

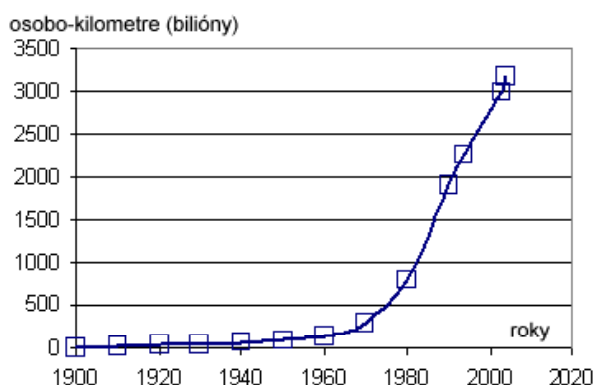
ASPEKTY A ÚSPECHY VÝVOJA LETECKÝCH MOTOROV

Kříž J., Novák A., ŽU Žilina

Nie je prehnané konštatovanie, že vývoj leteckých motorov za posledných sto rokov je proces ktorý nielen spôsobil prevrat letectva ako celku, ale ovplyvnil tiež početné skupiny ľudí a ekonomiky ktoré sú na letectvo napojené podobne ako príležitosti ktoré poskytol. Týmto hlboko ovplyvnili celé spoločenské a ekonomické systémy.

V minulom storočí by ťažko niekto predpokladal možnosti, ktoré letecká doprava umožní v objeme cestovania, vzdialenostiach, rýchlosti a komforte na medzikontinentálne, veľké či malé, vzdialenosti.

Roku 1919 sa uskutočnila prvá medzinárodná verejná letecká doprava na trati Paríž – Londýn,



Obr. 1. Vývoj skutočných výkonov pravidelnej civilnej leteckej dopravy vo svete

roku 1952 sa začali používať prvé anglické dopravné lietadlá Comet s prúdovými motormi.

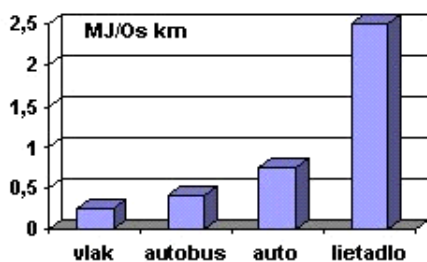
Výrazný zlom v náraste znamenalo nasadenie veľkokapacitných lietadiel. Štatistické údaje sú nekompromisné.

ICAO materiály uvádzajú nárast osobnej leteckej dopravy v roku 2004 o 6,2 %, a pre rok 2005 nárast 5,4 %, s predpokladom nárastu o 5,2 % pre rok 2006.

Štatistické údaje IEA (International Energy Agency) konštatujú za uplynulých 15 rokov nárast spotreby paliva viac ako 60 %.

Objem civilnej leteckej prevádzky sa zvýšil viac ako 150%, je teda možno hovoriť o výraznom zvýšení účinnosti paliva. Komerčné využitie lietadiel je podľa štatistických údajov sa zvýšilo z 60 % ponúkanej kapacity, na 70 %, z globálneho hľadiska reprezentuje spotrebu cca 500 gramov paliva na „tunokilometer“.

V týchto súvislostiach vyvoláva pozornosť enormne vysoká energetická náročnosť leteckej dopravy i keď letecký petrolej tvorí, iba 5 % produktov,



Obr. 2. Energetická náročnosť dopravy

ktoré sa z ročne vyťaženej ropy vo svete vyrábajú. V dohľadnej budúcnosti zrejme nedôjde k žiadnej principiálnej zmene v pohone lietadiel. Základom leteckých motorov zostanú tepelné stroje, ich pracovnou látkou bude zmes paliva a vzduchu. Objavili sa štúdie o použití alternatívneho paliva. Z prvkov, ktoré ponúka Mendelejevova tabuľka to bol tekutý vodík, ktorý zaujal vývojových pracovníkov svojou trojnásobne vyššou výhrevnosťou ako letecký petrolej.

