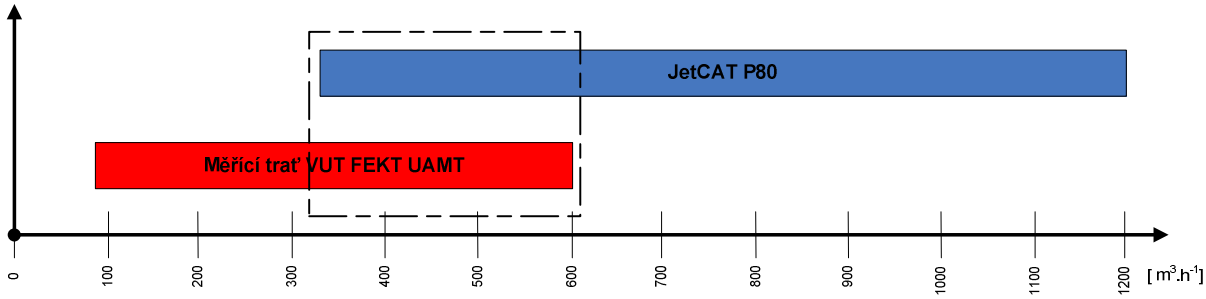


Obr. 6-4 Měřící trubice DN100



Obr. 6-5 Instalace trubice DN100 do měřící trati

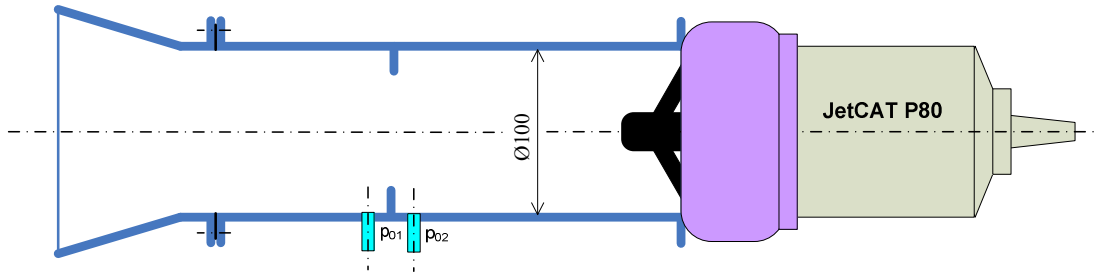
Trubice bude proměřena a zkalibrována v rozsahu průtoků, které umožní měřící trať **Graf 6-3**. Výstupem měření bude převodní charakteristika měřící trubice.



Graf 6-3 Společný rozsah průtoků

Vzhledem k rozměrům modelářského turbo-motoru Jet CAT P80 lze tuto měřící trubici připojit k sacímu hrdlu motoru a na druhé straně ji opatřit vstupním hrdlem, které eliminuje vliv nasávání vzduchu z volného prostoru a navodí podmínky ekvivalentní instalaci do uzavřeného měřícího systému. Popřípadě lze do potrubí instalovat usměrňovač průtoku pro dosažení kratší uklidňovací délky potrubí

[15] **Obr. 6-6** V této konfiguraci lze realizovat měření na modelářském turbo-motoru Jet CAT P80. Je zřejmé, že aktuální rozsah průtoků měřící tratě nepokrývá celý rozsah průtoků vzduchu modelářským turbomotorem ve všech provozních režimech motoru, pro ověření použitelnosti navrhované metody měření je společné pásmo průtoků dostatečné. **Obr. 6-8**



Obr. 6-6 Uspořádání měřící soustavy pro Jet CAT P80

6.4.3 Zhodnocení navrhovaných alternativ

Je zřejmé, že postupy a způsob měření jsou v obou případech stejné, liší se pouze rozměry měřící trubice, způsob zabudování a rozsahy měřených průtoků.

Měření na elektro-dmychadle umožňuje proměřit a zkalibrovat trubici na téměř celý provozní rozsah VASAFANu, tím bude ověřena použitelnost dané metody. Následně by bylo nutné přejít k měření na modelářském turbomotoru, což by vyžadovalo výrobu nové trubice a opakování předchozího postupu. Vzhledem k parametrům zařízení je v tomto případě možné proměřit a zkalibrovat trubici pouze pro oblast nižších průtoků. Do budoucna však lze měřící trať modifikovat a zvýšit hodnotu maximálního průtoku vzduchu. Zkalibrovaná měřící trubice bude přímé použitelná pro měření průtoku vzduchu u modelářského turbomotoru JetCAT.

Z této analýzy možností plyne závěr, že původně uvažované náhradní měření na elektro-dmychadle nepřináší zásadní výhody a také není snadněji realizovatelné. Proto je vhodnější připravit měřící trubici, která bude použitelná přímo pro měření průtoku vzduchu na modelářském turbo-motoru JetCAT P80, což je primárním cílem této práce.

7. REALIZACE MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU

7.1 Popis použité metody.

Průtok vzduchu bude určován nepřímou metodou prostřednictvím snímačů diferenčního tlaku vložených do potrubí. Tlaková ztráta v tomto potrubí vznikne vložením normalizované clony. Tato metoda je podrobně popsána v ČSN EN ISO 5167, Část 1 této normy popisuje obecné principy a požadavky. Část 2 této normy popisuje rozměry, provedení a instalaci měřící clony do potrubí.

Na základě doporučení normy lze navrhnout rozměry clony a umístění odběrů tlaku vzduchu před a za měřící clonou.

7.2 Návrh měřící trubice

Bylo provedeno proměření připojovacích přírub měřící tratě v místě kde se předpokládá umístění měřící trubice. V této oblasti je světlost potrubí D125. Pro výrobu měřící trubice bude použita trubka z PVC která je dostupná v rozměru Ø125 x 3,1, kde rozměr 3,1 je tloušťka stěny trubky v mm. Vnitřní průměr trubky je tedy 118,8 mm. S ohledem na výrobní tolerance bude dále uvažováno s D_T = 120 mm.

Průměr clony se volí dle následujícího vztahu (18). Pro dosažení co nejmenší tlakové ztráty volím β_T = 0,75 z čehož vychází vnitřní průměr clony d_T = 90 mm (19).

$$\beta_T = \frac{d_T}{D_T} = (0{,}1 \div 0{,}75) \qquad [\text{ - }] \qquad (18)$$

$$d_T = \beta_T \cdot D_T = 0{,}75 \cdot 120 = 90 \qquad [\text{ mm }] \qquad (19)$$

Tloušťka clonové desky se určí dle vztahu (20). Po dosazení D_T vychází možný interval pro volbu tloušťky clonové desky 0,6 až 2,4 mm. Z hlediska dostupnosti materiálu pro výrobu clonové desky bylo zvoleno e_T = 2 mm.

