



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

LETECKÝ ÚSTAV

INSTITUTE OF AEROSPACE ENGINEERING

ASPEKTY OVLIVŇUJÍCÍ TRENDY V TECHNOLOGII PROVOZU LETADLOVÉ TECHNIKY CIVILNÍHO LETECTVÍ

ASPECTS IMPACT TRENDS IN THE OPERATION TECHNOLOGY OF CIVIL AVIATION AIRCRAFT

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jan Korytář

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.

BRNO 2021

Zadání diplomové práce

Ústav: Letecký ústav
Student: **Bc. Jan Korytář**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Letecký provoz
Vedoucí práce: **Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.**
Akademický rok: 2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem V

Aspekty ovlivňující trendy v technologii provozu letadlové techniky civilního letectví

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V průběhu vývoje civilního letectví se postupně měnily požadavky na technicko provozní charakteristiky letadlové techniky. Tyto změny je neustále nutno sledovat a vyhodnocovat pro zajištění provozní efektivity a včasné reakce v konstrukční a výrobní oblasti.

Cíle diplomové práce:

Cílem je provést analýzu požadavků na technicko-provozní charakteristiky letadlové techniky, a vyhodnocení jejich vlivu na vývoj letadlové techniky, včetně predikce současného vývoje.

Seznam doporučené literatury:

Zákon o civilním letectví č.49/1997 Sb.

Letecký předpis L6, Letecká informační služba ČR, 2019.

Letecký předpis L8, Letecká informační služba ČR, 2018.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

.....

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

.....

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

ABSTRAKT

Cílem práce je popis vlivů na letecký provoz a leteckou techniku. První část práce je věnována stručnému popisu rozvoje jednotlivých technických parametrů a výkonů letadel od 20. let 20. století po současnost s posouzením působících vlivů. V druhé části práce je vliv současných požadavků, v třetí části celkový pohled na budoucí rozvoj konstrukce a technologie pro úspornější a ekologičtější leteckou dopravu a ve čtvrté části je vytvořen seznam letadel a jejich technických a technologických parametrů, na jejichž základě je provedena statistická analýza a vyhodnocení vybraných vlivů.

KLÍČOVÁ SLOVA

Technologické parametry, emise, hlučnost, ropná krize, konstrukce, samokřídlo, palivo, elektromotor, dvojitý tubus, hybrid, IATA, znečištění, skleníkové plyny, spotřeba, biopalivo.

ABSTRACT

The aim of the work is a general description of the effects on air traffic and aircraft. The first part of the work is devoted to a brief description of the development of individual technical parameters and performance of aircraft from the 1920s to the present with an assessment of the effects. The second part of the work is about the influence of current requirements, the third part is a general view of the future development of construction and technology for more economical and environmentally friendly air transport and the fourth part, a list of aircraft and their technical and technological parameters is created, on the basis of which a statistical analysis and evaluation of selected influences is performed.

KEYWORDS

Technological parameters, emissions, noise, oil crisis, construction, wing, fuel, electric motor, double tube, hybrid, IATA, pollution, greenhouse gases, consumption, biofuel.

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KORYTÁŘ, Jan. *Aspekty ovlivňující trendy v technologii provozu letadlové techniky civilního letectví* [online]. Brno, 2022 [cit. 2021-07-13]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/132948>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jiří Chlebek.



ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem, zpracoval jsem ji samostatně pod vedením Ing. Jiřího Chlebka Ph.D. a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 13. července 2021

Jan Korytář

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych rád poděkoval své rodině za podporu při studiu. Dále bych chtěl poděkovat Ing. Jiřímu Chlebkovi, Ph.D. za rady a pomoc při zpracovávání mé diplomové práce.

OBSAH

Obsah	- 13 -
Úvod	- 17 -
1. Vývoj letecké dopravy	- 18 -
1.1 Mezinárodní spolupráce	- 18 -
1.1.1 Mezinárodní vládní organizace	- 20 -
1.1.2 Mezinárodní nevládní organizace	- 21 -
1.2 Technologický vliv	- 22 -
1.2.1 Letecké motory	- 22 -
1.2.2 Letecké materiály	- 26 -
1.2.3 Systémy řízení letadla	- 30 -
1.3 Ekonomické vlivy	- 31 -
1.3.1 Ekonomické výkyvy	- 33 -
1.3.2 Nízkonákladová letecká společnost	- 37 -
1.4 Další významné vlivy	- 40 -
1.4.1 Letecké únosy	- 40 -
1.4.2 Letecké katastrofy	- 42 -
1.4.3 Přírodní katastrofy	- 45 -
2. Současné legislativní požadavky na letadlovou techniku pro leteckou přepravu	- 49 -
2.1 Legislativa	- 49 -
2.2 Hluk	- 50 -
2.2.1 Aerodynamický hluk	- 51 -
2.2.2 Mechanický hluk	- 52 -
2.3 Emise	- 52 -

2.3.1	Znečištění v okolí letiště.....	- 54 -
2.3.2	Vypouštění paliva.....	- 54 -
2.4	Snižování hluku a emisí.....	- 55 -
2.4.1	Konstrukce a technologie	- 55 -
2.4.2	Provozní postupy	- 56 -
3.	Budoucí vývoj.....	- 57 -
3.1	Vývojová technologie.....	- 58 -
3.1.1	Aerodynamika	- 59 -
3.1.2	Komponenty motoru.....	- 61 -
3.1.3	Systémy	- 61 -
3.2	Revoluční technologie	- 61 -
3.2.1	Koncept samokřídla – Blended wing body	- 62 -
3.2.2	Koncept křídel podepřených vzpěrami – Strut-braced Wing	- 63 -
3.2.3	Koncept uzavřených křídel – Box-Wing.....	- 63 -
3.2.4	Koncept dvojitého tubusu – Double-bubble fuselage	- 64 -
3.2.5	Technologie využívající pokročilé materiály	- 65 -
3.2.6	Koncepty pohonů	- 66 -
3.2.6.1	Propfan rotor – Open rotor	- 66 -
3.2.6.2	Propulsive Fuselage Concept – Nasávání mezní vrstvy.....	- 67 -
3.2.6.3	Elektromotory.....	- 68 -
3.3	Možnosti alternativních paliv	- 69 -
3.3.1	Syntetická paliva	- 70 -
3.3.2	Obnovitelná paliva	- 70 -

3.3.2.1	Biopaliva	- 70 -
3.3.2.2	Deriváty alkoholu.....	- 71 -
3.3.3	Nemísitelná paliva.....	- 71 -
3.3.3.1	Vodík.....	- 72 -
3.4	Budoucí prototypy letadel	- 73 -
3.4.1	MAVERIC	- 73 -
3.4.2	E-FAN X	- 75 -
3.4.3	STARC – ABL.....	- 75 -
3.4.4	WRIGHT 1	- 75 -
3.4.5	AURORA D8	- 76 -
3.4.6	N3-X.....	- 77 -
4.	statistické vyhodnocení.....	- 78 -
4.1	Vývoj hmotnostního poměru	- 78 -
4.2	Vývoj cestovní rychlosti.....	- 80 -
4.3	Vývoj tahu motorů.....	- 81 -
4.4	Vývoj spotřeby paliva.....	- 83 -
4.5	Vývoj počtu cestujících a doletu	- 85 -
Závěr		- 87 -
Použité informační zdroje		- 90 -
Seznam použitých zkratk		- 98 -

ÚVOD

Letecká doprava, i přes svoji krátkou historii, patří v současnosti k nejbezpečnějším, nejpohodlnějším a nejrychlejším způsobům dopravy. Kvůli svému mezinárodnímu charakteru a organizační složitosti klade vysoké požadavky na všechny zúčastněné pracovníky a organizace.

Od prvního letu, kdy se letadlo bratří Wrightů poprvé vzneslo do vzduchu roku 1903, uplynulo takřka 120 let. Za tuto relativně krátkou dobu stihlo letectví udělat velký pokrok vlivem technického vývoje, ale i vlivem různých událostí, které jej posunuly vpřed.

Cílem této diplomové práce je shrnout zásadní události a aspekty, které ovlivnily vývoj leteckých technologií a predikovat možný vývoj vzhledem k současnému dění. Práce je členěna na 4 části. První část je věnována pokroku letecké dopravy od 20. let 19. století po současnost a jednotlivým vlivům. Druhá část práce je věnována současným požadavkům na letecký provoz a třetí část se zabývá strategiemi a teoriemi budoucího vývoje letectví. Ve čtvrté části je vytvořen seznam letadel a jejich technických a technologických parametrů, na jejichž základě je provedena statistická analýza a vyhodnocení vybraných vlivů.

1. VÝVOJ LETECKÉ DOPRAVY

Letecká doprava je nejmladším druhem dopravy a od svého počátku zaznamenala dramatický rozmach. Odpradávná člověka provázela touha poznat svět z ptačí perspektivy, jak lze poznat z mýtu o Daidalovi a Ikarovi, kteří se vznesli pomocí křídel vytvořených z vosku a peří. První zaznamenané vědecké teorie pocházejí z 15. století z pera italského renesančního umělce a vědce Leonarda da Vinci, který nakreslil návrhy padáku, vrtulníku a mnoha dalších vizionářských idejí. Prvním potvrzeným případem vzletu člověka je let balonu bratří Montgolfierů ze září 1783 ve Versailles. Následně začaly pokusy s nepohyblivým křídlem. Nejdříve ve formě kluzáků, jejichž nejslavnější průkopník je Otto Lilienthal. Postavil 18 různých modelů, s kterými létal ze svahu. Poté přišla myšlenka letadlo pohánět strojem. Nejdříve pomocí parního stroje, který nedosahoval ani zdaleka dostatečné účinnosti pro vzlet. Až s vynálezem zážehového motoru se člověk přiblížil opět o krok ke svému snu létat. Začaly pokusy s letadly vybavenými zážehovými motory. Velký rozkvět letectví začal v moment, kdy se letadlo bratří Wrightů poprvé vzneslo do vzduchu roku 1903. Tento první opravdový let trval pouze 12 sekund na vzdálenost 39 metrů. Od té doby letectví učinilo neskutečný pokrok.

V této kapitole je rozebrán vývoj letecké dopravy v průběhu let, popsány aspekty ovlivňující letecký provoz a uvedeny události, které umožnily růst produktivity letecké dopravy. Mezi tyto aspekty lze přiřadit technologický vývoj, ekonomický vývoj, celosvětové krize a mimořádné události. Zároveň si letecká doprava vyžaduje mezinárodní spolupráci.

Základními prvky dopravního systému jsou letadla, navigační služby, letečtí dopravci a letecké dopravní cesty, které tvoří letiště, letecké služby a vymezené části vzdušného prostoru. Letadla jsou v současnosti vyráběna několika výrobci (hlavní dva výrobci jsou Airbus se sídlem v Toulouse a Boeing se sídlem v Seattlu). Provozovatelem letadel jsou letecké společnosti, které poskytují službu přepravy osob, nákladu a pošty za úplat. K jejich hlavním úkolům patří plánování letů, zajištění technické provozuschopnosti, pozemní obsluha, kontrola kvality a obchodní služby. Ke své činnosti však potřebují jednak letiště, která zajišťují zázemí pro provoz a v řadě zemí jsou samostatnými organizacemi, jednak navigační služby a služby řízení letového provozu, které zajišťují letové cesty a jsou v naprosté většině států spravovány organizacemi řízení letového provozu – Air Traffic Control. Tyto další organizace vybírají za své služby uživatelské poplatky, které bývají stanoveny v závislosti na objemu provozu a skutečných nákladech na poskytování daných služeb. [4]

1.1 Mezinárodní spolupráce

Díky mezinárodnímu charakteru si letecká doprava vyžádala vznik mnoha mezinárodních organizací pro zajištění vzájemné spolupráce a koordinace. Pro zjednodušení mezinárodní spolupráce a sjednocení provozních postupů proběhla řada konferencí. První proběhla 18. ledna roku 1919, tzv. **Pařížská mírová konference**, jejímž výsledkem byla Úmluva o civilním letectví.

Tato Úmluva řešila otázky suverenity nad vzdušným prostorem, registrace letadel, licencování pilotů a provoz vojenských letadel. Také zřídila Mezinárodní komisi pro leteckou navigaci (International Commission for Air Navigation – ICAN), která byla 1. organizací řešící rozvoj mezinárodního civilního letectví a předchůdcem organizace ICAO. [4]

Jedna z nejdůležitějších konferencí byla **Chicagská konference**, která proběhla 9. září 1944. Jejím cílem bylo reagovat na změny v letecké dopravě po 2. světové válce, v rozvoji letecké techniky a vytvořit legislativu zamezující případným konfliktům mezi jednotlivými státy. Výsledkem Chicagské konference bylo přijetí Úmluvy o mezinárodním civilním letectví (v platnosti od roku 1947), která kompletně nahradila Pařížskou úmluvu. Zároveň s ní vešly v platnost i další dokumenty, Mezinárodní dohoda o letecké dopravě a Dohoda o tranzitu mezinárodních leteckých služeb. **Úmluva o mezinárodním civilním letectví** je rozdělena na dvě části. První část obsahuje ustanovení, která upravují vztahy mezi státy v oblasti mezinárodního civilního letectví, určují, že každý stát má úplnou kontrolu nad vzdušným prostorem nad svým státním územím, pravidla létání, registraci letadel a jejich státní příslušnost, podmínky, jimž musejí letadla vyhovovat, požadavky na posádky letadel, definují zakázané oblasti, letištní poplatky a další normy. Druhá část dokumentu zřizuje **Mezinárodní organizaci pro civilní letectví** (International Civil Aviation Organisation – ICAO). Jejím cílem je bezpečný rozvoj mezinárodního letectví. Součástí úmluvy je také 19 annexů (příloh), které stanovují požadavky a postupy v jednotlivých oblastech letectví. [5, 86]

Další dva dokumenty (Mezinárodní dohoda o letecké dopravě a Dohoda o tranzitu mezinárodních leteckých služeb) zaručují úplnou suverenitu států nad svým vzdušným prostorem a určují základy pravidel pro zavedení volnějšího mezinárodního trhu v letecké dopravě. Dále určují pět letových svobod, které upravily legislativu pro aerolinie, daly jim právo vstupovat do letového prostoru jiného státu, přistávat na jeho území nebo nakládat či vykládat zboží a cestující za smluvních podmínek. Další čtyři svobody vznikly na základě praktických zkušeností z vedení linek a přípojů, tyto však nejsou právně určeny:

- první svoboda – právo letět přes území jiného stát bez přistání;
- druhá svoboda – právo přistát na území druhého státu z neobchodních důvodů;
- třetí svoboda – právo přepravy cestujících nebo služeb na území druhého státu;
- čtvrtá svoboda – právo přijmout cestující nebo zboží z druhého státu;
- pátá svoboda – právo vysadit nebo nabrat cestující či zboží na území prvního státu směřující do nebo z třetího státu;
- šestá svoboda – právo provozu letecké linky s mezipřistáním na vlastním území;
- sedmá svoboda – právo provozovat let mezi dvěma cizími státy;
- osmá svoboda – právo přepravovat cestující či náklad v druhém státě, i když let započal na území vlastního státu;
- devátá svoboda – právo provozování letu, který započal i končí na území druhého státu, aniž by započal na vlastním území.

Spolu s řadou dalších dohod přispěly k liberalizaci letecké dopravy, k bezpečnému a spolehlivému rozvoji letecké techniky, zajištění pravidelnosti letů a k zpřístupnění široké veřejnosti. [1, 4]

1.1.1 Mezinárodní vládní organizace

Mezinárodní organizace se dělí podle charakteru na vládní (členy jsou jednotlivé státy) a nevládní (členy jsou právnické, případně soukromé osoby). Mezi významné vládní organizace lze zařadit ICAO, EUROCONTROL, ECAC a EASA.

ICAO – Mezinárodní organizaci pro civilní letectví – Hlavní sídlo organizace se nachází v Montrealu se 7 regionálními pobočkami ve městech Bangkok, Káhira, Dakar, Lima, Mexiko City, Nairobi a Paříž. Nejvyšším orgánem ICAO je Valné shromáždění, které se schází aspoň jednou za 3 roky ke schválení programu a rozpočtu na následující období. Zástupce na shromáždění tvoří všechny členské státy (185 členů). Dále také volí Radu pro následující tříleté období. Radu ICAO tvoří 36 zvolených zástupců a má za úkol přijímat normy a doporučené postupy, týkající se letecké navigace, infrastruktury, prevence protiprávních činů a usnadnění překračování hranic. Hlavními úkoly ICAO jsou:

- celosvětově spořádaný a bezpečný rozvoj civilního letectví;
- podporovat rozvoj bezpečné letadlové techniky a stanovit mezinárodní základní požadavky pro provoz a konstrukci;
- podporovat rozvoj letadlových cest, letišť a stanovení mezinárodně uznávaných pravidel a norem;
- prosazovat bezpečnou, pravidelnou a hospodárnou leteckou dopravu stanovením jednotných doporučení, přejímaných do národních předpisů členských států;
- zajišťovat práva všech členských států a zabránit diskriminaci mezi smluvními státy;
- pomáhat všeobecnému rozvoji mezinárodní letecké dopravy v členských státech. [5, 86]

EUROCONTROL – European Organization for the Safety of Air Navigation – Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu se sídlem v Bruselu byla založena roku 1963. V současnosti sdružuje 41 evropských států, Česká republika je členským státem od roku 1996. Zabývá se civilním i vojenským letectvím. Koordinuje poskytování navigačních služeb jednotlivými členskými státy v jejich vzdušném prostoru. Hlavním cílem organizace je rozvoj systému plánování letového provozu, zajištění jednotného celoevropského systému řízení letového provozu, optimálně využívat evropský vzdušný prostor a předcházet zatížení letových tratí. [87]

ECAC – European Civil Aviation Conference – Evropská konference pro civilní letectví – Organizace založená v Paříži roku 1955 v současnosti sdružuje 44 evropských států. ČR je členem od roku 1991. Členy zastupují ministři odpovědní za civilní letectví daného státu. Cílem organizace je sjednocovat politiku členských států, podporovat trvalý rozvoj bezpečného, efektivního a udržitelného evropského systému letecké dopravy a řešit problematiku spojenou s pravidelnou i nepravidelnou leteckou dopravou v evropském prostoru. ECAC spolupracuje

s řadou vládních i nevládních organizací k dosažení společných cílů, včetně výcviku v oblasti bezpečnosti a ochrany životního prostředí. [88]

EASA – European Air Safety Agency – Evropská agentura pro bezpečnost letectví – Organizace se sídlem v Kolíně na Rýnem byla založená roku 2002, je agenturou Evropské unie a plní specifické regulační a výkonné úkoly vztahující se k oblasti bezpečnosti letectví. Cílem organizace je prosazovat nejvyšší společné standardy bezpečnosti a ochrany životního prostředí v civilním letectví, vyvíjet společná bezpečnostní a environmentální pravidla na evropské úrovni, dohlížet na dodržování norem prostřednictvím inspekcí v členských státech a zajišťovat potřebné technické a odborné znalosti pro Evropskou komisi při zpracovávání pravidel pro bezpečnost civilního letectví. K pravomocím EASA dále patří osvědčování leteckých výrobků a schvalování organizací pro konstrukci a údržbu letadel. [89]

1.1.2 Mezinárodní nevládní organizace

Mezi významné nevládní organizace, podílející se na letecké dopravě, patří například IATA, SITA a další.

IATA – International Air Transport Association – Mezinárodní asociace leteckých dopravců byla založena v roce 1945 v Havaně na Kubě 57 leteckými společnostmi. V současné době má 293 členů ve více než 140 zemích po celém světě zajišťující přibližně 82% letecké dopravy. Hlavní sídlo organizace je v Montrealu a dále se provozuje přes 50 oblastních kanceláří po celém světě. IATA kvůli různým oblastním problémům rozdělila své působení na jednotlivé regiony: Evropa, Afrika a Blízký východ, Severní Asie, Asijský Pacifik a Amerika. Mezi hlavní cíle IATA patří:

- zlepšovat porozumění letecké dopravě, zvyšovat povědomí o výhodách, které letectví přináší národním a globálním ekonomikám a obhajovat zájmy leteckých společností po celém světě;
- pomáhat leteckým společnostem zjednodušováním procesů a zvyšováním pohodlí cestujících při současném snižování nákladů a zvyšování efektivity;
- pomáhat leteckým společnostem provozovat dopravní přepravu bezpečně, efektivně a ekonomicky podle stanovených pravidel. [90]

SITA – Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques – Mezinárodní sdružení pro leteckou komunikaci s hlavním sídlem v Paříži bylo založeno leteckými společnostmi roku 1949. Provozuje telekomunikační síť k předávání a odesílání zpráv a počítačových dat pro potřeby letecké dopravy. Společnost poskytuje své služby více než 2 500 zákazníkům a pokrývá 90 % celosvětové letecké komunikace. SITA je v současnosti hlavním poskytovatelem komunikačních služeb v letecké dopravě a jejím prostřednictvím probíhá výměna zpráv a dat obchodního i provozního charakteru pro správnou funkci rezervačních, odbavovacích a dalších systémů. [91]

1.2 Technologický vliv

Letecká technologie prošla dlouhou cestu, aby se dostala tam, kde je dnes. V průběhu minulého století proběhl nespočet testovacích letů. Díky neustálému výzkumem leteckých technologií šel vývoj kupředu mílovými kroky, za vytvořením lepšího, bezpečnějšího a efektivnějšího letového zážitku. Technologického pokroku dosaženého během 1. světové války se využilo i v civilní sféře a po 1. světové válce se začala rozvíjet civilní letecká doprava. Kromě přepravy vzducholodí, která se uplatňovala v civilní přepravě od roku 1910, se začala uplatňovat i přeprava pomocí motorových letadel těžších než vzduch. Větší poptávka po osobní letecké přepravě vedla ke vzniku leteckých společností, pravidelných linek i prvních mezinárodních dohod o civilním letectví. Největší rozvoj letecké dopravy se stal v průběhu 2. světové války a v poválečném období. Během války došlo k velkému rozvoji letecké technologie, který se poté projevil také v civilní dopravě. Výrazně vzrostly přepravní výkony, prodloužily se dolety, zvyšovala se bezpečnost a spolehlivost. Navigační technologie začala využívat technologii radaru a zdokonalený systém ILS (Instrumental Landing System). Letecká doprava se stále více dostávala do běžného života lidí. Hlavní oblasti technologického vývoje jsou:

- letecké motory;
- letecké materiály;
- systémy řízení letadel. [9]

1.2.1 Letecké motory

V současnosti naprostá většina dopravních letounů využívá proudové motory, nicméně tomu předcházela vývoj pístových motorů. Letadla lze rozdělit podle typu pohonu:

- pístová letadla;
- proudová letadla – lze rozdělit na turbovrtulová a trysková.

Pístová letadla poháněná pístovými motory patří do nejstarší kategorie motorových letadel těžších než vzduch. Postupné zdokonalování konstrukce letadel, vývoj v oblasti motorů a vrtulí, to vše umožnilo růst výkonů a kapacity. První letadla začala být využívána k přepravě cestujících po 1. světové válce, i když pouze ve formě prototypů a přestavěných bombardérů. Po 2. světové válce dopravní letouny s pístovými motory dosáhly svých možných limitů velikosti a výkonů. Dokázaly přepravit okolo 100 cestujících při cestovní rychlosti 450–600 km·h⁻¹ s doletem 8 000–10 000 km. Další zvyšování rychlosti nebylo z fyzikálních důvodů možné, neboť tah vrtule závisí na kombinaci jejích otáček, počtu, průměru a tvaru listů vrtule. Při přílišném počtu listů dochází ke vzájemnému vyrušování proudění vzduchu mezi sousedními listy, což snižuje účinnost. Zvětšování průměru je vhodné až do okamžiku, kdy se obvodová rychlost na konci listů začne blížit rychlosti zvuku, při které vznikají rázové vlny snižující efektivitu. S omezenou rychlostí let dlouhý 8 000 km trval okolo 15 hodin. Nepohodlí cestujících způsobeno vibracemi a hlukem pístových motorů bylo důvodem, proč koncem 50. let 20. století byly pístové motory nahrazeny

proudovými na dlouhých, středních a poté i na krátkých tratích. Dnes pístové motory nalezneme pouze v malých letadlech, sloužících pro přepravu malého počtu pasažérů. [2]

Proudová letadla umožnila nárůst výkonu, který navýšil nosnost, dolet a cestovní rychlost. Dělíme je na turbovrtulová a trysková letadla.

Turbovrtulová letadla se rozšířila dříveji oproti tryskovým, neboť měla mnohem více společných znaků s konstrukcí pístových letadel a mohla využít jejich konstrukci. Tah turbovrtulového motoru je naprostou většinou zajištěn rotujícím pohybem vrtule a jen asi 5 % připadá na kinetickou energii plynů. Použití vrtule sice přináší podobná omezení jako v případě pístových motorů, nicméně hlavní výhodou je nárůst výkonu, snížení měrné spotřeby paliva a zvýšení spolehlivosti. Vyšší výkon turbovrtulových motorů umožnil zvětšit konstrukci letadla a zvýšit počet přepravených pasažérů. Cestovní rychlost velký nárůst nezaznamenala, ale došlo ke snížení vibrací a zvýšení komfortu cestujících. V začátcích docházelo k přestavbám, kdy byly pístové motory nahrazeny turbovrtulovými. [5]

Příkladem je známé letadlo Douglas DC-3 (Dakota). Toto letadlo bylo zařazeno do civilního provozu roku 1936, původně vybaveno pístovými hvězdicovými motory firmy Pratt & Whitney. S kapacitou 21 pasažérů a doletem 1 650 km dokázalo jako první komfortně a výnosně přepravovat cestující. DC-3 (obr. č. 1) také proslula svojí spolehlivostí (přibližně 172 kusů bylo roku 2020 stále registrovaných v provozu z přibližně 11 000 vyrobených kusů). První pokusy osadit DC-3 turbovrtulovými motory proběhly už na přelomu 40. a 50. let. Doopravdy se ale turbovrtulové motory uplatnily až u dalších typů, nejznámější a nejrozšířenější turbovrtulovou verzí letadla se stal Basler BT-67 (zařazen do provozu 1990). [80]



Obr. 1 – Douglas DC-3 [80]

Dnešní turbopohony jsou většinou osázeny šestilistými vrtulemi, jejichž listy mají počítačově optimalizovaný aerodynamický tvar pro vyšší tah a nižší hlučnost. Často jsou také vybaveny systémy aktivní redukce hluku v kabině pasažérů. Tento systém reproduktorů funguje na principu vyrušování zvukového vlnění od zvuku motorů. Reproductory vysílají zvuk o stejné frekvenci a amplitudě jako zvuk motorů, ovšem s určitým fázovým posunem, který zapříčiní, že se oba zvuky částečně vyruší. I tak je hluk stále výrazný a může působit nepříjemně na cestující. Běžně se proto délka letů pohybuje okolo 1,5 hodiny, aby se pasažéři cítili pohodlně. [3]

Během 60. let byla turbovrtulová letadla nahrazena tryskovými letadly na dlouhých a středních tratích. Turbiovrtulová letadla se udržela v provozu dodnes na krátkých tratích. Hlavní výhody oproti tryskovým letadlům jsou následující:

- konstrukčně jednodušší – nižší pořizovací náklady;
- nižší nároky na vzletové a přistávací dráhy – lze je provozovat i na menších a méně vybavených regionálních letištích;
- nižší provozní náklady – turbiovrtulová letadla mají menší spotřebu paliva a nižší náklady na údržbu a opravy;
- trysková letadla se nevyplatí na krátkých tratích – časová úspora tryskových letadel činí asi 25 % a na trati dlouhé 600 km by reálný rozdíl činil asi 20 minut. [3]

Trysková letadla využívají k vyvolání tahu proudové nebo dvouproudé motory. Motor pracuje na principu Newtonova zákona akce a reakce. Vstupní část motoru nasává vzduch a za pomoci kompresoru jej stlačuje. Vzduch se tím zahřívá a takto upravený putuje do spalovací komory, kde je k němu vstříkováno palivo. Zažehnutím směsi se uvolňuje tepelná energie a horké plyny, které vycházejí ze spalovací komory, roztáčejí turbínu umístěnou v zadní části motoru, která přes hřídel vedoucí osou motoru pohání kompresor. Proud spalin o vysokém tlaku a teplotě, který vychází z výstupních trysek, působí opačnou silou a přeměňuje tepelnou energii na kinetickou. Trysková letadla se vyznačují celou řadou nesporných výhod (vyšší cestovní rychlost, nižší hlučnost a vibrace), ale trpí také mnohými nedostatky. První letadla ve 40. letech se vyznačovala poměrně vysokou spotřebou pohonných hmot, a navíc pracovala při vysokých provozních teplotách. Vyžadovala tak kvalitnější komponenty, což vedlo ke zvýšení výrobní ceny. Tato skutečnost zapříčinila, že proudová letadla se dostala do civilního letectví až koncem 50. let 20. století. Prvním tryskovým dopravním letadlem se stal britský de Havilland Comet, který byl zařazen do provozu roku 1952. [3]

V průběhu let 1953–1954 se stala série nehod letounu typu Comet, způsobená únavovými trhlinami v rozích původních obdélníkových oken. Design trupu letounu navazoval na dosavadní vrtulová letadla, nicméně Comet létal o polovinu rychleji a v podstatně větší výšce než dosavadní letadla, přibližně 13 000 metrů. To však zapříčinilo výrazně rychlejší kumulaci únavového namáhání, jehož účinky nebyly v té době prozkoumány. Všechna letadla typu Comet byla uzemněna a do provozu se vrátila až přepracovaná verze Comet 4 v září 1958, kdy již byl 2 roky v provozu sovětský Tupolev Tu-104 a k nasazení do provozu se chystala americká letadla Boeing 707, Douglas DC-8 a francouzská Caravelle. Všechny tyto nové letouny již ve své konstrukci

využily nové poznatky o únavovém namáhání a využívaly upraveného designu. Svým designem daly základ standardu, který se dodržuje dodnes. [3]

Během 60. let došlo k výraznému rozmachu letecké dopravy, kdy díky technologickému pokroku, zvýšení spolehlivosti a rychlosti, se letecká doprava stala přístupnou široké veřejnosti. Letadla s maximální kapacitou okolo 200 pasažérů přestávala uspokojovat poptávku, a proto se hlavní světoví výrobci letadel zaměřili na tzv. velkokapacitní letadla, schopná přepravit najednou 400-500 cestujících. Tyto velkokapacitní letouny využívaly k pohonu dvouproudé motory (dmychadlové motory) s vysokým obtokovým poměrem. Jedním z prvních, který vstoupil do provozu roku 1969, byl čtyřmotorový Boeing 747 s kapacitou až 500 cestujících. Spolu se zvýšením kapacity došlo i k řadě provozních změn. Bylo třeba urychlit nástup a výstup velkého množství cestujících, proto byly zavedeny nástupní mosty spojující letadlo a letištní terminál. Bylo třeba připravit letištní infrastruktura pro velké množství lidí, pokročilé navigační prostředky pro zvýšenou hustotu dopravy na letišti, začaly vznikat rezervační systémy pro naplnění kapacit. Z těchto rezervačních systémů se později vyvinuly dnešní globální distribuční systémy (Amadeus, Galileo, Worldspan, Sabre), které umožňují automatizované rezervace a transakce mezi prodejci a agenturami, které poskytují služby v cestovním ruchu. [3, 4]

Od 80. let po současnost naprosté většině letecké dopravy dominují letadla vybavená dvouproudovými motory s vysokým obtokovým poměrem. Nejvýraznější změnou v systému pohonů v tomto období byl přechod z čtyřmotorových letadel na dvoumotorové na dlouhých a středních tratích. Při provozu je nutné splňovat požadavky, aby letadlo bylo schopné při vysazení jednoho motoru doletět bez problémů k nejbližšímu letišti. U třímotorových nebo čtyřmotorových porucha jednoho motoru znamená ztrátu pouze části tahu, zatímco u dvoumotorových znamená ztrátu 50 % tahu, což se projeví ztrátou výšky a rychlosti. S pokrokem technologií rostla spolehlivost motorů a riziko výpadku motorů klesalo. Nastupující nová výkonnější generace dvoumotorových letadel (Boeing 757, Airbus 310) s úspornějším provozem proti čtyřmotorovým letadlům postupně vytlačila původní čtyřmotorová letadla na dálkových linkách. Tato změna, kdy by případná porucha jednoho motoru byla podstatná, si vyžádala vytvoření nových pravidel ETOPS (Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards) pro provoz na dlouhých tratích. Podle ETOPS bylo umožněno konkrétnímu typu letadla provozovanému konkrétním dopravcem na základě prokázané spolehlivosti motorů a schválených postupů pro případ vysazení jednoho z nich létat nad neobydlenými oblastmi tak, že letadlo se v žádném okamžiku letu nevzdálí od nejbližšího z vhodných a provozuschopných letišť v okolí celé trati letu na větší vzdálenost, než odpovídá schválené maximální době letu v minutách dle příslušného povolení ETOPS-90 (maximálně 90 minut od nejbližšího letiště). [1, 7]

Dnešní moderní letadla létají standardně podle ETOPS-180 (maximálně 180 minut od nejbližšího letiště) a některé typy letadel dosahují certifikací ETOPS-330 i více. Zvyšující se ETOPS standardy, spolu se zvyšující se spolehlivostí, jednodušší a levnější údržbou i provozem, znamenaly porážku čtyřmotorových letadel, které dnes již tvoří spíše výjimky, jako například letadla obřího typu A380 nebo B747. [7]

1.2.2 Letecké materiály

V letectví se využívá mnoho druhů materiálů a každý materiál je vhodný pro jinou část letadla, podle její funkce a namáhání. Všechny materiály musí splňovat základní požadavky pro použití v létání. Důraz je kladen především na vysokou pevnost při minimální hmotnosti a požadované bezpečnosti, ale s minimálními ekonomickými nároky. Nejpoužívanějšími materiály jsou slitiny hliníku, dnes vytlačované kompozitními materiály.

