



Odborná společnost letecká ČR
Czech Aerospace Society

Trendy a vize dalšího vývoje pohonu letadel

Daniel Hanus

hanus@fd.cvut.cz

www.czaes.org

Fakulta dopravní ČVUT

Horská 3, Praha 2,

29. 6. 2017,

Posluchárna B5,

od 16 hod.



Obsah

- Základní požadavky na pohon letadel
- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Produkce tahu

Energetická náročnost produkce tahu

Vnitřní – tepelná účinnost

Vnější – propulzní účinnost

Energetická náročnost pohonu

- Současný trend

Obtokový poměr

Konstrukční řešení

Nové materiály

Additive manufacturing

- Vize do budoucnosti

Blended wing-body

Distributed propulsion

Electrical propulsion

Alternativní paliva

Integrace draku a pohonu

- Kam směřujeme ?

- **Základní požadavky pohonu letadel**

A) Bezpečná doprava

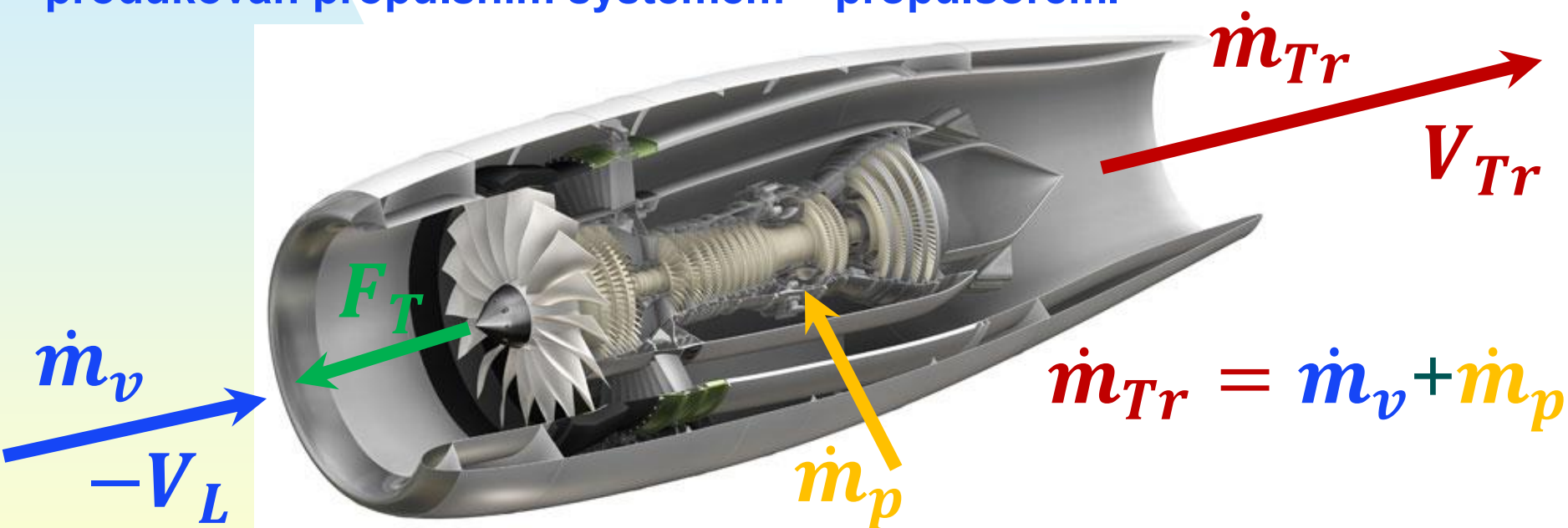
- za přijatelně krátký čas
- za přijatelnou cenu
- s minimálním dopadem na životní prostředí

B) Pohon je integrální součástí letounu

• Fyzikální podmínky pohonu letadel

Produkce tahu

Tah vzniká v pohonné jednotce silovým působením vzduchu a hnacích plynů na obtékané či protékané prvky pohonné jednotky. Výsledkem je dle zákona akce a reakce zvýšení toku hybnosti vzduchu a hnacích plynů vytékajících z pohonné jednotky. Tah pohonné jednotky je produkován propulsním systémem – propulsorem.

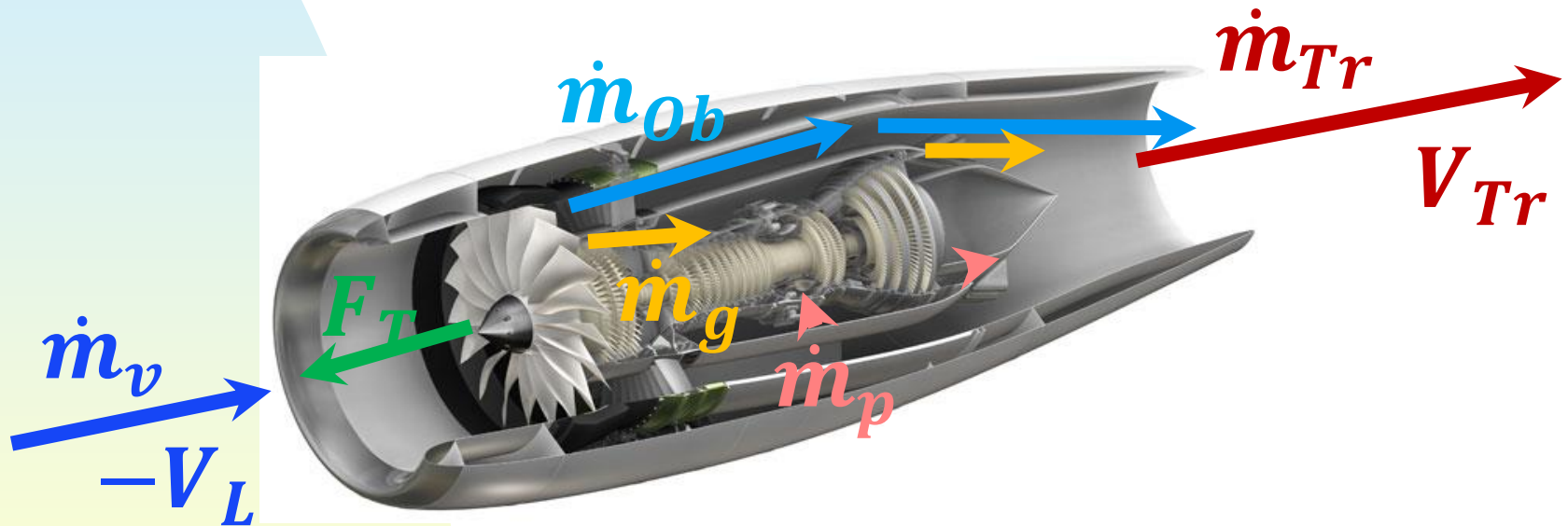


$$F_T = V_{Tr} \cdot \dot{m}_{Tr} - V_L \cdot \dot{m}_v$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Energetická náročnost produkce tahu

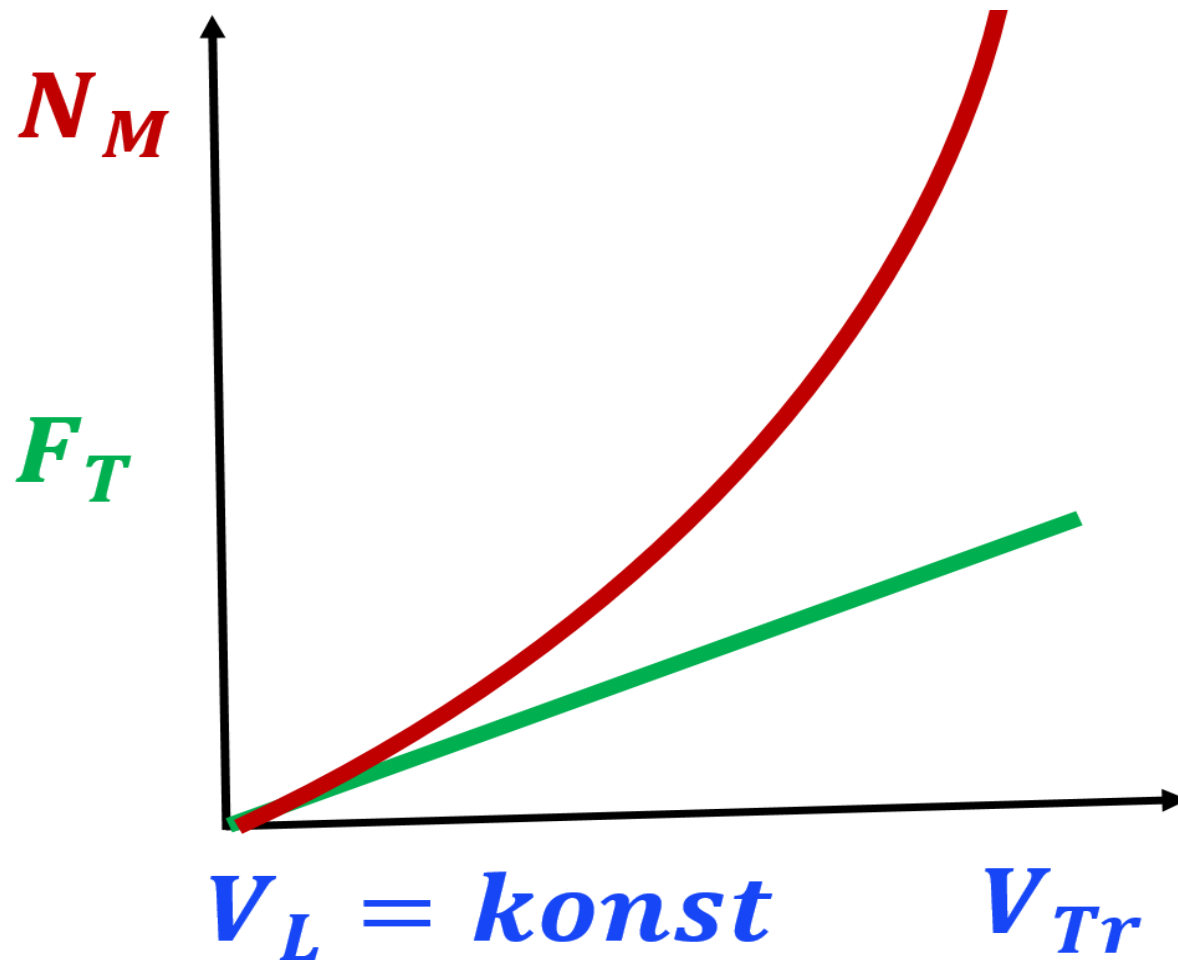
Produkce tahu vyžaduje zvýšení toku hybnosti vzduchu a hnacích plynů procházejících pohonnou jednotkou, tedy zvýšení toku jejich kinetické energie. Potřebný výkon pro zajištění produkce tahu propulsním systémem – propulsořem dodává propulsoru motor.



$$\dot{m}_{Tr} = \dot{m}_{ob} + \dot{m}_g + \dot{m}_p = \dot{m}_v + \dot{m}_p$$

$$N_M = \frac{1}{2} \cdot (V_{Tr}^2 \cdot \dot{m}_{Tr} - V_L^2 \cdot \dot{m}_v)$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel
Energetická náročnost produkce tahu

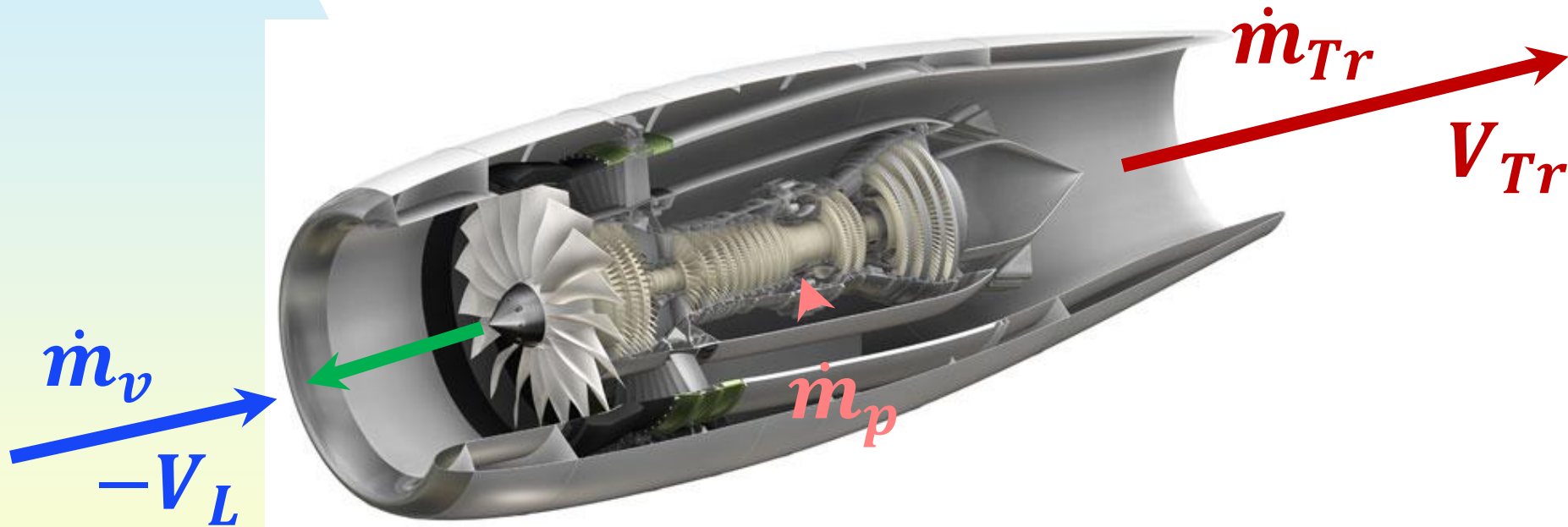


Závislost tahu a výkonu motoru na výstupní rychlosti
hnacích plynů z trysky pro $\dot{m}_v = konst$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Vnitřní – tepelná účinnost

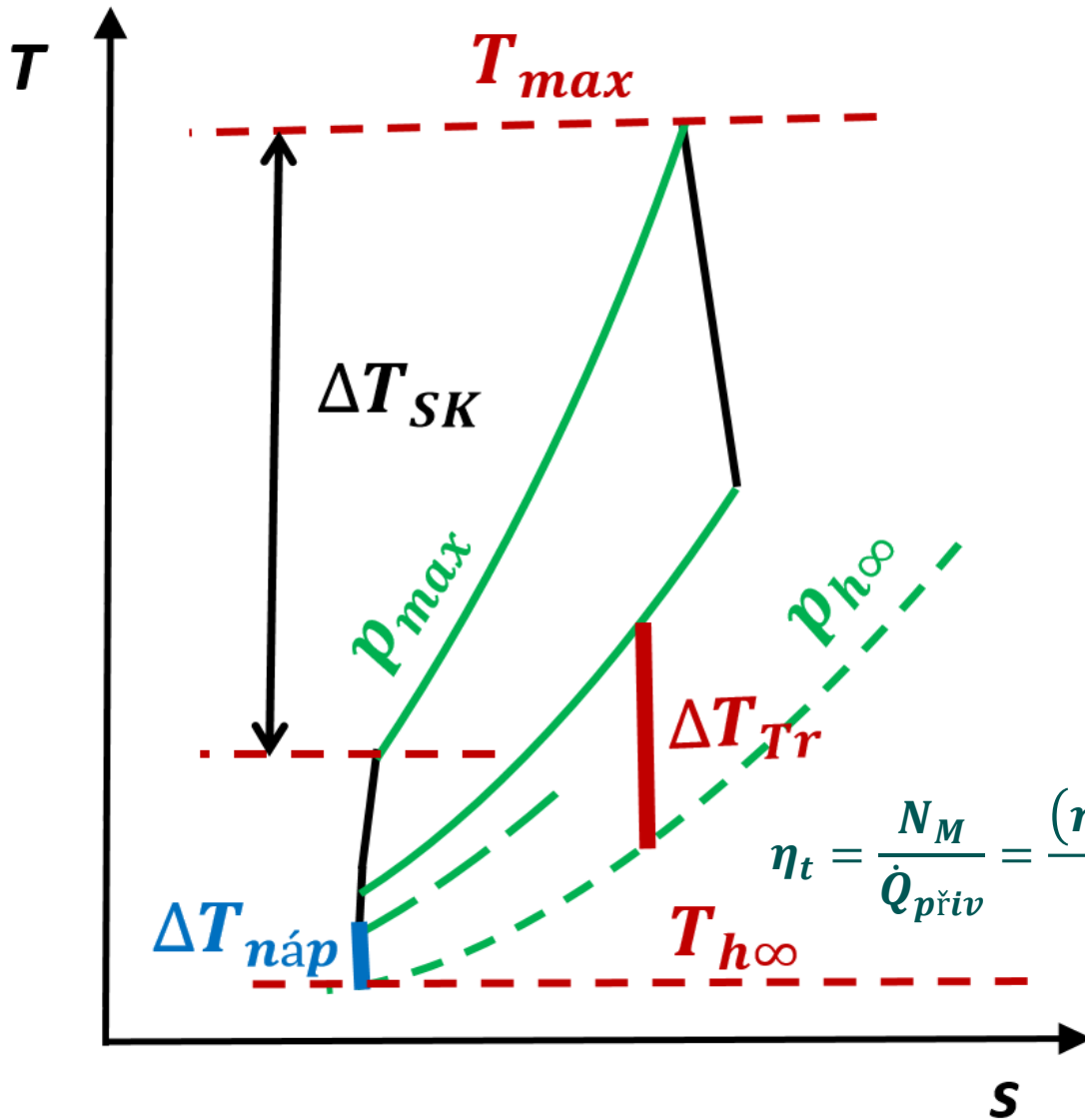
Užitečný mechanický výkon potřebný k produkci tahu poskytuje motor pohonné jednotky jako výsledek uskutečněné transformace přivedeného toku chemické energie paliva na mechanický výkon. Účinnost této transformace vyjadřuje vnitřní – tepelná účinnost.