Programy uvažujúce vodík ako palivo, začali počiatkom 80 - tých rokov - podarilo sa letieť s takýmito lietadlami. Do pravidelnej prevádzky sa však nedostali. Zdrojom tepelnej energie naďalej z čisto pragmatických dôvodov zostávajú tekuté uhľovodíkové palivá. prírodného, alebo syntetického pôvodu. Uhľovodíkové palivá sú a zrejme aj zostanú najlacnejšími, ľahko dostupnými, dobre skladovateľnými, osvedčenými a bezpečnými energetickými zdrojmi.

Aj keď v tomto prípade uvedieme, či porovnáme prakticky neporovnateľné, uveďme fakty. Prvý let Orwila Wrighta dňa 17.12.1903 trval 12 sekúnd, preletená vzdialenosť 36,5 metrov,

teda rýchlosť letu 3,05 m/s, tomu zodpovedá Machovo číslo letu 0,0089. Bezpilotné lietajúce teleso dokázalo po viac ako 100 rokoch letieť pomocou motora typu scramjet využívajúceho atmosférický kyslík ako okysličovadlo rýchlosťou $M = 9,8$, čo predstavovalo vo výške 30 km rýchlosť letu 11265 km/h teda za 10 sekúnd uletelo viac ako 24 km. Pokrok ktorý predstavuje nárast rýchlosti z 3,05 m/s na 3129 m/s je viac ako 1000 násobok. Praktické použitie uvedeného tepelného motora pre civilné nasadenie bude vyžadovať riešenie mnohých vznikajúcich problémov veľa úsilia.

Výkonové požiadavky na motor

Ako plní piestový a turbínový motor požiadavky konštruktérov a prevádzkovateľov lietadiel? Pri rýchlosti 800 km/h vo výške 10 500 m má lietadlo o hmotnosti 500 000 kg čelný odpor približne 220 kN. Každý motor štvormotorového lietadla, musí vyvodiť ťah 55 kN. Pre uvedené podmienky je to výkon jedného motora 12,5 MW. Tento výkon je za hranicami výkonnosti najväčších lietadlových piestových motorov, ktoré majú výkon okolo 2 500 kW a vo výške iba cca 750 kW. Skutočný ťahový výkon vrtuľového pohonu by bol ešte menší. Cestovná rýchlosť lietadiel s piestovým motorom a vrtuľou preto nebola väčšia ako 500 km/h. Tepelný stroj s periodickým pracovným obehom, akým lietadlový piestový motor je, umožňuje však obmedzenú koncentráciu energetických transformácií do hmoty, priestoru a času. Pre dosiahnutie vyšších rýchlostí letu vnikla naliehavá nutnosť odstránenia výkonových obmedzení. Piestový motor by bol v nových podmienkach brzdou rozvoja leteckej dopravy. Periodický pracovný obeh bolo potrebné nahradiť pracovným obehom kontinuálnym, tento je vlastný tepelným strojom prúdovým.

Účinnosť a spotreba paliva

Účinnosť lietadlovej pohonnej jednotky a s ňou spojená spotreba paliva je závislá na termickej a propulznej účinnosti stroja akým lietadlový motor je.

