



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION

ÚSTAV VÝKONOVÉ ELEKTROTECHNIKY A ELEKTRONIKY

DEPARTMENT OF POWER ELECTRICAL AND ELECTRONIC ENGINEERING

MODERNÍ TRENDY ELEKTROMOTORŮ PRO ELEKTRIFIKACI LETECKÉ DOPRAVY

MODERN TRENDS IN ELECTRIC MOTORS FOR THE ELECTRIFICATION OF AVIATION

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Oliver Alex Poul

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.

BRNO 2024

Bakalářská práce

bakalářský studijní program **Silnoproudá elektrotechnika a elektroenergetika**

Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky

Student: Oliver Alex Poul

ID: 238485

Ročník: 3

Akademický rok: 2023/24

NÁZEV TÉMATU:

Moderní trendy elektromotorů pro elektrifikaci letecké dopravy

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

1. Proveďte a sepište literární rešerši na téma více elektrická a plně elektrická letadla
2. Uveďte aplikace elektrických strojů v různých částech prostředků letecké mobility včetně kritického zhodnocení jednotlivých koncepcí z pohledu výkonu, účinnosti a ceny
3. sepište literární rešerši na téma nároků na elektrické stroje pro leteckou dopravu
4. Sepište a charakterizujte moderní trendy a vývoj elektrifikace letecké dopravy včetně konkrétních příkladů aplikace elektromotorů v Urban air mobility.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] PYRHONEN, J.; JOKINEN t.; HRABOVCOVÁ V. Design of rotating eletrical machines. John Wiley and Sons, 2007. ISBN 978-0-470-69516-6.
- [2] Juha Pyrhonen , Valeria Hrabovcova , R. Scott Semken: Electrical Machine Drives Control : An Introduction, ISBN: 9781119260455 (EN)
- [3] A. E. Fitzgerald, Ch. Kingsley, S. Umans "Electric Machinery", McGraw-Hill Companies Inc., 2003. 688 s. ISBN 0-07-112193-5

Termín zadání: 5.2.2024

Termín odevzdání: 29.5.2024

Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.

prof. Ing. Petr Toman, Ph.D.
předseda rady studijního programu

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

ABSTRAKT

Tato bakalářská práce se zabývá tématem elektrifikace letecké dopravy. Diskutuje důvody elektrifikace, její výhody či nevýhody a prezentuje nastupující trendy v tomto směru. Analyzují se různé součásti letecké dopravy, které již elektrifikované jsou, ale také ty, na které by jejich elektrifikace mohla mít pozitivní vliv.

KLÍČOVÁ SLOVA

elektrifikace letecké dopravy, elektrická letadla, elektromotory, udržitelná doprava, urban air

ABSTRACT

This bachelors thesis deals with the topic of electrification of air transport. The thesis discusses the reasons for electrification, its advantages or disadvantages and presents the emerging trends in this direction. It analyses various components of air transport that are already electrified, but also those that could be positively affected by electrification.

KEYWORDS

electrification of air transport, electric aircraft, electric motors, sustainable transport, urban air

POUL, Oliver Alex. *Koncepce a vývojové trendy elektromotorů pro elektrifikaci letecké dopravy*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, Ústav výkonové elektrotechniky a elektroniky, 2024, 82 s. Semestrální práce. Vedoucí práce: doc. Ing. Jan Bárta, Ph.D.

Prohlášení autora o původnosti díla

Jméno a příjmení autora: Oliver Alex Poul
VUT ID autora: 238485
Typ práce: Semestrální práce
Akademický rok: 2023/24
Téma závěrečné práce: Koncepce a vývojové trendy elektromotorů pro elektrifikaci letecké dopravy

Prohlašuji, že svou závěrečnou práci jsem vypracoval samostatně pod vedením vedoucí/ho závěrečné práce a s použitím odborné literatury a dalších informačních zdrojů, které jsou všechny citovány v práci a uvedeny v seznamu literatury na konci práce.

Jako autor uvedené závěrečné práce dále prohlašuji, že v souvislosti s vytvořením této závěrečné práce jsem neporušil autorská práva třetích osob, zejména jsem nezasáhl nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a/nebo majetkových a jsem si plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon), ve znění pozdějších předpisů, včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č. 40/2009 Sb.

Brno

.....

podpis autora*

*Autor podepisuje pouze v tištěné verzi.

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval vedoucímu bakalářské práce panu doc. Ing. Janu Bártovi, Ph.D. za odborné vedení, konzultace, trpělivost a podnětné návrhy k práci.

Obsah

Úvod	9
1 Více elektrická a plně elektrická letadla	10
1.1 Boeing 787	11
1.2 Airbus A380	14
1.3 Lockheed Martin F-35 Lightning II	17
1.4 Eviation Alice	21
1.5 Napájení	23
2 Elektrické stroje v letecké mobilitě	29
2.1 Auxiliary Power Unit	29
2.1.1 APU Pratt & Whitney	30
2.1.2 APU Honeywell	32
2.2 Motorové generátory	35
2.3 Aktuátory	37
2.4 Elektrické brzdy	40
2.5 Hlavní druhy motorů využívaných v letectví	41
2.5.1 Synchronní stroj	42
2.5.2 Asynchronní stroj	43
2.5.3 Stejnoseměrný stroj	44
2.5.4 Srovnání jednotlivých motorů	45
3 Nároky na elektrické stroje v letectví	47
3.1 DO-160G	47
3.1.1 Oddíl 4.0 - Teplota a nadmořská výška	47
3.1.2 Oddíl 5.0 - Kolísání teploty	48
3.1.3 Oddíl 6.0 - Vlhkost	49
3.1.4 Oddíl 7.0 - Provozní otřesy a bezpečnost při nárazu	49
3.1.5 Oddíl 8.0 - Vibrace	49
3.1.6 Oddíl 10.0 - Voděodolnost	50
3.1.7 Oddíl 11.0 - Citlivost na kapaliny	50
3.1.8 Oddíl 12.0 - Prach a písek	51
3.1.9 Oddíl 13.0 - Odolnost proti plísňím	51
3.1.10 Oddíl 14.0 - Solná mlha	51
3.1.11 Oddíl 15.0 - Magnetismus	51
3.1.12 Oddíl 16.0 - Příkon	52
3.1.13 Oddíl 17.0 - Přepětí	52

3.1.14	Oddíl 18.0 - Vodivost zvukové frekvence - Napájecí vstupy . . .	53
3.1.15	Oddíl 19.0 – Citlivost na indukované signály	53
3.1.16	Oddíl 20.0 – Citlivost na rádiové frekvence	53
3.1.17	Oddíl 21.0 – Emise radiofrekvenční energie	54
3.1.18	Oddíl 22.0 – Citlivost na přechodné jevy vyvolané bleskem . . .	54
3.1.19	Oddíl 23.0 – Přímé vlivy blesku	54
3.1.20	Oddíl 24.0 – Námraza	55
3.1.21	Oddíl 25.0 – Elektrostatický výboj	55
3.1.22	Oddíl 26.0 – Oheň a hořlavost	56
4	Budoucnost elektrifikace letecké dopravy	57
4.1	Předpokládaný vývoj	57
4.1.1	Vývoj letadel a technologií	60
4.2	eVTOL	61
4.2.1	Analýza konkurenceschopnosti letadel eVTOL	64
	Závěr	67
	Literatura	71
	Seznam symbolů a zkratk	82

Úvod

Elektrifikace je ve společnosti stále hlasitějším tématem a od začátku 21. století se dotkla již mnoha odvětví. Jedním z nejvíce diskutovaných odvětví je právě doprava, kde využití elektrické energie nahrazuje fosilní paliva. I přestože se elektrifikaci letecké dopravy nedostává takové mediální pozornosti, moderní letadla taktéž znamenala velký pokrok. Hlavními průkopníky mezi elektrifikovanými komerčními letadly jsou Airbus A380 a Boeing 787, v armádním sektoru se pak jedná o letoun F-35. [1]

Hlavním důvodem nahrazování fosilních paliv elektrickými alternativami je snížení uhlíkové stopy, která je dle publikace [2] z 2-2,5% tvořena leteckou dopravou. Důležitou roli však hraje i potenciální snížení provozních nákladů. Letadla ke svému provozu využívají nespočet mechanických, hydraulických a pneumatických systémů, které jsou nejen velikostí mnohem větší, ale také mnohem těžší než již dostupné elektrické alternativy. Elektrické systémy mohou být použity například jako náhrada palivových čerpadel, ovládání klapky nebo protinámrazových ochrany. Každý ušetřený kilogram hmotnosti se zásadně promítne do spotřeby letadla a ušetří provozovatelům desítky tisíc korun na provozu.