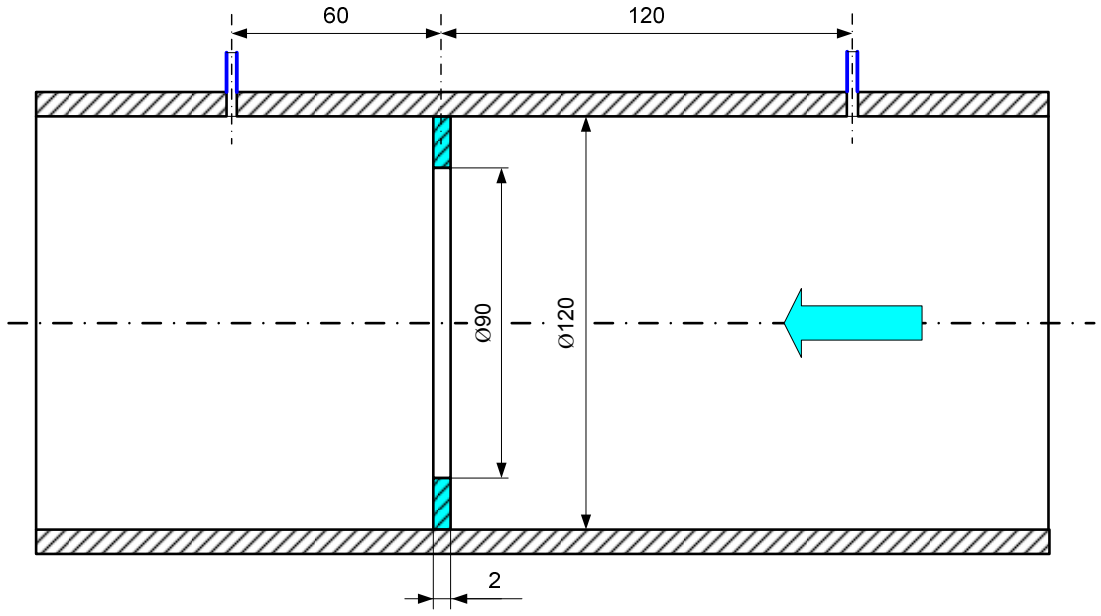
$$e_T = (0{,}005 \div 0{,}02) \cdot D_T = 0{,}6 \div 2{,}4 \qquad [\text{ - }] \qquad (20)$$

Dále je v normě specifikováno umístění otvorů pro odběr tlaku. Odběrné místo tlaku před clonou je vzdáleno l_a od osy clonové desky, odběrné místo za clonou je vzdáleno l_b od osy clonové desky. Vzdálenosti se určí dle vztahů (21), (22).

$$l_a = \cdot D_T = 120 \qquad [\text{ mm }] \qquad (21)$$

$$l_b = 0{,}5 \cdot D_T = 60 \qquad [\text{ mm }] \qquad (22)$$

Na základě výše uvedených základních rozměrů a rozměrů připojovacích přírub měřící tratě lze měřící trubici vyrobit **Obr. 7-1**.

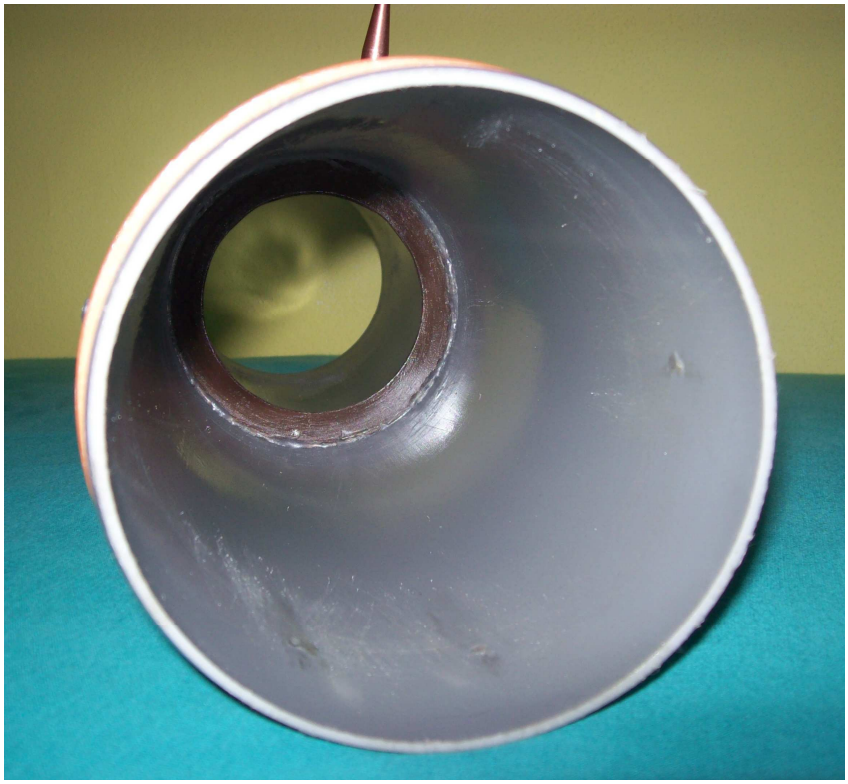


Obr. 7-1 Základní rozměry měřící trubice

7.3 Popis měřící trubice

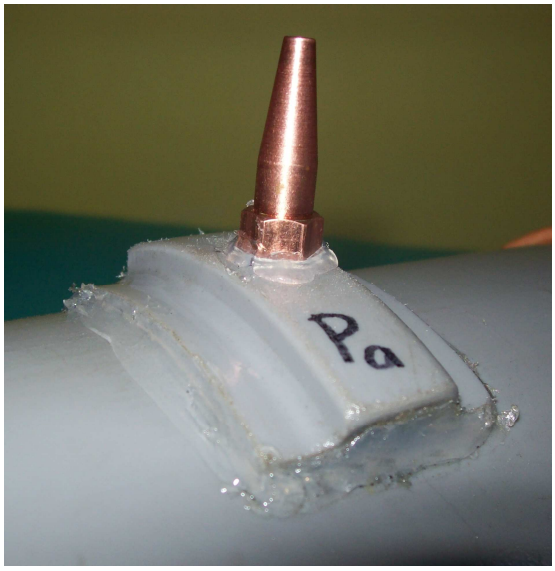
Měřící trubice je vyrobena z PVC, tento materiál je pro tuto aplikace postačující a je běžně dostupný, snadno se obrábí. Trubice nebude vystavená extrémním tlakům ani teplotám. Použitím tohoto materiálu bude dosaženo nízké celkové hmotnosti, což usnadní instalaci na měřený turbomotor, který je upevněn v měřícím rámu pro měření tahu motoru. Na **Obr. 7-2** je celkový pohled na trubici, ve které je instalována clonová deska s otvorem **Obr. 7-3**.

