



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV STROJÍRENSKÉ TECHNOLOGIE
FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF MANUFACTURING TECHNOLOGY

MOŽNOSTI POUŽITÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN V LETECKÉ DOPRAVĚ

PROPFAN ENGINES IN CIVIL AVIATION TRANSPORTATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Andrej POLÁK

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Miroslav Šplíchal, Ph. D.

BRNO 2015

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2014/2015

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Andrej Polák

který/která studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Základy strojního inženýrství (2341R006)**

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

Možnosti použití motorů koncepce Propfan v letecké dopravě

v anglickém jazyce:

Propfan engines in civil aviation transportation

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Pohonné jednotky koncepce "Propfan" představují možný směr pro vývoj nových palivově úsporných letadel.

Úkolem práce je představit historii vývoje motorů koncepce "Propfan" a zhodnotit možnost jejich nasazení v letecké dopravě.

Cíle bakalářské práce:

- Popis historie vývoje pohonných jednotek koncepce Propfan;
- Představení technického řešení a možných konfigurací těchto jednotek;
- Popis hlavních výhod;
- Popis nevýhod a možností jejich eliminace;
- Zhodnocení možností nasazení v reálném provozu.

Seznam odborné literatury:

- 1) Kocáb, Jindřich, Letadlové motory. 1. vyd. Praha : Kant, 2000. 176 s. ISBN 80-902914-0-6
- 2) Jane's aero-engines / Coulsdon : Jane's Information Group Limited, 2007. 778 s. : il., čb. fot. ISSN 1748-2534

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2014/2015.

V Brně, dne 20.11.2014

L.S.

doc. Ing. Jaroslav Juračka, Ph.D.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan fakulty

ABSTRAKT

POLÁK Andrej: Možnosti použití motorů koncepce propfan v letecké dopravě

Bakalářská práce je psaná rešeršní formou a pojednává o leteckých motorech koncepce propfan. Po představení samotné koncepce se první část zabývá principem fungování motorů a jejich propulsní účinností. Druhá část stručně popisuje konstrukci těchto motorů se zaměřením na specifické části odlišující motory koncepce propfan od ostatních leteckých motorů. Následně jsou shrnuty vlastnosti těchto motorů, popsány jejich výhody a nevýhody spolu s možnostmi eliminace nevýhod. Nakonec je stručně popsána historie vývoje koncepce propfan.

Klíčová slova

letecký motor, propfan, motor s nezaplášťovaným dmychadlem, úspora paliva, hlučnost, Boeing 7J7, obtokový poměr

ABSTRACT

POLÁK Andrej: Propfan engines in civil aviation transportation

Bachelor thesis is written in the search form and discusses propfan aircraft engines. After introducing the concept itself, the first part deals with the principle functioning of engines and propulsion efficiency. The second part briefly describes the construction of these engines with a focus on specific parts of propfan engines differentiating concept from other aircraft engines. Then summarizes the features of these engines, describes their advantages and disadvantages and the possibilities of eliminating disadvantages. Finally briefly describes the history of the development of propfan engines.

Key words

aircraft engine, propfan, unducted fan, fuel efficiency, noise level, Boeing 7J7, bypass ratio

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

POLÁK, A. *Možnosti použití motorů koncepce Propfan v letecké dopravě*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2015. 44 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Miroslav Šplíchal, Ph.D..

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma **Možnosti použití motorů koncepce Propfan v letecké dopravě** vypracoval(a) samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených na seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Andrej Polák

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto Ing Miroslavu Šplíchalovi Ph.D. za cenné připomínky a rady při vypracování bakalářské práce.

OBSAH

ÚVOD.....	9
1 PŘEDSTAVENÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN.....	10
2 SROVNÁNÍ VRTULE A DMYCHADLA	12
3 PRINCIP FUNGOVÁNÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN.....	14
3.1 Propulzní účinnost.....	15
4 KONSTRUKCE MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN	18
4.1 Konstruktivní řešení lopatek.....	18
4.2 Konstrukce dmychadel.....	21
4.3 Jádro motoru.....	21
4.3.1 Vstupní ústrojí motoru	21
4.3.2 Kompresory	22
4.3.3 Skříň motoru – stator	22
4.3.4 Spalovací komory	22
4.3.5 Turbíny.....	23
4.4 Motory s volnou turbínou.....	23
4.5 Motory s reduktorem.....	25
4.6 Tažné uspořádání	25
4.7 Tlačné uspořádání	26
5 ZÁSTUPCI MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN.....	27
5.1 Motor SR-7L	27
5.2 Motor GE-36	28
5.3 Motor 578-DX.....	28
5.4 Motor progress D-27	29
6 VÝHODY POUŽITÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN.....	30
7 NEVÝHODY POUŽITÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN.....	32
8 ZHODNOCENÍ VÝVOJE.....	36
ZÁVĚRY	38

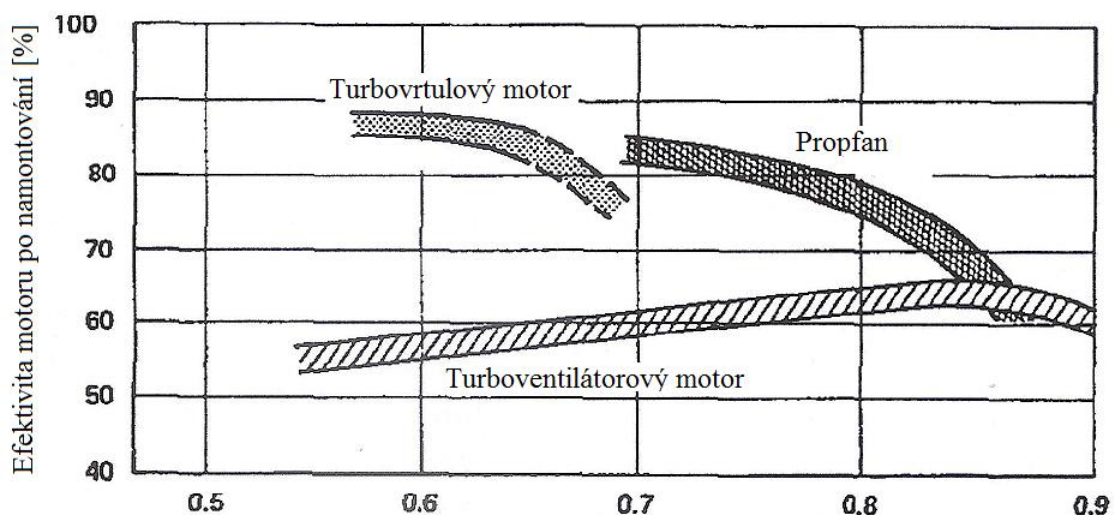
ÚVOD

Tato bakalářská práce pojednává o leteckých motorech koncepce propfan. Jedná se o motory s potenciálem zabrat si své místo v komerční sféře letecké dopravy. Byly vyvinuty v 80. letech minulého století jako reakce na prudký růst cen ropy a v době jejich vývoje je provázela značná propagace ze strany jejich výrobců a výrobců letadel mezi potenciální zákazníky – provozovatele aerolinek. Ačkoliv se jednalo o úsporné motory, jejich vývoj provázely určité komplikace. Přestože byly motory připravené k reálnému provozu, po ustálení situace na světovém trhu s ropou v polovině osmdesátých let došlo po ztrátě jejich hlavní výhody k zmražení jejich vývoje. Po roce 2008, kdy nastala další ropná krize a cena ropy se vyšplhala na své historické maximum, došlo ze strany výrobců pohonných jednotek pro leteckou dopravu k obnovení programů vyvíjejících tuto koncepci. Dnes je další motivací k vývoji motorů koncepce propfan i nižší produkce emisí těchto motorů, kde na rozdíl od minulosti je tento aspekt klíčový a převažuje nevýhody spojené s vysokou pořizovací cenou a údržbou motoru. Cílem samotné práce je přiblížit čtenáři problematiku těchto motorů, seznámit ho s možnými konstrukčními provedeními a s historickým pozadím provázejícím motory jejich vývojem a následně celou situaci zhodnotit.

1 PŘEDSTAVENÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN

Motory koncepce propfan byly vyvinuty ve snaze snížit spotřebu paliva v letecké dopravě po dramatickém růstu cen ropy po roce 1973. Iniciací pro růst cen pohonných hmot byly válečné konflikty na blízkém východě. Od roku 1967 čelil Izrael agresi ze strany arabských států a západní velmoci se postavily na stranu Izraele. To vedlo k uvalení embarga na dodávky ropy pro tyto země a k následné ropné krizi. Před touto krizí tvořilo palivo 25 % z nákladů provozu letadel, následkem skokového zvýšení cen stoupl podíl paliva v celkových nákladech provozu letadel na 50 %. [17]

Reakcí na cenu paliva byla snaha snížit spotřebu pohonných hmot. Nabízelo se použití turbovrtulových motorů, u kterých byla známá jejich propulzní účinnost a nabízely tak snadné řešení otázky spotřeby paliva. Tyto motory však nespĺňovaly standarty běžné pro osmdesátá léta a byly by krokem zpět. I s použitím nejnovějších technologií nebyly schopné konkurovat zavedeným turbodmychadlovým motorům v jejich rychlosti. Účinnost turbovrtulových motorů začínala rapidně klesat při překročení rychlosti 0,65 Ma, kdežto rozsah cestovních rychlostí turbodmychadlových motorů daného období začínal na hodnotách od 0,8 Ma výše. Průzkum trhu ukázal, že snížení komfortu cestování vzduchem nárůstem doby letu bylo nepřijatelné. Tato situace proto vyžadovala nalezení nového řešení nastalé situace. Jednou z variant řešení byla koncepce motorů nazvaná propfan (motor s nezaplášťovaným dmychadlem). Jednalo se o dvouproudový motor hybridní koncepce, která spojovala výhody obou výše jmenovaných motorů. Slibovala ekonomický provoz při zachování si rychlostí blízkých rychlosti zvuku, které již byly brány jako samozřejmost. Srovnání účinnosti jednotlivých koncepcí v závislosti na rychlosti letu můžete vidět na obrázku 1.1.



Obr. 1.1 Srovnání propulzní účinnosti jednotlivých druhů motorů [1]

Jednalo se o zcela nový druh pohonu a spolu s jeho výhodami se objevila i řada problémů, které bylo potřeba vyřešit. Mezi hlavní nedostatky propfanů lze uvést vysokou hlučnost a nákladnou výrobu a údržbu.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Motory koncepce propfan od turbovrtulových motorů odlišuje především dmychadlo. Dalo by se říci, že dmychadlo je nová obdoba vrtule. Toto tvrzení lze opřít o fakt, že vývojové označení propfanů bylo advanced turboprop engine neboli pokročilý turbovrtulový motor. Lopatky dmychadla jsou oproti listům vrtule kratší a jsou více zakřivené. První návrhy počítaly s přenosem energie pomocí reduktoru, pozdější návrhy pracovaly i s takzvanou volnou turbínou s protiběžnými rotory. Cestou k úspoře paliva bylo zvýšení propulzní účinnosti, to bylo dosaženo zvýšením obtokového poměru oproti turbodmychadlovým motorům (udává se až 25:1 oproti poměru 6:1, který byl běžný pro turbodmychadlové motory). Zachování cestovní rychlosti letadel bylo realizováno optimalizací tvaru lopatek, spolu s tím došlo k nárůstu zatížení lopatek a nutností vývoje nových materiálů, které by byly schopné splňovat provozní požadavky. [1]

Motory byly koncipovány hlavně pro provoz na krátké a střední vzdálenosti, kde se měla naplno projevit jejich účinnost. Udává se, že nová letadla osazená propfany měla nahradit až 1900 stávajících letadel společností Boeing a McDonnell Douglas. Jejich nasazení bylo plánováno nejpozději do roku 1990. [2]

Uvalením embarga na vývoz ropy východním velmocem ztratily arabské státy stojící za skokovým růstem cen ropy hlavního odběratele a postupem času se začaly potýkat s nestabilitou vlastního trhu, což je v roce 1985 donutilo toto embargo zrušit. Zrušením embarga došlo ke stabilizaci cen ropy na světových trzích a ke snížení cen paliv pro leteckou dopravu.