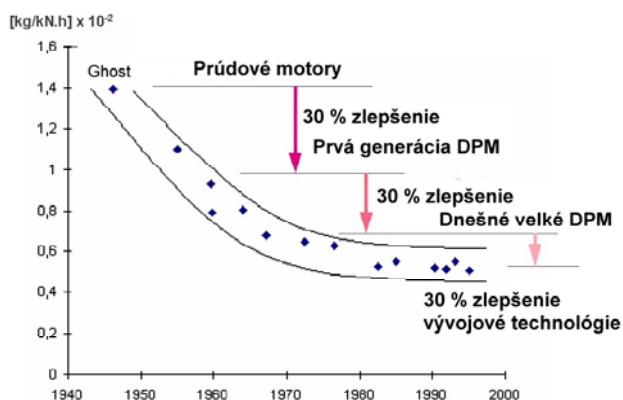
Termická účinnosť Ericsson-Braytonovho obehu, podľa ktorého pracujú lietadlové prúdové motory je závislá na kompresnom pomere. Hypotetický motor, ktorý má 100% účinnosť častí a neuvažujúc tlakové straty, má pri maximálnej teplote na konci kompresie 600 K, v stratosfére termickú účinnosť 76%. Môžeme uvažovať o koncepcii motora, ktorý pre rôzne rýchlosti letu dosiahne rovnakú termickú účinnosť 76 %. Pokiaľ účinnosť tohto motora ostáva pri konštantnej výstupnej teplote vzduchu z kompresora rovnaká, podobná účinnosť náporového motora sa zvyšuje s Machovým číslom letu a pri hodnote $M = 4$ dosiahne rovnakej hodnoty. Je zrejmé, že pre nízke rýchlosti letu je malé zvýšenie teploty vplyvom náporového stlačenia, o to väčšie musí byť stlačenie v kompresore. Zo zvyšovaním rýchlosti letu bude pre dosiahnutie tepelnej účinnosti 76 % potrebné stále menšie stlačenie v kompresore.

Druhý aspekt je propulzná účinnosť. Z teórie propulzora vyplýva, že vysoká propulzná účinnosť sa dosiahne za podmienok, kedy výstupná rýchlosť pracovnej látky z prúdového motora sa blíži rýchlosti letu. Prúdový motor pomalšieho lietadla dosiahne zníženie výstupných rýchlostí plynov transformáciou energie väčšiemu množstvu vzduchu. V skutočnosti to spôsobí pokles termickej účinnosti vplyvom strát v turbíne a dúchadle druhého prúdu, ktorý transformuje prevažnú časť energie. Je zrejmé, že rozdiel medzi teoretickou úvahou a skutočnosťou naznačuje možnosti termickej účinnosti predovšetkým pre podzvukové lietadlá. Keď uvažíme, že lietadlové turbínové motory pracujúce v stratosfére dosahujú termickú účinnosť okolo 47 - 50 %, môžeme naznačiť praktický limit s ohľadom na našu teoretickú hodnotu 76 %.

Prúdový motor s pracovnou látkou vzduch a uhl'ovodíkové palivo môže na výstupe zo spaľovacej komory mať teoretickú maximálnu teplotu okolo 2400 K. Termická účinnosť bude

v skutočnosti nižšia predovšetkým vplyvom polytropického charakteru deja. V dvojprúdovom motore sa termická účinnosť ďalej zníži vplyvom prenosu energie z prvého do druhého prúdu. Aby sa dosiahla vysoká propulzná účinnosť musí sa rýchlosť letu lietadla blížiť rýchlosti výstupných plynov z jeho pohonnej jednotky, znamená to priradiť využiteľnú energiu väčšej prietokovej hmotnosti vzduchu (moderný dvojprúdový motor pri vzletových podmienkach má prietok vzduchu až 1250 kg/s, obtokový pomer dosahuje hodnotu až 8,7, stlačenie látky v pracovnom obehu až 44). V praxi je to sprevádzané poklesom termickej účinnosti pretože narastajú straty prenosom energie do druhého prúdu dvojprúdového motora. Významný je však vzrast propulznej účinnosti, a z toho vyplývajúci vzrast celkovej účinnosti pohonnej jednotky.

Možno však konštatovať, že i malé zlepšenie účinnosti komponentov motora predstavuje veľké úsilie a veľa vynaloženej práce. Na jednej konferencii o možnostiach ďalšieho zlepšovania parametrov lopatkových motorov profesor Jerie túto skutočnosť komentoval slovami: „Je pravdou, že pri zmene účinností o deklarované hodnoty sa nám zníži spotreba paliva, problémom ale zostáva, ako deklarované zvýšenie účinnosti dosiahnuť“.



Obr. 3. Vývoj mernej spotreby paliva

Optimistickým, či pesimistickým pohľadom uvažme možné zvýšenie termickej účinnosti do stredy uvažovaného rozpätia, teda cca na 58%.

Propulzná účinnosť súčasných lietadlových pohonných jednotiek dosahuje 70 až 85%, môžeme preto predpokladať možnosti vývoja mernej spotreby.