Obr. 7-2 Celkový pohled na měřící trubici



Obr. 7-3 Clona Ø90 instalovaná v měřící trubici

Na trubici jsou místa pro odběr tlaku **Obr. 7-4.** Tlakoměr nemusí být umístěn přímo na trubici, propojení s tlakoměrem je realizováno plastovou hadičkou, která se nasadí na dutý hrot odběrného místa. **Obr. 7-5** zobrazuje ukončení trubice opatřené prstenci pro axiální aretaci trubice v měřící trati. Utěsnění bude provedeno prostřednictvím PTFE pásky, které se pro tyto včely používá v pneumatických systémech.

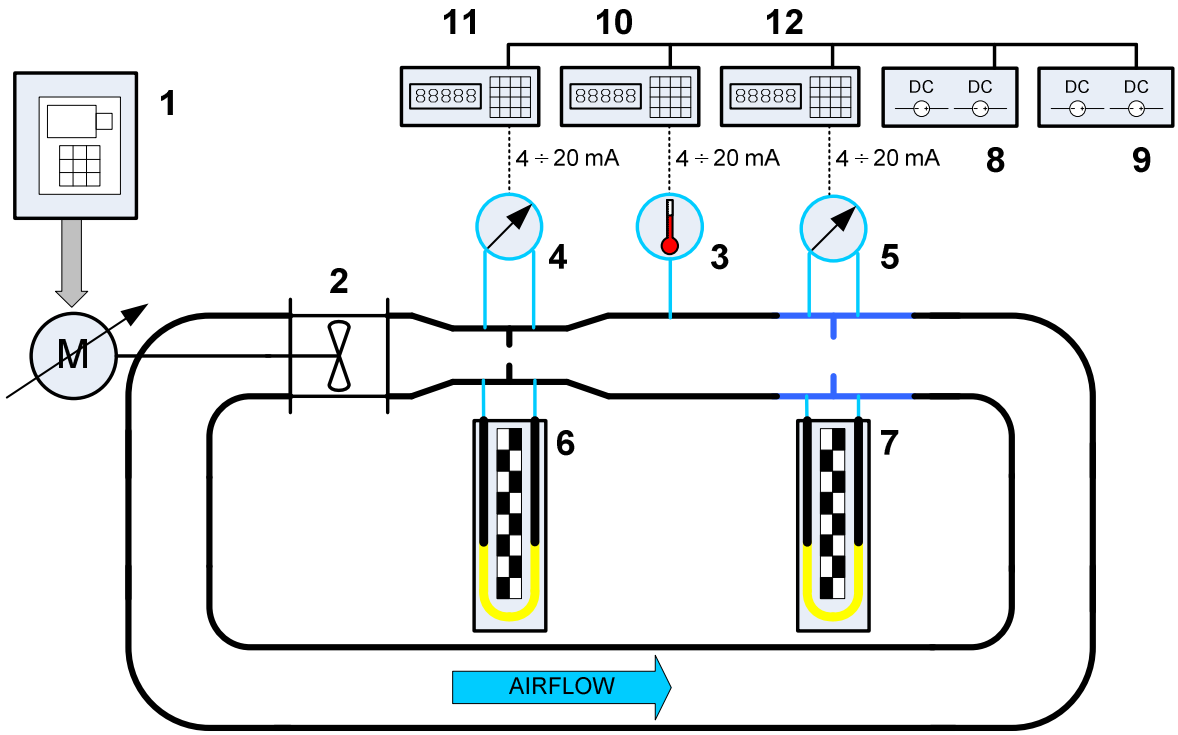


Obr. 7-4 Připojovací místo pro měření tlaku

Obr. 7-5 Ukončení trubice

7.4 Příprava měřícího zařízení

Pro kalibraci trubice pro měření průtoku bylo použito Měřící tratě VUT FEKT UAMT která byla k tomuto účelu vybudována. Uspořádání měřící tratě a zapojení měřících přístrojů pro kalibraci je zřejmé **Obr. 7-6**. Jedná se o uzavřenou měřící trať, kde průtok vzduchu je zajišťován ventilátorem **2**, jehož otáčky jsou plynule řízené prostřednictvím Frekvenčního měniče **1**. Referenční hodnota průtoku je měřena prostřednictvím normalizované clony Diferenciálním tlakoměrem **4**.



Obr. 7-6 Uspořádání měřícího zařízení

Informaci o aktuální teplotě proudící ho vzduchu poskytuje Snímač teploty **3**. Měřící trať je konstruována tak, aby do ní mohly být umístěny průtokoměry určené ke kalibraci. Jeden segment z přímého úseku tratě byl vyjmut a byl nahrazen Měřící trubicí. Tlaková diference na cloně měřící trubice je měřena prostřednictvím Diferenciálního tlakového senzoru **5**. Informativní hodnotu tlakové diference poskytují Revizní manometry **6** a **7**. Napájení senzorů zajišťují Stabilizované zdroje **8** a **9**. Výstupní analogový signál snímačů je vyhodnocován prostřednictvím Digitálních multimetrů **10**, **11**, **12**. Ke konfiguraci a kalibraci Diferenciálních

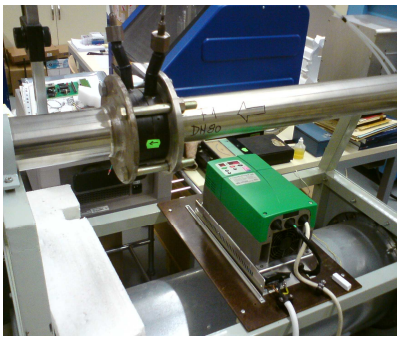
tlakových snímačů byl použit HART komunikátor. To umožní zvolit optimální měřící rozsah s ohledem na konkrétní měřenou veličinu. Seznam přístrojů použitých při měření je uveden v **Tabulce 7-1**.