V začátcích letectví se při výrobě letadel využívaly dřevěné prutové konstrukce s potahovým materiálem, nejčastěji plátnem. Využití dřeva skýtalo mnoho výhod, např.: odolnost vůči únavovému poškození, vysoká pevnost a nízká hmotnost. Největší nevýhodou je slabá odolnost vůči atmosférickým vlivům. K výrobě leteckých konstrukcí se používaly různé druhy dřeva. Bambus se použil pro svoji houževnatost, nicméně uplatnění nakonec nenašel kvůli své křehkosti a obtížnému spojování bambusových komponent. Jasan se používal při výrobě ohnutých součástek. Dále se objevovalo dřevo smrku a borovice a zřídka dřevo lípy a amerického ořechu. I v současnosti dřevo stále nachází uplatnění při konstrukci malých letadel. Pro potahování povrchu křídel a trupu se používalo bavlněné plátno nebo lněné plátno. Přibližně do roku 1911, podobně jako u balónů a vzducholodí, výrobci látku gumovali. Ocel byla využívána hlavně v konstrukci podvozku, spojovacích uzlech křídel a trupu, řídicích lankách a výtuzích. Nicméně dřevo i plátno je citlivé na změny teploty a vlhkost, a proto se začali hledat jiné materiály. [22]

Vyšší rychlosti způsobovaly větší síly v konstrukci a používané dřevo již nestačilo. Začaly se kombinovat ocelové trubkové konstrukce se dřevěnými konstrukcemi a potahovým materiálem se stal ocelový plech. Nejznámější rané použití kovových letadel bylo během 1. světové války. Prvním celokovovým letounem na světě se stal Junkers J.I vyráběný německou firmou Junkers. Tento dvoumístný jednoplošník se samonosným křídlem měl trup letadla potažen vlnitým duralovým plechem. Vlnité pláště pomáhaly zvládat odpor vzduchu. Vlnění také umožňovalo zvětšit tuhost konstrukce bez zásadního zvýšení váhy, a proto se tato úprava povrchu stala velice rozšířenou ve výrobě letadel. Po válce pokračoval Junkers v kariéře konstruktéra a už roku 1919 vzlétl první celokovový dopravní letoun na světě – Junkers F.13. [21, 92]

V dobách války často dochází k významnému pokroku ve vědecké oblasti poskytující strategickou výhodu nad nepřítelem. 2. světová válka se v tomto ohledu nijak nelišila. Poprvé se začaly využívat plasty, počínaje výměnou kovových dílů za gumové díly v amerických letadlech poté, co Japonsko omezilo obchod s kovy se Spojenými státy. Následně plasty vyšších tříd začaly nahrazovat elektrické izolátory a mechanické součásti, jako jsou ozubená kola, řemenice a spojovací prvky. Výrobci letadel začali nahrazovat hliníkové díly plastovými, protože byly lehčí a tím i úspornější než hliníkové materiály. Velký vliv mělo také vesmírné soupeření. Po 2. světové válce národy obrátily svou pozornost k nebi a dál. Vesmírný program v 60. letech měl zdánlivě nemožný úkol dostat lidstvo na Měsíc. Vědci NASA (National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a vesmír) věděli, že se zabývají novým územím v oblasti inovací a potřebovali materiál, který by dokázal proniknout zemskou atmosféru a

zároveň chránit posádku kosmické lodi před extrémními životními podmínkami. NASA využilo plastové materiály, konkrétně kevlar a nylon. Pod povrch kosmické lodi se umístily vrstvy nylonu a dalších izolantů, které posádku chránily před extrémními teplotami vesmíru. Oba tyto plasty se poté staly základem i v leteckém průmyslu. [21, 22]

V současnosti nejpoužívanější letecké materiály jsou:

- slitiny hliníku;
- ocelové slitiny;
- titanové slitiny;
- plasty;
- kompozitní materiály.

Slitiny hliníku

Slitiny hliníku tvoří i dnes hlavní materiál při konstrukci letadla. Hlavním důvodem je malá hustota ($2700 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Čistý hliník se ale takřka nepoužívá, většinou se využívá ve formě slitin s jinými prvky, které zlepšují jeho vlastnosti. Při konstrukci se berou v potaz různé vlastnosti:

- pevnostní – měrná pevnost, měrná únavová pevnost, odolnost vůči poškození, měrná tuhost – ověřují se mechanickými zkouškami za různých teplot;
- technologické – tvařitelnost, obrobitelnost, svařitelnost, schopnost lepení – částečně se ověřují mechanickými zkouškami;
- provozní – odolnost vůči korozi, opravitelnost;
- ekonomické – výrobní cena, provozní náklady a náklady na likvidaci.

Nejpoužívanější slitinami hliníku jsou:

- dural – dural je označení pro různé slitiny, obvykle s obsahem 90–96 % hliníku, 4–6 % mědi a s menšími přísadami hořčíku, manganu aj. Oproti čistému hliníku je dural nepatrně hustší, ale až pětikrát pevnější v tahu a tvrdší. Využívá se pro konstrukci při stavbě draku na nosníky, žebra, přepážky, podélné výztuhy, části řízení letadla a další;
- superdural – má vyšší pevnost než dural a využívá se pro více zatěžované části, například pásnice nosníků křídel;
- pantal – slitiny s hořčíkem a křemíkem mají zvýšenou odolnost proti korozi a využívají se na plechy a nýty;
- silumim – patří k nejvýznamnějším slitinám, složení je z hliníku, křemíku, hořčíku a manganu. Nejlepší slévárenské vlastnosti mají siluminy s eutektickým složením (cca 12 % Si). Jsou dobře odolné proti korozi. [22]

Ocelové slitiny

Ocelové slitiny se využívají u více namáhaných konstrukcí. Výhodou oproti Al slitinám je vyšší pevnost, lepší svařitelnost a vyšší odolnost vyšším teplotám. Nevýhodou je vyšší hustota

($7800 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$). Používají se například pro podvozky, pásnice nosníků křídel, zesílená žebra, ozubená kola, nýty, šrouby, ložiska a další výrazně namáhané součásti. [22]

Titanové slitiny

Titanové slitiny se vyznačují malou hustotou ($4500 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), vysokou pevností, koroziodolností, žáruvzdorností a chemickou odolností. Při projektování je nutno vzít v úvahu, že výroba titanu je v současné době finančně náročná a provozní nasazení titanových komponentů je účelné pouze v případech, kdy není možno použít levnější alternativu na bázi slitin hliníku. [22]

Plasty

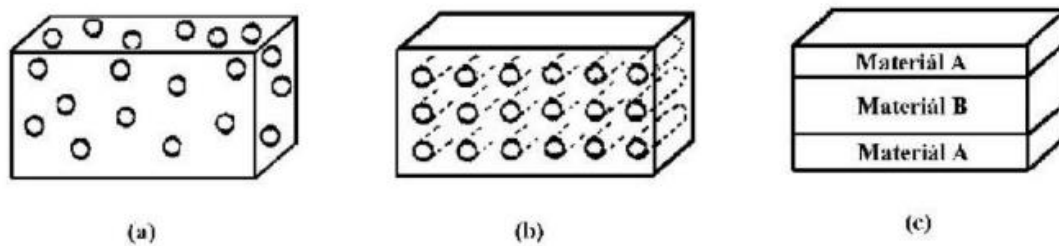
Plast je vysoce flexibilní, uměle vyrobený materiál. To znamená, že podle konstrukčních požadavků lze měnit jejich vlastnosti v širokém rozsahu. Mezi zásadní vlastnosti vysokovýkonných plastů používaných v letectví patří jejich nízká hmotnost a vysoká pevnost. Přechodem výroby od hliníku/oceli na plasty lze dosáhnout významných úspor hmotnosti. [22]

Výhody použití materiálů s nižší hmotností pro výrobu letounů s efektivním využitím paliva a nízkými emisemi jsou zřejmé, ale existují rovněž další výhody související s delší provozní životností součástí. Plasty pro aerokosmický průmysl navíc nejsou v leteckém provozním prostředí ovlivňovány korozi. Plasty se dělí do tří skupin:

- reaktoplasty – druh plastů, který se působením tepla vytvrzuje. To způsobuje, že přechází nevratně do netavitelného a nerozpustného stavu. Výhodou je velká pevnost a odolnost povětrnostním vlivům;
- termoplasty – druh plastů, které působením tepla měknou, ale chemicky se při tom nijak nemění. Jsou vhodné pro výrobu součástí vstříkovaním, vyfukováním a odléváním;
- elastomery – druh plastů s vysokou mezí pružnosti. Tento plast je snadno deformovatelný, ale po odlehčení působící síly se součást vrátí do původního stavu. [22]

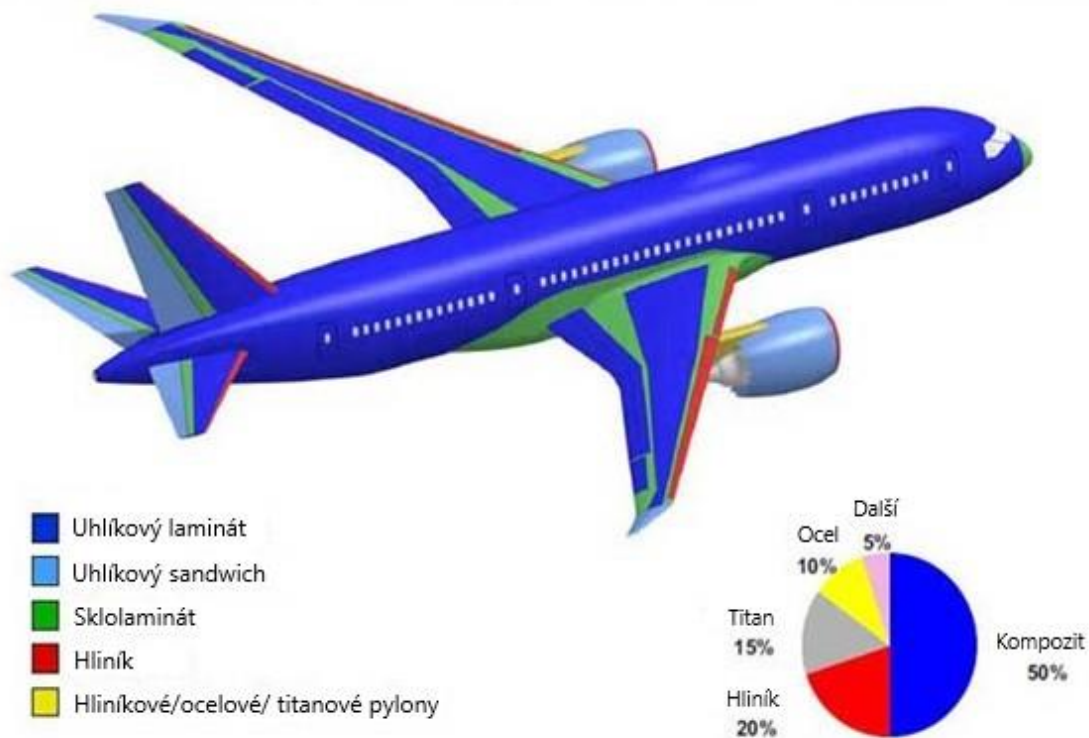
Kompozitní materiály

Kompozit je heterogenní materiál tvořený dvěma či více složkami, které se vzájemně liší svými chemickými, fyzikálními a mechanickými vlastnostmi. Všechny složky podílející se na vzniku kompozitu vytváří materiál, který dosahuje lepších vlastností, než by odpovídalo sečtení jednotlivých vlastností složek. Rozdělujeme na dvě složky – spojitá (neboli matrice) tvoří geometrickou podobu, chrání a udržuje druhou fázi – výztuž, která vyniká vysokou pevností, tvrdostí a modulem pružnosti, čímž se významně podílí na zlepšení vlastností kompozitu. Mezi výhody kompozitů řadíme: nízká hmotnost, vysoká tuhost a pevnost, dobrá lomová houževnatost, tvárnost, únavová pevnost, tlumení, odolnost vůči korozi a další. Dle geometrického rozložení výztuže dělíme kompozity na částicové, vláknové a vrstvené (obr. č 3), kdy každá má své vlastnosti a využití dle použitých materiálů. V letectví najdeme nejčastěji kompozitní materiály vyráběné kombinací vrstev uhlíkových nebo skleněných vláken s epoxidem. [20, 21]



Obr. 3 – Rozložení kompozitních materiálů, částicový (a), vláknový (b), vrtevnatý (c) [20]

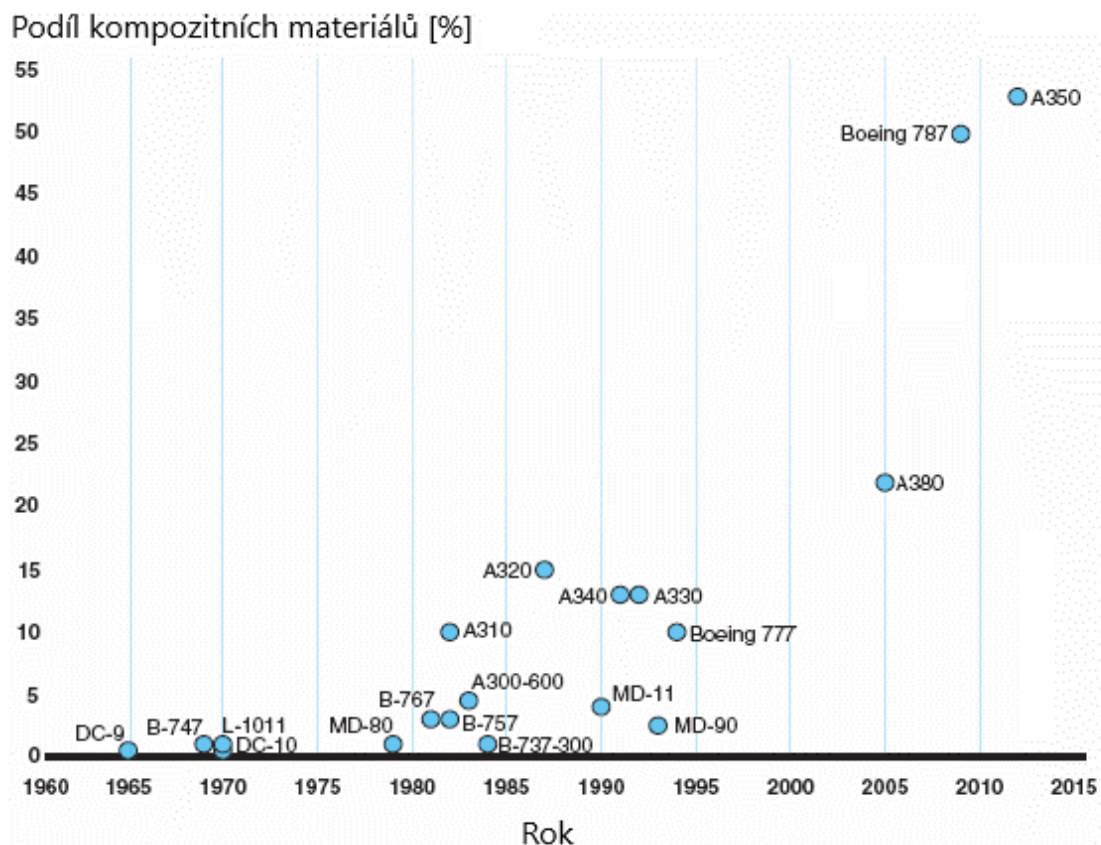
V posledních letech rozšířili výrobci použití kompozitů na trup a křídla, protože tyto materiály jsou obvykle lehčí a odolnější vůči korozi než kovové materiály, které se tradičně používají v letadlech. V 90. letech 20. století Airbus A340 používal 5 % a Boeing 777 12 % kompozitních materiálů z celkové hmotnosti letadla. Na přelomu století umožnila pokročilá výroba kompozitů progresivní vzestup využití kompozitů v leteckém průmyslu. Boeing 787 je první velké dopravní letadlo v komerčním provozu složené převážně z kompozitních materiálů (obr. č 4), přibližně 50 % celkové hmotnosti konstrukce bez motorů. Letadlo A350 od konkurenční společnosti Airbus dosahuje stejného podílu. Vývoj hmotnostního podílu kompozitních materiálů od 60. let lze vidět na grafu č.1. [19]



Obr. 4 – Použité materiály v letounu Boenig 787 [19]

Kompozitní technologie není revolucí v letectví a pro některé části letadel se již v minulosti používala. Avšak od roku 2011 zahájili výrobci produkci velkých komerčních letadel

převážně z kompozitů, což v letecké dopravě vytváří mnoho bezpečnostních obav, zejména kvůli nedostatku zkušeností s takovým designem a obrovským rozdílům ve zkušenostech s kovem a kompozitem. Je proto třeba přizpůsobení provozních a údržbových postupů tak, aby odpovídaly novým materiálům a nedocházelo k ohrožení bezpečnosti. [19]



Graf 1. – Procentuální zastoupení kompozitních materiálů z celkové hmotnosti [19]

1.2.3 Systémy řízení letadla

Prvky řízení letadla rozdělujeme na primární a sekundární. Mezi primární řízení letadel patří tři základní operace: klonění, klopení a zatáčení. Klonění se provádí pomocí křidélek umístěných na vnější části křídla. Klopení se ovládá pomocí výškového kormidla a zatáčení pomocí směrového kormidla. Mezi sekundární prvky lze přiřadit všechny ostatní ovládané prvky, například klapky, zatahování a vysouvání podvozku, brzdy, řízení příďového kola, sloty, spoilery a další. Systémy řízení letadel prošly v průběhu let velkými změnami a vylepšeními. U prvních letounů bylo ovládání letu prováděno pomocí mechanického přenosu sil prováděného pomocí lan a táhel připojených k ovládacím prvkům a řídicím plochám. Tento způsob ovládání vydržel mnoho let, a i dnes se objevuje u menších letadel. S nástupem větších a rychlejších letadel přišlo mnohem vyšší zatížení od aerodynamických sil na řídicí plochy letadla, kvůli čemuž bylo stále obtížnější ovládat letadlo pouze fyzickými silami pilota. Začaly se používat pomocné hydraulické servomechanismy

k odlehčení sil působících v řízení pilota. Nicméně pilot kvůli odlehčení nebyl schopen odhadnout přesnou sílu potřebnou k řízení a při manévrování mohlo dojít k přetížení letadla a k poškození systémů. Proto se do řízení začaly zavádět tzv. prostředky pro umělé zavádění sil do řízení, pomocí hydraulických servomechanismů jako zpětná vazba při řízení letounu pro pilota. Hydromechanický systém pracuje na všech třech hlavních řídicích plochách, křídélkách, výškovce a směrovce. Křídélka a výškovka jsou ovládány řídicí pákou a směrovka je ovládána pedály. S technologickým pokrokem se začaly používat první elektronické prvky v řízení. Byly použity v automatických stabilizačních systémech a tlumičech kmitání. Postupem času byly odstraněny mechanické spojení mezi pilotem a hydraulickým servomechanismem, a nahrazeny elektrickými prostředky ovládání letu. Zpočátku se jednalo o hybridní konstrukce, kde bylo v případě poruchy možné přejít k mechanickému ovládání letounu. Rychlý rozvoj digitální elektroniky dál vedl k vývoji Fly-by-wire systému, kde je mechanické ovládání zcela odstraněno a plně nahrazeno elektronikou. Tento systém se kvůli menší hmotnosti a značně zlepšeným manipulačním schopnostem používá v nejmodernějších dopravních letadlech. Architektura fly-by-wire byla vyvinuta v roce 1970 jako spolehlivý a sofistikovaný systém. [23]

Fly-by-wire k ovládání ovládacích ploch používá spíše elektrické signály než mechanické vstupy. Základní provoz systému fly-by-wire začíná tím, že pilot zadá povel, který se změní na analogový elektrický signál, který prochází paralelními elektrickými kabely a kanály, aby se zajistilo, že signál dosáhne palubního počítače pro řízení letu. Používá se více zálohovacích cest, nejčastěji 3 elektrických okruhů, pro zajištění dostatečné spolehlivosti. Počítač signál zpracuje a poté vyšle zesílený signál k hydraulickému servomechanismu, který řídí řídicí plochy. Během pohybu řídicích ploch se signál vrací zpět s informací o aktuální poloze do palubního počítače. Jakmile dosáhne řídicí plocha požadované polohy, příchozí a odchozí signály se vzájemně vyruší a proces řízení se ukončí. V budoucích systémech se uvažuje o využití optických vláken pro přenos signálů. Současné zvyšování podílu kompozitních materiálů má nevýhodu, že kompozity nenabízejí žádnou přirozenou ochranu před vysokofrekvenčními vyzařovanými poli a elektromagnetickou interferencí, které vznikají přenosem elektrických signálů. Využívá se instalace stínění k ochraně systémů řízení letu, to ale zvyšuje náklady a hmotnost letadla. Optická vlákna by tento problém vyřešila. [23]

1.3 Ekonomické vlivy

Existuje mnoho faktorů, které ovlivňují růst a pokles zájmu o leteckou dopravu. Tyto faktory ovlivňují jak spotřebitele, tak poskytovatele služeb a formují trh pomocí nabídky a poptávky. Poptávka je množství zboží nebo služeb, které je kupující (zákazník) ochoten pořídit za určitou cenu, v určitý čas a na určitém místě. Nabídka oproti tomu je souhrn nabízených statků (služeb) na trhu. Letecká doprava je nejmladší ze všech druhů dopravy a v posledních desetiletích zaznamenala výrazný nárůst v přepravních výkonech díky své spolehlivosti, bezpečnosti a rychlosti. Mezi faktory významně působící na trh řadíme sociální, ekonomické, demografické a jiné. [18]

Sociální faktory

- Obecně jsou sociální faktory silně ovlivněné demografickými a ekonomickými faktory a je těžké je proto rozlišit. Můžeme sem zařadit vzdělanost, zájem o cestování, životní styl, dopady na životní prostředí a kultura společnosti. [18]

Ekonomické faktory

- Cena – Jedním z nejdůležitějších ekonomických faktorů, který působí na poptávku a nabídku je cena dopravy. Nižší cena letenek vede k většímu zájmu o cestování a k růstu letecké dopravy. Cenu letu ovlivňují mzdy personálu, cena leteckých pohonných hmot, poplatky a další náklady na provoz letadlového parku. Cena pohonných hmot může být značně kolísavá a odvíjí se od současného trhu s ropou (viz kap. 1.3.1). Při provozu letecké dopravy je třeba uhradit řadu poplatků, které se promítnou do konečné ceny. Mezi poplatky patří přiblížovací poplatek, přistávací poplatek, hlukový poplatek, emisní poplatek, letištní poplatek a pojištění letadel či cestujících. Nejlepším příkladem snižování cen letenek jsou nízkonákladoví dopravci, kteří provádí svou činnost se zaměřením na co nejmenší výdaje za provozní náklady. Obvykle nízkonákladové společnosti omezují poskytované služby nebo je poskytují za poplatek. [13, 18]
- Prosperita státu – S vyšší prosperitou roste i poptávka po letecké dopravě. To platí i obráceně, kdy cestující, nejčastěji turisté, přispívají ke zvyšování prosperity státu. Prosperita se vyjadřuje výší hrubého domácího produktu (HDP). HDP je finální celková peněžní hodnota statků a služeb vytvořená za dané období na určitém území. Tento ukazatel se používá v makroekonomii pro určování výkonnosti ekonomiky států. Časovým obdobím bývá obvykle rok.
- Liberalizace – Postupná liberalizace letecké dopravy začala v USA na konci 70. let minulého století a postupně se rozšířila do celého světa. Vytvořila tak konkurenční prostředí a umožnila vznik nízkonákladových dopravců. Na jednu stranu tak klesá regulace v oblasti obchodu, na stranu druhou roste regulace v provozních, technických, bezpečnostních a dalších oblastech z bezpečnostních důvodů. [4, 18]
- Obchodní model – Zde proti sobě stojí tzv. klasičtí a nízkonákladoví dopravci (viz kap. 1.3.2).

Demografický faktor

- Spolu s rostoucím počtem obyvatel a postupující globalizací roste i zájem lidí o cestování. Prodlužující se produktivní věk (15-59) a zvětšující se střední třída také zvyšují počty cestujících. [18]

Omezená kapacita

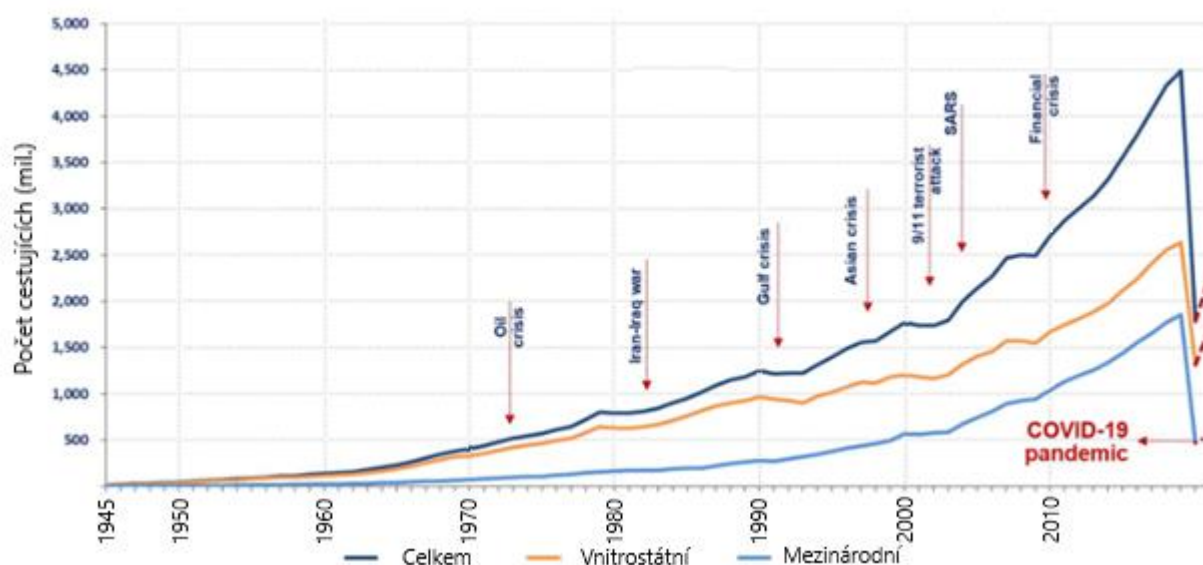
- Nabídka letů neustále roste, liší se dle vyspělosti trhu. Ve vyspělých zemích je letecká doprava takřka na maximum a předpokládaný růst je do 5 % ročně. V rozvojových zemích jako Indie, Latinská Amerika či africké státy se předpokládá rychlý růst. Celosvětově se během roku 2019 uskutečnilo přes 68 mil. letů. S takovým vytížením se kapacita letišť i kapacita vzdušného prostoru rychle zaplňuje. Vyspělé země tak ztrácí schopnost uspokojovat poptávku, aniž by zároveň neztrácely dostatečnou úroveň bezpečnosti. [18]

Náhodné vlivy

- Mezi náhodné vlivy můžeme řadit katastrofické události, jako jsou letecké nehody, přírodní katastrofy, meteorologické jevy, teroristické útoky či stávky personálu. Toto vše může negativně ovlivnit jak poptávku, tak nabídku, a způsobit pokles v letecké dopravě. Vybrané jevy jsou popsány v kap. 1.4. [13, 18]

1.3.1 Ekonomické výkyvy

Ekonomický a politický vývoj ve světě významně ovlivňuje ziskovost letecké dopravy a ta je poněkud nejistá. Z dlouhodobého hlediska je ziskovost nízká a cyklická. Od počátku 80. let minulého století se ziskovost pohybuje v opakujících se zhruba jedenáctiletých cyklech, které bývají narušeny ekonomickým a politickým vývojem ve světě. Na grafu č. 2 lze identifikovat krize, které výrazně ovlivnily leteckou dopravu či zapříčinily výkyvy v cenách ropy (viz graf č. 3) a ovlivnily cenu letu. Dále jsou uvedeny nejvýznamnější případy. Také lze pozorovat rozšíření letecké dopravy vlivem postupné liberalizace od 80. let. [16]



Graf 2. – Počet přepravených pasažérů 1945-2021 [11]

První ropný šok – Prvním ropným šokem je označováno zvýšení cen ropy, ke kterému došlo v roce 1973. Jedním z hlavních důvodů razantního zvýšení cen byla nespokojenost vývozců ropy s příliš nízkými ropnými zisky. Ve snaze o jejich zvýšení usilovali o zdvojnásobení cen ropy na úroveň 5 USD za barel. OPEC (Organization of the Petroleum Exporting Countries – Organizace zemí vyvážejících ropu) záměrně omezila svou výrobu ropy asi o 5 %. Zároveň vyhlásila embargo – čili zákaz vývozu ropy do zemí podporující Izrael během Jomkipurské války (Spojené státy americké a Nizozemí). Ve výsledku průměrná cena ropy vzrostla z 3,29 USD na 11,58 USD. [16]

Druhý ropný šok – K druhému ropnému šoku došlo v roce 1979 a hlavní příčinou byla politická změna režimu. Roku 1979 vypukla revoluce v Íránu a následovala irácko-iránská válka. Nový

režim začal vyvážet méně ropy než doposud (o 2 až 2,5 milionů barelů denně). Další země OPCE kvůli tomu zvýšily těžbu a ve výsledku došlo jen asi o 4 % snížení celosvětové produkce ropy. Revoluce měla za následek pouze krátkodobý pokles produkce, ale kvůli rozsáhlé panice cena ropy vzrostla mnohem více, než odpovídalo vážnosti situace. Výraznějším impulsem pro změnu ceny byla invaze Iráku na území sousedního státu roku 1980. Saddám Husajn využil zhroucení režimu v Íránu, aby si nárokoval území obývané iráckou menšinou, což bylo mimochodem i území s bohatým nalezištěm ropy. Válka trvala 8 let, poškodila obě ekonomiky a tím výrazně snížila těžbu (asi o 11 %) v obou zemích. Během této doby cena dosáhla svého historického maxima. Celosvětová produkce ropy dosáhla na původní úroveň před druhým ropným šokem až počátkem 90. let. Oba tyto šoky měly celosvětový dopad a v reakci na pokles dovozu se zvýšila snaha o snížení závislosti na zemích OPEC, hledání alternativních zdrojů a zásobování ropy. [16]

Válka v Perském zálivu – Ke krátkodobému navýšení ceny ropy došlo také roku 1990, kdy vyvrcholilo napětí mezi Irákem a Kuvajtem. V důsledku invaze OSN (Organizace spojených národů) uvalila sankce a embargo na Írák. V jejich důsledku byla produkce ropy výrazně snížena. Tento propad nicméně potlačily státy OPEC zvýšením produkce, čímž nakonec začaly snižovat cenu od roku 1991. [16]

Asijská krize – V polovině 90. let 20. století došlo na asijském trhu k poklesu hrubého domácího produktu, což vedlo ke snížení poptávky ropy, zároveň státy OPEC zvýšily produkci ropy. To vedlo k nasycení trhu, poptávka nestačila pokrýt nabídku, což vedlo k prudkému snižování ceny ropy. Ropa tak roku 1998 dosáhla dlouholetého minima 11,91 USD za barel a růst opět začala až se zotavováním ekonomiky. [16]

Teroristické útoky 11. září – Nejznámější teroristický útok spáchaný v letectví se udál 11. září 2001, kdy devatenáctičlenná teroristická skupina napojená na militantní islámskou organizaci Al – Káida, unesla 4 letadla typu Boeing 757 a 767 společností American Airlines a United Airlines. Dvě letadla narazila do věží Světového obchodního centra v New Yorku. Kvůli nárazu a následnému požáru se obě věže zřítily. Třetí letadlo narazilo do Pentagonu, sídla ministerstva obrany USA. Čtvrté letadlo se zřítilo po souboji mezi teroristy a pasažéry letu u města Shankville. Útoky měly na svědomí více než 3 000 mrtvých a velké množství zraněných. Cena ropy v důsledku útoků nejdříve výrazně klesla kvůli obavám z poklesu poptávky po ropě. Během roku 2002 ale začala cena ropy výrazně vzrůstat, neboť státy OPCE snížily produkci ropy. V dalších letech růst pokračoval kvůli stoupajícímu napětí na Blízkém východě. [16]

SARS – Ekonomické důsledky této pandemie byly mnohem větší, než by se zdálo z počtu 800 obětí. Ekonomické ztráty způsobené Číně, Singapuru, Hongkongu a Kanadě za několik týdnů trvání epidemie dosahovaly mnoha miliard dolarů. Během roku 2003 WHO poprvé v historii vydala doporučení necestovat do zemí postižených nákazou, což vedlo k dopadům na turistiku a hospodářství těchto zemí. I když tedy nedošlo k výraznějšímu poklesu poptávky ropy, došlo ke snížení zájmu o cestování do těchto zemí. [16]