$$\eta_t = \frac{N_M}{\dot{Q}_{přiv}} = \frac{N_M}{\dot{m}_p \cdot H_u} = \frac{\frac{1}{2} \cdot (V_{Tr}^2 \cdot \dot{m}_{Tr} - V_L^2 \cdot \dot{m}_v)}{\dot{m}_p \cdot H_u}$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Vnitřní – tepelná účinnost



$$\pi_c = \frac{p_{max}}{p_{h\infty}}$$

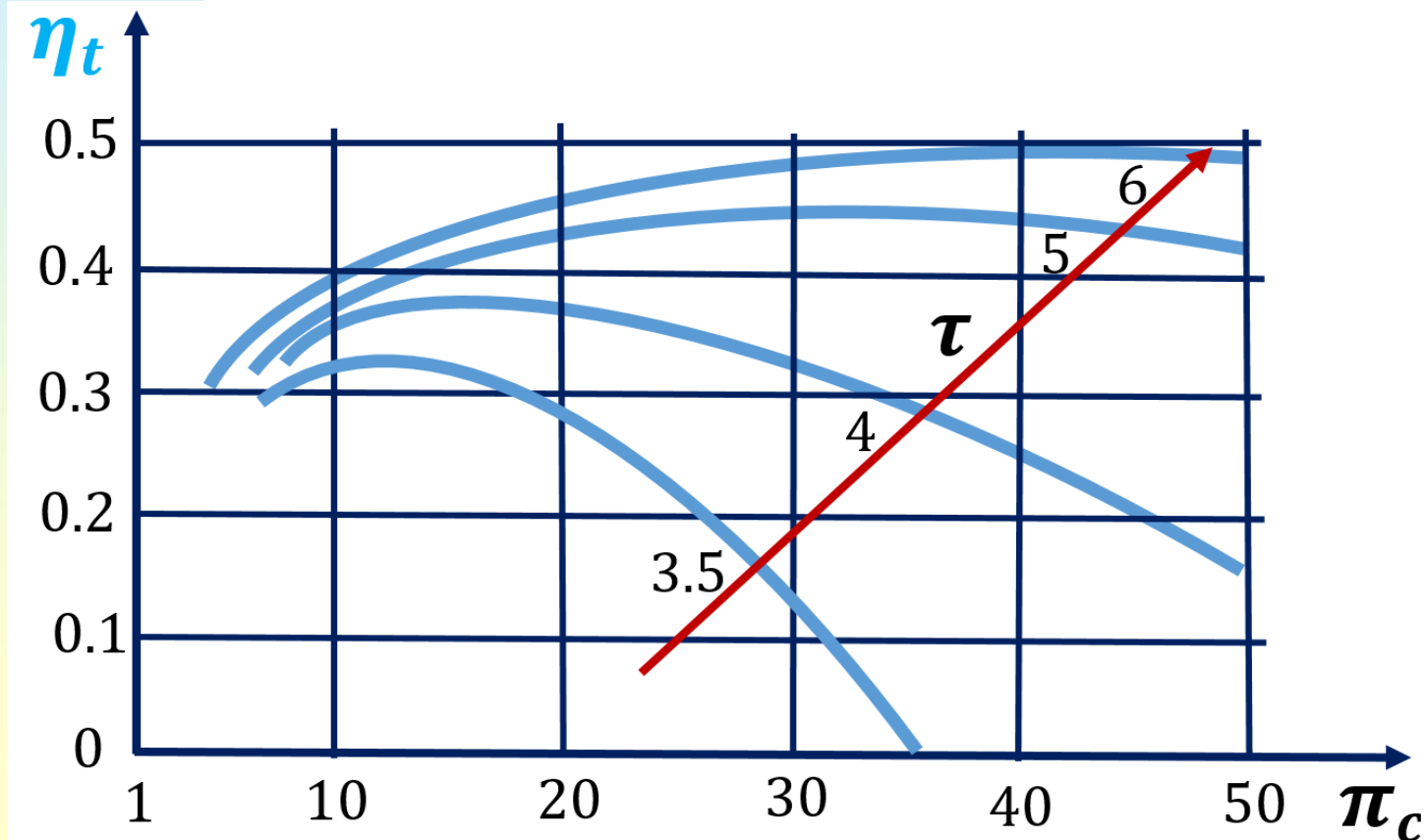
$$\tau = \frac{T_{max}}{T_{h\infty}}$$

$$\eta_t = \frac{N_M}{\dot{Q}_{přiv}} = \frac{(\dot{m}_v + \dot{m}_p) \cdot c_p \cdot \Delta T_{Tr} - \dot{m}_v \cdot c_p \cdot \Delta T_{nap}}{(\dot{m}_g + \dot{m}_p) \cdot c_p \cdot \Delta T_{SK}}$$

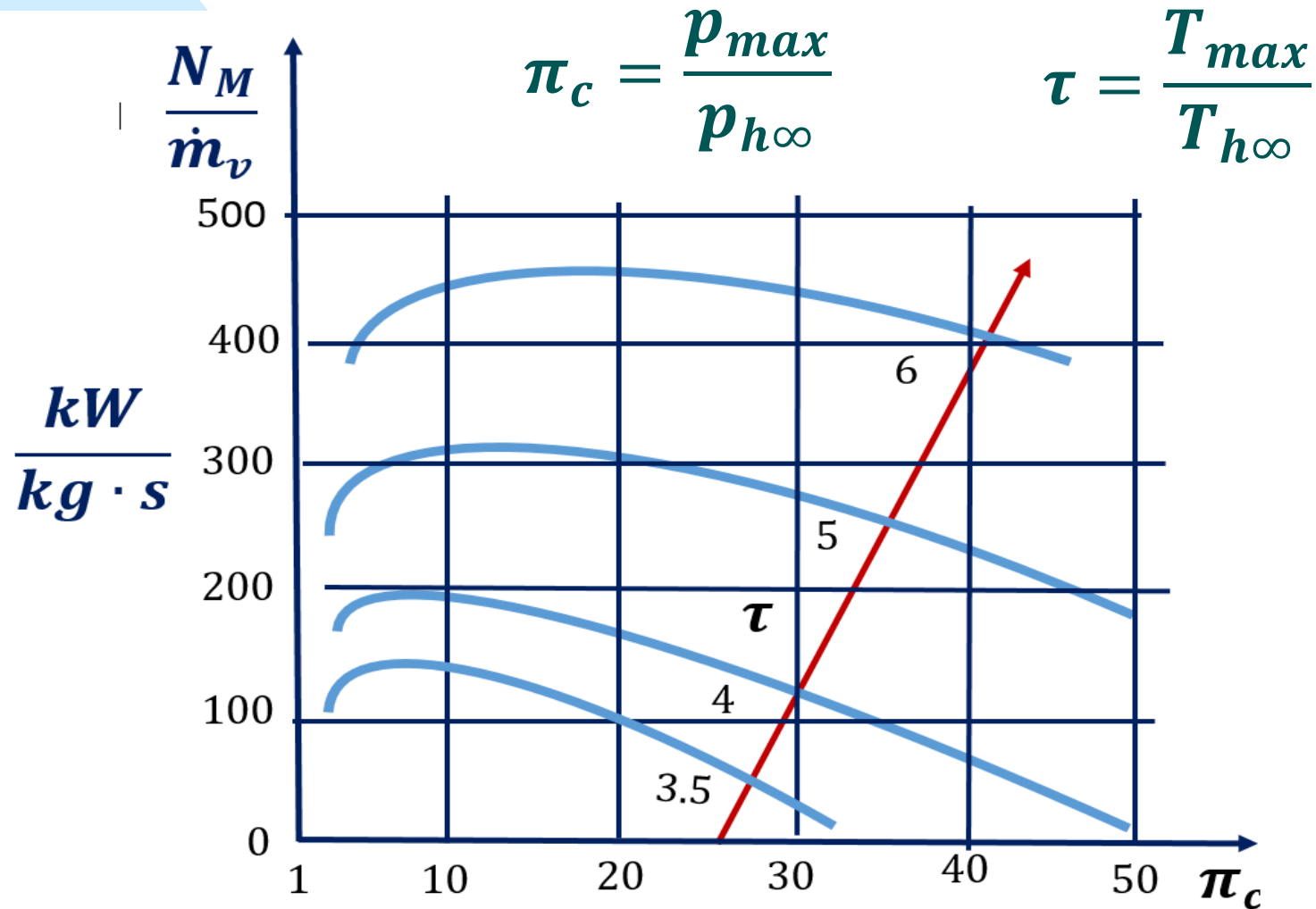
- Fyzikální podmínky pohonu letadel
Závislost tepelné účinnosti motoru na celkovém tlakovém a teplotním poměru

$$\pi_c = \frac{p_{max}}{p_{h\infty}}$$

$$\tau = \frac{T_{max}}{T_{h\infty}}$$



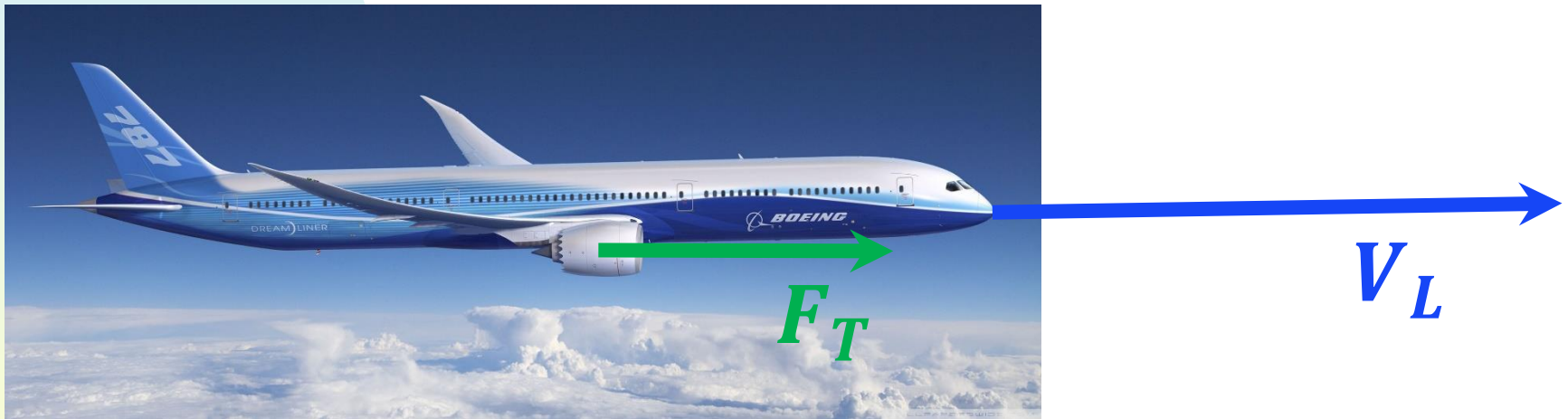
- Fyzikální podmínky pohonu letadel
Závislost měrného výkonu motoru na celkovém tlakovém a teplotním poměru



- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Vnější – propulzní účinnost

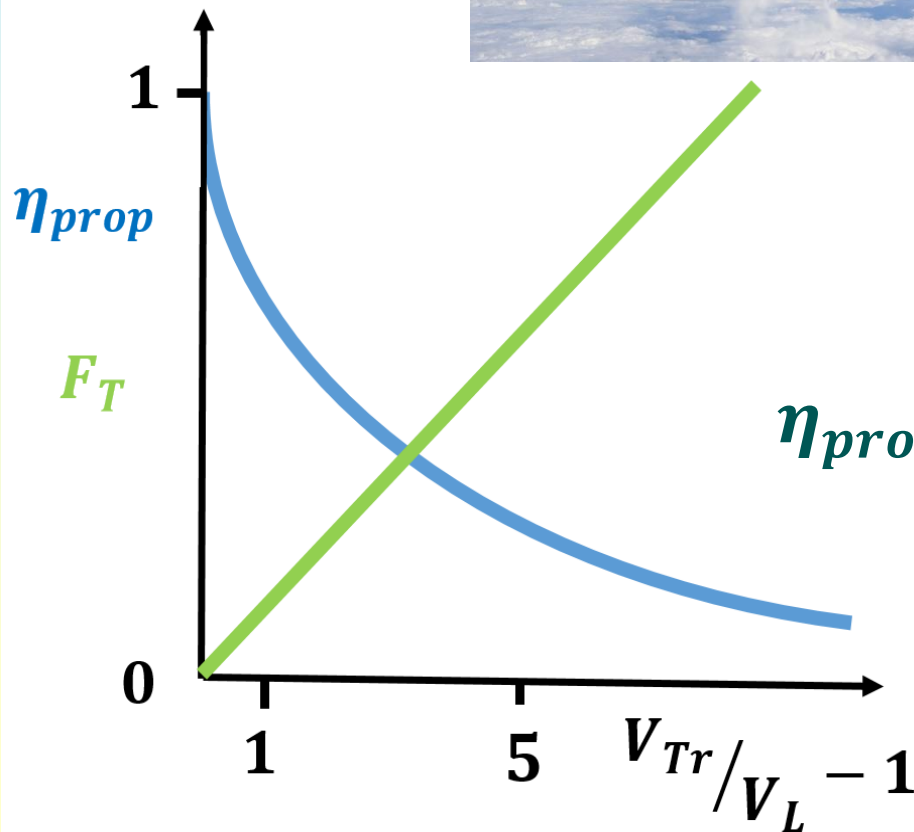
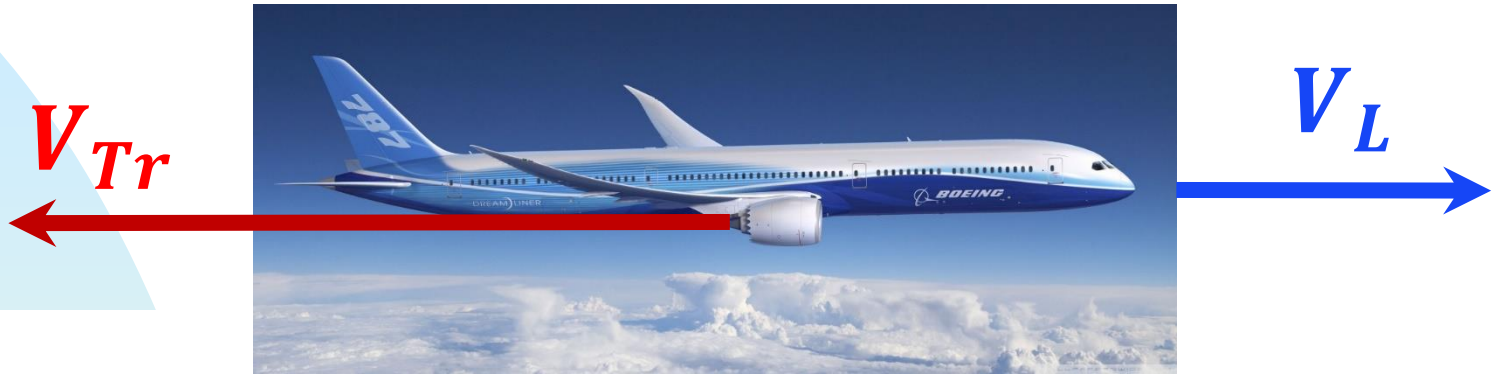
Pohonná jednotka pohánějící letoun rychlostí letu vykonává užitečný tahový výkon daný jako součin produkovaného tahu a rychlosti letu. Vnější –propulzní účinnost je účinnost transformace užitečného mechanického výkonu motoru pohonné jednotky na užitečný tahový výkon.



$$N_T = F_T \cdot V_L$$

$$\eta_{prop} = \frac{N_T}{N_M}$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel
Vnější – propulzní účinnost



$$\eta_{prop} = \frac{N_T}{N_M} \cong \frac{2}{1 + \frac{V_{Tr}}{V_L}}$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Dopravní energetická náročnost pohonu

Potřebný dopravní mechanický výkon motoru pro zajištění pohonu letounu danou rychlostí letu je dán pro aerodynamickou poláru letounu a jeho hmotnost celkovou účinností pohonu danou jako součin vnitřní – tepelné účinnosti motoru a vnější – propulsní účinnosti propulsního systému pohonné jednotky při dané rychlosti letu.

$$N_M = \frac{F_T \cdot V_L}{\eta_t \cdot \eta_{prop}} = \frac{c_D \cdot \rho_{h\infty} \cdot S \cdot V_L^3}{2 \cdot \eta_t \cdot \eta_{prop}}$$

Při vodorovném ustáleném letu platí vztah pro vertikální rovnováhu

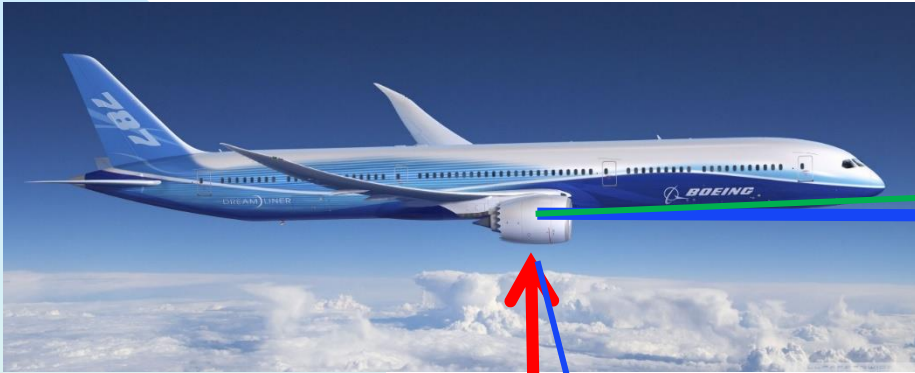
$$M \cdot g = \frac{1}{2} \cdot c_L \cdot \rho_{h\infty} \cdot S \cdot V_L^2$$

Dosazením do vztahu pro potřebný dopravní výkon motoru

$$N_M = \frac{M \cdot g \cdot V_L \cdot c_D}{\eta_t \cdot \eta_{prop} \cdot c_L} = \frac{M \cdot g \cdot V_L \cdot c_D}{\eta_t \cdot \eta_{prop} \cdot c_L} = \frac{M \cdot g \cdot V_L}{\eta_t \cdot \eta_{prop}} \cdot \operatorname{tg} \delta$$

- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Dopravní energetická náročnost pohonu



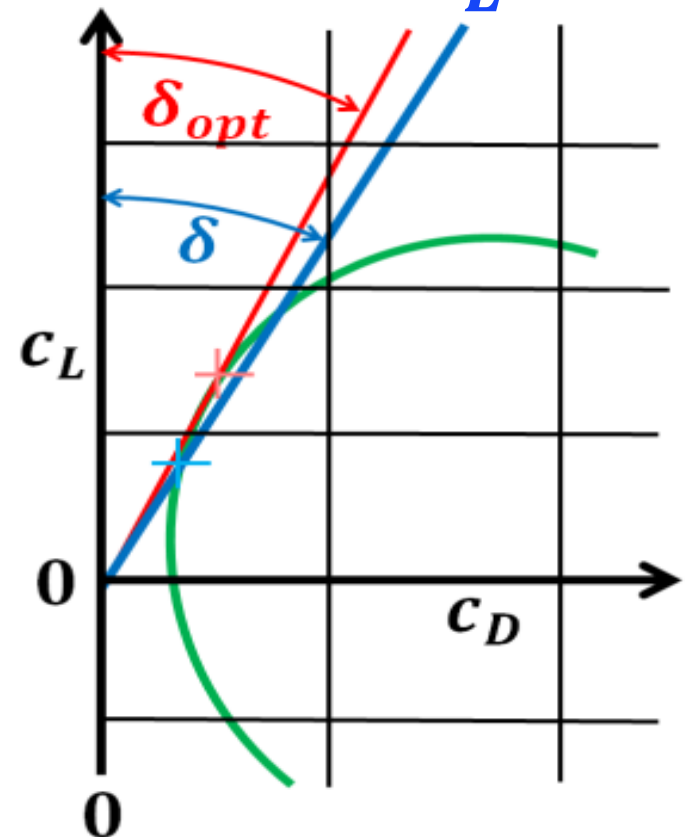
Úhel náběhu ι

V_L

$$\vec{L} = -M \cdot \vec{g}$$

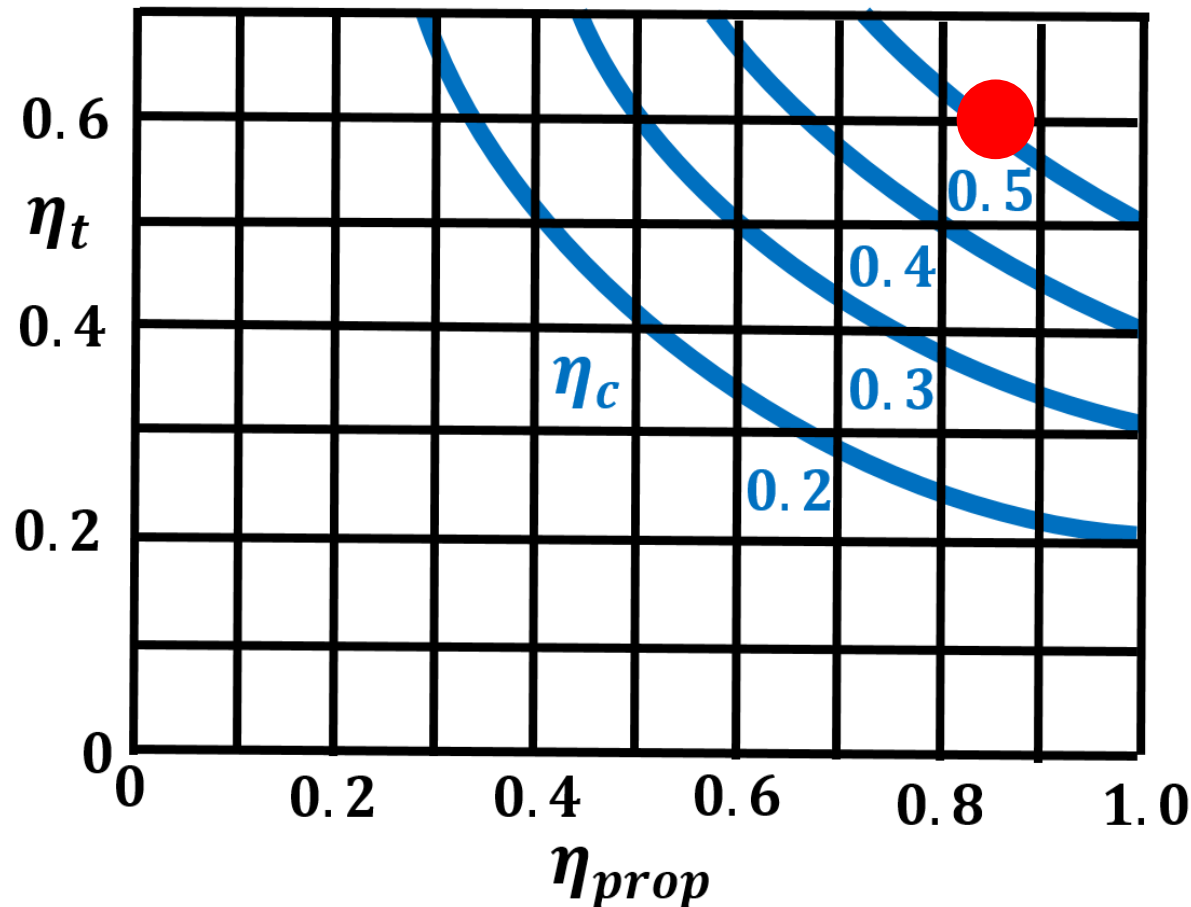
$$\vec{D} = -\vec{F}_T$$

$$N_M = \frac{M \cdot g \cdot V_L}{\eta_t \cdot \eta_{prop}} \cdot \operatorname{tg} \delta$$



- Fyzikální podmínky pohonu letadel

Dopravní energetická náročnost pohonu



Pro dosažení 50% celkové dopravní účinnosti pohonu letounu je nutno zajistit při 60% tepelné účinnosti motoru 85% propulsní účinnost pohonu

- **Fyzikální podmínky pohonu letadel**

Dopravní energetická náročnost pohonu

Potřebný dopravní mechanický výkon motoru pohonné jednotky letounu je přímo úměrný hmotnosti letounu, rychlosti letu a aerodynamické jemnosti letu, vyjádřené tangentou úhlu klesavého klouzavého letu v dané aerodynamické konfiguraci a nepřímo úměrný součinu tepelné a propulsní účinnosti.

Snižování potřebného dopravního výkonu motoru a snižování rozměrů a hmotnosti motoru pohonné jednotky pro požadovanou rychlost letu vyžaduje:

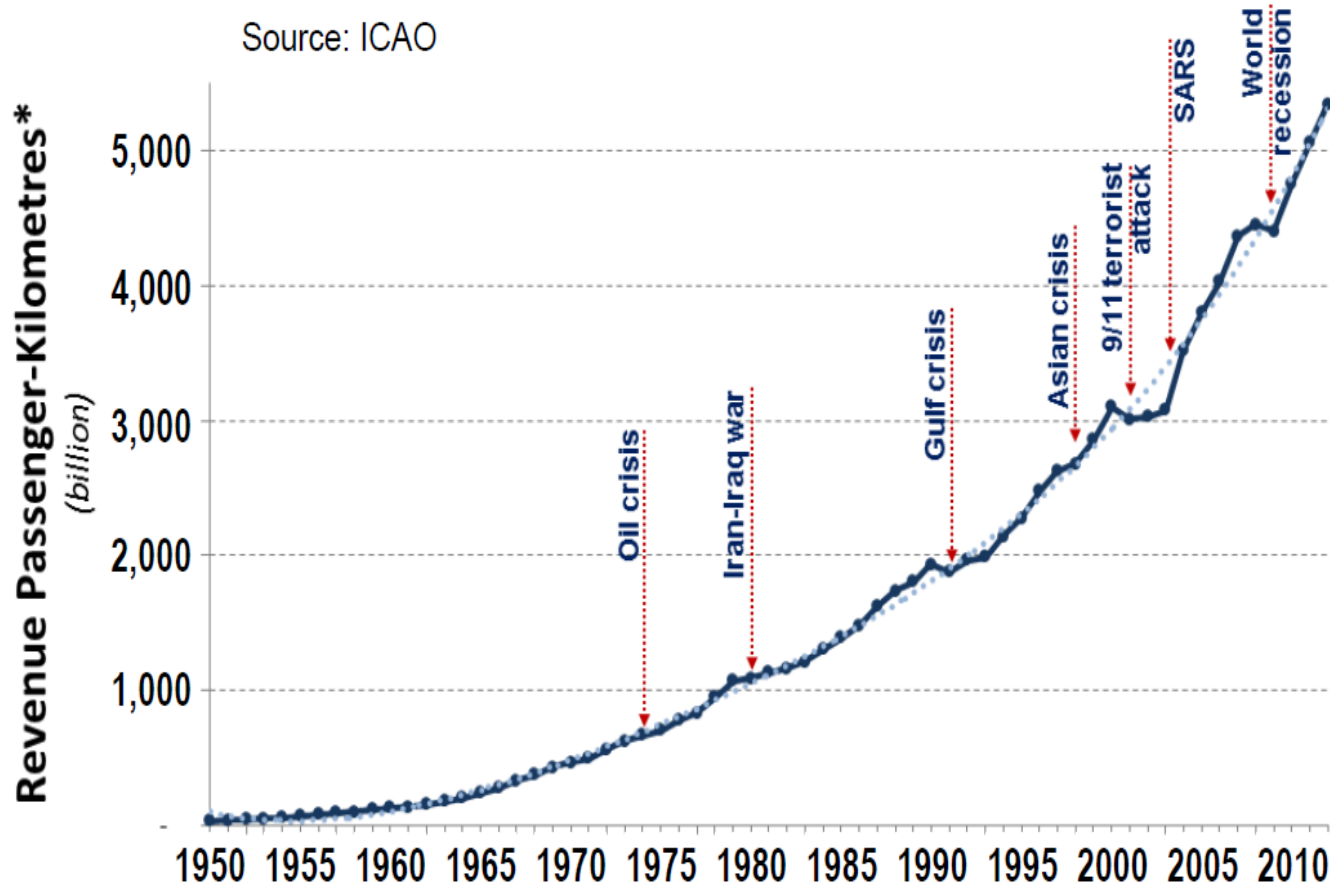
- **Snižování hmotnosti letounu**
- **Zvyšování aerodynamické účinnosti letounu**
- **Zvyšování tepelné účinnosti motoru**
- **Zvyšování propulsní účinnosti propulsního systému pohonné jednotky**

- Současný trend

Pokračování nárůstu přepravních výkonů v oblasti civilního letectví. **Počet cestujících v 10^9**

The World Aviation – 1950 to 2012

Source: ICAO



- Současný trend

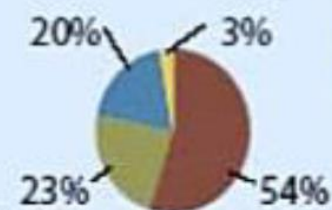
Globální dopravní výkony podle druhů dopravních prostředků. Počet cestujících v 10^{12}

LETECKÁ DOPRAVA A VYSOKORYCHLOSTNÍ KOLEJOVÁ DOPRAVA

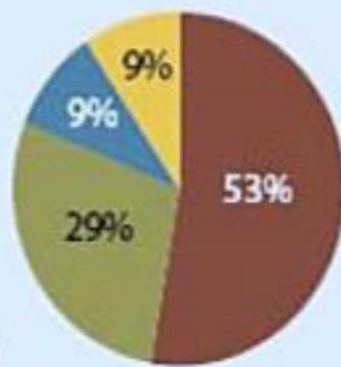
WORLD TRAFFIC VOLUME, measured in passenger-kilometers (pkm), will continue to balloon, with higher-speed transportation* gaining market share. By 2050, automobiles will supply less than two fifths of global volume.

**Includes high speed rail and air transportation*

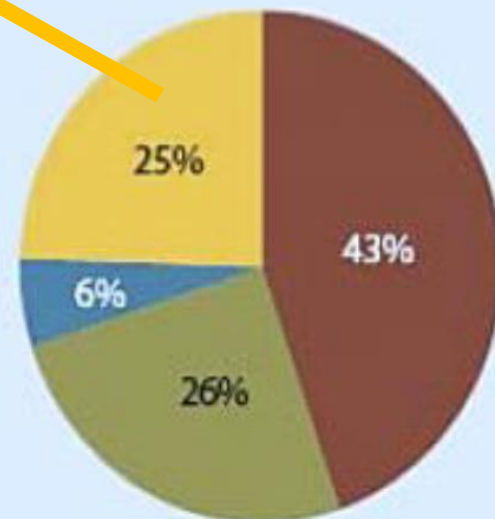
Source: Andreas Schafer and David Victor



5.5 TRILLION PKM
1960



23.4 TRILLION PKM
1990



53 TRILLION PKM
2020

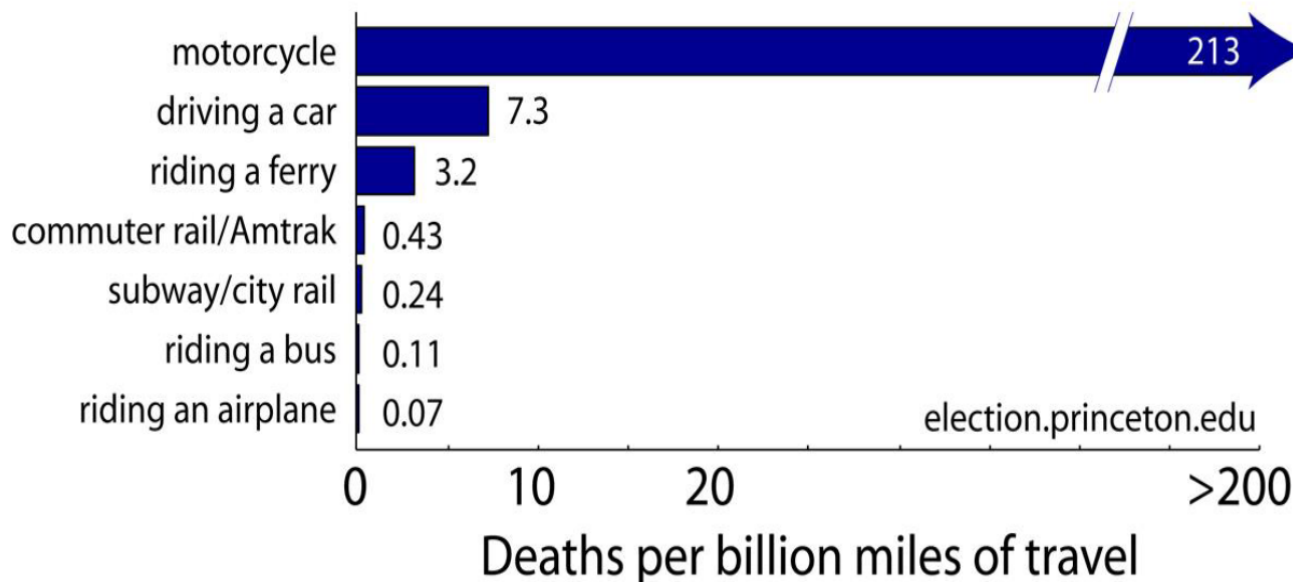
- **Současný trend**

Bezpečnost dopravy podle druhů dopravních prostředků.

Počet úmrtí na miliardu mil – letecká doprava 0.07

Jízda na motocyklu je více než 3000 nebezpečnější než cestování letadlem!

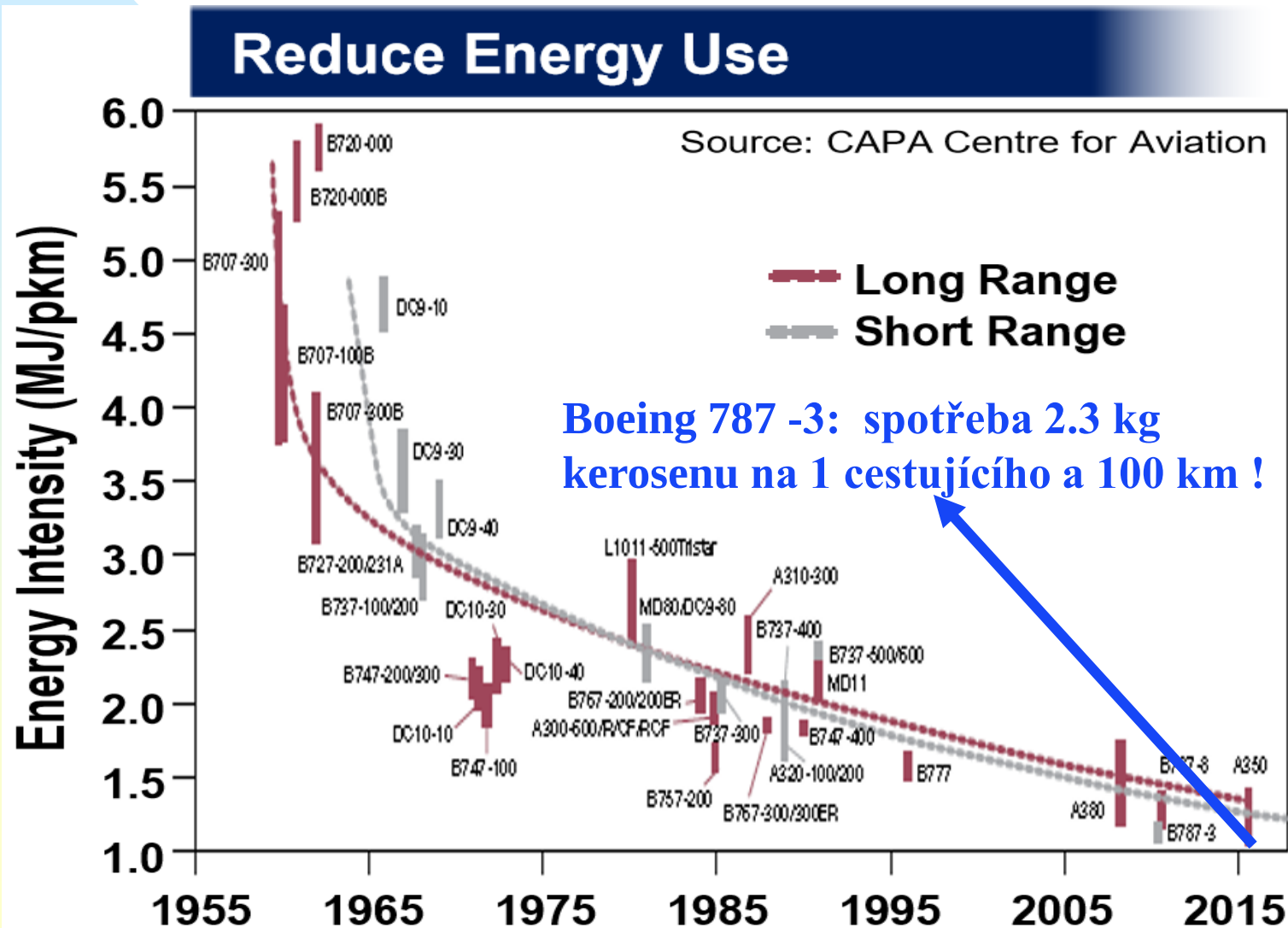
Air Transport is Extremely Safe and Reliable...



