



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
LETECKÝ ÚSTAV

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

SOUČASNÉ TRENDY VE VÝVOJI LETECKÝCH POHONNÝCH JEDNOTEK

CURRENT TRENDS IN DEVELOPMENT OF AIRCRAFT POWERPLANT

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

VLADIMÍR DURCHAN

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. Mgr. PAVEL IMRIŠ, Ph.D.

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Letecký ústav

Akademický rok: 2013/2014

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student: Vladimír Durchan

který studuje v **bakalářském studijním programu**

obor: **Profesionální pilot (3708R030)**

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

Současné trendy ve vývoji leteckých pohonných jednotek

v anglickém jazyce:

Current trends in development of aircraft powerplant

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Provést rešerši vývoje požadavků na letecké pohonné jednotky a výsledků výzkumu a vývoje s důrazem na současný stav jejich aplikace ve výrobě a v provozu, případně i na probíhající provozní zkoušky nových technologií a alternativních pohonu.

Cíle bakalářské práce:

Zmapovat vývoj leteckých pohonných jednotek a jejich aplikací, popsat spektrum současných požadavků na letecké pohonné jednotky a předpoklad směřování jejich dalšího vývoje, představit soudobé provozní aplikace a probíhající provozní zkoušky nových konstrukcí a technologií.

Seznam odborné literatury:

- TRAINING, Oxford Aviation. Aircraft general knowledge 3 powerplant. Rev. ed. Shoreham, U.K: Transair (U.K.), 2001. ISBN 978-190-4935-032
- Učební texty dle JAR FCL 1, část 2, hlava J: Všeobecné znalosti letounu,
- ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. Letadlové motory. Vyd. 2. Praha: Corona, 2008, 175 s. ISBN 978-80-86116-54-9.
- odborná periodika a podklady výrobců leteckých pohonných jednotek

Vedoucí bakalářské práce: Ing. Mgr. Pavel Imriš, Ph.D.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/2014.

V Brně, dne 19.11.2013

L.S.

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

prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.
Děkan fakulty

Abstrakt

Tato bakalářská práce popisuje současné trendy a novinky ve vývoji leteckých pohonných jednotek, jejich aplikaci v současnosti vyráběných leteckých pohonných jednotkách. Jednotlivá konstrukční řešení vyplývající z diskutovaných trendů jsou v práci demonstrována a popsána na ukázkách zkonstruovaných a vyvíjených leteckých motorech.

Klíčová slova

Letecká pohonná jednotka, letecký motor, trend, vývoj

Abstract

This bachelors thesis describes current trends and news in development in aircraft powerplants and their applications at currently produced aircraft engines. Individual construction solutions resulting from discussed trends are shown and described on examples of designed and developed aircraft engines.

Keywords

Aircraft powerplant, aircraft engine, trend, development,

Bibliografická citace

DURCHAN, V. Současné trendy ve vývoji leteckých pohonných jednotek. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 45 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Mgr. Pavel Imriš, Ph.D.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci na téma Současné trendy ve vývoji leteckých pohonných jednotek vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce Ing. Mgr. Pavla Imřiše, Ph.D. s použitím odborné literatury a pramenů uvedených v seznamu použitých zdrojů.

V Brně dne 28.5.2014

.....
Vladimír Durchan

Poděkování

Chtěl bych poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce panu Ing. Mgr. Pavlu Imříšovi, Ph.D. za odborné vedení práce, cenné rady, věcné připomínky a ochotu, kterou mi v průběhu zpracování práce věnoval. Dále bych chtěl poděkovat pánům Ing. Miroslavovi Šplíchalovi, Ph.D. a doc. Ing. Jiřímu Hlinkovi, Ph.D. za poskytnuté informace. Děkuji i své rodině za podporu při studiu.

Obsah

1. Úvod	- 8 -
2.1. Počátky motorového létání	- 9 -
2.2. Období 1. světové války	- 11 -
2.3. Meziválečné období	- 12 -
2.4. Období 2. světové války	- 14 -
2.5. Poválečný vývoj leteckých pístových motorů v Československu	- 16 -
2.6. Historie proudových motorů	- 16 -
3. Současné trendy ve vývoji leteckých pohonných jednotek	- 20 -
4. Pohonné jednotky pro letouny všeobecného letectví	- 23 -
4.1. Pohonné jednotky s pístovými motory	- 23 -
4.1.1. Systém elektronického řízení motoru	- 23 -
4.1.2. Vrtulové pohonné jednotky se vznětovými motory	- 24 -
4.2. Turbovrtulové motory	- 27 -
4.3. Vrtulové pohonné jednotky poháněné elektromotory	- 27 -
4.3.1. Solar Impulse	- 28 -
4.3.2. VUT 051 Ray	- 28 -
4.3.3. Elektra One	- 29 -
4.3.4. Antares 23E	- 30 -
5. Pohonné jednotky pro dopravní letouny	- 31 -
5.1. Turbovrtulové pohonné jednotky	- 31 -
5.1.1. GE Aviation Czech H80	- 31 -
5.1.2. PBSVB TP100	- 31 -
5.1.3. Europrop International TP400	- 32 -
5.1.4. Pratt & Whitney PW127	- 33 -
5.1.5. CPX 38	- 34 -
5.2. Proudové pohonné jednotky	- 35 -
5.2.1. GEnx	- 35 -
5.2.2. LEAP-X	- 36 -
5.2.3. Rolls-Royce Trent XWB	- 37 -
5.2.4. ADVENT a AETD	- 38 -
5.2.5. Propfan	- 39 -
6. Závěr	- 41 -
Seznam použitých zdrojů	- 42 -
Seznam použitých zkratek	- 44 -
Seznam použitých jednotek	- 45 -

1. Úvod

Moderní doba klade stále větší požadavky na přepravu osob a materiálu. Oproti pozemní a námořní dopravě, je letecká doprava schopna dostát vysokým požadavkům moderní doby. Letecká doprava se postupně stala nedílnou součástí našich životů, protože díky ní je možné dosáhnout vzdálených míst v krátkém čase.

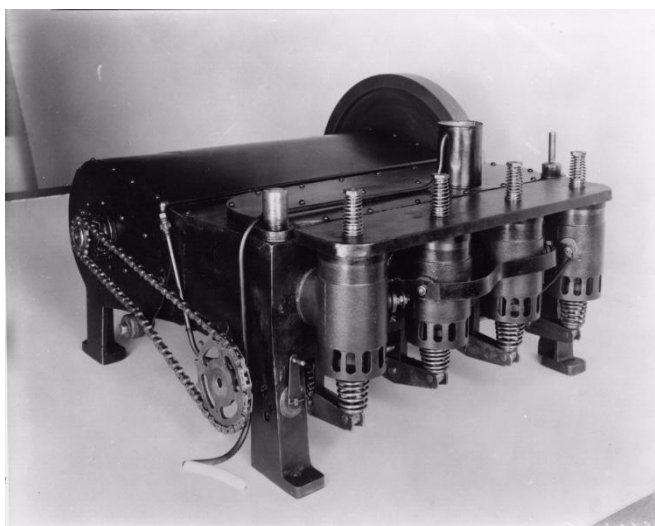
Historie motorového létání se začala psát počátkem dvacátého století, kdy byl zkonstruován první prototyp letounu, ve kterém bratři Wrightové úspěšně použili letecký motor vlastní konstrukce. Od té doby vývoj v leteckém průmyslu a zejména v oblasti leteckých pohonných jednotek významně pokročil. V dnešní době se z důvodu zvyšujících se cen pohonných hmot a nároků kladených na letecké pohonné jednotky hledají nové způsoby dosažení vyšší účinnosti již odzkoušených konstrukcí a objevují se i nové trendy v konstrukci vlastních leteckých pohonných jednotek.

Cíle této bakalářské práce je popis současných trendů a novinek ve vývoji leteckých pohonných jednotek. Snahou autora je čtenáři přiblížit aplikované vývojové trendy, které vedou např. ke snížení spotřeby paliva, emisí nebo celkových provozních nákladů.

2. Vývoj leteckých pohonných jednotek

2.1. Počátky motorového létání

Od dávných dob se lidé pokoušeli létat. Vzorem se jim stal let ptáků, kdy si lidé připevňovali na ruce křídla a pokoušeli se vzlétnout. Tyto pokusy většinou končily vážnými úrazy. Myšlenkou létání se zabýval i slavný vizionář Leonardo da Vinci¹. Jeho nápady zůstaly pouze v teoretické rovině a ty co byly sestrojeny, údajně nefungovaly. První, kdo uskutečnili delší let, byli francouzští bratři Joseph a Jacques Montgolfierovi², kteří v roce 1783 provedli svůj let s horkovzdušným balónem – letadlem lehčím než vzduch. Francouz Victor Meusnier ve svých vědeckých pracích zdůrazňoval, že pro déle trvající let je nezbytné použití vrtule pro vytvoření tahu. V 18. století nebyly dostatečné technické podmínky pro vytvoření stroje, který by rozpohyboval vrtuli, a ta vytvořila potřebný tah. V roce 1894 se pokoušel o první lety s pomocí tahu Brit Hiram S. Maxim³, který zkoušel své letadlo s parním strojem. Roku 1903 byl proveden první potvrzený a zaznamenaný motorový let. Tento let provedli bratři Wilbur a Orville Wrightové⁴ s jejich letounem Wright Flyer. Tento letoun tvořil dřevěný rám pokryt bavlněnou látkou a vyztužen ocelovými dráty. Blok motoru byl odlit ze slitiny hliníku a mědi. Motor vlastní výroby byl řadový čtyřválec chlazený vodou. Měl výkon 12 k (8,8 kW)⁵ a poháněl dvojici tlačných vrtulí. Hmotnost samotného motoru byla 77,1 kg. Po této události nastal velký rozkvět letectví.



Obr. 1 Čtyřválcový motor použitý na letounu Wright Flyer⁶

Létání se dostalo velkému rozmachu nejen v USA, ale i po celé Evropě. Letci neustále rozšiřovali hranice létání a k tomu potřebovali lepší, kvalitnější a výkonnější pohonné jednotky. Bratři Wrightové neustále pracovali na vývoji motorů pro svá letadla. Byl to např. Wright 440, což byl čtyřválcový motor o výkonu 30-40 k. Motor byl vybaven vodními

¹ Leonardo da Vinci (15.4. 1452 – 2.5. 1519) byl italský renesanční malíř, vynálezce, architekt a anatom.

² Joseph-Michel Montgolfier (26.8.1740 – 26.6.1810) a Jacques-Étienne Montgolfier (6.1. 1745 – 2.8. 1799) byli francouzští vynálezci.

³ Hiram Stevens Maxim (5.2.1840 – 24.1.1916) byl britský vynálezce např. prvního přenosného kulometu, elektroměru a věnoval se i konstrukci letadel.

⁴ Orville Wright (19.8. 1871 – 30.1. 1948) a Wilbur Wright (16.4. 1867 – 30.5. 1912) byli tvůrci prvního letounu těžšího než vzduch.

⁵ k- koňská síla (v angličtině značena HP – Horse Power nebo v němčině PS – Pferdestärke) je fyzikální jednotka výkonu zavedená James Watterem. Od 60. let 21. století je jednotkou výkonu kW. Přepočet 1 kW \doteq 1,36 k

⁶ Obr.1 Dostupný z: <http://airandspace.si.edu/exhibitions/wright-brothers/online/fly/1903/engine.cfm>

pumpami a chladičem, ale i tak byla chlazená jen polovina válců. Palivové čerpadlo bylo vyvedeno přímo do sacího potrubí, tudíž motor neměl žádnou regulaci výkonu, fungoval na plný výkon nebo byl vypnutý. Dalším jejich motorem byl Wright 660, což byl řadový šestiválec, který byl prvním motorem bratří Wrightů, jenž měl chlazené válce po celé jejich ploše. Hmotnost samotného motoru byla 140 kg, zdvihový objem 6,5 l a produkoval výkon 50 k. V roce 1913 byl vybaven Zenith-Strombergovým karburátorem a u motoru bylo poprvé možné regulovat přípusť. „Největším průkopníkem motorů v USA byl Glenn Curtiss⁷. Svoje první tři letadla Red Wing, White Wing a June Bug vybavil osmiválcem V8 o výkonu 40 k, který vycházel z motocyklového motoru jeho vlastní firmy. Curtiss Manufacturing Co.. V roce 1912 začal vyrábět vodou chlazený osmiválcový motor O. Jeho výkon byl 75 k při 1100 ot/min, ale už o rok vylepšený model OX měl výkon 90 k při 1400 ot/min a objemu 8,2 l. Tento motor se v různých modifikacích vyráběl až do roku 1929 a celkem se vyrobilo 12 619 kusů.“⁸

Ani Evropa nezůstávala pozadu a především v zemích jako Německo, Velká Británie, Itálie a Francie. Především Francie byla považována za evropskou motorářskou velmoc, kde prvním průkopníkem byl Léon Levavasseur⁹ s motorem Antoinette, vidlicovým osmiválcem o výkonu 25 k při 800 ot/min. Nastavení úhlu válců bylo 90°, chlazení se provádělo odpařováním vody. A právě chlazení motorů, především při malých rychlostech, bylo velmi problematické. Proto se začalo laborovat s hvězdicovými rotačními motory. „Rotační motor je druh hvězdicového motoru, jehož kliková hřídel je pevně uchycena do draku letounu a skříň s válci spojená s vrtulí, rotovala.“¹⁰ Výhoda této konstrukce motoru nebyla jenom v lepším chlazení motoru, ale i ve snížení vibrací tvořenými motorem. Při výrobě bylo důležité, aby rotační prsteneček byl dokonale vyvážen, jinak by docházelo k nesouměrným dostředivým silám, které měly velký vliv na životnost motoru. Tento způsob konstrukce hojně využívali bratři Louis a Laurent Seguinovi, jejichž motory byly známější pod značkou Gnome-Rhone¹¹. Jedním z jejich nejslavnějších rotačních motorů byl vzduchem chlazený devítiválcový Gnome Monosoupape o výkonu 150-180 k. „Ve srovnání se svými předchůdci se konstrukce motoru Monosoupape značně lišila v jednom ohledu. Používala důmyslné uspořádání vnitřních kanálů, které nahrazovalo velké množství pohyblivých součástí, používaných v běžných motorech. Stačil tak jen jeden ventil pro každý válec (jak je patrné z názvu). Roli sacího ventilu hrál samotný píst válce. Motory Monosoupape patřily k nejspolehlivějším motorům své doby.“¹² Tento motor poháněl řadu slavných bojových letadel z období 1. světové války, jako například Morane Saulnier A.1, Nieuport 28, Sopwith Pup a další. Dalšími významnými výrobci a konstruktéry motorů byly firmy Salmson¹³, Daimler-Mercedes¹⁴, Austro-Daimler¹⁵ a FIAT¹⁶.

⁷ Glenn Curtiss (21.5. 1878 – 23.7 1930) byl americký letecký průkopník a zakladatel amerického leteckého průmyslu.

⁸ Cit. ŠUCHA, Pavol. Letecké motory do roku 1914 [online]. [cit. 22.2.2014]. Dostupný na WWW: http://www.lietadla.com/motory/mot_1914.htm

⁹ Léon Levavasseur (8.1. 1863 – 26.2. 1922) byl francouzský inženýr zabývající se leteckými motory. Mezi jeho vynálezy patřilo chlazení motorů odpařováním nebo přímé vstříkávání paliva.

¹⁰ Cit. WIKIPEDIE. Rotační motor [online]. [cit. 22.2.2014]. Dostupný na WWW:

http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Rota%C4%8Dn%C3%AD_motor&oldid=11374794

¹¹ Gnome et Rhône byla francouzská firma zabývající se výrobou leteckých motorů. Byla založena v roce 1905 bratry Seguinovi. V roce 1945 byla znárodněna a stala se součástí koncernu SNECMA

¹² Cit. WIKIPEDIE. Gnome Monosoupape [online]. [cit. 22.2.2014]. Dostupný na WWW:

http://cs.wikipedia.org/w/index.php?title=Gnome_Monosoupape&oldid=10600905

¹³ Salmson (1890 – 1957) byla francouzská firma z Boulogne zabývající se výrobou leteckých motorů a automobilů

¹⁴ Daimler-Mercedes (1926 – dodnes) založena Karlem Benzem a Paulem Daimlerem ve Stuttgartu.