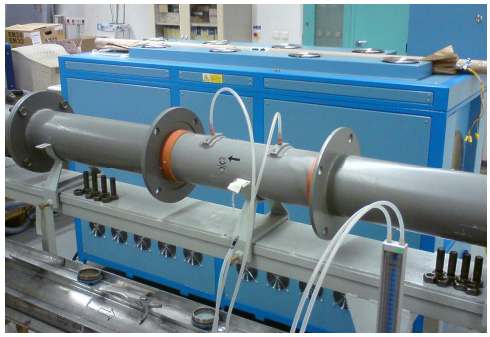
01	Název: Typ: Výrobce:	Měnič kmitočtu COMMANDER SE 5,5T Control Techniques	 Sériové číslo: 3989006008
02	Název: Typ: Výrobce:	Středotlaký ventilátor RSH PK 12 3227 velikost315 JANKA Radotín	 3kW, 3760min^{-1}
03	Název: Typ: Výrobce:	Snímač teploty Pt100, 0÷150℃, 4 ÷20mA ZPA Nová Paka	 Sériové číslo: 40511280920211100
04	Název: Typ: Výrobce:	Snímač diferenciálního tlaku 3051 CD1 A22A1CB4Q4 ROSEMONT	 Kalibrace na rozsah 0÷3500 Pa Sériové číslo: 7079598/1297
05	Název: Typ: Výrobce:	Snímač diferenciálního tlaku 3051 CD1 A22A1CB4Q4 ROSEMONT	Kalibrace na rozsah 0÷500 Pa Sériové číslo: 7079597/1297
06	Název: Typ: Výrobce:	Revizní manometr U100 ELABORA	 Třída přesnosti 0,5; P_{max}=10 kPa Výrobní číslo: 02/98
07	Název: Typ: Výrobce:	Revizní manometr U100 ELABORA	 Třída přesnosti 0,5; P_{max}=10 kPa Výrobní číslo: 03/98
08	Název: Typ: Výrobce:	Zdroj stabilizovaný AUL 310 22-013-011 ZPA Košíře	Evidenční číslo: 70008644 Sériové číslo: 881918
09	Název: Výrobce:	Zdroj stabilizovaný AT	Evidenční číslo: 70003068 Sériové číslo: 755737063
10	Název: Typ: Výrobce:	Digitální multimetr 34410A AGILENT	 Sériové číslo: MY47001058
11	Název: Typ: Výrobce:	Digitální multimetr 34410A AGILENT	 Sériové číslo: MY47001031
12	Název: Typ: Výrobce:	Digitální multimetr 34410A AGILENT	 Sériové číslo: MY47001051
13	Název: Typ: Výrobce:	HART komunikátor 257 R2E11B0000 ROSEMONT	 Sériové číslo: 9742-1213M

Tabulka 7-1 Seznam použitých přístrojů

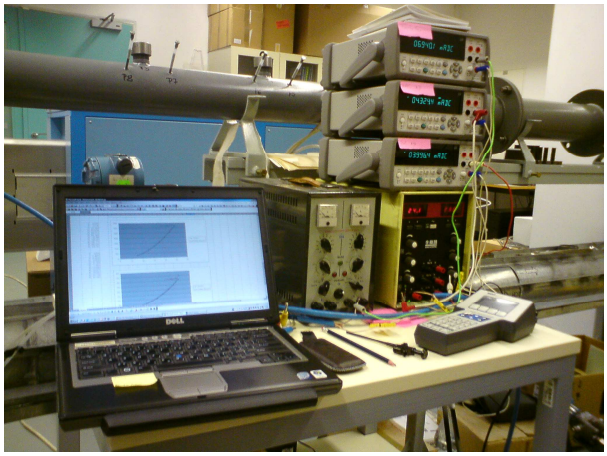
Reálné uspořádání měřících přístrojů a zařízení je na **Obr. 7-7** až **Obr. 7-9**.

Obr. 7-7 Uspořádání měřící tratě





Obr. 7-8 Referenční clona a měřící trubice



Obr. 7-9 Zapojení měřících přístrojů

7.5 Měření

Měření bylo prováděno tím způsobem, že byl nastaven průtok vzduchu prostřednictvím změny otáček ventilátoru měřící tratě. Byl změřen aktuální průtok vzduchu prostřednictvím Δp na normalizované cloně. Současně byl stejným způsobem změřen diferenční tlak Δp na cloně měřící trubice. Tento postup byl

Měření průtoku VUT FEKT UAMT 1.4.2010			Teplota okolí: 24℃			
Ventilátor	**Referenční měření průtoku**		**Měření průtoku trubicí**		**Teplota vzduchu proudícího v měřící trati**	
f	**I_r**	**Δp_r**	**I_m**	**Δp_m**	**I_T**	**T**
[Hz]	**[mA]**	**[Pa]**	**[mA]**	**[Pa]**	**[mA]**	**[℃]**
5	4,127	27,78	4,388	12,13	6,854	26,76
10	4,562	122,94	4,612	19,13	6,730	25,59
15	5,306	285,69	5,016	31,75	6,732	25,61
20	6,351	514,28	5,642	51,31	6,743	25,72
25	7,701	809,59	6,502	78,19	6,841	26,63
30	9,345	1169,22	7,553	111,03	6,863	26,84
35	11,274	1591,19	8,857	151,78	6,901	27,20
40	13,478	2073,31	10,398	199,94	6,945	27,61
45	15,998	2624,56	12,236	257,38	7,053	28,62
50	18,732	3222,63	15,148	348,38	7,153	29,56
5	4,126	27,56	4,398	12,44	7,291	30,85
10	4,557	121,84	4,625	19,53	7,231	30,29
15	5,292	282,63	5,029	32,16	7,186	29,87
20	6,330	509,69	5,647	51,47	7,069	28,77
25	7,677	804,34	6,482	77,56	7,073	28,81
30	9,312	1162,00	7,543	110,72	7,039	28,49
35	11,245	1584,84	8,820	150,63	7,132	29,36
40	13,423	2061,28	10,398	199,94	7,198	29,98
45	15,904	2604,00	12,114	253,56	7,263	30,59
50	18,598	3193,31	15,243	351,34	7,361	31,51
5	4,124	27,12	4,399	12,47	7,286	30,81
10	4,563	123,16	4,621	19,41	7,204	30,04
15	5,293	282,84	5,026	32,06	7,163	29,65
20	6,327	509,03	5,638	51,19	7,150	29,53
25	7,677	804,34	6,482	77,56	7,169	29,71
30	9,307	1160,91	7,541	110,66	7,156	29,59
35	11,247	1585,28	8,822	150,69	7,156	29,59
40	13,425	2061,72	10,357	198,66	7,203	30,03
45	15,893	2601,59	12,087	252,72	7,289	30,83
50	18,615	3197,03	15,245	351,41	7,274	30,69

Tabulka 7-2 Naměřené hodnoty

opakován pro jednotlivé nastavené hodnoty průtoků prostřednictvím změny frekvence od 5Hz do 50Hz, což umožňoval frekvenční měnič. Po otestování měřícího postupu a odstranění drobných nedostatků byl třikrát proveden stejný opakovaný postup měření pro celý rozsah průtoků. Výsledky měření jsou uvedeny v **Tabulce 7-2**.

7.6 Zpracování výsledků

Referenční hodnota průtoku se určuje dle [16], [17] dle vzorce (23) do kterého se dosadí příslušné koeficienty charakterizující měřící clonu, způsob instalace a charakter proudění. Při úpravě vzorce na tvar (24) lze jednotlivé součinitele sloučit do jednoho koeficientu k určujícího závislost mezi diferenciálním tlakem a průtokem clonou.