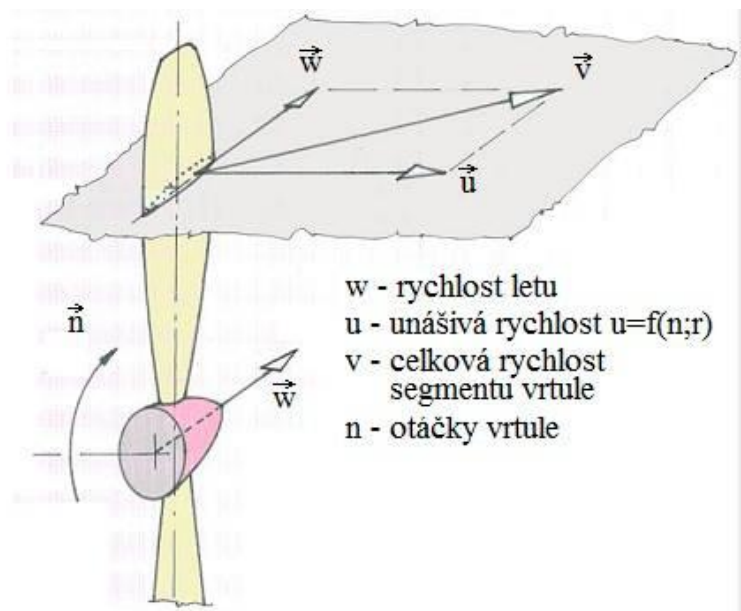
Přestože vývoj dokázal částečně eliminovat negativní projevy motorů, stále se projevovaly vyšší hlučnosti a jejich pořizovací náklady se nemohly s turbodmychadlovými motory rovnat. Vlivem poklesu nákladů na pohonné hmoty pomalu ztratily svou výhodu ekonomického provozu a tím vyprchal zájem leteckých společností o tuto koncepci, co vedlo až k úplnému zmražení jejich dalšího vývoje před jejich vypuštěním do provozu. [17]

2 SROVNÁNÍ VRTULE A DMYCHADLA

Jak již bylo zmíněno v kapitole zabývající se historií motorů propfan, tyto motory vznikly za účelem úspory paliva, kde nejjednodušší řešení by bylo použití již existujících turbovrtulových motorů. Vrtule však v té době nebyly schopny udržet komfort v rychlosti cestování a cestující by se tohoto komfortu vzdávali nesnadno. Proto byl započat vývoj nových „vrtulí“ dnes nazývaných dmychadla. Princip fungování vrtule a dmychadla jsou totožné a liší se pouze tvarem a velikostí.

Funkcí vrtule (dmychadla) je přeměna výkonu hřídele na tah motoru. Tato přeměna energie se neobejde beze ztrát, a tak je jedním z hlavních kritérií při výběru vrtule pro konkrétní letadlo její účinnost. Účinnost vrtule je ovlivňována mnoha faktory a nezávisí pouze na její konstrukci, ale i na provozních režimech (výška letu, letová rychlost, otáčky atd.). Vhodnost vrtule pro daný stroj je tedy dána provozními charakteristikami samotného letadla. Právě tady vrtule narazily na svůj strop a bylo nutné je nahradit novou technologií.

Hlavním problémem při konstrukci vrtulí (dmychadel) je vznik tlakových rázů když některá z částí vrtule překročí rychlost cca 0.85 Ma (rychlost obtékání profilu vrtule začne přesahovat 1 Ma a začne se projevovat stlačitelnost vzduchu). Tento jev nastává zpravidla u rozšířené části při konci listu vrtule viz obrázek 2-1 a značně snižuje účinnost vrtule, nehledě na to, že vzniklé rázy způsobují vibrace, které by



Obr. 2.1 Rychlost segmentu vrtule [5]

mohly mít pro vrtuli fatální následky. Rychlost vybraného segmentu vrtule se skládá z dopředné rychlosti (závislá na rychlosti letu) a na tečné rychlosti vzniklé rotací vrtule (závislá na průměru a otáčkách vrtule resp. dmychadla). Spolu se změnou tečné rychlosti souvisí změna dalšího parametru, kterým je úhel náběhu. Mění se úhel náběhu po délce listu vrtule (zakroucení vrtule). Změna úhlu náběhu po délce listu umožňuje urychlovat vzduch po celé délce listu na stejnou rychlost a tím docílit maximální účinnosti vrtule.

Zakřivení lopatek mělo také eliminovat proudění vzduchu v axiálním směru lopatky způsobené odstředivými silami. [1]

Existují dva způsoby jak snížit rychlost konců vrtule. Jedním z nich je snížení výstupních otáček z motoru při zachování délky listů. To však vede k snížení rychlosti, na kterou je vzduch urychlován a tím pádem i ke snížení letové rychlosti. Druhým způsobem

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

je zkrácení lopatek při zachovaných (zvýšených) otáčkách. Toto řešení umožní urychlovat proud vzduchu na vyšší rychlosti, ale sníží množství urychlovaného vzduchu a ke snížení propulsní účinnosti. Obecně byl trend při vývoji vrtulí směřován tou druhou cestou, což je vidět už v období 2. světové války, kde kompenzací za snížení množství urychlovaného vzduchu zkrácením lopatek bylo přidání listů. Na začátku zmíněného období byly používány dvoulisté vrtule, kdežto ke konci byla vidět letadla i s pětistými vrtulemi. Tento trend vývoje vedl až k dnešnímu vzhledu vrtulí, kterým říkáme dmychadla. Jedná se o „vrtule“ s velkým množstvím silně zakřivených lopatek s proměnlivým úhlem náběhu (natáčení lopatek). Listy vrtulí a lopatky dmychadel mají průřez hodně podobný profilu křídla letadla a fungují na stejném principu jako křídlo (na principu vzniku vztlaku). Ukázka rozdílu mezi vrtulí a dmychadlem na obrázcích 2-2 a 2-3. [3] [4]



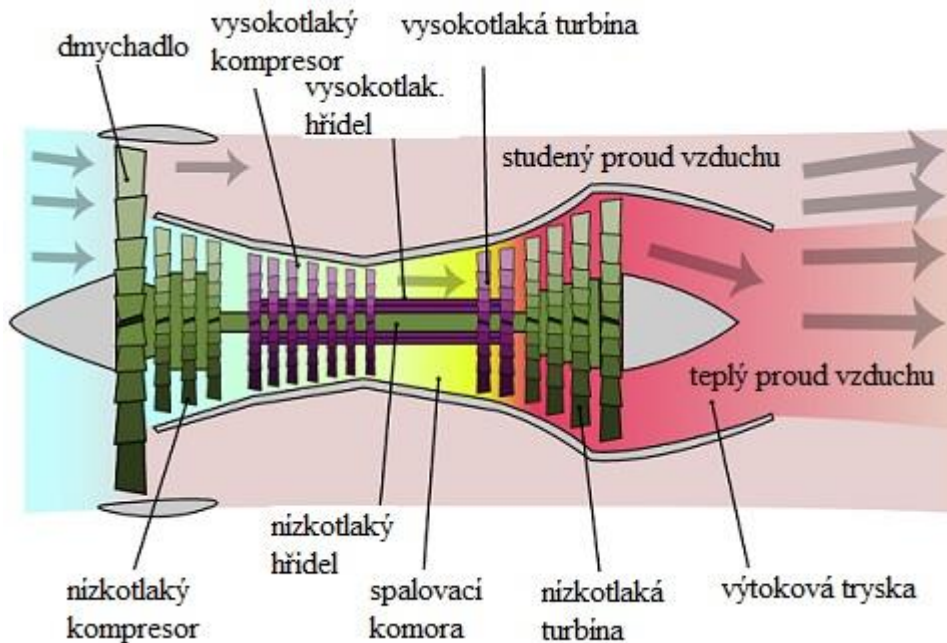
Obr. 2.2 Čelní pohled na dmychadlo motoru GE-36 s protiběžnými rotory [6]



Obr. 2.3 Čelní pohled na vrtuli letounu CC-130J Hercules [7]

3 PRINCIP FUNGOVÁNÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN

Motory koncepce propfan spadají do kategorie dvouproudových motorů s vysokým obtokovým poměrem. Obtokový poměr značí poměr vzduchu protékajícího jádrem motoru ku množství vzduchu obtékajícího jádro motoru. Vzduch procházející jádrem bývá nazýván teplý proud, nebo také primární proud a vzduch obtékající jádro motoru se nazývá studený, nebo sekundární proud viz obrázek 3-1. Dvouproudové motory využívají k docílení tahu urychlení většího množství vzduchu na nižší rychlost, na rozdíl od proudových motorů, které urychlují malé množství vzduchu na vysokou rychlost (v obou případech stejná letová rychlost). Urychlením velkého množství vzduchu na menší rychlosti dává při zachování rychlosti letu těmto motorům vyšší propulzní účinnost. Menší urychlení velkého objemu vzduchu však nemá zásadní vliv na použití těchto motorů v civilních dopravních letadlech, protože jsou pořád schopná dosáhnout rychlostí, které jsou běžné pro komfortní a bezpečné létání ve sféře civilního letectví.



Obr. 3.1 Tok vzduchu dvouproudovým dvouhřídelovým motorem spolu s popisem základních částí motoru [9]

Motory propfan mají hodně konstrukčních prvků stejných jako proudové motory. Zejména jádro motoru, které je ve své podstatě proudový motor. Hlavní rozdíl proudového motoru a jádra motoru dvouproudového (také motoru propfan) je výstup energie vytvořené spalováním paliva. U proudového motoru se část tepelné energie spotřebuje na pohon kompresoru a zbytek je ve výtokové trysce přeměněn na kinetickou energii (tah motoru). U dvouproudových motorů se část energie spotřebovává stejně, tedy na pohon kompresoru, zbylá energie však není přeměňována na kinetickou energii plynů vystupujících z motoru, ale na vytvoření přebytku výkonu na hřídeli spojující turbínu s dmychadlem. Samotné jádro motoru nevytváří žádný tah, nebo jen velice malý.

Jádro motoru je točivý tepelný stroj, který pracuje na podobném principu jako čtyřdobý spalovací motor. Jeho hlavní výhody a taky rozdíly oproti pístovému spalovacímu motoru jsou:

- Všechny cykly probíhají současně (sání, stlačování, spalování paliva a výfuk plynů)
- Žádné jeho hlavní části nekonají přímočarý vratný pohyb – nedochází ke ztrátám energie spojené s tímto dějem.

Vzduch je do motoru nasáván vstupním usměrňovacím ústrojím do kompresoru. Dále je v kompresoru stlačován a směřován do spalovací komory. Tady je do něj vsřikováno palivo. Hořením paliva za konstantního tlaku dochází k nárůstu tlaku plynů v komoře a tím i k nárůstu jejich tepelné energie. Tyto plyny dále pokračují přes usměrňovací lopatky do turbíny, kde předají část své energie k roztočení vysokotlaké turbíny, která zpětně pohání kompresor. Po průchodu vysokotlakou turbínou mají plyny stále vyšší tlak a teplotu než okolní atmosféra a jsou vedeny do nízkotlaké turbíny. Tady se zbytek tepelné energie plynů mění na kinetickou energii vzduchu prostřednictvím dmyhadla a tedy na tah motoru. [8]

3.1 Propulzní účinnost

Obecně je propulzní účinnost dopravních prostředků dána jako poměr energie, kterou prostředek dostane ve formě pohybové energie a energie spotřebované ve formě paliva. Vzhledem k tomu, že celková propulzní účinnost letadla je značně komplikovaná a je dána mnoha faktory (účinnost motorů, cestovní rychlost, aerodynamika letadla) a její zkoumání a popis nespadájí do zaměření práce, bude tato kapitola zaměřena pouze na propulzní účinnost samotného dmyhadla. Pozornost bude věnována především vlivům ovlivňujícím propulzní účinnost dmyhadla a na možnosti její optimalizace.

Samotná propulzní účinnost dmyhadla je dána jako poměr energie, kterou dmyhadlo dodává letadlu a energie, kterou dmyhadlo uděluje vzduchu, proudícímu skrze něj viz rovnice 3.1.

$$\eta_p = \frac{F_{tah} \cdot v_l}{\frac{1}{2} \cdot \dot{m} \cdot (v_{in}^2 - v_{out}^2)} \quad (3.1)$$

Kde čítecitel je součin tahu motoru a rychlosti letu (tah motoru popsán v rovnici 3.2) a jmenovatel dává kinetickou energii poháněného vzduchu.

$$F_{tah} = \dot{m} \cdot (v_{in} - v_{out}) \quad (3.2)$$

Je vidět, že hodnoty tahu motoru i propulzní účinnosti jsou závislé na rozdílu rychlosti vzduchu na výstupu z motoru a rychlosti vzduchu na vstupu do motoru a na množství vzduchu protékajícího motorem. Pro dosažení maximální propulzní účinnosti je nutné urychlit maximální množství vzduchu s co nejmenší změnou jeho rychlosti, to však není možné, protože by došlo ke ztrátě tahu motoru, který pro udržení rychlosti musí

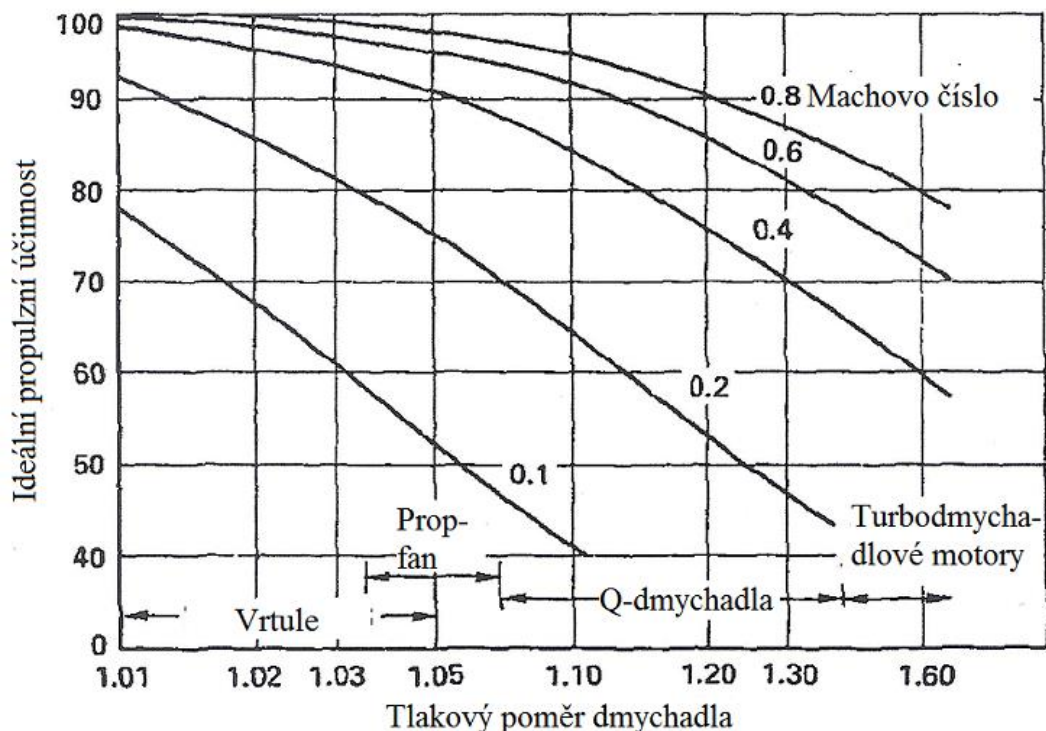
BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

překonávat odpor letadla. Navíc by nebylo konstrukčně možné docílit tohoto stavu. Je však možné se tomuto stavu co nejvíce přiblížit vhodným návrhem dmyhadla.