Přestože fosilní paliva se u žádného typu letadel využívaného k rozsáhlé komerční dopravě nepodařilo zcela nahradit elektrickými pohony, plně elektrické modely jsou již ve vzduchu. Mezi průkopníky v této oblasti letadel je kupříkladu společnost Eviation Aircraft, která se se svým plně elektrickým modelem Alice jako první vydala na trh a okamžitě zaregistrovala objednávky. [3]

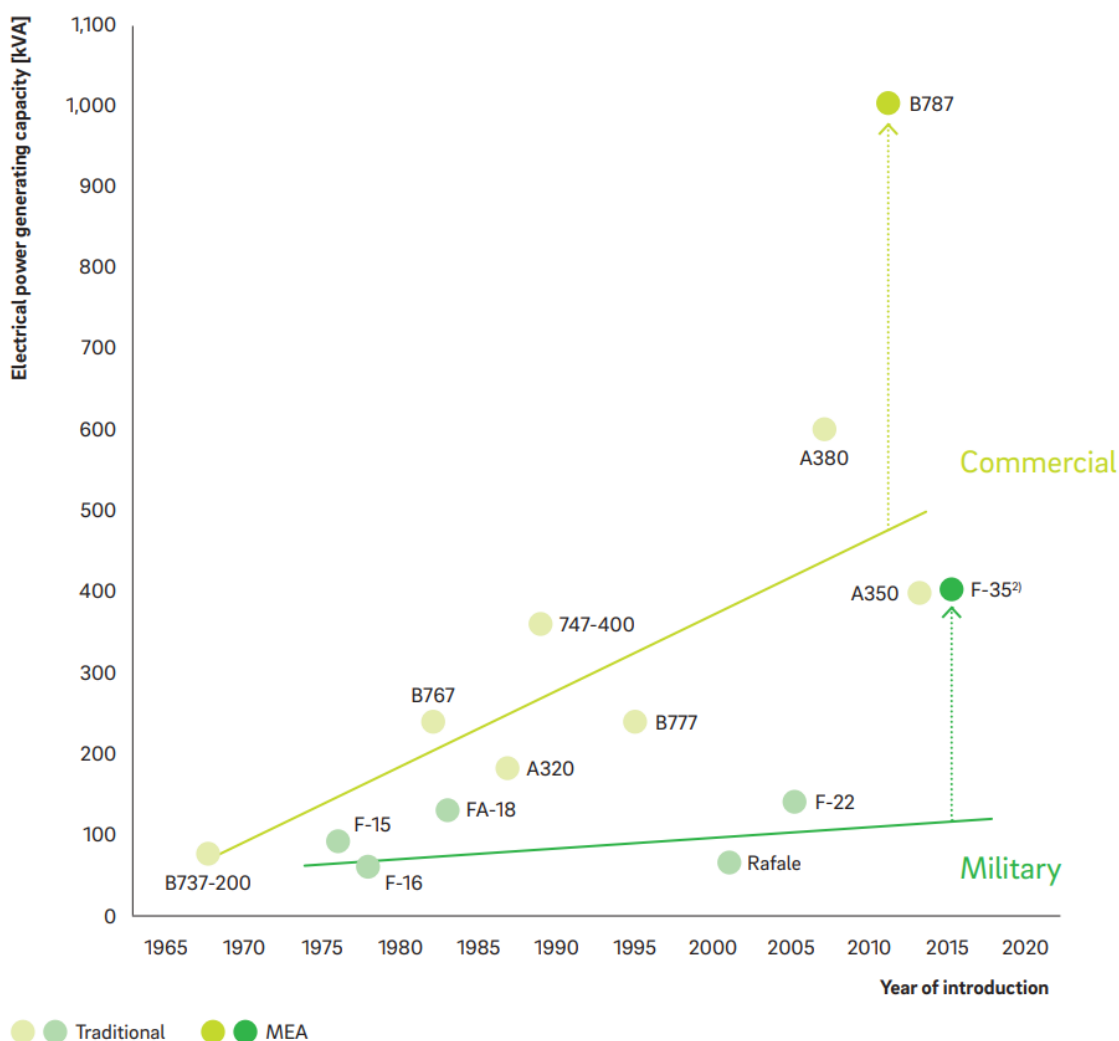
Tato práce má za cíl seznámit čtenáře se současným vývojem letectví směrem k udržitelnější budoucnosti. Ať již se jedná o specifické letouny, které dláždí cestu elektrifikaci letectví nebo přímo jednotlivé elektrické stroje, jež jsou v letadlech využívány a svými vlastnostmi vylepšují kvalitu provozu a zvláště také provozní náklady.

1 Více elektrická a plně elektrická letadla

Pro pochopení řešené problematiky je nutné si na začátek správně definovat jednotlivé pojmy.

Plně elektrické letadlo je bezemisní a jeho pohon je čistě elektrický. Většina jeho mechanických, hydraulických a pneumatických systémů je nahrazena elektrickými alternativami.

Více elektrické letadlo je stále poháněno systémem využívajícím fosilní palivo, avšak jeho zbylé systémy jsou do značné míry elektrifikované. Za dodávky výkonu elektrickým částem letadla je zodpovědný motorem řízený generátor. Mezi více elektrická letadla řadíme například největší civilní letadlo současnosti Airbus A380 nebo konkurenční Boeing 787 jak lze vidět na obrázku 1.1 kde jsou porovnány více elektrická letadla s jejich předchůdci dle výroby elektrické energie.



Obr. 1.1: Porovnání kapacity generátorů více elektrických a klasických letadel [1]

Jak zmiňuje zdroj [4], při porovnání více elektrických letadel s jejich silniční alternativou v podobě elektromobilů nebo hybridních automobilů zjistíme, že u automobilů je pohonný systém napájen z baterie za použití DC/DC měniče transformující napětí na požadovaných 12V, naopak více elektrická letadla využívají spalování leteckého paliva v proudových motorech jak k letu, tak k výrobě elektrické energie.

1.1 Boeing 787

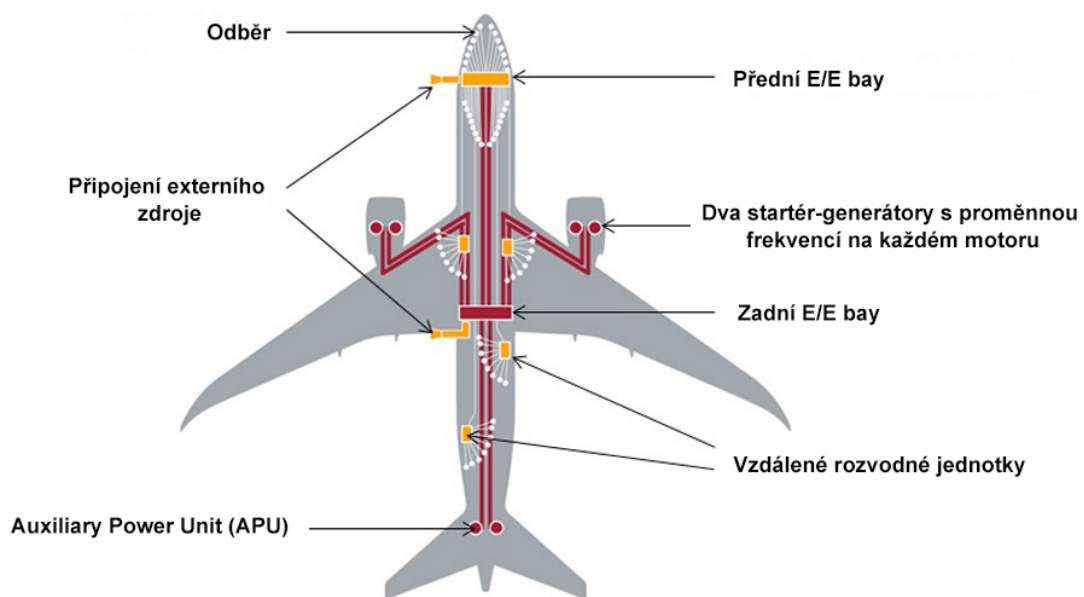
V roce 2007 [5] vyrobila americká společnost Boeing letoun, který se stal pravým průkopníkem v elektrifikaci letecké dopravy (Obr. 1.2). Zdroj [4] uvádí, že toto letadlo nesoucí modelové označení B787 je dodnes nejvýkonnějším letadlem co se výroby elektrické energie týče. Disponuje dvěma hlavními motory o výkonech 250kVA doplněné o 2 variable frequency (VF) generátory o výkonech 250kVA. K tomu má navíc 2 pomocné Auxiliary Power Unit (APU) generátory, každý o výkonu 225kVA.