Světová finanční krize – Též nazývaná Velká recese je období ekonomického poklesu na světových trzích, které trvalo mezi roky 2008 až 2015. Světová finanční krize byla důsledkem americké krize na trhu s hypotékami. Během srpna 2007 nastal finanční propad burzovních trhů v USA. O přesných příčinách se ekonomové a politici dodnes přou, nicméně je jisté, že k ní přispěla tzv. realitní bublina. Z důvodu snížení úrokových sazeb počátkem milénia prudce vzrostl počet prodaných domů a tento nárůst, zjednodušeně řečeno, neodpovídal síle tehdejší americké ekonomiky. V důsledku toho se celá řada bank dostaly do finančních problémů a byly nuceny odepsat stovky miliard dolarů z nakoupených dluhopisů. Kvůli propojení světových finančních trhů se poté krize z USA přelila i do dalších částí světa. Významnou roli sehrála rovněž vysoká cena ropy v první polovině roku 2008, která vedla k poklesu reálného HDP a zvedla spotřebitelské ceny. Během krize se akciové indexy propadly o přibližně 50 %, ropu nevyjímaje. Cena se tak během roku 2008 propadla ze svého maxima (111,39 USD za barel) na cenu 53,48 USD za barel. Poté cena zase začala prudce růst, aby se až během roku 2011 ustálila. Krize a prudké výkyvy ceny paliva vedly k oslabení zájmu o leteckou přepravu a letečtí dopravci se ocitli ve ztrátě. [16]

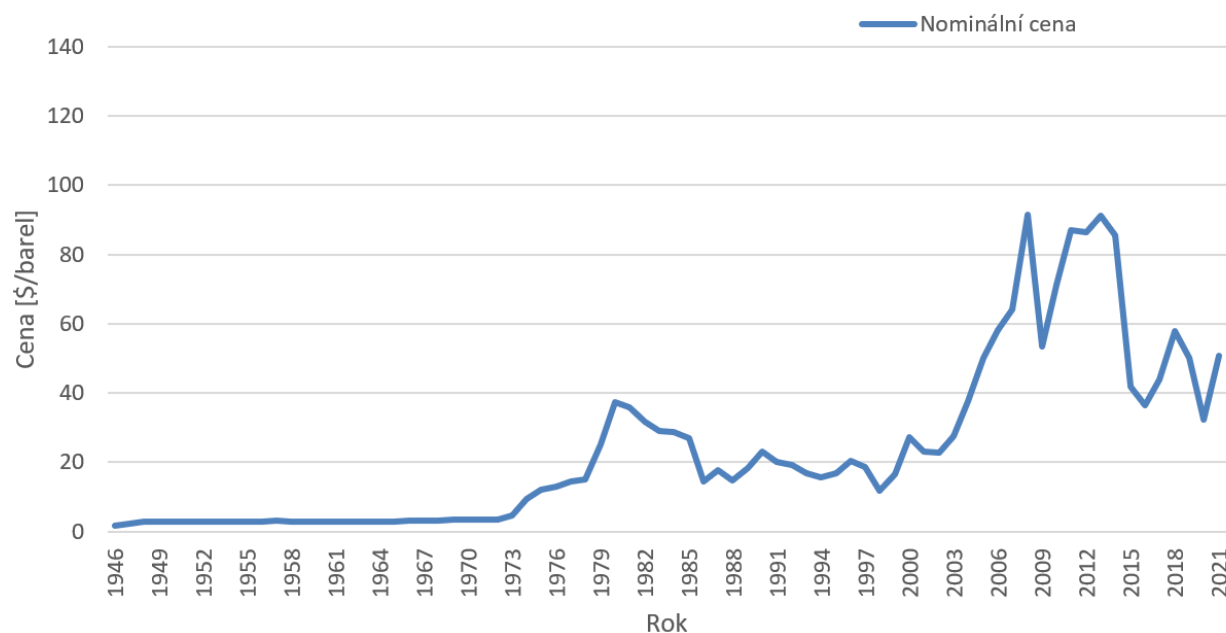
Břidlicová revoluce – Během let 2012 až 2015 se pohyb cen ropy ustálil přibližně na 100 USD za barel. Tato relativně vysoká cena způsobila, že pro americký trh začalo být výhodné produkovat břidlicovou ropu. Vhodné pro těžbu této ropy jsou povrchové doly. Avšak uvedený způsob je obrovskou ekologickou zátěží pro životní prostředí. Také zpracování paliva je finančně náročné, ale kvůli vysoké ceně ropy a pokročilejším metodám těžby se tento způsob začal vyplácet. Zatím nejvýznamnější objevené zásoby ropných písků se nacházejí na území Kanady a Venezuely. Objevilo se mnoho menších amerických producentů a produkce břidlicové ropy začala rychle růst. Tento nástup nové konkurence vedl členy OPEC ke zvýšení těžby ropy. Zvýšená nabídka na trhu vedla ke snižování ceny a během roku 2016 se cena dostala pod 40 USD za barel. Nicméně producenti břidlicové ropy vyvinuli levnější a efektivnější postupy těžby a nyní dokážou ziskově fungovat i při nižší ceně. Pro tuto formu extrakce ropy je typické, že produkce může být rychle zvýšena, což při těžbě hlubinné ropy nelze. Producenti břidlicové ropy mohou proto rychleji reagovat na pohyb ceny ropy. Amerika již vyprodukuje více než 12 milionů barelů ropy denně, což je úroveň, která nebyla pozorována od počátku 70. let. Podle IEA (International Energy Agency – Mezinárodní agentura pro energii) produkce nadále výrazně roste a USA nedávno překonaly těžbu ropy v Saúdské Arábii a Rusku. Výsledkem této silné konkurence byla relativně stabilní cena okolo 50 USD za barel a výrazné výkyvy byly nepravděpodobné až do pandemické krize COVID-19. Z této relativně nízké ceny letecké společnosti mohly těžit, neboť se cena paliva do té doby výrazně promítala do přímých nákladů. Snížením ceny paliva došlo ke snížení nákladů dopravy a zvýšení zisků aerolinií. [14]

COVID - 19 – Kvůli nákaze poklesla denní poptávka po ropě na celém světě zhruba o 2,5 milionu barelů během začátku roku 2020. Tento pokles těžce dopadl na trh s ropou a během dubna cena klesla na své historické minimum, na hranici 30 USD. Došlo k přeplnění skladovacích kapacit a největší producenti, země OPEC a Rusko, vyjednali snížení produkce. Většina členů OPEC je prakticky závislá na příjmech z prodeje ropy. Také pro Rusko byl pokles ceny ropy těžkou finanční ranou. Američtí těžaři byli zasaženi nejvíce, neboť náklady na těžbu jsou vysoké a cena

na trhu nestačila na pokrytí. Nicméně toto období netrvalo dlouho a na konci dubna začala cena ropy opět růst. Na konci roku 2020 se cena dostala na 45 USD za barel. V současnosti se ropa obchoduje za ceny, za které se obchodovala těsně před krizí, poptávka se neustále zvedá, ale zdaleka není na úrovni jako před koronavirovou krizí. Nicméně tento propad ceny ropy neměl žádný výrazný vliv na leteckou dopravu. I když by letecké aerolinie měly snížené náklady za sníženou cenu paliva, tak kvůli probíhající pandemii byla většina letů zrušena a letadla usazena na zem. V současné době není možné ještě učinit závěry týkající se současné probíhající krize, ale z dostupných informací o vývoji z předešlých měsíců a z krátkodobých ukazatelů lze prohlásit, že se jedná o nejhorší krizi v dějinách civilní letecké dopravy. Dle statistik letecká doprava zaznamenala meziroční nárůst o 3,5 % mezi roky 2018 a 2019 v počtu přepravených pasažérů. Během roku 2020 došlo k prudkému snížení zájmu o leteckou přepravu v důsledku šíření nemoci COVID-19. Bylo přepraveno o 2 699 mil. pasažérů méně, což činí asi 60 % propad oproti roku 2019. Dopravci nabízeli o 50 % méně letenek a ztráty v příjmech dosáhly na 371 mld. USD. Odhady pro rok 2021 se pohybují okolo 1,9 - 2,4 mld. méně přepravených pasažérů oproti roku 2019 a předpokládané ztráty jsou 282-343 mld. USD. Současná krize měla na letectví mnohem větší dopad než jakákoliv předchozí a je obtížné odhadnout, kdy se letectví vrátí do stavu před rokem 2020. I přes tento poslední velký výkyv lze předpokládat, že se časem stav vrátí do normálu a zájem o leteckou dopravu začne opět růst. [11, 14]

Jakákoli z těchto krizí měla výrazný dopad na leteckou dopravu, došlo k prudkému poklesu poptávky vlivem napjaté mezinárodní situace, na kterou je letecká doprava velmi citlivá, a dramatickému zvýšení ceny paliva. Některé letecké společnosti dokázaly projít krizovými obdobími s minimálními dopady nebo dokonce se ziskem, nicméně uvedené krize zasáhly většinu leteckých dopravců. Dopravci jsou proto nuceni hledat cesty, jak zvyšovat výnosy, snižovat náklady a přizpůsobovat se vnějším vlivům. [12, 17]

Ačkoli poptávka po ropě roste v důsledku vyšší poptávky po naftě, cena je často ovlivněna současným politickým děním. Poptávka po ropě roste celá desetiletí, přesto ale cena ropy nedosahuje svých historicky nejvyšších úrovní, což je zapříčiněno nejen současnou krizí, ale také obratem, kdy se průmysl v posledních letech snaží více zaměřit na udržitelný rozvoj a alternativní zdroje energie ale také na využití dalších zdrojů ropy (břidlicová ropa). Z grafu č. 3 lze vyčíst, že ropa dosáhla své maximální hodnoty v roce 1981 během druhého ropného šoku, kdy se cena vyšplhala na 35,75 amerických dolarů za barel (přepočteno na dnešní cenu s vlivem inflace 119,59 USD). Cena leteckého paliva se vyvíjí dle ceny ropy. Aerolinie jsou proto nuceny hledat nová opatření, aby snížily dopady výkyvů a vyhnuly se ztrátám. [12]



Graf 3. – Vývoj ceny ropy 1946-2021 [12]

Aby se zabránilo dopadům kolísání ceny paliva, mohou dopravci nasadit tzv. **hedgingový program**. Hedging znamená zajištění stálé ceny pohonných hmot po určitou dobu, na určené množství a za úplatu. Dopravci se tak chrání před náhlými ztrátami z rostoucích cen, na druhou stranu také neumožňují náhlý zisk z poklesu ceny. Někteří dopravci volí tuto jistější strategii, neboť cena paliva je nejvíce volatilním (proměnlivým) prvkem nákladů provozu. Mnoho dopravců na tuto strategii doplatilo během světové recese roku 2008, když si zablokovali cenu 120 USD za barel leteckého paliva a vzápětí došlo k poklesu o více než 60 %. Od té doby letečtí dopravci přistupují velmi opatrně k hedgingovému programu a před jeho zajištěním provádějí řadu analýz trhu a porovnávají výhody a nevýhody. [16]

1.3.2 Nízkonákladová letecká společnost

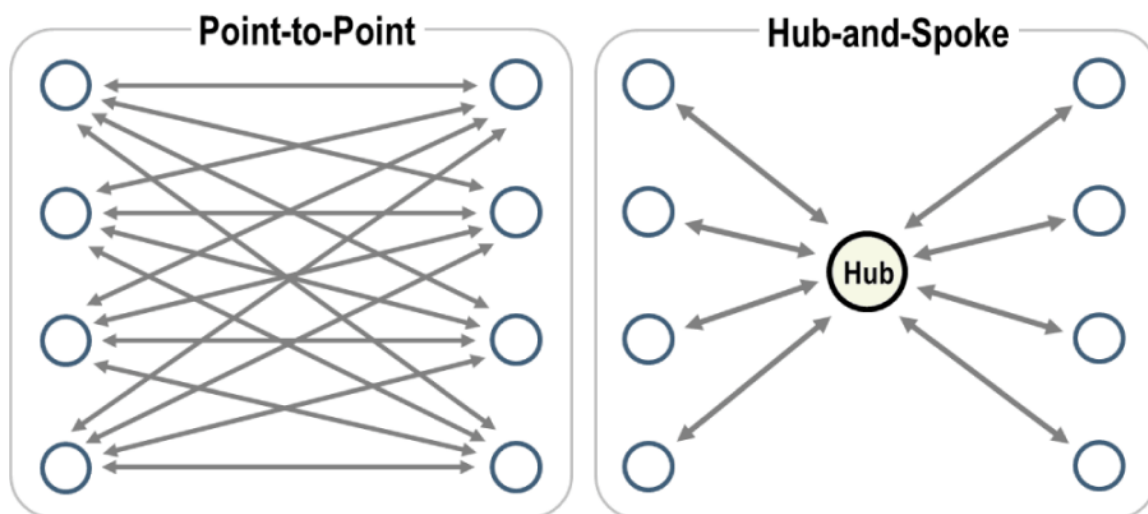
Liberalizace v letectví umožnila nástup nové konkurence. Dnes se letečtí dopravci rozdělují do dvou hlavních skupin. Klasické letecké společnosti a nízkonákladové letecké společnosti, přičemž obě skupiny mají své výhody a nevýhody.

Klasické aerolinky nabízejí služby s fixní dobou odletu, které jsou provozovány po celý rok pravidelnými lety. Na palubě letadla obvykle nabízejí více než jednu třídu. V ceně letenky je zahrnuto více služeb, jejichž úroveň je odlišná pro každou třídu na palubě. Jedná se o občerstvení podávané v průběhu letu, větší prostor, spojení s přestupem na jednu letenku, možnost letět s jinými dopravci a další. Tradiční přepravci mají obecně tendenci využívat převážně uznávaná, primární letiště. Cena letenky bývá vyšší než u nízkonákladového dopravce, ale cestující může na základě věrnostních programů sbírat body za nalétané míle a čerpat různé výhody. Většinou mají velký letadlový park s různými typy letadel, s kterými obsluhují různé tratě a upřednostňují hub-

and-spoke model přepravy. V Evropě jsou takoví dopravci převážně národní společnosti jako například Air France, KLM, Lufthansa, British Airways aj. Některé letecké společnosti provozují rovněž charterové lety. Charterový let je nepravidelný let, tedy let na objednávku. Typickým příkladem charteru je pronájem kapacity letadla cestovní kanceláři, která jej realizuje pro své klienty. Chartery mají často sezónní charakter a jedná se o lety do dovolenkových destinací. [4]

Nízkonákladoví dopravci (Low-cost carriers – LCC) se začali vyskytovat v 70. letech 20. století a vyvinuli se z původních charterových společností. Prvním nízkonákladovým přepravcem v Evropě se stala irská společnost Ryanair, která byla založena roku 1985. Další nízkonákladoví dopravci jsou EasyJet, WizzAir, SmartWings aj. LCC se odlišují od klasických aerolinií pomocí snižování provozních nákladů na minimum, což společnosti umožňuje snižovat cenu letenky. Snižování provozních nákladů provádí pomocí následujících bodů:

- jednotná flotila – provozováním pouze jednoho typu letadla dopravce ušetří na údržbě a výcviku;
- pouze jedna třída – LCC většinou provozuje pouze ekonomickou třídu, protože vyšší třídy by zvyšovaly náklady na personál a služby, zároveň by došlo ke snižování kapacity sedadel;
- maximální kapacita – maximální využití prostoru zajišťuje více obsaditelných míst;
- používání sekundárních letišť – primární mezinárodní letiště účtují vyšší letištní poplatky;
- provozní doba – provoz letů začíná v brzkých hodinách a společnosti se snaží, aby využití jejich letadel bylo co nejvyšší;
- žádné bezplatné služby – za veškeré služby navíc je nutné zaplatit, např. více odbavených zavazadel, občerstvení na palubě, rezervace hotelu, zajištění dopravy na letiště aj.;
- spoje point-to-point – LCC poskytují dopravu pro přímé spoje bez přestupů na krátké a střední tratě, tím se vyhnou mezipřistáním a letištním poplatkům (viz obr. č 5);
- přímé prodeje online – LCC prodávají letenky přes internet a přes vlastní distribuční kanál. Nenavyšují tak náklady spojené s používáním globálních distribučních služeb. Zároveň ušetří na pronájmu prostor kamenných prodejen;
- tarifní struktura;
- menší flexibilita rezervace – nelze rezervovat konkrétní sedadlo a změna rezervace není možná nebo zpoplatněna;
- žádné nebo vlastní věrnostní programy. [4, 17]



Obr. 5 – Point-to-Point a Hub-and-Spoke systémy [81]

Soupeření mezi těmito dvěma skupinami vedlo k postupnému smazávání rozdílů, ve snaze rozšířit okruh zákazníků docházelo k přebírání rozdílných obchodních strategií a dnes se již hranice nedají přesně určit. Došlo ke vzniku tzv. hybridních aerolinek, které kombinují prvky obou zmíněných skupin a snaží se tak pokrýt potřeby co největší části trhu. Přejímání strategií vedlo hlavně ke sblížení nákladů na přepravu a dnes již rozdíl v nákladech mezi oběma typy aerolinií není tak markantní. Některé nákladové vstupy (např. cena paliva) v případě růstu zasahují všechny dopravce, tak že kromě absolutního rozdílu v nákladech se stírají i relativní rozdíly mezi dopravci. [4, 17]

Vstup LCC dopravců na trh naprosto změnil létání. Vytvořilo se konkurenční prostředí, kde svými nízkými cenami vytvářeli tlak na klasické dopravce, což u řady z nich vedlo k jejich zániku nebo odkoupení konkurencí. Některé klasické aerolinie si ve snaze vyhrát boj založily vlastní dceřiné společnosti (např. společnost Go založená British Airways, Song americkou Deltou apod.), nicméně ani tyto pokusy neměly většinou valný úspěch, neboť vedly ke tříštění vlastních trhů společnosti a s řadou omezení se nedokázaly plně vyrovnat nízkonákladovým společnostem. Často to tak končilo odprodejem poboček (často dokonce právě těm low cost dopravcům, kterým měly konkurovat, příkladem je již zmíněná pobočka Go, kterou odkoupilo EasyJet roku 2001) nebo značnou finanční ztrátou, což opět vedlo k posílení LCC. Podíl nízkonákladových dopravců na trhu každý rok roste, dnes je více než každá čtvrtá sedačka v dopravních letadlech na celém světě nabízena některým z nízkonákladových dopravců. I přes tento růst LCC na trhu je nepravděpodobné, že by došlo k naprostému vytlačení klasických dopravců. Úspěch nízkonákladových dopravců je založen hlavně na rozdílu ceny oproti klasickým dopravcům, a proto by bez nich ztratili svoji největší výhodu. Také není možné uplatnit principy LCC na dálkových tratích. Nízkonákladové dálkové linky, tzv. long haul low cost, nelze dost dobře uplatnit. Dosavadní pokusy s obchodním modelem dnešních LCC buď zcela selhaly, nebo je z low cost konceptu převzata jen maximalizace počtu sedaček při omezených palubních službách, ale většina

dalších prvků zůstane zachována z modelu klasických dopravců. Problémy pro uplatnění dalších prvků jsou hlavně:

- vstup do dálkové přepravy vyžaduje velké počáteční investice a je zatížen obchodním rizikem. Nové LCC takové možnosti nemají a zavedení silní nízkonákladoví dopravci jsou si všech rizik dobře vědomi a drží se proto raději svého stávajícího, osvědčeného modelu;
- na dlouhých tratích přibývá nákladových položek a nízkonákladoví dopravci se musí cenově přibližovat klasickým. Jediný způsob, jak tyto náklady v přepočtu na jednotku výkonu snižovat, je větší počet sedaček v letadle. To má u mnohahodinových letů ze zdravotních důvodů své limity, zvláště když se oproti klasickým dopravcům podaří v nejlepším případě udržet pouze minimální rozdíl v ceně, cestující poté není ochoten akceptovat vyšší míru nepohodlí;
- problémem na spousta tratích může být nenaplnění plné kapacity letadla. Klasičtí dopravci uplatňují spolupráce s více dopravci, kdy navzájem doplňují cestující. LCC takovouto spolupráci odmítá. [4, 17]

Ač je tedy nepravděpodobné, že by LCC vytlačili kompletně klasické dopravce z trhu, je možné, že časem se oba modely dopravců sblíží natolik, že splynou v jeden. Je také možné, že s vývojem technologií nebo s převratnými událostmi dojde ke vzniku nového modelu, který změní leteckou dopravu podobně jako nástup nízkonákladových dopravců.

1.4 Další významné vlivy

Dnes je letecká doprava považována za nejmladší a nejdynamičtěji rozvíjející se oblast lidské činnosti, jež zásadně ovlivňuje globální ekonomiku a každodenní životy obyvatel. Jako taková významně přispívá k procesu globalizace. Na druhou stranu je velmi citlivá na globální dění, kdy některé události, byť třeba ne celosvětově významné, výrazně ovlivní názor společnosti, sníží zájem o cestování a určí vývoj techniky a provozních postupů. K takovýmto událostem můžeme přiřadit teroristické útoky, letecké nehody či přírodní katastrofy.

1.4.1 Letecké únosy

Letadlo za letu je velmi zranitelné a náchylné k ohrožení jeho bezpečnosti silou, ať cílenou jako teroristický čin nebo náhodnou jako chování nevladatelných cestujících. S nárůstem objemu letecké přepravy se zvětšuje množství opatření zaměřených na zajištění bezpečnosti letecké dopravy. Letecké únosy rozdělujeme dle typologie motivů nejčastěji na náboženské, politické, psychopatologické a tzv. single-issue únosy. Nejznámější jsou únosy motivované náboženskou ideologií či politickými důvody (kromě již zmíněného 11. září 2001 jde také o únosy izraelských aerolinek, prováděné organizacemi jako Lidová fronta pro osvobození Palestiny, Černé září a podobně). Je třeba pamatovat i na psychologická selhání jedinců, (například let Germanwings 9525 z března 2015) a na single-issue únosy (například útěky ze zemí komunistického bloku do západní Evropy). [5, 25]

Letecká doprava se postupem času stala vyhledávaným cílem teroristických akcí. Tyto útoky mívají dva různé cíle – buď únos letadla s možným využitím cestujících jako rukojmích nebo zničení letadla a zabití všech cestujících na palubě. Průběh je většinou podobný, teroristé se snaží zmocnit kontroly letadla ozbrojeným násilím, což vyžaduje schopnost propašovat zbraň (výbušné zařízení, pistoli či nůž) na palubu, její použití (nebo hrozba jejího použití) ke zneškodnění odporu a získání kontroly nad ovládacími a komunikačními prostředky letadla. Důvody, proč zrovna letecká doprava je často cílem útoků jsou:

- vysoká medializace leteckých únosů a havárií;
- civilní letadla jsou ve vzduchu téměř bezbranná a tvoří jednoduchý cíl;
- řada leteckých společností je národními společnostmi, takže pro teroristy jsou způsobem, jak poškodit danou zemi;
- letadlo může být rovnou zbraň i únikový prostředek. [5]

Stupňující se únosy vedly ke vzniku mezinárodních úmluv, jak postupovat v těchto případech. V roce 1963 byla vypracována **Tokijská úmluva** (Úmluva o trestných a některých jiných činech spáchaných na palubě letadla). Úmluva se vztahuje na trestné a jiné činy spáchané osobou na palubě letadla za letu, registrovaného ve smluvním stát, a stanovila, že stát, ve kterém je letadlo registrováno, je příslušný k výkonu soudní pravomoci nad trestnými činy spáchanými na jeho palubě. Dále ustanovila, že země, ve které unesené letadlo přistane, vrátí letadlo právoplatnému vlastníkovi a umožní cestujícím a posádce pokračovat v cestě. V prosinci 1970 byla vypracována **Haagská úmluva** (Úmluva o potlačení protiprávního zmocnění se letadla). Úmluva přísněji vymezuje čin protiprávního zmocnění se letadla, klasifikuje ho jako trestný čin, definuje přísné tresty a umožňuje každému státu stíhat únosce, pokud je tento stát nevydá, a zbavit je azylu před stíháním. [93]

Stupňovala se také letová, ale hlavně pozemní prevence. Skenování pasažérů a jejich zavazadel rentgenovými detektory bylo postupně doplňováno o ruční prohlídky, detektory kovů či moderní přístroje, které dokážou na základě stěrů z těla odhalit, zda osoba nemanipulovala v posledních dnech s výbušnými látkami. Dále vznikly postupy pro profilování cestujících, kdy státy vyžadují pro své bezpečnostní složky přístup do rezervačních systémů leteckých společností tak, aby bylo možné sledovat pohyb podezřelých osob. V rámci letů do zemí, které představují riziko či by mohly být cílem útoků, jsou často i další opatření, například bezpečnostní rozhovor. Cílem bezpečnostního rozhovoru je identifikovat podle předem stanovených kritérií osoby, u nichž by mohlo být podezření z teroristických úmyslů. Další ochranou v rámci letu je zabezpečení pilotní kabiny proti neoprávněnému vniknutí a doprovázení letů takzvanými leteckými maršály. Jejich úkolem je být nenápadný a pozorovat, jestli nehrozí nějaké nebezpečí. V případě, že by nebezpečí nastalo, je vycvičen na to, aby problém eliminoval a případného útočníka zpacifikoval. [93]

Únos letu 305

První únos letadla, který byl provedený kvůli výkupnému a odstartoval v 70. letech „boom“ únosů ve Spojených státech, se stal 24. listopadu 1971. Během letu číslo 305 na trase z Portlandu do

Seattlu byl Boeing 727 unesen. Na let trvající 30 minut v rámci států tenkrát nebyla potřeba identifikace cestujících a stačilo pouze uvedení jména. Letu se zúčastnil muž, který uvedl jméno Dan Cooper. Cestující během letu předal letušce zprávu, že má v kufříku bombu a požaduje 200 000 dolarů, dva padáky, a aby letadlo doplnilo palivo v Seattlu na další let. Pilot kontaktoval letovou věž a ta se obrátila na FBI. Od nich pilot dostal příkaz spolupracovat s únoscem. Po splnění požadavků letadlo přistálo v Seattlu. Cooper přikázal, aby doplnění paliva proběhlo na odlehlém místě letiště a za ztlumených světel, aby se tak vyhnul případným odstřelovačům. Únosce byl podle svědků překvapivě klidný. Za splnění všech podmínek pustil 37 rukojmích, všechny cestující včetně jedné letušky. V letu poté pokračovali dva piloti, druhá letuška a technik. Během letu bylo letadlo následované americkými stíhačkami. Cooper poté chtěl letět směrem do Mexika – to posádka vzhledem k nedostatku paliva odmítla a let byl namířen na Reno v Nevadě. Únosce poté požadoval let ve výšce 3 000 metrů, rychlostí $320 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$, s vytaženým podvozkem a nenatlakovanou kabinou. Během letu přikázal letušce, aby odešla do kokpitu. Následně si Cooper vzal jeden z padáků, otevřel zadní dveře letadla a vyskočil ven. Kvůli špatnému počasí ho doprovázející stíhačky neviděly. [26]

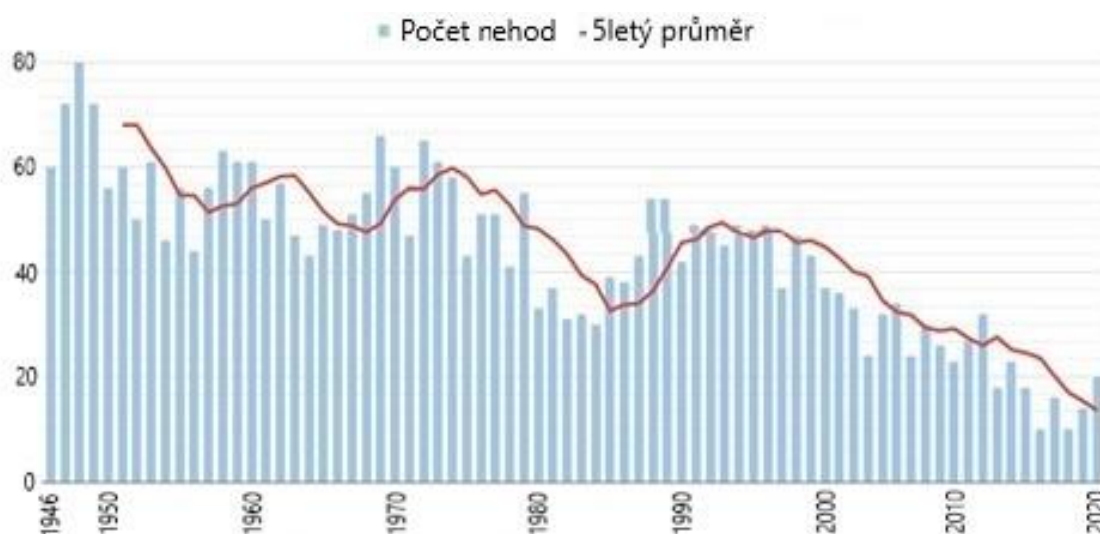
Následné vyšetřování a prohledávání oblasti dopadu nic nepřineslo. Předpokládá se, že Cooper nepřežil seskok nebo lesní prostředí na které nebyl připraven. Tělo, ale ani peníze, se nikdy neobjevilo. Skutečná identita únosce nebyla odhalena. Došlo k řadě výsledků, policie dokonce zatkla muže jménem D. B. Cooper, který byl ale okamžitě propuštěn, jelikož neměl s únoscem nic společného – od té doby se ale hledanému začalo říkat D. B. Cooper namísto původního Dan Cooper. Po této události následovala řada dalších podobných pokusů. V reakci se posílily letové kontroly cestujících i jejich zavazadel v podobě detektorů kovů. V letadle se instalovaly průhledy na dveře kokpitu a tzv. Cooperova pojistka, která zabraňuje otevření zadních dveří za letu. [26]

1.4.2 Letecké katastrofy

Letecká doprava je statisticky nejbezpečnější způsob dopravy vlivem přísných pravidel zaručujících vysokou úroveň bezpečnosti, vývojem technologií, správnou údržbou a vysokou úrovní výcviku. Postupným vývojem se snížil pětiletý průměrný počet smrtelných nehod na 13 za rok. Za rok 2019 se stalo 20 smrtelných nehod se 283 oběťmi. Oproti roku 2010 se tak průměr nehod snížil o polovinu. Ze statistik vyplývá, že téměř 70-80 % všech současných leteckých nehod je způsobeno chybou člověka. Následující graf č. 4 zobrazuje počet leteckých nehod se ztrátami na životech v období od 1946–2019. Počet nehod před 2. světovou válkou byl výrazně nižší, neboť až po válce došlo k výraznému rozmachu letectví a tím i k růstu počtu nehod. [27]

Dnešní dopravní letadla jsou konstruována podle filozofie "bezpečná při poruše" (Fail Safe), což znamená, že všechny důležité části a systémy letadla jsou buď zálohovány (někdy i několikanásobně), nebo jsou zpracovány postupy, jak dokončit let i v případě poruchy. Pravděpodobnost vzniku poruchy vychází z modelu spolehlivosti zpracovaného výrobcem jako součást procesu typové certifikace letadla a je dána konstrukčním řešením, způsobem namáhání a stavem opotřebení všech částí, které se mohou podílet na vzniku dané poruchy. Smyslem údržby

je udržet pravděpodobnost vzniku technické závady či kombinace závad, které by mohly vést k nehodě letadla, pod předepsanou úrovní. [5]



Graf 4. – Počet leteckých nehod s úmrtím a 5letý průměr 1946-2019 [27]

Nehody s lidskými oběťmi, případně s vážnými zraněními účastníků, jsou vždy velkou tragédií a zkouškou psychické odolnosti, jak pro pozůstalé, tak pro přeživší. V letectví jsou tyto události ještě umocněny tím, že velké procento nehod končí úmrtím posádky a cestujících, fatálním zničením letadla, škodami na majetku a případně poškozením třetí strany. Jakákoliv letecká nehoda či incident je silně medializována a ohrožuje důvěru veřejnosti v leteckou dopravu. Šetření těchto událostí spadá pod nejrůznější organizace, které jsou na takovéto události odborně zaměřené, mají zajištěná patřičná povolení a zpracovaný detailní postup vlastního šetření. Většinou se jedná o organizace zřízené vládou, v České republice se jedná o Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod (ÚZPLN). Jejich hlavním úkolem je zjištění příčiny a zajištění prevence budoucích nehod a incidentů bez určování viny či odpovědnosti. Zahrnuje shromáždění a analýzu informací o letecké nehodě, vypracování závěrů včetně určení příčiny nebo faktorů, které k nim přispívají, a případně vypracování bezpečnostních doporučení pro výrobce, provozovatele, údržbu, posádku a další účastníky provozu. ÚZPLN postupuje podle předpisů L13 (Předpis o odborném zjišťování příčin leteckých nehod a incidentů), zákona č. 49/1997 Sb., o civilním letectví, předpisů EUROCONTROL (European Organisation for the Safety of Air Navigation – Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu) a předpisů Evropské unie upravujícího šetření nehod a incidentů v civilním letectví. [5]

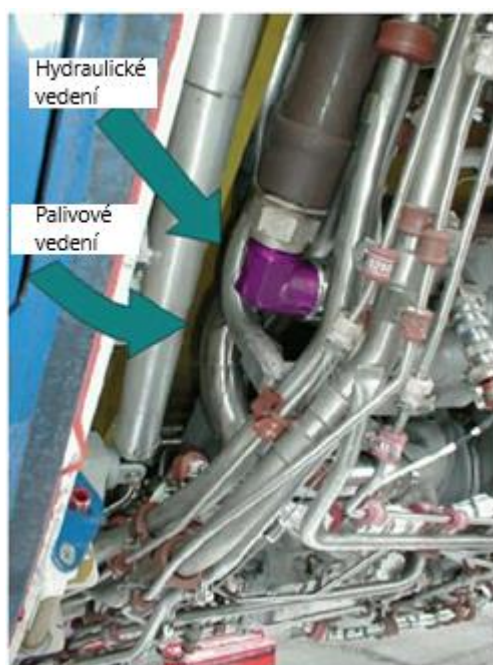
Příčiny leteckých nehod se časem mění. Dříve více převažovaly letecké nehody z důvodu selhání letecké techniky, protože letadla obsahovala konstrukčně nespolehlivé součásti, což umocňoval fakt, že systémy řízení nebyly zálohované. Dříve také piloti méně využívali vypracované nouzové postupy, které snižují riziko vzniku letecké nehody při nenadálé situaci, ať už z důvodu jejich úplné absence, nebo jejich ignorace. V pozdějších letech se daleko výrazněji vyvíjela obchodní letecká přeprava, s kterou přišel větší důraz na bezpečnostní opatření. Tvořily a zlepšovaly se

postupy a limity bezpečnosti provozu letadel a letišť, které vedly k celkovému zvýšení úrovně bezpečnosti provozu. Na základě zjištění příčin nehod, a aby se znovu neopakovaly, se měnila konstrukce letadel (například již zmíněné nehody letounů typu Comet), postupy údržby (let Air Transat 236), výcvik leteckých posádek, změny leteckých postupů a frazeologie (nehoda na Tenerife, význam slov ‚take off‘ a ‚departure‘) a mnoho dalších. [1, 4]