2.2. Období 1. světové války

Po začátku 1. světové války nastalo hromadné využití letadel ve vojenských operacích a tím rostl zájem o stále výkonnější pohonné jednotky. Nejvíce se asi využívaly rotační hvězdicové motory, protože řadové motory měly stále problémy s chlazením. Při potřebě být rychlejší než nepřítel se stále zvyšoval výkon motorů, např. britská firma Bentley¹⁷ vyvinula rotační motor Bentley BR2, který dosahoval výkonu 245 k. To mělo za následek, že motor měl značnou hmotnost, což při chodu vytvářelo velký gyroskopický moment, který negativně ovlivňoval letové vlastnosti. Výrobce tento problém řešil přidáním reduktoru, který měl změnit smysl otáčení vrtule. Toto řešení bylo velmi složité a motor díky tomu trpěl značnou nespolehlivostí a poruchovostí.



Obr. 2 Motor Hispano-Suiza 8A¹⁸

Přes svou poměrně velkou hmotnost se do popředí začaly dostávat motory řadové a to především pro svůj potenciál zvyšování výkonu přidáním dalších řad válců a také pro možnost aerodynamičtějšího kapotování. Mezi významné řadové motory patřil německý Daimler Mercedes D.III (F1466), který se v různých verzích vyráběl od roku 1914 až do konce 1. světové války. Byl to šestiválec chlazený kapalinou o výkonech 160 - 200 k. Motor měl hliníkovou klikovou skříň, na kterou byly připevněny ocelové válce. Motor prošel řadou modifikací, jako změna tvaru pístů na více klenutý pro zvýšení komprese. Od roku 1915 byly vybavovány prvními kompresory pro schopnost operovat ve vyšších výškách a také vstříkovaní benzolu do paliva pro zvýšení oktanového čísla. Na straně Spojenců byl důležitou pohonnou jednotkou španělský motor Hispano-Suiza¹⁹ 8A navržený švýcarským inženýrem Marcem Birkigtem²⁰, který se podílel i na vývoji synchronizačního systému pro střelbu skrz okruh vrtule. Hispano-Suiza 8A byl řadový vodou chlazený osmiválec se zdvihovým objemem 11,76 l s ventilovým rozvodem OHC²¹ a samotnou hmotností 215 kg. Základní verze 8A měla výkon 140 k, jedna z posledních verzí značená 8F dosahovala výkonu až 300 k. H.S. 8A byl chválen nejen pro svoji značnou spolehlivost, ale pro poměr hmotnost-výkon a pro svůj velký rozvojový potenciál. Motor byl vyráběn od roku 1914 až do 20. let 20. století. První varianty se odlišovaly převážně jiným kompresním poměrem, až u verze

¹⁵ Austro-Daimler (1899 – 1934) rakouský výrobce automobilů a leteckých motorů.

¹⁶ FIAT - Fabbrica Italiana Automobili Torino (1899 – dodnes) založena Giovannim Agnellim v Turíně.

¹⁷ Bentley Motors Limited (1910 – dodnes) založena W. O. Bentleyem v Crewe, Velká Británie.

¹⁸ Obr.2 Dostupný z: <http://www.enginehistory.org/Museums/NMNA.shtml> Foto: Garry Brossett

¹⁹ Hispano – Suiza (1904 – 1968) založena v Barceloně Emiliem de la Cuadra a Marcem Birkigtem. Zabývala se hlavně výrobou leteckých motorů a luxusních automobilů. Dnes součástí francouzského konsorcia SAFRAN.

²⁰ Marc Birkigt (8.3. 1878 – 15.3. 1953) byl švýcarský inženýr, spoluzakladatel Hispano – Suiza.

²¹ OHC - Over Head Camshaft - vačková hřídel i ventily jsou umístěny v hlavě motoru.

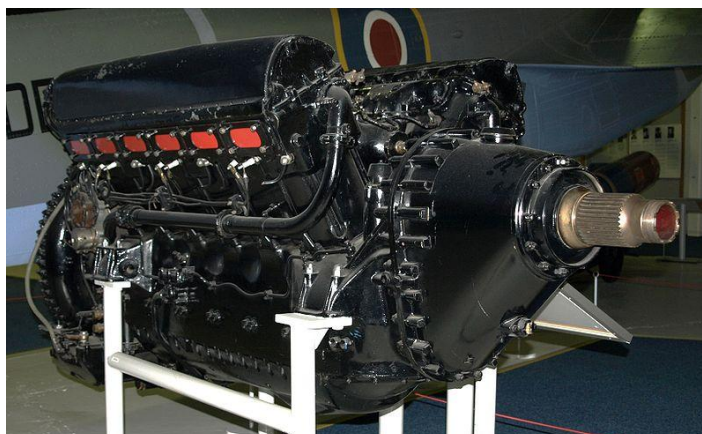
8Bb došlo k zástavbě reduktoru, ale první vyrobené kusy měly velké problémy s tímto systémem, kdy docházelo k destrukci celého motoru. Po vyřešení těchto problémů verze 8B dosahovaly výkonu 235 k. Verze 8C měla mezi válci umístěný 37 mm kanón Puteaux SA 18, který střelil dutou hnací hřídelí, bez toho, aby ovlivnil vrtuli. Jedna z posledních variant 8F byla určena pro bombardéry a měla zvětšený zdvihový objem na 18,5 l, hmotnost 260 kg a výkon 300 k. Všechny varianty motoru Hispano-Suiza 8 bylo vyrobeno okolo 50 000 kusů různých variant. Motory byly vyráběny licenčně ve Francii, Velké Británii, USA, Československu atd.. V Československu se vyráběl v licenci u plzeňské Škodovky a byl použit v řadě československých letounů jako Avia BH-21/22, Letov Š-7, Letov Š-13/14.

2.3. Meziválečné období

Po skončení 1. světové války v roce 1918 existovalo značné množství letounů bez využití. Uplatnění našly v civilní sféře, kde se letadla začala využívat pro převoz pošty, nákladu a osob. Původně vojenské letouny nevyhovovaly, a proto se začaly vyvíjet nové, vhodnější letouny. Nové požadavky byly kladeny i na pohonné jednotky a to především na jejich hospodárnost, spolehlivost a životnost. V této době se prakticky využívalo dvou konstrukcí motorů a to kapalinou chlazených řadových motorů nebo vzduchem chlazených hvězdicových motorů. Letectví se těšilo velkému zájmu a oblibě, a proto se začaly pro veřejnost pořádat letecké dny a rychlostní letecké závody. Na těchto závodech se prezentovali jak výrobci letounů, tak i leteckých motorů. Mezi nejznámější a nejslavnější závody patřil Schneiderův pohár (Schneider Trophy), pořádaný francouzským průmyslníkem Jacquesem Schneiderem od roku 1913. Mezi nejúspěšnější účastníky tohoto závodu patřil britský výrobce Supermarine²², který Schneiderův pohár vyhrál celkem čtyřikrát a to v letech 1922, 1927, 1929 a 1931. Poslední tři ročníky ovládl Supermarine se svým S.5 respektive S.6 a velký podíl na tomto úspěchu měl motor Rolls-Royce R²³. Rolls-Royce R byl řadový přeplňovaný dvanáctiválec s válci do V s roztečí 60° a objemu úctyhodných 37 l, výkon se pohyboval okolo 2 530 k. Značné problémy takto výkonného motoru způsobovalo jeho chlazení, protože obvykle používaný voštinový chladič měl za letu velký odpor. Proto bylo rozhodnuto využít povrch křídel a plováků jako tepelné výměníky. Princip spočíval v použití vrstveného povrchu, v němž cirkulovala chladicí kapalina složená ze 70% vodou a z 30% ethylenglykolem. Obdobně se chladil i olej, jenž využíval plochu trupu a ocasní plochy. Z těchto důvodů měl S.6 přezdívkou Létaující chladič. Ale ani tento systém nebyl stoprocentní a během letu na plný výkon docházelo k přehřívání. Stěžejní částí motoru byl kompresor s velkým poměrem výkonu k hmotnosti, schopný fungovat při vysokých otáčkách díky značné strukturální pevnosti. Kompresor dodával stlačený vzduch o tlaku 1,24 baru vyšší, než byl atmosférický tlak. Rolls-Royce R využíval pro svůj chod speciálního paliva, což byla směs tvořená 11% leteckého petroleje, 89% benzolu a 5 cm³ tetraethylu. Po zkušebních testech bylo zjištěno, že při vstříku methanolu do směsi docházelo ke zvýšení výkonu až o 20 k. I když typ R byl vyroben v pouhých 19 kusech, znamenal významný milník ve vývoji pohonných jednotek, protože právě z něj vycházely motory jako Rolls-Royce Merlin a Rolls-Royce Griffon, které poháněly stroje jako Supermarine Spitfire, de Havilland Mosquito, Hawker Hurricane, Avro Lancaster atd. a nemalou měrou pomohly ke konečnému poražení nacismu.

²² Supermarine (1913 – 1960) byl britský výrobce letounů, založený panem Noelem Pemberton-Billingem. Je známá především díky stíhacímu Supermarine Spitfire. Dnes je součástí British Aircraft Corporation.

²³ Rolls-Royce Limited (1906 – dodnes) je britský výrobce luxusních automobilů a leteckých motorů. Založen v Manchesteru Charlesem Rollsem a Henry Roycem.



Obr. 3 Rolls-Royce R²⁴

Kromě rychlostních závodů, se konaly různé pokusy o rekordní lety. Asi nejznámější byl první sólový přelet Atlantického oceánu, který uskutečnil se svým strojem Spirit of St. Louis v roce 1927 Charles Lindbergh²⁵. Spirit of St. Louis byl původně typ Ryan NYP, což je jednomístný hornoplošník dřevěné konstrukce, poháněný devítiválcovým hvězdicovým motorem Wright J-5C Whirlwind. Tyto pohonné jednotky používaly i první, na svou dobu velkokapacitní letouny, jako Ford Trimotor nebo Fokker F.VII. Wright J-5C byl velmi oblíben pro svoji spolehlivost, nenáročnou údržbu a poměrně malé provozní náklady.

V 30. letech 20. století začaly pokusy s využitím vznětových leteckých motorů z důvodu snížit spotřebu paliva a také ke snížení rizika požáru motoru. Největším průkopníkem vznětových motorů v letectví byl německý konstruktér Hugo Junkers²⁶. V roce 1926 představil 270 kW řadový šestiválec Fo-2. Roku 1929 vykonal Junkers F-24 první přelet se vznětovým motorem na evropském kontinentu z Dessau do Kolína nad Rýnem. I přes úspěch této konstrukce byly zážehové agregáty upřednostňovány před vznětovými motory, především kvůli vyšší hmotnosti a značně složitě konstrukci vznětových motorů. Mezi první britské vznětové motory patřil Bristol Phoenix, což byl devítiválcový vzduchem chlazený hvězdicový motor s výkonem 380 k a hmotností 484 kg. V roce 1934 letoun Westland Wapiti s tímto motorem se stal držitelem výškového rekordu 8 368 m, který držel až do druhé světové války. I přes dobré výsledky se vznětové motory neujaly.

Velký neduh hvězdicových motorů byl jejich značný čelní odpor, který způsoboval snížení rychlosti a zvýšení spotřeby paliva. Proto začaly v americkém Národním poradním výboru pro letectví²⁷ práce na speciální kapotáži hvězdicových motorů, která měla snížit odpor a zlepšit obtékání motoru. Nová kapotáž nejenom dopomohla ke snížení odporu až o 60%, ale i zlepšila chlazení, především hlav válců. Při testech NACA bylo dokázáno na letounu Curtiss AT-5A Hawk vybaveném motorem Wright Whirlwind J-5 a kapotáží NACA, že při přímočarém letu dosáhne rychlosti 220 km/h oproti rychlosti 190 km/h při letu při němž nebyl vybaven kapotáží. V Británii se touto problematikou zabýval Dr. Hubert Townend. Kryt vynalezený Dr. Townendem deklaroval zvětšení rychlosti až o 30 km/h, ale tento kryt se

²⁴ Obr.3 Dostupný z: <http://www.en.wikipedia.org/wiki/File:RollsRoyceR.JPG>

²⁵ Charles Lindbergh (4.2. 1902 – 26.8. 1974) byl americký aviatik, spisovatel a vynálezce.

²⁶ Hugo Junkers (3.2. 1859 – 3.2. 1935) byl německý letecký konstruktér. Byl průkopníkem ve stavbě celokovových letounů a zakladatel firmy Junkers.

²⁷ NACA-National Advisory Committee for Aeronautics, 3. března 1915 – 30. září 1958, předchůdce dnešní NASA - National Aeronautics and Space Administration

příliš nehodil pro rychlosti vyšší než 450 km/h a proto většina letounů vybavených hvězdicovými motory používala kapotáž NACA.

Když v roce 1935 poprvé objevil Douglas DC-3, jednalo se o nejmodernější dopravní letadlo té doby a to platilo i o pohonných jednotkách použitých na tomto stroji. Konkrétně se jednalo o motor Pratt & Whitney²⁸ R-1830 Twin Wasp, což byl dvouřadý hvězdicový, vzduchem chlazený čtrnáctiválec o zdvihovém objemu 30 l. Hliníková kliková skříň byla vybavena tlumičem vibrací, ventilová vahadla byla v uzavřeném krytu s kontinuálním mazáním. První vyrobené kusy měly výkon mezi 775 - 825 k, laborováním s kompresním poměrem a použitím paliv s vyšším oktanovým číslem, se výkon zvýšil, až na 1200 k. Pozdější varianty byly vybaveny, především z důvodu potřeby létat ve vyšších výškách, jednorychlostními mechanickými kompresory z produkce General Electric²⁹. Tímto motorem se osazovala letadla jako již zmíněný Douglas DC-3, Consolidated B-24 Liberator, Consolidated PBV Catalina nebo palubní stíhací letoun Grumman F4F Wildcat. Masová výroba těchto letounů způsobila, že Pratt & Whitney R-1830 Twin Wasp, se stal se 173 618 vyrobenými kusy nejvyroběnějším pístovým leteckým motorem.

2.4. Období 2. světové války

Dne 1. září 1939 začala Druhá světová válka. Bylo jasné, že letectvo bude hrát velkou roli a bude mít velký vliv na výsledek celé války. Nadvláda ve vzduchu se stala jednou z nezbytných podmínek vítězství a bylo jasné, že kdo získá převahu ve vzduchu, získá převahu i na zemi³⁰.

Na začátku války měl tuto převahu její iniciátor, nacistické Německo. To začalo tajně s intenzivním vývojem letecké techniky všeho druhu. Ale ani inženýři ostatních velmocí nezůstávali příliš pozadu a vývoj pokračoval mílovými kroky. Neprobíhal pouze vývoj motorů jako takových, ale i materiálů, z nichž se vyráběly konstrukční součástky. Mezi nejpoužívanější patřil bezpochyby hliník. Hliník byl základním kovem pro všechny slitiny, z nichž se vyráběly klikové skříňe, písty, čepy apod. Poměrně byly rozšířené slitiny hliníku a niklu, označované Y, hliníku a křemíku, hliníku a mědi, hliníku a duralu. Do nich se přidávaly další kovy jako železo a titan nebo polokovy jako křemík a jiné. Z nich vycházely slitiny používané například pro písty označované jako RR50 a RR53, které používaly v továrně Rolls-Royce. V Německu se na písty používaly slitiny EC 124 (1,5% mědi, 21% křemíku, 1% manganu, 1,5% niklu). Bloky motorů se odlévaly ze slitin Hiduminium (obsahoval 93,7% hliníku, 2% mědi, 1,4% železa, 1,3% niklu) nebo Silumin (slitina hliníku a křemíku).

Rychlost a výška letů se neustále zvětšovaly a proto bylo zapotřebí pohonného ústrojí, schopného dodávat potřebný výkon ve vyšších výškách. Zkoušelo se zvyšování otáček, ale tento způsob byl limitován především přenosem otáček na vrtuli, protože účinnost vrtule je omezena rychlostí otáčení, při které ještě vyvozuje tah. Zvětšováním zdvihového objemu nebo přidáním válců nebylo příliš výhodné, protože rostla celková hmotnost.

²⁸ Pratt & Whitney (1925 – dodnes) je americká firma z Connenticutu zabývající se především vývojem a výrobou leteckých motorů.

²⁹ General Electric (1892 – dodnes) je americká firma založena v Schenectady, New York Thomasem Edisnem a jeho společníky. GE se angažuje v oblasti dopravních technologií, finančnictví, energetiky, médií a další.

³⁰ Srov. NĚMEČEK, Václav. Vojenská letadla 3. Praha: Naše Vojsko, 1977, ISBN 28-063-77. str. 7

Jako nejvýhodnější se ukázalo zvýšení plnicího tlaku pomocí kompresorů nebo turbodmychadel.