Obr. 1.2: Boeing 787 za letu [6].

V textu [4] lze najít rozdíly v elektrickém systému mezi klasickými letadly a právě B787. Klasická letadla generují elektřinu na napěťové hladině $115V_{ac}$ při frekvenci 400Hz ve 3 fázích. Oproti nim dokáže B787 vyrábět elektrickou energii, při napětí $230V_{ac}$ s měnitelnou frekvencí od 360Hz do 800Hz. Pro napájení starších (nemodernizovaných) systémů se dále elektřina transformuje na $115V_{ac}$ a $28V_{dc}$ pro osvětlení. Pro napájení environmental control system (ECS), neboli klimatizačního systému, který udržuje požadovaný tlak v kabinovém prostoru a optimalizuje teplotu vzduchu pro komfort cestujících a posádky, je autotransfornátorem s usměrňovačem převeden na $270V_{dc}$.

Jak popisuje publikace [7], střídavý systém letadla má totožný levý a pravý kanál a každý má integrovaný hnací generátor poháněný přídatnou převodovkou motoru. Řídicí jednotka generátoru ovládá napětí $115V_{ac}$ a má výkon 90kVA. Pokud dojde ke ztrátě jednoho z generátorů, dojde k sepnutí dvou jističů sběrnic, které tímto obě sběrnice spojí. Navíc mohou být sběrnice napájeny jak z externího zdroje, tak i z APU přes pomocný výkonový jistič. Pokud dojde ke ztrátě pravého či levého kanálu, APU může být použita jako primární zdroj energie. Vše je ovládáno řídicí jednotkou napájecí sběrnice (BPCU - Bus Power Control Unit).



Obr. 1.3: Elektrický systém B787 [8].

Jak uvádí výrobce [8], B787 nevyžaduje ke startu žádné externí zdroje energie. Jeho soběstačnost začíná již u baterií dedikovaných pro pomocné jednotky APU umístěné na ocasu letadla (viz. Obr. 1.4). Tyto baterie napájejí generátory APU, které nastartují samotné APU. Jakmile jsou pomocné jednotky uvedeny do běhu, začínají napájet motorové generátory, které poté uvedou do běhu oba hlavní motory. Za letu se jednotek APU nevyužívá a zůstávají v záloze pro případ selhání hlavních motorů. Ve vzduchu jsou hlavním zdrojem elektrické energie čtyři generátory na motorech. Generovaný výkon přechází z generátorů do čtyř AC sběrnic, kde je dále distribuován při napětí $230V_{ac}$ nebo se dále transformuje dle potřeb ostatních systémů.

Boeing 787 má na palubě dva prostory s rozvaděči a elektronikou (E/E bay) jak lze vidět na Obr. 1.3. Jeden je umístěn na přídi pod kokpitem a druhý v trupu letadla mezi křídly. O rozvody elektřiny se stará několik rozvodných jednotek, čímž zároveň šetří hmotnost zmenšením napájecího zdroje. Většina vybavení v letadle je

napájena z příďového prostoru a z rozvodných jednotek na napěťové hladině $115V_{ac}$ a $28V_{dc}$. Rozvodné jednotky jsou tvořené polovodičovými regulátory na místo běžně používaných tepelných jističů a relé [9]. Toto provedení umožňuje B787 značně redukovat celkovou délku kabeláže, pro rozvody elektřiny a zároveň ušetřit hmotnost. Oficiální data Boeingu uvádí, že v jejich letadle je použito o 32 kilometrů méně vodičů než u předchozího modelu B767 [8]. To může v absolutní hmotnosti znamenat až řády tun.



Obr. 1.4: Auxiliary Power Unit (APU) Boeingu 787 [10].

Jednou ze zajímavých inovací, kterou se zabývá práce [9], je chybějící odvodušňovací systém (Bleed Air System), který je u klasických letadel nezbytný. Tento systém odebírá stlačený vzduch z kompresoru uvnitř motoru a je využíván systémem ECS a k chlazení avioniky. Toto řešení však negativně ovlivňuje úspornost letadla, kdy se při spalování musí chybějící vzduch kompenzovat větším množstvím vstřikovaného paliva, aby se dosáhlo stejného výkonu. Tento systém mimo jiné obsahuje mnoho přístrojů na jeho zpracování. Vzduch nejprve vstupuje přes redukční ventil, následně je ochlazen v předchlazovači a veden přes výměníky tepla, dohříváče a kondenzátory. Nahrazením tohoto systému elektronikou je Boeing 787 schopný dosahovat mnohem menší spotřeby. [11] O napájení systému, který kompenzuje absenci odvodušňovacího systému se starají čtyři autotransformátory s usměrňovači, které převádí základní napětí $230V_{ac}$ vyráběné generátory na $270V_{dc}$. Toto napětí je nezbytné k napájení

motorů s nastavitelnými otáčkami hydraulických čerpadel, kompresorů, které tlakují kabinu a systémů výroby dusíku.

Dle slov společnosti Boeing [8], bylo bezpečnosti jejich letadla věnováno důkladné pozornosti, a nejen že byly jednotlivé prvky navrhovány tak aby neselhaly, ale přistoupilo se i k možnosti, že selhají a dále byli přizpůsobovány k maximální možné bezpečnosti. Například každý důležitý systém v letadle je duplikován, což znamená že při selhání se pouze uvede v provoz jeho záložní alternativa a letadlu nehrozí stav kritického ohrožení a není ani nuceno předčasně přistát. Dále jsou od sebe systémy odděleny dle funkcí a zároveň dostatečným prostorem, aby selhání jednoho neohrozilo další. Funkčnost jak bezpečnostních opatření, tak i zbytku letadla byla ověřena v programech sestávajících z 5000 testovacích hodin na zemi i ve vzduchu. B787 získal nejkompletnější certifikaci, kterou kdy Federální letecký úřad Spojených států amerických (FAA) provedl. V případě elektrických systémů Boeing demonstroval, že B787 dokáže letět přes 330 minut pouze s jedním motorem a jedním ze šesti generátorů a bezpečně přistát.

1.2 Airbus A380

Francouzská společnost Airbus představila v roce 2005 [12] dosud největší civilní letadlo s označením A380 (Obr. 1.5). Na dvoupatrové palubě je místo pro 555 cestujících při rozdělení do tří kategorií (economy, bussines, first) nebo 853 cestujících v případě pouze ekonomické konfigurace. Kolosální stroj, který trhal rekordy však nikdy nenaplnil svůj potenciál jak z pohledu Airbusu, tak i jejich provozovatelů.



Obr. 1.5: Airbus A380 za letu [13].

Zdroj [4] říká, že A380 bylo prvním větším civilním letadlem, které do svého systému integrovalo VF generátor. Stejně jako Boeing 787 má A380 čtyři tyto generátory, které operují při frekvenci od 370Hz do 770Hz doplněné o dvě APU jednotky s frekvencí 400Hz. Generátorový výkon je však tím zásadním činitelem, který posouvá B787 daleko před A380. Motorové generátory A380 mají každý výkon 150kVA a APU má každá výkon 120kVA. Dohromady tak A380 ztrácí na B787 610kVA ze všech dostupných zdrojů. V případě napájení z externího zdroje má o jednu přípojku více než B787 (4). Mezi hlavní odběry výkonu se řadí palubní osvětlení s přibližným výkonem 15kVA, provoz kuchyně 120-240kVA, chlazení kuchyně 90kVA a letový zábavní systém (ovládání sedadel, sedadlové televize atd.) o výkonu 50-60kVA nebo vyjádřen jako asi 100W/sedadlo.