Cílem při návrhu motoru koncepce propfan bylo dosažení propulzní účinnosti aspoň 80 % při letové rychlosti 0,8 Ma, obvodové rychlosti hrotů lopatek 244 m/s a letové výšce 10660 m (35000 stop).

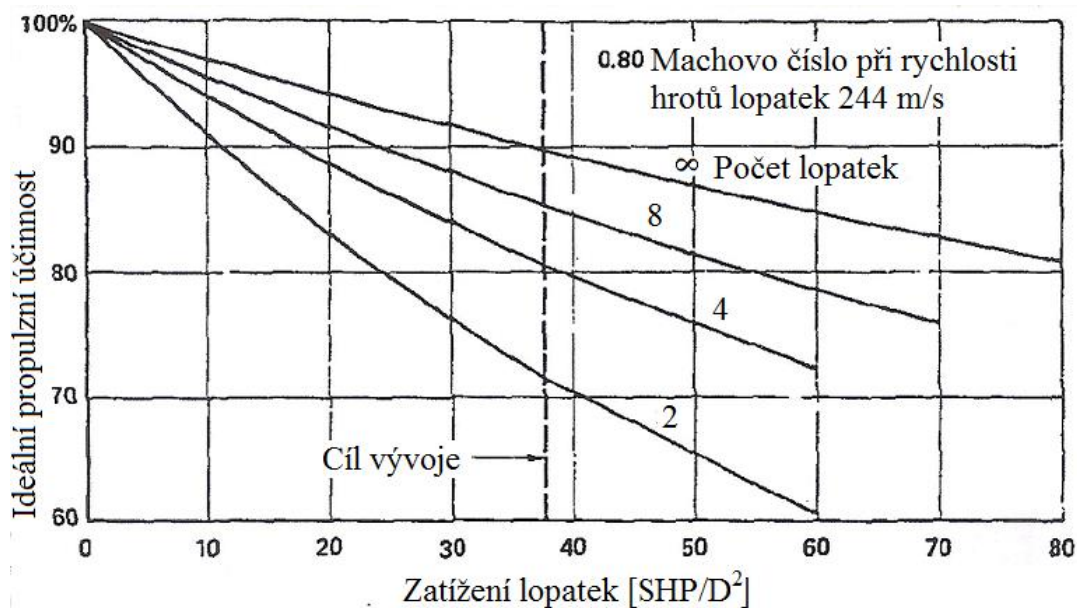
Teoretické výpočty ukazovaly propulzní účinnost až 97 % při uvažovaném zatížení lopatek dmyhadla $37,5 \text{ SHP/D}^2$ a tlakovému poměru 1,047. Zde se však rozešlo teoretické řešení s praktickou realizovatelností dmyhadla. Pro dosažení požadovaných podmínek bylo nutné použití velkého množství širokých lopatek s velice tenkým profilem, což bylo konstrukčně nedosažitelné. Reálné dmyhadlo mělo omezený počet lopatek s omezenými možnostmi dosažitelného poměru tloušťky k šířce. Tím došlo k nárůstu zatížení lopatek a k nárůstu tlakového poměru na vnitřní straně lopatky. Tato skutečnost vedla ke snížení propulzní účinnosti přibližně na 80 % oproti teoretickým 97 %. Nicméně ve srovnání s turbodmychadlovými motory měly při rychlosti 0,8 Mach pořád navrch, viz obrázek 1.1. Další závislosti účinnosti na výše popsanych vlivech lze vidět na obrázcích 3.2 a 3.3.

Na snížení propulzní účinnosti dmyhadla a celého motoru má vliv také namontování motoru na letadlo. Porovnání propulzních účinností motoru s nezaplášťovaným dmyhadlem a turbodmychadlového motoru v tabulce 3.1. [1]



Obr. 3.2 Vliv tlakového poměru na propulzní účinnost [1]

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE



Obr. 3.3 Vliv zatížení lopatek na ideální propulzní účinnost [1]

Propfan		Turbodmychadlový motor	
Ideální teoretická účinnost	97 %	Ideální teoretická účinnost	80 %
Ztráty na lopatkách	17 %	Ztráty na lopatkách	9 %
		Ztráty na vstupu do motoru	3 %
Účinnost nenamontovaného motoru	80 %	Účinnost nenamontovaného motoru	68 %
Ztráty v převodovce	1 %	Odpor pláště motoru	5 %
Odpor gondoly	2 %	Odpor gondoly	2 %
Konečná účinnost	74 %	Konečná účinnost	61 %

Tabulka 3.1 Srovnání propulzní účinnosti turbodmychadlového motoru a motoru koncepce propfan při totožném výkonu na výstupním hřídeli [1]

4 KONSTRUKCE MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN

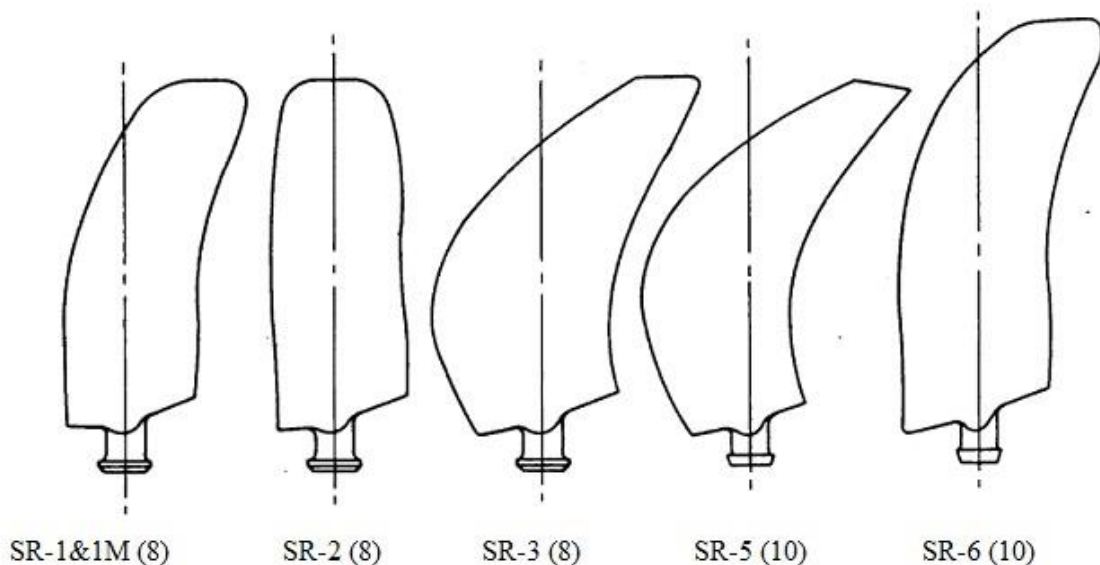
Motory koncepce propfan byly zcela novým druhem pohonu pro dopravní letadla. Přestože se jednalo o hybridní koncepci na základě turbodmychadlových a turbovrtulových motorů, některé součásti bylo potřeba postavit od základů, tak aby splňovaly požadavky kladené specifikací těchto motorů. Konkrétně se jednalo o celé dmychadlo a o reduktory. Spolu s tím přišly i inovace jako volná turbína s protiběžnými rotory.

4.1 Konstrukční řešení lopatek

Vývoj zcela nových lopatek neměl moc možností obracet se k již zavedeným technologiím té doby. Jediný opěrný bod se nacházel v možnosti použití kompozitních materiálů, které se pomalu stávaly standardem i při navrhování vrtulí pro turbovrtulové motory.

Vývoj lopatek proto musel začít téměř od nuly. Prvním krokem nelehkého úkolu bylo dokázání zmíněné teorie, že nová dmychadla budou schopna dosáhnout vysoké propulsní účinnosti při vysokých letových hladinách a při rychlostech přibližujících se rychlosti zvuku.

Bylo navrženo několik variant tvaru lopatky, kde jednotlivé varianty, viz obrázek 4.1,



Obr. 4.1 Navrhované varianty lopatek pro motor SR-7L, v závorce číslo udávající počet lopatek na dmychadle [10]

byly testovány pomocí zmenšených modelů v aerodynamických tunelech. Tyto testy prokázaly správnost dřívějších předpokladů o propulsní účinnosti. Testování však odhalilo náchylnost lehkých tenkých lopatek vyrobených z kompozitních materiálů ke kmitání. Tento fakt se musel zohlednit při návrhu jednotlivých modelů a kromě důrazu na účinnost lopatky se pozornost obracela taky ke kontrole zvukových projevů lopatek zapříčiněných chvěním. Hluk však nebyl jediný problém způsobený kmitáním lopatek. Kmitání mělo vliv také na životnost jednotlivých komponent motoru a bylo ho nutné zohlednit i při návrhu gondoly pro spojení motoru s drakem letadla. Jako nejvýhodnější se jevílo řešení pod

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

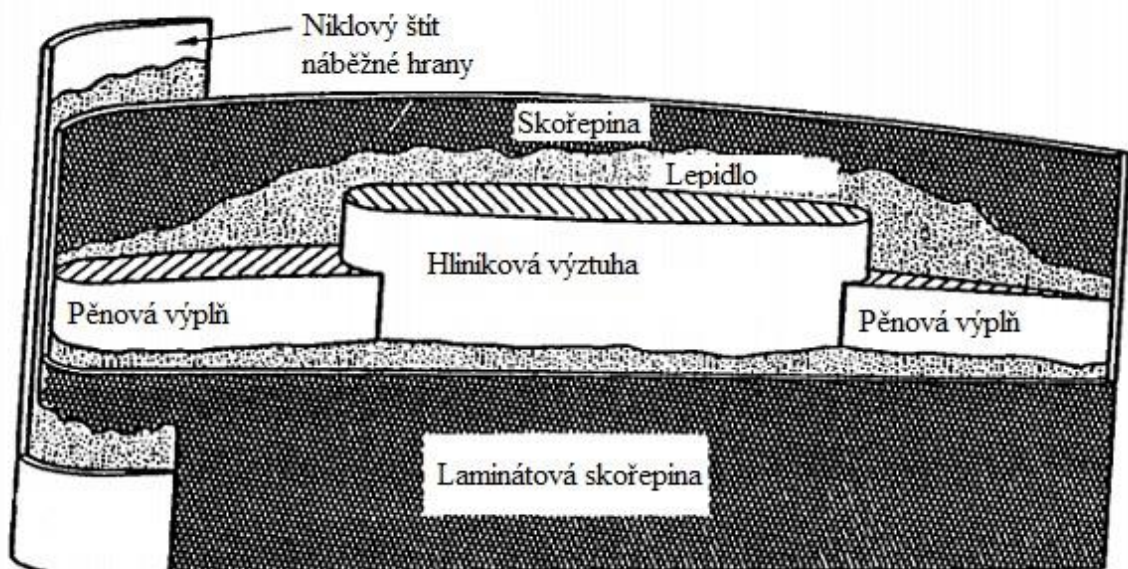
označením SR-3 Propfan Blade, tato lopatka byla schopna dosáhnout propulzní účinnosti až 80 % při rychlosti 0,8 Ma.