Teoretický medzný prípad $\eta_t = 0.76$ a $\eta_p = 1.0$ predstavuje spodnú hranicu mernej spotreby paliva $C_M = 25$ [kg/kN.h], motor však nedáva ťah.

Teoretický predpoklad $\eta_t = 0.68$ a $\eta_p = 0.7$ odpovedá dolnej hranici mernej spotreby paliva $C_M = 40$ [kg/kN.h]. Futuristické predpoklady $\eta_t = 0.68$ a $\eta_p = 0.85$ naznačujú málo pravdepodobnú mernú spotrebu paliva $C_M = 33$ [kg/kN.h] i keď súčasnosť ukazuje, že merná spotreba paliva lietadlových motorov sa pohybuje okolo $C_M = 60$ [kg/kN.h].

Lietadlový motor a životné prostredie

Trvalo udržateľný rozvoj spoločnosti je jednoznačne podmienený do budúcnosti trvalo udržateľnou ekonomickou a ekologickou stabilitou dopravy. Skutočnosťou je, že v mnohých prípadoch až následne spoločnosť štatisticky konštatuje aký vplyv a do akých oblastí zasahuje technický rozvoj. Automobilizmus napríklad v USA neznamená iba znečisťovanie ovzdušia či zaťažovanie hlukom, je to tiež napríklad ročne 60 000 smrteľných úrazov, zvýšenie srdcových ochorení a mnohé ďalšie. V medzinárodnom meradle sa expertné skupiny ICAO podieľajú veľa rokov na riešení dopadu nepriaznivých vplyvov na životné prostredie sprevádzajúcich rozvoj civilnej leteckej dopravy.

Hluk lietadlového prúdového motora

Od doby, kedy boli uvedené do prevádzky civilné lietadlá s prúdovými motormi sa rozvíjajú technológie aby ich prevádzka bola menej hlučná. Veľa rokov bol hluk prúdového motora považovaný za hlavný nepriaznivý dopad na životné prostredie, predovšetkým hladina hluku v okolí letísk. Protichodne tu pôsobia dva trendy; výmena hlučných lietadiel za modernejšie menej hlučné a zvyšovanie počtu pohybov lietadiel. Hluk dýchadla a kompresora je superpozíciou hluku zo širokým spektrom (pozadia) a hlukových špičiek v diskretných

frekvenciách. Dúchadlo a kompresor vytvárajú hluk v oblasti stredných a vysokých frekvencií (v rámci rozsahu 20 až 12500 Hz). Hlavný zdroj hluku prvých prúdových motorov bol hluk vznikajúci pri procese zmiešavania výstupných rýchlych plynov s okolitým vzduchom. Najväčší hluk bol zapríčinený strihovým pnutím medzi výstupným prúdom a okolím a takto spôsobenými turbulenciami.

Moderné prístupy a koncepcie riešenia otázok hluku „zvládli“ odporúčania z minulosti k zníženiu hluku, pre civilné dvojprúdové motory: stlačenie v dúchadle 1,6 a maximálna teplota 1500 K. Súčasné moderné motory navrhnuté pre najväčšie súčasné lietadlo A380 majú stlačenie v dúchadle 1,7 – 1,8, a maximálne teploty dosahujú 1500 °C. S novou filozofiou zabráňovať a nielen tmiť prispela ej „elektrizácia“ tepelného motora - kde je to možné zaradenie elektrických motorov v pohonnej jednotke. Vhodným tvarovaním vstupného kanála, lopatiek dúchadla ako aj výstupnej dýzy je ich hlučnosť až o 25 dB menšia ako sú hlukové limity Stupňa 3 (CAEP - Committee on Aviation Environmental Protection), platného do januára roku 2006.

5.2 Emisie lietadlového prúdového motora

Lietadlový turbínový motor zaťažuje životné prostredie rovnako ako iné dopravné prostriedky, tiež produkuje škodlivé emisie. Časť týchto emisií, hluk a zápach sú ľuďmi priamo pociťované ako rušivé, prevažne tiež vážne akceptované iba v blízkosti letísk, kde ich lietadla zanechávajú pozorovateľne menej. Väčšia časť emisií je imitovaná vo väčšej výške v priebehu letu, ich účinok je v súčasnosti stále viac skúmaný.