A380 dosahuje rozpětí křídel 79,80 metrů a na délku 72,73 metrů. Navíc k tomu se dvoupatrová paluba tyčí do výšky 24,10 metrů [14]. Těmto rozměrům muselo být uzpůsobeno celé provedení letadla. Zdroj [15] uvádí, že vertikální stabilizátory na ocase A380 jsou délkou rovny křídům A320 a horizontální stabilizátor je velký jako obě křídla A310. Ovládání takto velké plochy by vyžadovalo nadstandardní množství hydrauliky v podobě dlouhých trubek s velkým průřezem, které by minimalizovaly ztráty tlaku. Toto řešení by se však kriticky promítlo do celkové hmotnosti letadla



Obr. 1.6: Elektro-hydrostatický aktuátor Airbusu A380 [16].

a přidalo na jeho složitosti. Proto se Airbus rozhodl pro kombinaci hydraulické a elektrické energie pro řízení letu. Dle slov vedoucího oddělení pro ovládání a hydrauliku Airbusu Dominique van den Bosscheho [15] je hydraulika, která je již po dekádách v letectví využívána a dobře prozkoumána je pro řízení letu stále hlavním zdrojem energie. Avšak kvůli využití elektro-hydrostatických aktuátorů (viz. 1.6) se Airbusu podařilo efektivně oddělit kanály pro rozvod energie a zároveň ušetřit

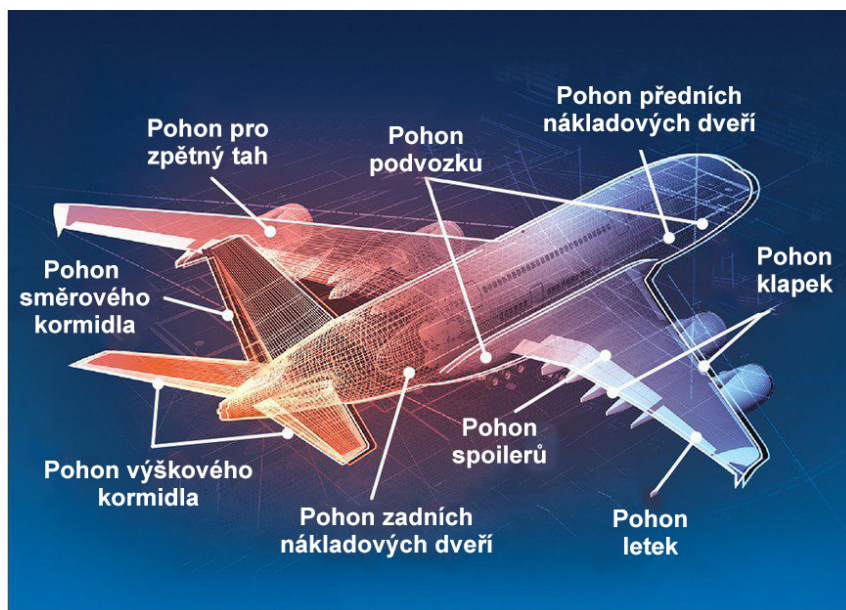
na hmotnosti. Dále zvýšení hydraulického tlaku z 3000psi (20,7MPa) na 5000psi (34,5MPa) v ostatních hydraulických obvodech také pomohlo, jak ke zmenšení součástí a redukci potrubí a kapalin, tak i ke zjednodušení samotné instalace. Michael Comes, vedoucí strojírenských systémů pro A380, říká: *"Díky odlišné architektuře [řízení letu], pokud ztratíme hydraulický výkon, letadlo neztratí žádné letové schopnosti."* Dále dodává, že kombinace hydrauliky a elektřiny umožnila ušetřit přibližně 1500kg [15].

Jak autor článku [17] uvádí, při selhání všech motorů nebo při vážné poruše elektrického systému uvede v činnost záložní zdroj, čímž je malá pístová vzduchová turbína na spodní straně křídla (RAT - Ram Air Turbine)(viz. 1.7). A380 má ke každému motorovému generátoru přiřazenou právě jednu sběrnici. Jsou značeny jako AC 1, AC 2, AC 3 a AC 4. Pokud za letu dojde ke ztrátě všech těchto sběrnic, ze spodní strany křídla se vysune tato malá turbína, která zabezpečuje dodávky elektrické energie dokud se problém na letadle nevyřeší nebo dokud letadlo nepřistane. Výrobce této turbíny [18] říká, že turbína je opatřena 70kVA generátorem, což v žádném případě nepokryje výkonové požadavky celého letadla, avšak pro napájení pouze kritických systémů je to dostačující. Turbína sestává z vrtule s průměrem 162,5cm.



Obr. 1.7: Ram Air Turbine (RAT) na Airbusu A380 [19].

Technický ředitel společnosti Thales Group, která se podílela na vývoji motorových generátorů pro A380, Pasacal Thalín uvádí [20], že jejich VF generátory jsou až čtyřikrát tak spolehlivé jako ekvivalentní fixed-frequency (FF) generátory. Zdroj [21] říká, že oproti konkurenčnímu Boeingu 787 má sice A380 čtyři hlavní proudové motory, ale na každém motoru pouze jeden generátor. Dále generátory Airbusu poskytují výstupní napětí $115V_{ac}$, což je pro letadlo jako celek výhodou, protože si



Obr. 1.8: Přehled různých aktuálních pohonů zajišťujících provoz A380 [22].

zachovalo Bleed Air System, takže není nuceno energii dále transformovat na $270V_{dc}$ jako v případě B787, který na této napěťové hladině provozuje ECS. Taktéž na B787 ztrácí, co se jednotek APU týče. B787 disponuje dvěma těmito pomocnými jednotkami, A380 má na ocase umístěnou pouze jednu. S touto znalostí lze konstatovat, že Airbus A380 je na zemi mnohem více závislý na externích zdrojích energie než Boeing 787, jelikož jeho jedna APU, která je zodpovědná za start letadla má téměř čtvrtinový výkon jako B787. To se dále promítá hlouběji do provozních nákladů. Dále se nabízí tvrzení, že ve vzduchu je A380 více závislá na leteckém palivu, jelikož chybějící elektrický výkon nemůže podpořit celkovou elektrifikaci letadla a tak má A380 mnohem více systémů stále poháněných mechanicky, hydraulicky nebo pneumaticky.

1.3 Lockheed Martin F-35 Lightning II

Elektrifikace letectví se netýká pouze komerčního sektoru, ale začal do něj vstupovat i sektor vojenský. V armádním průmyslu se však na spotřebu zásadně nedbá a zelená energie není preferována. Z toho důvodu se elektrifikace armádních letounů zaměřuje na jiné výhody elektrických zařízení oproti jejich mechanickým, hydraulickým či pneumatickým alternativám. Jedním z nich může být například značná redukce hmotnosti, která se u strojů uzpůsobených k rychlým manévřům při vysokých přetíženích může projevit jako zcela klíčová. Federální úřad pro letectví Spojených států amerických [23] uvádí, že piloti mohou být krátkodobě vystaveni přetížení až

9G (devítinásobek gravitačního zrychlení na Zemi). Když se tedy při výrobě stroje ušetří, kupříkladu 100 kg, při takovémto manévru bude ušetřená hmotnost rovna 900kg. Vycházejíce z druhého Newtonova zákona, snižováním hmotnosti se zlepšují schopnosti ke změně směru zrychlení.

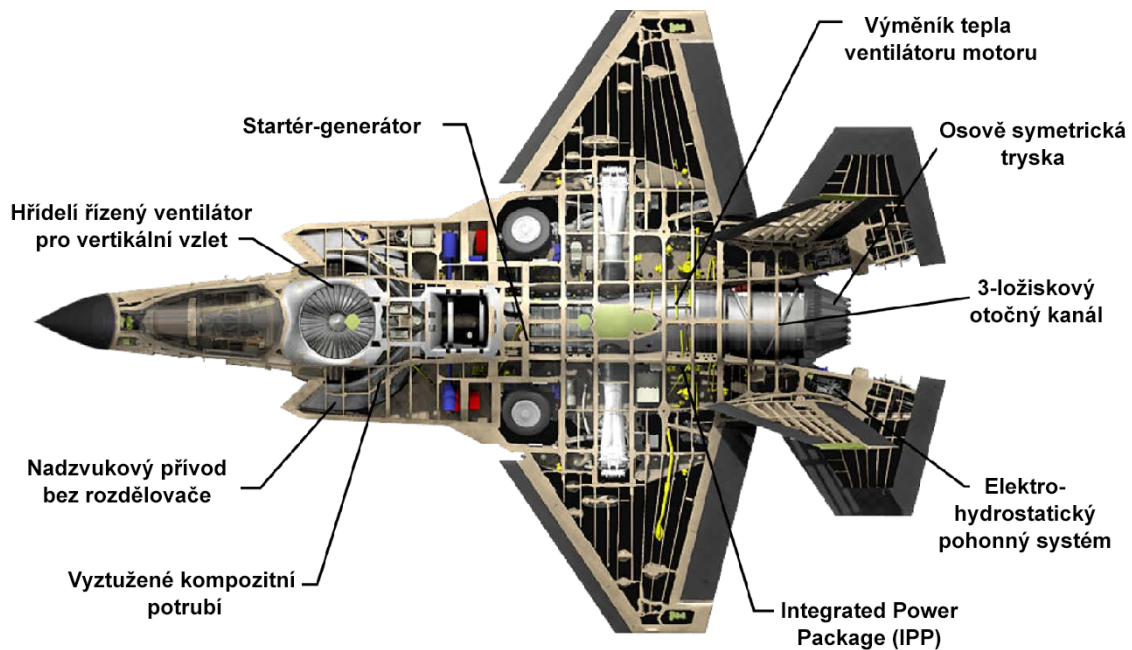


Obr. 1.9: F-35 za letu [24].