Součinitel průtoku	$C_r = 0{,}6021$
Expanzní součinitel	$\varepsilon = 0{,}9947$
Průměr potrubí	$d_r = 81{,}50$ mm
Průměr potrubí	$D_r = 61{,}05$ mm
Poměr průměrů	$\beta_r = D_r / d_r = 0{,}7491$

$$w = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2\Delta p \rho} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (23)$$

$$w = \frac{C}{\sqrt{1-\beta^4}} \cdot \varepsilon \cdot \frac{\pi}{4} \cdot d^2 \cdot \sqrt{2\rho} \cdot \sqrt{\Delta p} = k \cdot \sqrt{\Delta p} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (24)$$

$$w = \frac{0{,}6021}{\sqrt{1-0{,}7491^4}} \cdot 0{,}9947 \cdot \frac{\pi}{4} \cdot 81{,}5^2 \cdot \sqrt{2 \cdot 1{,}2041} \cdot \sqrt{\Delta p_r} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (25)$$

$$w = 3{,}2868 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta p_r} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (26)$$

Do vzorce (24) byly dosazeny charakteristiky referenční normalizované clony (25) a dostáváme vztah (26), který slouží k výpočtu hmotnostního průtoku na základě Δp na normalizované cloně. V **Tabulce 7-3** uvedeny zpracované výsledky měření.

Hodnoty diferenciálního tlaku jsou průměrné hodnoty pro tři měření při stejném průtoku. Z hodnot Δp_r jsou dle vztahu (26) vypočteny hodnoty hmotnostního průtoku, které jsou dále přepočteny dle vztahu (14) na objemový průtok.

Přepočtový koeficient k_m bude určen na základě měření dle vztahu (28), který vychází z předpokladu stejného průtoku oběma měřícími clonami dle vztahu (27).

$$w = k_r \cdot \sqrt{\Delta p_r} = k_m \cdot \sqrt{\Delta p_m} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (27)$$

$$k_m = k_r \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r}{\Delta p_m}} = 3{,}2868 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\frac{\Delta p_r}{\Delta p_m}} \qquad [\text{ kg.s}^{-1}\text{]} \qquad (28)$$

Na základě změřeného Δp_m na cloně trubice je dle vztahu (28) vypočten koeficient k_m. Tento koeficient se předpokládá konstantní pro celý rozsah průtoků přípustný pro měřící clonu, referenční clona je navrhovaná pro průtoky větší než 80 $m^3.h^{-1}$, clona měřící trubice je optimalizovaná pro vyšší průtoky. Z tohoto důvodu je hodnota k_m určena jako průměr hodnot odpovídajících průtoku v intervalu <165;556> $m^3.h^{-1}$ a tato hodnota je $k_m = 10{,}3862.10^{-3}$.

Ventilátor	Referenční měření průtoku			Měření průtoku trubicí	
f	Δp_r	w	Q	Δp_m	$k_m.10^{-3}$
[Hz]	[Pa]	[$kg.s^{-1}$]	[$m^3.h^{-1}$]	[Pa]	[$kg.s^{-1}.Pa^{-2}$]
5	27,49	0,0172	51,52	12,34	4,9049
10	122,65	0,0364	108,83	19,35	8,2739
15	283,72	0,0554	165,52	31,99	**9,7884**
20	511,00	0,0743	222,14	51,32	**10,3712**
25	806,09	0,0933	279,00	77,77	**10,5818**
30	1164,04	0,1121	335,27	110,80	**10,6533**
35	1587,10	0,1309	391,49	151,03	**10,6547**
40	2065,44	0,1494	446,60	199,51	**10,5754**
45	2610,05	0,1679	502,04	254,55	**10,5247**
50	3204,32	0,1861	556,26	350,38	**9,9397**

Tabulka 7-3 Výsledky měření

7.7 Přesnost měření

7.7.1 Přesnost měření průtoku

Relativní chyba měření průtoku: δ_Q = 1,1 %

Určeno dle ČSN EN ISO 5167 [15], [16]

7.7.2 Přesnost měření tlaku

$$\delta_p = 2 * \left[0{,}025 + 0{,}005 \cdot \left(\frac{URL}{rozsah} \right) \right] \quad [\,\%\,] \quad (29)$$

$$\delta_p = 2 * \left[0{,}025 + 0{,}005 \cdot \left(\frac{6230}{3500} \right) \right] = 0{,}07\% \quad [\,\%\,] \quad (30)$$

URL (Upper Range Limit) = 6230 Pa

Nastavený rozsah 3500 Pa

Určeno dle katalogového listu [18]

7.7.3 Přesnost měření proudu

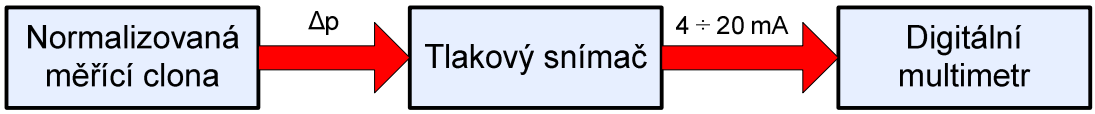
Proud byl měřen pomocí digitálního multimetru

$$\delta_{mm} = \delta_M + \delta_R = 0{,}02 + 0{,}008 = 0{,}028 \quad [\,\%\,] \quad (31)$$

Určeno dle katalogového listu [19]

7.7.4 Celková přesnost nepřímého měření

Jedná se o nepřímé měření, kde se projeví nepřesnost celého sériového měřícího řetězce který je naznačen na **Obr. 7-10**.



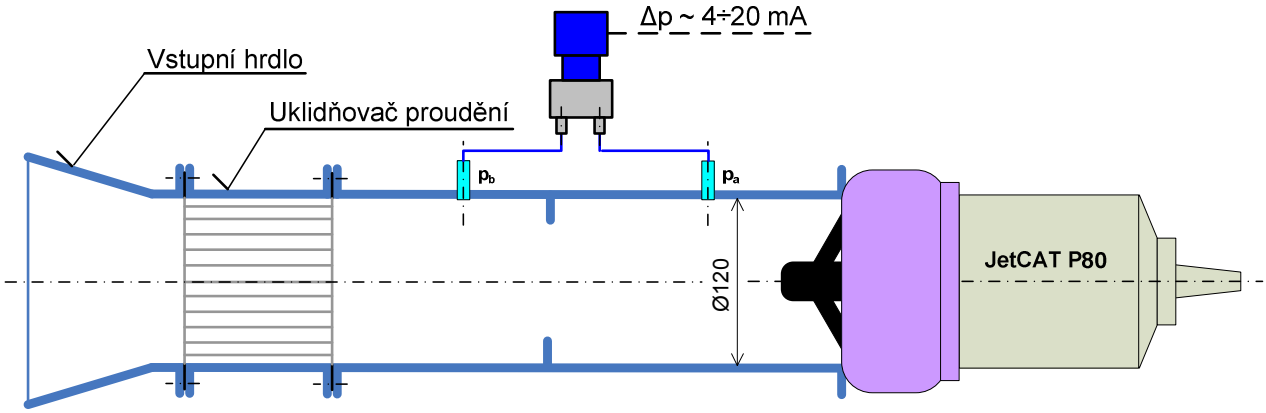
Obr. 7-10 Měřící řetězec

$$\delta_C = \delta_Q + \delta_p + \delta_{mm} = 1{,}1 + 0{,}07 + 0{,}028 = 1{,}198 \quad [\,\%\,] \quad (32)$$