V súčasnosti sú ako škodlivé látky označované všetky komponenty, ktoré vznikajú pri spaľovaní. Komponenty je potrebné rozlišovať, tie ktoré vznikajú pri dokonalom spaľovaní (CO_2 , H_2O) a tie, ktoré vznikajú pri nedokonalom spaľovaní (NO_x , HC, sadze, SO_2). Časť imitovaných škodlivých látok vznikajúcich následkom leteckej dopravy je pomerne malá. Pretože CO_2 , H_2O vznikajú proporcionálne spotrebe, môžeme hovoriť o cca 5 %. S ohľadom na požiadavky na chemické zloženie leteckého petroleja ležia všetky ostatné emisie pod hranicou 1 %. Dá sa z toho vyvodiť záver, že redukcia škodlivých látok u leteckých motorov nepredstavuje naliehavý problém. Porovnanie s pozemnou dopravou je však nevhodné, pretože letecké motory v priebehu letu imitujú v regiónoch, v ktorých nezasahujú žiadne ďalšie antropogénne zdroje škodlivých látok.

Vodík, ktorého v leteckom petroleji ako uhl'ovodíkovom palive je cca 15 % sa spálením prakticky dokonale premení na vodu. Vodná para sa podieľa v atmosfére na dôležitom skleníkovom efekte. Prírastok vody v atmosfére vplyvom spaľovania uhl'ovodíkových palív je zanedbateľný, nakoľko vplyvom slnečného žiarenia v troposfére neustále obieha mnohonásobne väčšie množstvo vody. Bez kolobehu vody v atmosfére by bol život na zemi nemožný. V stratosfére je obsah vody nepatrný, pretože voda sa tu vplyvom ultrafialového žiarenia štepí na atomárny kyslík a vodík. Isté obavy vyvoláva imitovaná voda vo vrstvách 10 000 - 13000 m, kde je jej vplyv málo preskúmaný. Imitovaná voda tu vplyvom ľadových oblakov môže pôsobiť na zvýšenie skleníkového efektu

Uhlík, ktorého je v leteckom palive cca 85 %, by sa pri dokonalom spaľovaní okysličil na CO_2 . Tento je stabilný, hromadí sa v troposfére a má silný vplyv na vytváranie skleníkového efektu. Na povrchu Zeme a oceánov dochádza k redukcii CO_2 fotosyntézou. Do stratosféry sa CO_2 dostáva tiež sopečnou činnosťou. Nepriaznivé zaťaženie životného prostredia je, ako bolo už u vody konštatované, úmerné spotrebe leteckého paliva. Voda a CO_2 vznikajú pri spaľovaní všetkých uhl'ovodíkových zlúčenín a dá sa im vyhnúť iba tak, keď spaľovaná látka neobsahuje zlúčeniny uhlíka a vodíku.

Nedokonalým spaľovaním uhlíku vzniká oxid uhoľnatý CO, sadze a zbytky nespálených uhl'ovodíkov označovaných súhrnne HC (Hydrocarbons). Oxid uhoľnatý CO je nebezpečný prudký jed. Známy je fakt, že vo výfukových plynch piestových vozidlových motorov je koncentrácia CO už smrteľná. Podiel leteckej dopravy je opäť možno odvodiť od podielu spotreby paliva, je to menej ako 0,1 % celkového zamorenia.

Sadze sú temer čistý, tuhý, jemne rozptýlený uhlík, opticky sa prejavujú pohlcovaním slnečného svetla. Dymenie motorov sa na palivovej hospodárnosti motorov podieľa iba nepatrne, nepôsobí však esteticky. Zo zdravotného hľadiska sú sadze pravdepodobne neškodné. Mohutnosť dymenia najskôr z optických dôvodov bola ako prvá, pre ktorú sa zahájili práce na zdokonaľovaní spaľovania s ohľadom na životné prostredie.