Nehoda letu Air Transat 236

Nehoda se stala během letu z Toronto do Lisabonu v noci z 23. na 24. srpna 2001. Jednalo se o pravidelný transatlantický let s číslem TS 236 aerolinek Air Transat. Letounu Airbus A330 vysadily oba motory z důvodu vyčerpání paliva. Nicméně piloti, kapitán letu Robert Piché (48) a první důstojník Dirk de Jager (28), dokázali nouzově přistát na letišti vzdáleném téměř 130 kilometrů na Azorách. Zachránili tak všech 293 cestujících. Následující vyšetření ukázalo, že nehoda vznikla z důvodu špatné výměny náhradních dílů. [28, 29]

Letadlo Airbus A330-243 bylo 5 dní před nehodou na pravidelné údržbě. Během ní našli kovové části v olejovém systému pravého motoru značky Rolls-Royce RB211 Trent 772. Z toho důvodu se rozhodli motor vyměnit za starší model, který neobsahoval hydraulickou pumpu. Použili pumpu z původního motoru, nicméně vedení hydraulické kapaliny bylo o pár milimetrů delší. Hlavní technik údržby sice upozornil na nekompatibilní díly, nicméně na nátlak vedení společnosti, které nechtělo odstavit letadlo, výměnu provedli. Vlivem tlaku poté došlo ke kontaktu hydraulického vedení a vedení paliva, které se prodřelo a zlomilo. [28, 29]



Obr. 6 – Zobrazení hydraulického a palivového vedení [29]

V 04:38 UTC letadlo začalo ztrácet palivo. V 05:03 byli piloti upozorněni palubním počítačem na nízkou teplotu oleje, nízkou zásobu oleje a vysoký tlak oleje. Předpokládali, že se jedná o chybu signalizace. V 05:33 UTC počítače signalizovaly výrazný pokles hladiny paliva v pravé nádrži. Piloti nepředpokládali únik paliva a řídili se dle letového manuálu, začali přečerpávat palivo z levé nádrže. Když nedošlo k vyrovnání hladin, piloti si uvědomili, že se jedná o únik. V té době bylo v nádržích asi 11 tun paliva, což by nestačilo na zbytek cesty do Lisabonu. V 05:45 změnili směr na nejbližší letiště, vojenskou základnu v Lajes na Azorách a vyhlásili nouzový stav z důvodu nedostatku paliva. V 06:13 letadlu vysadil pravý motor. Letadlo bylo ve výšce FL390 a ve vzdálenosti 280 km od letiště. Piloti ohlásili letovému řízení, že motor přestal pracovat. V 06:26 přestal pracovat i druhý motor ve vzdálenosti 120 km. Bez pohonu ztrácel letoun výšku 300 metrů na každých 5 kilometrů ($610 \text{ m} \cdot \text{min}^{-1}$), nicméně piloti dokázali doplachtit zbylou vzdálenost. Před přiletem potřebovali ztratit výšku, proto provedli otočku o 360° a těsně před dosednutím několik S manévrů. V 06:45 se poprvé dotkli země s rychlostí $370 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$ asi 310 m za prahem runwaye. Následně letadlo odskočilo asi o 540 m dál, kdy už dosedlo trvale. Piloti použili nouzové brzdění a zastavili asi 700 metrů před koncem runwaye. Následovala nouzová evakuace, kdy všech 306 osob přežilo, pouze 16 osob utrhlo lehká zranění a 2 osoby těžká zranění. Letadlo utrpělo poškození hlavního podvozku a spodních částí letounu. [28, 29]

Vyšetření nehody se ujal portugalský úřad pro vyšetřování a prevenci leteckých nehod za pomoci francouzských a kanadských úřadů. Po vyšetření příčin nehody společnost Air Transat uznala svoji odpovědnost a dostala od kanadských úřadů pokutu ve výši 250 000 kanadských dolarů. Dále došlo ke změně výcviku pilotů, byl přepracován manuál pro případ úniku paliva, kdy je nutné před přečerpáváním paliva zkontrolovat, zda nedochází k úniku. Airbus přepracoval palubní systém, kdy nyní předává zprávu, pokud dochází k větší spotřebě, než je očekávaná. Piloti sice selhali v zjištění, že se jedná o únik, nicméně, po návratu do Kanady byli uvítáni jako hrdinové za vynikající zvládnutí situace. [28, 29]

1.4.3 Přírodní katastrofy

K přírodním katastrofám dochází každoročně, často se odehrají nepředvídatelně a vyžádají se tisíce obětí. Existují oblasti, ve kterých je výskyt kalamit mnohem pravděpodobnější a v takovýchto oblastech je třeba, aby letiště bylo připravené. Katastrofy klasifikujeme podle prostředí jejich vzniku. Prostředím je:

- kosmos – pád mimozemského tělesa;
- atmosféra – tropické cyklóny, tornáda či pískové a prachové bouře;
- hydrosféra – bouřlivé přílivy, tsunami, povodně;
- zemský povrch – ničivé svahové pohyby – sesuvy;
- celá zemská kůra až do svrchního pláště – sopečné výbuchy, zemětřesení. [31]

Země na rozhraní tektonických desek jsou příkladem častých seismických aktivit. Velká část těchto činností se odehrává na mořském dně a přináší další riziko tsunami nebo přílivových vln. Existují tři hlavní rizika seismických aktivit:

- zemětřesení – zemětřesení způsobuje pohyb litosférických desek. Slabá zemětřesení, která člověk buď vůbec nepocítí, nebo která se projeví na nestabilních předmětech v domácnosti, jsou velmi častá i v seismicky klidnějších oblastech. Silnější zemětřesení jsou pak vázána většinou na aktivní tektonické oblasti a jejich výskyt je méně častý. Zemětřesení vzniká nahromaděním napětí v zemské kůře a jeho náhlým uvolněním. Epicentrum je místo na zemském povrchu nejbližší ohnisku;
- tsunami – zemětřesení může způsobit deformaci mořského dna, která dále vyvolá obrovské mořské vlny a tsunami;
- sopečná erupce – během sopečná erupce dochází k výronu magmatu na povrch tělesa. Je vyvolávána tlakem sopečných plynů uvolňujících se z magmatu během výstupu. Ohrožením jsou výlevy lávy, když se valí k lidským sídlům poblíž sopky. Větším nebezpečím pro letectví, než lávy jsou vývrhy sopečného popelu. Stovky krychlových kilometrů částic dokážou zastínit slunce, ochladit atmosféru na řadu let a ohrozit letový provoz. [32]

Letištní pohotovostní plánování

Dle Anexxu 14 musí každý provozovatel letiště vypracovat Letištní pohotovostní plán odpovídající velikosti provozu letadel a činnostem prováděným na daném letišti, který zajišťuje koordinaci potřebných činností odpovědných útvarů, v případě vzniku mimořádné události na letišti. Mezi odpovědné útvary na letišti řadíme např. složky řízení letového provozu, záchranná a požární služba, správa letiště, lékařské a ambulantní služby, provozovatelé letadel, bezpečnostní služby a policie. Dokumentace letištního pohotovostního plánu musí obsahovat nejméně následující:

- typy předpokládaných událostí;
- útvary zahrnuté do plánu;
- odpovědnost a úkoly každého útvaru, pohotovostní operační středisko a místo velení pro každý typ pohotovosti;
- jména a telefonní čísla kanceláří nebo lidí pro spojení v případě konkrétní mimořádné události;
- mapu letiště a jeho bezprostředního okolí s kartografickou sítí. [32]

Vulkanický popel

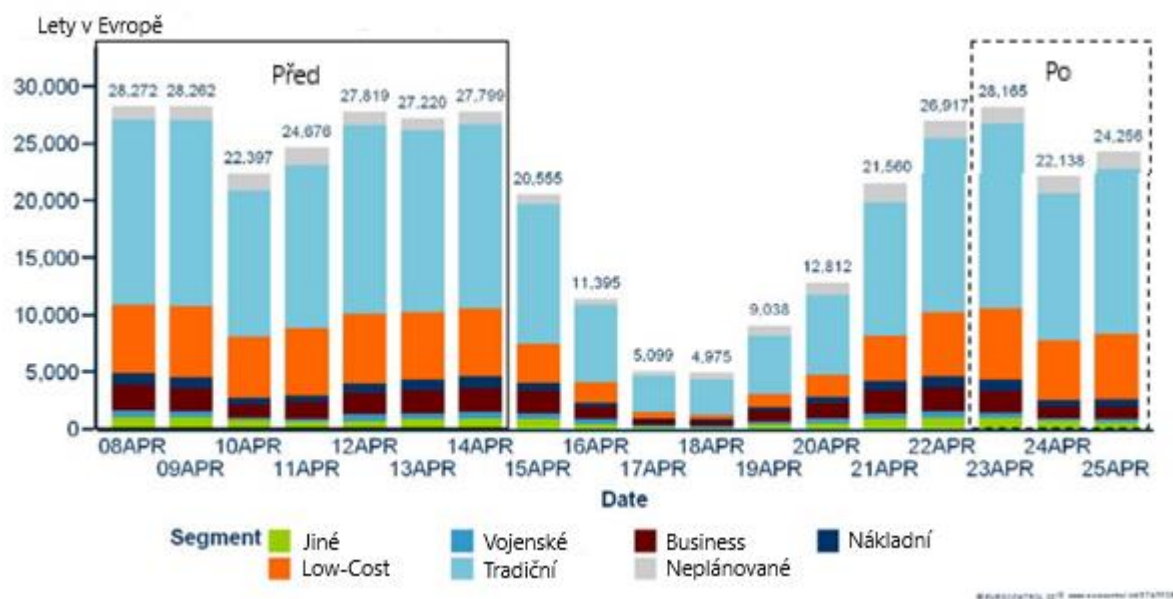
Vulkanický popel je z hlediska letecké dopravy, oproti ostatním produktům vulkanické činnosti, vážný problém, protože významně narušuje vzdušný prostor a letadla jsou citlivá i na nízké koncentrace popela. Zatímco dnes je již nebezpečí vulkanického popela dobře známo, do roku 1982 nebyl považován za hrozbu. To se změnilo s prvním incidentem dopravního letadla, který téměř vyústil v havárii. Od té doby je vulkanickému popelu věnována pozornost ze strany úřadů a mezinárodních organizací. Vulkanický popel ohrožuje leteckou dopravu nejen poškozením

konstrukce letadla, jeho motorů, ale též kontaminací letiště a jeho vybavení. V závislosti na hrubosti popela dochází k abrazivnímu poškozování celého povrchu draku. Dochází k obrušování náběžných hran, což má za následek zhoršování aerodynamických vlastností. Obrušováním oken pilotní kabiny dochází k jejich zneprůhledňování a znemožňování vizuální orientace. Může dojít k poškození prvků různých systémů, které jsou umístěné na povrchu. Do těchto prvků spadá pitot-statická trubice a jiná snímací zařízení, antény navigačních systémů a komunikace, případně popel může kontaminovat vnitřní prostory a systémy. Velkým problémem je nasávání popela proudovými motory a tavení popela do sklovitého materiálu, který se poté ukládá v částech turbíny motoru, na statorových lopatkách a dochází tak k zanášení motoru. To způsobuje zmenšování průchozího prostoru a zvyšování tlaku ve spalovací komoře. Ve spalovací komoře je nedostatek kyslíku, což se projevuje neúplným spalováním paliva. Výsledkem jsou pulzace v motoru, ztráta tahu až úplné selhání motoru. Na turbíně způsobuje ukládaný materiál snížení účinnosti turbíny a tím i výkonu celého motoru. Dále dochází k abrazivnímu poškozování lopatek kompresoru a snižování jejich životnosti a účinnosti. [32]

Pokud popel pokryje souvislou vrstvou odbavovací plochy, runwaye, pojezdové dráhy, ale i techniku, světelná návěstidla, letištní budovy či radionavigační systémy výrazně tak omezí provoz, sníží viditelnost, ohrozí bezpečnost a zvýší nároky na schopnosti nejen posádek letadla, ale i pozemního personálu. Pokud dojde k takovéto události většinou to vede k úplnému uzavření letiště, až do doby, kdy je popel odstraněn. Odklizení popela je nákladné a náročné, protože nestačí pouze odklidit popel z provozních ploch letiště, ale je nutné zajistit jeho odklizení mimo letiště tak, aby nedošlo k opětovné kontaminaci provozních ploch např. v důsledku rozfoukání popela větrem. [32]

Erupce sopky Eyjafjallajökull

Letecká doprava nad Evropou byla paralyzována kvůli erupci islandské sopky Eyjafjallajökull (14. dubna 2010) od 15. dubna do 21. dubna 2010, omezení se výrazně dotkla i transatlantických letů. Zrušeno bylo na 100 tisíc letů, výluka zasáhla 29 % celosvětové letecké dopravy. Opatření se týkala více než 300 letišť a postiženo bylo deset milionů cestujících takřka ve všech částech světa. Během dalších menších erupcí během května došlo k zrušení asi 7 000 letů. Dubnové uzavření vzdušného prostoru způsobilo leteckým společnostem finanční ztráty odhadované na 1,7 miliardy dolarů. [33]



Graf 5. – Počet a rozdělení letů v Evropě během dubna 2010 [31]

Tato bezprecedentní situace způsobila řadu změn v postupech při kontaminaci vzdušných prostorů vulkanickým popelem. ICAO zřídilo Mezinárodní úkolovou jednotku pro vulkanický popel (International Volcanic Ash Task Force – IVATF), jejímž úkolem je koordinace opatření přijímaných v souvislosti s vulkanickým popelem a jejich úprava, a to jak na globální, tak regionální úrovni. Jejím nejvýraznějším rozhodnutím bylo zrušení nulové tolerance a odsouhlasení bezpečné koncentrace vulkanického popela $2 \text{ mg} \cdot \text{m}^{-3}$ pro leteckou dopravu. To znamená, že k uzavření letiště a zákazu provozu letadel dojde pouze v oblastech s vyšší než povolenou koncentrací a v ochranném pásmu o rozměru 60 NM. [33]

2. SOUČASNÉ LEGISLATIVNÍ POŽADAVKY NA LETADLOVOU TECHNIKU PRO LETECKOU PŘEPRAVU

Letiště je významným členem dopravní infrastruktury. Počty odbavených letů se v posledních letech významně zvyšují. Letiště Praha za rok 2019 odbavilo více než 17,8 milionu cestujících, což oproti předchozímu roku 2018 činilo nárůst o 6 %. Tento nárůst nicméně zvětšuje dopady na životní prostředí, a proto roste tlak na provozovatele letišť a výrobce na snižování dopadů. Letiště jako zdroj negativních dopadů na prostředí je však vnímáno okolím mnohem citlivěji a intenzivněji, zejména v důsledku každodenních osobních zkušeností s leteckým hlukem, který je hodnocen jako jeden z nejhorších vlivů na životní prostředí a život lidí.

V průběhu let se kladl čím dál větší důraz na právní úpravu ochrany životního prostředí. Základem přístupu ČSL (Česká správa letišť) k ochraně životního prostředí se stal dokument Koncepce péče o životní prostředí z roku 1992. Obsahoval záměry ke zlepšování životního prostředí a jeho ochrany po předchozí analýze nedostatků na každém letišti pod správou ČSL. V současnosti se ochrana životního prostředí opírá o soustavu vnitřních organizačních předpisů a norem. Každý letoun v členských zemích ICAO musí splňovat certifikační zkoušku o hlukové způsobilosti a motorových emisích podle Annex 16. Pro Českou republiku musí splňovat podmínky dle předpisu L16. Tato osvědčení kontroluje a vydává Úřad pro civilní letectví. [84]

Mimo tento předpis platí řada nařízení a směrnic Evropské unie a České republiky, které se neustále upravují a doplňují:

- směrnice EP a Rady 2002/49/ES o hodnocení a řízení hluku ve venkovním prostředí;
- nařízení EP a Rady (EU) č. 598/2014 o pravidlech a postupech pro zavedení provozních omezení ke snížení hluku na letištích Unie v rámci vyváženého přístupu;
- směrnice 2008/101/ES o vytvoření systému pro obchodování s povolenkami na emise skleníkových plynů ve Společenství;
- nařízení vlády č. 9/2002 Sb., kterým se stanoví technické požadavky na výrobky z hlediska emisí hluku;
- zákon č. 49/1997 Sb. Zákon o civilním letectví;
- zákon č. 258/2000 Sb., o ochraně veřejného zdraví;
- nařízení vlády č. 272/2011 Sb., o ochraně zdraví před nepříznivými účinky hluku a vibrací;
- zákon č. 201/2012 Sb., o ochraně ovzduší. [84]

2.1 Legislativa

Posuzování stavu akustické způsobilosti a emisní způsobilosti spadá do povinností příslušného certifikačního úřadu (pro Českou republiku je to Úřad pro civilní letectví – ÚCL). Ten pro každé letadlo vydává osvědčení o hlukové způsobilosti a osvědčení emisní způsobilosti. Pro vydání osvědčení letadlo musí prokázat, že splňuje příslušné hlukové a emisní limity podle platných standardů předpisu L-16. Osvědčení hlukové způsobilosti je vydáváno s neomezenou dobou

platnosti a musí obsahovat informace uvedené v předpisu L16/I hlava I. Mezi tyto informace spadá:

- název státu zápisu do rejstříku;
- název dokumentu dokládajícího ověření hlukové způsobilosti;
- číslo dokumentu;
- poznávací značka;
- výrobce a typ letadla;
- výrobní číslo letadla;
- výrobce, typ a model motoru;
- typ a model vrtule u vrtulových letounů;
- maximální vzletová hmotnost v kilogramech;
- maximální přistávací hmotnost v kilogramech;
- další modifikace provedené za účelem splnění požadavků na ověření hlukové způsobilosti;
- datum vydání osvědčení o hlukové způsobilosti;
- podpis úředníka, který dokument vydal;
- dále obsahuje hladiny hluku v jednotlivých fázích letu podle splnění požadavků tohoto předpisu. [34]

Osvědčení emisní způsobilosti se vydává pro všechny motory zvláště a musí obsahovat minimálně tyto informace podle předpisu L16/II, části III, hlavy 1:

- název certifikačního úřadu;
- označení typu a verze výrobcem;
- prohlášení o každé dodatečné modifikaci zavedené pro účely splnění příslušných požadavků emisní způsobilosti;
- jmenovitý tah;
- referenční poměr stlačení;
- prohlášení o splnění požadavků na hodnotu kouřového čísla;
- prohlášení o splnění požadavků na plynné znečišťující látky. [34]

ÚCL se zaměřilo na kvalitu ovzduší v předpisu L16/II, kde udává pokyny pro ověřování emisní způsobilosti s požadavky na kouřivost, plynné a pevné emise nových leteckých motorů. Dále hlídá emise z letištních zdrojů, vliv odmrazovací techniky a vliv stárí motorů na produkci emisí. L16 dále obsahuje svazky L16/III – Emise CO₂ letounů a L16/IV – Program kompenzace a snižování emisí oxidu uhličitého v mezinárodním letectví. [34]

2.2 Hluk

Zvuk na lidské vnímání působí svojí intenzitou, výškou a proměnlivostí. Fyzikálně ho lze popsat jako mechanické vlnění šířící se v prostoru, o určité frekvenci a amplitudě. Hlukem se stává, jakmile začne působit rušivě. Dlouhodobé působení nadměrného hluku může mít negativní vliv na zdraví jedince a na kvalitu života. Při dlouhodobém působení může u člověka vyvolat zhoršení sluchu, stres, zvýšený krevní tlak, bolesti hlavy, potíže se soustředěním a ovlivnit schopnosti

jedince. Hluk se měří pomocí jednotek decibelu (dB). Hodnota 0 dB je práh slyšení a 130 dB práh bolestivosti, kdy zvuk působí bolest v uchu. Od této hodnoty výše může způsobit trvalé poškození sluchového nervu. V letectví se také používá jednotka EPNdB, která není přímo měřitelná a musí se dopočítávat. Tato jednotka popisuje míru obtěžování člověka hlukem letadla. Hluk způsobený letadlem byl problémem od počátku letectví. Při přechodu z pístových motorů na proudové v 60. letech a se zvyšováním hustoty dopravy se zájem o tuto problematiku postupně zvětšoval. Roku 1968 shromáždění ICAO přijalo nařízení týkající se hluku a vydalo doporučující materiály pro kontrolu hlasitosti zvuku na letištích a okolí. Annex 16 je částí přílohy Chicagské úmluvy a obsahuje postupy pro měření hlasitosti, lidské tolerance na hlasitost, způsoby osvědčování hlasitosti letounů, postupy pro snižování hluku letadel a nároky podle jednotlivých typů letadel. Během let se tento annex postupně vyvíjel a doplňoval, jak rostly nároky na ochranu životního prostředí. Letadlo vytváří hluk dvěma způsoby – aerodynamicky a mechanicky. Oba tyto způsoby je snaha minimalizovat zdokonalováním techniky. Aerodynamický hluk je způsoben obtékáním vzduchu okolo letadla a mechanický hluk je způsoben mechanickými pohyby letadla, motoru a jeho částí. Obecně platí, že při vzletu je dominantnější mechanický hluk, kdy je třeba vyvinout velký výkon motoru pro dostatečný tah. Při příletu je naopak dominantnější aerodynamický hluk, kdy je tah motoru minimální. [35, 36]

2.2.1 Aerodynamický hluk

Aerodynamický hluk vzniká v důsledku narušování laminárního proudění na jednotlivých částech letadla. Toto narušování způsobuje nejen hluk, ale také zvyšuje odpor proudícího vzduchu a tím zvyšuje spotřebu paliva. Hladina hluku závisí na rychlosti letadla, hustotě vzduchu a aerodynamických vlastnostech konstrukce. Mezi částmi, kde se vytváří nejvíce hluku spadá vztlačková mechanizace, vytažený podvozek a nedokonalosti trupu letadla. Celkově je snaha snižovat odpor působící na povrch letadla. Zkoumají se různé materiály, které působí malý odpor proudícímu vzduchu. Dále se povrch upravuje proti menšímu zachytávání nečistot a hmyzu, které také snižuje aerodynamické vlastnosti. Tyto postupy spadají do tzv. pasivní kontroly proudu vzduchu. Spadá sem také úprava geometrických tvarů na povrchu letadla pro hladší obtékání vzduchu např. na odtokové hraně křídla, otvory pro doplnění paliva, konstrukční spoje aj. Velký podíl na aerodynamickém hluku má podvozek, který má velké množství různě tvarovaných částí a nelze je přímo upravit. Proto je snaha zakrýt jednotlivé části podvozku aerodynamickým krytem, který má lepší tvar a vzduch ho lépe obtéká. Dále existuje aktivní kontrola proudu vzduchu, metody spočívají ve využití aero akustického designu pro části letadla způsobující hluk. Byly provedeny pokusy s povrchovým nasáváním vzduchu a vypouštěním za odtokovou hranou, čímž dojde ke zmenšení mezí vrstvy a méně výraznému turbulentnímu proudění. Zkoumají se také metody, které spočívají ve vzájemné interferenci dvou opačných vln a následnému vyrušení, a možnosti využití trysek, které by byly umístěny na povrchu křídla, pouštěly by vzduch do mezí vrstvy, čímž by způsobily pozdější oddělení od povrchu křídla. Tyto metody nejen že snižují hluk způsobený na křídle, ale také zlepšují aerodynamické vlastnosti letu. [36, 37]

2.2.2 Mechanický hluk

Mechanický hluk vzniká mechanickými pohyby stroje a chodem pohonné jednotky. Mezi letadlové systémy vytvářející nevíce hluku patří pomocná jednotka APU, klimatizace a komunikace. Největším zdrojem hluku jsou motory. Je třeba rozlišovat skupiny letadel na pístové, turbovrtulové a proudové. U pístových letadel je největším zdrojem hluku samotný pístový motor a hluk vznikající na vrtuli. Podobně jsou na tom turbovrtulová letadla. U proudových letadel je největším zdrojem hluku protékání vzduchu přes pohonnou jednotku, kdy je vzduch stlačován kompresorem, vháněn do spalovací turbíny ve směsi s palivem, následuje vznícení směsi a rychlá expanze. Největší podíl má hluk z trysek. Hlasitost hluku je přímo úměrná relativní rychlosti proudícího vzduchu. Pro snížení hluku se používají tlumiče na výstupu spalin z motoru. Nejvíce mechanického hluku vzniká při odletu letadla, neboť motor musí vyprodukovat dostatečný tah pro vzlet. [36, 40]

2.3 Emise

Letecké emise jsou zvětšujícím se zdrojem znečištění přírodního prostředí. Podle odhadů by se do roku 2050 objem letecké dopravy měl zvětšit na 6,5 – 15,5ti násobek oproti roku 1990. Z hlediska spotřeby je samotný let rozdělen do fází, které se hodnotí podle doby a spotřeby paliva během fáze. Fáze mohou mít vliv na životní prostředí lokální nebo globální. Poblíž letišť provoz ovlivňuje ovzduší, zdraví obyvatel a pracovníků, proto je nutné řešit pojiždění, vzlet a přistání. Globální vliv má hlavně fáze letu, neboť vypouštění emisí ve stratosféře má výrazně větší vliv na klima. Fáze se dělí následovně:

- pozemní pojiždění – doba od prvního pohybu letadla až po vzlet na ranveji, nebo od prvního dotyku po přistání až do zastavení letadla;
- vzlet – definován jako náhlý nárůst akcelerace na vzletovou rychlost, náklon letadla a je ukončen buď dosažením výšky 35 stop nebo zasunutím podvozku;
- stoupání – letadlo po vzletu vystupá na cestovní výšku;
- let – doba od ukončení stoupání po začátek klesání;
- klesání – prudké a nepřerušené klesání k cílovému letišti;
- přistání – první dotyk kol, relativní výška letadla vůči letišti je nulová. [42, 44]

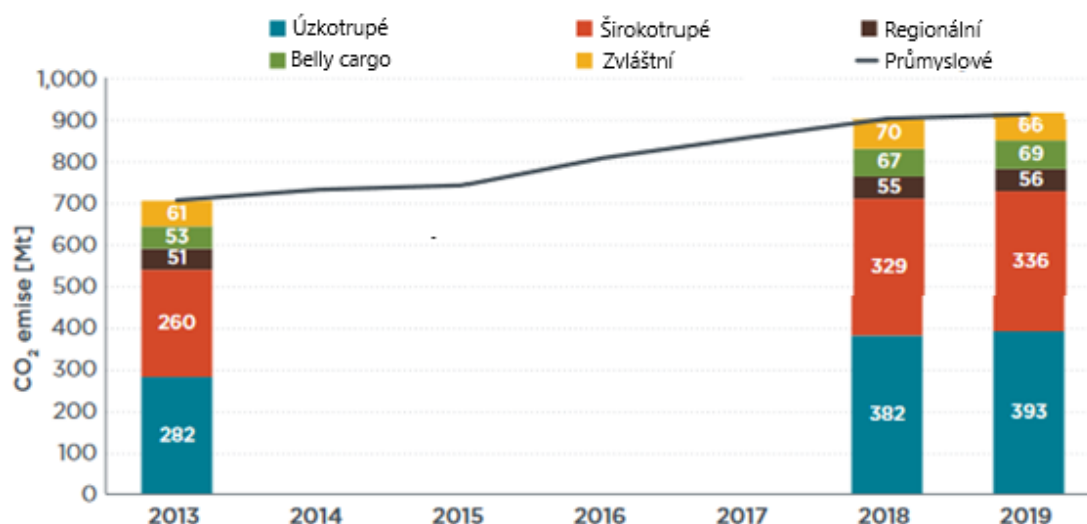
Databáze ICAO určuje standardní hodnoty tahu a časová období v režimu k ověřování spalování paliva a emisí. Předpokládá, že bez ohledu na typ letadla a motoru, vzlet probíhá za nastavení 100 % tahu po dobu 42 sekund, stoupání 85 % tahu po dobu 132 sekund, klesání 30 % tahu po dobu 240 sekund a pojiždění 7 % tahu po dobu 1 560 sekund. Pro udělení certifikace musí motor splňovat hodnoty průtoku paliva a emisní limity pro tyto tahy a časy. [44]

Spalováním fosilních paliv vznikají odpadní látky, které mají dopad na životní prostředí. Spaliny tak mohou mít místní vliv, kdy ohrožují zdraví obyvatelstva v okolí letišť, a vliv globální, kdy plyny vypouštěné v troposféře a stratosféře podporují skleníkový efekt a ovlivňují klima planety.

Plyny vznikající spalováním paliva jsou: oxid uhličitý (CO_2), oxid dusnatý (CO), oxid dusičitý (NO_2), vodní páry (H_2O), methan (CH_4), oxidy síry (CO_x) a saze. Z těchto plynů vzniká nevíce oxid uhličitý a vodní pára. [42]

Skleníkový efekt je proces založen na rozdílné absorpci záření různé vlnové délky. Sluneční záření je tvořeno krátkými vlnami. Krátké vlny jsou propouštěny atmosférickými plyny a poté jsou absorbovány zemským povrchem. Země naopak radiací (sáláním) teplo vyzařuje ve formě dlouhých vln, které se od skleníkových plynů odráží zpět k Zemi. Přírozený skleníkový efekt je žádoucí, neboť je rozhodující pro zachování ideální teploty a života. Nicméně, lidským působením dochází k nárůstu skleníkových plynů a k zesilování skleníkového efektu. Předpokládá se, že při současné úrovni znečišťování ovzduší vzroste průměrná teplota na Zemi do roku 2100 o 1,5 – 4,5 °C. [41]

Oxid uhličitý – Atmosféra Země běžně obsahuje 78 % dusíku, 21 % kyslíku a 1 % ostatních plynů. Oxid uhličitý tvoří přibližně 0,04 %, přesná koncentrace závisí na místních podmínkách, výšce, vlhkosti aj. Existují plyny, které ovlivňují globální oteplování mnohonásobně více, nicméně CO_2 je zastoupen v atmosféře nejvíce a ve výsledku má největší vliv na skleníkový efekt způsobený člověkem. Vlivem lidské činnosti se jeho koncentrace zvyšuje. Za posledních 200 let se jeho koncentrace zvýšila o přibližně 30 %. Letecká komerční doprava vyprodukovala roku 2019 celkem 918 mil. tun CO_2 a vytvořila nárůst o 29 % oproti roku 2013. Přibližně 85 % vytvořila přeprava cestujících. Největší přispěvatelé jsou USA (s podílem 29 %), Evropská Unie (19 %) a Čína (13 %). Nárůst vyprodukovaného množství emisí CO_2 leteckou dopravou za posledních 7 let je zobrazeno na grafu č. 6, rozděleno podle podílu jednotlivých druhů letadel na úzkotrupé, širokotrupé, regionální, nákladní přepravu v osobních letounech a nákladní. [41]



Graf 6. – Podíl produkovaných emisí CO_2 podle druhu letecké dopravy [41]

Vodní pára – V zemské atmosféře je zastoupena asi 0,25 % a je druhým nejprodukovanějším plynem při spalování pohonných hmot. Atmosférický cyklus vodní páry je velmi komplikovaný

proces a svým působením udržuje přirozené a stálé podmínky na Zemi, nicméně svou podstatou přispívá k zesilování skleníkového efektu nejvýrazněji ze všech plynů. Procentní podíl na skleníkovém efektu odpovídá 36-70 %. [42]

2.3.1 Znečištění v okolí letiště

Znečištěné ovzduší je směsí pevných a tekutých částic, které vznikají provozem letadel, ale i podpůrnou technikou, dopravou a zdroji energie. Pevné částice rozlišujeme podle velikosti menší než 10 μm , které snadno proniknou do dýchacích cest, menší než 2,5 μm , které se mohou dostat až do plicních sklípků a ultrajemné částice, menší než 100 nm. Při dlouhodobém působení dochází k ohrožení zdraví toxickým působením, výskytu rakoviny a DNA poruchám. Kromě ovzduší dochází k znečišťování půdy a podzemních vod chemikáliemi používanými pro úpravu povrchu letadel a provozních ploch. Úniky paliva a maziv, čištění, odmrazování či chemické odstraňování plevelu představují operace, při kterých může dojít ke kontaminaci a ohrožení životního prostředí. Pro zmírnění rizika se zvyšuje kontrola nad jednotlivými operacemi, přechází se na čističe na vodní bázi, pro odmrazování se využívají nové technologické postupy (zahřívání infračerveným světlem, elektrické vyhřívání křídél). Agentura pro ochranu životního prostředí (Environmental Protection Agency – EPA) stanovila předpisy pro kontrolu odtoku dešťové a odpadní vody. Letiště má vybudovanou síť kanálu a potrubí pro sběr vody z letištní plochy s dostatečnými rezervoáry pro případ silných dešťů. Letiště podle možností samo zřizuje čištění vody nebo ji posílá do čistírny odpadních vod. [42]

2.3.2 Vypouštění paliva

K vypouštění paliva dochází většinou pouze za určitých nouzových situací, kdy je třeba snížit váhu letounu na maximální přistávací hmotnost (Maximum Landing Weight – MLW) před nouzovým přistáním. K nouzové situaci může dojít ihned po vzletu, kdy je letadlo na své maximální vzletové hmotnosti (MTOW). Vlivem závady či jiných obtíží je nutno s letounem přistát dříve než v cílové destinaci, letadlo přitom nestihlo spálit nadbytečné palivo a musí snížit hmotnost na MLW. Při překročení povolené hmotnosti může dojít k poškození konstrukce letadla při dosednutí a zvyšuje se riziko požáru. Proto je nutné vypustit palivo a snížit váhu. Proces vypouštění probíhá za kontroly řízení letového provozu, aby nedošlo k vypouštění pod výškou 1 800 m, ve vzdálenosti 8 km od nejbližšího letadla a nad neobydlenou zónou. Letecký petrolej je těkavý a jeho odpařování závisí na teplotě, tlaku a nadmořské výšce. Povolená výška, 1 800 m, zajistí, že se 90 % paliva vypaří před dopadnutím na povrch. Řízení letového provozu dále řídí dopravu v oblasti a odklání letadla od místa vypouštění o 9,3 km horizontálně a 6 100 m vertikálně. Postupem dle předpisů lze předcházet škodám na zdraví a majetku, neřeší ovšem znečištění ovzduší. [42]

2.4 Snižování hluku a emisí

S rostoucím zájmem o dopady leteckého provozu na životní prostředí, roste i snaha tyto dopady, pokud možno omezit, nebo alespoň zmírnit tempo jejich růstu. Velká pozornost je upřena na snižování spotřeby paliva, které lze dosáhnout řadou možností.