Používaná paliva se lišila především oktanovým číslem, tedy odolností proti detonačnímu hoření. Na počátku války Britové používali paliva s oktanovým číslem 87. V roce 1940 se přešlo na paliva s oktanovým číslem 100/130 a ke konci války 110/150. Německo využívalo paliv s oktanovými čísly 87 a 93. Nebezpečí vzniku detonačního hoření se zabraňovalo i snížením teploty směsi. Jednalo se o to, že do směsi paliva a vzduchu byla vstříkována látka, která měla velké výparné teplo. Odpařování této látky mělo za následek ochlazení celé směsi. Používal se buď N₂O nebo směs vody a methanolu. V Německu byl tento systém označován jako MW30/50 (Methanol-Wasser, číselná hodnota udává poměr vody a methanolu) a Spojenci jej označovali jako WEP (Water Injection).

Symbolem německého letectví z druhé světové války se stal bezpochyby stíhací Messerschmitt³¹ Bf 109. Byl to jednomotorový stíhací dolnoplošník, celokovové skořepinové konstrukce. Většina verzí byla osazena motory řady Daimler-Benz 600. Nejrozšířenější variantou byl DB 605. Jednalo se o kapalinou chlazený invertní vidlicový dvanáctiválec s klikovým hřídelem umístěným nad válci. Kompresor byl radiální s proměnnými otáčkami a poháněný přes barometricky řízenou spojku. Každý válec měl čtyři ventily, dva sací a dva sodíkem chlazené výfukové ventily. Hmotnost samotného motoru byla 730 kg, zdvihový objem válců 35,7 l. Výkon motoru byl 1475 k (bez použití MW50) u verze DB 605A(M) a krátkodobý výkon až 2000 k při použití MW50. S těmito motory létaly i stroje Messerschmitt Bf 110 a Messerschmitt Me 210.

S 28 000 vyrobenými kusy se stal nepoužívanějším hvězdicovým motorem v Německu výrobek bavorské firmy Bayerische Motoren Werke³² označovaný jako BMW 801. „Tento vzduchem chlazený čtrnáctiválcový dvouhvězdicový motor byl vyvíjen koncem třicátých let u BMW s určením pro pohon výkonných vojenských letadel. V roce 1940 použil konstruktér Kurt Tank tento motor k montáži do svého nového stíhacího letounu Focke-Wulf Fw 190³³. Vznikla tak neobyčejně účinná letecká zbraň, která se stala vážnou hrozbou Spojencům. Postupným vývojem motoru vznikla verze BMW 801 D-2, jež měla zdvihový objem 41,74 l a kompresní poměr 1:7,2 a dávala maximální výkon 1 730 k při 2 700 ot/min klikového hřídele, které byly na vrtulový hřídel redukovány v poměru 1:0,54.“³⁴ Motor byl přepřehován jednostupňovým radiálním mechanickým kompresorem. Každý válec měl dva ventily, jeden sací a jeden výfukový chlazený sodíkem. Dále využíval přímého vstříkování paliva do pístu válce. Samotná hmotnost činila 1 012 kg. Letoun byl vybaven sdruženou elektricko-hydraulickou ovládací jednotkou, která poloautomaticky upravovala režim motoru v závislosti na poloze plynové páky a výšce letu.

V SSSR³⁵ se především sázelo na řadové motory, ale z důvodu obrovské přetíženosti továren vyrábějící řadové motory jako Klimov M-105 z konstrukční kanceláře

³¹ Messerschmitt (1927- 1989) byla firma založená německým konstruktérem Willym Messerschmittem. Dnes součástí skupiny EADS.

³² BMW (1916 – dodnes) je firma založená Franzem Poppem v Mnichově. Do roku 1945 vyráběla i letecké motory, dnes se zabývá výrobou automobilů a motocyklů.

³³ Focke-Wulf (1923 – 1964) byla firma vyrábějící letouny, založená Henrichem Fockem a Kurtem Tankem v Brémách

³⁴ Cit. VHU. Letecký motor BMW 801 D-2 [online]. [cit. 26.2.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.vhu.cz/exhibit/letecky-motor-bmw-801-d-2/>

³⁵ SSSR – Svaz sovětských socialistických republik 1921 – 1991.

Vladimira Klimova³⁶, musel konstruktér Lavočkin³⁷ pro svůj La-5 hledat vhodný hvězdicový motor. Lavočkinova konstrukční kancelář si vybrala vzduchem chlazený dvouhvězdicový čtrnáctiválec Švecov AŠ-82 z konstrukční kanceláře Arkadije Švecova³⁸. Tento motor sice vycházel z amerického Wright R-1820 Cyclone, ale byl prakticky celý přepracován, snížila se jeho hmotnost a rozměry, aby mohl být použit v malých letadlech, a také byl schopen operovat v krutých zimních podmínkách. Motor měl přepracované karburátory a olejová čerpadla. Výkon se pohyboval okolo 1 500 k, zdvihový objem byl 41,2 l a hmotnost 860 kg. Verze AŠ-82F byla prakticky identická, jenom se zvětšila doba mezi prohlídkami, došlo ke zlepšení chlazení a mazání, což umožnilo neomezené použití vzletového výkonu. Verze značené FN měly přímé vstřikování paliva, zvýšený výkon na 1650 k a používaly dva dvourychlostní mechanické kompresory. Tyto motory používaly stíhací stroje La-5F/FN a La-7, a jejich příchod na frontu znamenal výrazné zlepšení bojové síly sovětského stíhacího letectva. Až do výšky 6000 m verze FN díky své pohonné jednotce výkonnostně převyšovaly nejen Jak-3 a Jak-9, ale i nepřátelské Bf-109G a především obávané Focke-Wulfy Fw-190. Tento motor se vyráběl i po válce. Po různých opravách poháněl i dopravní stroje Iljušin Il-14 (licenčně vyráběné v Československu jako Avia-14) a dokonce i vrtulníky Jakovlev Jak-24 a Mil Mi-4.

2.5. Poválečný vývoj leteckých pístových motorů v Československu

S pístovými motory po 2. světové válce létaly především cvičné a sportovní letouny. V Československu se výrobou pístových motorů zabývala firma Walter³⁹. Po válce vyráběla motor Walter Minor 4-III, který měl výkon 105 k. Tohoto motoru se v letech 1946 až 1960 vyrobilo 3 092 kusů. Firma Walter vyráběla i silnější šestiválcový motor 6-III s výkonem 160 k. Těch bylo vyrobeno 1 500 kusů. V roce 1956 se začal vyrábět motor M332Sc. Jednalo se o čtyřválec s ventilovým rozvodem OHC a vypínatelným kompresorem. Dosahoval výkonu 140 k. S tímto motorem létaly letouny L-40 Meta Sokol a Aero Ae-145. Šestiválcový vzduchem chlazený M337Sh s výkonem 210 k. Z motoru M337 byla vyvinuta řada verzí, například M137A pro akrobatický Z-526 nebo M137AZ pro letoun Z-42. Motor má výkon 132 k, zdvihový objem je 5,97 l.

2.6. Historie proudových motorů

Základního principu proudových motorů, akce a reakce, už využíval v dobách před naším letopočtem Herón z Alexandrie k roztočení rotoru pomocí páry. V roce 1791 obdržel Angličan John Barber patent na plynem poháněné turbínové kolo. Jedním ze zásadních momentů pro další vývoj turbínových motorů bylo udělení patentu Maximu Guillaumovi v roce 1922 na návrh prvního axiálního proudového motoru s několikastupňovým kompresorem, spalovací komorou a vícestupňovou turbínou. Velmi důležitým mezníkem se stal rok 1929, kdy v Anglii začal rozvíjet svou teorii proudového pohonu důstojník RAF Frank Whittle⁴⁰. Nechal si patentovat soustavu odstředivého kompresoru, prstencové

³⁶ Vladimír Klimov (23.7. 1892 – 9.9. 1962) byl ruský konstruktér leteckých motorů.

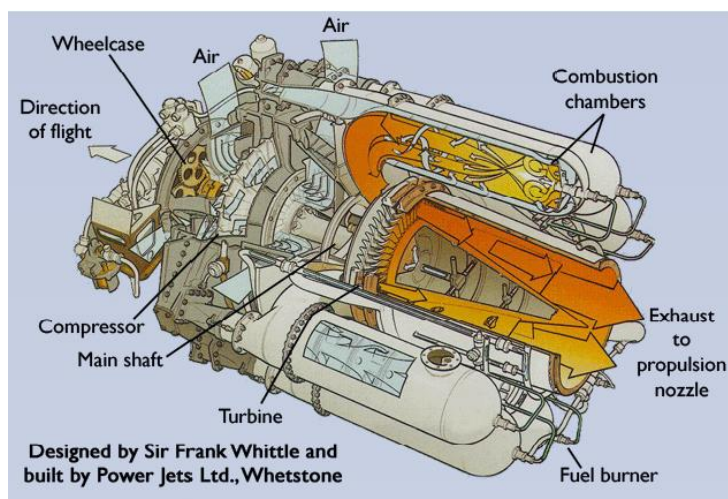
³⁷ Semyon Lavočkin (11.9. 1900 – 9.6. 1960) byl ruský letecký konstruktér.

³⁸ Arkadije Švecov (25.1. 1892 – 19.3. 1953) byl ruský konstruktér leteckých motorů.

³⁹ Walter Motors (1911 – dodnes) je firma založena Josefem Waltrem. Je známá především kvůli výrobě leteckých motorů. Dnes je součástí firmy GE.

⁴⁰ Frank Whittle (1.6. 1907 - 9.8. 1996) byl důstojník RAF, který rozvinul technologii proudového motoru.

spalovací komory a dvojité axiální turbíny. Návrh ale Ministerstvo letectví⁴¹ příliš nezaujal, především z obavy z malé účinnosti. Proto si Frank Whittle založil v roce 1936 firmu Power Jets za účelem vývoje a výroby proudových motorů. Společně s firmou British Thompson-Houston se jim podařilo vytvořit provozuschopný proudový motor W.1, který byl roku 1937 úspěšně vyzkoušen na pozemním testovacím zařízení. S blížící se válkou se začala nadřazená místa zajímat o tento nadějný vynález. Po několika vylepšeních byl motor osazen do letounu Gloster W.28/39, který byl zkonstruován právě pro tento účel. Dne 15. května 1941 vzletl z letiště v Cranwellu pilot Gerry Sawyer k prvnímu proudovému letu nad územím Velké Británie. Tato událost zaznamenala obrovský úspěch. Všechny podklady k W.1 byly předány několika tradičním britským výrobcům motorů. Firma Rolls-Royce původní návrh přepracovala a vznikl Rolls-Royce Welland. Motor používal radiální kompresor s deseti spalovacími komorami umístěnými po obvodu šestistupňové axiální turbíny. Používané palivo byl letecký petrolej. Motor měl na délku cca 1500 mm a průměr činil 1 092 mm. Hmotnost motoru byla 358,6kg a dosahoval tahu 7,12 kN. Welland používaly první operačně nasazené britské stíhací Gloster Meteor, v té době používané především k ničení německých střel V1 a V2⁴².



Obr. 4 Proudový motor W.2, předchůdce Rolls-Royce Welland⁴³

Ale Britové nebyli prvními na světě, kdo uskutečnil let s letadlem poháněným pouze proudovým motorem. Po spojení německého fyzika Hanse von Ohaina⁴⁴ a mechanika Maxe Hahna u letecké továrny Heinkel⁴⁵ vznikl tajně zkonstruovaný proudový motor Heinkel HeS3. Jednalo se o agregát s dvěma stupni kompresoru, jedním axiálním a jedním radiálním. Spalovací komora byla prstencová. HeS3 dosahoval maximálně 13000 ot./min a tah 4,9kN, při rozměrech 1630 mm na délku a průměru 930mm. Dne 27. srpna 1939 v 6 hodin ráno rostockého času vznesl Heinkel He 178V1 osazený proudovým motorem HeS3 pilotovaný továrním pilotem Erichem Warsitzem k prvnímu proudovému letu na světě vůbec. První proudový let trval 15 minut. Ale ani konkurenční společnost Junkers Motorenwerke nestála s vývojem pozadu a již roku 1941 spatřil světlo světa motor Jumo 004B. Tento agregát měl používat dvoumotorový stíhací Messerschmitt Me 262, jedna z Hitlerových zázračných zbraní, která měla obrátit vývoj války ve prospěch Německa. Jumo 004B trpěl nedostatečnou

⁴¹ Air Ministry 1918 – 1964, oddělení Britské vlády s pověřením řídit činnost RAF

⁴² V1 a V2 byly německé raketové létající střely použité za 2. světové války především k ostřelování Londýna

⁴³ Obr. 4 Dostupný z: <http://www.midlandairmuseum.co.uk/jet.php>

⁴⁴ Hans von Ohain (14.12. 1911 – 13.3. 1998) byl německý konstruktér prvního proudového motoru.

⁴⁵ Heinkel (1922 – 1965) byla německá firma zabývající se výrobou leteckých motorů a letadel založena Ernem Heinkelem.

spolehlivostí a krátkou životností, motor se musel vyměnit a projít generální opravou po pouhých 25 hodinách chodu. Základní konstrukce Jumo 004B se skládala z kompresoru, spalovacího úseku, turbíny, regulační jehly a chladicího systému. Kompresor byl osmistupňový, axiální s konstantním průměrem. Spalovací část byla tvořena šesti válcovými spalovacími komorami ze žáruvzdorné oceli, potažené vrstvou antikoroziho hliníku. Do každé komory ústilo palivové potrubí s tryskou uvnitř a každá měla svou zapalovací svíčku. Aby bylo zajištěno správné promíchání paliva se vzduchem, byl v každé spalovací komoře vytvořen vzduchový vír, do kterého bylo vstřikováno palivo. Regulační jehla svým pohybem vpřed a vzad nastavovala optimální průřez trysky a tahu v závislosti na nadmořské výšce. Chlazení bylo zajištěno vedením studeného vzduchu mezi dvojitým opláštěním.⁴⁶ S vyrobenými 6000 kusy se Jumo 004B stal prvním velkosériově vyráběným proudovým motorem. Po skončení války se německé proudové pohonné jednotky dostaly do rukou Spojenců a byly odvezeny k detailnímu prozkoumání. Němečtí konstruktéři byli zajati, poslání do zemí vítězných mocností, kde dále pracovali na vývoji proudových motorů.

Dá se říci, že nastala éra proudových motorů. Souběžně s vývojem proudových motorů se začaly objevovat nové technologie ve zpracování materiálů a pracovalo se na zvýšení tepelné odolnosti materiálů. To umožnilo například aplikování přídavného spalování, které umožnilo letounu dosáhnout vyšší rychlosti, i nadzvukové. Místo radiálních kompresorů se začaly používat axiální nebo smíšené. V roce 1950 vstoupil do provozu první dvouproudový motor (turbofan), Rolls-Royce Conway. Turbofan je kombinací proudového motoru a axiálního dmyhadla, které slouží ke stlačení vzduchu, jehož část proudí do nízkotlakého kompresoru a část obtéká a chladí vysokotlakou část. Výhody turbofanů jsou především vyšší účinnost při stejném výkonu a nižší spotřeba paliva a nižší hlučnost. Roku 1952 vzlétl první proudový dopravní letoun, de Havilland Comet, poháněný čtyřmi motory Rolls-Royce Avon. Jednalo se o jednohřídelový, jednoproudový turbokompresorový motor s axiálním patnáctistupňovým kompresorem. Spalovací komora byla prstencová s osmi plamenci. Jako palivo sloužil letecký petrolej. Suchá hmotnost činila 1 311 kg a celkový tah 42 kN. Tento motor poháněl nejenom dopravní stroje jako Sud Aviation Caravelle, ale i stíhací letouny Hawker Huntera a Saab 35 Draken. Tupolev Tu-144, první nadzvukový dopravní letoun vzlétl 31. prosince 1968, představen byl v roce 1975. Pohon letounu zajišťovaly čtyři dvouproudé motory Kuznetsov NK-144. Motor měl dvoustupňové dmyhadlo, třístupňový nízkotlaký a šestistupňový vysokotlaký kompresor. Spalovací komora byla prstencová. Motor byl vybaven přídavným spalováním a dosahoval s ním tahu 168 kN. Pro obrovskou spotřebu paliva a neekonomičnost létaly sériové letouny s motory Kolesov RD-36-51 bez přídavného spalování. Avšak Tu-144 byl zastíněn úspěšným britsko-francouzským nadzvukovým dopravním letounem Aérospatiale-BAC Concorde. I jeho pohonné jednotky vznikly spoluprací firem Rolls-Royce a Snecma. Výsledkem byl motor Olympus 593 s axiálním kompresorem se sedmi stupni nízkotlakými a sedmi vysokotlakými. Spalovací komora byla prstencového tvaru, vyrobená ze slitiny niklu. Turbíny byly dvě, jedna jednostupňová vysokotlaká a jedna jednostupňová nízkotlaká. Hodinová spotřeba paliva v cestovním režimu činila 25 629 l leteckého petroleje Jet A1. Concorde poháněly čtyři motory Olympus 593, každý o tahu 169,2 kN a s nimi 7. února 1996 provedl nejrychlejší let na trati mezi městy Londýn – New York v čase 3 hodiny a 20 minut. V roce 2003 byl americkým leteckým úřadem ukončen certifikační proces vysokoobtokového dvouproudového agregátu GE90 vyvíjeného speciálně pro Boeing 777. Jedná se o nejvýkonnější proudové jednotky na světě, schopné vyvinout tah až 570 kN. Jenom dmyhadlo motoru má průměr 3 250 mm.