Následovalo spuštění programu pro pozemní testování vybraného typu lopatky v plné velikosti. Výrobou a testováním lopatek byl pověřen Hamiltonův Standart. Mezi hlavní cíle testovacího programu se řadily:

- Konfigurace lopatek pro reálný motor,
- Aerodynamické a akustické vlastnosti lopatek plné velikosti,
- Mechanické vlastnosti (předběžná mechanická konstrukce),
- Konstrukce předběžného testovacího uložení motoru,
- Vytvoření aeroelastického modelu.

Po těchto testech pokročil vývoj k výrobě součástí schopných účastnit se testování v provozu (za letu), co zahrnovalo výrobu samotných lopatek, hubu (náboje) a mechanismu pro změnu úhlu náběhu lopatek.

Samotná lopatka sestávala z hliníkového nosníku a laminátové skořepiny. Náběžná hrana je opatřena niklovým krytem. Vnitřní prostor mezi nosníkem a laminátovou skořepinou je vyplněn pěnovým materiálem vykazujícím vysokou tuhost. Nosník je umístěn poblíž náběžné hrany, aby došlo ke zvýšení stability lopatky a zvýšení bezpečnosti proti poškození cizím tělesem. Přidáváním vrstev sklolaminátu na kritická místa umožňuje docílit vyšší tuhosti lopatky a částečně tak eliminovat chvění lopatky. Konstrukci lopatky a její řez lze vidět na obrázku 4.2.



Obr. 4.2 Řez lopatky dmyhadla motoru SR-7L [10]

Volba tohoto řešení vyšla z faktu, že již byla ověřená při výrobě konvenčních vrtulí, umožňovala snadné tvarování lopatek a byla připravena k okamžitému použití bez dalších zdlouhavých výzkumů. [10]

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Po dosažení zmíněných vývojových požadavků musely lopatky splňovat řadu dalších provozních požadavků jako:

- Rozložení rezonančních frekvencí lopatky nesmělo být blízko provozním frekvencím jak při zatížení v letu, tak ani při startu,
- Lopatky nesměly jevit známky jiné než elastické deformace při jejich přetočení na 125 % jejich pracovních otáček,
- Lopatky mohly jevit známky malé plastické deformace při přetočení na 140% jejich pracovních otáček, nesměly se však objevit trhliny,
- Musely vydržet 10^8 zátěžných cyklů při normálním letu bez známky degradace materiálu,
- Musely vydržet 50000 vzletových a přistávacích cyklů bez degradace materiálu,
- Náběžné hrany lopatek musely být odolné vůči erozivnímu opotřebení,
- Při střetu lopatky s drobnými předměty (do 0,113 Kg) nesmělo dojít k viditelnému poškození lopatky a nesměla být narušena funkce lopatky,
- Při střetu lopatky se středně velkými objekty (0.907 Kg) mohlo dojít k oddělení materiálu a narušení tvaru lopatky, oddělené úlomky však nesměly být natolik velké aby dokázaly penetrovat plášť trupu, nevyváženost vzniklá poškozením lopatky (lopacek) nesměla přesáhnou určitou mez, dmychadlo musí být schopné plnit svou funkci po stanovenou dobu,
- Při střetu lopatky s velkými objekty (do 1,814 Kg) může dojít k oddělení materiálu a narušení tvaru lopatky, oddělené úlomky však nesměly být natolik velké aby dokázaly penetrovat plášť trupu, nevyváženost vzniklá úbytkem materiálu nesmí způsobit kritické poškození motoru a draku letadla během doby než je motor vypnut.

Kromě použití kompozitu se skelnými vlákny (laminátu) se spolu s vývojem propfanů poprvé objevily i kompozitní materiály na bázi uhlíku. Jak již bylo řečeno, tyto kompozity byly dále použity pro výrobu lopatek turbodmychadlových motorů. Během následujících dvaceti let se výroba leteckých součástí z těchto materiálů těšila velké oblibě a přetrvává dodnes s výraznými pokroky v optimalizaci výrobních postupů a zlepšení mechanických vlastností těchto materiálů. To je obrovským benefitem pro výrobce leteckých motorů, kteří svoji pozornost vrátili zpět k motorům s nezaplášťovaným dmychadlem. Poznatky za těchto 20 let vývoje jim nyní pomáhají s optimalizací lopatek pro obnovené projekty motorů koncepce propfan.

Nyní je možné vyrobit lopatky mnohem tenčí, lehčí s vyšší tuhostí a pevností. Díky tomu lze vylepšit propulzní účinnost motoru ruku v ruce se snížením hlučnosti. Na výrobu lopatek pro nyní vyvíjený motor testuje společnost GE ve spolupráci se společností Snecma výrobu kompozitních lopatek pomocí 3D tisku. [11] [12]

4.2 Konstrukce dmychadel

Hamiltonův institut, který s vývojem dmychadel začal, pracoval se dvěma variantami dmychadla. Jedno bylo osazeno osmi lopatkami a druhé deseti. Deseti-lopátková verze byla účinnější, lehčí a produkovala méně hluku, nicméně měla problémy s pevností lopatek, které byly oproti osmi-lopátkové verzi užší. Z obrázků 5.2, 5.3 a 5.4 je patrné, že výrobci se nakonec obrátili k variantě s nižším počtem lopatek, kde motor D-27 má osm lopatek na předním rotoru a šest lopatek na zadním, motor GE-36 disponuje osmi lopatkami na každém z rotorů a motor 578-DX byl osazen šesti lopatkami na každém z protichůdných rotorů.

Samotné dmychadlo je sestaveno z několika částí a mechanismů (lopatky dmychadla, náboj pro ukotvení lopatek, hřídel, kužel a mechanismy pro nastavování sklonu lopatek). Tyto součásti je možné najít také u vrtulí turbovrtulových motorů, jen bylo nutné je upravit pro provozní požadavky dmychadel, především pro vyšší otáčky oproti vrtulím.

Obzvláště náročné bylo zkonstruovat mechanismy pro nastavování sklonu lopatek, jednak z důvodu vyššího zatížení přenášeného z lopatek oproti tehdejšími vrtulím a také vlivem vysokých otáček a tedy i odstředivých sil. Natáčení lopatek dmychadla bylo doménou pouze motorů s nezaplášťovaným dmychadlem, u moderních turbodmychadlových motorů se z důvodu zvýšení spolehlivosti a zjednodušení konstrukce setkáváme až na pár prototypových výjimek s pevně vetknutými lopatkami. [10]

Od počátku vývoje prošla dmychadla značným pokrokem, zvláště s obnovením programů na vývoj propfanů mezi lety 2000 – 2010. Došlo ke zdokonalení mechanismů pro nastavení sklonu lopatek, optimalizaci jednotlivých částí, snížení hmotnosti a k zvýšení počtu lopatek (jak UDF motor společnosti GE, tak i open rotor koncepce jsou nyní osazeny dvanácti lopatkami na předním rotoru a deseti na zadním), které dmychadlo nese. To mělo za následek snížení negativních vlastností motorů spojených s konstrukčními limity lopatek. [13] [14]

4.3 Jádru motoru

Jak jste se již mohli dočíst, jádro motoru je téměř totožné jako samostatný proudový motor. Jediný rozdíl je ve formě předání energie ven z jádra. Jelikož je tato část motoru nesčetně krát dopodrobna popsána v mnohých učebních textech a publikacích nebude jí věnována nějaká zvláštní podobnost. Vedle velmi stručného popisu jednotlivých prvků motoru budou tyto popisy doplněny o informace, které souvisejí s vývojem motorů koncepce propfan.

4.3.1 Vstupní ústrojí motoru

Vstupní ústrojí motoru musí zajišťovat správnou funkci motoru při všech polohách letadla, při všech režimech letu a zatížení motoru. Dělí se na vnější a vnitřní. Vstupní ústrojí musí přivádět požadované množství vzduchu do kompresoru, mít minimální ztráty tlaku přiváděného vzduchu, minimální odpor, spolehlivou funkci a musí zabraňovat vniknutí cizích těles do motoru. [8]

Tady se objevil další z technických problémů propfanů. Kombinace vysoké dopředné rychlosti a proudění vzduchu ve tvaru šroubovice dělala obtíže při navrhování vstupního ústrojí při uvažovaném tažném uspořádání motoru. Komplikace spojené s nasáváním vzduchu do motoru se naskytly i při řešení reverzování tahu motoru. Konstrukčně jednoduché provedení spočívající v možnosti nastavit negativní úhel náběhu lopatek pomocí systému, který ovládá sklon lopatek za letu, by způsobovalo přerušení proudu vzduchu do kompresorů a vývoj musel přijít s řešením, tím bylo tlačné uspořádání motoru. [2]

4.3.2 Kompresory

Kompresory slouží ke stlačování vzduchu a následnému plnění spalovací komory. Z konstrukčního hlediska rozdělujeme dva druhy kompresorů a to radiální a axiální. Pro správné plnění je možné použít i kombinaci obou variant řazených za sebou. Na kompresor jsou podobně jako i na zbytek částí motoru kladeny vysoké nároky.

Dvouproudové motory (včetně propfanů) mají kompresorovou sekci rozdělenou do dvou, nebo tří částí. Jedná se o nízkotlaký a vysokotlaký kompresor, mezi ně může být zařazena ještě střednětlaká sekce. Pro ustálené proudění vzduchu kompresorem a eliminaci kolísání tlaku jsou kompresory opatřeny protipumpážním zařízením.

Ve srovnání s konvenčními proudovými motory nezaznamenaly kompresory používané v motorech koncepce propfan žádné zásadní změny. [8]

4.3.3 Skříň motoru – stator

Skříň motoru je závažným montážním spojovacím a silovým uzlem motoru. Zajišťuje přenos sil a momentů do zavěšení motoru a draku letadla. Skříň motoru je namáhána od ložisek rotoru, silami působícími na statorové lopatky, odporem vstupního ústrojí a vnitřním přetlakem v motoru. Konstrukce skříní se různí podle požadavků na motor, pro který jsou konstruovány. Obrázek 5.1 napovídá, že motory s reduktorem nevyžadovaly žádné zásadní změny skříně ve srovnání s proudovým motorem. Při realizaci motoru s volnou turbínou musela skříň projít změnami v uložení rotorů nízkotlaké turbíny. [8]

4.3.4 Spalovací komory

Nyní se podíváme na spalovací komory. Ve spalovací komoře je do oběhu dodávána energie ve formě plynů vzniklých spalováním paliva (kerosinu). Jedná se o tvarově a konstrukčně velice složitá zařízení, které musí splňovat řadu požadavků.

Palivo je do komory vstřikováno buďto samostatnými tryskami, nebo pomocí rozstřikovacího kroužku. Při vstřikování je nutné dosáhnout správné velikosti částicek vstřikovaného paliva ($70 \div 100 \mu\text{m}$), dále je potřebné, aby se palivo co nejlépe mísilo se vzduchem. [8]

Současně je největším pokrokem ve výrobě vstřikovacích zařízení zavedení 3D technologií. Společnost GE pracuje na vývoji trysek pro své turbodmychadlové motory právě za pomoci 3D tisku. V plánu je dostat takto vyráběné trysky do výroby v roce 2016 a postupem času je zavést do všech motorů společnosti. Tato technologie sníží počet součástí trysky ze současných 18 na 1, s tím dojde i ke snížení hmotnosti o 25 % a k zvýšení životnosti až 5x. S možností vyrobit trysku mnohem složitějších tvarů dále umožní efektivnější rozprašování paliva a další snížení spotřeby. [15] [16]

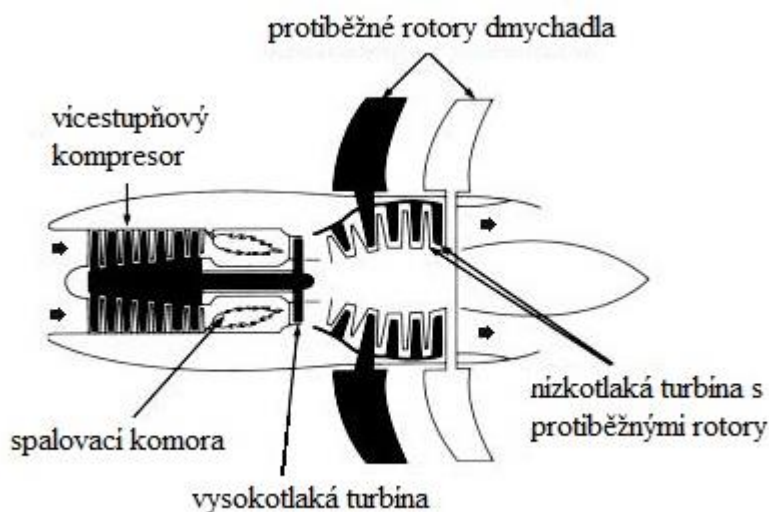
Při opomenutí inovací spojených s optimalizací spalování paliva ve spalovacích komorách, které se prolínají i s vývojem ostatních motorů fungujících na principu proudového motoru, nebyly nutné specifické úpravy spojené s funkcí motorů koncepce propfan.