Data: Ian Savage, <http://faculty.wcas.northwestern.edu/~ipsavage/436.pdf>

- Současný trend

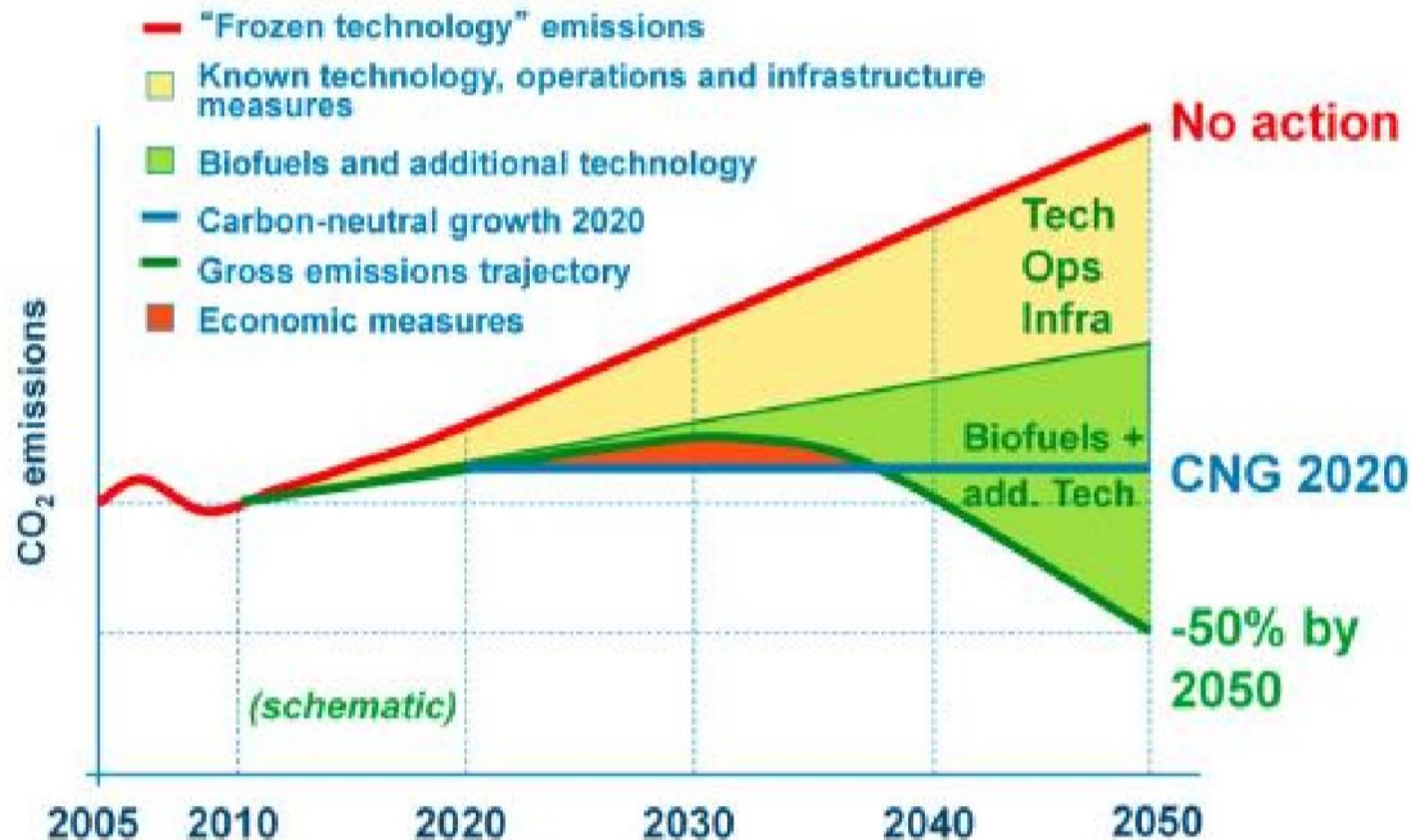
Spotřeba energie na jednoho cestujícího a 1 kilometr v
civilní letecké dopravě



- Současný trend

Různé scénáře vývoje produkce CO₂ do roku 2050 v
civilní letecké dopravě

Emissions reduction roadmap



- **Současný trend**

Uplatňování nových technologií 4. průmyslové revoluce

- **Zvyšování výkonových parametrů pohonných jednotek a snižování spotřeby paliva, emisí CO₂, škodlivých exhalací a hluku**

Konstrukční architektura letounu:

Drak (trup plus křídla) – motor

V principu stejná od bratří Wrightů!



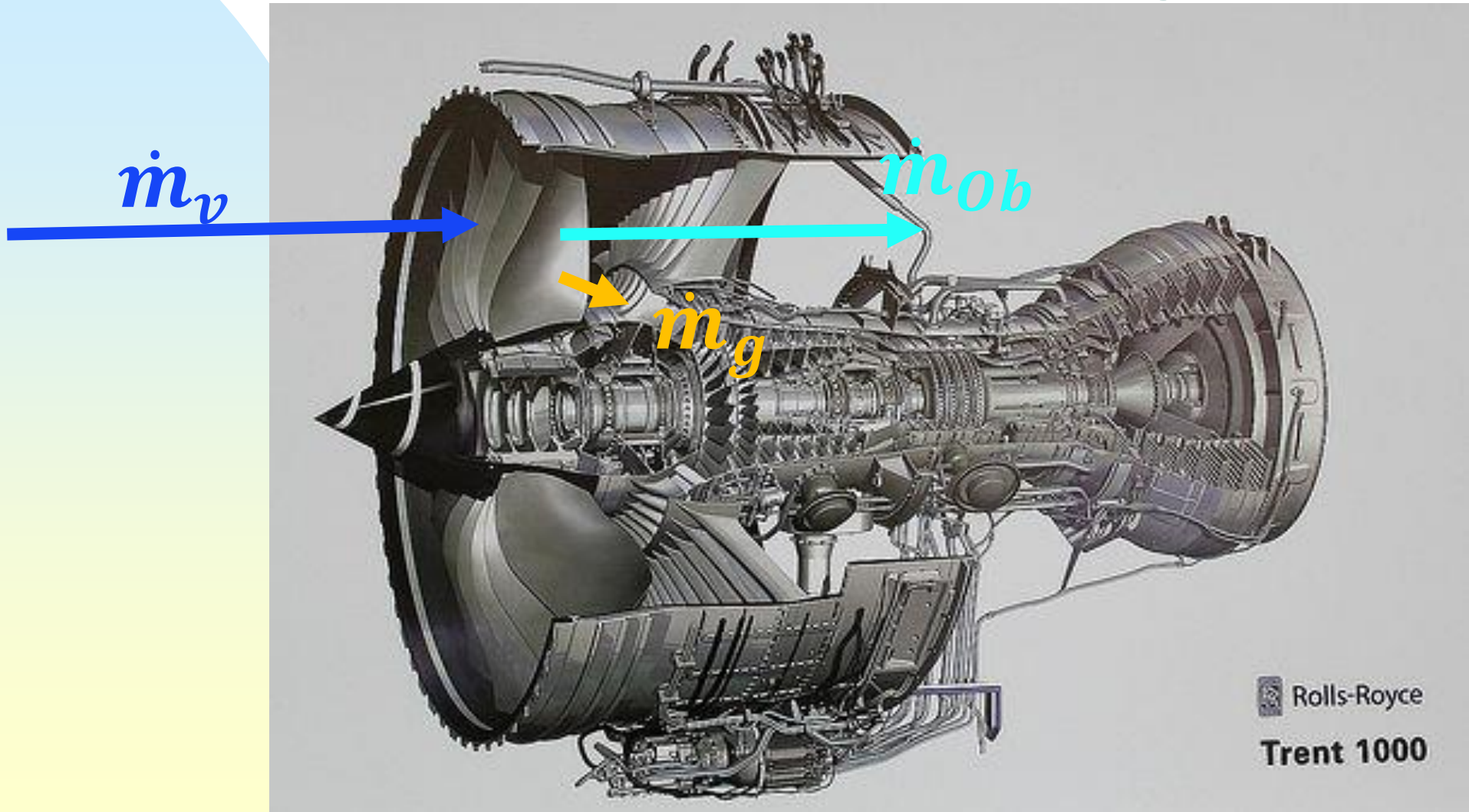
1910



2010

- Současný trend
Obtokový poměr

$$\mu_{ob} = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_g}$$



- Současný trend

Obtokový poměr

Zvyšování obtokového poměru nad hodnoty


$$\mu_{ob} = \frac{\dot{m}_{ob}}{\dot{m}_g} = 8 \text{ až do } 12 \Rightarrow \text{zvýšení } \eta_{prop}$$

A současně:

Zvyšování celkového tlakového poměru tepelného oběhu motoru

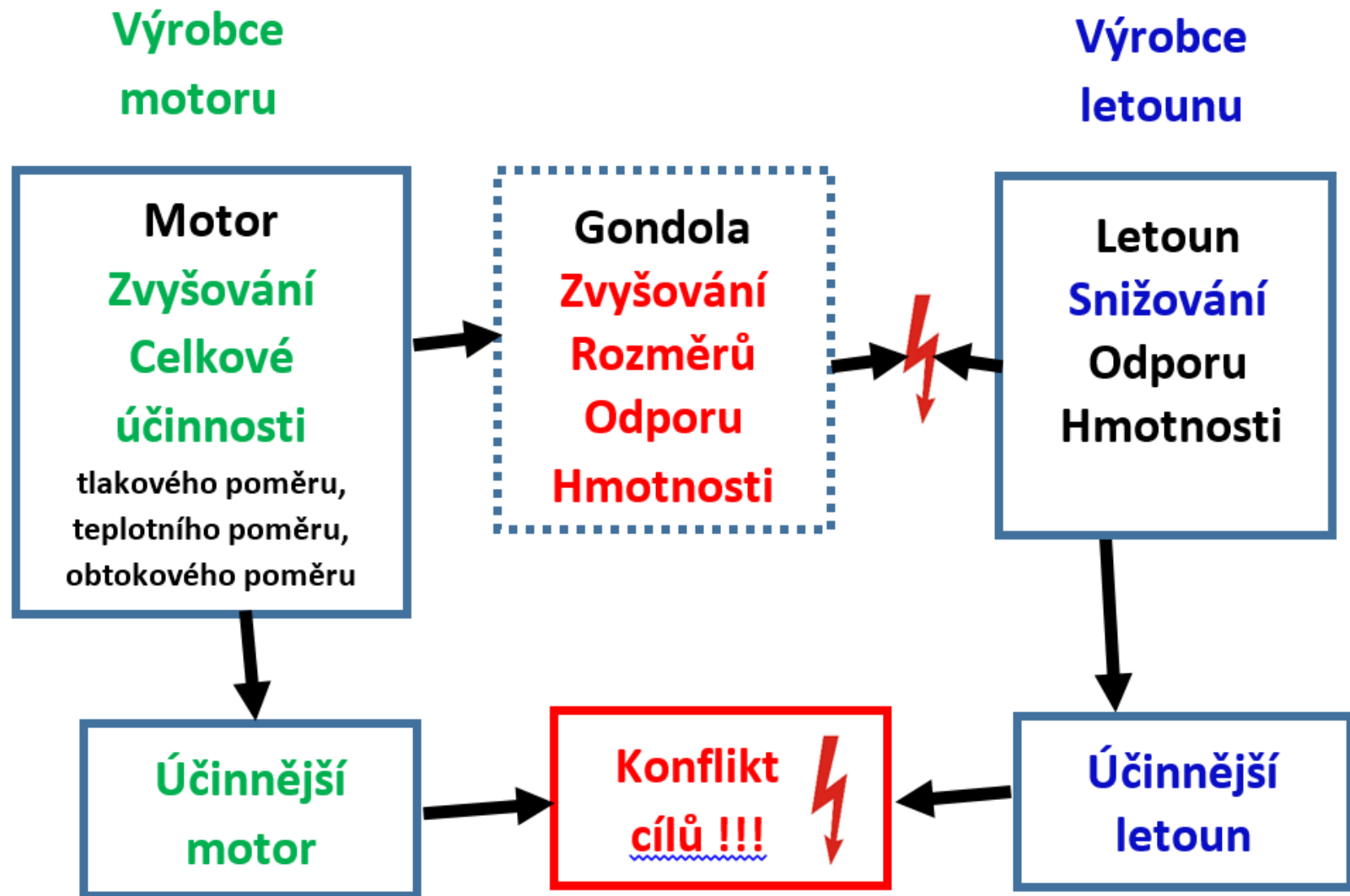

$$\pi_c = \pi_{nápov} \cdot \pi_K = \frac{p_{max}}{p_{h\infty}} = 40 \text{ až } 50 \Rightarrow \text{zvýšení } \eta_t$$

Zvyšování celkového teplotního poměru tepelného oběhu motoru


$$\tau_c = \frac{T_{max}}{T_{h\infty}} = 6 \text{ až } 7 \Rightarrow \text{zvýšení } \eta_t$$

- Současný trend

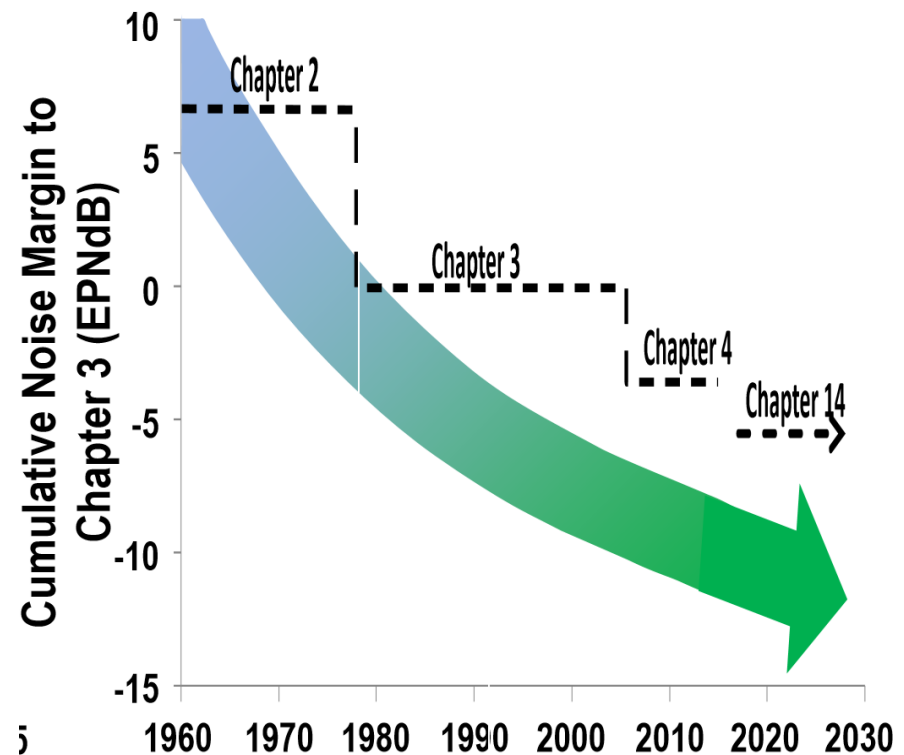
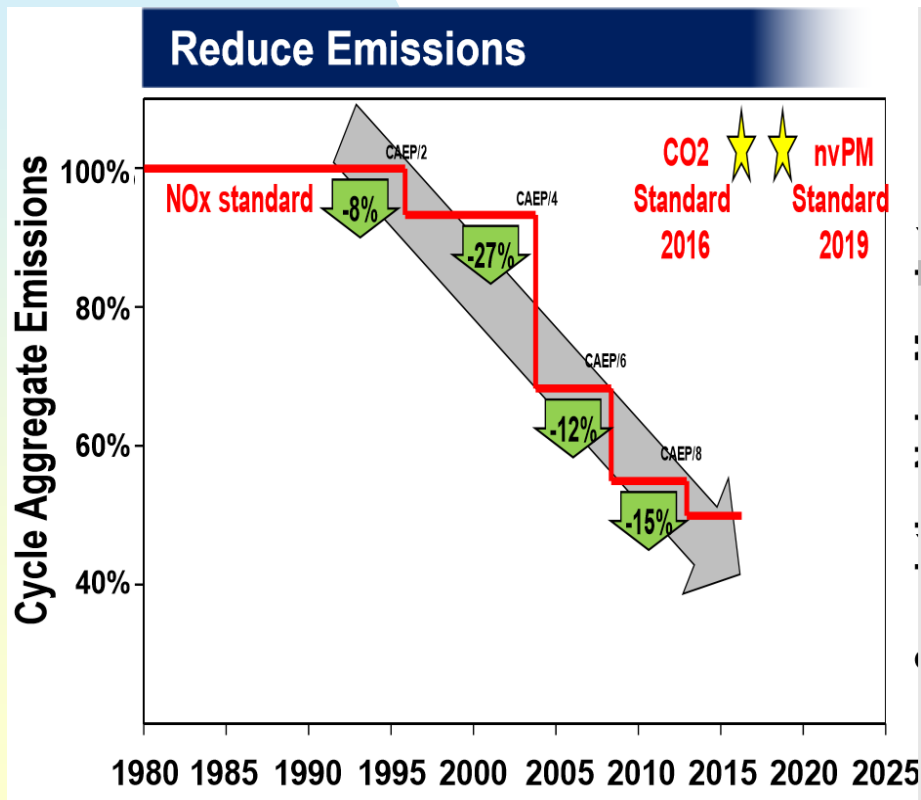
Obtokový poměr