Celková relativní chyba měření: δ_C = 1,2 %

8. MĚŘENÍ PRŮTOKU VZDUCHU MOTOREM

Na **Obr. 8-1** je znázorněno výsledné uspořádání měřící soustavy pro měření průtoku vzduchu Turbínového modelářského motoru JetCAT P80 během jeho testů na měřícím standu. Jedná se o modifikované uspořádání dle **Obr. 6-9**, který představoval základní návrh koncepce. Trubice je upevněna přímo k sacímu hrdlu motoru na druhé straně je opatřena Uklidňovačem proudění, který bude navržen dle ČSN EN ISO 5167 [15], [16]. Tento element zajistí uklidnění průtoku před vstupem do měřící trubice a eliminuje tak ekvivalentní uklidňovací délku přímého úseku potrubí. K navození druhu proudění, které se vyskytuje v uzavřené měřící trati je uklidňovači předřazeno vstupní hrdlo. Měřící trubice, uklidňovač proudění a vstupní

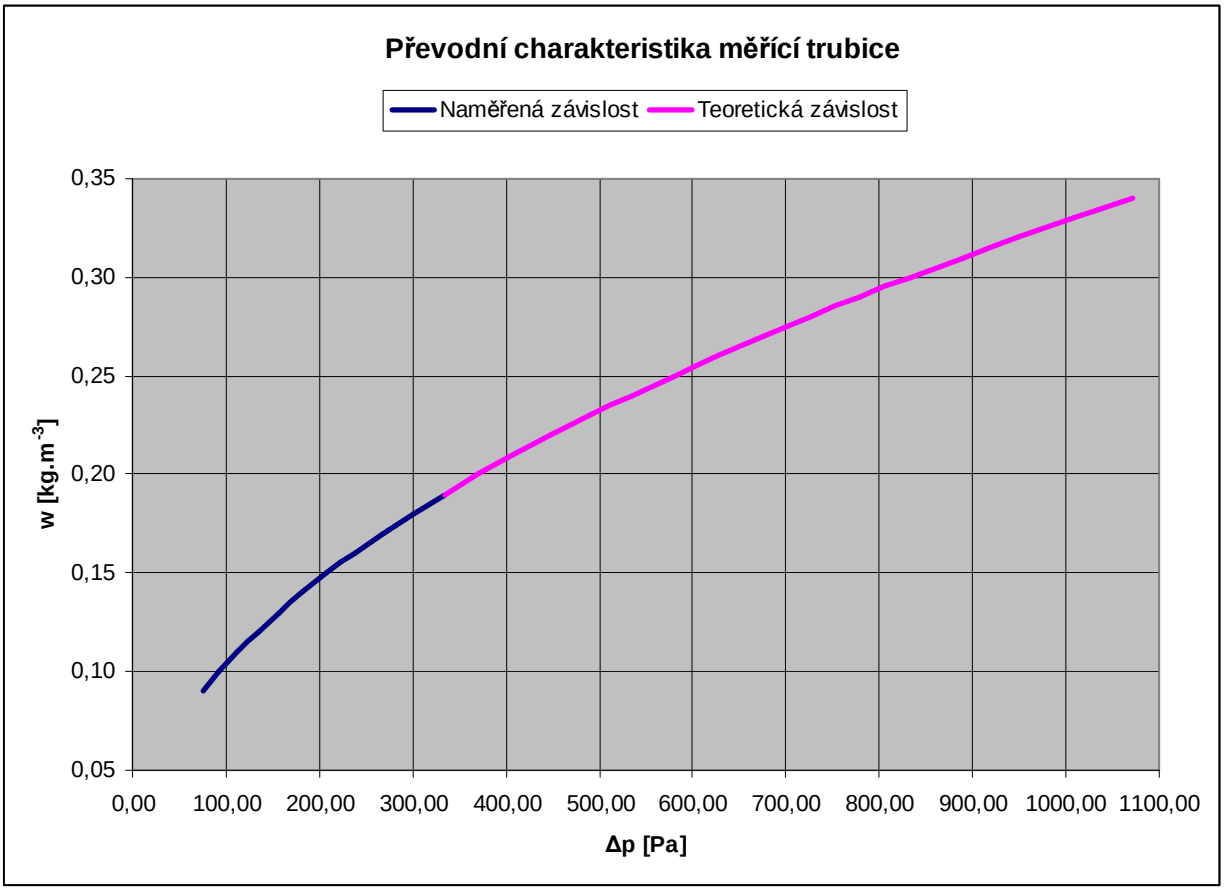


Obr. 8-1 Výsledné uspořádání měřící soustavy pro Jet CAT P80

hrdlo tvoří jeden celek, který je pevně spojen s motorem. Diferenciální snímač tlaku může být umístěn mimo měřící trubici a připojen k odběrům tlaku pomocí flexibilních plastových hadiček. Analogový výstup ze snímače reprezentuje diferenciální tlak na měřící cloně, který je možné dle vztahu (33) přepočíst na hmotnostní průtok nebo dle vztahu (34) na průtok objemový. Závislost hmotnostního průtoku na diferenciálním tlaku je zobrazena v **Grafu 8-1**.

$$w = k_m \cdot \sqrt{\Delta p_m} = 10{,}3862 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta p_m} \qquad [\ \mathrm{kg.s^{-1}}\ ] \qquad (33)$$

$$Q = \frac{k_m \cdot \sqrt{\Delta p_m}}{\rho} = \frac{10{,}3862 \cdot 10^{-3} \cdot \sqrt{\Delta p_m}}{\rho} \qquad [\ \mathrm{m^3.s^{-1}}\ ] \qquad (34)$$



Graf 8-1 Převodní charakteristika měřící trubice

9. ZÁVĚR

Z analýzy dané problematiky je zřejmé že zvolený modelářský motor P-80 je vhodný pro identifikaci modelu turbínového motoru, získané poznatky ohledně chování motoru, jeho parametrech atd. budou použity v dalších krocích projektu ENGINE SIMULATOR, neméně důležitá je i analýza rozdílů mezi modelářským turbomotorem a turbodmychadlovými motory používanými v civilním letectví. Při zohlednění těchto rozdílů a jejich implementaci do výsledného simulačního modelu bude dosaženo věrné reprezentace funkce zvoleného typu motoru, což umožní sofistikovanou simulaci a verifikaci funkce jednotek FADEC, což je v souladu s hlavním cílem projektu, v jehož kontextu je tato práce zpracovávána.