⁴⁶ Srov. KUSSIOR, Zdeněk. www.leteckemotory.cz [online]. [cit. 10.3.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.leteckemotory.cz/motory/jumo004>

2.7. Historie turbovrtulových motorů

Krátce po skončení 2. světové války nastal poměrně velký rozmach letecké civilní dopravy. Pro přepravu se používaly z přebytků armád především typy DC-3, DC-4 a nově vyráběné DC-6, Lockheed Constellation a Il-14. Všechny tyto letouny létaly s pístovými hvězdicovými motory. Po rozmachu proudových pohonných jednotek v civilní dopravě bylo jasné, že pístové jednotky nebudou výkonově stačit proudovým. Proudové motory nevyhovovaly pro lety na krátkých a středních tratích. Proto konstruktéři začali používat konstrukci s turbínou, která přes hřídel pohání vrtuli.

Turbovrtulovým pohonem se začal zabývat maďarský inženýr György Jendrassik⁴⁷, který si v roce 1929 patentoval vynález turbovrtulového motoru. Mezi lety 1937 až 1941 testoval v Budapešti svůj první turbovrtulový motor Jendrassik Cs-1. Jednalo se o axiální konstrukci s patnáctistupňovým kompresorem, sedmistupňovou turbínou a prstencovou spalovací komorou. Předpokládaný výkon na brzdě byl 1 000 k, ale především díky problémům se spalováním dosahoval výkonu pouze 400 k. V roce 1941 byl program Jendrassik Cs-1 ukončen. Prvním letadlem poháněným turbovrtulovým pohonem byl v roce 1945 upravený Gloster Meteor, létající s Rolls-Royce RB.50 Trent. Přímým vývojem z RB.50 vznikl Rolls-Royce RB.53 Dart, který poháněl první turbovrtulově poháněné letadlo Vickers Viscount. O kvalitě konstrukce svědčí i to, že s menšími úpravami se vyráběl až do 80. let a poháněl řadu známých typů jako Fokker F.27, Hawker Siddeley HS 748 nebo japonský NAMC YS-11. Kam až mohou zajít možnosti turbovrtulových motorů ukázala v padesátých letech konstrukční kancelář Kuzněcov⁴⁸ s jejich motorem NK-12. NK-12 poháněl dvě osmilisté protiběžné vrtule. Motor má čtrnáctistupňový axiální kompresor, vytvářející kompresní poměr mezi 9:1 až 13:1. Protiběžné vrtule a kompresor byly poháněny pětistupňovou axiální turbínou. Výkon na hřídeli dosáhl úctyhodných 11 033 kW. Dosud se jedná o jeden z nejvýkonnějších turbovrtulových motorů. Letouny používající tyto pohonné jednotky jsou dodnes držiteli různých rekordů, například 9. dubna 1960 dosáhl Tupolev Tu-114 rychlosti 877,21 km/h na uzavřeném 5000 km okruhu s nákladem 25 000 kg. Motory Kuzněcov NK-12 spolehlivě slouží i dnes, například pohání nákladní letoun Antonov An-22 nebo dálkový strategický bombardér Tupolev Tu-95. Turbivrtulové motory se staly, tak jako proudové, nedílnou součástí letecké dopravy po celém světě a denně přepraví tisíce cestujících a tuny nákladu.



Obr. 5 Motor NK-12 na letounu Tu-95⁴⁹

⁴⁷ György Jendrassik (13.5. 1898 – 8.2. 1954) byl maďarský fyzik a konstruktér.

⁴⁸ Nikolaj Kuznětsov (23.6. 1911 – 30.7. 1995) byl ruský inženýr pracující na konstrukci leteckých motorů.

⁴⁹ Obr. 5 Dostupný z: <http://www.airliners.net/photo/Russia---Air/Tupolev-Tu-95KD-22/0732777/L/&sid=03a6f32e0c23bdb4100cc84ae59c3abe> Foto:JayDeeKay

3. Současné trendy ve vývoji leteckých pohonných jednotek

Se stále rostoucím objemem letecké dopravy roste spotřeba pohonných hmot a tím dochází k nárůstu množství vyprodukovaných emisí. S rostoucími cenami paliv je žádoucí, aby letecké motory byly co nejvíce efektivní a aby jejich provoz měl co nejmenší dopad na životní prostředí. Možnost, jak splnit tyto požadavky, je zaměřit se například na zlepšení celkové účinnosti motorů. S tím souvisí především zvýšení teploty před turbínou a také zvýšení kompresního poměru. Zvyšování teploty plynů na vstupu do plynové turbíny je možné díky zdokonalování vnitřního vzduchového chlazení usměrňovacích a pracovních lopatek plynové turbíny. V nízkotlakém kompresoru nových motorů je snaha dosáhnout vyšších obvodových rychlostí. Hodnota těchto rychlostí je limitována pevností a nízkým Machovým číslem lopatek v kompresoru. Proto se lopatky vyrábějí z pevnějších materiálů a také bylo zjištěno, že kritické Machovo číslo může zvýšit tvar lopatky, používají se lopatky ve tvaru šavle.

Novým trendem ve vývoji leteckých proudových motorů je použití konstrukce turbofanu s reduktorem. Důvodem použití této konstrukce je, že nízkotlaký kompresor a dmyhadlo se nacházejí na společné hřídeli, kde dmyhadlo má nižší otáčky, než se kterými pracuje nízkotlaký kompresor, je nutné zvýšit počet stupňů nízkotlakého kompresoru. A proto se mezi dmyhadlo a kompresor vloží reduktor, planetová převodovka. Ta umožňuje oddělení otáček a nízkotlaký kompresor může pracovat s mnohem vyššími otáčkami než dmyhadlo. Dalšími výhodami je zvýšení obtokového poměru až na hodnotu 12:1, snížení produkovaného hluku o 24 dB a 15% nižší spotřeba paliva.

V rámci nastoleného trendu zvyšování účinnosti motorů pomocí zvýšení obtokového poměru zkoumají výrobci způsob jak dosáhnout většího obtokového poměru. Zvýšení obtokového poměru může být dosaženo použitím motoru, který má konstrukci tzv. otevřeného rotoru. To znamená, že se jedná o motor, kde je ventilátor umístěn vně motoru. Tyto motory mohou mít obtokový poměr větší než 15:1. Nevýhodami této koncepce je složité umístění na letadlo, značná hlučnost a vibrace, které jsou přenášeny do kabiny a výrazně snižují pohodlí na palubě. Momentálně jsou rozpracovány projekty, které se zabývají použitím koncepce motoru s otevřeným rotorem (SAFRAN⁵⁰).

Trendem uplatňovaným ve vývoji nových pohonných jednotek je používání nových materiálů. Kromě tradičních materiálů, jako jsou slitiny niklu nebo titanu, se začínají na některé části motorů používat nové materiály, např. monolitické intermetalické materiály, keramické matrice nebo polymerické kompozity. Značný vývoj je zaznamenán i ve výrobních procesech. Metoda nazvaná aditivní výroba⁵¹, kterou používá firma GE. Díky této metodě GE může vyrábět součástky, které je složité nebo nemožné vyrobit klasickým způsobem obrábění. Aditivní výroba snižuje počet použitých dílů v sestavě a umožňuje celé sestavy nahradit jednotlivými částmi, což vede ke snížení hmotnosti. Snížení počtu výrobních kroků vede i ke snížení nákladů na výrobu a také snížení finální ceny.

Důležitou součástí motorů je mazací soustava. Na mazací soustavy současných leteckých motorů jsou kladeny vysoké nároky především z důvodu vyšších rychlostí, zatížení

⁵⁰ SAFRAN (2005 – dodnes) je francouzské konsorcium sdružující výrobce letecké techniky a obranných systémů.

⁵¹ Aditivní výroba označuje proces, při němž vzniká výrobek postupným nanášením materiálu v tenkých vrstvách na sebe.

a vyšších teplot v motoru, stejně jako integraci výkonných převodovek a startovacích generátorů. Současné mazací soustavy jsou založeny na konstrukci a technologiích používaných před třiceti lety. Z těchto důvodů byl založen program ELUBSYS⁵². Cílem programu ELUBSYS je výzkum, vývoj a zkoušení nového konstrukčního přístupu k návrhu vysoce výkonných mazacích systémů letadla se záměrem snížit spotřebu paliva a oleje. Hlavními cíli jsou:

- Snížit specifickou spotřebu pohonných hmot a emise CO₂ výrazným snížením (až o 60%) požadavku na odběr vzduchu od motoru k natlakování ložiskových komor prostřednictvím zavedení nových dokonalejších těsnění a zkvalitněním tepelného vedení krytů.
- Snížit množství úniku oleje až o 60%, zavedením vysoce výkonných kartáčových ucpávek a zdokonalením přívodního čerpadla.
- Optimalizovat konstrukci mazacích systémů tím, že se zredukuje jejich složitost a také hmotnost.
- Vyvinout systém pro lepší monitorování kvality oleje se zaměřením na zanášení mazacího systému. Díky tomu je možné, aby olej plnil svoji funkci i při vyšších teplotách a po delší dobu.

Programu ELUBSYS se účastní přední evropští výrobci leteckých motorů, jako jsou MTU Germany⁵³, Rolls-Royce, SAFRAN a přední evropské univerzity, jako například University of Sheffield a University of Nottingham z Velké Británie, Université de Bordeaux z Francie nebo německá Universität Karlsruhe.

Požadavky kladené na letecké motory, jako jsou provozní spolehlivost, dlouhá životnost motoru a jeho komponentů nebo delší doba mezi generálními opravami, pomáhají splnit systémy monitorování stavu motoru. Systém monitorování stavu motoru⁵⁴ kontinuálně a na dálku monitoruje různé parametry motoru a pomáhá zjišťovat anomálie, aby včas upozornil na případnou poruchu. Prostřednictvím prevence systém nepřímo snižuje provozní náklady. Dále tento systém napomáhá provozovatelům plánovat údržbu motorů. Technici pomocí ECM sbírají a analyzují data motoru, které jim umožňují monitorovat výstupní teplotou plynů motoru a detekují abnormální chování motoru. Dále systém umožňuje sledovat provoz motoru, vydávat doporučení k opravám, doporučení provést prohlídku motoru a další řadu opatření. Všechny parametry jsou pro provozovatele přístupné v reálném čase. Přenos informací spočívá v tom, že všechny parametry jsou převedeny na matematický model a ty jsou přes družicový systém přenášeny buď do pozemních středisek provozovatele, nebo výrobce a tam jsou rozkódovány a analyzovány, vždy v reálném čase. ECM může pomoci ke zvýšení účinnosti motoru, neboť umožňuje provozovateli určit optimální načasování k proplachu jádra motoru. Optimalizované načasování proplachu motoru může zvýšit rozpětí teploty výstupních plynů až o 12%, s čímž souvisí snížení specifické spotřeby paliva o 1%. Dalšími výhodami jsou snížení neplánovaných prostojů letadel, nižší náklady údržby, včasné identifikování provozních problémů, vyšší spolehlivost motorů a také tzv. delší doba motoru na křídle.

Dalším trendem je snižování hladiny hluku, které produkují letecké motory. U pístových motorů značnou část produkovaného hluku vytváří vrtule. Zde je hladina hluku snižována buď vhodným tvarem konce vrtulového listu, nebo zmenšením průměru vrtulových

⁵² ELUBSYS - Engine LUBrication system technologies

⁵³ MTU Germany (1934 – dodnes) je německý výrobce leteckých motorů.

⁵⁴ V angličtině označován jako ECM – Engine Condition Monitoring

listů. Hluk výstupního proudu vzduchu je u proudového motoru způsoben turbulentním promícháváním výstupních plynů s atmosférou a je ovlivněn stříhem způsobeným relativní rychlostí mezi výstupním proudem a okolním prostředím. Jednoduchá tryska zajišťuje nízkou míru promíchání, a tudíž způsobuje vysokou hladinu hluku. Z těchto důvodů se začínají používat na výstupních tryskách a odtokových hranách krytů motorů speciální vykrojení nazvané Chevron (Obr. 5), které urychlují rychlost promíchání a snížení rychlosti proudění a tím je dosaženo značného snížení hluku. Lopatky uvnitř motoru vytváří tzv. tonální hluk o určité frekvenci. Tento hluk je snížen pomocí systému aktivní kontroly hluku, který snižuje hluk motorů generováním signálu o stejné frekvenci, ale s opačnou fází, což má za následek snížení celkové hladiny hluku. Tento systém se nazývá Active Noise Control.



Obr. 6 Vykrojení krytu motoru pro snížení hluku⁵⁵

S rostoucími cenami ropy a jejími klesajícími světovými zásobami je snaha používat jako palivo vodík. Ke konci 80. let 20. století v bývalém SSSR testovali letoun, který byl poháněn motory spalujícími vodík. Konkrétně se jednalo o speciálně upravený Tupolev Tu-154, který poté nesl označení Tu-155. Po částečném útlumu se poslední roky vědci a konstruktéři zabírají použitím vodíku jako náhražky ropy. Výhodou je, že adaptace motorů pro používání vodíku není příliš složitá. Úpravy motoru spočívají ve změně počtu vstříkovacích trysek a zkrácení délky spalovacích komor, aby bylo dosaženo vyšší rychlosti hoření vodíku. Dále je potřeba dosáhnout dokonalého směšování vodíku a vzduchu. Značným problémem je skladování vodíku v kapalné formě uvnitř letadla, protože je nutné, aby byl skladován při vysokém tlaku. To umožňují speciální nádrže, které nelze umístit na obvyklá místa, kde se skladuje palivo, jako například v křídle. V letounu Tu-155 byla nádrž válcového tvaru umístěna v prostoru pro cestující, což je značně nevýhodné, protože zabírá místo pro platící cestující. Dále musí být palivový systém doplněn o tepelné výměníky a další zařízení, čímž roste celková hmotnost letounu a klesá jeho přepravní kapacita a také dolet. I když se do vodíku vkládají velké naděje a je také označován jako palivo budoucnosti, čeká konstruktéry a vědce ještě pravděpodobně dlouhá cesta k uvedení vodíkových paliv do běžného provozu.

⁵⁵ Obr. 6 Dostupný z: <http://grabcad.com/requests/boeing-787-chevron-nozzle>

Požadavky kladené na současné letecké motory

- Nízká spotřeba pohonných hmot
- Efektivnost
- Nízké emise CO₂ a NO_x
- Provozní spolehlivost
- Dlouhá životnost motoru a jeho komponentů
- Nízká hladina produkovaného hluku
- Časově nenáročná údržba
- Technologicky nenáročná údržba
- Malá hmotnost
- Malé rozměry
- Snadná obsluha
- Velký časový rozsah mezi TBO

4. Pohonné jednotky pro letouny všeobecného letectví

4.1. Pohonné jednotky s pístovými motory

Po nástupu proudových a turbovrtulových pohonných jednotek se klasické pístové motory užívají v segmentu všeobecného letectví a ULL.⁵⁶ Největší důraz při vývoji pístových pohonných jednotek je kladen především na hospodárnost provozu a také na ochranu životního prostředí. Snaha výrobců tyto podmínky splnit spočívá především ve zvyšování středního efektivního tlaku pracovního oběhu, zvyšováním celkové účinnosti motoru, snižováním energetických ztrát v motoru (např. třecí ztráty). Za všech okolností je nutné, aby byl stále dodržován vysoký standard bezpečnosti a spolehlivosti motorů. Z tohoto důvodu se musí výrobci řídit požadavky leteckých úřadů. Konkrétně v Evropské unii musí pohonné jednotky splňovat požadavky certifikace dle předpisu EASA⁵⁷ CS-E/3 z 23. prosince 2010.

4.1.1. Systém elektronického řízení motoru

Tento systém se od 60. let 20. století úspěšně používá pro řízení proudových i turbovrtulových pohonných jednotek. A trend používání systému elektronického řízení motorů začíná pronikat i do segmentu všeobecného letectví, tedy kategorie poháněné především pístovými motory.