- Současný trend

Další podmínky

Plnění stále přísnějších předpisů ICAO pro emise škodlivých exhalací a hluku



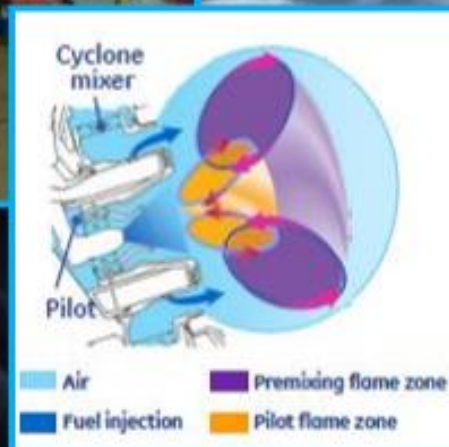
- Současný trend

Další podmínky

Plnění stále přísnějších předpisů ICAO pro emise škodlivých exhalací a hluku



**CHEVRONS TYPE
NOZZLE B787**



• Současný trend

Další podmínky

Odolnost motoru při střetu s ptáky a při námraze způsobené ledovými krystaly ve velkých výškách

Opportunities – Birds and Ice Crystals



- No indication on radar
- No visual contact with cloud
- No ice on fuselage and wings



Ice Crystals– Appdx D



Supercooled Drops– Appdx C



Adapted from original by Geoff Coulson, ES8

- Současný trend

Další podmínky

Odolnost motoru při námraze způsobené ledovými krystaly ve velkých výškách



- Současný trend
Konstrukční řešení

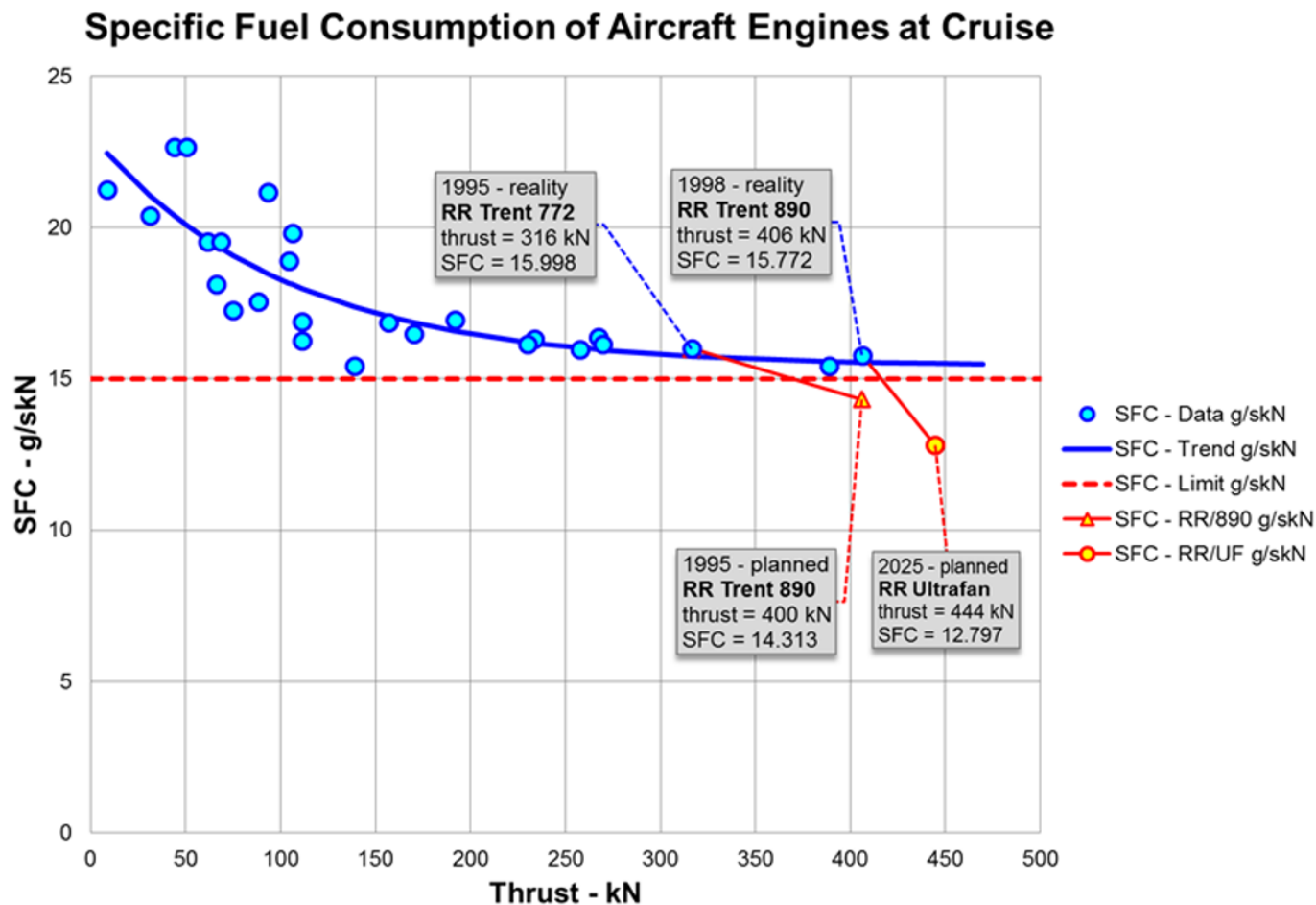


Physical Size of Modern Engines Is Impressive . . .

• Současný trend

Konstrukční řešení

Snižování měrné spotřeby paliva turbínového motoru zvyšováním účinnosti všech jeho částí



- Současný trend
Konstrukční řešení



**PROPFAN
VYSOKÁ
ODOLNOST
PŘI STŘETU
S PTÁKY
VYSOKÝ
OBTOKOVÝ
POMĚR
HLUK**

- **Současný trend**

Konstrukční řešení

Letouny s kolmým startem a přistáním



F_35B_BF_1FirstFlight.wmv

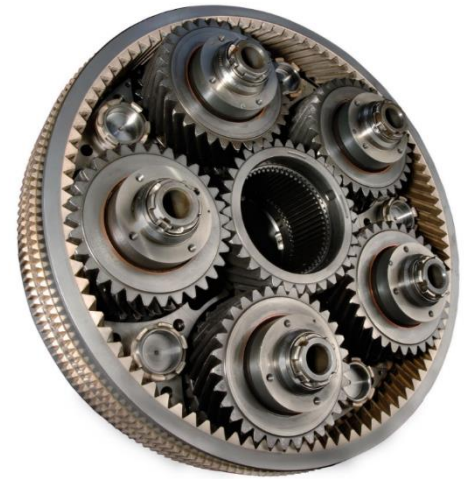


- **Současný trend**

Konstrukční řešení

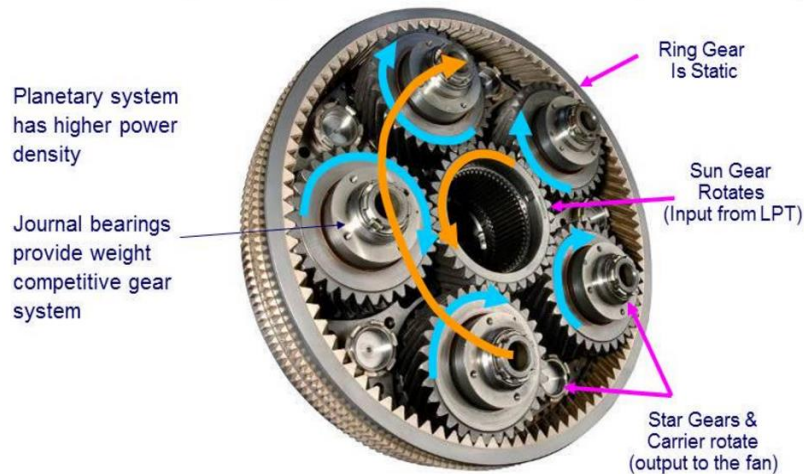
Pratt & Whitney PW1000G

Planetový reduktor s pěti satelity – větší počet satelitů umožněný použitím kluzných ložisek pro zajištění přenosu vysokého výkonu na ventilátor



Planetary Fan Drive Gear System (FDGS)

Enables higher gear ratios; more compact design

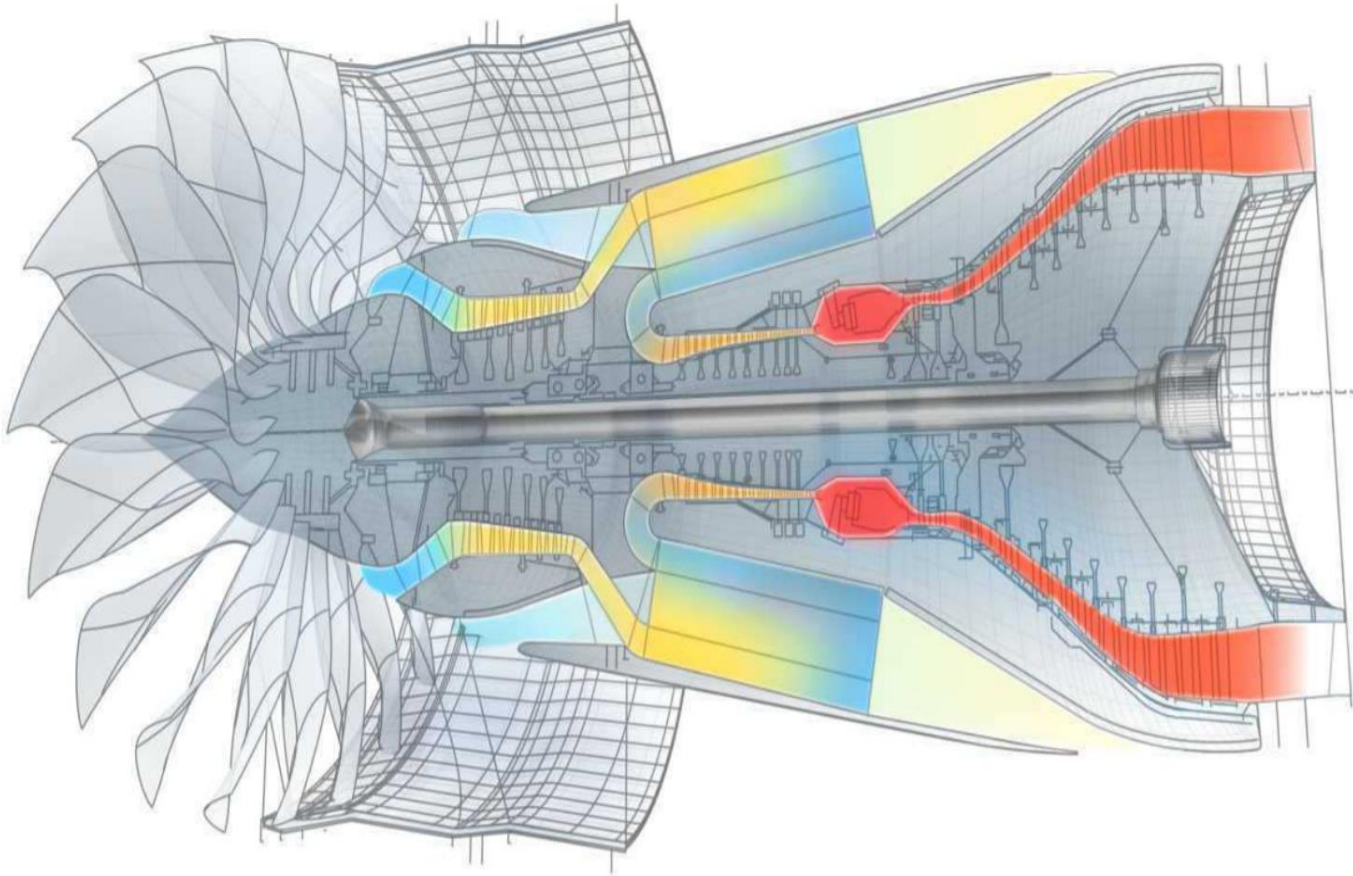


Higher gear ratios Improve Propulsive η



Minimalizace hmotnosti dvouproudového motoru snížením počtu stupňů výkonové turbíny a snížením otáček pohonu ventilátoru reduktorem

- **Současný trend**
Konstrukční řešení



Mezichlazením vzduchu za nízkotlakým kompresorem se sníží potřebný výkon pro kompresi vzduchu ve vysokotlakém kompresoru a tím se zvýší tepelná účinnost a výkon motoru

- **Současný trend**

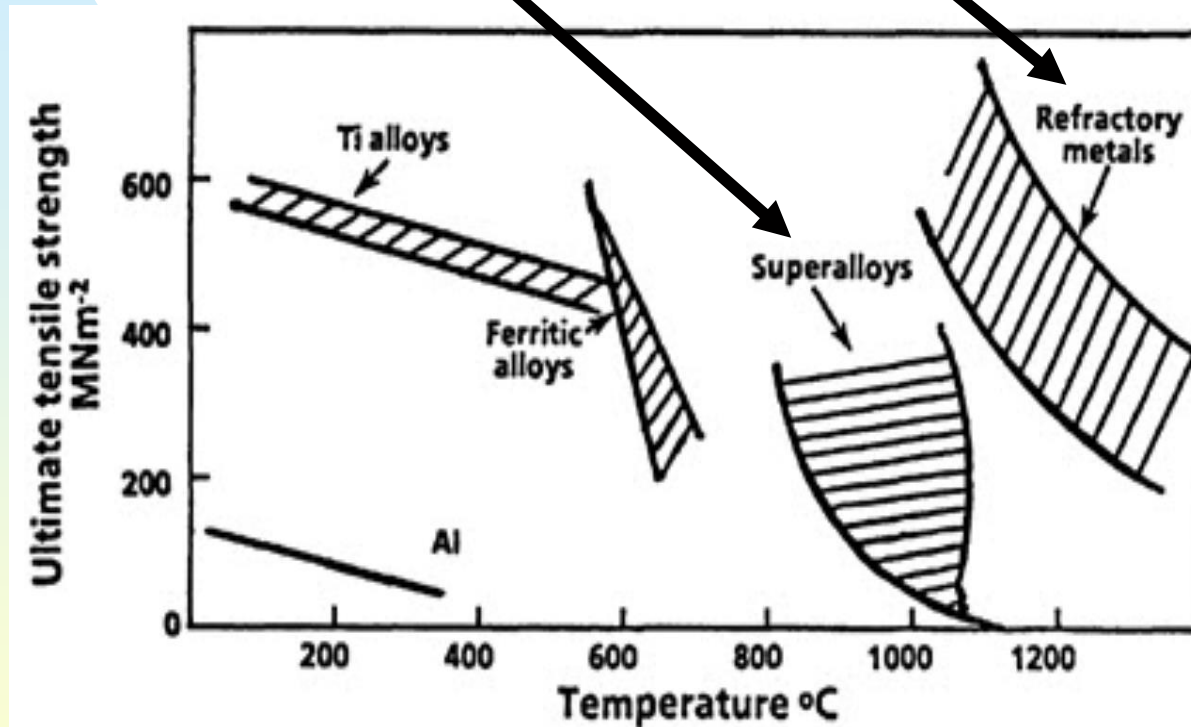
- **Nové materiály**

- **Vysoko-pevnostní a vysokoteplotní kovové materiály**
- **Vysokoteplotní kovové a keramické kompozitní materiály**
- **Vysoko-pevnostní vláknové kompozitní materiály**
- **Práškové kovové nano-materiály pro aditivní výrobní procesy**
- **Ultralehké kompozitní, pěnové a plastické materiály**
- **Vysokoteplotní keramické povlakové materiály**

- Současný trend

Nové materiály

Vysokoteplotní super-slityny a žárovevné slitiny na žárové součásti turbínových motorů

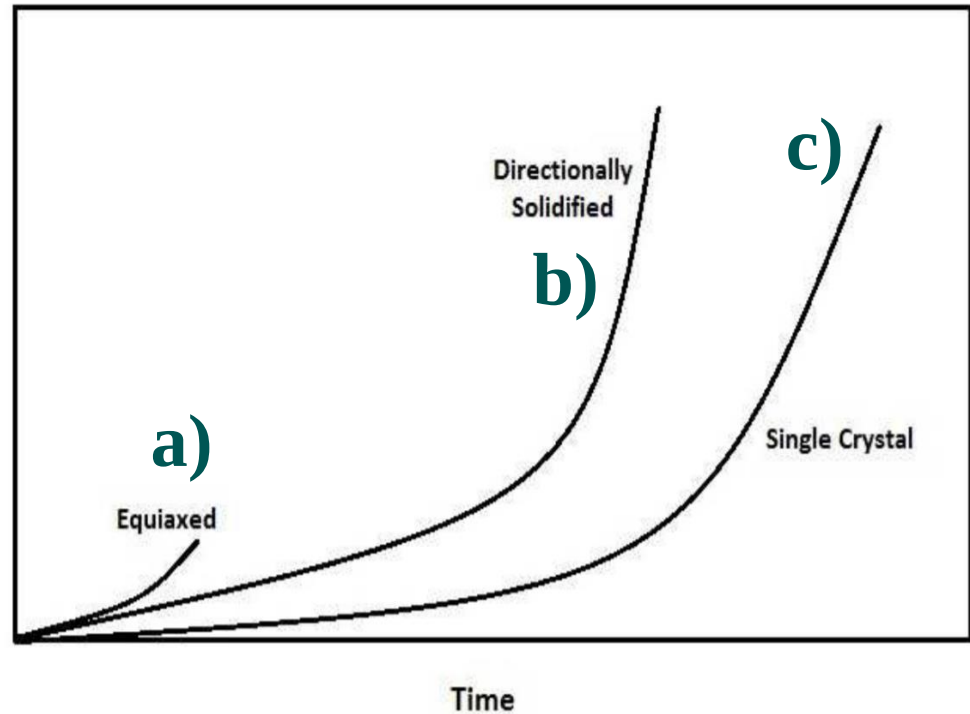
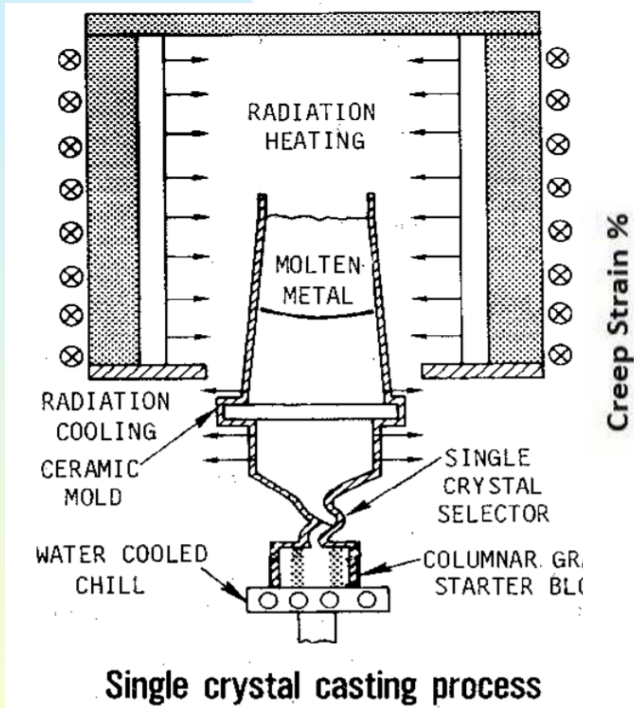


Pevnost v tahu materiálu v $MN \cdot m^{-1} = N \cdot mm^{-1}$ jako funkce teploty.