Teoretická analýza chování motoru a popis jeho základních funkčních bloků z hlediska jejich parametrů a transformačních funkcí je také přínosná při navrhování vhodného umístění senzorů v motoru, umožní pochopení vzájemného ovlivňování veličin a eliminaci potenciálních zdrojů chyb měřících metod.

Co se týče měření provozních veličin motoru, měření tlaku, teploty, otáček a tahu lze realizovat použitím standardních senzorů, umístěných vhodně v jednotlivých stupních motoru, či na upevňovacím rámu v případě měření tahu. Jako problematické se jeví měření průtoku vzduchu motorem. Tento parametr je dosti zásadní pro určení provozních a výkonových charakteristik motoru.

Pro měření průtoku vzduch byla zvolena metoda založená na tlakové diferenci vznikající na normalizované cloně. Původním záměrem bylo ověřit tuto metodu na elektro-dmychadle. Z analýzy dostupných možností referenčního měření průtoku vyplynulo, že měření na elektro-dmychadle nebude nezbytné realizovat. Bylo možné přejít přímo k návrhu měřící trubice pro měření na modelářském turbínovém motoru P80 firmy JetCAT. Kalibrace měřící trubice byla provedena na Měřící trati VUT FEKT UAMT prostřednictvím referenční normalizované měřící clony, která je za tímto účelem v trati instalována.

Navrhovaný způsob měření průtoku vzduchu motorem je použitelný pro modelářský turbínový motor JetCAT, a to jak z hlediska snadné instalace na měřený

objekt tak i z hlediska začlenění výstupního analogového signálu do automatizovaného sběru a zpracování provozních dat motoru.

Další oblast, kterou by bylo vhodné se zabývat v navazujících Bakalářských pracích je ovlivňování průtoku vzduchu před turbomotorem, a průřezu výstupní trysky, což umožní posuvy charakteristik jednotlivých komponentů motoru a také celkového chování tohoto modelářského motoru. Dalším řídícím parametrem, kterým lze chování motoru zásadně ovlivnit je odpouštění vzduchu za kompresorem.

10. SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

[1] STAROSTA, M.,: *Simulátor leteckého motoru (Engine simulator)-Návrh HW*, Bakalářská práce, Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2009, 51 s.

[2] *FADEC*, Wikipedia, the free encyclopedia
Dostupné z: <http://en.wikipedia.org/wiki/FADEC>

[3] DRAXLER, K., MARŠÁLEK, J.: *Pohon*, učební texty JAR-66, Brno, CERM, 2005, 87 s. ISBN 80-7204-368-4

[4] KREINER, A., LIETZAU, K.: *The Use Of Onboard Real-time Models For Jet Engine Control*, MTU Aero Engines
Dostupné z:
<www.mtu.de/en/technologies/engineering_news/development/26869vki_kreiner_lietzau.pdf>

[5] HORACEK, P., FUKA,J.: *Systémy a modely*, skripta ČVUT, 2. vyd., Praha, , Vydavatelství ČVUT, 2001, 232 s. ISBN 80-01-01923-3

[6] COHEN, H.-ROGERS, F.C.-SARAVANAMUTTO, H.I.H. *Gas Turbine Theory*. 4th Edition. Cornwall: T. J. Press, 1996. 442 s. ISBN 0-582-23632-0

[7] SHETTY, P., MUKHERJEE, J. *Aircraft Engine Gaspath Modeling*, zpráva Honeywell Laboratories, Honeywell International, 2007, 95 s.

[8] LEONARD O., THOMAS J. P.: *Ten Years of Experience With a Small Jet Engine as a Support for education*, Turbomachinery Group, University of Liège, Belgie, 2009 Dostupné z:
<www.turbinetechnologies.com/minilab/Technical%20Papers/UniversityLiege.pdf >

[9] RAHMAN N. U., WHIDBORNE J. F.: *A numerical investigation into the effect of engine bleed on performance of a single-spool turbojet engine*, Dynamic simulations and Controls Group, Cranfield University, Bedforshire, UK, 2008 Belgie, 2009 Dostupné z:
<https://dspace.lib.cranfield.ac.uk/bitstream/1826/3327/1/Engine%20bleed%20on%20performance%20of%20a%20single-spool%20turbojet%20engine-2008.pdf>

[10] WALSH, P.P., FLETCHER, P.: *Gas Turbine Performance*. 2nd Edition. Blackwell Publishing, 2004. 658 s. ISBN 0-632-06434-X

[11] ADAMEC, J. a kol.: *Pohonná jednotka*, učební texty JAR-FCL-1, Brno, CERM, 2006, 266 s. ISBN 80-7204-477-X

[12] ĎAĎO, S-KREIDL, M.: *Senzory a měřící obvody*. Vydání druhé. Praha: ČVUT Praha, 1999. 215s. ISBN 80-01-02057-6

[13] OMEGA: *Flow & Level Measurement.* Handbook, Putman Publishing Company and OMEGA Press LLC, 2001. 113s. Dostupné z:
<http://www.omega.com/literature/transactions/Transactions_Vol_IV.pdf>

[14] VASAMODEL, firemní literatura
Dostupné z: <http://www.vasamodel.cz>

[15] ČSN ISO 5167-1: *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí, Část 1: Obecné principy a požadavky*
Český normalizační institut, 2003

[16] ČSN ISO 5167-2: *Měření průtoku tekutin pomocí snímačů diferenčního tlaku vložených do zcela zaplněného potrubí, Část 2: Clony*
normalizační institut, 2003

[17] ŠEDIVÁ (ORLÍKOVÁ), S.,: *Optimalizace parametrů víceotvorové rychlostní sondy*, Disertační práce, Brno, Vysoké učení technické v Brně, 2002, 157 s.