Systém elektronického řízení motoru je systém, který slouží především k ulehčení práce pilota a zvýšení efektivnosti práce motoru. Jedná se o autonomní řízení chodu motoru počítačem. Nejpoužívanějším systémem je systém FADEC (Full Authority Digital Electronic Control). Skládá se z CPU (Central Processing Unit), EEC (Engine Electronic Controller) nebo ECU (Engine Control Unit). FADEC dostává všechny informace týkající chodu motoru za letu, jako třeba hustotu vzduchu, nastavení páky přípusti, teploty jednotlivých částí motoru, teplotu oleje, tlak oleje a další parametry. Obdržené informace jsou zpracovány v EEC asi sedmdesátkrát za sekundu. Dále jsou zpracované informace využity k optimálnímu nastavení chodu motoru a mohou být pilotovy zobrazeny na displeji v pilotní kabině, zařízení EICAS.

⁵⁶ ULL - Ultralight je ultra lehké letadlo, v Evropě s maximální vzletovou hmotností 450 kg.

⁵⁷ EASA – European Aviation Safety Agency

Systém si sám ideálně nastaví bohatost směsi a nastaví úhel vrtule pro daný režim letu. Vzhledem k tomu, že FADEC udržuje ideální nastavení směsi pro každý jednotlivý válec, zabráňuje selhání motoru z důvodu špatného nastavení bohatosti směsi. FADEC neposkytuje jenom zefektivnění práce motoru nebo snížení paliva, ale i nepřímo prodlužuje jeho životnost. Klíčové parametry, které ovlivňují stav motoru, jsou monitorovány po celou dobu letu. Získané údaje slouží k analýze případných poruch nebo pro odstranění příčin, které k poruše vedly. Dále také informuje o možné poruše, která může nastat. Systém na základě získaných informací umožňuje plánovat údržbové práce na motoru. Každá pohonná jednotka má svůj specifický systém FADEC, který lze použít jen pro daný typ motoru. Lídrem v použití systému elektronického řízení motoru v pístových motorech je firma Teledyne Continental Motors⁵⁸, která tento elektronický systém začala používat v motorech IO-240. Podobné systémy elektronického řízení motorů používá řada výrobců leteckých motorů. Například EEC (Electronic Engine Control) od firmy GE anebo ECS (Electronic Controlled System) od firmy Austro Engines⁵⁹.



Obr. 7 Informace ze systému FADEC zobrazené pilotovi⁶⁰

4.1.2. Vrtulové pohonné jednotky se vznětovými motory

V posledních patnácti letech nastal velký rozmach vznětových motorů v automobilovém průmyslu díky největším kladům, jako jsou nízká spotřeba pohonných hmot při vysokém výkonu. To neuniklo ani konstruktérům leteckých pohonných jednotek a opět začali pracovat na vývoji vznětových motorů pro letadla. Dále také kvůli poptávce po motorech využívajících jiných paliv, především z důvodu nedostupnosti leteckého petroleje v některých částech světa a na některých letištích.

První, leteckými civilními úřady certifikovaný vznětový motor, byl výrobek firmy Thielert, motor Thielert Centurion 1.7, postavený na základech automobilového motoru Mercedes OM668 (pro vozy Mercedes třídy A). Jedná se o čtyřválcový, kapalinou chlazený přeplňovaný vznětový motor. Zdvihový objem je 1689 cm³ a dosahuje výkonu 101 kW.

⁵⁸ Teledyne Continental Motors (1929 – dodnes) je americký výrobce leteckých motorů.

⁵⁹ Austro Engines (2007 – dodnes) je rakouský výrobce leteckých motorů založena firmou Diamond Aircraft Industries.

⁶⁰ Obr. 7 Dostupné z: <http://www.avweb.com/news/motorhead/189994-1.html?redirected=1>

Je vybaven přímým vstřikováním Common Rail⁶¹. Thielert Centurion 1.7 je certifikován pro letadla Cessna 172 a Piper Cherokee, normálně létající se zážehovými motory Lycoming O-320. Udávanou nevýhodou vznětových motorů je jejich poměrně vyšší specifická hmotnost, ale Thielert Centurion 1.7 má téměř stejnou hmotnost jako O-320, při podobném výkonu (O-320 má výkon vyšší asi o 12 kW). I z těchto důvodů používá Centurion 1.7 rakouský Diamond Aircraft Industries, jak i pro jednomotorový Diamond DA40 TDI, tak i pro dvoumotorový DA42 TwinStar. Udávaná spotřeba paliva letounu DA42 při 85% výkonu je 25,5 l na oba motory.

I přes úspěch Centurionu 1.7 společnost Thielert v roce 2008 upadla do insolvence. Z těchto důvodů Diamond přešel na vlastní výrobu diesellových motorů a za tímto účelem založil v roce 2007 firmu Austro Engines. Nově vyvinutý motor AE300 je kapalinou chlazený, čtyřválcový motor se zdvihovým objemem 1991 cm³ a dvěma vačkovými hřídeli (rozvod OHC). Každý válec má čtyři ventily, které jsou ovládány pomocí vaček. Přímé vstřikování paliva je řešeno technologií Common rail. Motor je řízen systémem ECS (Electronic Controlled System) s ovládáním jedinou pákou. Úhel nastavení náběhu vrtule je ovládán regulátorem, který je řízen z ECS. V ekonomickém režimu (73% - 90 kW) je spotřeba paliva 21 l/h. Maximální výkon se pohybuje okolo 123,5 kW.



Obr. 8 Motor AE300 na letounu DA42⁶²

Dalším výrobcem zabývajícím se vznětovými motory pro letadla je francouzská firma SMA Engines (Societe de Motorisations Aeronautiques). Zatím jejich jediný motor SR 305 (certifikace šestiválcového SR430 je plánována na rok 2015) je olejem chlazený čtyřtaktní, čtyřválcový, přeplňovaný motor s přímým vstřikováním paliva. Při poruše nebo úplném vyřazení elektronické řídicí jednotky, lze nastavit bohatost směsi manuálně. SR305 je prozatím certifikován pro letoun Cessna 182. Dnes už Cessna nabízí tento SMA305 v oficiální nabídce agregátů pro letoun Cessna 182. Je možné i přestavět letoun pro použití motoru SMA305. Cena přestavby s motorem se pohybuje okolo 75 000 dolarů. Náklady za přestavbu se mohou vrátit na ušetřeném palivu, protože C182 s originálním motorem má spotřebu 51 l leteckého benzínu, oproti 38 l na hodinu letu s motorem SMA305. Chystaný

⁶¹ Common Rail je systém přímého vysokotlakého vstřikování paliva do válce u vznětových motorů. Vyvinut Švýcarem Robertem Huberem.

⁶² Obr. 8 Dostupné z: <http://www.pprune.org/professional-pilot-training-includes-ground-studies.html>

SR430 je odlišný nejenom počtem válců, ale i výfukovým potrubím vedeným nad blokem motoru a dvěma turbodmychadlům umístěných za motorem, což značně zplošťuje celou konstrukci a tudíž snižuje aerodynamický odpor celé kapotáže.

Power Developments je společnost vyvíjející vznětové motory pro malá sportovní letadla. Jejich motor Gemini 100 je dvouhřídelový tříválec s dvěma písty na válec. Právě s výkonem 75 kW a hmotností pouhých 70,5 kg je ideální pro použití např. v kategorii letadel ULL nebo LSA⁶³ a právě těchto kategoriích jim bude největším konkurentem rakouský Rotax. A proto si vybrala společnost Power Developments jako partnera pro vývoj svých pohonných jednotek společnost Tecnam⁶⁴. Tato pohonná jednotka se zkouší i na vzducholodích. Jiným vznětovým motorem z Velké Británie je Wilksch Airmotive WAM-120. Jedná se o tříválcový, dvoudobý agregát. Je vybaven turbodmychadlem a dosahuje maximálního výkonu 89 kW. Chlazení je kapalinové. Výrobce označuje WAM-120 jako hybridní. Hybridní v tom smyslu, že nasávání vzduchu přes prepouštěcí kanálek je časováno pohybem pístu, ale výfukový proces je načasován pomocí vačkové hřídele. To dává motoru mechanickou jednoduchost a výkon čtyřdobých motorů. Turbodmychadlo poskytuje motoru plný výkon až do výšky 5 500 m. WAM-120 má velmi malou spotřebou, letoun Rutan LongEz osazen touto pohonnou jednotkou dosáhl při letu ekonomickou rychlostí 230 km/h ve výšce 600 m spotřeby leteckého petroleje 12 l na hodinu.

Vznětové motory se v letectví začínají poměrně prosazovat a ukrajují si část z trhu pístových pohonných jednotek pro malá a střední letadla, a to především díky nízké spotřebě paliva. Do budoucna se zvažuje použití levnější bionafty, tudíž lze předpokládat snížení nákladů a růst zájmu o vznětové letecké motory. Značnou nevýhodou vznětových agregátů je jejich nižší životnost a nákladná údržba.

4.1.3. Motory s rotačním pístem

Výhod Wankelových rotačních motorů, jako je malá hmotnost, vyšší výkon a menší rozměry si byla vědoma skupina pilotů a provozovatelů letadel, kteří v roce 2001 ve švýcarské Ženevě založili podnik Mistral Engines. Jejich hlavním zaměřením se stala výroba leteckých rotačních motorů využívajících principu Wankelova návrhu. Zatím jediným vyráběným motorem je G-300. G-300 má tři rotační písty a je nepřepřlňovaný. Maximální dosažitelný výkon je 224 kW. Palivový systém obsahuje dvě palivová čerpadla a přímé vstříkovaní. Používané palivo je letecký benzín s minimálním oktánovým číslem 92. Chlazení je kapalinové. Nyní probíhá vývoj verze, která by byla schopná pracovat i s leteckým petrolejem JET-A1. Čistá hmotnost obsahující reduktor vrtule, startér a alternátor je 177 kg. G-300 je vybavena systémem FADEC, který se skládá ze dvou ECU (Engine Control Unit), které se vzájemně doplňují a nahrazují. Momentálně probíhá proces certifikace přeplňované, 265 kW silné verze G-360-TS. Malá čelní plocha motoru je výhodná pro použití v letadlech s tandemovým uspořádáním sedaček. TBO činí 3 000 hodin. Klady G-300 jsou především malá hmotnost a rozměry vůči podávanému výkonu. Ve srovnání s motorem Lycoming IO-540 má Mistral G-300 o 22 kg nižší hmotnost, ale zároveň o 30 kW vyšší výkon. Další výhodou je malá hlučnost při nominálním výkonu. Největší slabinou je spotřeba pohonných hmot. U Lycomingu IO-540 je hodinová spotřeba 40 l a G-300 při stejném režimu to je 60 l na hodinu letu. Samozřejmě je snaha konstruktérů tento problém odstranit, a to především zlepšením spalovacího cyklu a zdokonalením těsnění vrcholů rotačních pístů.

⁶³ LSA – Light Sport Aircraft je kategorie sportovních letadel s maximální vzletovou hmotností 600 kg.

⁶⁴ Tecnam (1986 – dodnes) je italská firma z Casorie zabývající se výrobou sportovních letadel.

Než se ale vše podaří, budou to mít motory firmy Mistral, i přes své nesporné kvality, velmi těžké se uplatnit na trhu.



Obr. 9 *Motor Mistral G300*⁶⁵

4.2. Turbovrtulové motory

Tradiční výrobce Rolls-Royce od roku 2008 vyvíjí turbovrtulový motor pro segment všeobecného letectví. RR500 vychází z turbohřídelového RR300 pohánějící vrtulník Robinson R66. Snahou Rolls-Royce při vývoji RR500 je podřídit se trendu více palivových motorů. To znamená, aby motor byl schopný pracovat s leteckým petrolejem nebo leteckým benzínem. RR500 má být vhodný pro celou řadu jednomotorových nebo dvoumotorových letadel, vyžadující velký výkon při vysokých teplotách vzduchu a dobrou výškovost. Kromě palivové flexibility může RR500 nabídnout delší dobu mezi intervaly údržby než pístové motory, tudíž i menší náklady. Maximální vzletový výkon na hřídeli dosahuje 370 kW, maximální stálý je 280 kW. Díky své nízké hmotnosti 113 kg je vhodný pro letadla typu Mooney M20.

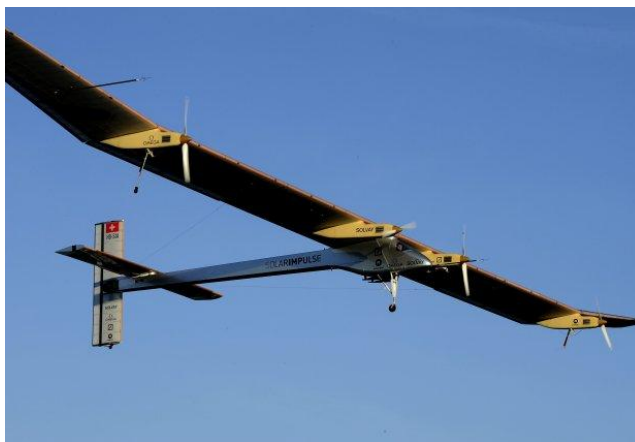
4.3. Vrtulové pohonné jednotky poháněné elektromotory

S rostoucí cenou pohonných hmot je trend hledat jiné zdroje pohonu, které nepoužívají paliva z ropy. Mezi ně patří motory na elektrickou energii. Různé druhy elektrických motorů využívajících vlastností magnetického pole jsou známy od první poloviny 19. století. Myšlenka využívat elektrickou energii pro napájení pohonu, který roztáčí vrtuli, jež vyvozuje potřebný tah, je poměrně stará. Ale v dřívějších dobách neproveditelná především z důvodu absence ideálních zdrojů elektrické energie umístěných na palubu letadla. Poslední dobou udělal vývoj elektrických baterií velký pokrok a byly vyvinuty baterie s akceptovatelným poměrem hmotnost ku kapacitě. I když vývoj elektropohonů v letectví značně pokročil, stále jsou probíhající projekty pouze na úrovni technologických demonstrátorů anebo je lze použít v běžné praxi pouze v omezené míře (elektromotory sloužící pro vzlety kluzáků).

⁶⁵ Obr. 9 Dostupný z: <http://www.shearwateraircraft.com/Technical/The+Engine.html>

4.3.1. Solar Impulse

Projekt založený v roce 2003 Bertrendem Piccardem a André Borschbergem s cílem vyrobit letadlo, které bude schopno obletět svět bez toho, aby vytvořilo škodlivé emise, tudíž bez použití ropných produktů. Zatím byl vyroben jediný stroj s registrací HB-SIA. Jedná se o hornoplošník s obdélníkovým křídlem o rozpětí 63,4 m (srovnatelné s Airbusem A340), klasickými ocasními plochami. Trup je obdélníkového tvaru s vepředu umístěnou kabinou pro jednoho pilota. Letoun je poháněn čtyřmi elektrickými motory podvěšenými pod křídly. Jedná se o střídavé bezkartáčové motory. Skládají se ze satorového jádra z vrstvené oceli, rotorového vinutí připevněného na společné hřídeli. Přes převodovku pohání dvoulisté vrtule o průměru 3,5 metru pracujících s otáčkami 200 – 400 ot/min. Motor je napájen ze 70 lithium-polymerových baterií dodávajících energii 21 kWh. Baterie jsou umístěny v motorové gondole a celková hmotnost baterií činí 450 kg.



Obr. 10 *Solar Impulse*⁶⁶

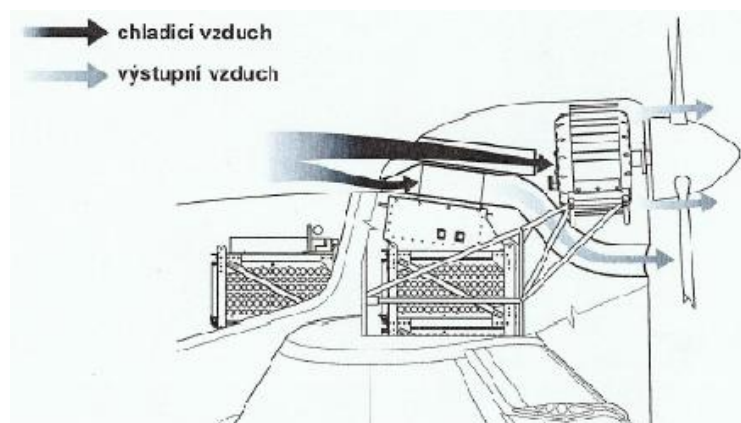
Každý z motorů dosahuje výkonu 10 kW. Baterie jsou za letu dobíjeny energií získanou ze solárních panelů umístěných po celé ploše křídla a vodorovných ocasních ploch. Solární panely sestávají z celkem 11 700 fotovoltaických buněk z monokrystalického silikonu. Každá motorová gondola je důmyslně teplotně izolována, aby udržela teplo vyzařované z baterií a tím je udržela funkční i při okolní teplotě dosahující až -40°C, odpovídající výšce zhruba 8500 metrů. Letoun s těmito motory může dosáhnout rychlosti až 90km/h. Díky menší energetické náročnosti a dobíjení baterií pomocí solárních panelů dosahuje výdrž až 30 hodin. Na rok 2015 připravují Bertrand Piccard a André Borschberg let okolo světa, který bude velkou zkouškou pro tento projekt.