- Současný trend

Nové materiály

Přesné odlitky oběžných lopatek turbíny s řízenou krystalizací při tuhnutí

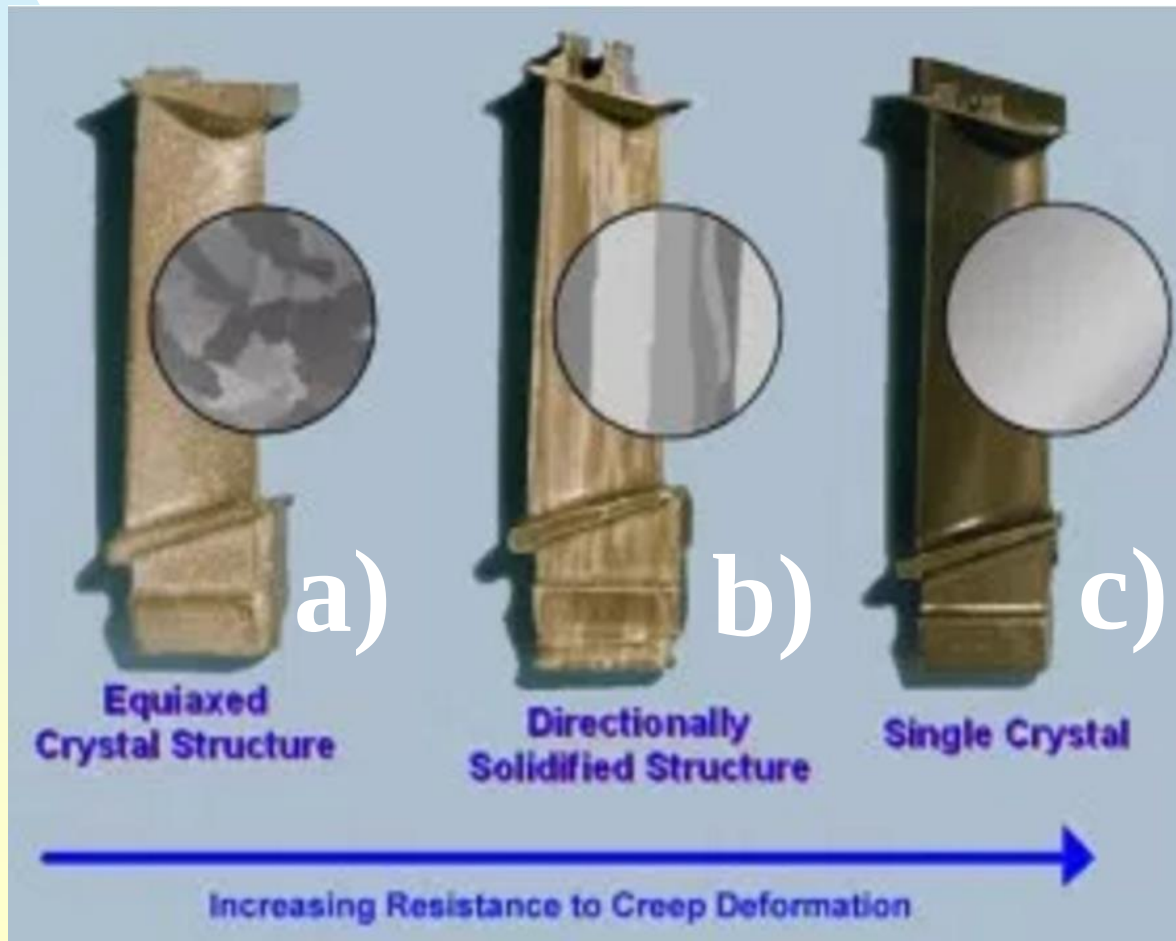


Rychlost tečení materiálu za vysokých teplot v závislosti na typu krystalické struktury a) neuspořádaná, b) směrově uspořádaná, c) monokrystalická

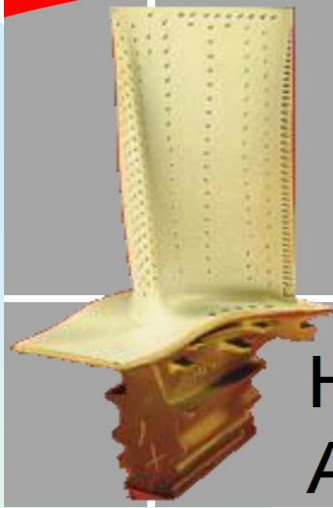
- Současný trend

Nové materiály

Přesné odlitky oběžných lopatek turbíny s různými typy krystalické struktury a) neuspořádaná, b) směrově uspořádaná, c) monokrystalická



- **Současný trend**
Nové materiály



**Vysokoteplotní žárovevné materiály lopatek turbín-
slitiny kovů:**

**Ni, Cr, W, Mo, Ti, Al,
Nb, Mo, Ta, Mo**

Pevnost slitiny až do 1100°C

**Jako monokrystal ve směru
hlavní osy až do 1200°C**



Low Conductivity TBC's

**Vysokoteplotní povlakové
materiály lopatek turbín-
Oxidy a karbidy prvků:**

Zirkon

Hafnium

Bor

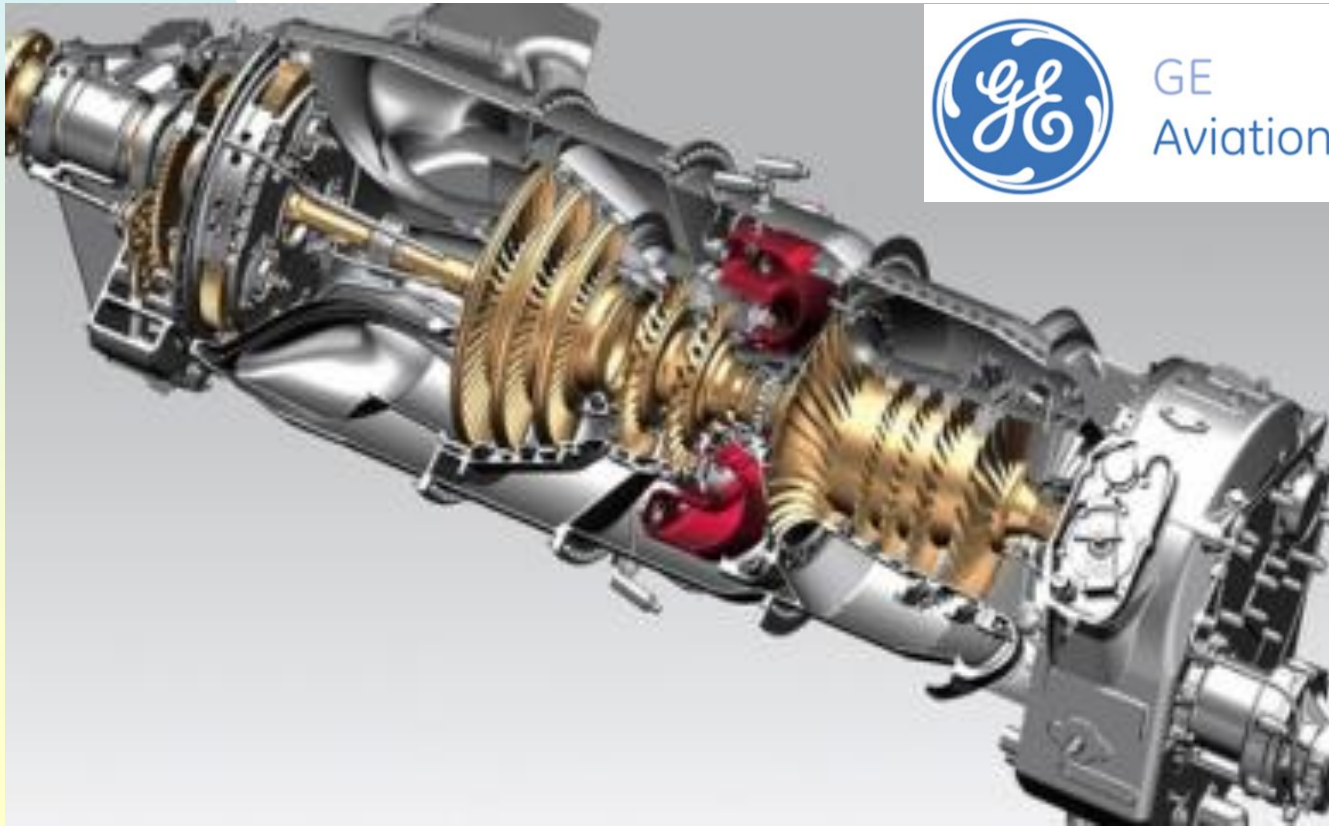
Wolfram

Tantal – bod tavení 4215°C !

- **Současný trend**
Additive manufacturing

General Electric Aviation Czech

Vývoj nového turbovrtulového motoru General Electric GE93 vyrobeného z větší části 3-D tiskem pro letoun Cessna Denali



GE
Aviation

- **Současný trend**
Additive manufacturing

Výroba tvarově velmi složitých součástí a celých konstrukčních celků je umožněna 3-D tiskem.

Nejnovější technologie dokonce umožňují realizovat konkrétní součást různými na sebe navazujícími materiály s ohledem na místní namáhání, teploty a další mechanické a fyzikální vlastnosti.

Forecast: Manufacturing Innovation ▼



Impossible shapes made easy

- Cooling flow schemes enabled



Materials compositions

- Changing materials within a part
- Enabling intricate repairs

Additive revolution will stimulate advancement in conventional manufacturing technology

- Současný trend
Additive manufacturing

Additive Manufacturing Will Benefit Small **Parts** First



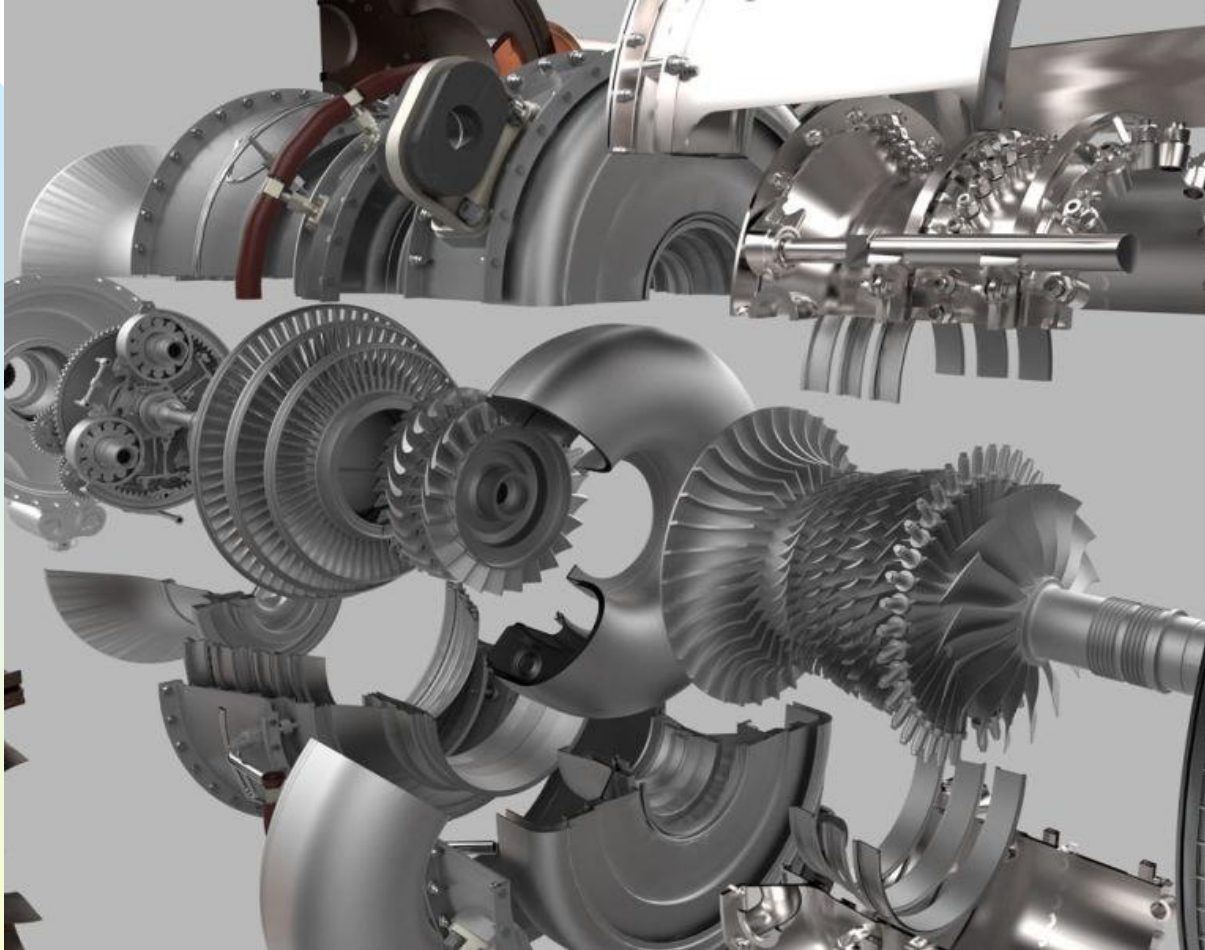
Enabling Intricacies Not Possible Before

- **Současný trend**
Additive manufacturing



CESSNA DENALI firmy TEXTRON s motorem General Electric GE 93

- **Současný trend**
Additive manufacturing



Použitím 3-D tisku se sníží počet součástí vzduchové cesty motoru z původního počtu 855 na pouhých 12

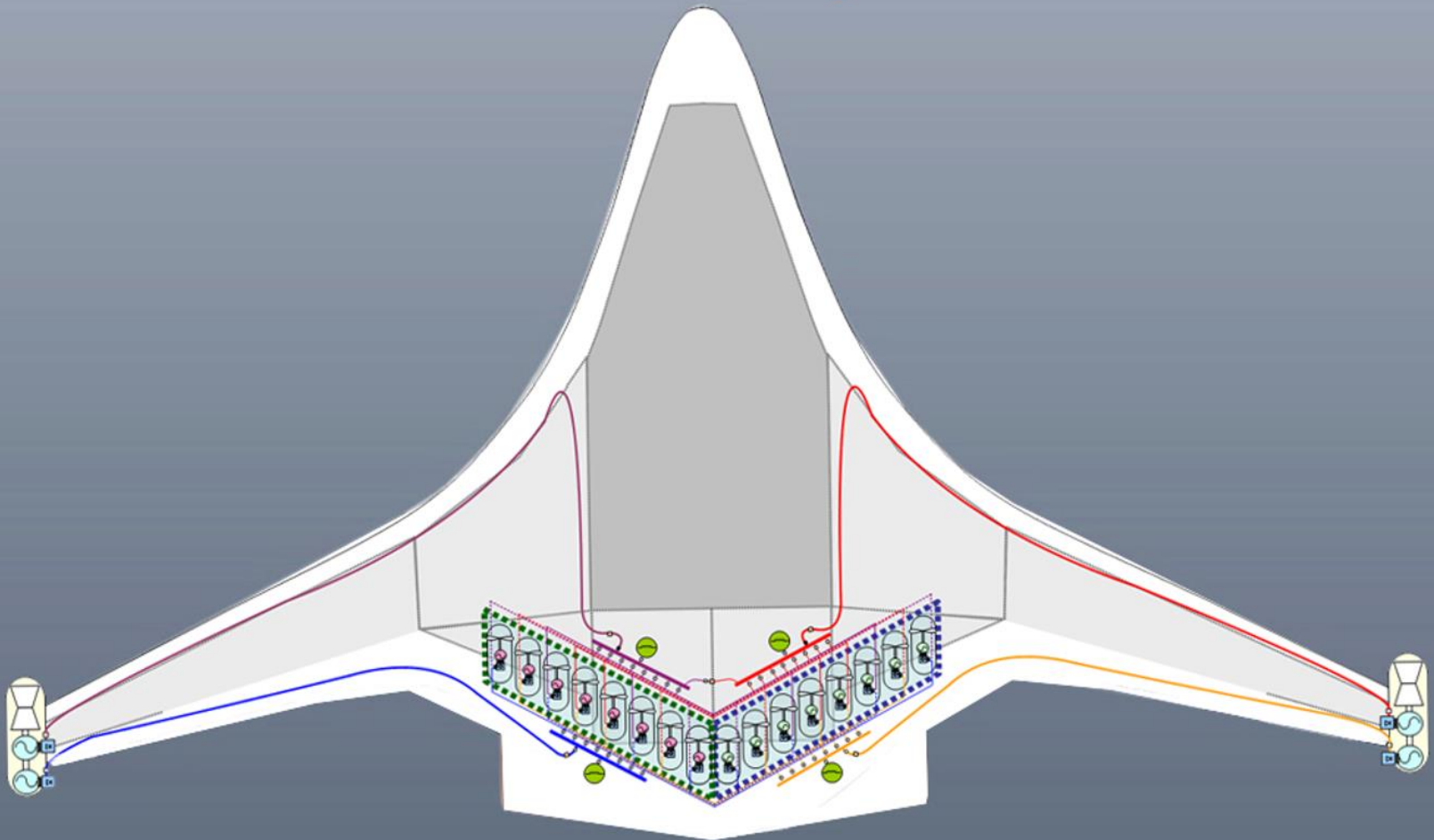
- Vize do budoucnosti
Blended wing-body

Aplikace konstrukční architektury tak zvaného samokřídla pro velkokapacitní dopravní letouny