[18] ROSEMOUNT 3051: *katalogový list*; 00813-0117-4001, Rev FA Srpen 2004
Dostupné z:
<http://www.zpanp.cz/cs/produkty-a-sluzby/snimace-tlaku-a-tlakove-diference/>

[19] Agilent Technologies, Inc.: *Digital multimeter product overview*; 2007;
Dostupné z: <http://www.home.agilent.com/agilent/product.jspx>

11. SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK A SYMBOLŮ

Zkratky:

FADEC - Full Authority Digital Engine Control

DFSS - Design For Six Sigma

UDMOVC - Understand Define Model Optimize Verify Control

EEC - Electronic Engine Control

ECU - Electronic Control Unit

FBW - Fly By Wire

FT - Fault Tolerant *Systém*

APU - Auxiliary Power Unit

FMS - Flight Management System

IU - Input Unit

OU - Output Unit

AMT - Advanced Micro Turbine

EGT - Engine Gas Temperature

RPM - Revolutions Per Minute

FF - Fuel Flow

ISA - The International Standard Atmosphere

FAR - Fuel Air Ratio

URL - Upper Range Limit

Symboly:

C - Součinitel průtoku

d, D - Průměr

e- Tloušťka

F - Tah motoru

g - Gravitační zrychlení

h - Výška

I - Elektrický proud

k- přepočtový koeficient průtoku

l - Délka

m - Hmotnost

N - Otáčky rotorové soustavy (otáčky kompresoru, turbíny)

p - Tlak

Δp - Tlaková diference

p_I - Tlak na vstupu (vstupní tlak)

p_O - Tlak na výstupu (výstupní tlak)

Q - Objemový průtok

r - Plynová konstanta

S - Plocha (průtočný průřez)

T - Teplota

T_I - Teplota na vstupu (vstupní teplota)

T_O - Teplota na výstupu (výstupní teplota)

$\vec{u}$ - Vektor řízení

V - Objem

v - Rychlost

w - Hmotnostní průtok

w_I - Hmotnostní průtok na vstupu (vstupní hmotnostní průtok)

w_O - Hmotnostní průtok na výstupu (výstupní hmotnostní průtok)

$\vec{x}$ - Vektor vstupů

$\vec{y}$ - Vektor výstupů

α, β - Poloha (natočení) lopatek statoru nebo rotoru

β - Rozměrový koeficient normalizované clony

δ - Relativní chyba měření

ε - Expanzní součinitel

ρ - Hustota

Indexy:

0, 1, 2, 3, 4, 5 - Stupně motoru / místa / provozní stavy

A - Air/Vzduch, Aircraft / Letadlo

a - Ambient / Okolní prostředí

C - Celkový

E - Elektrodmychadlo

F - Fuel / Palivo

G - Gross / Hrubý

I - In (Vstup)

K - Kelvin / Termodynamická teplota

M - Měřené hodnoty

m - měřící trubice

mm -multimetr

O - Out (Výstup)

p - tlak

Q - Průtoku

R- Rozsahu

T – Trubice, Trať

r - referenční měření

12. SEZNAM TABULEK

Tabulka 3-1 Hlavní měřené parametry motoru……..….27
Tabulka 4-1 Parametry motoru JetCat P80……..29
Tabulka 6-1 Průtoky vzduchu motorem ……...……..45
Tabulka 6-2 Parametry elektrodmychadla……..……...……..45
Tabulka 6-3 Průtoky vzduchu dmychadlem …..……...……..46
Tabulka 6-4 Parametry měřící tratě……..……..……...……..46
Tabulka 6-5 Rozsahy průtoků……...……..……...……..47
Tabulka 7-1 Seznam použitých přístrojů……...……..……...57
Tabulka 7-2 Naměřené hodnoty……...……..……...…..59
Tabulka 7-3 Výsledky měření……...……..……...…...……61

13. SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1-1 Vývojový proces s využitím metod Six Sigma……..….10
Obr. 1-2 Struktura projektu ENGINE SIMULATOR……...11
Obr. 2-1 Příklad provedení jednotky FADEC……...17
Obr. 2-2 Blokové schema vnitřní struktury jednotky FADEC……..18
Obr. 3-1 Termodynamický transformační blok…….21
Obr. 3-2 Termodynamický parametrický transformační blok……...……22
Obr. 3-3 Blokové schema modelářského turbomotoru…….....23
Obr. 3-4 Blokové schema reálného turbodmychadlového motoru……..…..23
Obr. 3-5 Parametry jednotlivých stupňů motoru…….……..25
Obr. 3-6 Hlavní měřené parametry motoru……...……27
Obr. 4-1 Modelářsky turbínový motor P-80SE……...……..28
Obr. 4-2 Modelářsky turbínový motor P-80SE - základní rozměry……..29
Obr. 4-3 Kompresor - transformační blok……...……..30
Obr. 4-4 Charakteristické křivky: Tlakový poměr/průtok……..…31
Obr. 4-5 Charakteristické křivky účinnosti……31
Obr. 4-6 Spalovací komora - transformační blok……..……32

Obr. 4-7 Turbína - transformační blok……..…….33
Obr. 4-8 Charakteristické křivky: Průtok/Tlakový poměr…….34
Obr. 4-9 Charakteristické křivky účinnosti……...…….34
Obr. 4-10 Závislost tahu na otáčkách motoru……..35
Obr. 4-11 Závislost průtoku paliva na otáčkách motoru……..…36
Obr. 5-1 Měření teploty plynů v motoru a na jeho výstupu……..38
Obr. 5-2 Objemový průtokoměr……...…….39
Obr. 5-3 Princip měření - změna energie……..……41
Obr. 5-4 Návrh měřícího řetězce……...……42
Obr. 5-5 Algoritmus vyhodnocování naměřených hodnot……43
Obr. 6-1 Měřící trubice DN80……...…48
Obr. 6-2 Instalace trubice DN80 do měřící trati……48
Obr. 6-3 Uspořádání měřící soustavy pro elektro-dmychadlo……...49
Obr. 6-4 Měřící trubice DN100…….……50
Obr. 6-5 Instalace trubice DN100 do měřící trati……..……50
Obr. 6-6 Uspořádání měřící soustavy pro Jet CAT P80……51
Obr. 7-1 Základní rozměry měřící trubice…….……53
Obr. 7-2 Celkový pohled na měřící trubici……54
Obr. 7-3 Clona Ø90 instalovaná v měřící trubici……...……54
Obr. 7-4 Připojovací místo pro měření tlaku…….……55
Obr. 7-5 Ukončení trubice…….……55
Obr. 7-6 Uspořádání měřícího zařízení……..……56
Obr. 7-7 Uspořádání měřící tratě……...…58
Obr. 7-8 Referenční clona a měřící trubice……58
Obr. 7-9 Zapojení měřících přístrojů…….……58
Obr. 7-10 Měřící řetězec……..……62
Obr. 8-1 Výsledné uspořádání měřící soustavy pro Jet CAT P80…..……63

14. SEZNAM GRAFŮ

Graf 6-1 Grafické zobrazení rozsahů průtoků ……...……...47
Graf 6-2 Společný rozsah průtoků ……....……...49
Graf 6-3 Společný rozsah průtoků ……....……...50
Graf 8-1 Převodní charakteristika měřící trubice…….....64