2.4.1 Konstrukce a technologie

Jednou z možností, jak snižovat spotřebu paliva je vývoj nových technologií a konstrukcí, které pracují s vyšší efektivností, zlepšují aerodynamické vlastnosti, snižují hmotnost konstrukce letounu a mnoho dalšího. Příkladem může být systém elektrického pohonu při pojíždění. Výzkumů probíhá celá řada a fungují na podobném konceptu. Elektromotor umístěný do kola hlavního podvozku je napájen z pomocné pohonné jednotky APU (Auxiliary Power Unit). Nejblíže k certifikaci má firma WheelTug se stejnojmenným výrobkem. Prozatím se uvažuje, že WheelTug bude použitelný pro letadla na střední tratě s MTOW od 20 tun výše, např. A321, Boeing 737 ad. Systém má dosáhnout větší manévrovatelnosti s pojížděcí rychlostí až $50 \text{ km} \cdot \text{h}^{-1}$. Letadla budou moci zmenšit rozestupy a umožnit plynulejší provoz při výjezdu ze stání a při pojíždění po ploše letiště, neboť se nebudou vzájemně ohrožovat proudem výstupních plynů nebo sáním hlavních motorů. Dojde také ke zvýšení bezpečnosti pozemního personálu, možnost provádět servis a pracovní úkony v menší vzdálenosti od letadla a odpadne nutnost využívání pozemních tahačů, které vedou k občasnému poškození podvozku. Dle odhadů by mělo dojít k úspoře 300 až 2 500 USD na let. Z ekologického hlediska jsou výhody nepochybné, předpokládá se snížení spotřeby paliva během pozemního provozu o 80 %, snížení produkce emisí nejen od letadel, ale také pozemních vozidel a techniky. Dále dojde ke snížení hladiny hluku. Technologie v současnosti prochází testy a certifikací FAA (Federal Aviation Administration), nicméně firma předpokládá uvedení na trh již koncem roku 2021 a už nyní přijímá objednávky. Více konceptů budoucího vývoje je popsáno v následující kapitole věnující se budoucímu vývoji. [43]



Obr. 7 – Přední kolo podvozku vybavené systémem WheelTug [43]

2.4.2 Provozní postupy

Jednou z možností, jak ovlivňovat spotřebu, je samotné řízení provozu. Úkol ATC spočívá v koordinaci letadel v jednotlivých fázích letu a navádění při provedení letu. Při letech může docházet ke zdržení, přehlcování dopravních uzlů nebo neefektivnímu trasování, což vede k vyčerpání letišť a nutnosti letadel vyčkávat na přistání a kroužit kolem letiště. Dochází tak ke zbytečnému spotřebování paliva. Například letadlo A320 Neo spotřebuje během kroužení 25 kg paliva za minutu. Tomu má zabránit **projekt SESAR** (Single European Sky ATM Research) založen roku 2007. Systém umožňuje letadlům plánovat optimální trať bez výpočtu řízení letového provozu, zlepšuje komunikaci, zjednodušuje navádění ve všech fázích letu a zvětšuje předvídatelnost dopravních tratí, což vede k plynulejšímu provozu na letišti bez nutnosti vyčkávat. Cíle projektu roku 2008 do roku 2020 byly: zkrácení letů o 8-14 minut, šetření paliva o 300-500 kg a zmenšení emisí o 950-1 575 kg CO₂. Součástí projektu je i systém i4D, který má za cíl analyzovat trajektorii letadel ve 4 dimenzích – zeměpisná šířka, zeměpisná délka, výška a čas. Systém procházel 2 roky zkušební fází, během které byl úspěšně použit pro navádění více než 20 000 letů. Během roku 2020 dokončil experimentální fázi a předpokládaný vstup do provozu byl během roku 2021 v řadě evropských zemí, nicméně je pravděpodobné, že z ekonomických důvodů kvůli pandemii COVID-19 dojde k odložení. Velmi podobný systém je **NextGen** (Next Generation Air Transportation System), který vzniká v rámci výzkumu FAA. V současnosti probíhá implementace a předpokládá se, že plně nahradí současný systém do roku 2025. [45]

Metoda plynulého klesání (CDA – Continuous Descent Arrival) je procedura, kdy letoun dostane povolení na přistání a klesá bez mezivyčkávání na povolení. Běžně pilot dostává povolení k sestoupení do výšky přibližně 950 m, kde musí vyčkat na povolení k přistání. Pro udržení výšky motory musí běžet v chodu a spotřebovávají palivo. Při využití metody CDA dostane pilot povolení již ve výšce 2 500 m, klesá do výšky 950 m na volnoběh, a až tady pilot spustí motory, aby mohl korigovat a přiblížit se na přistání pod úhlem 3°. Touto metodou dojde ke snížení produkce emisí a hluku v přistávací fázi letu a zkrátí se čas letu. [46]

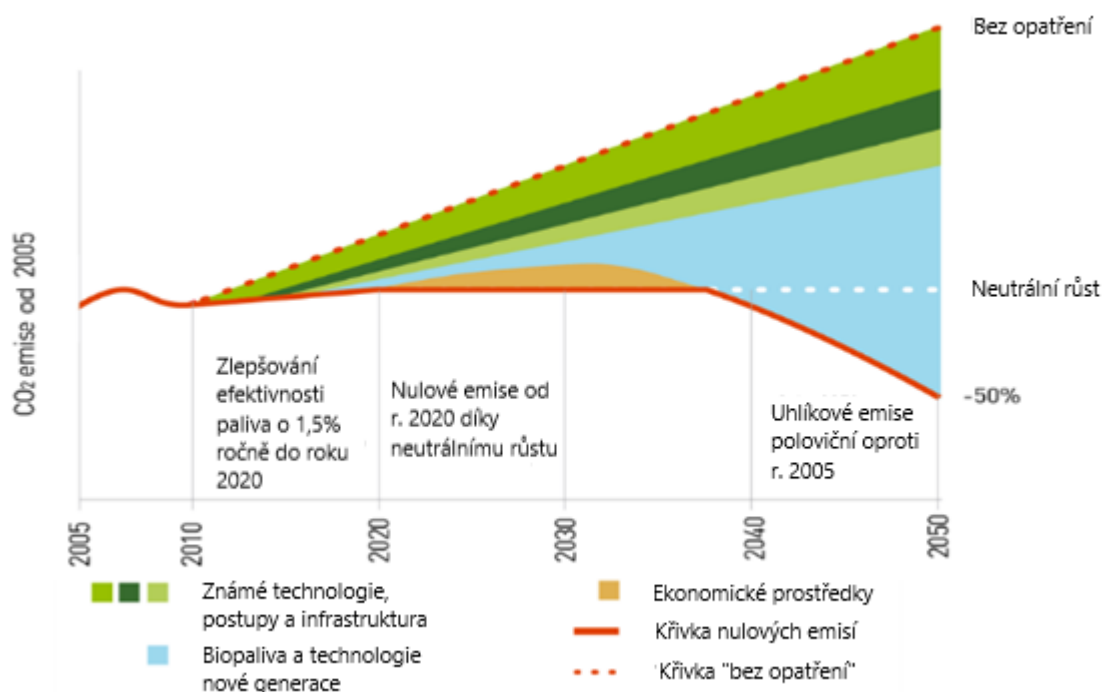
Další systém na navádění letadel **E-AMAN** (Extended Arrival MANagement horizon) umožňuje dřívější automatické sekvencování příletového provozu. Původní systém AMAN průběžně počítá trajektorie a časy příletů letů na základě polohy a rychlosti letadel. Pracovní oblastí je TMA – koncová řízená oblast, naproti tomu E-AMAN rozšiřuje oblast působení a dokáže kalkulovat s mnohem vzdálenějšími letadly. Zlepšuje tak efektivitu a plynulost provozu, bezpečnost a snižuje ekologické dopady. [94]

3. BUDOUCÍ VÝVOJ

Roku 2009 IATA odsouhlasila plán na zmírnění dopadů na životní prostředí za pomoci strategie založené na vývoji technologií, zefektivnění leteckého provozu, zlepšení infrastruktury a ekonomických opatření. 3 hlavní cíle byly:

- ročně zlepšit efektivní využití paliva o 1,5 % mezi roky 2009 a 2020;
- neutrální růst uhlíkové produkce od roku 2020;
- zmírnit produkci uhlíkových plynů o 50 % do roku 2050 oproti 2005. [47]

Následující graf č. 7 zobrazuje vývoj produkce CO₂ do roku 2050 za předpokladu stálého růstu a etapy pro udržení neutrálního růstu.



Graf 7. – Graf zobrazující předpokládaný vývoj produkce CO₂ emisí [47]

Předpokládá se postupný vývoj technologií do roku 2030, kdy se bude zdokonalovat stávající konstrukce letadel (trup-křídlo), výkony proudových pohonů, aerodynamika a materiály. Od roku 2035 se předpokládá využití nových revolučních konstrukcí a pohonů díky pokrokům v technických oborech. Mezi nejslibnější zkoumané konstrukce patří tvar samokřídla, křídla podepřená vzpěrami, dvojité tubus a uzavřená křídla. Pro zdokonalení systému pohonu se uvažuje technologie otevřených rotorů, pohlcování mezní vrstvy, využití alternativních paliv nebo elektrického pohonu letadel, ať už poháněné formou naakumulované energie v bateriích nebo s využitím hybridního motoru. K dalším požadavkům patří ekonomická a časová úspora na údržbu, rychlejší odbavování letadel, snížení hlučnosti a další. [47]

Nejen IATA ale i řada dalších organizací, provozovatelů a výrobců se zavazují reformovat letectví k efektivnějšímu cestování. Například Evropská komise vydala roku 2011 dokument **Flightpath 2050 – Evropská vize pro aviatiku**. V něm rozebírá cíle pro leteckou dopravu do roku 2050, mimo jiné snížení dopadů na životní prostředí a vývoj směrem k udržitelnému letectví:

- 75 % snížení produkce CO₂ na kilometr pasažéra oproti roku 2000;
- 90 % snížení produkce dusíkatých oxidů;
- 65 % snížení hlučnosti letadla;
- pojíždění letadel bez produkce emisí;
- recyklovatelné letadla;
- využívání obnovitelných paliv. [83]

3.1 Vývojová technologie

Vývojová technologie se váže na vylepšování klasické konstrukce trup-křídlo. Současný postup splňuje zadaný cíl, ročně zvyšovat efektivitu o 1,5 % a snižovat produkci CO₂ na pasažéra o 2 %. Nicméně, okolo roku 2035 se předpokládá, že se tento trend bude zpomalovat. Další generace letadel má v zásadě stejnou konfiguraci jako předchůdci, liší se pouze v jednotlivých částech. V tab. 1 jsou uvedeny skupiny změn, koncept a procento ušetřeného paliva. Nejvyšší příspěvek k úsporám paliva tvoří skupiny tvořící aerodynamiku, komponenty motoru a systémy. [47]

Skupina	Koncept	Ušetřené palivo
Aerodynamika	Proměnlivé prohnutí	1-2 %
	Riblety	1 %
	Winglety	3-6 %
Kabina	Odlehčený interiér	1-5 %
Materál a struktura	Pokročilé materiály	1-3 %
	Aktivní zmírnění zatížení	1-5 %
	Primární kompozitní struk.	1-3 %
	Sekundární kompozitní struk.	<1 %
Systémy	Nastavitelný podvozek	1-3 %
	Systém pojíždění	1-4 %
	Pokročilé Fly-by-Wire	1-3 %

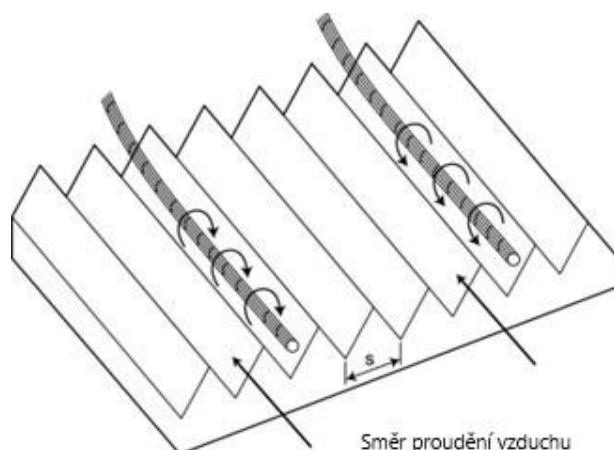
Skupina	Koncept	Ušetřené palivo
Systemy	Monitorování struktury	1-4 %
Komponenty motoru	Úprava rotoru	2-6 %
	Vysoký obtokový poměr	2-6 %
	Pokročilá spalovací komora	5-10 %

Tab. 1 – Kategorie vývojových technologií [47]

3.1.1 Aerodynamika

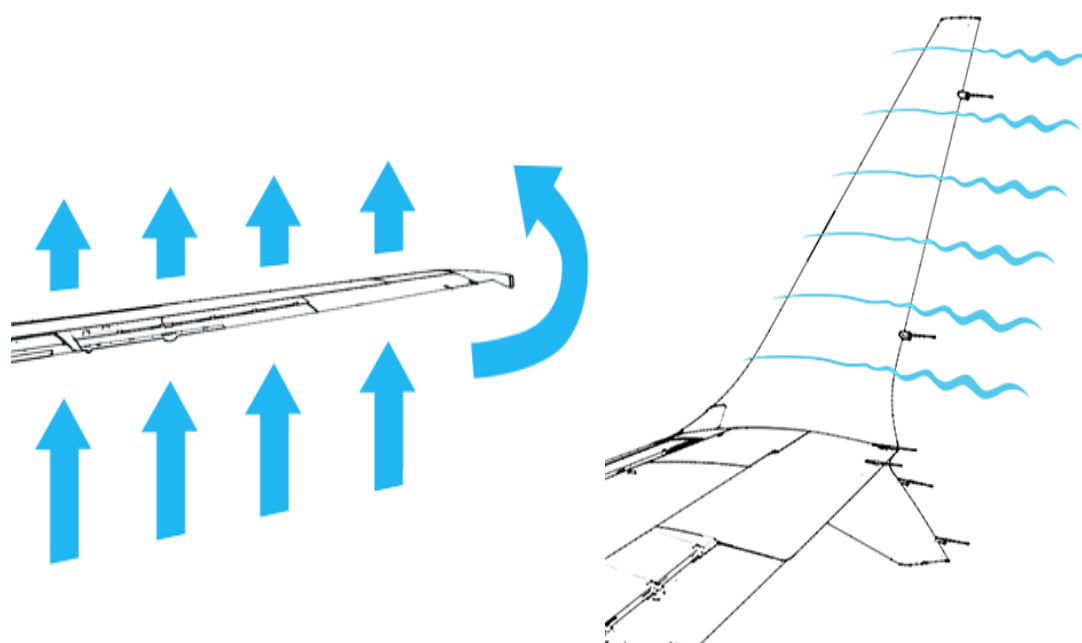
Výzkum aerodynamiky se zaměřuje hlavně na tvorbu designu se sníženým odporem vzduchu. V posledních letech se nejvíce projevil v oblasti kontroly laminárního proudění. Tato technologie zabráňuje vzniku turbulentního proudění při proudění vzduchu okolo křídla, čímž významně snižuje odpor. Tato kontrola může vznikat pasivně nebo aktivně. Aktivní kontrola spočívá v sání mezní vrstvy k udržení laminárního proudění po povrchu křídla a ovlivňování procházejícího proudu vzduchu a tím zvyšovat účinnost řídicích a stabilizačních ploch, jejichž velké rozměry jsou nevýhodou během horizontálního letu. [38]

Pasivní kontrola se zajišťuje pomocí vhodného povrchu křídla nebo struktur na povrchu křídla. Do této kategorie spadají riblety a winglety. Při testech s těmito změnami bylo dokázáno, že lze dosáhnout až 10 % snížení třetího odporu a 4,5 % úspory paliva při letu do vzdálenosti 800 NM. **Riblety** (obr. č. 7) jsou tvořeny podélnými drážkami s velikostí pohybujících se v setinách až desetínách milimetrů. Jsou umístěny rovnoběžně se směrem proudění vzduchu a slouží k usměrnění toku a ke zmírnění odporové síly působící od turbulentní vrstvy. Riblety byly vyzkoušeny v provozu už roku 1996, kdy společnost Cathay Pacific Airways provozovala letadlo A340, který byl pokryt plastovými riblety. Letadlo bylo v provozu 2,5 roku, během kterých se dosáhlo snížení spotřeby paliva o 3 % a zvýšil se tak zisk o 6 %. Do praxe se riblety nikdy nedostaly kvůli nízké životnosti plastového materiálu a finančním nárokům na udržování. Nicméně s novými materiály se znovu zkoumá možnost využití. [48]



Obr. 8 – Usměrnění proudu vzduchu pomocí ribletů [48]

Winglet je pomocná plocha na konci křídla. Slouží k usměrnění koncových vírů vznikajících na konci křídla. Tyto víry vznikají v důsledku vyrovnávání podtlaku nad křídlem a přetlaku pod křídlem a jsou zdrojem indukovaného odporu. Vertikálně umístěný winglet slouží k zabránění vyrovnávání tlaků na koncích křídel, čímž zajišťují nižší indukovaný odpor. Tato konstrukce dokáže snížit indukovaný odpor až o 20 % a celkový odpor o 5 %. Winglety se uplatňují v provozu už od roku 1977, poprvé byly využity na letounu LearJet 28. V současné době se vyrábí v různých variacích, od klasického Whitcombova wingletu, přes oboustranné zakončení až po nejmodernější dvojité šavlovité winglet umístěný na letounu Boenig 737 MAX (obr. č. 9). Tento winglet dosahuje až 9 % snížení spotřeby paliva oproti letounům bez úprav konců křídel. Dále jsou vyvíjeny a testovány další modifikace, např. spirálovité a řízené winglety. [49, 50]



Obr. 9 – Působení vzduchu na běžné křídlo (vlevo) a křídlo vybavené Wingletem (vpravo) [49]

3.1.2 Komponenty motoru

U nových modelů letadel největší měrou k úspoře paliva přispívají změny v konstrukci motorů. U proudových motorů dochází ke zvyšování obtokového poměru, což je poměr u dvouproudých motorů mezi průtokem vzduchu vnějším (kolem jádra) a vnitřním (jádrem) proudem. Poměr se pohybuje řádově mezi 3 až 7 u dopravních letadel, u motorů s vysokým obtokovým poměrem je většina tahu vyvozena vnějším proudem vzduchu za jeho relativně nízkého urychlení. Nízká přidaná rychlost způsobuje i nižší množství potřebné dodané energie z paliva, proto je ekonomičtější vyšší obtokový poměr. Nové modely dopravních letadel, např.: A220, B737 MAX, Embraer E-Jet E2, aj. mají obtokový poměr mezi 9 až 12, což snižuje spotřebu paliva přibližně o 15 % oproti dřívějším modelům. [47]

Zároveň jsou ve vývoji motory s novou architekturou, firma Rolls-Royce má rozpracované 2 nové typy, *Advance* a *UltraFan motor*. *Advance motor* představuje tříhrádelovou stavbu s vysokotlakým jádrem, u kterého se předpokládá snížení spalování pohonných hmot a produkci emisí CO₂ o 20 %. Pokročilejší *UltraFan motor* se skládá z vysokotlakého jádra a dvouhrádelová stavba je spojená s turbodmychadlem a převodovkou. Očekává se o 25 % nižší spotřeba. Firma Safran pracuje na konvenčním motoru s turbodmychadlem, ale s hodnotou obtokového poměru až 15, který by snížil spotřebu o 10 až 15 % oproti současné A320 Neo. Části motoru budou využívat lehčí a silnější kompozitní materiály, samotná turbína bude zkonstruována z kompozitů s keramickou maticí. [51, 52]

3.1.3 Systémy

Mezi vyvíjené systémy, které mohou ovlivnit spotřebu patří například elektrický systém pojiždění vyvíjený firmou WheelTug, již zmíněný v kapitole 2.4.1. Systém umožní, díky elektrickým motorům namontovaným na hlavních podvozkových kolech, pojíždět bez použití hlavních motorů nebo tažného vozidla. Zajímavou možností jsou palivové články, které vyrábějí elektřinu z chemické reakce kyslíku a plynného vodíku. Jsou tak šetrné k životnímu prostředí, odpadní látkou je teplo a vodní pára, články dále nevytvářejí žádný hluk. Palivové články by mohly nahradit APU a sloužit k napájení elektrických systémů, jako startování motorů, ventilace, osvětlení, řízení letu a další. Jsou schopné vytvářet velkou škálu výkonů, od wattů až po megawatty, ale zároveň jsou lehké a skladné. Přes řadu výhod je tu jeden problém, a to že potřebují pravidelnou dodávku vodíku jako paliva. O využití vodíku jako alternativního paliva více v kapitole 3.3. [53]

3.2 Revoluční technologie

V předchozí kapitole byly zmíněny vývojové možnosti pro skladbu letadla trup-křídlo, nicméně tato konfigurace se dostává na hranici svých možností. Proto je snaha přijít s alternativními konstrukčními možnostmi, u kterých se předpokládá, že by se do provozu mohly dostávat od roku

2035. Řada světových firem v oblasti letectví pracuje na konceptech novelizace konstrukce letadel, pohonu, materiálů a struktur. Některé z těchto konstrukcí a možností jsou rozebrány v následujících kapitolách.

3.2.1 Koncept samokřídla – Blended wing body

V dnešní době naprostou většinu letadel tvoří podobná konstrukce skládající se z dlouhého úzkého trupu sloužícího pro umístění nákladu a většiny systémů, křídel poskytujících vztlak, motorů poskytujících tah a stabilizačních ploch. Tento konstrukční model prošel dlouhým vývojem a je v současnosti ekonomicky nejvýhodnější. Z geometrického hlediska je výhodné mít těžiště umístěné pod křídly pro zajištění stability během letu. Problémem konstrukce jsou aerodynamické vlastnosti. Vzájemnou pozicí trupu a křídla dochází ke vzniku interferenčního odporu a třecího odporu po celém povrchu. Proto vznikl koncept samokřídlo nebo podobná konstrukce V-letounu, které je tvořeno pouze křídlem bez trupu. Konstrukce by ideálně měla pojmout posádku, náklad, motory a všechna nezbytná zařízení tak, aby nedošlo k narušení siluety křídla a dosáhla co největší aerodynamické čistoty letounu. Takto zkonstruovaný letoun by mohl ušetřit až 20 % paliva. Oproti běžným letounům skládajících se z trupu a křídel má samokřídlo výhodu, že vztlak působí po celé ploše letounu. Dalšími výhodami jsou menší napětí působící v konstrukci, menší odpor, menší hmotnost a s tím spojená úspora paliva, dále při umístění pohonu nad křídlo dojde k zabránění šíření hluku směrem k zemi. Nevýhodou je, že při absenci ocasních ploch je let nestabilní a je proto nutné vybavit nosné plochy auto-stabilním profilem nebo vyvažovacími klapkami, které poskytují podélnou stabilitu. [47]

První vyrobené prototypy samokřidel byly vyrobeny během 2. světové války. Vznikly prototypy Horten Ho 229 a Baynes Bat. Horten Ho 229 byl německý stíhací letoun vybavený proudovými motory, nicméně k dokončení nikdy nedošlo. Britský Baynes Bat měl umožnit vzdušnou přepravu tanků. Byl vyroben prototyp, ale reálně využit nebyl. V následujících letech došlo k dalším experimentům se samokřídly, ale nikdy nebyly úspěšné v důsledku špatné manévrovatelnosti a stability. Prvním úspěšným letadlem byl americký strategický bombardér Nortrop Grumman B-2 Spirit. Do civilního letectví začal koncept trupu ve tvaru křídla pronikat až v posledních letech. Airbus představil model MAVERIC (Model Aircraft for Validation and Experimentation of Robust Innovative Controls) roku 2020 v Singapuru. [47, 54]

B-2 Spirit

Tento letoun absolvoval první let 17. července 1989. Konstrukce letounu byla postavena z uhlíkových kompozitů a využívala technologii stealth proti radarové technice. Technologie radaru pracuje na principu odrazu vln. Radar vyšle krátké impulsy elektromagnetické energie v určeném směru a anténa okamžitě přepne do přijmacího modu pro přijetí odražených vln od vzdáleného objektu. Indikátor radaru zobrazí velikost, směr a vzdálenost objektu od vysílače. Technologie stealth se snaží tuto praktiku narušit využitím správné konstrukce. B-2 má rozpětí křídel 52 metrů, a přesto se zobrazuje na radaru v průměru cca 0,5 metru. Jedním

z nejzajímavějších prvků letounu je nepřítomnost ocasních ploch, tím postrádá možnost kontroly zatáčení kolem svislé osy z. Namísto toho používá pouze křídélka na koncích křídel jako vzdušné brzdy a způsobuje tak zatáčení. Kvůli technologické náročnosti se cena jednoho letounu pohybovala okolo 1,15 miliardy dolarů, a proto se vyrobilo pouze 21 kusů.

Letouny B-2 původně měli sloužit až do roku 2058, čímž by se dostaly na provozní dobu 70 let. Jelikož ale technika postupuje rychle kupředu bylo rozhodnuto o vyřazení roku 2032, poté by je měly nahradit nové letouny verze B-21, které by měly mít funkční prototypy roku 2023. [65]

3.2.2 Koncept křídel podepřených vzpěrami – Strut-braced Wing

Křídla podepřená vzpěrami byla využita již dříve, nicméně s pokrokem v materiálech je možné dosáhnout stejné pevnosti na úkor hmotnosti křídel. Vzpěry umožní delší rozpětí při snížení působícího ohybového momentu. Při větším rozpětí dojde ke zmenšení indukovaného odporu, který vzniká prouděním vzduchu po profilu křídla. S menším odporem není potřeba vyvinout tak velký tah, a tím je možné cestovat s menšími a lehčími motory. [47]

Letadlo, navržené firmou Boenig ve spolupráci s NASA v rámci výzkumu **Subsonic Ultra Green Aircraft Research** (SUGAR), mělo plnit požadavky redukce hluku o 71 dB oproti FAA standardům a více než 70 % menší spotřeba pohonných hmot. V současnosti se výzkum nachází ve své Volt fázi. V předchozí fázi se výzkum soustředil hlavně na aspekty konstrukce křídel podepřenými vzpěry. V dalších fázích se výzkum zaměří na přizpůsobení designu cestování rychlostí 0,8 Mach, na zjišťování charakteristik křídla za nízké rychlosti a na vývoj pokročilých technologií. Jednotlivé fáze:

- SUGAR High – konstrukce křídla širokého rozpětí, s vysokým poměrem vztlak k odporu by měla zajistit úsporu paliva o 8 % oproti běžným konzolovým křídly. Dále křídla umístěná na vrchu trupu umožňují efektivnější vestavění motorů s otevřenými rotory o větším průměru;
- SUGAR Volt – koncept hybridního elektrického dopravního letadla. Využití obnovitelných zdrojů energie (vítr, solární energie...) může nahradit část energie získanou z paliva, a tak snížit produkci emisí;
- SUGAR Freeze – obsahuje technologie využívající zkapalněný zemní plyn, palivové články, kryogenicky chlazené elektromotory, pokročilejší skladování energie v bateriích a technologii pro pohlcování mezní vrstvy. [55]

3.2.3 Koncept uzavřených křídel – Box-Wing

Koncept uzavřených křídel spojuje konce hlavních křídel, případně spojuje křídla s konci horizontálních ocasních ploch. Touto konstrukcí se sníží indukovaný odpor, zvýší se klouzavost a dojde ke snížení spotřeby paliva. Podle konfigurace konstrukce (rozpětí, výškový rozdíl, umístění na trupu...) se zajistí rozdílné působení sil a momentů potřebných pro stabilitu a kontrolu letu. Nevýhodami konstrukce jsou větší působící síly, proto se uvažuje se zesílenou konstrukcí s větší hmotností. Dále výrazně menší palivové nádrže v křídlech, obtížně splnitelné vztlakové

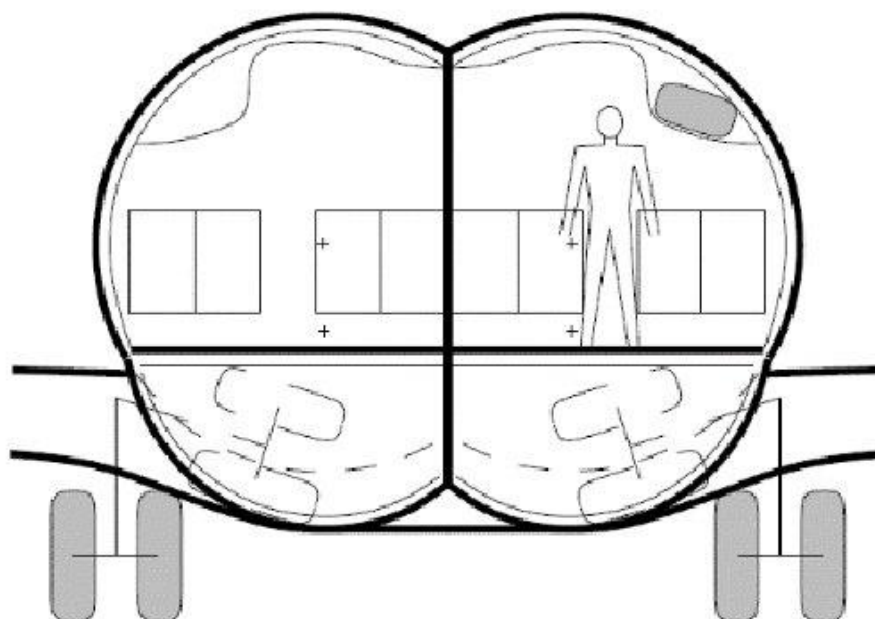
koeficienty pro přední část křídla, nemožnost umístění motorů a přistávacího podvozku na křídlech a neschopnost jednoduše vytvořit prodloužené nebo zkrácené verze letouny z důvodu rozdílného působení sil a umístění těžiště. [56]



Obr. 10 – Příklad konstrukce box – wing letounu [82]

3.2.4 Koncept dvojitého tubusu – Double-bubble fuselage

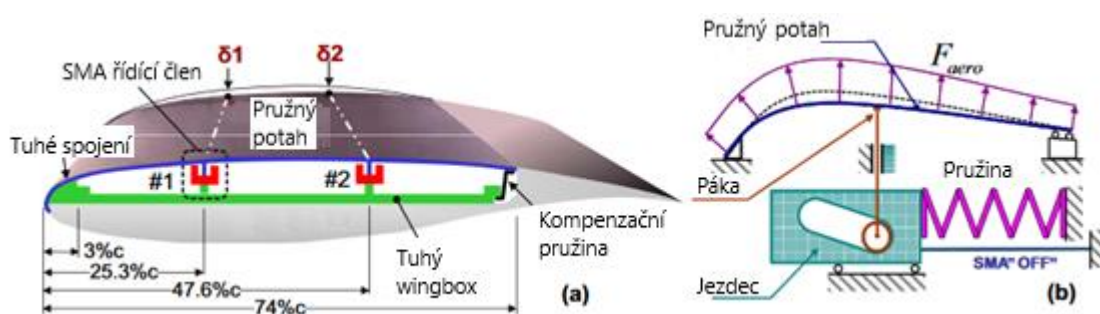
Koncept fungující na podobném principu jako samokřídlo. Spojením dvou tubusů do jednoho vznikne zploštělý trup poskytující další přidaný vztlak. Běžně má trup kruhový průřez, protože lépe odolává zatížení, při nekruhových průřezech by docházelo k silnějším ohybovým zatížením. Geometrie double-bubble využívá protínající se kruhy svázané k podlaze trupu, aby bylo dosaženo efektivní struktury, kde jsou všechny prvky kabiny napnuté. Podlaha funguje jako příčný nosník a pomáhá snášet tlakové zatížení. Dvojité tubus se většinou používá u nákladních letadel se 2 protínajícími se kruhy nad sebou, což poskytuje větší prostor pro nákladní dopravu. Tubusy umístěné vedle sebe by výrazně rozšířily kapacitu cestujících. Problémem jsou koncentrátoři napětí, které by mohly ohrožovat bezpečnost a spolehlivost. Nicméně díky přesným počítačovým simulacím a použití odolnějších materiálů by mělo být možné se zmíněných problémů vyvírat. [57]



Obr. 11 – Příklad konstrukce dvojitého tubusu [57]

3.2.5 Technologie využívající pokročilé materiály

I když se v současnosti dosáhlo výrazného snížení hmotnosti letadla díky použití kompozitních materiálů a lehkých slitin, jsou ve výzkumu další možnosti. NASA ve svém výzkumu Spanwise Adaptive Wing (SAW) zkoumá materiál, který je schopen vrátit se do původního tvaru působením zvýšené teploty. Používá k tomu paměťovou slitinu nikel-titanu (SMA – Shape Memory Alloy). SMA bylo poprvé použito v americkém stíhacím letounu F14 roku 1969 v hydraulickém systému na potrubí. Potrubí se propojilo na nerozebíratelný spoj pomocí nalisování dvou součástí o různé teplotě. Od té doby se díky své spolehlivosti dostalo do mnoho dalších částí letadla. Uvažuje se o budoucím využití pro proměnlivou konstrukci křídla a trysek. Konstrukce systému by se skládala ze 4 částí: materiálu SMA, snímacích prvků, hnacích prvků a řídicí jednotky. Působením soustavy by se geometrický profil přizpůsoboval jednotlivým fázím letu a měnil působící síly. Na obrázku č. 12 (obr. a – využití 2 hnacích prvků, obr. b – využití 1 hnacího prvku) je znázorněný profil křídla využívající technologii SMA. Pružný potah je napojen na systém pák a převodů, které pracují v závislosti na změnách SMA, a mění tak tloušťku profilu v řádech milimetrů. Využitím změny tvaru trysky v proudovém motoru lze docílit snížení hluku během vzletu a během letu vrátit původní tvar, aby nedocházelo ke snižování výkonu motoru. [58]



Obr. 12 – Konstrukce křídla schopná měnit prohnutí profilu [58]

Další technologii měnícího se profilu křídla zkoumá NASA ve spolupráci s MIT. Mechanismus proměny by sestával z celého křídla, které by bylo zakryto potahem vyrobeným z překrývajících se kusů připomínajících šupiny. Schopnost deformovat tvar křídla by zvýšila účinnost letu a tím snížila spotřebu paliva. Zkoušky této konstrukce v aerodynamickém tunelu ukázaly, že aerodynamické vlastnosti odpovídají konvenčnímu křídlu přibližně při jedné desetíně jeho hmotnosti. [47]

3.2.6 Koncepty pohonů

Předpokládá se, že nové typy pohonů budou mít v následující generaci dopravních letadel výrazně vyšší úsporu paliva. Zajímavé technologické koncepty pro motory jsou propfanová konstrukce, elektromotor a využití nasávání mezní vrstvy.