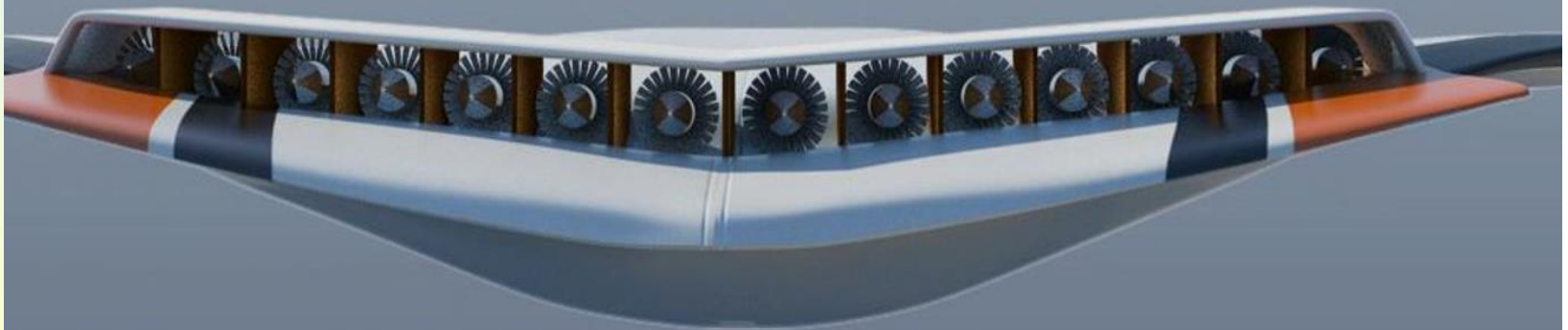
- Vize do budoucnosti
Distributed propulsion

The Pursuit of Advanced Technologies



- Vize do budoucnosti
Distributed propulsion

The Pursuit of Advanced Technologies

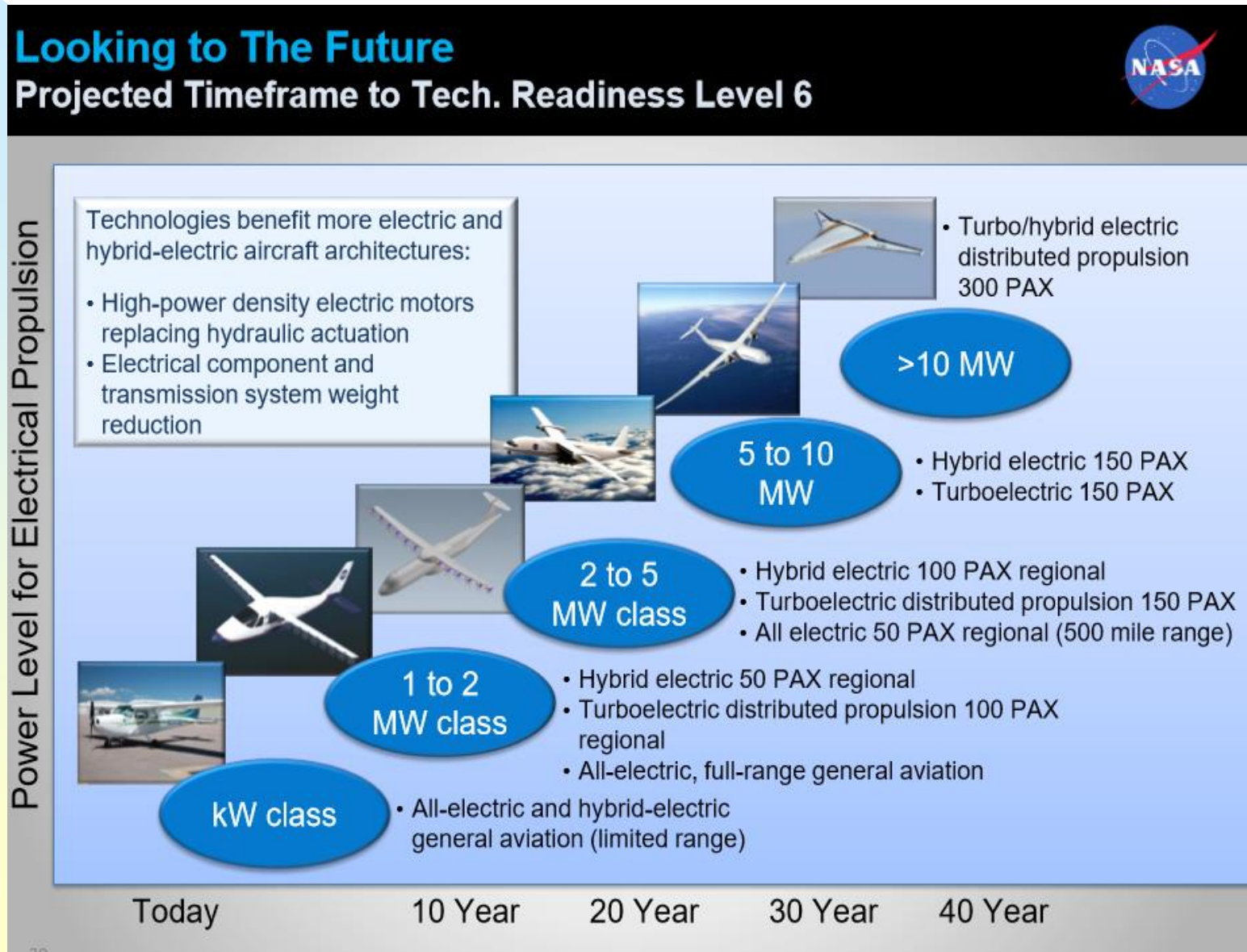


- Vize do budoucnosti
Electrical propulsion



- Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

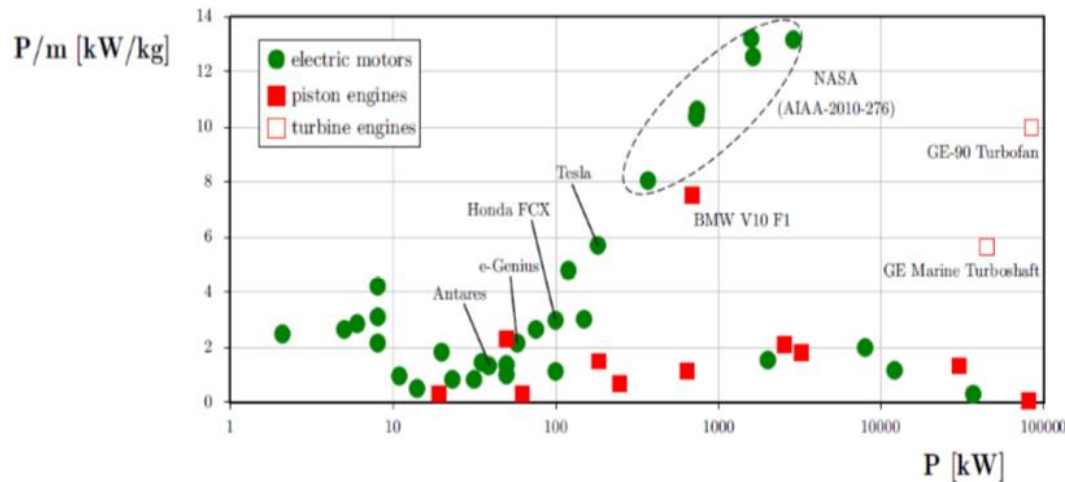


- Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

Electric Motors/Generators

- Large capacity light weight electric motors from current 2-4 kW/kg to 14 (7x increase) by 2020



Specific power density of current piston engines (squares) and electric motors (circles).

Ref: NATO-AVT 209-09, 'Electric Flight – Potential and Limitations' by M. Hepperle, German Aerospace Center, Jan. 2013

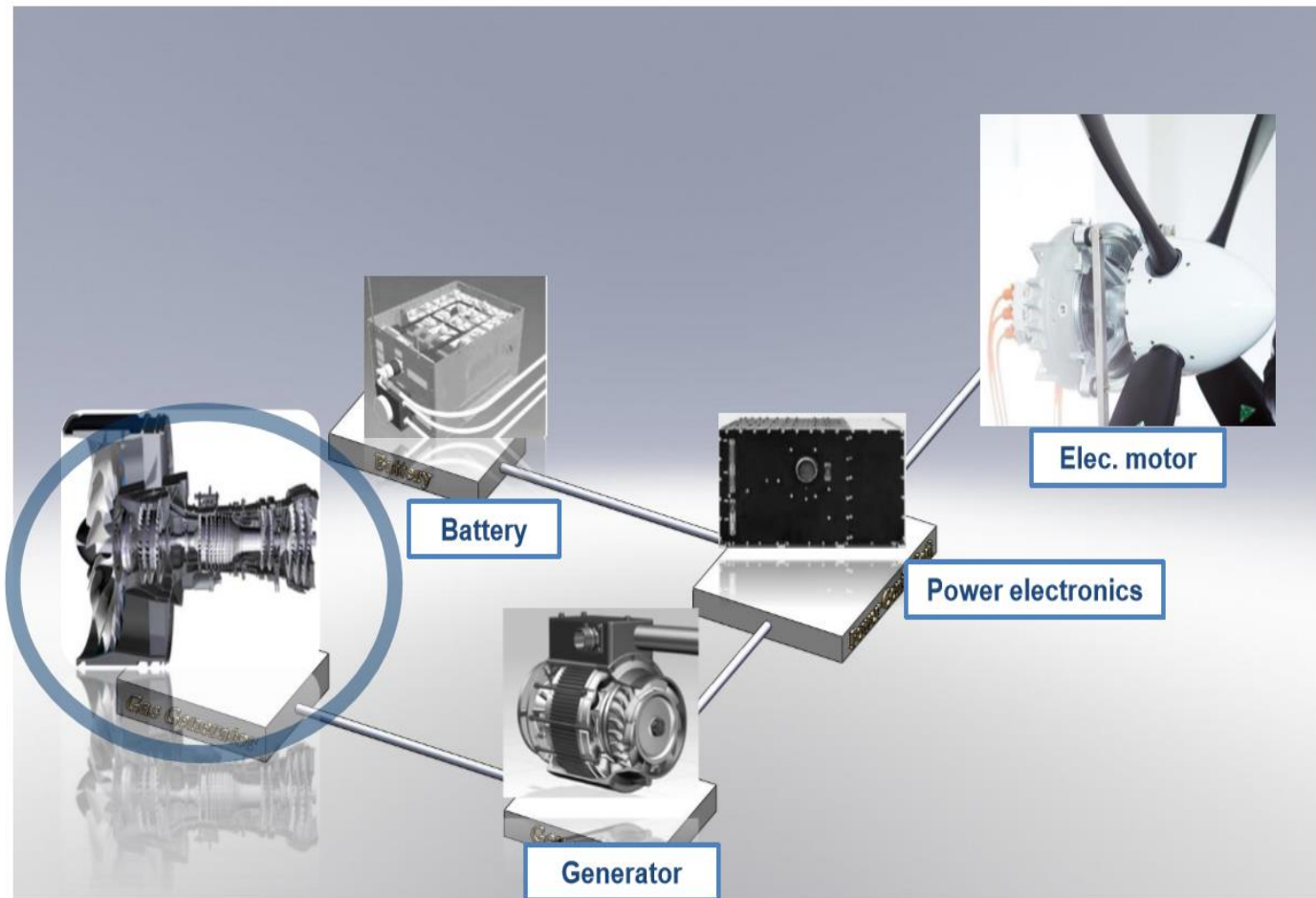
Ref: March 25, 2015 Press release "Siemens unveils electric motor for aircraft"



2500RPM, 50kg, 260kW (5kW/kg)
Siemens motor for electric aircraft

- Vize do budoucnosti
Electrical propulsion

Major components of an hybrid propulsion system

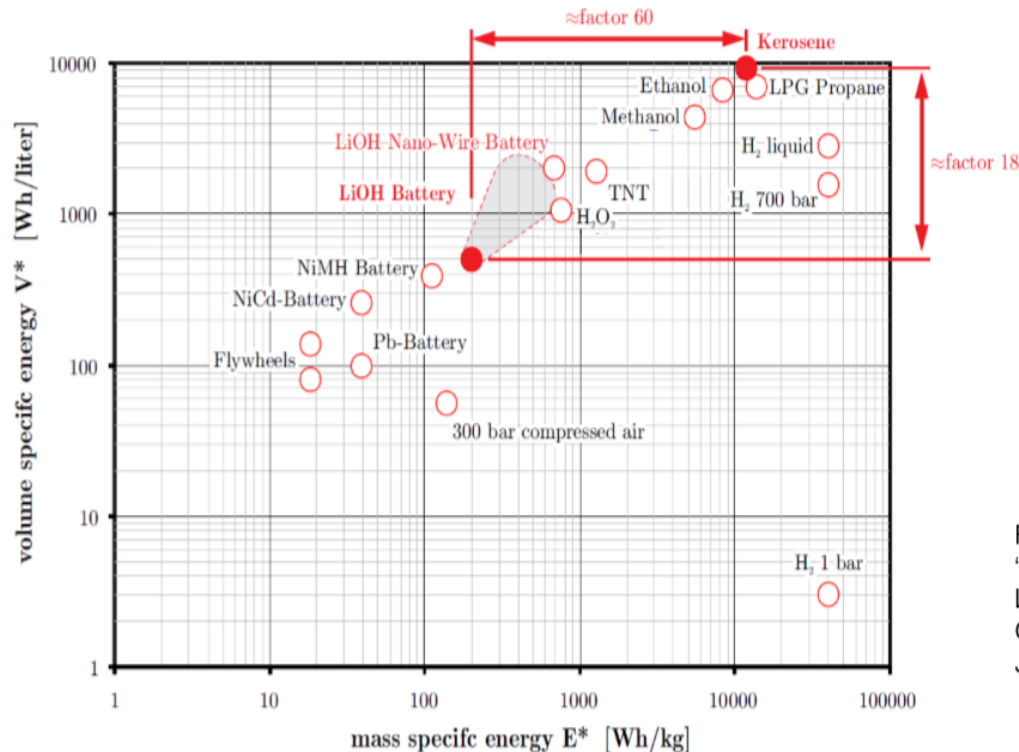


• Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

Batteries

- Current gravimetric energy density needs to grow:
 - 10x for regional aircraft applications
 - 50x for large scale commercial applications



Ref: NATO-AVT 209-09,
'Electric Flight – Potential and
Limitations' by M. Hepperle,
German Aerospace Center,
Jan 2013

- Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

Innovation through in-flight experience, with DGAC support

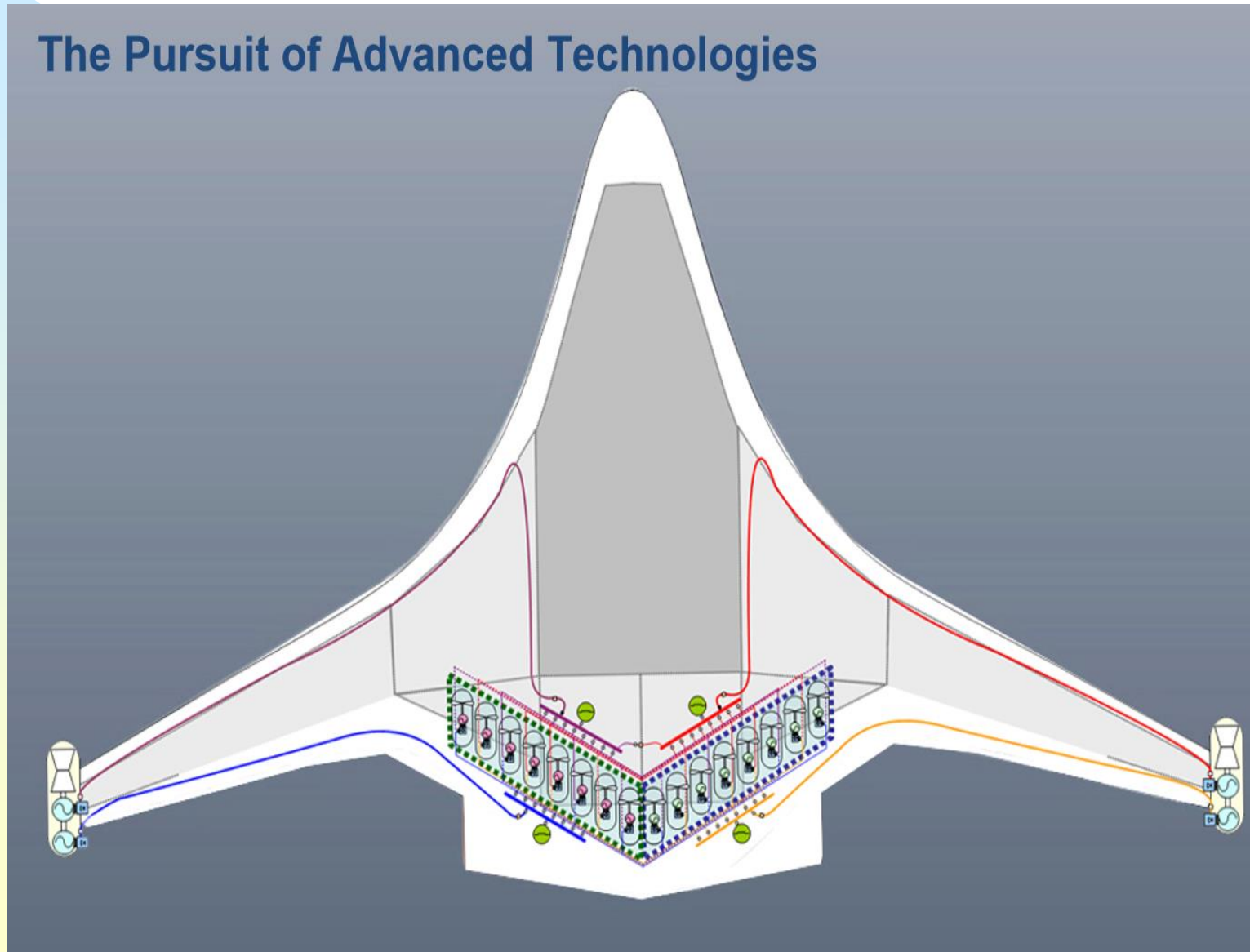


E-Fan
100th Flight
performed on
June 19th,
2015

E-Fan
Channel
Crossing July
10th, 2015

AIRBUS
GROUP

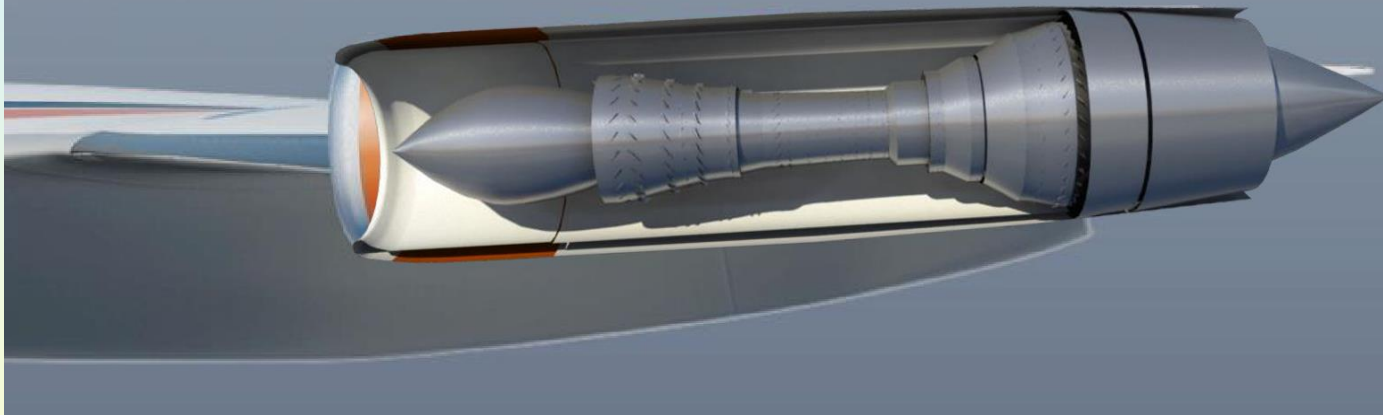
- Vize do budoucnosti
Electrical propulsion



- Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

The Pursuit of Advanced Technologies



Turbínový motor s elektrickým generátorem spalující kapalný vodík, který zajišťuje supravodivost vodičů propojujících vysokootáčkový elektrický generátor s elektromotory pohánějícími ventilátory distribuovaného pohonného systému.

• Vize do budoucnosti

Electrical propulsion

Elektrický pohon letadel představuje větší změnu než přechod od pohonu pístovým motorem k turbínovému. Výrazně účinnější, spolehlivější, nezávislý na velikosti, méně hlučný, umožňující integraci pohonu s drakem.

Electric Propulsion is a Bigger Change than Going from Piston to Turbine Engines



Electric Propulsion Penalties

Energy Storage Weight (60x worse than aviation fuel)
Energy Storage Cost (Tesla 65 kWhr battery is ~\$25,000)
Certification?



Electric Propulsion Benefits

~2x efficiency of turbine engines, 3-4x efficiency of piston engines
High efficiency across 50% rpm range
6x the motor power to weight of piston engines
None air breathing - No power lapse with altitude or on hot days
Extremely Quiet
Zero vehicle emissions
10x lower energy costs



Electric Propulsion Integration Benefits

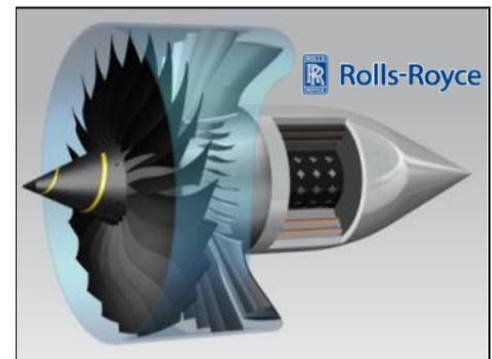
Scale independent
Power to weight and efficiency don't degrade at smaller sizes
Extremely compact
High Reliability – Few moving parts

Hydrocarbon fuel cost has tripled in constant year dollars since 1999 with constant energy density, while batteries have tripled in energy density.

3

Abstract from:
"Misconceptions of Electric Aircraft and their Emergent Aviation Markets"

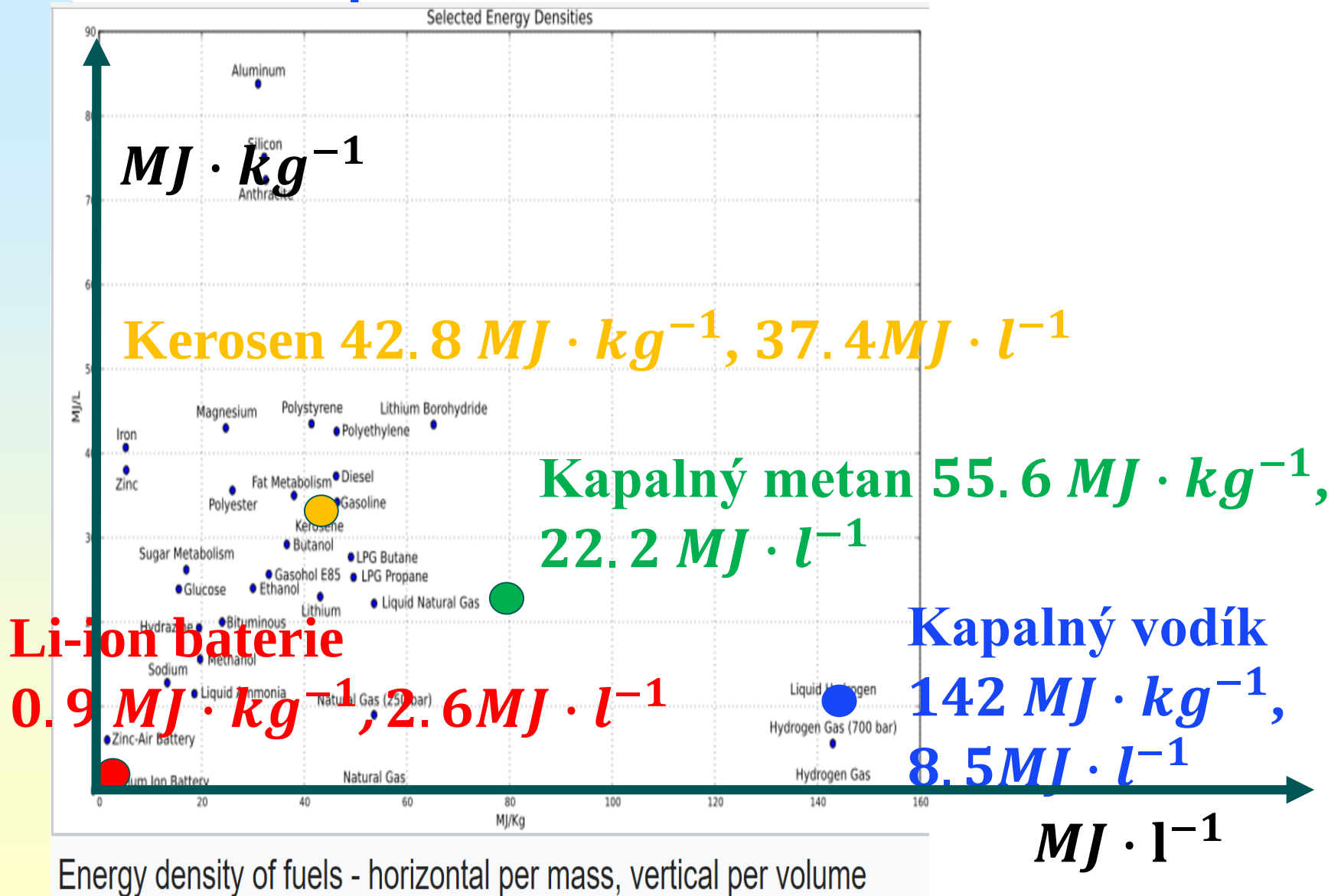
Mark D. Moore and William J. Fredericks,
AIAA SciTech, Jan 12-15, 2014



AIRBUS
GROUP

- Vize do budoucnosti

Alternativní paliva



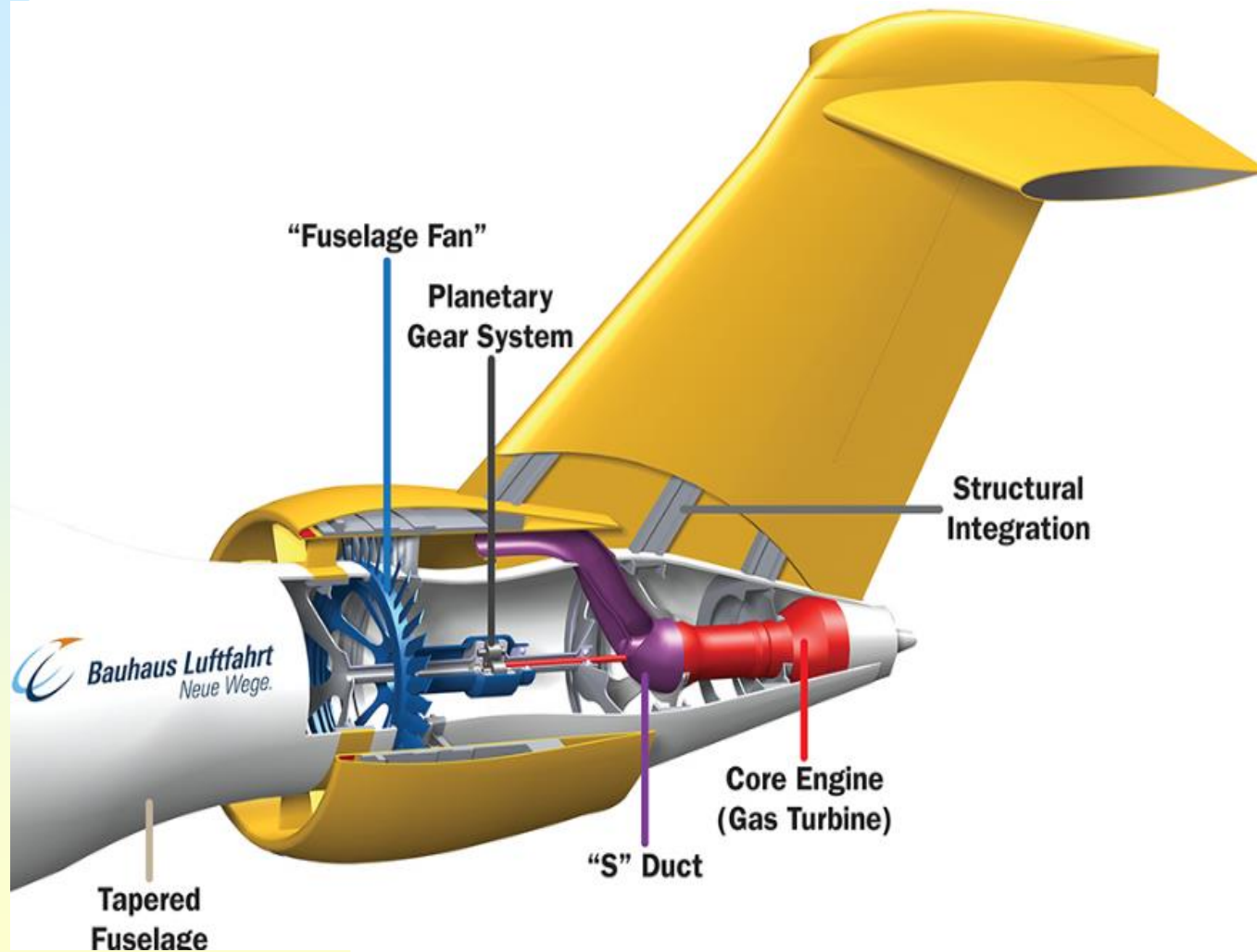
- Vize do budoucnosti
Alternativní paliva

HYDROGEN POWERED CRYOPLANE



EU PROGRAMME

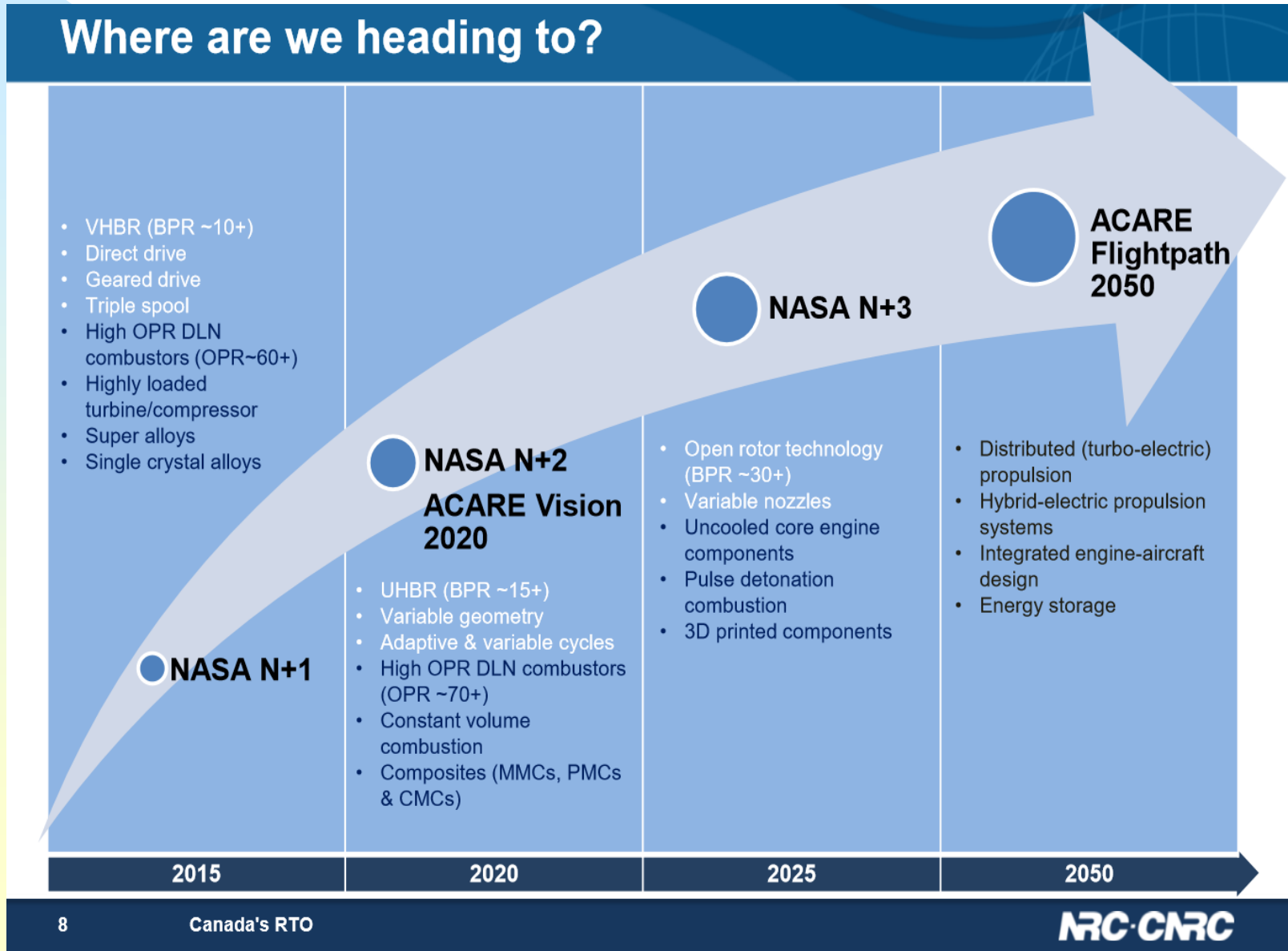
- Vize do budoucnosti
Integrace draku a pohonu



- Vize do budoucnosti
Integrace draku a pohonu



• Kam směřujeme ?



Děkuji za pozornost Otázky?