4.3.5 Turbíny

Turbína funguje na stejném principu jako kompresor a taktéž bývá rozdělena na více sekcí (vysokotlaká turbína, střednětlaká turbína, nízkotlaká turbína), kde každá sekce pohání jinou část motoru. U proudových motorů se jedná o pohon kompresorů a pomocí ozubeného soukolí může být vyveden z hřídele spojujícího turbínu a kompresor pohon podpůrných systémů motoru a samotného letadla (výroba elektřiny pro letadlo, pohon čerpadel pro mazání a chlazení motoru, pohon čerpadel hydraulických systémů řízení letadla atd.). [8]

U dvouproudových motorů se k pohonu kompresorů a podpůrných systémů přidává ještě pohon dmyhadla, kde pro pohon dvourotorových dmyhadel byla v souvislosti s vývojem propfanů vyvinuta speciální volně uložená turbína, ta je popsána v následující kapitole. [17]

4.4 Motory s volnou turbínou



Koncepce motorů s volnou turbínou se objevovaly i dříve u turbovrtulových motorů. Společnost General Electric však v souvislosti s motory koncepce propfan vyvinula nové inovativní řešení této turbíny – volnou turbínu s protiběžnými rotory. Nízkotlaká turbína neobsahovala statorovou část. Ta byla nahrazena

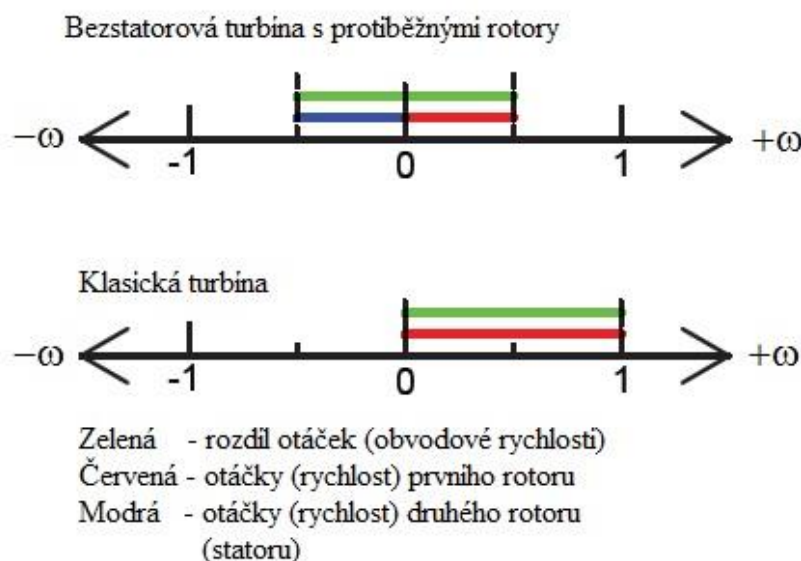
Obr. 4.3 Zjednodušený řez motorem s protiběžnými turbínami [29]

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

druhým rotorem, který měl lopatky natočené stejně, jako jsou natočeny rozváděcí lopatky statorů u konvenčních proudových motorů. Rotory se otáčejí vzájemně opačným směrem. Jednotlivé řady lopatek protiběžných dmychadel jsou spojeny přímo s jednotlivými rotory, viz obrázek 4.3. Tímto konstrukčním řešením došlo ke snížení ztrát spojených se ztrátami energie plynů při průchodu statorovou sekcí turbíny. Turbína proto dosahuje vyšší účinnosti a mohla být zmenšena při zachování si svého výkonu.

Dále toto řešení umožňovalo snížení otáček jednotlivých rotorů na polovinu při zachování obvodových termodynamických podmínek. U standardní turbíny je relativní rychlost mezi rotorem a statorom dána rozdílem obvodové rychlosti rotoru a statoru. U protiběžných rotorů je relativní rychlost dána rozdílem obvodových rychlosti jednotlivých rotorů, viz obrázek 4.4. Snížením otáček rotorů došlo také ke snížení otáček dmychadla. Pro dosažení co nejvyšší účinnosti dmychadla je důležité, aby celková rychlost hrotů lopatek nepřesáhla rychlost zvuku. Při snížení otáček dmychadla dojde ke snížení obvodové složky rychlosti listů dmychadla. Nicméně snížením otáček rotorů odstraněním statorové části pořád není dostačující. Pro další snížení otáček se dají zvolit dvě varianty, kde jednou je zvětšení průměrů lopatkových kol turbíny a druhou přidání více sekcí turbíny. To vede ke zvětšení turbíny, které neguje již zmíněné zmenšení odstraněním statorové části.

Oba protiběžné rotory jsou na sobě nezávisle uloženy v ložiscích a nejsou nijak spojeny se zbytkem motoru (ve smyslu přenosu výkonu), proto je tato konstrukce nazývána volnou turbínou. S tímto řešením přišly i problémy s udržení stálých otáček rotorů v různých režimech letu a problémy se synchronizací otáček rotorů vůči sobě.



Obr. 4.4 Rozdíl otáček rotorů klasické turbíny a turbíny s protiběžnými rotory

Konstrukční opatření pro snížení otáček nízkotlaké turbíny vedou k nárůstu hmotnosti. Nejnovější studie prokázaly, že za současného stavu výrobních možností je rozdíl v hmotnosti a účinnosti motoru s volnou turbínou a motoru s reduktorem zanedbatelný. [17] [20]

4.5 Motory s reduktorem

Druhou možností, jak přenést výkon turbíny na dmychadlo bylo použití reduktoru. Přestože byly v souvislosti s použitím reduktoru pro přenos výkonů očekávaných od nových motorů jisté obavy, vývoj motorů koncepce propfan se ubíral i tímto směrem. Hlavní nevýhodou reduktoru oproti volné turbíně jsou tepelné ztráty v ozubených soukolích (pro požadované výkony se očekával neúměrný nárůst tepelných ztrát). V době vývoje propfanů existovaly reduktory pro turbovrtulové motory s omezenými možnostmi, co se týče hodnoty výkonu, které byly schopné přenášet a vrtulníkové reduktory. Ty byly schopné přenést výkony dostačující pro potřebu propfanů, nicméně jejich výstupní parametry (otáčky a krouticí moment) neodpovídaly požadavkům motorů koncepce propfan a poznatky z jejich vývoje nebyly pro vývoj nového reduktoru příliš užitečné. Motorům s reduktory nenahrával ani fakt, že jejich výroba byla náročná a nákladná, co souviselo s jejich složitostí. Složitost reduktorů neprospívala také jejich spolehlivosti, náročnosti na údržbu a nákladům na údržbu. Jedinou jejich výhodou byla možnost přesného a stálého nastavení otáček rotorů a jejich synchronizace (nízkotlaká turbína byla pomocí hřídele spojena s reduktorem, který zajišťoval snížení otáček dmychadla a opačný chod rotorů). Vedení vývoje společnosti Allison-P&W se přesto rozhodlo právě pro reduktor. Tady také narazili na limit tehdejších reduktorů, kde se ukázalo, že vývoj převodovky požadovaných parametrů by byl zdoluhavý a drahý. A tak byl reduktor pro motor 578-DX postaven na základě reduktoru turbovrtulového motoru T56 Turboprop společnosti Allison a motor 578-DX výkonově značně zaostával za svým konkurentem GE-36 společnosti General Electric. V první vlně vývoje koncepce propfan tedy převažoval návrh motoru s volnou turbínou, přesto po obnovení programů na vývoj motoru s nezaplášťovaným dmychadlem došlo i k obnovení vývoje motoru s reduktorem v rámci projektu SAGE. [18] [14]

4.6 Tažné uspořádání

Tažné uspořádání motorů propfan se objevilo v počátcích vývoje. Tyto motory byly odvozeny z turbovrtulových motorů, kde samotné jádro motoru dostalo jen malých změn a výrazně byla upravena jen ta část, která tvoří tah motoru (vrtule respektive dmychadlo). Toto uspořádání však trpělo několika neduhy. Vzhledem k plánovaným letovým výškám zde bylo jisté riziko vzniku námrazy na lopatkách, vyšší provozní rychlosti a obtížnost simulace proudění vzduchu za dmychadlem tvořili problém při plnění motoru vzduchem. Další problém s plněním nastal také při reverzaci tahu motoru. S rychlostí proudu vzduchu za dmychadlem souvisel taky vznik turbulentního proudění při obtékání gondoly motoru a při obtékání křídla. Mezi zástupce propfanů v tažném uspořádání lze uvést motory SR-7L

vyvinutý společností NASA a Progress D-27 vyvinutý společností Ivchenko Progress. [10]
[2]

4.7 Tlačné uspořádání

Tlačné uspořádání eliminovalo několik problémů tažného uspořádání, zejména ty s nasáváním vzduchu do motoru. Vytvořilo však jeden nový konstrukční problém, se kterým se museli konstruktéři vypořádat. Jak je vidět z obrázku 5.4 výtokové trysky motoru 578-DX jsou umístěny ještě před dmychadlem a horké spaliny proudí skrz něj. Toto uspořádání odstraňuje riziko tvorby námrazy na lopatkách, ale lopatky musí být schopné snášet vyšší teploty oproti motorům s tažným uspořádáním. Jako zástupce kategorie motorů tlačného uspořádání lze uvést již zmíněný motor 578-DX společnosti Allison-P&W a motor GE-36 společnosti General Electric. [2]

5 ZÁSTUPCI MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN

Tato kapitola stručně představí jednotlivé motory koncepce propfan vyvinuté v sedmdesátých a osmdesátých letech minulého století, spolu s tím bude zmíněno historické pozadí provázející jednotlivé motory, budou motory zařazeny do kategorií popsaných výše a budou k nim uvedeny některé jejich provozní parametry.

5.1 Motor SR-7L

Jedná se o prvního zástupce motorů koncepce propfan. Vývoj začal v roce 1975, kdy byl také poprvé představen v technických novinách s předpovědí úspory paliva 30 – 35 %



oproti dobovým turbodmychadlovým motorům. Motor vyšel z dílny NASA za spolupráce s Hamiltonovým Standartem. Původní interní označení motoru bylo ATP (Advanced TurboProp), ale marketingové důvody vedly k jeho přejmenování na propfan. Cílem při stavbě tohoto motoru bylo vyrobít reprezentativní testovací model, na němž měla být dokázána spolehlivost, bezpečnost, účinnost a připravenost této technologie k zaujetí svého místa v komerční sféře letectví. Spolu s dokázáním reálné

Obr. 5.1 Motor SR-7L [21]

konkurenceschopnosti ostatním pohonným jednotkám bylo kvůli jeho odlišnosti od zavedených turbovrtulových motorů nutné vyvinout nové montážní postupy a nástroje pro montáž dmychadel. V roce 1981 byl projekt ve stavu, jež dovoľoval výrobu dmychadla v plné velikosti a jeho testování za letu. V této době byl také představen turbodmychadlový motor V2500 společností P&W a RR. Motor SR-7L stále trpěl obtížemi s optimalizací účinnosti a pevnosti lopatek a po srovnání motorů SR-7L a V2500 dospělo vedení NASA k závěru, že koncepce propfan nenaplnila očekávání a projekt byl ukončen. [17]

Dmychadlo bylo osazeno osmi lopatkami v jedné řadě. Průměr činil 9 stop (2,74 m) a hroty lopatek dosahovaly obvodové rychlosti 800 stop za sekundu (cca $244 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Vzletový výkon motoru činil 4413 KW (6000 HP), letový výkon dosahoval 1906 KW (2592 HP) při výšce letu 35000 stop (10668 m) a rychlosti 0,8 Ma. Blízký hluk produkovaný za letu činil 144 dB a při vzletu motor splňoval normu FAR-36 s rezervou 10 dB. Motor SR-7L lze vidět na obrázku 5.1. [10]

5.2 Motor GE-36

V roce 1973 nedošlo k jedinému radikálnímu zvýšení cen ropy na světových trzích. Za dalším růstem stála v roce 1981 revoluce v Íránu a Irácko-Íránská válka. Během tohoto konfliktu zaznamenal vývoj cen ropy skok na dvojnásobek už tak vysoké ceny pro roce 1973 a předpokládal se další trend jejího růstu v daném období až do roku 1990.