3.2.6.1 Propfan rotor – Open rotor

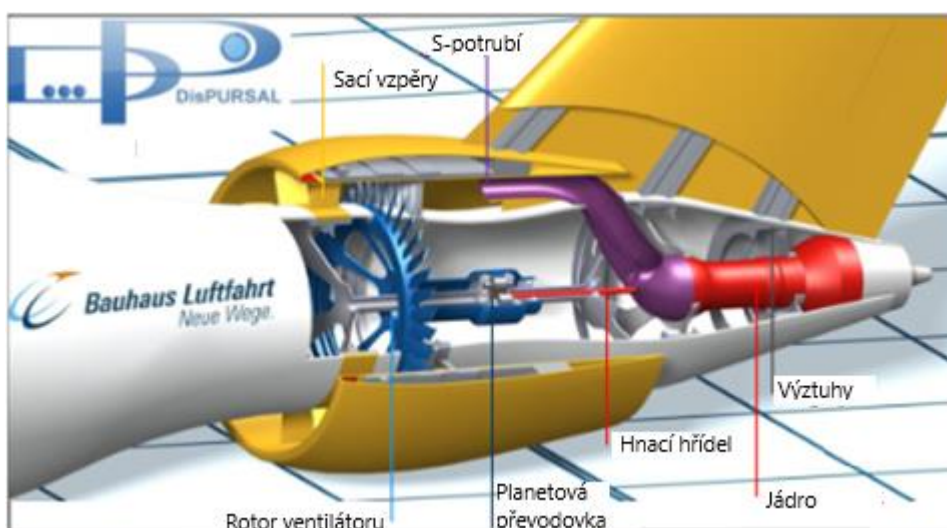
Propfan je kombinace turbovrtulového a turbodmychadlového motoru. Vyznačuje se 2 protiběžnými nezakrytými vrtulemi. Vrtule jsou poháněny jednou plynovou turbínou a díky reverzoru se točí proti sobě. Propfan je efektivnější než oba zmíněné motory, umožňuje snížit spotřebu paliva a produkci emisí o přibližně 15 % oproti současným turbodmychadlovým motorům. Vývoj motoru probíhal již během ropné krize v 70. letech 20. století, dostal se i do komerčního provozu, nicméně byl jeho vývoj zpomalen a upozaděn po konci ropné krize, kvůli vyšší hlučnosti a vyšším nákladům na výrobu a údržbu. Znovu se začalo uvažovat o jeho využití na přelomu tisíciletí vlivem výkyvů cen ropy a růstem tlaku na ekologičnost letecké dopravy. Firma Safran v rámci projektu Clean Sky vyvíjí motor typu propfan od roku 2008, během let 2015-2017 vytvořili prototyp motoru a podrobili ho zkouškám ve větrném tunelu a pozemním testům. Provedené analýzy ukazují reálné snížení spotřeby paliva a produkce emisí o 15 % oproti současným motorům. Firma SAfran předpokládá, že by se motor mohl dostat do provozu v období 2030 až 2035. [61]



Obr. 13 – Fotografie pozemní zkoušky propfan motoru firmy Safran [60]

3.2.6.2 Propulsive Fuselage Concept – Nasávání mezní vrstvy

Jedná se o systém integrovaný v zadní části trupu letounu před vstupem do motoru, kde slouží k nasávání mezní vrstvy. Skládá se z jednoho či dvou prstenců lopatek rotujících kolem trupu elektricky poháněných generátory od motorů na křídlech. Prstence nasávají vzduch, tím zmenšují tloušťku mezní vrstvy u trupu a snižují tak působící povrchový odpor, zvětšují průřez obtokové plochy a urychlují vzduch na vstupu do motoru. Motor umístěný v zadní části trupu tento vzduch dále urychluje a způsobuje tah. Koncept je zkoumán více firmami: Bauhaus Luftfahrt, MIT a NASA. Běžná konfigurace s motory umístěnými na křídlech, má výhodu, že proud vzduchu vstupující do kompresoru motoru je nerozrušený a působí rovnoměrně na všech lopatkách vrtule. Oproti tomu, při umístění motoru na konec trupu dochází k nárazům a rozrušování proudu větru. To způsobuje větší namáhání a rychlejší opotřebení částí motoru. Tento systém umožňuje proud vzduchu usměrnit. Při testech ve větrných tunelech bylo dokázáno, že úspora energie se přibližuje 10 až 15 %. [63]

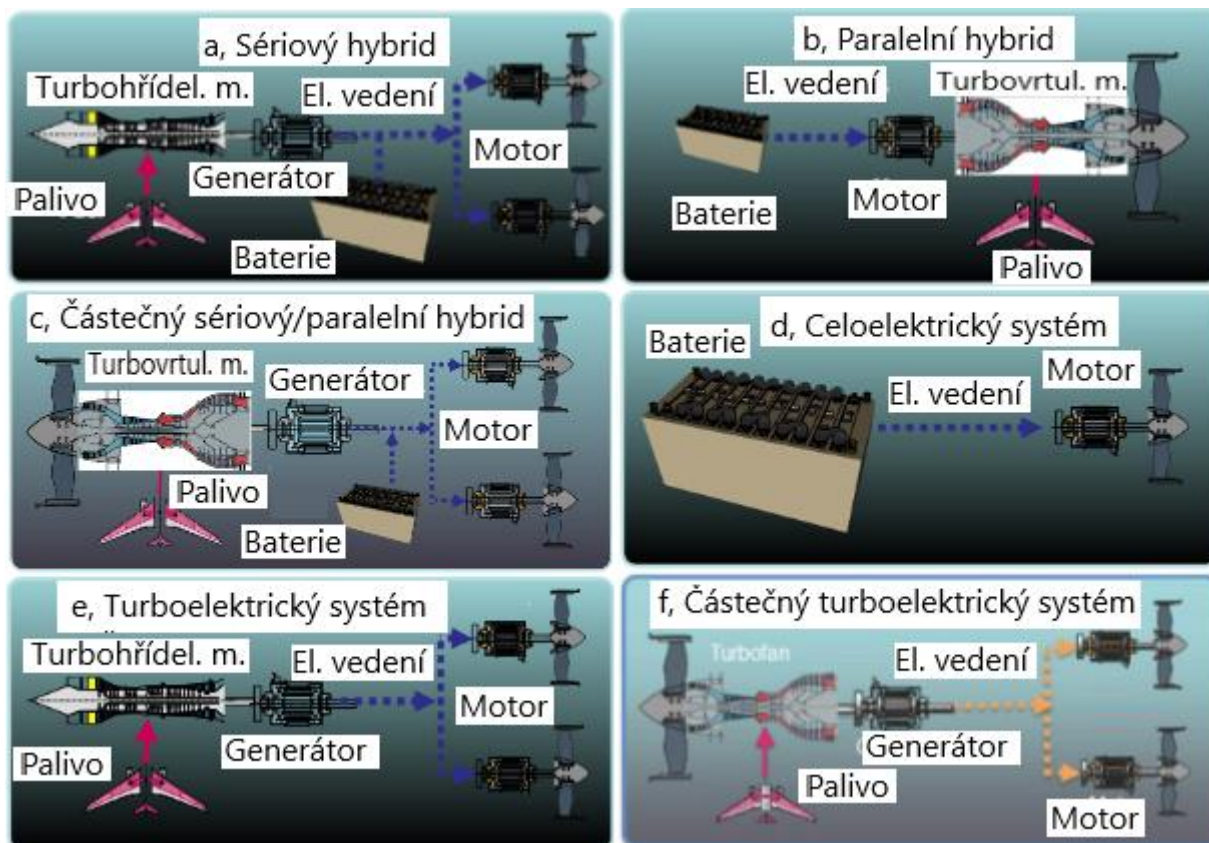


Obr. 14 – Vnitřní konstrukce propulsního systému [62]

3.2.6.3 Elektromotory

Idea elektrických motorů se dostává stále více do popředí, díky tomu, že neprodukují žádné emise při provozu. Předpokládá se, že do roku 2050 budou mít hlavní roli pro dodržení cílů na ochranu životního prostředí. Největším problémem v této vizi může být zajištění dostatku alternativní elektřiny a v jejím uskladnění během provozu. Uvažuje se o 6 hlavních konceptech pro elektromotory:

- sériový hybrid (a) – dmychadlo je poháněné pouze elektromotorem, turbína pomocí generátoru nabíjí baterie;
- paralelní hybrid (b) – dmychadlo umístěné na hřídeli může být poháněno zároveň turbínou i elektromotorem nebo pouze jedním zdrojem;
- paralelní/sériový hybrid (c) – jedno nebo více dmychadel je poháněno přímo turbínou, zbytek dmychadel je poháněno elektromotory;
- elektrický systém (d) – spoléhá se pouze na baterie pro dodání hnací síly;
- plně turbo elektrický systém (e) – neobsahuje baterie, turbína je napojena na generátor a produkuje stejnosměrný proud, který pohání elektromotory;
- částečně turbo elektrický systém (f) – část hnací energie generuje elektrický pohon, část zajišťuje turbodmychadlo poháněné plynovou turbínou. [64]



Obr. 15 – Koncepty motorů využívajících elektrický zdroj [64]

Hybridní elektrická letadla, kombinující inovativní elektromotory a spalovací motory, jsou v blízké budoucnosti považována za velmi účinnou náhradu konvenčních letadel krátkého a středního doletu. Mnoho velkých společností v leteckém průmyslu investuje do této technologie, např: Airbus, Siemens, Rolls-Royce, Boeing a další. [47]

3.3 Možnosti alternativních paliv

Mezinárodní panel pro změnu klimatu 2015 (Intergovernmental Panel on Climate Change) dospěl k rozhodnutí, že bez naléhavých opatření bude mít změna klimatu závažné a nevratné dopady po celém světě. I když se produkce CO₂ při spalování snižuje o přibližně 1,5 % ročně na jednoho pasažera, tak velikost letadlových flotil roste o 4 % ročně. [47]

U leteckého paliva rozlišujeme letecký petrolej (kerosin) a letecký benzin. Letecký petrolej je znám také pod označením Jet A-1, což je specifická verze petroleje, určeného coby palivo moderních reaktivních (proudových) a turbovrtulových motorů (turbopropech). Cena leteckého petroleje je nižší než leteckého benzínu a pohybuje se včetně spotřební daně a DPH na částce 30 až 32 Kč za jeden litr. Naproti tomu letecký benzin je určený pro pístové motory, používané u menších letadel. Cena na zákazníka je u leteckého benzínu vyšší, přibližně 50 Kč za litr. Využívání alternativních paliv by mohlo hrát důležitou roli při omezování spotřeby fosilních paliv,

snižování emisí skleníkových plynů a ochraně životního prostředí. Palivo je jedním z největších provozních nákladů pro letecký průmysl a IATA očekává, že do roku 2030 bude 30 % podíl biopalivové složky v palivu. Všechny složky v leteckém průmyslu se snaží zavést nová opatření a řešení k dosažení cílů, které vlády a organizace stanovily za účelem zlepšení změny klimatu. V současnosti je vyvinuto úsilí na výrobu biopaliv šetrnějších k životnímu prostředí. Kromě biopaliv je řada výzkumů zaměřená i na další alternativní paliva, např: vodík, amoniak či deriváty alkoholu. [76]

Letecké palivo musí splňovat řadu kritérií na kvalitu, aby zajistilo požadovanou bezpečnost a efektivnost při letu. S růstem dopravy obecně, roste i spotřeba fosilních paliv a zároveň klesají zdroje. Letecká doprava již několik let využívá přimíchávání alternativních paliv. Tato složka se vyrábí z obnovitelných zdrojů a přimíchává do leteckých paliv. Dle způsobu výroby a vlastností je můžeme rozdělit na **syntetická, obnovitelná a nemísitelná**. Označení biopalivo je pouze u paliv vyrobených z biomasy a biologického odpadu. [78]

3.3.1 Syntetická paliva

Syntetická paliva jsou vyráběna metodou zvanou Fischer-Tropsch. Základním materiálem může být uhlí, plyn nebo biomasa. Paliva na této bázi jsou volně mísitelná se současnými palivy. Syntetická paliva mají vynikající vlastnosti, někdy dokonce lepší než současná paliva. Nicméně výroba z neobnovitelných surovin (uhlí, zemní plyn) není dlouhodobým řešením. Výzkum je zaměřen na vývoj biologického paliva vyráběného z rostlin odstraňujících CO₂ z atmosféry. [78]

3.3.2 Obnovitelná paliva

Mezi obnovitelné letecké paliva patří paliva na bázi bio-dieselu, bio-paliva získané pyrolýzou zkapalněné biomasy a paliva na bázi alkoholu získaná hydrolyzou a fermentací. Tyto paliva jsou plně mísitelná s konvenčními palivy. Paliva jsou většinou vyráběna z bio-olejů. [76]

3.3.2.1 Biopaliva

Biopaliva rozdělujeme na 4 generace dle výrobní suroviny:

- polysacharidy a olejniny;
- lignocelulozové zbytky;
- vodní řasy a mikroorganismy;
- výroba elektřiny chemickou reakcí.

Zda, a případně o kolik, biopaliva snižují produkci skleníkových plynů, stále zůstává předmětem sporů. Faktem je, že při výrobě biopaliv je třeba dodávat nezanedbatelné množství energie a zdrojů. Mezi obnovitelná letecká paliva patří kromě paliv na bázi bio-dieselu, také právě vyvíjené bio-paliva získané pyrolýzou zkapalněné biomasy. [78]

V Evropské unii dlouhodobě roste podpora produkce biopaliv, to se ale změnilo v září 2007, kdy Organizace pro hospodářskou spolupráci v Evropě (OECD) začala tento trend kritizovat. Podle OECD vede k prudkému růstu cen potravin a potenciálně i k devastaci přírody. V září 2012 uvedla agentura Reuters návrh legislativy z Bruselu, ve které Eurozóna omezí používání biopaliv založených na zemědělských plodinách, protože se obává, že tato jsou méně šetrná k životnímu prostředí, než se předpokládalo. Výbor pro životní prostředí, veřejné zdraví a bezpečnost potravin Evropského parlamentu omezila podíl biopaliv na 5,5 %. Problémů při pěstování biomasy pro biopaliva je celá řada. Při spalování bionafty dochází k podstatně větší produkci pevných částic menších než 1 mikrometr, dále oxidu uhelnatého (CO), oxidu uhličitého (CO₂), oxidu dusičitého (NO₂) i oxidu siřičitého (SO₂). Pěstování probíhá na velkých plantážích, čímž významně ubývá biodiverzity. Používáním pesticidů a hnojiv dochází k zamořování podzemních vod. Vysoká neefektivnost – na výrobu 1 litru biopaliva je spotřebováno až 2 500 litrů vody, během každé fáze produkce jsou využívána fosilní paliva a malá energetická výtěžnost. [76, 78]

3.3.2.2 Deriváty alkoholu

Podobně jako biopalivo lze do paliva přimíchávat deriváty alkoholu – nejčastěji methanol, ethanol a dimethylether (DME). Jejich podíl může tvořit až 20 % pro běžná paliva. V letectví se uplatňuje hlavně ethanol, který nejlépe splňuje technické nároky. Čistý ethanol se v letectví nepoužívá jako palivo, většinou se smíchává s běžnými minerálními palivy s podílem až 10 %. Díky ethanolu se zvyšuje oktanové číslo a snižuje se množství emisí CO₂. [78]

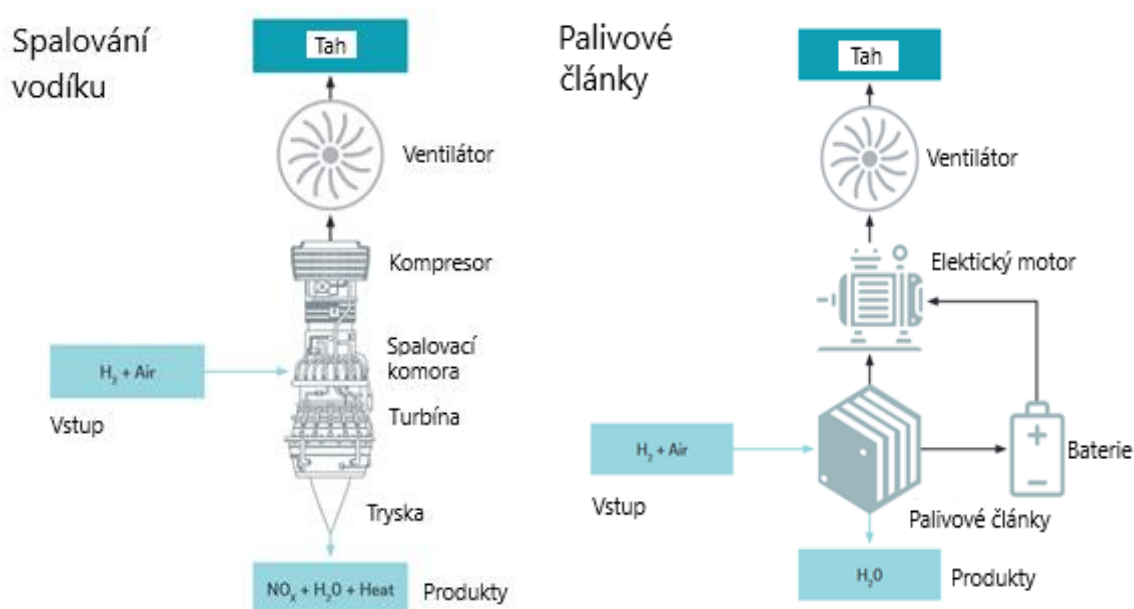
Ethanol (chemický vzorec C₂H₅OH) je druhý nejjednodušší alkohol, vznikající při alkoholovém kvašení jednoduchých cukrů působením kvasinek. Pro použití jako palivo je ethanol nejčastěji vyráběn z obilí, dalšími plodinami jsou kukuřice, brambory či cukrová třtina. První snahy o využití jako paliva začaly v 30. letech 20. století, ale větší pozornosti se mu dostalo až během ropné krize v 70. letech. Ethanol se začal využívat jako palivo pro pístové motory malých letounů. Maximální dolet letadla je s etanolem menší, než je tomu v případě leteckého benzínu. Také výkon motoru na ethanol je menší než s konvenčním palivem. Kvůli těmto nedostatkům je nepravděpodobné, že by ethanol mohl nahradit letecký benzín. Pro proudové motory se nenašlo využití, neboť jeho energetická hustota a měrná energie jsou příliš nízké a míchání s běžným petrolejem není možné kvůli rozdílným chemickým vlastnostem. [78]

3.3.3 Nemísitelná paliva

Do této skupiny spadají paliva, která nejsou mísitelná s konvenčními palivy. Problémem je, že současný provoz ani používaná technika na jejich využívání nejsou připraveny a muselo by dojít k celkovému přeměrování leteckého provozu a vybudování zásobovací infrastruktury. Nejvíce zkoumaným palivem je vodík.

3.3.3.1 Vodík

Vodík (H_2) je považován v mnoha ohledech za dokonalé palivo budoucnosti. Účinné, netoxické, lze ho produkovat z obnovitelných zdrojů, nejedná se o skleníkový plyn a při použití v palivových článcích nevytváří žádné emise. Využití vodíku by také znamenalo snížení závislosti na dovozu ze zahraničních zemí a předpokládá se budoucí širší využití v průmyslu, dopravě a energetice. Problém je v současné produkci vodíku. Asi 96 % spotřebovaného vodíku se vyrábí petrochemickými procesy a při výrobě se produkují oxidy uhlíku. Zbylé 4 % se vyrábí "čistě" elektrolyzou. Pomocí stejnosměrného proudu se rozkládá voda na kyslík a vodík. Nevýhodou je velké energetická spotřeba, přibližně $5 \text{ kWh} \cdot \text{m}^{-3}$ vodíku při celkové účinnosti cca 18-28 %. Tato nízká účinnost je hlavní nevýhodou tohoto způsobu výroby vodíku. Pro vodík se zkoumají dvě metody využití v letectví, první obnáší spalování vodíku místo leteckého petroleje v upravené plynové turbíně, druhá metoda je výroba elektřiny z vodíku a kyslíku pro napájení elektromotorů. [77]



Obr. 16 – Schéma spalovacího vodíkového motoru (vlevo), schéma motoru s vodíkovými články (vpravo) [75]

Spalování vodíku – Spalovací motor na vodík funguje na stejném principu jako proudový motor. V přední části vstupuje vzduch nasávaný kompresorem, který vzduch stlačuje a tím ohřívá. Vzduch dále putuje do spalovací komory, kde se vstříkuje palivo. Zažehnutím se směs vznítí a uvolněné plyny roztáčejí turbínu. Za turbínou se tepelná energie mění na kinetickou a působí tah. Produkty při spalování vodíku jsou energie, vodní pára a oxidy dusíku. Oba plyny podporují skleníkový efekt. Vodní páry se vytváří více než v případě petroleje (asi 260 % více) a vytváří kondenzační stopy, které ve stratosféře zůstávají dlouhou dobu. Oxidy dusíku nejsou produkovány v takovém množství (cca o 90 % méně) a nejsou tak škodlivé jako oxidy uhlíku. Oproti

konvenčnímu palivu nabízí vodík větší výkon na 1 kg, nevýhodou je jeho nízká hustota. Pro přepravu stejné hmotnosti letounu vyžaduje 4 až 5násobně větší objem než petrolej. Přejít na vodíkový pohon vyžaduje vyřešení několika hlavních aspektů, přizpůsobení motorů pro spalování vodíku, dostatečná kapacita na dlouhé tratě, zajištění stálé dodávky paliva na letišti pomocí nové dopravní infrastruktury a přizpůsobení letišť pro větší kapacitu nového paliva. S tím vším jsou spojeny certifikační povolení, které v letecké dopravě znamenají velmi zdlouhavý proces. Oproti použití vodíkových článků jsou ale změny méně výrazné a bylo by jednodušší přizpůsobit zavedené postupy a technologie. [75, 77]

Vodíkové články – Při výrobě elektřiny chemickou reakcí kyslíku a vodíku vzniká jako vedlejší produkt pouze plynná vodní pára, přibližně 9 kg vodní páry na reakci 1 kg vodíku. Vliv takového množství vodní páry na globální klima je zatím nejasný a při vývoji se bere v potaz, jak omezit vypouštění vodní páry. Během roku 2019 bylo ohlášeno 5 vznikajících projektů využívajících vodíkové články. Většinou se jedná o velmi rané fáze výzkumu malých dopravních letadel (počet pasažérů do 20 sedadel). Jedinou výjimku tvoří projekt NASA CHEETA, který má za cíl vytvořit letoun pro komerční dopravu s konstrukcí samokřídla a elektrickým pohonem, poháněným kriogenicky chlazenými vodíkovými články. Projekt je financován 3 mil. dolarů na 3 roky. Studie tvrdí, že využití vodíkových článků (s efektivním využitím paliva 45-50 %) je efektivnější než spalování (40 %). To by znamenalo menší potřebnou zásobu paliva v letadle. Využití technologie by vyžadovalo mnohem větší změny v konstrukci letadel a přepracování systémů na nový elektrický zdroj. [75]

3.4 Budoucí prototypy letadel

Na následujících stránkách je vybráno několik vznikajících prototypů a projektů, využívajících pokročilých technologií a konstrukcí. Většina vyvíjených prototypů sdílí některé technologické parametry:

- rychlost – přibližně 0,7 m, což je asi o 5-10% menší rychlost než u současné generace;
- cestovní výška ve vyšších letových hladinách pro zmírnění odporu a snížení spotřeby paliva;
- menší energetická náročnost způsobí menší hlučnost při vzletu;
- menší kapacita – okolo 180 pasažérů;
- menší vzletová délka. [73]

3.4.1 MAVERIC

Francouzský výrobce letadel Airbus představil poprvé veřejnosti MAVERIC (Model Aircraft for Validation and Experimentation of Robust Innovative Controls) v Singapuru 11. února 2020. Tento model letounu je zvláštní tím, že má křídla navazující na trup (konstrukce samokřídla), čímž je zajištěna mnohem lepší aerodynamika, ale na úkor složitosti ovládání. Bylo by to první dopravní letadlo tohoto druhu. Podle výkonného viceprezidenta společnosti Airbus, Jeana-Brice Dumonta, je toho možné dosáhnout díky technologickému pokroku ve výrobě lehčích materiálů a výkonnější

výpočetní technice. Prozatím byl otestován model (obr. č. 17) s délkou 2 metry a rozpětím křídel 3,2 metry. Poprvé vzlétl červnu 2019. Model vznikl během 3 let v rámci projektu Airbus UpNext se sídlem v Toulouse. Tato část firmy se zabývá vývojem budoucích technologií letectví a jejich uplatněním v provozu. [66]

Samotný model byl postaven s precizností jako skutečné letadlo a také musel projít všemi potřebnými testy. Ve větrném tunelu se zkontrolovaly aerodynamické charakteristiky, jak se model chová za nízké rychlosti, za pádové rychlosti, charakterizovat brzdovou dynamiku, stabilizaci a řízení. Z testů vyplynulo, že konstrukce samokřídla může ušetřit až 20 % paliva v porovnání s tubusovým letounem se stejným motorem. Větší konstrukce letounu dává možnost integrovat jiné typy pohonných systém, při umístění motoru v horní centrální části dojde také ke snížení hluku působícího na zem. Větší konstrukce zpříjemní cestu pasažérům otevřenějším prostorem. Mezi nevýhody se řadí nedostatečná stabilita v podélné i svislé ose. Toto je třeba řešit pomocí počítačů, které dbají na bezpečný režim letu a samy letoun stabilizují. Další nevýhodou je rozložení hmoty a cestujících. Během naklánění se letoun může dostat do 30° náklonu. V tubusových letounech je cestující vzdálen od podélné osy maximálně 3 metry, ale v novém letounu bude vzdálenost větší a na cestující bude působit větší obvodové zrychlení, které může vyvolat nepříjemné pocity. Možným řešením je zpomalit naklánění na úkor zvětšení poloměru zatáčky. [47, 66]

Toto letadlo je zatím ve fázi výzkumu a není jisté, že se vůbec někdy dostane do provozu. Samotný výzkum a vývoj nových technologií dopravních letadel je nákladná záležitost, a aby se investice vyplatila, musí výsledek přinést zisk. Kromě technologického výzkumu by pro zavedení do provozu bylo nutné přebudovat systém provozu na letišti, vyřešit systém nástupu a výstupu cestujících, zabezpečení, pohodlnost a rozvržení sedadel pasažérů a další. Odhadnout všechny možnosti i nástrahy nových technologií není nic snadného a za současného stavu je pro společnosti ještě více riskantní investovat do nejistých výsledků.



Obr. 17 – Model letounu MAVERIC [67]

3.4.2 E-FAN X

Prototyp hybridního letounu vznikl od roku 2017 ve spolupráci firem Airbus, Rolls-Royce a Siemens, a ač byl prototyp takřka dokončen a první let byl naplánován na rok 2021, tak v dubnu 2020 byl program zrušen z důvodu pandemie COVID-19. Letadlo mělo jeden ze čtyř turbovrtulových motorů nahrazen 2 megawattovým elektromotorem. S kapacitou 50-100 pasažerů měl létat regionální a krátké tratě od roku 2035. [68]



Obr. 18 – Prototyp letounu E-FAN X [68]

3.4.3 STARC – ABL

Koncept vznikající pod vedením NASA se zaměřil na částečný turboelektrický pohon fungující zároveň se systémem nasávání mezní vrstvy pro snížení odporu. Letadlo s kapacitou 150 pasažerů, doletem 3 500 NM a tradiční stavbou trup-křídlo by měl překlenout mezeru mezi současnými letadly poháněnými spalovacími motory a budoucími celoelektrickými letadly. Pohon zajišťují 2 tradiční proudové motory umístěné pod křídly a 1 elektromotor napájený elektřinou z generátorů plynových turbín. Celkově by podle odhadu měly proudové motory na křídlech dodávat při vzletu 80 % a při letu 55 % tahu, zbylá procenta by dodával elektromotor na konci trupu. Celkově by pohon mohl dosáhnout úspory paliva 10 %. S uvedením do provozu se uvažuje mezi roky 2035 a 2040. [70]

3.4.4 WRIGHT 1

Koncept čistě elektronického letadla. Akumulátorová letadla dosahují nejvyššího možného snížení emisí CO₂ a nejvyšších přínosů pro životní prostředí. Některé společnosti v současné době pracují

na konstrukci a vývoji letadel poháněných bateriemi. Je však pravděpodobné, že budou potřebovat více času do uvedení do provozu než srovnatelná hybridně-elektrická letadla. Jedna ze společností, Wright Electric, pracuje na projektu WRIGHT 1. Projekt podpořil nízkonákladový evropský přepravce EasyJet roku 2017. Design společnosti Wright Electric je založen na distribuovaném pohonu, s počtem 10-14 elektromotorů integrovaných v křídlech, a na bateriích, které lze snadno vyměnit během údržby na letišti. Letadlo by mělo pojmout 186 cestujících a schopno dvouhodinového letu na vzdálenost 560 km. Pohon by tvořily elektrické motory o výkonu 1,5 MW, které by se měly začít testovat během roku 2023. Samotné letadlo by se mohlo objevit v provozu roku 2030. [71, 72]



Obr. 19 – Koncept letounu WRIGHT - 1 [72]

3.4.5 AURORA D8

Na projektu pracují ve spolupráci firmy Aurora Flight Sciences, MIT, NASA a Pratt & Whitney od roku 2008. Konstrukce je tvořená dvojitým trupem zakončeným dvojitým vertikálním stabilizátorem. Pohon, využívající technologii pohlcování mezní vrstvy, tvoří 3 motory připevněné k ocasu trupu, tím pádem samotná křídla mohou být menší a lehčí. U letounu se předpokládá cestovní rychlost 0,74 M, kapacita pasažérů 180 a dolet 3 000 NM. Předpokládaná doba zprovoznění je 2030-2035. [73]



Obr. 20 – Koncept letounu AURORA D8 [73]

3.4.6 N3-X

V rámci NASA vzniká spousta možných projektů kombinujících různé technologie. Jeden z nejpokrokovějších je N3-X, prozatím ve fázi počítačových simulací. Využívá konstrukci samokřídla, s elektromotory pohánějící větší množství vrtulí rozmístěných podél zadní hrany křídla. Energie je dodávána 2 generátory poháněnými turbohrádelovým motorem umístěnými na každém konci křídel. Generátory jsou připojeny k pohonům prostřednictvím chlazených supravodivých elektrických vedení. Předpokládaná kapacita je 300 pasažérů, dolet 7 500 NM a cestovní rychlost 0,84 M. [72]



Obr. 21 – Koncept letounu N3-X [72]

4. STATISTICKÉ VYHODNOCENÍ

V této části práce vychází ze zpracovaný seznam vybraných letadel používaných od 20. století po současnost. Kompletní zpracovaná data jsou uvedena příloze č. 1 (tabulka Seznam) a jsou nedílnou součástí této diplomové práce. Dále je seznam rozdělený na pístová a proudová letadla, proudová letadla jsou dále rozdělena podle doletu na krátké střední a dlouhé tratě (tabulka Rozdělení). V následujících kapitolách jsou uvedena vyhodnocení vývoje fyzických parametrů a letových výkonů [10, 19, 84, 95].