Autor [25] zmiňuje čtyři hlavní pilíře programu Joint Strike Fighter (JSF), který měl na starosti právě F-35 (Obr. 1.9). Tyto pilíře jsou: cenová dostupnost, ničivá síla, možnost podpory a schopnost přežít. Aby bylo letadlo schopno dostát záměrům výrobce, musí být opatřeno o několik klíčových vlastností:

- vysoce výkonné letové systémy, zajišťující přesnost informací a přehledů o letadle
- nejnovější letové systémy pro pozorování, diagnostiku a hlášení o zdravotním stavu letadla
- systémy spravující zdravotní data letadla, propojené s koncovým uživatelem a údržbou
- systémy analyzující zdravotní stav letadla a okamžité řešení problémů
- plně integrovaný podnikový chod, který zapojuje všechny strany podílející se na provozu letadla

V článku [26] se dozvíme, že F-35, na rozdíl od předchozích bojových letounů využívajících napětí $120V_{ac}$ při frekvenci 400Hz, pracuje primárně na napětí $270V_{dc}$. Tato radikální změna donutila vlastníky těchto letounů přebudovat celé hangáry, protože $270V_{dc}$ nelze přenášet na dlouhou vzdálenost a proto je nutné letouny napájet přímo v hangáru. Kvůli ceně vysoce kvalitní kabeláže, která kvůli riziku poškození nemůže být vedena na podlaze hangárů se začali hledat alternativní způsoby



Obr. 1.10: Pokročilé komponenty pohonného systému F-35 [27].

napájení F-35, které by zároveň nezabíraly mnoho využitelného prostoru. Jedním z jednodušších řešení je instalace stropních úchyťů či vysutých plošin kudy by kabely mohli vést. Mezi pokročilejší řešení patří servisní jáma, která mimo elektrické energie poskytuje i ostatní příslušenství k údržbě. Napájecí vodiče a hadice s kapalinami a vzduchem lze tak z podlahy vyndat, provést údržbu a stisknutím jediného tlačítka zpět pod podlahu uložit. Tyto jímky speciálně navržené pro F-35 mají hydraulické víko, které se zvedá do výšky 3 metrů a poskytuje tak komfort oproti starším, které byli opatřeny kladkou a závažím a obsluha je musela manuálně operovat.

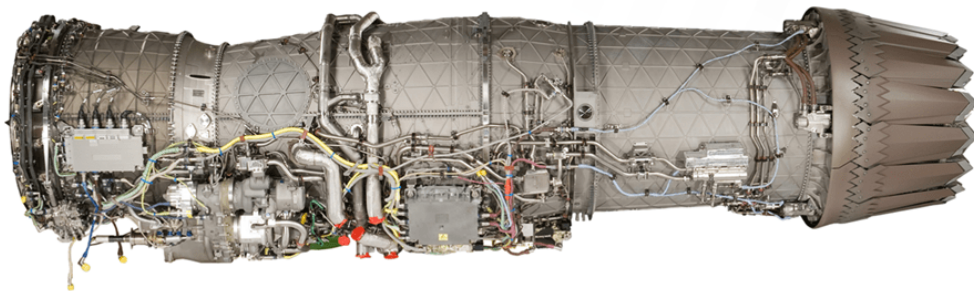
Dle slov společnosti Lockheed Martin [28] stojící za výrobou F-35 sebou první start letounu nesl úspěch přelomového integrovaného napájecího balíčku (IPP) a na motor upevněného startér-generátoru (viz. Obr. 1.10). IPP je jediný systém, který v sobě kombinuje funkce APU, ECS a systém nouzového napájení, čímž umožňuje snížení hmotnosti, přidá na spolehlivosti a zefektivní celé letadlo. Celý systém začíná u lopatkového stroje, který napájí startér/generátor a ten rozeběhne motor na mezní startovací otáčky. Jakmile se poté motor uvede do volnoběhu, startér se přesune z režimu motoru do režimu generátoru. Do série systému, které do značné míry elektrifikovali celé letadlo dále patří elektricky řízené letové řídicí plochy a systém nouzového napájení.

Dle informací zdroje [1] je F-35 generováním elektrického výkonu na úrovni Airbusu A350. Generátory na motorech obou letadel jsou schopny vyrábět výkon o velikosti 400kVA. Avšak dopravní letadlo francouzské společnosti, které váží 280 tun při maximálním dovoleném naložení [29], dokáže na jeden kilogram své hmotnosti

vyrobit 1,43VA. Naopak F-35, která při největším zatížení dosáhne hmotnosti 31,8 tun [30] vyrábí celých 12,58VA na kilogram. I přes značný velikostní deficit je F-35 schopna bez problémů dosáhnout kapacity svých tří ekvivalentních generátorů, které dohromady vyrábějí 240kW činného výkonu. K tomu slouží motor F135 (viz. Obr. 1.11) zkonstruovaný společností Pratt & Whitney schopný produkovat maximální tah 191,3kN [31].

Společnost Honeywell podílející se na produkci elektrických systémů a komponent pro F-35 uvádí [32], jak jejich práce pomohla k úspěchu celého projektu. Mezi jimi vyvinuté systémy patří:

1. Systém správy napájení a tepla
 - Téměř 500kg ušetřeno na hmotnosti
 - Zkrácení letadla o 25cm
 - Zásadně zlepšená spolehlivost a redukce provozních nákladů
2. ECS
3. Pomocné a nouzové napájení
 - APU GTS130
4. Chlazení kapalinou a kontrola odvodu vzdušného proudění
5. Řízení kontroly paliva
6. Výměníky tepla a předchlazovače ve ventilátorových kanálech
7. Palubní systém výroby kyslíku



Obr. 1.11: Motor P&W F135 pohánějící F-35 [33].

1.4 Eviation Alice

Společnost Eviation Aircraft svou činností dláždí cestu pro čistě elektrickou leteckou dopravu. Jejich plně elektrický model Alice (viz. Obr.1.12) se stal prvním takovým letadlem s místem pro pasažéry, které se dostalo do vzduchu. Tímto zároveň po dlouhé době došlo ke změně pohonného systému. Naposledy se to událo v 50. letech minulého století, kdy proudové motory nahradily motory pístové [34]. Jak zdroj dále uvádí, dle Guinnessovi knihy rekordů byla první člověkem ovládaná helikoptéra poháněna elektrickým motorem úspěšně testována 4. srpna 2011 ve Francii. Tato helikoptéra se vznesla 50cm nad zem a 2 minuty se vznášela. Dalším elektrickým letadlem, které v době provozu zažilo úspěch je Solar Impulse 2. Toto jednomístné letadlo na solární energii mezi lety 2015 a 2016 obletělo celou planetu. Z toho vy-



Obr. 1.12: Eviation Alice při prvním vzletu [35].

plývá, že i přes dlouhodobou snahu (přibližně počátek 70. let) o elektrické letadlo, které by mohlo konkurovat gigantům jako je Boeing a Airbus, se zatím nepodařilo zkonstruovat. Avšak Eviation Alice je k tomu zatím nejbližší a jejich případný úspěch na globálním měřítku by mohl odstartovat rozsáhlejší financování elektrických letadel a tím zároveň i pokrok v tomto směru.

Izraelská společnost stojící za modelem Alice se zatím orientuje spíše na způsob dopravy známý jako Urban Air, který spočívá v dopravě osob či nákladu v rámci jednotlivých měst či bližšího okolí. Alice je totiž oproti letadlům s proudovými motory limitována doletovou vzdáleností 250 námořních mil (463km) s rezervní energií na dalších 30 minut letu. I přesto však článek [34] informuje o okamžitém projeveném zájmu dopravní společností CapeAir operující na východním pobřeží a středo-západě

USA a v Portoriku. Ta má v plánu zařadit Alice do provozu ke konci roku 2023. Jak uvádí přímo CapeAir [36], byla podepsána dohoda o dohodě budoucí (Letter of Intent) na 75 kusů Eviation Alice uzpůsobených pro přepravu osob.