Na tento popud byl ve společnosti General Electric zformován tým pověřený vývojem motoru s nezaplášťovaným dmychadlem pod označením UDF (UnDucted Fan). V roce 1983 byl motor označený GE-36 poprvé představen odborné veřejnosti. Dmychadlo motoru se skládalo ze dvou protiběžných rotorů poháněných volnou turbínou s protiběžnými rotory v tlačném uspořádání. Jednalo se o první návrh nízkotlaké turbíny



Obr. 5.2 Motor GE-36 [35]

řešený tímto způsobem vůbec. Takto postavená turbína zajišťovala další pokrok na cestě za úsporou paliva a sklidila značný úspěch a obnovení zájmu NASA o tuto koncepci. Vypuštěním reduktoru odstranilo limit ze strany výkonu a motor byl oproti motoru SR-7L výkonnější. Jeho výkon si dokázal získat pozornost i ze strany výrobců letadel, konkrétně společností Boeing a McDonnell Douglas. Přestože se jeho uvedení do provozu předpokládalo nejdříve v roce 1986, společnost boeing začala s vývojem letadla Boeing 7J7, na jehož pohon měla být použita dvojice motorů GE-36. Přesto byla spolupráce mezi GE a Boeingem po odeznění ropné krize v roce 1985 přerušena. Poté o motor projevila zájem ještě společnost McDonnell Douglas ve snaze zvýšit svou konkurenceschopnost vůči Boeingu a Airbusu, ta však nebyla schopna vytvořit dostatečný odbyt pro UDF motory a projekt byl ukončen ze strany GE. [17]

Oproti požadované rychlosti 0,8 – 0,85 Mach byla jeho finální letová rychlost omezena na 0,72 Ma. Při této rychlosti dosahoval úspory 25 % oproti nejmodernějším turbodmychadlovým motorům vyráběným až do roku 1990 a disponoval tahem až 111KN. Motor GE-36 na obrázku 5.2. [26]



Obr. 5.3 Motor 578-DX [36]

5.3 Motor 578-DX

Po představení motoru GE-36 v roce 1983 a po prvních náznacích zájmu tyto motory ze strany výrobců letadel se

do vývoje motorů koncepce propfan pustily i firmy Allison a Pratt & Whitney, které ještě ve spolupráci s NASA vyvinuly s využitím poznatků z vývoje SR-7L motor 578-DX. Stejně jako motor GE-36 disponoval motor 578-DX dmychadlem s dvojicí protiběžných rotorů. Narozdíl od GE-36 však tento motor využíval k pohonu dmychadla reduktor odvozený z reduktoru pro jiný turbovrtulový motor společnosti Allison. Reduktor představoval značné omezení celkového možného výkonu motoru, co ho stavělo do nevýhody oproti motoru GE-36. Koncem osmdesátých let byl motor testován na letadle MD-80 ve spolupráci se společností McDonnell Douglas. Přestože testování vykazovalo dobré výsledky, už bylo jasné, že koncepce motorů s nezaplášťovaným dmychadlem je mrtvá a práce na projektu byly taktéž ukončeny. [17]

Motor byl postaven v talčném uspořádání, disponoval maximálním výkonem 7750 KW (10400 HP) a jeho obtokový poměr činil 35:1. Na obrázku 5.3 lze vidět motor 578-DX. [26]

5.4 Motor progress D-27

Progress D-27 je motor vyvinutý Ukrajinskou firmou Ivchenko Progress v 80. letech. Prvního letu se účastnil v roce 1992 a je jediným zástupcem motorů koncepce propfan v aktivní službě. Slouží k pohonu strategického dopravního letadla Antonov An-70. Byl však zvažován i pro pohon letadel pro přepravu cestujících, konkrétně Antonovu An-180 a Yakolevu Yak-44, z projektů však sešlo. Jde o tříhřídelový motor tažného uspořádání s dvěma řadami lopatek. Přestože je tento motor v provozu, už se nevyrábí. Zajímavostí je, že první rotor je osazen osmi lopatkami a druhý šesti. Rotory mají průměr 4,5 m. Motor



Obr. 5.4 Motory Progress D-27

dosahuje maximálního výkonu 10800 KW. I když výrobce prezentuje tento motor jako propfan, objevují se i jisté pochybnosti o tom, zda jde opravdu o propfan. Mezi hlavní argumenty proti označení propfan lze uvést velký průměr dmychadla (vrtule) v porovnání s ostatními motory této koncepce, tažné uspořádání, které je běžné spíše pro turbovrtulové motory, tažné uspořádání bylo jinak použito pouze u testovacího motoru SR-7L a znatelně nižší letová rychlost oproti ostatním motorům koncepce propfan (0,65 M). Motory Progress D-27 letounu An-70 si lze prohlédnout na obrázku 5.4. [22] [23] [24]

6 VÝHODY POUŽITÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPFAN

Hlavním přínosem motorů koncepce propfan pro leteckou dopravu by bylo znatelné snížení spotřeby paliva. Úspora paliva se měla pohybovat někde mezi 25 – 30 %. Při nahrazení tehdejších motorů propfany. Byla predikována úspora paliva až 18 miliónů tun v období od roku 1990 do roku 2000. [31] Další výhodou motorů koncepce propfan je jejich vysoká statická účinnost (vysoký tah motoru když se letadlo nepohybuje) a účinnost při nízkých rychlostech, co má za následek výrazné zkrácení vzletové dráhy. Tato vlastnost by letadlům poháněným propfany umožňovala přístup na letiště, na kterých mají letadla podobných parametrů problémy právě s délkou vzletové dráhy. Dnes také nelze opomenout přínos propfanů provázaný s nízkou spotřebou paliv a tím přínosem je snížení emisí CO₂ pohybující se na podobné míře jako úspora paliva, čili až 30 %. Dále snížení spotřeby paliva snižuje množství dalších emisí, jako jsou oxidy síry a oxidy dusíku.

Hlavní studie zabývající se ekonomickým potenciálem propfanů z roku 1976 zahrnovala testování pro komerční dvoumotorové letadlo s kapacitou 180 pasažerů o rychlosti 0.8 Ma a s doletem 3300 km. Pro testování a porovnávání výsledků byly použity 3 návrhy letounu.

1. Letadlo poháněné turbodmychadlovými motory (sloužilo jako základ pro srovnání výsledků),
2. Letadlo poháněné motory propfan zavěšenými pod křídly,
3. Letadlo poháněné motory propfan umístěnými na pylonech na zádi letounu.

Prvotní testy prokázaly úsporu paliva pro obě konfigurace motorů propfan. Letoun s motory zavěšenými pod křídlem dosahoval úspory 9,7 % paliva a letoun s motory umístěnými na zádi 5,8 %. Nicméně je nutno podotknout, že se jednalo o první prototypy motoru SR-7L, které disponovaly jednou řadou lopatek a nedosahovaly takových účinností jako pozdější motory s protiběžnými rotory. Další vliv na účinnost letadel s propfany jako celku měla vyšší hmotnost těchto letounů. To bylo způsobeno vyšší hmotností samotných propfanů a nutností konstrukčních úprav pro namontování těchto pohonných jednotek. Spolu s vyšší hmotností se na efektivitě podepsal i vyšší odpor letadel způsobený nutností zvětšit plochu křídla pro konfiguraci s motory zavěšenými právě pod křídlo a u verze s motory umístěnými na zádi nutnosti zvětšení ocasní plochy k vyvážení letadla za letu (tyto negativní vlivy byly spojené s provizorním návrhem upevnění motorů k letounu a po určité optimalizaci by se daly minimalizovat). Nárůst účinnosti se projevil až při testování letounů pro lety na kratší vzdálenosti. Tato úspora spočívala ve větším vlivu těch fází letu, kde letouny nedosahovaly testované provozní rychlosti 0.8 Ma (vzlet, stoupání, přiblížení, přistání).

Závěrem testů byly skutečnosti, že propfany poskytovaly určitou úsporu pohonných hmot. Pro letadla parametrů testovacích letounů nebyly tyto motory zcela ideální volbou. Další nejistoty se objevily ohledně ztráty účinnosti při vyšších rychlostech. Pro dosažení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

vyšší účinnosti a ekonomické výnosnosti bylo nutné provést řadu výzkumů zabývajících se dalším vývojem lopatek a optimalizaci letounu pro snížení odporu. [14]

Zprávy objevující se po roce 2010 udávají dosažení úspory až 25% oproti moderním turbodmychadlovým motorům, což lze považovat za velký úspěch vzhledem k tomu, že už i samotné turbodmychadlové motory prošly od přelomu 80. a 90. let značnou optimalizací spotřeby paliv a produkce emisí. Takový úspěch mohl být dosažen díky moderním výpočtovým a výrobním 3D technologiím. Povedlo se navrhnout reálně vyrobitelné lopatky dmyhadla produkující minimální množství hluku bez nutnosti kompromisu na straně účinnosti. [27]

7 NEVÝHODY POUŽITÍ MOTORŮ KONCEPCE PROPAN

Pro nikoho asi nebude překvapením, když zde uvedu, že jedním z nejpalčivějších problémů v souvislosti s leteckou dopravou je obrovské množství hluku generované provozem letadel. Hluk totiž přímo neovlivňuje jenom lidi okolo letecké dopravy (cestující, letecký personál) ale i lidi, kteří zrovna s leteckou dopravou nemají nic společného. Zejména v okolí velkých letišť, kde jsou vzlety a přistání letadel nepřetržitou součástí jejich provozu. Právě vzlet letadla je z hlediska produkce hluku nejhorší. Průzkumy dokázaly, že lidé žijící v okolí letišť si mnohem více stěžují na hluk, než na znečištění vzduchu, které, vzhledem k výrazně vyšší spotřebě paliva při startu, není zanedbatelné. Na jednu stížnost ohledně špatné kvality vzduchu v okolí letišť připadá až 300 stížností na hlukové znečištění. Možným řešením hluku z letecké dopravy může být přesměrování leteckých tras mimo hustě obydlené oblasti, nebo při stavbě nových letišť jejich umístění ve větší vzdálenosti od lidských sídel spolu s vybudováním vhodné infrastruktury pro snadný přístup k letišti. Toto však není ideální řešení, protože přítomnost letiště poblíž města zvedá atraktivitu žití právě v tomto městě a dříve nebo později se městská zástavba rozroste i směrem k izolovanému letišti. Nejúčinnějším řešením se jeví být omezování hluku produkovaného letadly. V souvislosti s letišti s vysokým objemem dopravy nacházejícími se blízko obydlených částí měst to znamená až omezení ve formě zákazu pro letadla, která jsou až moc hlučná (splňují mezinárodní normy, ale nesplňují požadavky daného letiště). [29]

Kromě šíření zvuku do okolí letadla nelze opomenout také pronikání hluku do kabiny letadla, s kterým se vývojáři museli taktéž popasovat. V tomto ohledu nebylo až tak nutné snižování hluku produkovaného motorem, ale spíše ho efektivně odstínit z kabiny. V tomto směru bylo během vývoje propfanů učiněno několik opatření. Společnost Boeing, která měla o použití propfanů zájem pracovala na vývoji pláště trupu, který byl schopný snížit pronikání hluku do kabiny. Další možností bylo umístění motorů na zádi trupu atd.

Už podle vyšší hlučnosti turbovrtulových motorů bylo jasné, že hlučnost bude slabinou i pro nové propfany. Nemalé úsilí proto muselo být vynaloženo na maximální potlačení hluku během vývoje těchto pohonných agregátů. První krok ke snížení hlučnosti motorů spočíval v nalezení příčin vzniku tohoto hluku. K těmto účelům sloužila dmychadla vyrobená v menším měřítku (62,2 cm v průměru). Poté se prováděly experimenty, které ukázaly, zda se dají některé hlavní zdroje hluku eliminovat. Tyto experimenty byly také prováděny s pomocí zmenšených modelů a byl predikován vliv na dmychadla ve skutečné velikosti. Poté následovalo testování právě na dmychadlech skutečných velikostí. Zmenšený model pro testování se volil proto, aby bylo možné jasně identifikovat zdroje hluku. Měření bylo realizováno ve specializovaných laboratořích a aerodynamických tunelech, kde se nesměl nacházet jiný zdroj hluku. Vzhledem k nutnosti změřit zvukové projevy v různých vzdálenostech a v různých polohách vůči samotnému motoru by bylo velice obtížné a nákladné provádět takováto měření na komponentách plné velikosti.

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Jako první se vývojáři zaměřili na samotné lopatky dmyhadla, kde zkoumali tvorbu hluku různě tvarovaných lopatek při pokrytí všech pracovních režimů (vzlet, přistání, let po trase, let při maximální rychlosti atd.). Z těchto testů vyšlo jasně najevo, že největším problémem je obvodová rychlost konců lopatek, kdy po překročení rychlosti přes 200 m/s docházelo k dramatickému nárůstu hladiny hluku. Po řadách testů bylo rozhodnuto, jak bude vypadat finální tvar lopatky s ohledem na účinnost a akustické projevy daného tvaru. Při měření směrovosti šíření hluku směrem od dmyhadla nebyl zjištěn žádný zásadní rozdíl oproti klasickým vrtulím.