První letadla uvedená v seznamu jsou experimentální letadla z průkopnické doby letectví a slouží k ukázce, jak letectví začínalo a kam pokročilo. Dále jsou zde meziválečná letadla, která dokazují, že největšího technologického pokroku se dosahuje během války a kde jsou první zástupci letadel, kteří sloužili k civilní přepravě. Od 50. let jsou uvedeni pouze zástupci civilních dopravních letadel.

Při vývoji letadel se pohlíží na mnoho faktorů, např.: bezpečnost, provozní parametry, provozní náklady, využití aj. Jeden z faktorů ovlivňující trh a výrobce letadel je efektivní využití paliva. Spolu s tím v posledních letech roste i zájem o snižování vypouštěných emisních plynů. Pro určení výkonnostních parametrů letadel jsou nejdůležitější tyto vlastnosti:

- aerodynamická účinnost – důležitý je poměr vztahové a odporové síly;
- hmotnostní poměr – hmotnost prázdného letounu (Operating Empty Weight – OEW) a maximální vzletové hmotnosti (Maximum Take Off Weight – MTOW);
- kapacita sedadel;
- účinnost motorů.

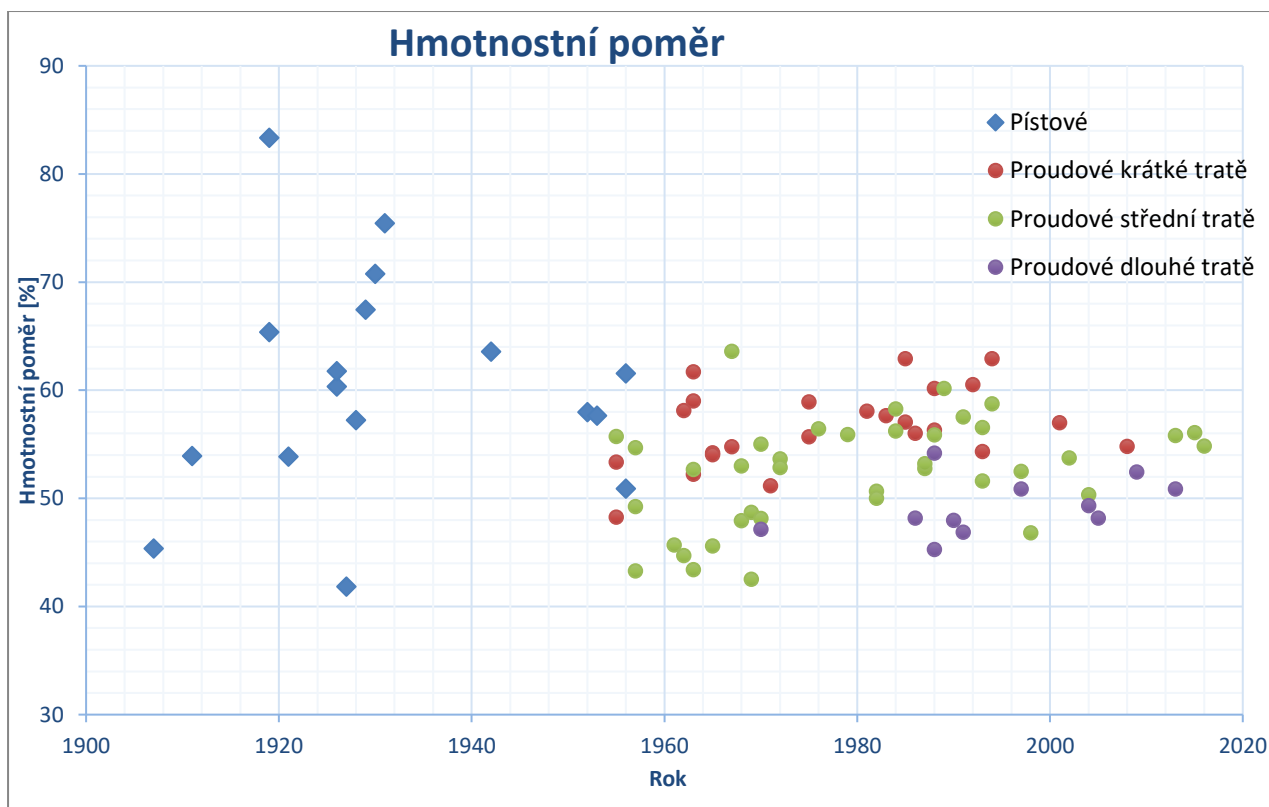
OEW – Hmotnost konstrukce letadla včetně posádky, všech kapalin potřebných pro provoz, jako je motorový olej, chladicí kapalina motoru, voda, nepoužitelné palivo a všechny položky a vybavení potřebné pro let, s výjimkou použitelného paliva a užitečného zatížení.

4.1 Vývoj hmotnostního poměru

V posledních letech se zvyšuje podíl kompozitů v konstrukci. Mezi výhody kompozitních materiálů patří lepší odolnost proti porušení, odolnost proti korozi a prohoření, nižší měrná hmotnost. Zásadní nevýhodou je vyšší cena a náročná výroba. Díky své nižší hustotě a zvyšujícímu se zastoupení v poslední generaci letadel se předpokládá, že se bude hmotnostní poměr (hmotnost konstrukce/MTOW) snižovat, neboť je snaha konstruovat lehká letadla s co největším možným obchodním zatížením.

Ze zpracovaných grafů (viz příloha – Grafy č. 1-4), ve kterých jsou zpracovaná data hmotnostního poměru pro jednotlivé kategorie letadel, lze vyčíst, že se hmotnostní poměr konstrukce letadla a MTOW v průběhu let měnil minimálně, pouze v jednotkách procent. První skupina pístových letadel má velký rozsah hmotnostního poměru, neboť zástupce tvoří řada experimentálních letadel

z průkopnické éry letectví, kdy byla letadla zaměřena na překonávání rekordů a závodní létání. Nicméně pozdější zástupci pístových dopravních letadel mají hmotnostní poměr přibližně 60 %. U proudových dopravních letadel se poměr přibližuje průměrně 48-56 % odstupňovaný podle délky doletu (viz tab. č. 2). Rozdíly dle délky trati jsou způsobeny vybavením a systémy, které každé letadlo musí obsahovat. Graf č. 8 uvedený níže shrnuje pro přehlednost grafy č. 1-4, které jsou uvedeny v příloze.



Graf 8. – Graf hmotnostního poměru [příloha]

Druh letadel	Pístová l. [%]	Proud. let. kr. [%]	Proud. let. stř. [%]	Proud. let. dl. [%]
Průměr	62,20	56,63	52,42	48,67

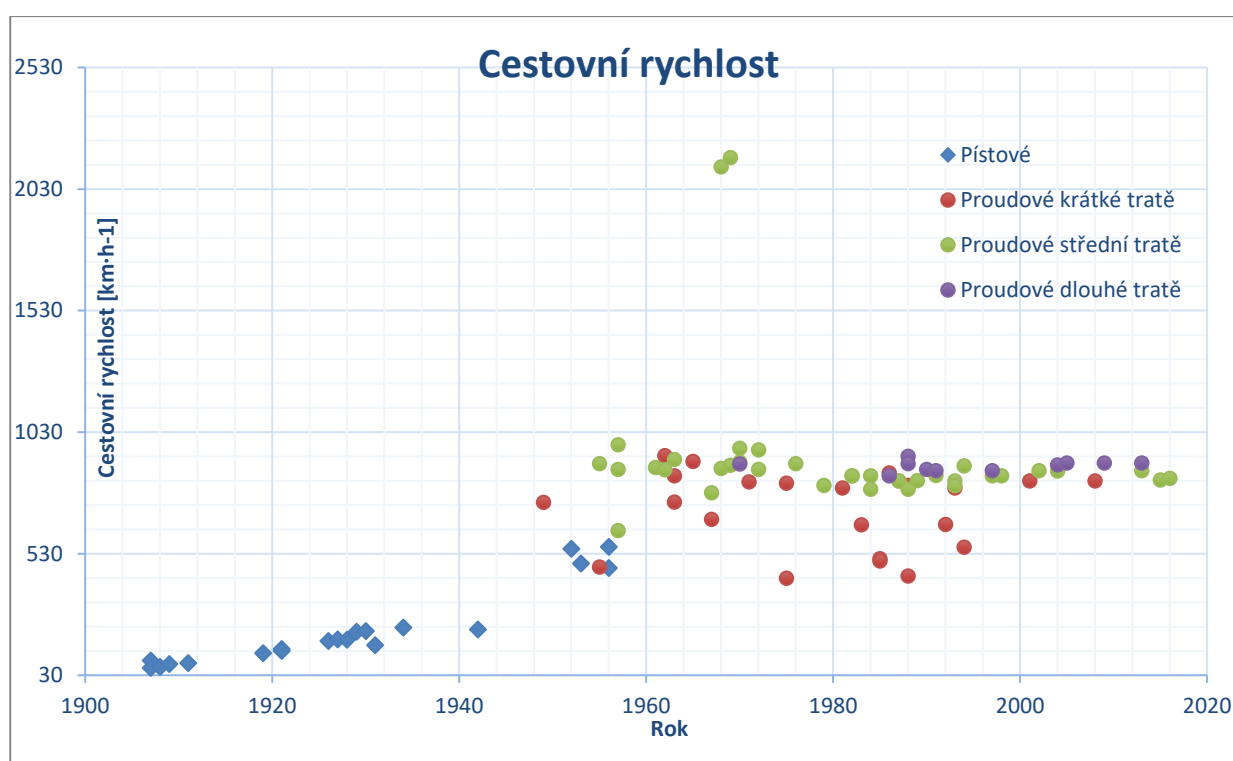
Tab. 2 – Průměrný hmotnostní poměr [příloha]

Je překvapivé, že se tento poměr výrazněji nemění. S narůstajícím podílem kompozitních materiálů (viz kap. 1.2.2. graf č. 1) se dalo předpokládat, že u posledních zástupců (B787-8, A350-900 ad.), u kterých dosahuje kompozitní materiál až 50 % z celkové hmotnosti, hmotnostní poměr výrazněji klesne. To se ovšem nestalo. Pokud porovnáme podobná letadla od výrobce Airbus A330-200 (č. 85) a A350-900 (č. 95) vidíme, že hmotnostní poměr se takřka nezměnil, i když u novějšího letadla je hmotnostní podíl kompozitů 53 %. Letadlo A350 je mírně větší, hmotnost letadla narostla o 15 % a kapacita narostla až o 31 %. Dolet se zvýšil o 36 % a tah motorů o 16 %, přičemž spotřeba paliva klesla z $3,32$ na $2,9 \text{ l} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{pas}^{-1}$ (přibližně o 14 %). Se sníženou

spotřebou paliva se snížily i skladovací kapacity paliva na palubě. Došlo ke snížení hmotnosti konstrukce, zároveň došlo i ke snížení hmotnosti paliva v MTOW a díky výkonnějším motorům došlo k prodloužení doletu. Z toho lze usoudit, že pevnější a lehčí kompozitová konstrukce umožnila osazení výkonnějších motorů, tedy zvýšení výkonnosti letadla při zachování hmotnostního poměru.

4.2 Vývoj cestovní rychlosti

Následující graf č. 9 (příloha – graf č. 6) vývoje cestovní rychlosti potvrzuje, že největšího růstu bylo dosaženo ve všech parametrech v 40. letech vlivem technologického vývoje během 2. světové války.



Graf 9. – Graf cestovní rychlosti [příloha]

Z grafu je patrné, že pístové motory jsou omezené využitím vrtule na přibližně 200-225 km·h⁻¹, výjimku tvoří pozdější letadla z 50. let, která dosahovala rychlosti až 500 km·h⁻¹. Největší skok v cestovní rychlosti je zobrazen v 50. letech, během přechodu na proudové motory a vývoj se ustálil. Rychlost změny parametrů se začala snižovat až stagnovat. Během 50. let se rychlost tryskových letadel přiblížila rychlosti zvuku (přibližně 850–900 km·h⁻¹ - 0,8 Machu), která je pomyslnou hranicí pro ekonomicky výhodné cestování, neboť během transsonické rychlosti roste potřebný tah pro překonání zvukové bariéry.

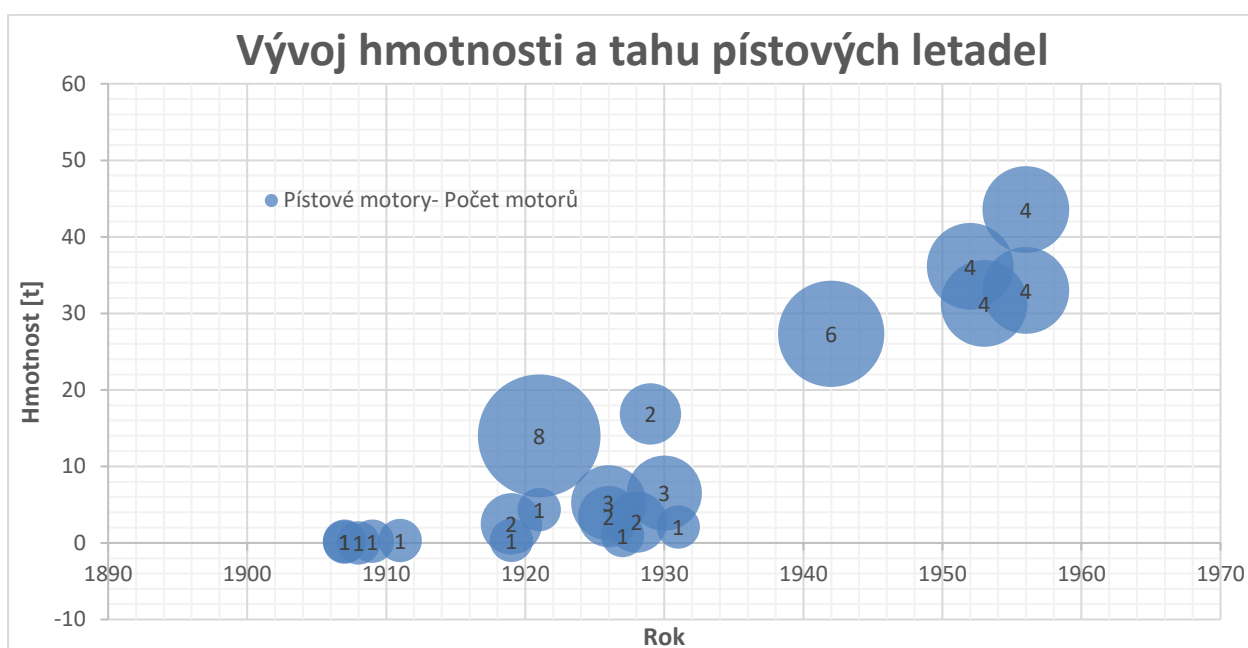
Výjimkou jsou na grafu turbomotorová letadel na krátké tratě, která dosahují hodnot cestovní rychlosti přibližně $500\text{--}550\text{ km}\cdot\text{h}^{-1}$. Druhou výjimkou jsou nadzvuková letadla (Concorde - 46, Tupolev 144 - 44) s rychlostí až 2 Machů.

Do budoucna vyvíjené prototypy počítají s nižší cestovní rychlostí, přibližně 0,7–0,8 Machu. I když probíhá výzkum více projektů, je využití nadzvukových dopravních letadel nepravděpodobné v nejbližší budoucnosti. Je zde řada překážek, kvůli kterým se provoz pravděpodobně neuskuteční – vysoká hlučnost, kvůli které byly nadzvukové tratě omezeny pouze nad hladinu moře už během provozu letadla Concord, velká produkce palivových spalin a vysoká cena letu je v době low-costových dopravců ekonomicky nevýhodná. Změny budou možné pouze se zdokonalením technologií pro překonávání zvukové bariéry, se kterou se potýkají nejen konstruktéři cestovních letadel, ale i konstruktéři vojenských letadel.

4.3 Vývoj tahu motorů

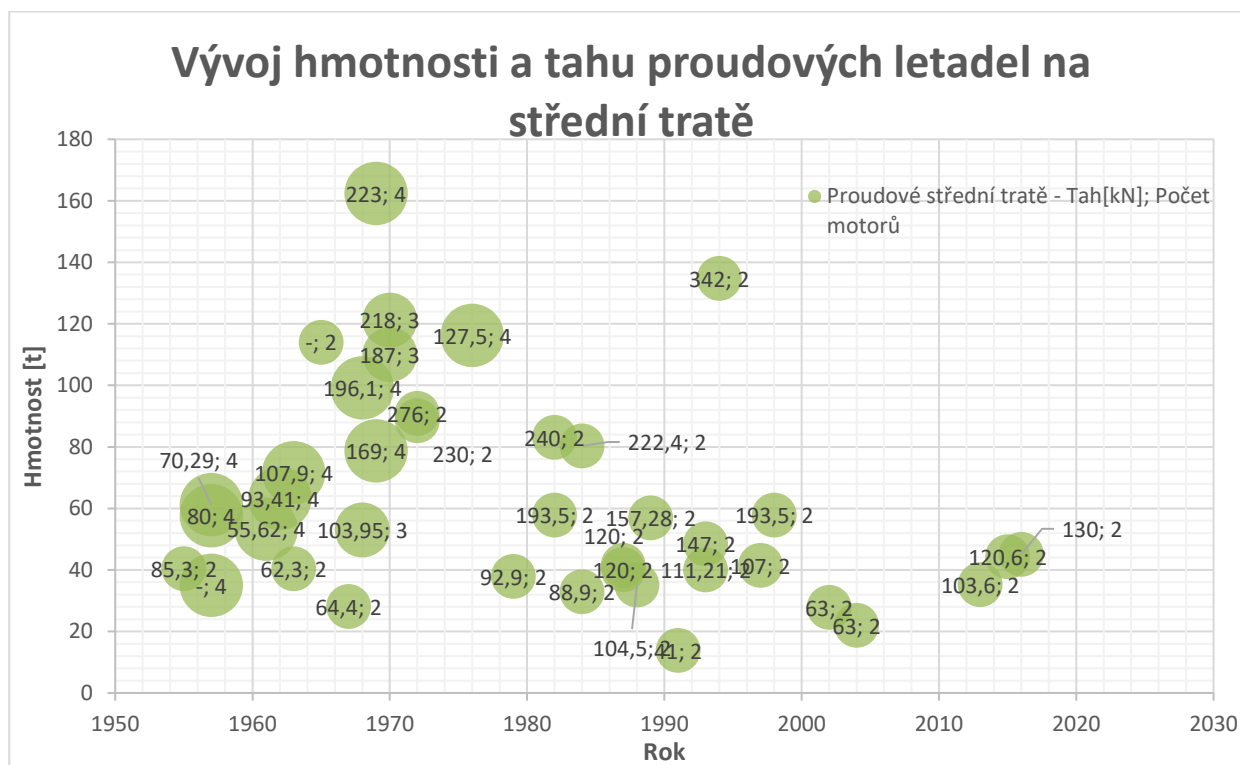
V příloze na grafech č. 7-10 vidíme skokové změny ve hmotnosti konstrukce a velikosti tahu motorů podle druhu motoru a délky tratě. Se zvyšujícím se tlakem na nižší spotřebu paliva dochází k odklonu od použití čtyřmotorových letadel. Postupné snižování tahu motorů a snižování celkového počtu motorů při zachování stejné hmotnosti bylo umožněno zvyšující se spolehlivostí motorů a lepšími aerodynamickými vlastnostmi.

U pístových letadel (graf č. 10) vidíme, že docházelo k experimentování s počtem motorů, kdy letadlo využívalo až 6-8 motorů. U pozdějších dopravních letadel se počet motorů ustálil na 4 při kapacitě přibližně 100 pasažérů a hmotnosti konstrukce přibližně 40 tun.



Graf 10. – Graf hmotnosti a počtu motorů pístových letadel [příloha]

Pokud porovnáme průměrné hodnoty jednotlivých dekád u proudových letadel na střední tratě (viz graf č. 11 a tab. č. 3), vidíme že do 70. let se parametry zvyšovaly. Po 1. ropném šoku se výrobci zaměřili na nižší spotřebu a letadla začala být menší a úspornější. Také se v tomto období začal omezovat počet motorů ze 4 na 3 nebo 2 motory. Použití více motorů než dvou se od 80. let objevovalo hlavně u letadel na dlouhé tratě. Spolu se snižováním počtu motorů docházelo i ke konstrukčním úpravám. Křídla nesla menší váhu, začala být méně robustní a tím i lehčí a aerodynamicky čistší.

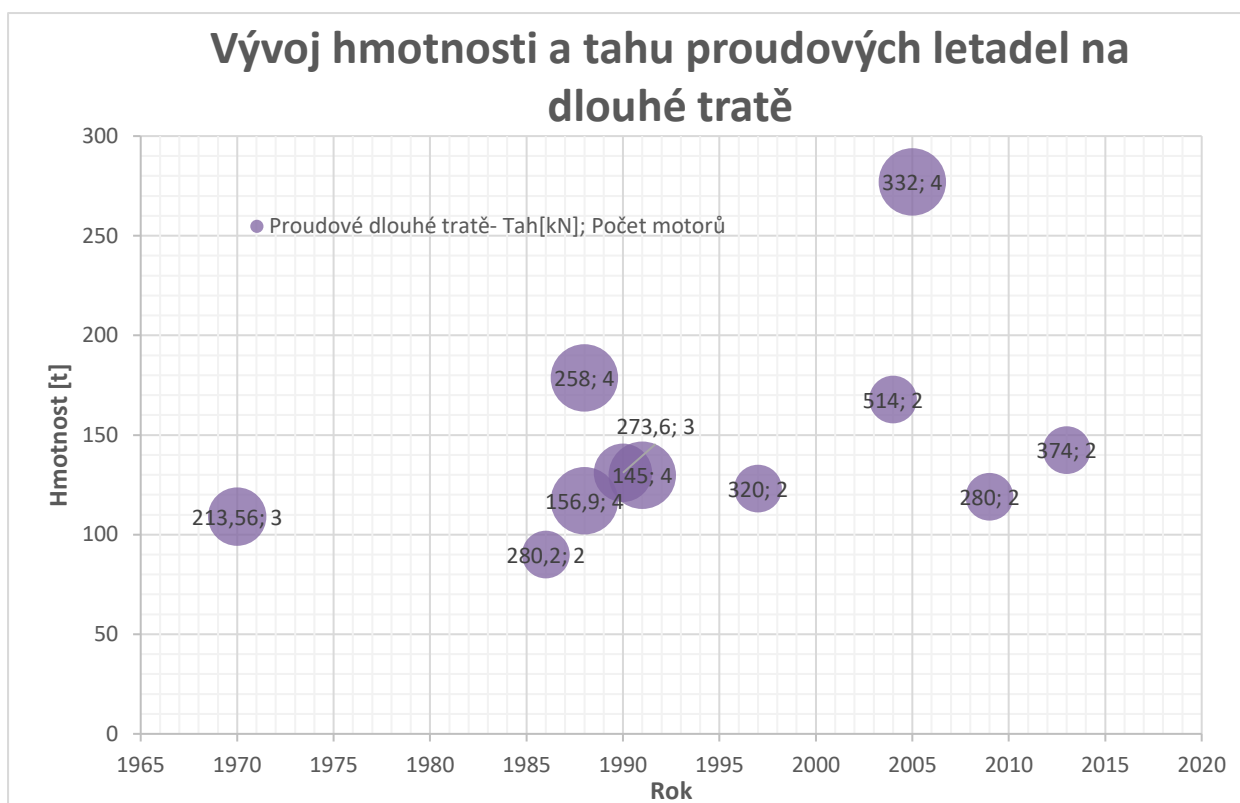


Graf 11. – Graf hmotnosti a počtu motorů proudových letadel na střední tratě [příloha]

Desetiletí	50. léta	60. léta	70. léta	80. léta	90. léta	00. léta	10. léta
Hmotnost	48,56	76,39	94,13	53,47	56,08	24,92	41,53
Tah	78,53	106,59	188,57	155,82	156,95	63,00	118,07
Kapacita	120,75	192,60	291,17	192,13	215,50	92,50	149,00

Tab. 3 – Průměrné parametry proudových letadel na střední tratě [příloha]

Dnes vidíme, že čtyřmotorová letadla se neudrží v provozu ani na dlouhých tratích. Na grafu č. 12 vyčnívá pouze A380 s hmotností 277 tun, 4 motory a tahem 332 kN. V době, kdy se celý trh začal přeorientovávat na středně velká letadla s nižšími kapacitami, s nižším tahem a spotřebou, Airbus zkonstruoval jedno z největších dopravních letadel. Malý odběr, vysoké provozní náklady a těžko naplnitelná kapacita vedly k ekonomickému neúspěchu. Proto se výroba A380 během roku 2021 zastavuje. Současně dochází ke snižování nebo zastavení produkce řady dalších velkokapacitních letounů, protože na trhu nenachází uplatnění.



Graf 12. – Graf hmotnosti a počtu motorů proudových letadel na dlouhé tratě [příloha]

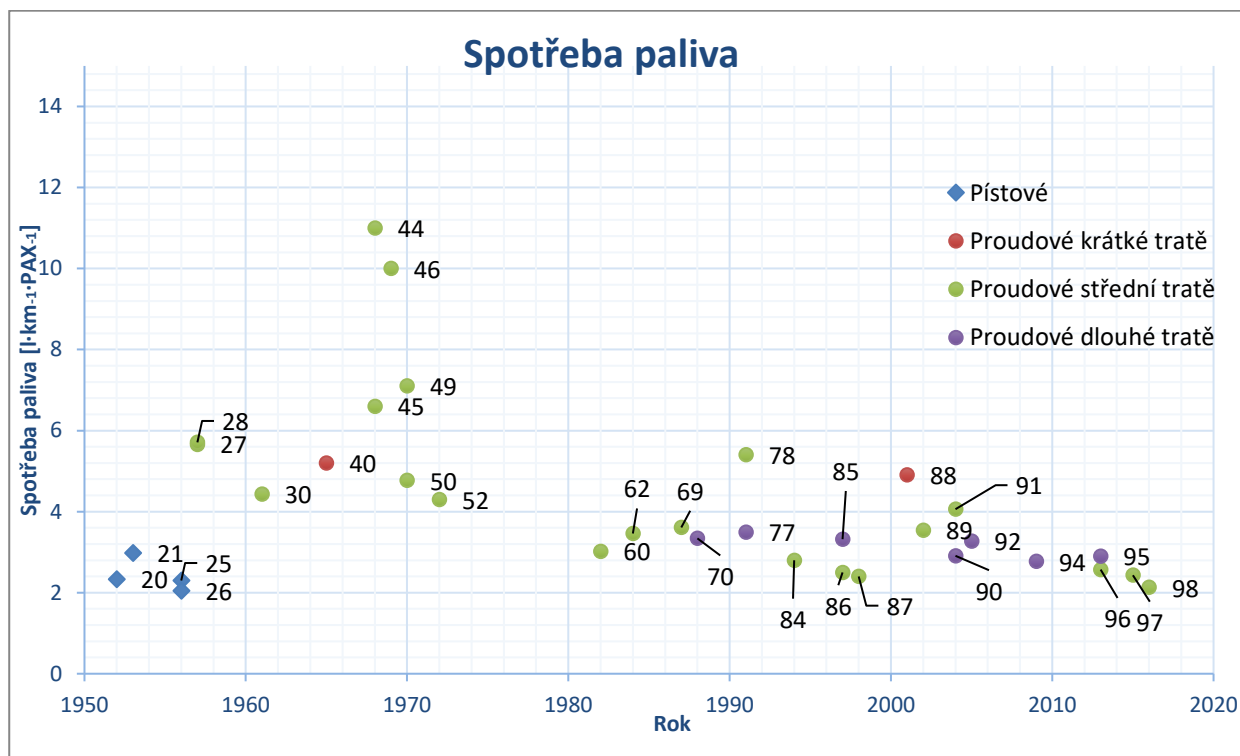
Do budoucna je nemožné odhadnout, kterým směrem letectví půjde. Vyvíjené prototypy nejčastěji uvažují se středními kapacitami 150-200 pasažerů. Nicméně záleží na vyvíjených technologiích a které nakonec budou úspěšně zařazeny do provozu.

4.4 Vývoj spotřeby paliva

Jedním z nejvýznamnějších výdajů v rámci provozních nákladů je palivo. Podílí se přibližně na jedné třetině z celkových provozních nákladů. Provozovatelé i výrobci se snaží snižovat spotřebu paliva během letu. Spotřeba se běžně počítá na 100 km a 1 pasažera.

Na grafu č. 13 (viz příloha graf č. 11) jsou číselně označena letadla od 50. let. Z grafu je vidět, že poslední generace pístových letadel v 50. letech měla výrazně lepší využitelnost paliva (cca $2,5 \text{ l} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{PAX}^{-1}$) než nastupující proudová (cca $5 \text{ l} \cdot \text{km}^{-1} \cdot \text{PAX}^{-1}$). V 70. letech, kdy došlo k ropné krizi a cena leteckého paliva začala růst, se zvýšil zájem o využitelnost paliva. Pokud porovnáme tento graf s grafem zobrazujícím cenu ropy (viz kapitola 1.3.1 graf č. 3), vidíme, že výrobci reagovali na změny ceny ropy. Nová generace v 80. letech měla nižší spotřebu. Původní rozdíl mezi účinností pístových a proudových letadel se tak začínal srovnávat. Postupným vývojem se účinnost proudových letadel zlepšila, z velké části díky vylepšení efektivnosti proudových motorů, ale také díky zlepšení aerodynamických vlastností a zvýšení kapacity sedadel. Samostatnou kapitolou jsou nadzvuková letadla (Concorde - 44, Tu 144 - 46), která vešla

do provozu těsně před 1. ropnou krizí. Jejich provoz se tak prodražil a letadla Concorde musela být dotována až dokonce jejich provozu roku 2003.



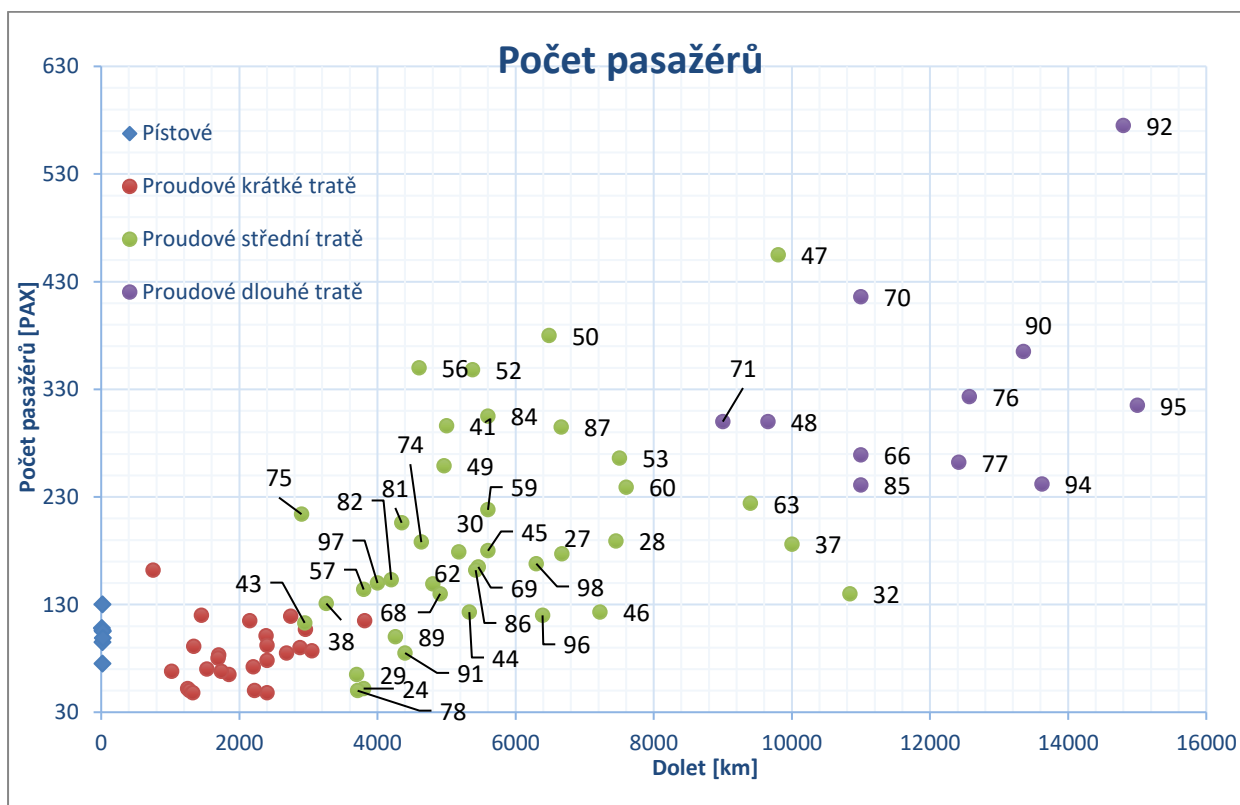
Graf 13. – Spotřeba paliva [příloha]

Z analýzy vyplynulo, že při nástupu proudových motorů měly horší účinnost než stávající pístové, které měly menší spotřebu. Proudové motory ale měly nižší hlučnost, vyšší letové rychlosti, vyšší dolet a vyšší spolehlivost. Kromě ekonomického tlaku na snižování spotřeby se zvyšoval i legislativní tlak na snižování produkce emisí. Spotřeba se postupným vývojem snížila přibližně na 40 % oproti spotřebě z 60. let. Nižší spotřeba zvětšila možný dolet, vedla k navýšení počtu pasažérů a eliminovala nutnost častých mezipřistání kvůli tankování. Díky tomu se cena letu na jednoho pasažéra snížila, což vedlo ke zvyšujícímu zájmu o cestování leteckou dopravou.