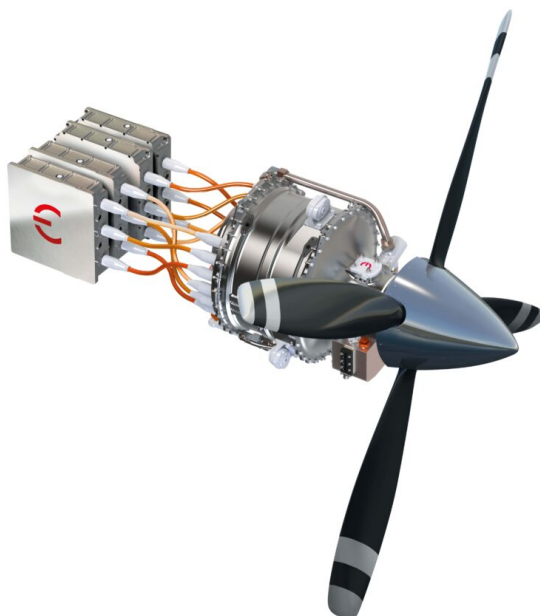
Eviation [3] v současnou chvíli nabízí 3 typy modelů Alice:

1. **Commuter** - typ nabízející přepravu pro co nejvyšší počet lidí, na palubě je místo pro 9 cestujících a 2 členy posádky (piloti)
2. **Executive** - typ zaměřující se na maximální komfort cestujících, v letadle je rozsáhlý prostor pro nejrůznější osobní předměty se kterými může chtít člověk cestovat, ať už se jedná o golfové hole, lyže, či dokonce kola, na palubě je místo pro 6 pasažérů a 2 členy posádky
3. **Cargo** - typ uzpůsobený pro výhradní přepravu zboží, skladovací prostor s dvěma přístupovými vchody má užitný objem $12,7m^3$

Dle dat poskytnutých výrobcem dokáže Alice vyvinout maximální provozní rychlost $260kts$ ($481,5kmh^{-1}$). Dále jsou popsány přistávací a vzletové vzdálenosti, které výrobce definoval pro maximální vzletovou hmotnost (MTOW), mezinárodní atmosférický standard (ISA) a suchou runway na úrovni moře. Pro přistání je potřeba alespoň 622m a pro vzlet alespoň 839m. Z toho vyplývá, že Alice je na rozdíl od větších letadel variabilní co se využitelného množství letišť, protože nevyžaduje kilometrové přistávací plochy jako velké stoje. MTOW je stanovena na 8350kg, z čehož 1134kg je vyhrazeno pro užitečný náklad (cestující + zavazadla) v případě typu Commuter. Co se rozměrů týče, na délku má celý stroj 17,4m, na šířku 19,2m a je 3,84m vysoký. Bez křídel může být tedy přirovnán k patrovému autobusu. Kabinový prostor již však nenabízí takové množství luxusu, jak by se mohlo na první pohled zdát. Kabina vysoká pouze 1,5m a široká 1,93m může na některé cestující působit klaustrofobickým dojmem. I přes tyto nevýhody je Alice stále letadlo s nejprostornějším kabinovým prostorem ve své váhové kategorii FAR23.

Na ocase letadla se nacházejí dvě plně elektrické pohonné jednotky vyvíjené společností magniX. Ze dvou druhů motorů (magni350; magni650), které společnost nabízí, využívá Alice dvou 650kW motorů (magni650) [37]. Zdroj [38] uvádí, že celý pohonný systém je tvořen synchronním motorem s permanentními magnety a sadou čtyř střídačů magniDrive 100 na jehož přední straně je namontována vrtule s konstantními otáčkami, která je poháněna přímo hřídelí motoru. Dále jsou na hřídeli namontovány přídatné převodovky za účelem napájení dalších systémů. Každý motor je 715mm dlouhý a v nejširším místě má průměr 675mm. Na Obr. 1.13 jsou střídače umístěny v těsné blízkosti motoru, v realitě však mohou být kdekoliv to konstrukční řešení letadla nabízí. Jak lze dále na obrázku vidět, pod kovovým kuželovitým krytem, ze kterého vycházejí lopatky vrtule, je přídatná převodovka, která při minimálním vytížení řídí olejové čerpadlo pro chlazení a systém maziv.

Aby plně elektrické letadlo mohlo fungovat, potřebuje baterie ve kterých bude



Obr. 1.13: magni650 s vrtulí [38].

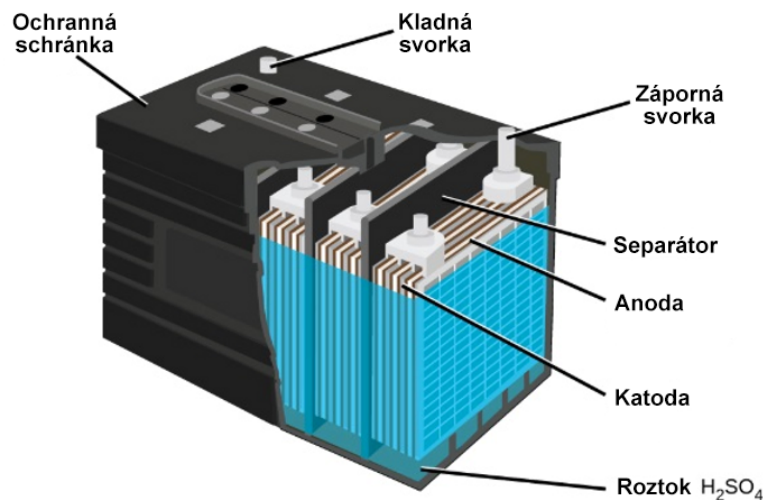
elektrickou energii ukládat. Nejde však jen o pár baterií. CEO společnosti Eviation vysvětluje [39], že Alice má na palubě sadu baterií s celkovou kapacitou 900kWh vážící přes 3,6 tuny. Z toho vyplývá, že samotné baterie tvoří téměř polovinu celkové hmotnosti letadla při maximálním možném zatížení. Dále však CEO Gregory Davis dodává, že to co váží baterie je přibližně ekvivalentní hmotnosti leteckého paliva, kterou by Alice musela mít v nádrži, kdyby měla místo elektromotoru klasický proudový motor. Za účelem zkrácení doby kdy letadlo nevydělává (není ve vzduchu) se Eviation rozhodlo uzpůsobit napájecí přípojku napětí $800V_{ac}$. Tím je možno Alice pro let trvající 1 hodinu nabít za 30 minut. Jak dále Davis zmiňuje, cíle Eviation nebylo vytvořit baterii, která vydrží od uvedení letadla do provozu až po jeho vyřazení jako to bývá u elektromobilů, ale aby byla schopna super-rychlého nabíjení a zvládla alespoň 3000 hodin.

1.5 Napájení

Nedílnou součástí jakéhokoliv elektrického systému je zdroj elektrické energie. Například v domácnostech je zdrojem distribuční síť nízkého napětí. V takovém případě je přenos elektřiny v zásadě jednoduchý, jelikož je odběratel pevně připojen ke zdroji. V letadlech, které operují ve výškách přesahující 10 kilometrů nelze dodávat energii ze sítě. Proto vyžadují rozsáhlé bateriové systémy, které budou elektrickou energii jak uchovávat, tak i dodávat. Jelikož letadla jsou stroje nadměrných velikostí, je pochopitelné, že vyžadují velké množství energie uchovávané ve velkém množství

baterií. Jak již bylo zmíněno, Eviation Alice má na palubě baterie o celkové kapacitě 900kWh, které tvoří téměř polovinu celkové hmotnosti letadla. Hmotnost baterií je tedy jedním ze zásadních činitelů, který stojí v cestě rozsáhlejší elektrifikaci letecké dopravy.

Následující informace o olovených a nikel-kadmiových bateriích vycházejí z článku [40], ve kterém se autor zabývá bateriemi využívaných v letadlech. Základní dělení baterií je podle materiálu z kterého jsou vyrobeny. Nejběžnějšími typy byly v minulosti olovené a nikel-kadmiové baterie. Současný vývoj však již pokračuje směrem lithium-iontových článků.