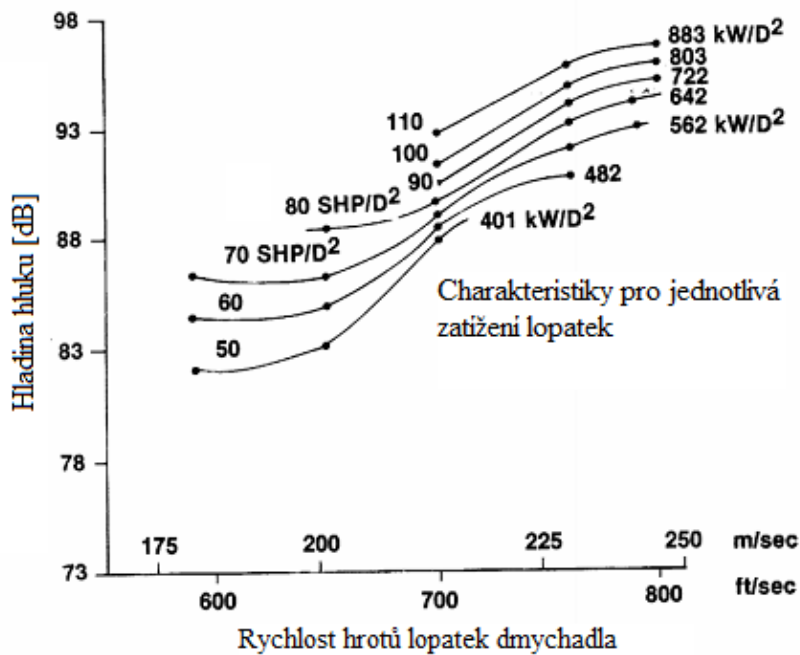
Další na řadu přišlo zkoumání vlivu konfigurace lopatek. Testování probíhalo na třech konfiguracích (6 lopatek, 8 lopatek a 10 lopatek). Z tohoto testování vyšla nejlépe konfigurace s deseti lopatkami, bohužel u deseti-lopatkového dmyhadla nastaly jiné konstrukční problémy a pro motory připravované pro potenciální hromadnou výrobu byla zvolena varianta s nižším počtem lopatek.

Zkoumán byl také vliv umístění motoru a jeho uspořádání. Ukázalo se, že tažné uspořádání produkuje o něco méně hluku, než tlačné. Tento rozdíl byl však s celkovou hlučností motoru zanedbatelný. Zanedbatelný byl taktéž vliv vzdálenosti motorů od trupu. Při zkoumání vlivu úhlu náběhu pylonu motoru byl zjištěn významný nárůst hladiny hluku, kde při změně úhlu náběhu z 0° na 4° byl zaznamenán nárůst hluku v průměru o 3,5 dB.

Zásadní vliv na zvukové projevy motoru mělo i dvourotorové provedení dmyhadel. Kromě zesílení hluku přidáním další řady lopatek jakožto dalšího hlukového generátoru došlo k dalším zvukovým projevům vlivem aerodynamické interakce mezi rotory. Při protichůdných rotorech se testování zaměřilo na akustickou vazbu mezi rotory. Testoval se vliv vzdálenosti rotorů v axiálním směru a vliv rozdílných otáček rotorů (až 20%). Při měření rozdílů mezi vzdálenostmi rotorů byly naměřeny jen nepatrné rozdíly, kde se zvětšující se vzdálenosti klesala hladina hluku. Při rozdílných otáčkách rotorů bylo zjištěno, že při vyšších otáčkách předního rotoru dochází k mírnému snížení hluku a naopak.

Uvádí se i testy hlučnosti reduktoru, nicméně jeho vliv na celkovou hlučnost je také minimální. Testování a vyhodnocování akustických charakteristik reduktoru je spíše jen formální záležitostí, aby byly testy kompletní.

Finální vyhodnocení naměřených dat zmenšeného modelu předpokládalo hlučnost při startu letadla se dvěma motory koncepce propfan 93,1 dB ve vzdálenosti 450 metrů ve směru do strany od letadla viz obrázek 6-1 a 6-2. Vzhledem vyhodnocování hladiny hluku pro skutečný stroj ze zmenšeného modelu byly jako nevýznamné změny označeny vlivy měnící hlučnost v rozmezí do 1 dB. [28]

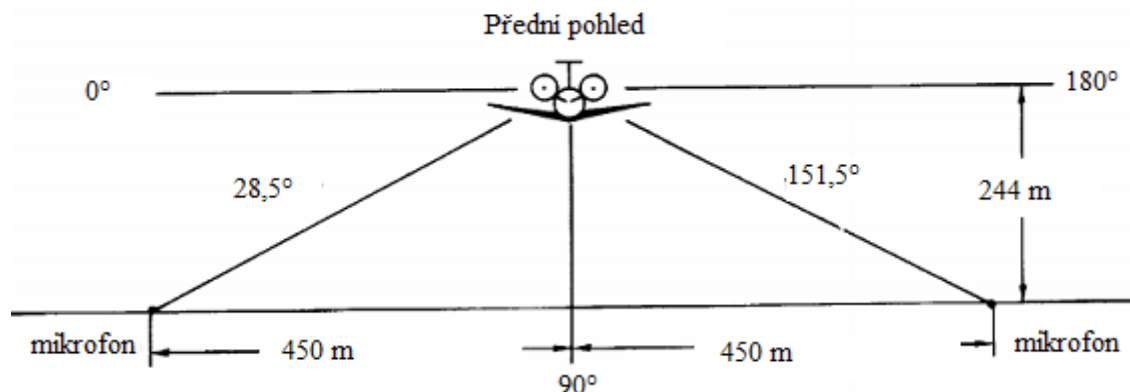


Obr. 6.1 Závislost hladiny hluku na zatížení lopatek a rychlosti hrotů lopatek [28]

Nejnovější studie běžící od roku 2009 dokázaly snížit hladinu hluku až pod hodnotu normy stage 4 FAA platnou od roku 2006 s určitou rezervou, kde se předpokládá dodržení normy stage 5 FAA. Další snižování hluku se neočekává. Tento předpoklad je založen na faktu, že výrobci motorů se snaží plnit hlukové normy na hranici limitu, poté je přednější snížení spotřeby, které má mnohem větší vliv na rozhodování potenciálních kupců o podepsání smlouvy na dodávky pohonných agregátů. [13]

ních kupců o podepsání smlouvy na dodávky pohonných agregátů. [13]

Stěžejními ukazateli přínosnosti zařízení pro provozovatele jsou jeho cena a náklady na provoz (údržbu). V těchto ohledech si motory koncepce propfan nevedly zrovna dobře. Co se týče výrobních nákladů, byly empiricky odvozeny z nákladů pro výrobu jednotlivých komponent. Pro součásti obdobné součástem již používaných v jiných motorech (reduktor a praktický celý jádro motoru) byla cena stanovena s ohledem na jejich velikost a použitý materiál. Pro součásti navržené speciálně pro koncepci propfan se odhad ceny prováděl s ohledem na zkušenosti výrobce komponent pro dmychadlo, jež měl letité zkušenosti s výrobou klasických vrtulí (Hamiltonův institut). Náklady na výrobu se kvantifikovaly za předpokladu výroby 300 motorů ročně. Výsledný verdikt zněl jasně, osazení letadla



Obr. 6.2 Schéma umístění mikrofónů při měření hluku letadla [28]

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

motory koncepce propfan by vyšlo 2x dráž než klasické turbodmychadlové motory. Náklady na údržbu byly znatelně ovlivněné použitím převodovky, ta byla finanční zátěží jak ze strany ceny samotných dílů, které potřebovaly pravidelný servis, tak ze strany časové náročnosti její údržby a oprav. Ve srovnání nákladů na údržbu převodovek a dmychadel propfanů a nákladů na údržbu převodovek a vrtulí turbovrtulových motorů byla údržba zařízení pro propfany jen o 15% vyšší než zařízení pro turbovrtulové motory. [32]

Nemálo důležitým parametrem leteckého motoru je také jeho hmotnost a je důležité ji co nejvíce zredukovat. Redukci hmotnosti lze s určitým nadhledem snadno provést na zařízeních, u kterých se díky pokroku technologií a díky zkušenostem s provozem samotného zařízení ukázaly jisté rezervy. Motory propfan však postihly trochu jiné okolnosti, které vedly k nechtěnému zvýšení jeho hmotnosti. Hlavními příčinami nárůstu váhy motoru oproti prvotním návrhům byly ohledy na provozní spolehlivost motoru, zjednodušení montáže a údržby motoru a také použití rotorů s osmi lopatkami, který vycházel hmotnostně hůř než ten s deseti lopatkami.

Ačkoliv deseti-lopatkové dmychadlo vycházelo v testech o mnoho lépe proti zvolenému osmi-lopatkovému dmychadlu, důvod k rozhodnutí pro méně výhodnou variantu byl prostý. S větším počtem lopatek klesala jejich šířka a s tím se objevovaly problémy s jejich pevností a spolehlivostí. Jelikož obavy spojené s následky utržení lopatky se s projektem vlekly už od počátku samotného projektu, nebylo při návrhu dmychadla moc prostoru ke krokům, které by mohly vyvolat další pochybnosti a tak přišlo na provozně méně výhodnou variantu. [10] [14] [30] [31]

8 ZHODNOCENÍ VÝVOJE

Přestože vývoj motorů koncepce propfan úplně skončil, práce na tomto projektu byla v mnoha ohledech zúročena. Společnost GE použila technologie vyvinuté v rámci projektu UDF během dalšího vývoje svých dalších produktů. Konkrétně se jedná o technologie spojené s lopatkami pro dmychadlo, které byly použity při stavbě turbodmychadlového motoru GE90. Volně uložená turbína s protiběžnými rotory vyvinutá také v rámci vývoje motorů koncepce propfan také přinesla mnohé poznatky využitelné do budoucna. V nedávné minulosti se téměř podařilo tuto technologii dostat do motorů pro nejnovější Boeing 787.

Boeing postavil letadlo s označením 777 na technologiích vyvinutých v rámci projektu Boeing 7J7. Mezi další prvky převzaté z projektů kolem motorů koncepce propfan jsou spojeny se snahou odstínit hluk v kabině letadla, které i přes neúspěch těchto pohonů našli své místo v oblasti stavby letadel i nadále. Práce na 7J7 byla dokonce označena předsedou společnosti Thorntonem Wilsonem jako nejlepší investice na poli vývoje letadel vůbec. [2] [17] [18]

Jak už jste se mohli dočíst výše, tak vývoj propfanů byl z ekonomických důvodů po odeznění ropné krize zrušen. Nicméně po přelomu tisíciletí došlo k výraznému kolísání s pozvolným růstem cen ropy na světových trzích. Svého maxima dosáhla 30. Června 2008, kde cena skončila na 143,67 dolarech za barel. Společně s nepřízní cen pohonných hmot a zvýšením nátlaku na ekologičnost letecké dopravy od dob kdy koncepce motorů propfan spatřila světlo světa, bylo zcela předpokládatelné znovuoživení projektů zabývajících se právě touto koncepcí.

Momentálně jsou ve hře 2 projekty, zabývající se vývojem a modernizací propfanů. Jako první nutno zmínit program společnosti General Electric, která se spojila s francouzskou společností Snecma. Tento program navazuje na poznatky získané v osmdesátých letech během práce na motoru GE-36. Společnosti pracují především na optimalizaci dmychadla. GE pracuje na vývoji a testování tvaru lopatek a Snecma hledá vhodnou technologii pro jejich výrobu s ohledem na zkušenosti s výrobou lopatek pomocí 3D technologií pro turbodmychadlové motory řady Leap. Vedení Sencemi tvrdí, že vývoj lopatek je ve velmi pokročilém stádiu a v už v roce 2015 budou schopni dodat tyto lopatky pro ostré testování za letu.

Dmychadlo však není jediným středem zájmu pro vývoj. Aby mohly propfan motory držet krok s moderními turbodmychadlovými motory, je nutné zaměřit jistou pozornost i na jádro. Hlavní změny jádra spočívají hlavně ve vývoji nových materiálů turbín. Kombinace nových superslitin a keramických povlaků umožňují provoz takto vyrobených součástí na vysokých teplotách. Tím dochází k zvýšení efektivity jádra jako takového.

Společnost GE tvrdí, že testy nejnovějších návrhů dmychadla obnovené na přelomu let 2009 a 2010 ukazují úsporu paliva a snížení emisí až o 25% oproti turbodmychadlovým motorům. Také se jim podařilo vyřešit problémy s hlučností a jejich propfan je dokonce tišší než současné turbodmychadlové motory. Bohužel uvedení motorů propfan na trh se

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

jen tak nedočkáme, protože na výrobce motorů je kladen tlak ze strany Airbusu a Boeingu, kde je požadavek na novou generaci motorů pro letadla 737 od Boeingu a A320 od Airbusu. Reálné uvedení UDF motoru společnosti GE na trh je až kolem roku 2030.

Společnost Snecma nefiguruje pouze v programu společnosti GE, ale také v evropském programu zabývajícím se motory s nezaplášťovaným dmychadlem s označením Open Rotor. Projekt je podporován hlavním evropským výrobcem letadel – Airbusem. Program s názvem SAGE spadá pod hlavní program označen DREAM (DREAM zahrnuje obrovský projekt vývoje nových ekologických motorů pro civilní letectví včetně motorů koncepce propfan) a zastřešuje několik evropských firem (Deutschland, Volvo Aero, Alenia, Hispano-Suiza, Techspace Aero, Aircelle, AVIO atd.) pod vedením společnosti Rolls-Royce.

Tento program je rozdělen do dvou podprogramů. Jedna z dílčích částí vývoje zahrnuje vývoj motoru s reduktorem, který vychází z motoru 578-DX společnosti Allison-P&W, která byla odkoupena společností Rolls-Royce. Druhá část se věnuje vývojem motoru s volně uloženou turbínou s protichůdnými rotory (obdobu technologie GE).

Motory Open Rotor vykazují stejně jako motory UDF vysokou efektivitu (25 – 30 % úspory paliva) a nízkou hladinu generovaného hluku. Tady je odhad uvedení motoru do provozu optimističtější, uvedení je plánováno na přelom roků 2019 a 2020.