HC - nespálené uhl'ovodíky rôznej konzistencie a pôvodu ako metán, etylén, acetylén, aldehydy, čpavok a rôzne fragmenty vysokomolekulárnych olefinov a aromatických uhl'ovodíkov, dechtová smola a koks. V piestových motoroch vytvárajú väzke konzistencie a môžu vyvolať poruchu motora (zapečenie piestných krúžkov), v plynnej forme znečisťujú atmosféru nepríjemným pachom a spolu s NO_x s rozhodujúcim podielom podieľajú na vytváraní smogu. Podiel leteckej dopravy je opäť možno odvodiť od podielu spotreby paliva, je to menej ako 0,5% celkového zamorenia.

V spalínach spaľovacích motorov sa z oxidov dusíka vyskytuje prevažne NO a NO₂. Súhrnne sa ich obsah hodnotí ako emisie NO_x. Letecký priemysel venoval veľa energie na zlepšenie ekonomiky leteckých motorov, vývoj prispel predovšetkým ku zníženiu emisií oxidu uhoľnatého a nespálených uhl'ovodíkov. Vyššie teploty a tlaky v spaľovacej komore, ktoré sa v súčasnej dobe dosahujú spôsobujú zvýšenie množstva oxidov dusíka NO_x. Do teploty 1800 K sa molekuly N₂ chovajú ako inertný plyn. V spaľovacej komore leteckého motora vzniká hlavne tzv. termický NO_x ktorý vzniká reakciou dusíka a kyslíka pri dostatočne vysokých teplotách nad 1900 K. Oxid dusnatý NO vzniká endotermickou reakciou. Teplo dodávajú exotermické reakcie spaľovania uhl'ovodíkov. Pokiaľ je v spalínach dostatok O₂, prebieha čiastočná oxidácia NO na NO₂ už v motore, opäť endotermickou reakciou. Ďalšia oxidácia NO prebieha vo voľnom priestore vplyvom slnečného žiarenia. CO a HC vznikajú pri nedostatočnom, príliš pomalom spaľovaní, predovšetkým pri nízkych teplotách. Z toho vzniká nebezpečenstvo, že opatrenia použité ku zníženiu NO_x, zvyšujú emisie CO a HC.

Síra, pokiaľ v uhl'ovodíkovom palive je, všetka zhorí na SO₂ ktorý sa neskôršie fotochemickou cestou v atmosfére za prítomnosti vody ďalej okyslíči na SO₃ a ten sa rozpustením vo vode premení na kyselinu sírovú. Podiel leteckej dopravy na poškodzovaní životného prostredia splodínami s obsahom síry celkom zanedbateľný (0.05 %).

Vývoj, predpoklad úspechu

Roku 1966 bol Boeing 707 jeden z najväčších lietadiel na svete, jeho cena a prevádzkové náklady boli také, že si nákup mohli dovoliť iba niektoré spoločnosti. Ako mohlo nové lietadlo B747, ktorého technologický pokrok bol ďaleko za revolúciou ovplyvniť trh? Odpoveď je jednoduchá, skutočnosť, že 747 bol opatrený modernými dvojprúdovými motormi a kabína bola o 25 m dlhšia vytvorila predpoklady, že prevádzkové náklady boli o 30 % nižšie ako u 707.