4.3.2. VUT 051 Ray

Letoun VUT 051 RAY vychází z letounu VUT 001 Marabu. Jedná se o dvousedadlový středoplošník s tandemovým uspořádáním sedadel. Podvozek letounu je tříkolový pevný s předovým kolem. Ocasní plochy letounu jsou uspořádány do tvaru T. Maximální vzletová hmotnost je 650 kg. Letoun je poháněn synchronním elektromotorem s permanentními magnety, který je chlazen náporovým vzduchem. V motoru jsou instalovány snímače teploty vinutí a polohy hřídele, která je přímo spojena s motorem. Vzletový výkon

⁶⁶ Obr. 10 Dostupný z: <http://www.setyoufreenews.wordpress.com/2011/04/28/solar-plane-prepped-for-first-international-flight/>

činí 53 kW a jmenovitý 40 kW. Jako zdroj energie slouží Li-ion články s parametry 3,6 V / 3 Ah. Baterie se skládá z těchto 3060 Li-ion článků, uspořádaných sériovo-paralelně. Pohon se skládá ze třech částí: akumulátorového zdroje, elektrického pohonu a palubních systémů. Celková zásoba energie je 34,15 kWh. Nominální napětí je 324 V, maximální 378 V. Jmenovitá kapacita baterie činí 102 Ah. Vypočítaná hodnota výdrže je 1 hodina, a dobíjení akumulátoru trvá zhruba 3 hodiny. Článek používá spirálovou strukturu se čtyřmi vrstvami. Kladná elektroda je aktivována kyselinou kobaltovou a záporná elektroda je aktivována speciálním uhlíkem. Bateriová komora je vybavena propouštěcím ventilem, který slouží k upouštění nahromaděných plynů, aby nedošlo k explozi. Další bezpečnostní systém akumulátorů je HRL (heat-resistant layer, teplotně odolná vrstva). Tato vrstva je umístěna mezi katodu a anodu akumulátoru. HRL vytváří teplotně závislý odpor (pozistor). Když je akumulátor vybit vysokým proudem, akumulátor zastaví dodávání proudu do obvodu a díky tomu začne teplota akumulátoru klesat pozvolně. Toto se děje, dosáhne-li teplota vrstvy 80°C. Elektromotor pohání třílistou tlačnou vrtuli s průměrem 1700 mm.



Obr. 11 Systém chlazení elektromotoru⁶⁷

4.3.3. Elektra One

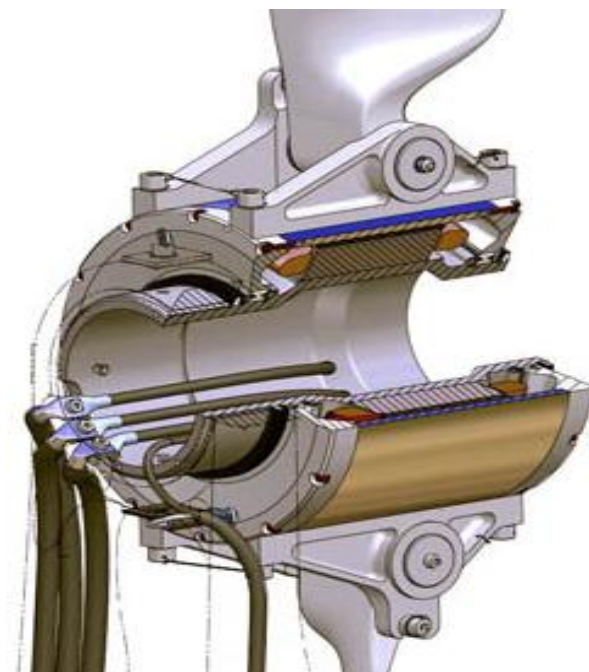
Je jednosedadlové letadlo kategorie ULL německé firmy PC-Aero, poháněné elektromotorem HPD 13.5 firmy Geiger Engineering. HPD 13.5 je velmi lehký, pomalu se otáčející pohon s velkým výkonem při maximální účinnosti. Je určen pro relativně nízké rychlosti otáčení přímo poháněné vrtule o průměrech 1,3 nebo 1,5 metru, mající největší možnou účinnost, ale zároveň nízkou hladinu hluku (hladina hluku se pohybuje okolo 50 dB). Jedná se o bezkartáčový stejnosměrný elektromotor. Motor má výkon 10 kW při vstupním napětí 52 V a proudu 190 A. Při těchto parametrech dosahuje jmenovitých otáček 2100 ot/min a točivém momentu 42 Nm. Mezní hodnoty proudu se pohybují mezi 220 – 230 A, v závislosti na maximální teplotě statoru, která je 100°C. Elektra One s elektromotorem dokáže letět cestovní rychlostí až 160 km/h. Elektřinu získává elektromotor ze sady Li-ionových akumulátorů o celkové hmotnosti 100 kg. Výrobce udává, že celková výdrž jsou 3 hodiny a dolet 400 km. Unikátní je způsob dobíjení. Energie se získává buď přímo ze sítě, nebo lze k letounu zakoupit speciální transportní přívěs se solárními panely, které vyrábějí elektřinu pro dobíjení baterií. Za stejným účelem dodává výrobce i solární hangár. Již je připravena verze Elektra One Solar, což je prakticky totožné letadlo jako

⁶⁷ Obr. 11 Zdroj: Letecký ústav FSI VUT

Elektra One, jenom má zvětšené rozpětí na 11 m. To umožňuje na horní straně křídla vytvořit plochu 6 m² pro solární panely, které během letu poskytují část energie pro napájení elektrické pohonné soustavy. Výrobce deklaruje, že výdrž má být 8 hodin a dolet až neuvěřitelných 1000 km. Cena letové hodiny Elektry One je cca 35 eur a prodejní cena je 100 000 eur. Výrobce PC-Aero již registruje první objednávky na své letouny a výrobky společnosti PC-Aero se jako první letouny s elektrickým pohonem prosazují na komerčním trhu.

4.3.4. Antares 23E

Velkým trendem poslední doby je používat na kluzácích vysouvateľný motor, který slouží buď pro samostatný vzlet, nebo jako pomoc v nouzi při nenalezení stoupavých proudů. Tímto směrem se vydali konstruktéři elegantního kluzáku Antares 23E, kteří pro pohon zvolili speciálně vyrobený elektromotor EM42, jeden z prvních elektromotorů certifikovaných v EASA. EM42 je střídavý, bezkartáčový s nezvyklým uspořádáním statoru a rotoru, protože rotor je umístěn na vnější straně konstrukce. Jmenovité napětí je 190 – 288 V a jmenovitý proud 160 A. Dosahuje maximálního výkonu 42 kW při točivém momentu 216 Nm. Celková účinnost je 90%. Na rotor je připevněn unašeč se dvěma vrtulovými listy.



Obr. 12 Řez elektrickým pohonem kluzáku Antares 23E⁶⁸

Akumulátorový systém je tvořen z lithium-iontových článků. Životnost baterií je zatím 3000 cyklů (úplné nabití a úplné vybití akumulátoru). Počáteční stoupavost s EM42 je 4 m/s. Zatím se udává TBO 900 hodin, ale nevyskytnou-li se problémy při provozu, je pravděpodobné, že se TBO prodlouží.

⁶⁸ Obr. 9 Dostupný z http://www.lange-aviation.com/htm/deutsch/produkte/antares_23e/antrieb.html

5. Pohonné jednotky pro dopravní letouny

5.1. Turbovrtulové pohonné jednotky

Tento druh pohonné jednotky se využívá převážně v letadlech pro regionální linky nebo ve vojenských a pátracích letounech. Hlavními výhodami jsou nejen nízká spotřeba paliva a nízké provozní náklady, ale i schopnost letounů operovat z krátkých drah, typických pro regionální letiště.

5.1.1. GE Aviation Czech H80

Tato pohonná jednotka je vůbec první čistě česká konstrukce po převzetí slavné Waltrovky gigantem GE. Motor již získal typové osvědčení od evropské agentury EASA a amerického leteckého úřadu FAA⁶⁹. Hlavní uplatnění tohoto motoru je v menších obchodních a dopravních nebo v zemědělských letadlech. Konstrukčně vychází z osvědčeného M601, vyvinutého ještě v původní Waltrovce. Nové technologie poskytují větší výkon na hřídeli, snižují spotřebu paliva a zvyšují schopnost operovat při vysokých teplotách nebo z vysokohorských letišť. Předpokládá se, že motory H80 budou pracovat i v těžkých polních podmínkách, proto jedinečná konfigurace motoru zjednodušuje údržbu tím, že eliminuje častou údržbu palivových trysek a nevyžaduje pravidelnou kontrolu horkých sekcí motoru. Konstrukce motoru je dvouhřídelová s reverzním proudem vzduchu a spalín. Kompresor se skládá ze dvou osových stupňů typu blisk a jednoho radiálního stupně, vysokotlaká i volná turbína jsou jednostupňové. Jedná se o technicky pokročilý motor, při jehož konstrukci bylo počítáno s 3D aerodynamikou a byly použity moderní materiály s vysokou tepelnou odolností. Tyto a další moderní technologie nejen zvyšují výkon a snižují spotřebu (o 7% nižší oproti jednotce M601), ale také prodlužují životnost a usnadňují údržbu. Doba mezi opravami je stanovena na 3600 letových hodin a 6600 cyklů.⁷⁰ Výkon na hřídeli je 597 kW. Značnou výhodou je, že maximální vzletový výkon je stejný jako maximální trvalý výkon. To znamená, že například po vysazení jedné pohonné jednotky může letoun dále bezpečně stoupat bez omezení. Standardní hardwarové vybavení obsahuje omezovač otáček vrtule, sensor rychlosti otáčení vrtule, sensor rychlosti plynů, palivovou řídicí jednotku, automatický startér motoru nebo řídicí jednotku zapalování. Největší používání H80 se předpokládá například v zemědělském letounu Thrush 510, v ruském dopravním a cvičném Technoavii Rysačok (první prototypy létají se staršími agregáty M601) anebo v českém velmi úspěšném L-410 Turbolet. Skvělé provázání českého letadla a českých motorů dokazuje certifikování letounu L-410 Turbolet (OK-LEK) s pohonnými jednotkami GE H80 na jednom z nejhůře položených letišť, nepálské Lukle.

5.1.2. PBSVB TP100

TP100 je dvouhřídelový turbovrtulový motor vyvíjený ve spolupráci První brněnské strojírnou Velká Bíteš a Vysokého učení technického v Brně. TP100 vychází konstrukčně z proudového TJ100, který v konstrukci TP100 zastává funkci generátoru plynů. Motor je modulové

⁶⁹ FAA- Federal Aviation Administration je federální letecký úřad USA

⁷⁰ Srov. KUSSIOR, Zdeněk. www.leteckemotory.cz [online]. [cit. 1.4.2014]. Dostupný na WWW: <http://www.leteckemotory.cz/motory/h80/>

koncepce s generátorem plynu, turbínou a převodovým ústrojím. To znamená, že jednostupňový radiální kompresor pohání volnou jednostupňovou axiální turbínu a ta přes reduktor roztáčí třílistou vrtuli AV723 konstantních otáček. Převodovka má dva převodové stupně s děleným přenosem energie, první a druhý stupeň jsou spojeny torzní hřídelí. Konstrukce převodovky nabízí možnost instalace vysokorychlostního elektrického generátoru s výstupním elektrickým výkonem 3,3 kVA. Spalovací komora je prstencového typu. Motor dosahuje výkonu na hřídeli 180 kW. Motor je schopný provozu až do výšky 9000 m MSL. Konstrukční provedení dovoluje instalaci motoru v tažném i tlačném uspořádání. Hlavními výhodami TP100 jsou malé rozměry, relativně malá hmotnost (samotná hmotnost je 55 kg) a velký výkon. Z těchto důvodů je TP100 ideální pro použití v malých letadlech kategorie ULL a VLA⁷¹, nebo v nepilotovaných prostředcích UAV (Unmanned Aerial Vehicle). Motor TP100 je momentálně ve fázi letových zkoušek na létající laboratoři, v tomto případě na letounu VUT 061 Turbo (OK-DLT). Je připravována i turbohřídelová verze TS100 pro pohon menších vrtulníků.



Obr. 13 Letoun VUT 061 Turbo s motorem TP100⁷²

5.1.3. Europrop International TP400

Tato pohonná jednotka je primárně určena pro pohon vojenského těžkého nákladního a dopravního Airbusu A400. Vzhledem k tomu, že se předpokládá použití letounu pouze pro armádní potřeby, se konstruktéři hlavně zaměřili na schopnost motoru obstát v náročných bojových podmínkách. Na vývoji se podílí přední evropské konstrukční kanceláře leteckých pohonných jednotek (Snecma 32%, Rolls-Royce 25%, MTU Germany 22%, ITP 21%). Jedná se o tříhřídelový turbovrtulový motor, který dosahuje výkonu na hřídeli 8 203 kW. Po motorech Kuznětsov NK-12 a Progress D-27 je TP400 třetí nejvýkonnější turbovrtulový motor na světě. TP400 má dvoustupňový generátor plynů s koaxiální hřídelí spojující nízkotlakou turbínu s osmílistou kompozitovou vrtulí o průměru 5,3 m přes vyrovnávací reduktor. Dále obsahuje pětistupňový axiální kompresor, šestistupňový axiální vysokotlaký kompresor a prstencovou spalovací komoru, jednostupňovou axiální vysokotlakou turbínu,

⁷¹ VLA – Very Light Aircraft je kategorie sportovních letadel s maximální vzletovou hmotností 750 kg.

⁷² Obr. 12 Dostupné z: <http://www.pbsvb.com/turboprop-engine-tp-100-and-turboshaft-engine-ts-100>

jednostupňovou axiální střední turbínu a třístupňovou axiální nízkotlakou turbínu. Tři hřídelová konstrukce byla použita k navýšení celkového tlakového poměru. Profil lopatek třístupňové nízkotlaké turbíny byl navržen pomocí pokročilých 3D modelací pro snížení koncových vůlí z důvodu zvýšení průtoku vzduchu. Lopatky jsou spojeny do páru k zajištění vyšší tuhosti. Prstencovou spalovací komoru má na starost podnik Safran. Technologie a materiály jsou převzaty z motoru M88, který pohání stíhací Dassault Rafale. Jednostupňová vysokotlaká turbína také pochází z M88. Z důvodu vyrovnání gyroskopických momentů vytvořených otáčením jednotlivých vrtulí se TP400 vyrábějí jak pro pravotočivé, tak i levotočivé otáčení vrtule. Vnitřní motory (2 a 3) mají smysl otáčení k trupu letadla a vnější motory (1 a 4) se otáčejí od trupu. TP400 je vybaven systémem FADEC pro kontrolu a monitorování chodu agregátu. Přesto, že se plánuje využívání těchto pohonných jednotek v čistě vojenských letadlech, tak TP400 splňují všechny emisní i hlukové normy v Evropské unii. Specifická spotřeba paliva je také nízká, výrobce deklaruje spotřebu 0,238 kg/kW a hodinu letu. Samotná hmotnost jednoho motoru činí 1900 kg. I přes počáteční problémy s vývojem a značné opoždění vůči původnímu plánu proběhly zkoušky a certifikace motoru hladce a TP400 se na letounech Airbus A400 dostává do operační služby leteckých útvarů zemí jako Francie, Německo, Velká Británie, Španělsko a Turecko.