Nehledě na výborné výsledky ve vývoji těchto motorů jsou zde pořád určité nejistoty trhu. Nedá se s jistotou říci, zda přední výrobci dopravních letadel (Boeing a Airbus) budou mít zájem o masivní nasazení motorů s nezaplášťovaným dmychadlem. Tyto obavy jsou spojeny s nutností vývoje zcela nových letadel a odsunutí stranou tahounů společností (Boeingu 737 a Airbusu A320). [34] [13] [14]

ZÁVĚRY

Motory koncepce propfan prošly během své historie značným vývojem. Už v první vlně zájmu o tuto koncepci v letech 1973 – 1988 se podařilo vyvinout motory schopné fungovat v reálném provozu. Před jejich nasazením do provozu stálo jenom dotažení vývoje letadel určených pro létání s těmito motory do zdárného konce. Přestože byla koncepce motorů propfan připravená na ostrý provoz, trápily ji jisté nedostatky. V první řadě lze zmínit hlučnost motorů, konstrukci lopatek, konstrukci dmychadla a složitou a nákladnou údržbu. Tyto nevýhody vedly ke snížení plánovaných provozních charakteristik motorů, hlavně ke snížení rychlosti, jež se měla vyrovnat turbodmychadlovým motorům. V součtu všechny tyto nevýhody nakonec převážily jejich jedinou hlavní výhodu – nízkou spotřebu paliva a s tím spojenou nízkou produkci emisí což vedlo ke snížení zájmu o tyto motory a s tím spojenému přerušení vývoje.

Druhá vlna zájmu o koncepci propfan začala spolu s extrémním nárůstem cen ropy v roce 2008 a přetrvává dodnes. Hlavní motivací k vývoji nových úsporných motorů není jenom nestálá situace na trhu s ropou, ale i trend snižování emisí, ve kterém mají motory koncepce propfan veliký potenciál. Momentálně se vývojem této koncepce zabývají 2 výrobci, kde podle dostupných informací mají své motory buďto ve fázi testování, nebo těsně před ní. Postupem výrobních technologií bylo umožněno potlačit většinu negativních vlastností těchto motorů a dosáhnout provozních výkonů, které si výrobci stanovili již v první vlně vývoje.

Nyní je otázkou reálnosti nasazení motorů s nezaplášťovaným dmychadlem do provozu zájem dvou hlavních světových výrobců letadel Airbusu a Boeingu o tyto motory. Aktuální zprávy hovoří o požadavku ze strany výrobců letadel na novou generaci turboventilátorových motorů. Tato skutečnost nutí výrobce motorů ke směřování svých zájmů i k těmto motorům a zpomaluje vývoj koncepce propfan. Je možné, že když dojde k přechodu stávajících letadel na novou generaci turbodmychadlových motorů a nebude po dokončení vývoje koncepce propfan o tyto motory zájem. Přejít na nové turboventilátorové motory a jejich následné nahrazování propfany by bylo neekonomické a navíc by potřebovalo vývoj nových letadel vhodných pro použití propfanu jako pohonné jednotky.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] ROHRBACH, C. a F.B. METZGER. AMERICAN INSTITUTE OF AERONAUTICS AND ASTRONAUTICS. *The Prop-fan - a new look in propulsors*. Anaheim, California, 1975.
- [2] MOXON, J. 1982. Propfan: The propeller to replace jets? *Flight International* [online]. (2): 112-114 [cit. 2015-05-18]. DOI: 0015-3710. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1982/1982%20-%200118.html>
- [3] Propeller Performance Factors. *EPI Inc.* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.epi-eng.com/propeller_technology/selecting_a_propeller.htm
- [4] Propellers. *Pilotfriend* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.pilotfriend.com/training/flight_training/fxd_wing/props.htm
- [5] LNĚNÍČKA, Jaroslav. 2009. Statický a využitelný tah vrtulové pohonné jednotky. *E-magazín Akademie letectví* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.airspace.cz/akademie/rocnik/2009/06/tah.php>
- [6] HOEVELER, Patrick. 2014. Open Rotor im Fokus. *Flug Revue* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://images.flugrevue.de/sixcms/media.php/11/thumbnails/Open-Rotor-6%20GE%20UDF%20an%20727.jpg.2476116.jpg>
- [7] Lockheed CC-130J Hercules. 2012. *Canadian wings* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.canadianwings.com/cmsAdmin/uploads/aircraft/gallery/DSC_0444.jpg
- [8] KOCÁB, Jindřich a Josef ADAMEC. *Letadlové motory*. Vyd. 1. Praha: KANT, 2000, 175 s., vii s. barev. obr. příl. ISBN 80-902914-0-6.
- [9] Schematic diagram of a high-bypass turbofan engine. 2008. *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://en.wikipedia.org/wiki/Turbofan#/media/File:Turbofan_operation.svg
- [10] DEGEORGE, C. L. *Large-scale advanced prop-fan (LAP) final report* [online]. s. 254 [cit. 2015-05-18]. NASA CR 182112. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19880010922.pdf>
- [11] GE's Composite Fan Blade Revolution Turns 20 Years Old. 2015. *GE Aviation* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www.geaviation.com/press/ge90/ge90_20150226.html
- [12] THRYFT, A.R. 2014. *GE Redesigns Carbon Composite Blades for GE9X Engine* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: http://www.designnews.com/document.asp?doc_id=274730

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

- [13] CROFT, John. 2012. Open rotor noise not a barrier to entry: GE. *Flight Global* [online]. Washington DC [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/news/articles/open-rotor-noise-not-a-barrier-to-entry-ge-373817/>
- [14] Open rotor research revs up. 2010. *Aerospace America* [online]. (3): 38-42 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: http://www.aerospaceamerica.org/Documents/March%202010/Open%20rotor%20research%20revs%20up_MAR2010.pdf
- [15] Fit to Print: New Plant Will Assemble World's First Passenger Jet Engine With 3D Printed Fuel Nozzles, Next-Gen Materials. 2014. *GE Reports* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.gereports.com/post/80701924024/fit-to-print>
- [16] TAYLOR, Shane. 2014. 3D Printed LEAP Engines Successfully Take to the Sky. *3D Printing industry* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://3dprintingindustry.com/2014/10/13/ge-3d-printed-leap-engines/>
- [17] *Whatever happend to propfans?* [online]. 2007. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/news/articles/whatever-happened-to-propfans-214520/>
- [18] SWEETMAN, Bill. 2005. *The Short, Happy life of the prop-fan* [online]. : 5 [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.airspacemag.com/history-of-flight/the-short-happy-life-of-the-prop-fan-7856180/?no-ist>
- [19] The ultra high bypass engine. *Aviation history* [online]. 2013 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.aviation-history.com/engines/bypass.htm>
- [20] HENDRICKS, E.S. a M.T. TONG. *Performance and Weight Estimates for an Advanced Open Rotor Engine* [online]. 2012, 20 s. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/20120014381.pdf>
- [21] Large Scale Advanced Turboprop LAP SR-7L Propfan on Display in Propulsion System Labortory PSL 3. *NASA Technical reports server* [online]. 1984 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://naca.larc.nasa.gov/search.jsp?R=C-1984-06795&q=N%3D125%26No%3D530>
- [22] Progress D-27. *DATAB* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://datab.us/i/Progress%20D-27>
- [23] Progress D-27. *MEMIM: Eyclopedia* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://memim.com/progress-d-27.html>
- [24] Is the Progress D-27 really a propfan? *Aviation beta* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://aviation.stackexchange.com/questions/8089/is-the-progress-d-27-really-a-propfan>
- [25] Antonov Airlines / Design Bureau Antonov An-70 UR-NTK. *Airplane pictures* [online]. 2012 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.airplane-pictures.net/photo/235958/ur-ntk-antonov-design-bureau-antonov-an-70/>

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

- [27] BCAC PRELIMINARY DESIGN CENTER,. 1976. Energy consumption characteristics of transports using the prop-fan concept. In: *Boeing commercial airplane company* [online]. s. 148 [cit. 2015-05-18]. NASA CR 137937. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19770007086.pdf>
- [28] MAGILOZZI, Bernard, Paul BROWN a David PRAZYCH. 1987. Acoustic test and analysis of a counterrotating prop-fan model. In: *Hamilton standart united technologies corporation* [online]. [cit. 2015-05-18]. NASA CR 179590. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19900001367.pdf>
- [29] SMRŽ, Vladimír, Rudolf VOLNER, Rostislav HORECKÝ a Karel SZYDLOWSKI. 2010. Letecká doprava. In: *Letecká doprava* [online]. Brno: Akademické nakladatelství CERM [cit. 2015-05-19]. ISBN 978-80-7204-741-3. Dostupné z: <http://issuu.com/esf150/docs/fs2?e=2644980/3450987>
- [30] Open rotor engine briefing paper. 2008. *Sustainable aviation* [online]. [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.sustainableaviation.co.uk/wp-content/uploads/open-rotor-engine-briefing-paper.pdf>
- [31] Propfan: The price factor. 1987. *Flight international* [online]. (6): 76-79 [cit. 2015-05-19]. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/pdfarchive/view/1987/1987%20-%200770.html>
- [32] BAUM, J.A., P.J. DUMAIS, M.G. MAYO, F.B. METZGER, A.M. SHENKMAN a G.G. WALKER. 1978. *Prop-fan data support study, technical report* [online]. In: . [cit. 2015-05-19]. NASA CR 152141. Dostupné z: <http://ntrs.nasa.gov/archive/nasa/casi.ntrs.nasa.gov/19780019185.pdf>
- [33] *Ropná krize v roce 1973* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://www.penize.cz/15900-ropna-krize-v-roce-1973>
- [34] LUNSFORD, J. L. a Daniel MICHAELS. 2008. Jet-engine makers launch new war. *Tucson Citizen* [online]. [cit. 2015-05-18]. Dostupné z: <http://tucsoncitizen.com/morgue/2008/07/14/90901-jet-engine-makers-launch-new-war/>
- [35] What Happened To The GE36? *The wings of the web* [online]. 2008 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: http://www.airliners.net/aviation-forums/general_aviation/read.main/3861692/
- [36] Pratt & Whitney considers geared open rotor concept. MOORES, Victoria. *Flightglobal* [online]. 2007 [cit. 2015-05-26]. Dostupné z: <http://www.flightglobal.com/news/articles/pratt-amp-whitney-considers-geared-open-rotor-concept-215261/>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Zkratka	Jednotka	Popis
ATP	[-]	Advanced TurboProp
DREAM	[-]	validaton of Radical Engine Architecture systeMs
FAA	[-]	Federal Aviation Administration
GE	[-]	General Electric
Ma	[-]	Machovo číslo
NASA	[-]	National Aeronautics and Space Administration
P&W	[-]	Pratt & Whitney
SAGE	[-]	Sustainable And Green Engine
UDF	[-]	UnDucted Fan

Symbol	Jednotka	Popis
F_{tah}	[N]	tahová síla motoru
\dot{m}	[kg·s ⁻¹]	hmotnostní tok
V_{in}	[m·s ⁻¹]	rychlost vzduchu na vstupu do motoru
V_1	[m·s ⁻¹]	rychlosti letu
V_{out}	[m·s ⁻¹]	rychlost vzduchu na výstupu z motoru
η_p	[-]	propulzní účinnost

SEZNAM OBRÁZKŮ

Číslo	Popis	Strana
1.1	Srovnání propulzní účinnosti jednotlivých druhů motorů	10
2.1	Rychlost segmentu vrtule	12
2.2	Čelní pohled na dmychadlo motoru GE-36 s protiběžnými rotory	13
2.3	Čelní pohled na vrtuli letounu CC-130J Hercules	13
3.1	Tok vzduchu dvouproudovým dvouhřídelovým motorem spolu s popisem základních částí motoru	14
3.2	Vliv tlakového poměru na ideální propulzní účinnost	16
3.3	Vliv zatížení lopatek na ideální propulzní účinnost	17
4.1	Navrhované varianty lopatek pro motor SR-7L, v závorce číslo udávající počet lopatek na dmychadle	18
4.2	Řez lopatky dmychadla motoru SR-7L	19
4.3	Zjednodušený řez motorem s protiběžnými turbínami	23
4.4	Rozdíl otáček rotorů klasické turbíny a turbíny s protiběžnými rotory	24
5.1	Motor SR-7L	27
5.2	Motor GE-36	28
5.3	Motor 578-DX	28
5.4	Motory D-27	29
6.1	Závislost hladiny hluku na zatížení lopatek a rychlosti hrotů lopatek	34
6.2	Schéma umístění mikrofونů při měření hluku letadla	34

SEZNAM ROVNIC

Číslo	Popis	Strana
3.1	Vyjádření propulzní účinnosti dmychadla	15
3.2	Vyjádření tahu motoru	15

SEZNAM TABULEK

Číslo	Popis	Strana
3.1	Srovnání propulzní účinnosti turbodmychadlového motoru a motoru koncepce propfan při totožném výkonu na výstupním hřídeli	17