Pokud tedy porovnáme podobně těžká letadla z 60. a 90. let, například B707-120B (30) a B757-300 (87), vidíme, že hmotnost i hmotnostní poměr jsou velmi podobné. Největší rozdíl je, že starší B707 využívala 4 motory s celkovým tahem 222 kN, zatímco B757 2 motory s celkovým tahem 385 kN. Tento větší tah umožnil přepravit 295 cestujících (cca o 65 % více) na vyšší vzdálenost 6 658 km (cca o 28 % více). Díky efektivnějšímu využití paliva je spotřeba nižší, z 4,43 klesla na 2,4 l·km⁻¹·PAX⁻¹ (o 46 %). Díky nižší spotřebě došlo k poklesu kapacit paliva na palubě, což umožnilo nahradit hmotnost paliv vyšším počtem cestujících, proto opět zůstal zachován hmotnostní poměr.

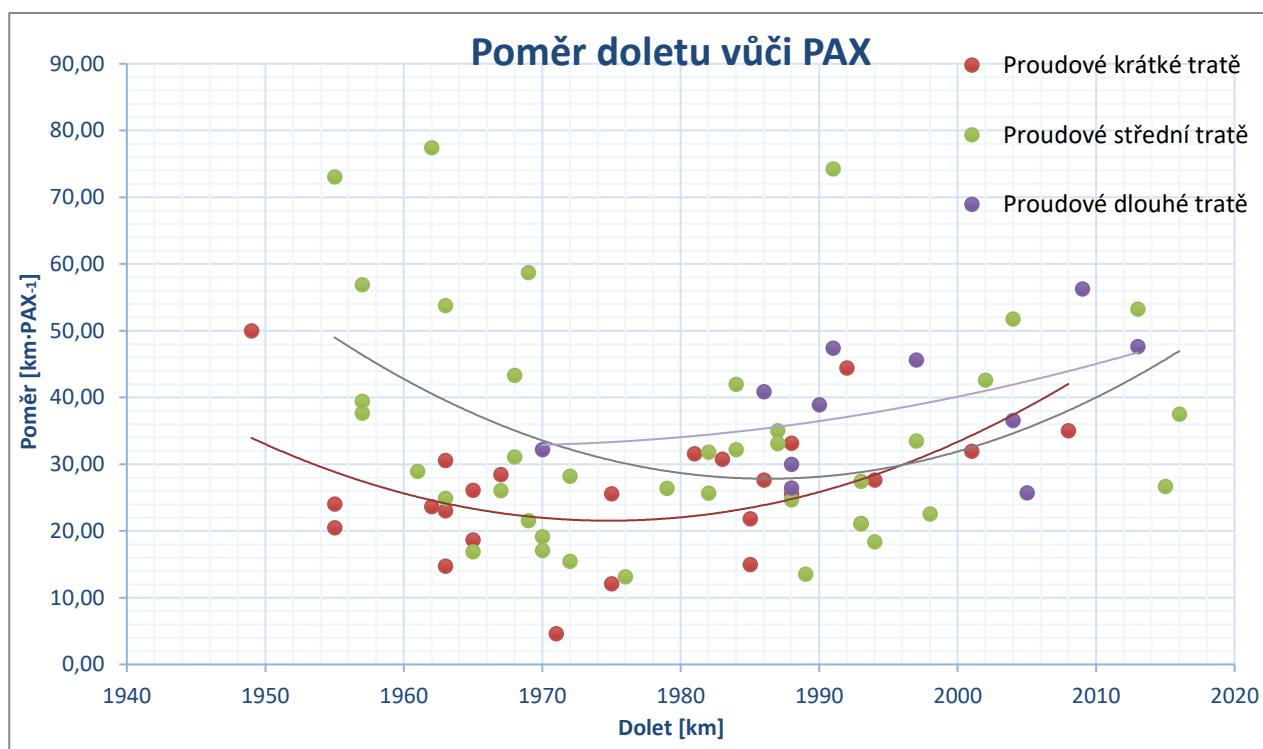
4.5 Vývoj počtu cestujících a doletu

Na grafu č. 14 (příloha graf č. 12) je zobrazena závislost počtu cestujících na doletu, kde vidíme, že počty pasažerů jsou odstupňované podle doletu. Je výhodnější na dlouhé vzdálenosti přepravovat více pasažerů ve větších letadlech než vypravit více menších letadel. Kapacity cestujících byly do 70. let 20. století mírně vyšší. Poté začal růst doletu na úkor počtu cestujících.



Graf 14. – Vývoj počtu pasažerů dle doletu [příloha]

Trend je lépe zobrazen v grafu č. 15 (příloha graf č. 13), kde zobrazen podíl doletu na počet přepravených cestujících. Do 70. let letadla využívala větší počet motorů, tento větší výkon umožňoval přepravu více pasažerů, ale s větší spotřebou. Poté začal ubývat využívaný tah a snižoval se počet cestujících. Během 80. a 90. let se s efektivnějšími motory začal zvyšovat dolet. Proto, pokud body proložíme křivky, vznikne parabolický tvar. Dochází k postupnému zvyšování doletu na jednoho pasažera a v současnosti se poměry letadel na jednotlivých tratích přibližně rovnají.



Graf 15. – Poměr doletu na pasažéra [příloha]

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo shrnout aspekty ovlivňující vývoj letecké technologie a provozu. Práce je rozdělena na čtyři hlavní části. První část práce stručně shrnuje vybrané aspekty a příklady z historie. Pro značnou obsáhlost historického vývoje nebylo možné zmínit všechny aspekty. Tento výběr nejpodstatnějších bodů slouží jako přehled, přičemž nejdůležitější vliv lze přisoudit technologickému pokroku dosaženému během 2. světové války a přechodu na proudové motory. Po válce bylo mnoho vojenských technologií převzato do civilního letectví. Provoz začal dbát mnohem více na bezpečnost a spolehlivost, čímž se letecká doprava otevřela široké veřejnosti. Létání, se zvyšující se nabídkou a snižující se cenou, tak přestalo být výsadou několika málo jedinců.

Druhá část práce se věnuje současnému důrazu na snižování dopadů na životní prostředí. Letecký provoz a jeho údržba na zemi významně dopadá nejen na lidské zdraví a místní okolí letišť, ale má také vliv na globální klima. Proto je snaha tyto dopady sledovat, analyzovat a snižovat. Jedná se zejména o produkování emisí pevných částic, plynných oxidů a hlučnosti.

Třetí část práce zkoumá budoucí plány leteckého průmyslu, kde je opět kladen důraz na ochranu životního prostředí. Základem všech plánů na udržitelný rozvoj leteckého průmyslu je zlepšovat efektivitu využívání paliva, neutrální růst uhlíkové produkce a zmírnit produkci uhlíkových plynů. Jedním z cílů IATA, který si stanovila roku 2009 bylo do roku 2020 ročně zvyšovat efektivitu využívání paliva o 1,5 % a snižovat produkce emisí na pasažera o 2 %. Tyto cíle se daří plnit díky vývojovým technologiím. Dále jsou zde rozebrány vybrané zkoumané technologie, jejich výhody a nevýhody a použití v projektovaných letadlech.

Čtvrtá část práce se zakládá na vytvořeném seznamu vybraných letadel používaných od 20. století po současnost. Seznam obsahující 98 letadel sumarizuje klíčové technické a technologické parametry, jako je například druh a tah pohonu, kapacitu, dolet, rychlost, hmotnosti atd. Na základě vlivů z rešeršní části jsou poté přisouzeny trendy ve vývoji těchto parametrů. Při porovnání těchto vlivů je patrná komplexní provázanost například mezi cenou paliva a vývojem nových technologií mající vliv na spotřebu. Díky tomu se cena letu na jednoho pasažera zmenšuje, což vede ke zvyšujícímu zájmu o cestování leteckou dopravou a tedy k navyšování počtu cestujících.

Letecká doprava výrazně přispívá ke globalizaci a jako taková je velmi citlivá na veřejné mínění a celosvětové dění. Proto je důležité zajišťovat vysokou bezpečnost a spolehlivost. Těchto standardů se během let podařilo docílit, často i na úkor nehodám a lidským životům. Dnes je letectví nejbezpečnějším způsobem cestování. Se zvětšujícím se zájmem společnosti o ochranu životního prostředí, roste i tlak na leteckou dopravu. Vzniká řada technologií a nových konstrukcí, které mají za cíl snižovat dopady na životní prostředí.

Do budoucna lze očekávat nástup nových generací letadel. Původně byl nástup odhadován na rok 2030 až 2040, nicméně současná pandemie COVID-19 bude mít velké dopady na letectví. Na více než rok výrazně omezila leteckou dopravu, řada provozovatelů pocítila značný úpadek, často i krach. Kvůli tomu je pravděpodobné, že řada vyvíjených projektů se odloží nebo pozdrží, neboť vývoj technologií je nákladná záležitost. Výrobci budou méně riskovat a investovat do vývoje, čímž dojde k odsunu. Na druhou stranu pandemie urychlila odpis starších letadel, u kterých se dopravcům nevyplatilo provádět údržbu, když byla dlouhodobě neprovozovaná a zakonzervovaná. Tím pádem dojde k výměně starších modelů, které měly menší efektivitu, za nové.

Letectví vlivem mnoha předpisů a opatření velmi pomalu zavádí změny, ať už se jedná o konstrukci letadel, postupy či pozemní techniku. Proto by bylo vhodnější začít s konstrukčními změnami, které významně neovlivní postupy a bezpečnost během letu. Ze zmiňovaných palivových technologií má největší potenciál přechod na alternativní palivo vodík. Spalovací motory, které by využívaly k pohonu vodík, lze přirovnat k přechodu z pístových motorů na turbovrtulové v 50. letech. Princip a konstrukce je podobná a neměla by takový dopad na bezpečnost jako přechod na palivové články, s kterými nejsou žádné zkušenosti z provozu. Největším problémem by tak bylo zařídit infrastrukturu a pravidelnou dodávku paliva. Podobnosti v procesu doplňování paliva mezi vodíkem a petrolejem by mohly usnadnit přechod mezi novým a starým procesem, vodík by ovšem vyžadoval jiná potrubí, skladování a potenciálně odlišné teploty kapaliny.

Využití elektrického pohonu brání řada technologických problémů. Největší je zajištění dostatečné dodávky elektrické energie po celou dobu letu. To by se současnou úrovní baterií byl problém, proto největší potenciál má využití hybridních motorů. Čistě elektrický pohon by mohl najít uplatnění v malém letectví na velmi krátké tratě.

Využití nových konstrukcí skýtá řadu nástrah. Konstrukce samokřídla by vyžadovala nové postupy, přeškolení pilotů a předpokládaná vysokokapacitní letadla by měla takové rozpětí, že mnoho letišť by musela měnit svoji infrastrukturu. Proto je nejzajímavějším řešením konstrukce využívající dvojitý tubus. Konstrukce by poskytovala přídavný vztlak, navýšila kapacity pasažérů a zároveň by výrazně neovlivnila současné postupy.

Nejsnadnější způsoby šetření jsou v samotném provozování. Například k velkým spotřebám paliva dochází na zemi během pojíždění a čekání na povolení ke vzletu. Řešením může být pojíždění na jeden motor, budoucí použití technologie wheeltug, a pokročilejší navigace na zemi pro zkrácení dob mezi vzlety. Během letu to je létání ve vyšších letových hladinách, využívání vhodných meteorologických podmínek a metoda plynulého klesání na přistání. V rámci provozu je možných mnoho cest k šetření nákladů, které využívají nízkonákladový dopravci.

Současná krize, i když tvrdě zasáhla leteckou dopravu, zároveň posunula letectví novým směrem. Dopravci se museli přizpůsobit novým podmínkám, aby zvládli krizi. Během roku 2020 se nebe nad Evropou pročistilo, osobní doprava byla minimální a dopravci začali letadla využívat k nákladní dopravě, která v tu dobu tvořila naprostou většinu letů. Řada starších typů letadel byla odepsaná, neboť dopravcům by se nevyplatilo konzervovat je na dobu neurčitou. V současné době opět roste zájem o leteckou dopravu, jestli se ale vrátí do hodnot jako před pandemií je nejisté. Řada firem se během pandemie naučila pracovat vzdáleně, využívajíc ke komunikaci moderní technologie. Proto by pravidelné lety, které využívali obchodní cestující, mohly mít problém naplnit kapacity. Je pravděpodobné, že dojde ke zvýšení cen v ekonomické třídě a tím pádem klesne i poptávka. To se již dnes snaží některé aerolinky změnit a nabízejí komfortnější lety. Například aerolinie Lufthansa začala nabízet 3 sedadla jako lehátko za příplatek na dálkových trasách nebo nově nabízí speciální program Pay-as-you-fly pro velké firmy, s kterým odpadá nutnost zakoupení letenky předem a zjednodušuje změny.

Letecká doprava je tak komplexní a složitá, že je obtížné vypořádat jednotlivé vlivy. Jednotlivé aspekty podléhají více vlivům a ovlivňují se navzájem. Přesto lze vypořádat jeden společný vliv, kterému podléhá nejen letecká doprava. Ekonomický vliv působí nejsilněji ze všech. Cíl každé společnosti je přežít a být zisková. V letecké dopravě vládne silná konkurence a náklady na fungování jsou vysoké. Zároveň se začíná projevat, co je ekologické je i ekonomické. Ekologický tlak působí na nižší spotřebu a zároveň snižuje emisní poplatky.

POUŽITÉ INFORMAČNÍ ZDROJE

- [1] *Evolution of international aviation.*, rozšířené vydání. Aldershot: Ashgate, 2003. ISBN 07-546-3785-9.
- [2] NĚMEČEK, Václav. *Civilní letadla.*, rozšířené vydání. Praha: Nakladatelství dopravy a spojů, 1981. Knižnice letecké dopravy. ISBN 07-546-3785-9.
- [3] NĚMEČEK, Václav. *Civilní letadla: dopravní letadla s turbovrtulovými a proudovými motory.* Praha: NADAS, 1981. Knižnice letecké dopravy. ISBN 31-012-81.
- [4] PRUŠA, Jiří. *Svět letecké dopravy.* Praha: Galileo CEE Service ČR, 2007. ISBN 978-80-239-9206-9.
- [5] PRUŠA, Jiří, Martin BRANDÝSKÝ, Luboš HLINOVSKÝ, Jiří HORNÍK, Michal PAZOUREK, František SLABÝ, Marek TŘEŠŇÁK a Jiří ŽEŽULA. *Svět letecké dopravy.* II., rozšířené vydání. Praha: Galileo Training, 2015. ISBN 978-80-260-8309-2.
- [6] Řízení letového provozu ČR. [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.rlp.cz/spolecnost/profil/Stranky/historie.aspx>
- [7] *ETOPS Simple flying.* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/what-are-etops-rules/>
- [8] *Letecká doprava v ČR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://is.muni.cz/th/wg8v3/text_finalni.txt?studium=282101;vysl=19055
- [9] *History of Aviation-A Short Review* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.researchgate.net/publication/317056911_History_of_Aviation-A_Short_Review
- [10] *Fuel efficiency of commercial aircraft* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.transportenvironment.org/sites/te/files/media/2005-12_nlr_aviation_fuel_efficiency.pdf
- [11] *Effects of Novel Coronavirus (COVID-19) on Civil Aviation* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.icao.int/sustainability/Documents/COVID-19/ICAO_Coronavirus_Econ_Impact.pdf
- [12] *Historical Crude Oil Prices* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://inflationdata.com/articles/inflation-adjusted-prices/historical-crude-oil-prices-table>
- [13] *Vývoj osobní letecké dopravy v závislosti na ekonomických ukazatelích s dopadem na cestující* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.grantjournal.com/issue/0101/PDF/0101skolilova.pdf>

- [14] Cena ropy v roce 2021. <https://www.lynxbroker.cz/vzdelavani/cena-ropy/> [online]. [cit. 2021-5-13].
- [15] LCC capacity in Europe set for half a billion seats in 2018. <https://www.anna.aero/2018/07/18/lcc-capacity-in-europe-set-for-half-a-billion-seats-in-2018/> [online]. [cit. 2021-5-13].
- [16] *Analýza vývoje ceny leteckého paliva* [online]. Praha, 2014 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/64084/F6-DP-2014-Kusova-Beata-Analyza_cen_leteckeho_paliva.pdf?sequence=1&isAllowed=y. Diplomová práce. ČVUT.
- [17] *NÍZKONÁKLADOVÉ LETECKÉ SPOLEČNOSTI NA ČESKÉM TRHU* [online]. Olomouc, 2016 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://theses.cz/id/qd60ve/Aneta_Muchov_-_Bakal_sk_prce.pdf. Bakalářská práce. Univerzita Palackého Olomouc.
- [18] *Socio-economic and demographic factors that contribute to the growth of the civil aviation industry*, *Procedia Manufacturing, Volume 19* [online]. 2018, , 9 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2351978918300027>
- [19] *Worries about new composite made airplane* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.1001crash.com/index-page-composite-lg-2.html>
- [20] JANČÁŘ, Josef. *Úvod do materiálového inženýrství polymerních kompozitů*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2003. ISBN 80-214-2443-5.
- [21] *A Survey of Aircraft Materials: Design for Airworthiness and Sustainability* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/311750391_A_Survey_of_Aircraft_Materials_Design_for_Airworthiness_and_Sustainability
- [22] *Vývoj používání materiálů pro letadlové konstrukce* [online]. Ostrava, 2013 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://core.ac.uk/download/pdf/17306437.pdf>. Bakalářská práce. VŠB.
- [23] MOIR, Ian a A. G. SEABRIDGE. *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. Reston: AIAA American Institute of Aeronautics, 2001. ISBN 15-634-7506-5.
- [24] *THE EVOLUTION OF FLIGHT CONTROL SYSTEMS* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/286926246_THE_EVOLUTION_OF_FLIGHT_CONTROL_SYSTEMS_TECHNOLOGY_DEVELOPMENT_SYSTEM_ARCHITECTURE_AND_OPERATION

- [25] *MOTIVACE K TERORISMU A VÝCHODISKA BOJE S NÍM* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.mocr.army.cz/mo/obrana_a_strategie/1-2005cz/parizkova.PDF
- [26] *Únos Boeingu 727 v roce 1971* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://cs.istanbulbear.org/den-kuper-d-b-kuper-ugon-samol-ta-boeing-v-godu-5724>
- [27] Fatal Accidents Per Year 1946-2019. *Aviation Safety Network* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aviation-safety.net/statistics/>
- [28] Accident Overview Air Transat 236. *Federal Aviation Administration* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://lessonslearned.faa.gov/ll_main.cfm?TabID=2&LLID=73&LLTypeID=2
- [29] Air Transat 236. *Aviation Chief* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.aviationchief.com/air-transat-236.html>
- [30] METODICKÁ SMĚRNICE PRO PŘÍPRAVU A ORGANIZACI ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD A INCIDENTŮ V CIVILNÍM LETECTVÍ. *ÚSTAV PRO ODBORNÉ ZJIŠŤOVÁNÍ PŘÍČIN LETECKÝCH NEHOD* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://uzpln.cz/upload/Pov%C4%9B%C5%99en%C3%AD/P%C5%99edpisy/METODICK%C3%81%20SM%C4%9ARNICE%20LN%20BRO%C5%BDURA%20%5B3.0%5D\(1\).pdf](https://uzpln.cz/upload/Pov%C4%9B%C5%99en%C3%AD/P%C5%99edpisy/METODICK%C3%81%20SM%C4%9ARNICE%20LN%20BRO%C5%BDURA%20%5B3.0%5D(1).pdf)
- [31] Přírodní katastrofy. *Svět geologie* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.geology.cz/svet-geologie/poznej-geologii/geologicka-temata/prirodni-katastrofy>
- [32] SOUKOP, R. Vliv vulkanického popela na leteckou dopravu. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2012. 108s. Vedoucí diplomové práce Ing. Jiří Chlebek, Ph.D.
- [33] Ash-cloud of April and May 2010: Impact on Air Traffic. *EUROCONTROL* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/sites/default/files/article/attachments/201004-ash-impact-on-traffic.pdf>
- [34] Předpis L16; Ochrana životního prostředí. *Řízení letového provozu* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://aim.rlp.cz/predpisy/predpisy/index.htm>
- [35] Annex 1 to 18; The Convention on International Civil Aviation. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.skybrary.aero/bookshelf/books/3370.pdf>
- [36] *Hluková problematika přiletových tratí* [online]. Praha, 2018 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://dspace.cvut.cz/bitstream/handle/10467/77338/F6-DP-2018-Kotvaldova-Tereza->

- Hlukova%20problematika%20priletovych%20trati.pdf?sequence=-1&isAllowed=y.
Diplomová práce. ČVUT.
- [37] *Aerodynamic Noise Reduction Using Active Flow Control Techniques* [online]. , 7 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/309310979_Aerodynamic_Noise_Reduction_Using_Active_Flow_Control_Techniques
- [38] NASA chce snížit spotřebu, emise a hluk letadel civilního letectví. *Aeroweb* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aeroweb.cz/clanky/4577-nasa-chce-snit-spotrebu-emise-a-hluk-letadel-civilniho-letectvi>
- [39] *Aircraft Noise Reduction Technology and Airport Noise Analysis for General Aviation Revitalization* [online]. , 16 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/281869714_Aircraft_Noise_Reduction_Technology_and_Airport_Noise_Analysis_for_General_Aviation_Revitalization
- [40] Noise Control. *Purdue* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/basics/noise.html>
- [41] CO2 EMISSIONS FROM COMMERCIAL AVIATION. *ICCT* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://theicct.org/sites/default/files/publications/CO2-commercial-aviation-oct2020.pdf>
- [42] Aviation and the Global Atmosphere. *Grida* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.grida.no/climate/ipcc/aviation/index.htm>
- [43] Can WheelTug, A Driveable Aircraft Nosewheel, Save Airlines Money? *Forbes* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.forbes.com/sites/michaelgoldstein/2020/09/11/can-wheeltug-a-driveable-aircraft-nosewheel-save-airlines-money/?sh=1a9edc10eb4b>
- [44] Analysis of Aircraft Fuel Burn and Emissions in the Landing and Take Off Cycle using Operational Data. *ICRAT* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.icrat.org/icrat/seminarContent/Author/Yashovardhan%20SushilChati842/641-cfp-Chati.pdf>
- [45] Four-dimensional trajectory data: a pathway to decarbonisation. *SESAR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sesarju.eu/news/four-dimensional-trajectory-data-pathway-decarbonisation>
- [46] Continuous descent operations. *SESAR* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: [https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol11%2001%20CN%20Solution%2011%20Continuous%20Descent%20Operations%20\(CDO\).pdf](https://www.sesarju.eu/sites/default/files/documents/solution/Sol11%2001%20CN%20Solution%2011%20Continuous%20Descent%20Operations%20(CDO).pdf)
- [47] Aircraft Technology Roadmap to 2050. *IATA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.iata.org/contentassets/8d19e716636a47c184e7221c77563c93/technology20roadmap20to20205020no20foreword.pdf>

- [48] Aircraft Aerodynamic Boundary Layers. *Sciencedirect* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/riblets>
- [49] The most efficient winglet on any airplane. *Boeing* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <http://www.boeing.com/commercial/737max/737-max-winglets/>
- [50] DANĚK, Milan. *Aerodynamika a mechanika letu pro piloty a techniky*. Praha: Naše vojsko, 1958. Knižnice letectví (Naše vojsko).
- [51] Advance and UltraFan. *Rolls-Royce* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/media/our-stories/innovation/2016/advance-and-ultrafan.aspx#solution>
- [52] *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-aircraft-engines.com/innovation-0>
- [53] SAFRAN AND AVIATION'S ELECTRIC FUTURE. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.safran-group.com/sites/group/files/dp_safran_bourget_2019_safran_and_aviations_electric_future_en.pdf
- [54] Horten Ho 229. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Horten_Ho_229
- [55] How sweet the future of aviation. *Boenig* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2017/feature-technical-sugar.page>
- [56] BOX WING FUNDAMENTALS – AN AIRCRAFT DESIGN PERSPECTIVE. *HAW* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.fzt.haw-hamburg.de/pers/Scholz/Airport2030/Airport2030_PUB_DLRK_11-09-27.pdf
- [57] Cost-Driven Design of a Large Scale X-Plane. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/312041238_Cost-Driven_Design_of_a_Large_Scale_X-Plane
- [58] Shape Memory Alloy in Various Aviation Field. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273499103_Shape_Memory_Alloy_in_Various_Aviation_Field
- [59] SMA Actuators for Morphing Wings. *ScienceDirect* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/273499103_Shape_Memory_Alloy_in_Various_Aviation_Field

- [60] Open Rotor. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/node/16322?button=1&index=0>
- [61] Open Rotor. *Safran* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.safran-group.com/media/what-does-future-hold-store-open-rotor-20190328>
- [62] *Centreline* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.centreline.eu/wp-content/uploads/2019_CENTRELINE_Policy_Makers_Workshop_Brussels.pdf
- [63] CONCEPT VALIDATION STUDY FOR FUSELAGE WAKE-FILLING PROPULSION INTEGRATION. *ICAS* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.icas.org/ICAS_ARCHIVE/ICAS2018/data/papers/ICAS2018_0342_paper.pdf
- [64] NASA Electric Propulsion System Studies. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20160009274/downloads/20160009274.pdf>
- [65] B-2-Spirit. *Northropgrumman* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.northropgrumman.com/wp-content/uploads/B-2-Spirit-of-Innovation.pdf>
- [66] Airbus reveals its blended wing aircraft demonstrator. *Airbus* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/02/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator.html>
- [67] MAVERIC. *Aero-mag* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aero-mag.com/airbus-reveals-its-blended-wing-aircraft-demonstrator/>
- [68] Airbus and Rolls-Royce cancel E-Fan X hybrid-electric RJ100 experiment. *FlightGlobal* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/air-transport/airbus-and-rolls-royce-cancel-e-fan-x-hybrid-electric-rj100-experiment/138067.article>
- [69] Aviation Renaissance: NASA Advances Concepts for Next-gen Aircraft. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/feature/aviation-renaissance-nasa-advances-concepts-for-next-gen-aircraft>
- [70] Single-aisle Turboelectric Aircraft with Aft Boundary-Layer Propulsion. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/>
- [71] Wright Electric Begins 1.5 mW Engine Development Program for 186-Seat Commercial Airliner. *AviationToday* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aviationtoday.com/2020/01/30/wright-electric-begins-1-5-mw-engine-development-program-186-seat-commercial-airliner/>
- [72] EasyJet ‘electric aircraft’ partner aims to fly engine in 2023. *FlightGlobal* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.flightglobal.com/programmes/easyjet-electric-aircraft-partner-aims-to-fly-engine-in-2023/136456.article>

- [73] Beauty of Future Airplanes is More than Skin Deep. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.nasa.gov/topics/aeronautics/features/future_airplanes.html
- [74] NASA N3-X. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/20150002081/downloads/20150002081.pdf>
- [75] *FOCUS* [online]. , 28 [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.google.com/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=&ved=2ahUK EwiO1tz23rnuAhUk_SoKHQayDV0QFJA AegQIAxAC&url=https%3A%2F%2Fwww.rolandberger.com%2Fpublications%2Fpublication_pdf%2Froland_berger_hydrogen_the_future_fuel_for_aviation.pdf&usg=AOvVaw3FdeDN1OyuSx0UzTxR4x6m
- [76] AVIATION FUEL EVOLUTION: A REVIEW. *ASECU* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: http://www.asecu.gr/files/13th_conf_files/The-Aviation-Fuel-Evolution-A-Review.pdf
- [77] Liquid hydrogen as a potential low-carbon fuel for aviation. *IATA* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.iata.org/contentassets/d13875e9ed784f75bac90f000760e998/fact_sheet7-hydrogen-fact-sheet_072020.pdf
- [78] A review on alternative fuels in future energy system. *ResearchGate* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/341681937_A_review_on_alternative_fuels_in_future_energy_system
- [79] Review of Alternative Fuel Initiatives for Leaded Aviation Gasoline (AVGAS) Replacement. *AIDIC* [online]. [cit. 2021-5-13]. Dostupné z: <https://www.aidic.it/cet/18/63/030.pdf>
- [80] How Many DC-3 Are Still Flying? *SimpleFlying* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://simpleflying.com/dc-3-operation/>
- [81] Point-to-Point versus Hub-and-Spoke Networks. *TransportGeography* [online]. [cit. 2021-5-14]. Dostupné z: <https://transportgeography.org/contents/chapter2/geography-of-transportation-networks/point-to-point-versus-hub-and-spoke-network/>
- [82] Outside the Box, Sort of. *NASA* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://www.nasa.gov/content/outside-the-box-sort-of>
- [83] Flightpath 2050. *European Commission* [online]. [cit. 2021-5-17]. Dostupné z: <https://ec.europa.eu/transport/sites/transport/files/modes/air/doc/flightpath2050.pdf>
- [84] ZUBRVALČÍK, Jan. *Historie civilního letectví 1970-2000* [online]. Brno, 2019 [cit. 2021-05-14]. Dostupné z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117360>.

- Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav.
- [85] *Ochrana životního prostředí* [online]. [cit. 2021-5-21]. Dostupné z: https://is.muni.cz/el/law/podzim2017/MVV230K/um/Zivotni_prostredi_v_pravu_civilniho_letectvi.pdf
- [86] The History of ICAO and the Chicago Convention. *ICAO* [online]. [cit. 2021-7-8]. Dostupné z: <https://www.icao.int/about-icao/History/Pages/default.aspx>
- [87] What we do. *EUROCONTROL* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/about-us>
- [88] About ECAC. *ECAC* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://www.ecac-ceac.org/about-ecac>
- [89] *EASA* [online]. [cit. 2021-7-16]. Dostupné z: <https://www.easa.europa.eu/the-agency/faqs/agency>
- [90] About us. *IATA* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.iata.org/en/about/>
- [91] About us. *SITA* [online]. [cit. 2021-7-19]. Dostupné z: <https://www.sita.aero/about-us/#industry-expertise>
- [92] HERRIS, Jack a Bob PEARSON. *Letadla 1. světové války 1914-1918*. 1. Praha: Svojtka & Co, 2010. ISBN 978-80-256-0505-9.
- [93] SRBA, Matěj. *Bezpečnost civilního letectví a jeho ochrana před protiprávními činy*. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117359>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Jiří Chlebek.
- [94] Extended AMAN. *Skybrary* [online]. [cit. 2021-7-29]. Dostupné z: https://www.skybrary.aero/index.php/Extended_AMAN
- [95] Fuel economy in aircraft. *Wikipedia* [online]. [cit. 2021-8-2]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Fuel_economy_in_aircraft

SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK

Zkratka	Význam
APU	Auxiliary Power Unit – Pomocná motorová jednotka
ATC	Air Traffic Control – Řízení letového provozu
ATM	Air Traffic Management
CDA	Continuous Descent Arrival – Metoda plynulého klesání
ČSL	Česká správa letišť
E-AMAN	Extended Arrival Management horizon
EASA	European Union Aviation Safety Agency – Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví
ECAC	European Civil Aviation Conference – Evropská konference pro civilní letectví
EPA	Environmental Protection Agency – Agentura pro ochranu životního prostředí
ERP	Emergency Response Plan
ETOPS	Extended-range Twin-engine Operational Performance Standards
EU	Evropská unie
EUROCONTROL	European Organisation for the Safety of Air Navigation – Evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu
FAA	Federal Aviation Administration
HDP	Hrubý domácí produkt
IATA	International Air Transport Association – Mezinárodní asociace leteckých dopravců
ICAN	International Commission for Air Navigation – Mezinárodní komise pro leteckou navigaci
ICAO	International Civil Aviation Organisation – Mezinárodní organizaci pro civilní letectví
IEA	International Energy Agency – Mezinárodní agentura pro energii
ILS	Instrumental Landing System
IVATF	International Volcanic Ash Task Force – Mezinárodní úkolová jednotka pro vulkanický popel
LCC	Low-Cost Carriers – Nízkonákladový dopravci

MIT	Massachusetts Institute of Technology
MLW	Maximum Landing Weight – Maximální přistávací hmotnost
MTOW	Maximum Take Off Weight – Maximální vzletová hmotnost
NASA	National Aeronautics and Space Administration – Národní úřad pro letectví a vesmír
NM	Nautical Mile – Námořní míle
OECD	Organizace pro hospodářskou spolupráci v Evropě
OEW	Operating Empty Weight – Operační hmotnost letadla
OPEC	Organisation of the Petroleum Exporting Countries – Organizace zemí vyvážejících ropu
OSN	Organizace spojených národů
S	Dolet
SAW	Spanwise Adaptive Wing
SESAR	Single European Sky ATM Research
SITA	Société Internationale de Télécommunications Aéronautiques – Mezinárodní sdružení pro leteckou komunikaci
SMA	Shape Memory Alloy
SUGAR	Subsonic Ultra Green Aircraft Research
TMA	Terminal Control Area – Koncová řízená oblast
ÚCL	Úřad pro civilní letectví
USA	Spojené státy americké
UTC	Coordinated Universal Time – Koordinovaný světový čas
ÚZPLN	Ústav pro odborné zjišťování příčin leteckých nehod