Obr. 14 Airbus A400 s motory TP400 ⁷³

5.1.4. Pratt & Whitney PW127

Tento motor pochází z konstrukční linie osvědčeného turbovrtulového PW100, který vznikl v roce 1984. PW127 je konstruktéry neustále vylepšován i přesto, že má na trhu téměř výsadní postavení. PW127 je ideálním motorem pro moderní 30 až 90 místné turbovrtulové letouny operující po celém světě, především kvůli jeho vysoké spolehlivosti, životnosti a dobré provozní ekonomii. Dále nabízí nejnižší specifickou spotřebu pohonných hmot a má nejnižší emise oxidu uhličitého. Konstruktoři se v dalších verzích PW127 snaží tyto hodnoty

⁷³ Obr. 10 Dostupný z: [www. http://eaglesgate.com/TP400.htm](http://eaglesgate.com/TP400.htm)

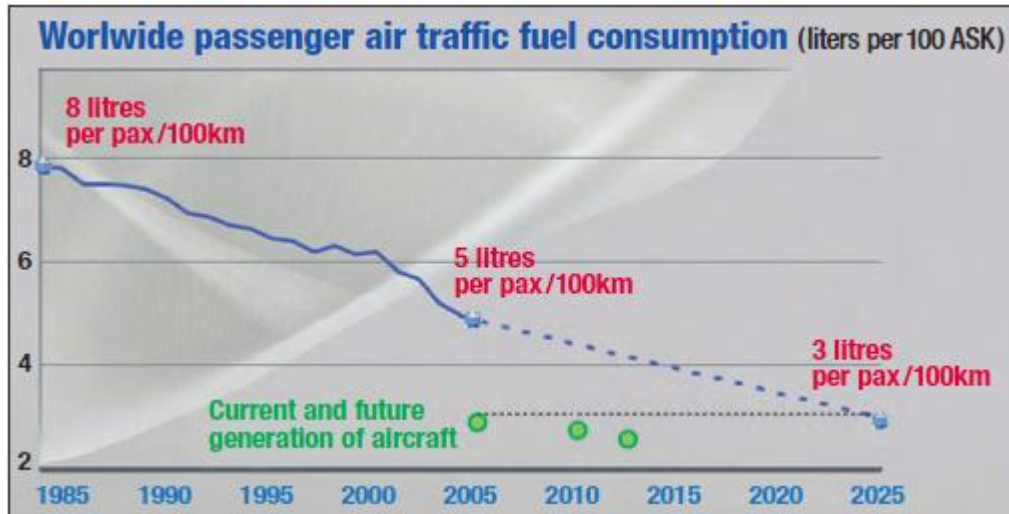
dále snižovat například zvýšením účinnosti turbíny snížením ztrát až o 15%. Díky dostupnosti nových výpočetních a konstrukčních programů je možné navrhnout ideální tvary lopatek turbíny. Ke snížení celkové hmotnosti agregátu dopomáhá snížení hmotnosti turbíny použitím nových lehkých materiálů, jako je titan nebo hliník. Použití těchto materiálů může vést ke snížení hmotnosti turbíny až o 10%. Výrobce udává, že letadla poháněná jejich pohonnými jednotkami dosahují o 25% až 40% nižší spotřebu paliva a vytvářejí až o 50% nižší emise oxidu uhličitého, než proudová letadla podobné velikosti. PW127 je tříhřídelový, dvouproudý motor. Má dvoustupňový radiální nízkotlaký a vysokotlaký kompresor. Nízkotlaká a vysokotlaká turbína jsou obě jednostupňové. Třetí hřídel přenáší výkon turbíny na vrtuli přes redukční převodovku, s optimalizovaným převodovým poměrem pro vytvoření nejlepší kombinace účinnosti motoru a vrtule. K motorům je dodáván elektronický systém pro kontrolu a řízení chodu motoru, který průběžně zaznamenává parametry chodu motoru. Tyto informace poté slouží k rychlejší a efektivnější údržbě agregátu. PW127 se vyrábí v řadě verzí, lišících se především maximálním výkonem na hřídeli (nejnovější verze PW127M dosahuje výkonu 2000 kW. Dalšími výhodami jsou startování motoru přímo pomocí palubního zdroje, použití moderních materiálů a zlepšení chlazení pro dlouhou životnost motoru, robustní konstrukci motoru pro zachování dlouhé životnosti, snadné ovládání pro snížení zatížení posádky nebo přizpůsobené otáčky pro snížení hluku vrtulí. Turbovrtulové motory Pratt & Whitney PW127 se nejvíce uplatnily v regionálním dopravním letadle ATR 42/72, čínském XIAN M-60 nebo ve vojenském transportním letadle CASA C-295.

5.1.5. CPX 38

Tato pohonná jednotka od amerického výrobce General Electric je připravována pro chystaný projekt turbovrtulového 70 – 90 místního regionálního letadla, nazvaného Next Generation Regional Turboprop. CPX 38 bude konstrukčně vycházet z turbohřídelového motoru GE 38, pohánějící těžký dvoumotorový vrtulník Sikorsky CH-53K. Totožný bude pětistupňový axiální kompresor. K udržení nastoleného trendu snižování spotřeby pohonných hmot a škodlivých emisí je nutné zvýšit efektivitu celého kompresoru, a to především dosažením práce s vyššími tlaky a také zvýšením rychlosti proudění uvnitř motoru. Tyto úpravy budou mít za následek i zvýšení pracovní teploty, proto se konstruktéři zabývají novými, z teplotního hlediska odolnějšími materiály a technologiemi pro jejich zpracování. Vysokotlaká turbína má být dvoustupňová a nízkotlaká turbína třístupňová. Motor je navržen tak, aby byl odolný vůči poškození motoru vnějšími vlivy, jako je například vnik ptactva a ledových krup nebo aby byl schopen krátkodobého fungování bez mazání. Výkon na hřídeli by se měl pohybovat mezi 2900 – 4400 kW. CPX 38 má dosahovat specifické spotřeby paliva až o 15% nižší, než současné motory v tomto segmentu. Protože se předpokládá stále zpřísnování protihlukových norem, má být CPX 38 až o 15 dB tiší, než požadují současné normy. K tomu mají dopomoci speciálně tvarované vrtulové listy, kterých má mít vrtule osm až deset. Výrobce předpokládá, že certifikační zkoušky budou ukončeny v roce 2018.

5.2. Proudové pohonné jednotky

Proudové pohonné jednotky pohánějí velké množství letounů všech typů. Používají se především díky jejich vlastnostem, jako jsou především velký tah, díky němu jsou letouny schopny dosáhnout vysokých rychlostí a také dávají možnost létat ve velkých výškách. I když princip proudových motorů zůstává stejný, současné proudové motory se značně liší od prvních proudových motorů především použitými materiály, konstrukčním upořádáním nebo podávanými výkony. Dále je při jejich konstruování kladen důraz, aby byly ekonomické, šetrné k životnímu prostředí a byly co nejtíšší.



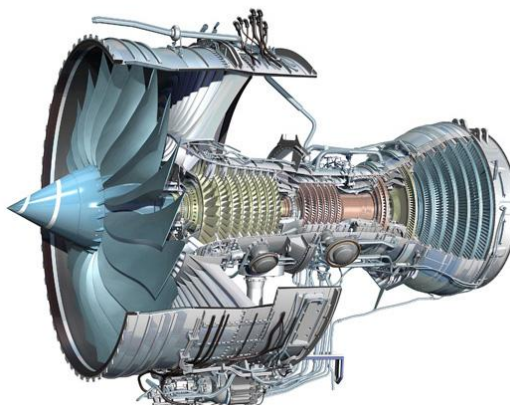
Obr. 11 Graf naznačující vývoj snížení spotřeby paliva na osobu a vzdálenost⁷⁴

5.2.1. GENx

Tento motor vychází z osvědčeného dvouproudového GE90 a používá některé stejné technologie, například kompozitové lopatky dmyhadla. Tyto motory používají nové letouny Boeing 787 a Boeing 747-8i. Novější verze těchto letounů by již neměly používat systém odebírání stlačeného vzduchu z motorů pro pneumatické systémy, klimatizaci nebo startování motorů. Ve spolupráci s firmou Boeing bylo rozhodnuto nahradit tyto systémy systémem elektrickým a především z důvodu snížení celkové hmotnosti nebo také snížení nákladů na údržbu, ale i nižší spotřebu paliva. Další výhodou je, že není z motorů odebírána energie a tím se zvýší účinnost motoru. GENx je axiální, vysoko obtokový turbodmychadlový motor. Jednostupňové dmyhadlo a čtyřstupňový nízkotlaký kompresor se otáčí proti směru hodinových ručiček (pohled zezadu dopředu). Desetistupňový vysokotlaký kompresor je poháněn dvoustupňovou vysokotlakou turbínou a otáčí se po směru hodinových ručiček (pohled zezadu dopředu). Nízkotlaká turbína je sedmistupňová. Rozdílné smysly otáčení jsou z důvodu snížení zátěže vodících lopatek. Velmi nízké spotřebě paliva dopomáhá inovativní dvouprstencová spalovací komora TAPS. Tato konstrukce umožňuje vyšší efektivnost spalování a za nižších teplot spalování. Spalovací komora používá tzv. koncept před směšování paliva se stlačeným vzduchem. Vstupní proud stlačeného vzduchu je promíchán s palivem speciálními vírníky a vytvoří se ideální směs palivo/vzduch. Protože vznik škodlivých emisí NOx závisí na teplotě spalování, díky poměrně nízké teplotě hoření se emise

⁷⁴ Obr. 11 Dostupné z: <http://www.cleansky.eu/lists/documents>

NOx vytvářejí ve značně menší míře. Výrobce udává až o 56% nižší emise než jsou udávané limity. Nižší teplota spalování má také za důsledek vyšší životnost navazujících prvků. Porovnáním poměru vytvořeného hluku ku tahu patří GENx mezi nejtišší motory. Především díky větším a účinnějším lopatkám dmyhadla, které pracují na nižší obvodové rychlosti a vytvářejí o 30% nižší hladinu zvuku. GENx má 15% nižší spotřebu paliva a také o 15% nižší emise oxidu uhličitého. Jedná se o první komerční proudový motor s dmyhadlem kompletně vyrobeným z kompozitu (pouze náběžné hrany lopatek jsou ocelové), které jsou trvalejší a mají nízké nároky na údržbu. Dalšími konstrukčními znaky jsou například účinnější chlazení vnitřních částí motoru – zvyšuje životnost motoru, lopatky nízkotlaké turbíny vyrobeny z Aluminidu titanu a extrakce nečistot v nízkotlakém kompresoru, chránící vysokotlaký kompresor. Průměr dmyhadla u GENx-1B je 2,8 m (motory určené pro B787) a průměr dmyhadla u verze GENx-2B je 2,7 m (motory určené pro B747-8). Obtokový poměr dmyhadla je 9,6:1. Motor dodává maximální tah 284 kN. Ke konci roku 2013 se objevily problémy s vytvářením námrazy ve velkých výškách na motorech a motory díky tomu ztrácely tah, ale bezpečnost letů nebyla ohrožena. Výrobce pracuje na vyřešení tohoto problému. I přes tyto problémy je GENx jedním z nejpokrokovějších motorů.



Obr. 12 Motor GENx ⁷⁵

5.2.2. LEAP-X

Je nově vyvíjený motor výrobcem CFM International⁷⁶, který je zamýšlen jako nástupce rozšířených motorů řady CFM56, které pohánějí více než 60% všech letounů řady Airbus A320. Plánuje se použití v letounech Airbus A320neo, Boeing 737MAX a v čínském COMAC C919. V jeho konstrukci jsou v souladu se současnými trendy použity kompozitní materiály. Jedná se o tříhřídelový motor s vysokým obtokovým poměrem a jednostupňovým dmyhadlem osazeným osmnácti lopatkami. Nízkotlaký kompresor je třístupňový a vysokotlaký kompresor je desetistupňový. Dva stupně má vysokotlaká turbína a sedmistupňová je nízkotlaká turbína. Mezi použité technologie patří lopatky a prstenec dmyhadla z uhlíkových vláken. Uhlíková vlákna mají nižší hmotnost, vyšší životnost a odolnost proti vniku cizích předmětů. Náběžná hrana lopatek je pokryta vrstvou titanu. Výrobce klade velký důraz na ideální tvar lopatek kompresorů, protože díky tomu lze dosáhnout vyššího celkového kompresního poměru. Použití vypouklé konstrukce krytu kompresoru umožňuje snížení ztrát na koncích lopatek a zvyšuje účinnost kompresoru. Lopatky vysokotlakého kompresoru jsou na koncích speciálně zahnuté a to umožňuje, že úhel

⁷⁵ Obr. 11 Dostupný z: <http://www.flightglobal.com/features/787dreamliner/engines/>

⁷⁶ CFM International (1974 – dodnes) je americko-francouzská firma zabývající se výrobou leteckých motorů

nabíhajícího proudu vzduchu může být vyšší, což oddaluje vznik pumpáže⁷⁷ motoru. Nízkotlaká turbína je navržena 3D aerodynamickým designem a umožňuje lepší spotřebu paliva a lepší akustické vlastnosti. S nastoleným trendem se do budoucna plánuje používání kompozitů s keramickou maticí⁷⁸ ve větším množství. CFM je lídrem v začlenění kompozitu s keramickou maticí. Hlavní důvod pro použití tohoto materiálu je schopnost kompozitu s keramickou maticí odolávat teplotám o několik set stupňů vyšší než u stávajících niklových slitin a nabízejí příslib významného zvýšení účinnosti motoru. LEAP-X bude první komerční motor s CMC komponenty v turbíně. Plánuje se rozšíření CMC komponentů do celé horké části motoru. LEAP stejně jako GEnx používá prstencovou spalovací komoru a vylepšený systém TAPS II (Twin Annular Premixing Swirl). Díky lepšímu promíchání směsi má motor nižší specifickou spotřebu a emise. Oproti současnému motoru CFM56 má LEAP-X o 60% nižší emise NOx. Motor LEAP se má zatím vyrábět ve třech verzích:

- LEAP-1A – určený pro Airbus A320neo, tah 109 – 146 kN, obtokový poměr 11:1
- LEAP-1B – určený pro Boeing B737MAX, tah 100 – 120 kN, obtokový poměr 9:1 (dmychadlo má z důvodů světlé výšky B737 menší průměr)
- LEAP-1C – určený pro COMAC C919, tah 124,5 – 133,4 kN, obtokový poměr 11:1

Celkově mají tyto motory přinést v průměru až 16% nižší spotřebu paliva. První sériové motory řady LEAP se mají dostat do provozu ke konci roku 2016.

5.2.3. Rolls-Royce Trent XWB

Je dalším motorem následujícím trendy ve snižování spotřeby pohonných hmot, snižování produkovaných emisí nebo používání kompozitních materiálů v konstrukci. Jedná se o motor, který bude primárně používán na dopravním velkokapacitním Airbus A350 XWB. Jedná se o třířídlový motor, který pochází z řady motorů Trent. Turbínová část má nejen nízkotlakou a vysokotlakou turbínu, ale i střední dvoustupňovou turbínu s lopatkami vyrobenými ze slitiny niklu, poskytuje lepší efektivnost, větší tah a nižší spotřebu paliva. Teploty uvnitř spalovací komory dosahují bodu tání materiálů z ní vyrobené. Proto je zde dokonalejší chlazení a povrch spalovací komory je pokryt vrstvou speciální keramiky a teplota může dosahovat až k 2000°C. Například v kompresoru je použita technologie blisk, která nejen šetří hmotnost kompresoru až o 15%, ale i zlepšuje aerodynamickou účinnost kompresoru. Pomocí simulačních počítačových programů došlo k optimalizaci proudění vzduchu uvnitř motoru. Dmychadlo má průměr 3 m a je osazeno dvaceti dvěma kompozitními lopatkami, které jsou navrženy tak, aby vydržely střet s ptactvem. Speciálně tvarované konce lopatek dmychadla umožňují velmi tichý chod a chrání vnitřní ústrojí motoru. Trent XWB v kombinaci s Airbusem A350XWB má mít o 10% nižší spotřebu paliva než ostatní letadla tohoto segmentu a díky tomu mohou provozovatelé ušetřit značné finanční náklady. Trent XWB má jednostupňové dmychadlo, osmistupňový nízkotlaký a šestistupňový vysokotlaký kompresor. Turbínová část se skládá ze tří oddílů a to šestistupňové nízkotlaké turbíny, dvoustupňové střední turbíny a jednostupňové vzduchem chlazené vysokotlaké turbíny. Obtokový poměr je 9,3:1 a průtok vzduchu motorem dosahuje 1440 kg za sekundu. Produkovaný tah se pohybuje mezi 330 – 430 kN. Trent XWB úspěšně prošel všemi

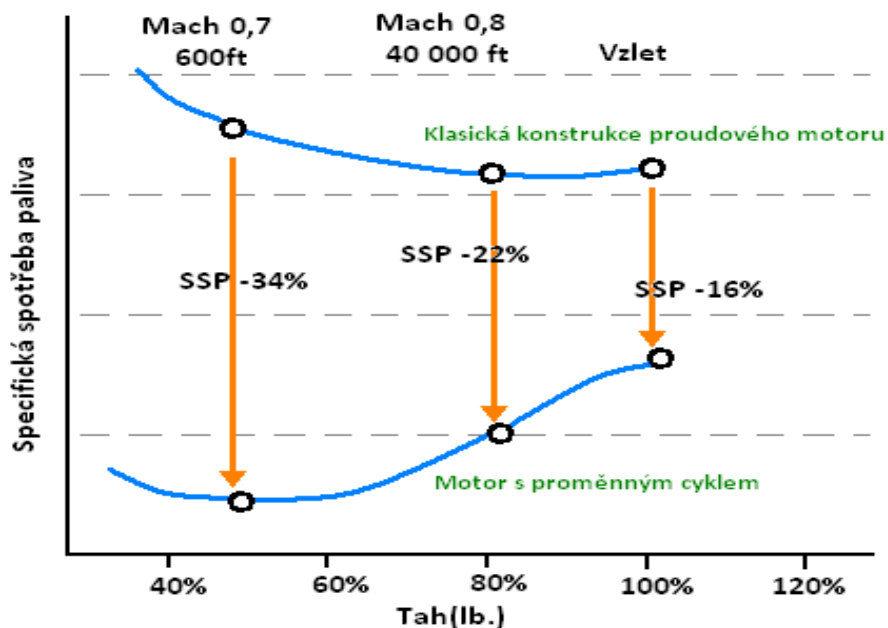
⁷⁷ Pumpáž je nestandardní režim práce kompresoru, způsobený odtržením proudu vzduchu od lopatek kompresoru. To má za následek vytvoření přetlaku před kompresorem a ne za ním. Plyny ze spalovací komory expandují do přední části motoru. Pumpáž je velmi nebezpečná a pokud není řešena rychle (stažení přípusti motoru), může dojít k destrukci motoru.