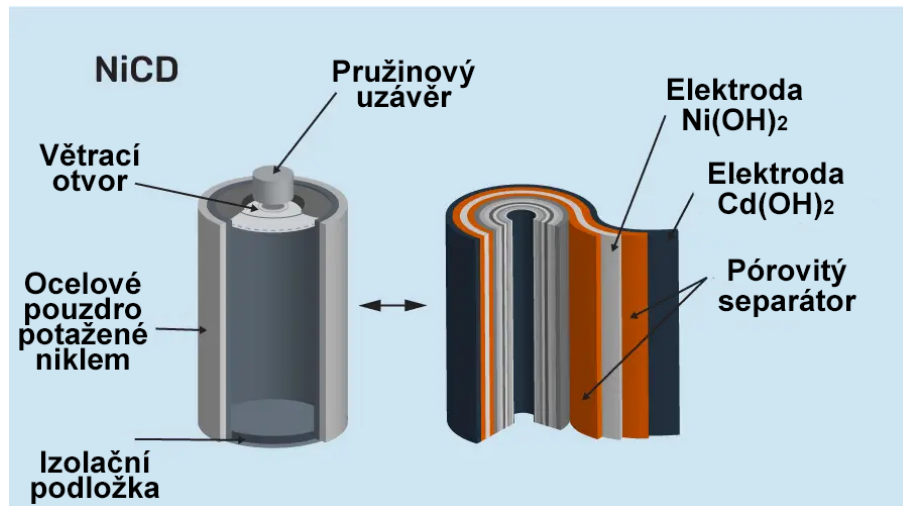
Obr. 1.14: Konstrukce olovené baterie [40].

Olovené baterie (viz. Obr.1.14) jsou nejčastěji využívány u malých letadel. Jejich konstrukce spočívá ve dvou olovených deskách (katoda a anoda), které jsou ponořeny do roztoku kyseliny sírové a vody v poměru 3:7. Anoda je naplněna peroxidem olova a katoda je tvořena měkkým houbovitým olovem. Každý takový článek má napětí přibližně 2V a baterie jako celek má obvykle těchto článků 6 nebo 12 v závislosti na napětí, které je požadováno na výstupu (12V nebo 24V). Jedním z důvodů proč je využití olovených baterií u velkých letadel upozaděno je jejich teplotní závislost. Nejlépe operují ve 25°C, což není lehké udržovat v operativních výškách komerčních letounů. S klesající teplotou klesá výkonost článků a s rostoucí teplotou klesá životnost.

Olovené baterie se dále dělí na:

- **Se suchými články** - Elektrody těchto baterií byli prvně nabity a poté vysušeny. Elektrolyt je přidán až následně. Tyto baterie vyžadují doplňování vody, jelikož na katodě se z vody odštěpuje vodík. Při nabíjení se navíc na anodě tvoří kyslík, který z článku uniká a zplyňuje jej.

- **Ventilem regulované** - Tento typ olovených baterií je v letectví rozšířenější, protože u něj nedochází k uvolňování vodíku následovaný úbytkem vody. Navíc obsahují pojistný ventil, který článek odvzdušní pokud dojde k přebíjení baterie.



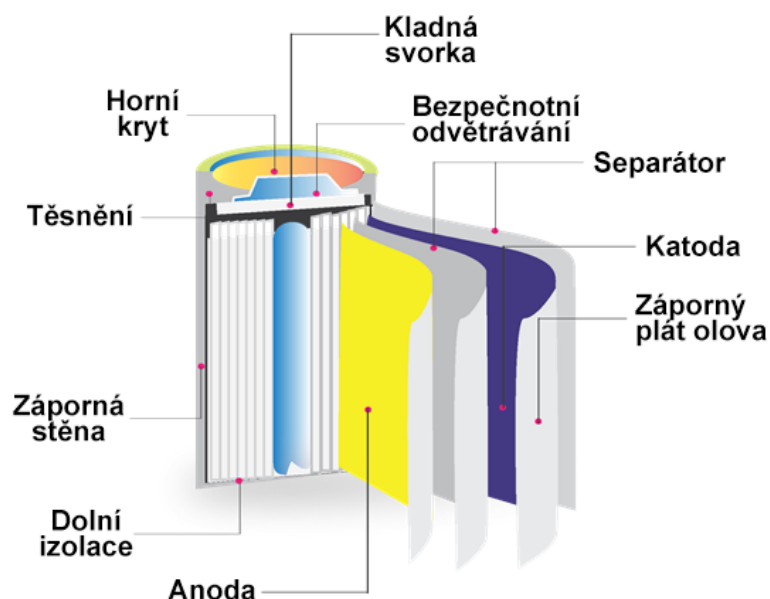
Obr. 1.15: Konstrukce Ni-Cd baterie [41].

Nikl-kadmiové baterie (viz. Obr.1.15) jsou na druhou stranu častěji využívány u velkých letadel. Anoda je v nabitém stavu tvořena oxidem nikelnatým a katoda kadmíem. Při vybíjení se anoda mění na hydroxid nikelnatý a katoda na hydroxid kadmínatý. Napětí Ni-Cd článků se pohybuje mezi 1,2V a 1,25V a klasická 24V Ni-Cd baterie je tvořena 19 či 20 sériově zapojenými články. Elektrody jsou vyráběny spékáním kovových destiček a jsou impregnovány aktivním materiálem. Spečením vznikne pórovitý materiál, který je dále vyplněn nikelnatými a kadmiovými solemi podle příslušné elektrody.

Nikl-kadmiové baterie se dělí na:

- **Odvětrávané** - Tento typ je zaplaven elektrolytem a vodík s kyslíkem vznikající při nabíjení je odvětráván ven z článku.
- **Rekombinační** - Tento typ má minimum elektrolytu, což umožňuje plynům snadno dosáhnout elektrod a umožňuje rekombinaci [42]. Dále je tlumen vznik vodíku na katodě, takže lze baterii hermeticky uzavřít.

Lithium-iontové baterie (viz. Obr.1.16) jsou nástupcem Ni-Cd baterií v komerční dopravě. Dle informací Boeingu [43] byly baterie s obsahem niklu a kadmia využívány například v modelech B777, B747 a MD-11. Oproti moderním lithiovým bateriím však značně zaostávají téměř ve všech aspektech. Lithiové baterie nabízí oproti Ni-Cd vyšší výstupní napětí a proud, rychlejší nabíjení a značnou redukci objemu a hmotnosti asi o 30%. Každá lithiová baterie Boeingu B787 je složena z 8 článků. Každý článek produkuje napětí 8V a baterie jako celek má na výstupních svorkách

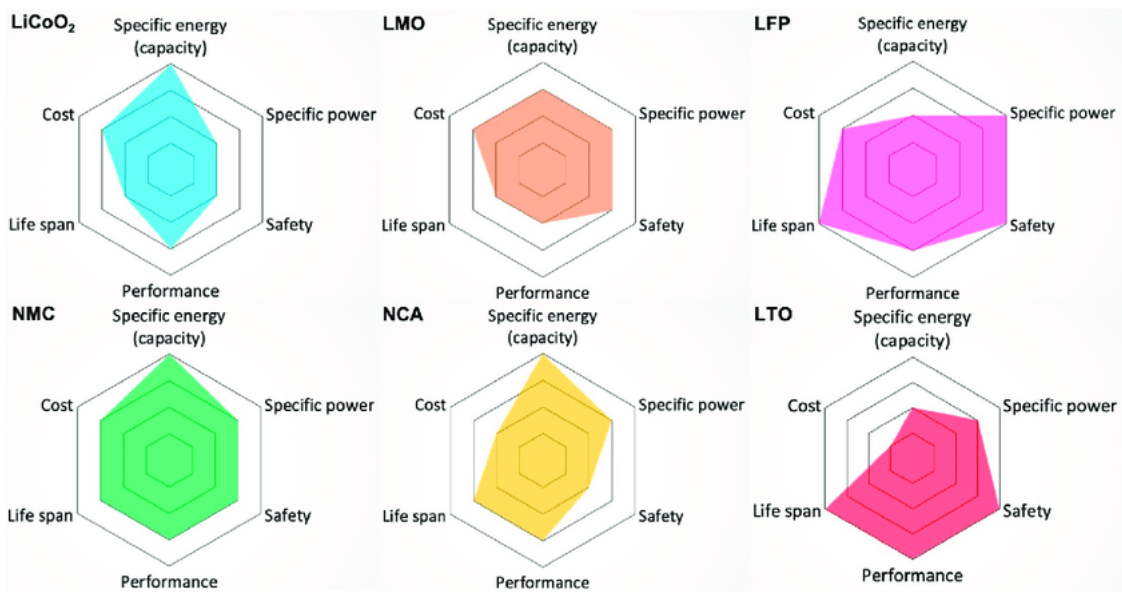


Obr. 1.16: Konstrukce lithium-iontové baterie [45].