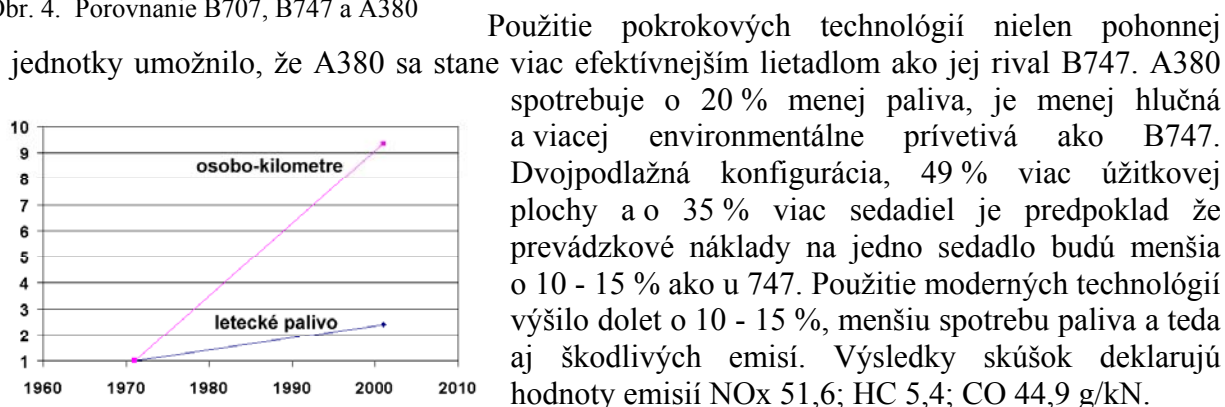
Podobnú otázku, akú si prevádzkovatelia kládli pre 25 rokmi, môžeme položiť dnes pri predvedení A380. Aj keď je A380 dlhšia iba o 2,1 m ako B747, má väčšie krídla a modernejšie motory. Elektronické systémy poslednej generácie pre riadenie letu a pohonných jednotiek vytvárajú predpoklady hospodárnejšej prevádzky.

Napríklad modifikácia z 555 sedadlami po úprave až na 840 sedadiel predstavuje zvýšenie sedadlovej kapacity o 30 až 50 % pri porovnaní A380 a B747.

Štúdie o zvýšení hospodárnosti či ekonomiky paliva za predchádzajúcich 10 až 15 rokov konštatujú, že zlepšenie hospodárnosti vďaka modernizácii pohonnej jednotky tvorí spravidla do 25 % celkového zlepšenia. Vo väčšej miere k tomu prispievala racionalizácie postupov a optimalizácia letovej prevádzky. Nová A380 má dolet viac ako 18 000 km, čím môže priamo doletieť kamkoľvek na svete, nová generácia motorov umožňujúca „dvihnúť“ a poháňať lietadlo o hmotnosti 560 ton. Rolls Royce alebo GE/Pratt & Whitney motory majú cestovný ťah 330 kN. Pre porovnanie motory B707 mali ťah 45 kN. Môžeme konštatovať významné zvýšenie ťahu moderných motorov.



Obr. 4. Porovnanie B707, B747 a A380



Obr. 5. Trend nárastu výkonov a spotreby

Použitie pokrokových technológií nielen pohonnej jednotky umožnilo, že A380 sa stane viac efektívnejším lietadlom ako jej rival B747. A380 spotrebuje o 20 % menej paliva, je menej hlučná a viac environmentálne prívetivá ako B747. Dvojpodlažná konfigurácia, 49 % viac užitočnej plochy a o 35 % viac sedadiel je predpoklad, že prevádzkové náklady na jedno sedadlo budú menšie o 10 - 15 % ako u 747. Použitie moderných technológií výšilo dolet o 10 - 15 %, menšiu spotrebu paliva a teda aj škodlivých emisií. Výsledky skúšok deklarujú hodnoty emisií NOx 51,6; HC 5,4; CO 44,9 g/kN.

Možný pohľad na úspechy vývoja leteckej dopravy, ku ktorým vývoj lietadlovej pohonnej jednotky význačne prispieva naznačuje porovnanie nárastu realizovaných osobo-kilometrov v leteckej doprave a nárastu spotreby leteckého paliva v období rokov 1971 a 2001 spracované s príspevom štatistik IEA (International Energy Agency) a ICAO.

Literatúra:

1. Aircraft-Info.net: *Airbus A380*, Aircraft-Info_net - Airbus A380 Information, 2005
2. ICAO: *Publications related to Civil Aviation and the Environment*, ICAO\International Civil Aviation Organization (ICAO)enviro, 2005
3. IEA: *Evolution og Oil Products Consumption from 1971 to 2001*, IEA Energy Information Centre, 2005
4. KŘÍŽ, J. : *Lietadlové pohonné jednotky*, ŽU Žilina, 2005
5. Engine Alliance: *P7200 Engine Specifications*, 2005