⁷⁸ CMC (Ceramic Matrix Composites)

certifikačními zkouškami, ale jestli tento motor splní na něj kladené požadavky, především ekonomický a ekologický provoz ukáže až čas.

5.2.4. ADVENT a AETD

Vývojový program ADaptive Versatile ENgine Technology byl založen z iniciativy USAF⁷⁹ v roce 2007. Hlavním zaměřením programu je vývoj efektivního leteckého proudového motoru s proměnným cyklem, určeného pro další generaci vojenských letadel ve výkonnostní kategorii 89 kN tahu. Hlavními spolupracujícími partnery jsou společnosti General Electric a Rolls-Royce. „Program má za úkol rozvíjet proměnný cyklus proudových motorů a pokračovat ve vývoji nových materiálů, zejména v oblasti kompozitu s keramickou maticí. Cílem programu je postavit nový typ proudového motoru s proměnným cyklem, který by našel využití převážně ve vojenském letectví. Výsledný motor by měl podle předpokladů dosahovat 25% úspory paliva, umožnit o 40% delší dolet, a dosáhnout 5 až 10% zvýšení tahu oproti klasickým motorům. Program sestává ze dvou fází. První fáze zahrnuje předběžný a podrobný návrh, analýzu a metody snížení rizika. Nové technologie budou hrát klíčovou roli v druhé fázi, kdy dojde k samotným testům částí motoru z kompozitního materiálu keramickou maticí. Následně bude zkoušeno jádro motoru, které zahrnuje kompresor, spalování a vysokotlakou turbínu. V oblasti stlačování vzduchu se očekává demonstrace vysokého kompresního poměru v jádře motoru a proměnného kompresního poměru u dmyhadla, spolu s novým typem chlazení turbíny. To umožní zvýšit hodnotu stlačení vzduchu a teplotu plynu před turbínou bez navýšení stupňů komprese, což se projeví ve zvýšení specifického tahu a účinnosti motoru.“⁸⁰



Obr. 13 Předpokládané snížení spotřeby paliva motoru s proměnným cyklem⁸¹

⁷⁹ USAF – United States Air Force – Letectvo Spojených států amerických

⁸⁰ Cit. HECZKO, Nikodem. Letecké proudové motory s proměnným cyklem. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.

⁸¹ Obr. 12 Zdroj: US. Air Force

Konstrukce motoru s proměnným cyklem je navržena tak, aby byl schopen efektivně pracovat za všech podmínek napříč letovou obálkou, včetně podzvukových a nadzvukových rychlostí. Podle návrhu General Electric je součástí konstrukce motoru s proměnným cyklem i tzv. třetí proud vzduchu, který je využit pro maximálně efektivní spalování paliva a poskytuje lepší vedení tepla, oproti konvekčním motorům. V programu ADVENT je proud vysokotlakého jádra a nízkotlakého obtokového dmyhadla spojen do třetího, vnějšího průtokového kanálu, který může být otevřen nebo uzavřen v závislosti na letových podmínkách. Pro vzlet je třetí proud uzavřen z důvodu snížení obtokového poměru a zvýšení množství průtoku vzduchu skrz vysokotlaké jádro, což má za následek zvýšení tahu. Při cestovním režimu je třetí průtokový kanál otevřen a zvýšený obtokový poměr snižuje spotřebu paliva. Uzavření nebo otevření třetího kanálu je součástí proměnného cyklu a díky tomu přemění motor z bojového režimu do režimu ekonomického. Jestliže je kanál otevřen zvyšuje se obtokový poměr a dochází ke snížení paliva. Tento režim prodlužuje dolet podzvukovou rychlostí až o 40% a také vede ke zvýšení vytrvalosti až o 60%. Od roku 2012 probíhají pozemní zkoušky, které jsou rozděleny do 16 cyklů s dobou trvání 60 hodin a jsou zaměřeny na testování kompresorové a turbínové části. Na začátku roku 2013 bylo ve Výzkumné laboratoři Letectva spojených států amerických dosaženo nejvyšší kompresorové a turbínové teploty, která kdy byla zaznamenána. Dosažení vysokých teplot umožňuje použití teplotně odolných kompozitů s keramickou maticí, které dle General Electric mají vydržet teploty až 1400°C. Na program ADVENT plynule navazuje program AETD (Adaptive Engine Technology Development), který má rozvíjet nové technologie a především dokončit zabudování do plánovaných letadel. Plnohodnotné zavedení motorů do operační služby je plánováno na rok 2020.

5.2.5. Propfan

Tato koncepce leteckého motoru je známa poměrně dlouho, ale až v posledních letech se začíná objevovat v nových projektech dopravních letadel. To naznačuje, že při případném úspěchu, by se tato koncepce mohla stát novým trendem v pohonech dopravních letadel. Propfan je typ leteckého motoru spojující koncepci dvouproudého a turbovrtulového motoru. Motor používá plynovou turbínu, která pohání nekrytou vrtuli. Vrtule je tvořena krátkými, silně zkroucenými lopatkami, podobně jako lopatky u turbodmychadlových motorů. Z těchto důvodů se někdy nazývají jako bezplášťová dmyhadla (UDF), motory s otevřeným rotorem nebo ultra-vysoko obtoková dmyhadla (UHBF). Efektivnost těchto motorů je do 500 km/h stejná jako u turbovrtulových motorů a po překonání této rychlosti efektivnost roste. Největší je při rychlostech 700 – 900 km/h. Od roku 2013 francouzská firma Snecma pracuje na vývoji a testování propfanového motoru, zatím značeného ORE (Open-Rotor Engine). Koncept založený na použití dvou řad protiběžných vysokorychlostních vrtulí, vyrobených z 3D tkaninových⁸² kompozitů. Uvnitř větrného tunelu ve francouzském Modane již pomocí modelu v měřítku 1:5 proběhly zkoušky při malých a vysokých rychlostech a nyní probíhá vyhodnocování získaných údajů. Jako značný problém se jeví velká hlučnost protiběžných vrtulí, nicméně studie zaměřené na snížení hluku při zachování velké účinnosti jsou v plném proudu. Výrobce udává, že by tato koncepce měla mít o 25% – 30% nižší spotřebu paliva, než současný proudový motor CFM56. Snecma udává, že by se motor mohl dostat do provozu v roce 2025.

⁸² 3D tkanina je trojrozměrná textilie definovaná jako výrobek s prostorovou orientací vláken nebo nití anebo s prostorovým rozpínáním konstrukčního dílu. Používají se především jako výztuže v kompozitech.

Koncepci s otevřeným rotorem plánuje použít i britská letecká společnost EasyJet, která založila program ekologického dopravního letadla budoucnosti EcoJet. Projekt má následovat současné trendy, snižování emisí oxidu uhličitého nebo oxidů dusíku a také snižování spotřeby paliva. Zatím není jasné, jaké motory budou použity, buď motory vyvíjené firmou Snecma nebo vlastní konstrukce. Jestli se tento projekt zrealizuje, předpokládá se uvedení do provozu ne dříve, než po roce 2020.



Obr. 14 *EcoJet*⁸³

⁸³ Obr. 13 Dostupné z: <http://innovation.uk.msn.com/design/new-planes-youll-be-travelling-on-soon>

6. Závěr

Snahou autora bylo čtenáři podat ucelený přehled současných trendů ve vývoji leteckých pohonných jednotek, které jsou aplikovány při vývoji a výrobě komerčně používaných pohonných jednotek. V úvodu práce je popsán historický vývoj leteckých motorů od období počátku 20. století až do současnosti. V následující kapitole se autor věnuje popisu aktuálním trendům aplikovaných při vývoji leteckých pohonných jednotek.

Závěrem práce jsou zmíněny i perspektivní konstrukční řešení leteckých motorů, u kterých je možné očekávat v budoucnu jejich praktické nasazení v komerčním provozu. Mezi takováto konstrukční řešení patří např. i řešení propfan. Toto konstrukční řešení může v případě úspěšného nasazení do leteckého provozu přinést zejména značné úspory paliva, snížení provozní nákladů a současně s tím i nižší produkované emise skleníkových plynů. Problémem u této konstrukce je vysoká hlučnost motorů. Jiným zajímavým řešením, které by v budoucnu mohlo najít za jistých okolností najít uplatnění v leteckém průmyslu je náhrada fosilních paliv vodíkem. Vyřeší-li se problémy se skladováním vodíku na palubě letadel, může být vodík velmi perspektivním palivem.

Vývoj nových leteckých pohonných jednotek je velmi finančně nákladný. Zavádění nových prvků do letecké praxe je proto velmi zdouhavé a náročné. Dokud nebude objeven a úspěšně odzkoušen zcela jiný technologicky typ pohonu, bude nezbytné požívat motory transformující chemickou energii vázanou v palivu na energii mechanickou.

Seznam použitých zdrojů

Literatura

BLACKAH, Paul a Malcolm LOWE. Messerschmitt Bf 190: Všechny verze od roku 1935. Praha: GRADA, 2011. ISBN 978-80-247-3522-1

HECZKO, Nikodem. Letecké proudové motory s proměnným cyklem. Brno, 2013. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.

KELLER, Ladislav a Jindřich KOCÁB. Letadlové motory. Praha: KANT cz, 2000. ISBN 80-922914-0-6.

Letectví a kosmonautika. Praha: Aeromedia, a.s., 2012, roč. 2012, č. 10. ISSN 0024-1156.

Letectví a kosmonautika. Praha: Aeromedia, a.s., 2013, roč. 2013, č. 3. ISSN 0024-1156.

NĚMEČEK, Václav. Vojenská letadla 3. Praha: Naše Vojsko, 1977, ISBN 28-063-77

TRAINING, Oxford Aviation. Aircraft knowledge 3 powerplant. Rev. ed Shoreham, U.K: Transair, 2001. ISBN 978-190-4935-032

ZEMAN, Petr. Návrh letounu VUT 051 RAY s uvážením hybridního pohonu. Brno, 2012. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Fakulta strojního inženýrství.

Internetové zdroje

Airbus [online]. [srov. 2014-05-16]. Dostupné z: www.airbus.com

Aircraft Engine Historical Society [online]. [srov. 2014-03-21]. Dostupné z: <http://www.enginehistory.org/>

Austro Engine [online]. [srov. 2014-04-03]. Dostupné z: <http://www.austroengine.at/>

Boeing Company [online]. [srov. 2014-05-16]. Dostupné z: www.boeing.com

CFM Aero Engines [online]. [srov. 2014-04-16]. Dostupné z: <http://www.cfmaeroengines.com>

Clean Sky [online]. [srov. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.cleansky.eu/>

Deagel Aviation [online]. [cit. 2014-04-26]. Dostupné z: <http://www.deagel.com>

European Commission [online]. [srov. 2014-04-11]. Dostupné z: http://ec.europa.eu/research/transport/projects/items/elubsys_en.htm

Europrop International [online]. [srov. 2014-04-06]. Dostupné z: http://www.europrop-int.com/pages/tp400/tp400_d6.htm

General Electric Aviation [online]. [srov. 2014-05-20]. Dostupné z: <http://www.geaviation.com/engines/commercial/genx>

Historie letectví [online]. [srov. 2014-03-17]. Dostupné z: <http://www.historieletectvi.xf.cz>

Honeywell Aerospace [online]. [srov. 2014-04-10]. Dostupné z: http://www.honeywell.com/sites/aero/Propulsion_Engines.htm

Intergovernmental Panel on Climate Changes. [online]. [srov. 2014-04-12]. Dostupné z: <http://www.ipcc.ch/ipccreports/sres/aviation/index.php?idp=98>

Lange Aviation [online]. [srov. 2014-05-01]. Dostupné z: <http://www.lange-aviation.com/>

Letecké motory [online]. [srov. 2014-04-17]. Dostupné z: <http://www.leteckemotory.cz/>

Lietadla [online]. [srov. 2014-03-22]. Dostupné z: http://www.lietadla.com/motory/mot_1914.htm

MTU Aero Engines [online]. [srov. 2014-04-28]. Dostupné z: <http://www.mtu.de>

Palba [online]. [srov. 2014-03-27]. Dostupné z: <http://www.palba.cz/viewtopic.php?t=2808>

Pratt & Whitney [online]. [srov. 2014-03-26]. Dostupné z: <http://www.pw.utc.com/Home>

PC-Aero [online]. [srov. 2014-05-03]. Dostupné z: <http://www.aircraft-certification.de>

První brněnská strojírna Velká Bíteš [online]. [srov. 2014-04-05]. Dostupné z: <http://www.pbsvb.cz/pohonne-jednotky>

Rolls-Royce. Civil Aerospace [online]. [srov. 2014-0-10]. Dostupné z: <http://www.rolls-royce.com/civil/products/largeaircraft/>

Snecma [online]. [srov. 2014-05-26]. Dostupné z: <http://www.snecma.com/-moteurs-civils,9-.html?lang=en>

Solar Impulse [online]. [srov. 2014-04-20]. Dostupné z: <http://www.solarimpulse.com/>
Turbomeca Engines [online]. [srov. 2014-04-15]. Dostupné z: <http://www.turbomeca.com/english/our-products/helicopter-engines/>,

Vesmír [online]. [srov. 2014-05-15]. Dostupné z: <http://www.vesmir.cz/clanek/vodik-palivem-budoucnosti>

Wikipedia [online]. [srov. 2014-05-22]. Dostupné z: <http://www.en.wikipedia.org>

Wright Brothers Aeroplane Company [online]. [srov. 2014-03-12]. Dostupné z: <http://www.wright-brothers.org/>

Seznam použitých zkratek

ADVENT	Adaptive Versatile Engine Technology
AETD	Adaptive Engine Technology Development
cit.	citováno
CMC	Ceramic Matrix Composites
CPU	Central Processing Unit
EADS	European Aeronautic Defence and Space Company
EASA	European Aviation Safety Agency
ECS	Electronic Controlled System
ECM	Engine Condition Monitoring
ECU	Engine Control Unit
EEC	Engine Electronic Controller
EICAS	Engine Indicating and Crew Alerting System
ELUBSYS	Engine Lubrication System Technologies
FAA	Federal Aviation Authority
FADEC	Full Authority Digital Electronic Control
HRL	Heat Resistant Layer
OHC	Over Head Camshaft
LSA	Light Sport Aircraft
NACA	National Advisory Committee for Aeronautics
NASA	National Aeronautics and Space Administration
ORE	Open Rotor Engine
RAF	Royal Air Force
srov.	srovnej
SSSR	Svaz sovětských socialistických republik
TAPS	Twin Annular Pre-Swirl
TBO	Time Between Overhaul
UAV	Unmanned Aerial Vehicle
UDF	Unducted Fan
UHBF	Ultra-High Bypass Fan
ULL	UltraLight
USA	United States of America
USAF	United States Air Force
VLA	Very Light Aircraft

Seznam použitých jednotek

A	ampér	proud
Ah	ampérhodina	kapacita
cm ³	centimetr krychlový	objem
°C	stupeň Celsia	teplota
dB	decibel	hladina intenzity zvuku
k	kůň	výkon
kg	kilogram	hmotnost
kg/kW	kilogram na kilowatt	spotřeba
km/h	kilometr za hodinu	rychlost
kN	kilonewton	tah
kVA	kilovoltampér	zdánlivý výkon
kW	kilowatt	výkon
kWh	kilowatt hodina	energie
l	litr	objem
m	metr	délka
mm	milimetr	délka
m/s	metr za sekundu	rychlost
m ²	metr čtvereční	plocha
Nm	newtonmetr	točivý moment
ot/min	otáčky za minutu	otáčky
V	volt	napětí