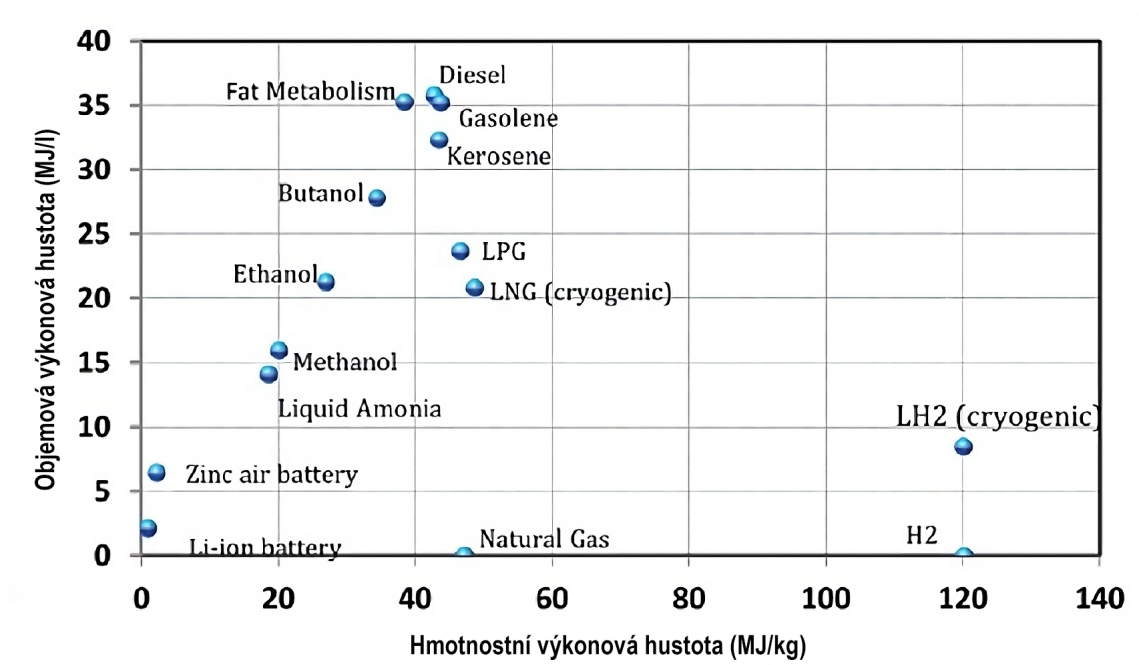
32V. Při přímém porovnání lithiové baterie B787 s Ni-Cd baterií B777 lze pozorovat, že Ni-Cd baterie mají pracovní napětí 24V a jsou složeny z 20 článků. Nejen, že lithiová konstrukce nabízí vyšší napětí, ale také o 12 článků méně, což ušetří na hmotnosti až 20kg. Dále jsou lithiové baterie schopny při startu letadla dodávat až 150A oproti 16A Ni-Cd baterií.

V článku [44] je uvedeno 5 základních částí konstrukce lithiové baterie: anoda, katoda, elektrolyt, separátor a sběrače proudu. Separátor slouží k tomu, aby se elektrody vzájemně nedotýkaly. Katoda je tvořena sloučeninami, které umožňují lithným iontům difuzi dovnitř a ven. Anoda bývá nejčastěji tvořena titaničitanem lithným nebo uhlíkem. Lithiové baterie nabízí na jednotku hmotnosti 150-200 Wh/kg. To je až pětinasobek toho co dokáží nabídnout olovené baterie. Na obrázku 1.17 lze vidět porovnání typů Li-ion baterií.

Graf 1.18 zobrazuje a porovnává různé druhy paliva od těch běžných jako je kerosin, který se běžně využívá v letadlech nebo diesel či benzín, který pohání automobilismus, až po ty méně běžné jako jsou právě Li-iontové baterie. Jak lze vidět, baterie se ještě zdaleka nemohou rovnat výkonové hustotě, neboli kolik energie lze získat z jednotky objemu či hmotnosti, fosilních paliv. V tabulce jsou energetické hustoty pro jednotlivá paliva vyčíslena a Li-iontové baterie jsou až 72,3 násobně výkonnější na jeden kilogram. [47][48][49]



Obr. 1.17: Srovnání různých druhů lithium-iontových baterií dle kapacity, měrného výkonu, bezpečnosti, výkonosti, životnosti a ceny [46].



Obr. 1.18: Porovnání různých druhů paliva využívaného v letadlech [50].

Tab. 1.1: Porovnání výkonových hustot různých paliv

Palivo	MJ/l	Mj/kg
JP-8	34,5	43,4
Nafta	36,2	42,5
Benzín	32	44
Kapalný vodík	120	8
Methanol	15,6	19,7
Li-iontové baterie	0,8-3,6	0,6
Olověné baterie	0,36	0,14
Ni-Cd baterie	1,08	0,14

2 Elektrické stroje v letecké mobilitě

V první kapitole byly rozebírány jednotlivá letadla reprezentující elektrifikaci, kterou letecká doprava prochází. Tato kapitola se zaměří na jednotlivé elektrické stroje, bez kterých by se elektřinou poháněné letadlo nemělo šanci dostat do vzduchu.

Při porovnání elektrických strojů v elektromobilech a letadlech lze najít několik zásadních rozdílů, které formují konstrukci a vývoj v jednotlivých oblastech. V případě automobilové dopravy jde primárně o dlouhodobou spolehlivost (baterie elektromobilů by měli vydržet to co samotný automobil), jednoduchost (redukce ceny oprav), dostupnost (redukce ceny náhradních dílů) a výsledná cena automobilu (drahé komponenty udělají auto neprodejně). Letecká doprava v těchto ohledech funguje do značné míry odlišně. Vývoj strojů v letadle je podřízen primárně maximalizaci spolehlivosti po dobu provozu (stroj v letadle nesmí za žádných okolností selhat v rozmezí jeho životnosti), extrémním podmínkám (značné teplotní a tlakové rozdíly) a dlouhodobá výnosnost (stroje musí být co nejefektivnější pro maximalizaci zisku). Cena jednotlivých komponent se upozaďuje, protože desítky tisíc dolarů se u letadla za stovky milionů ztratí. [51]

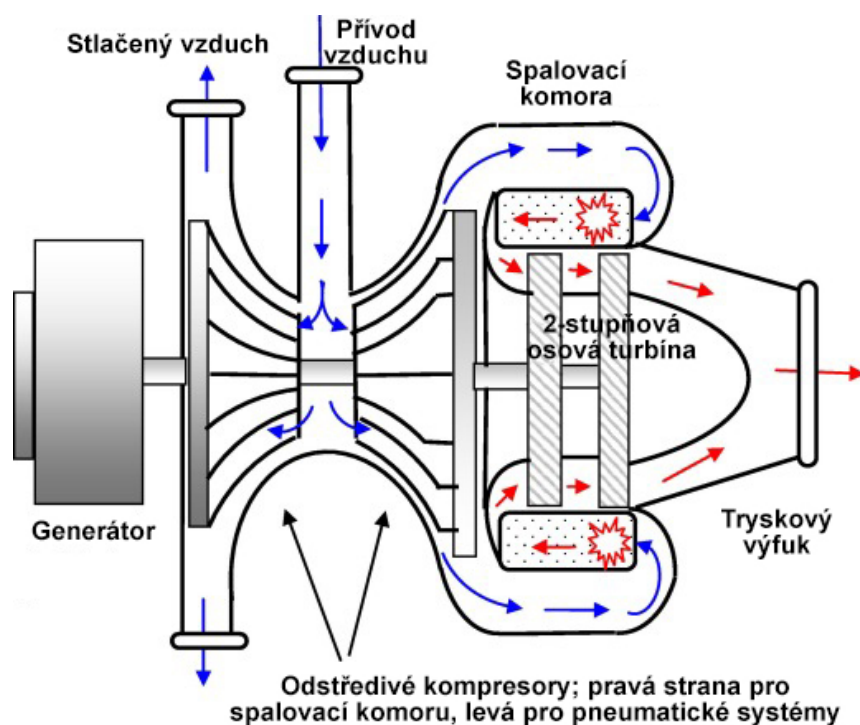
Článek [52] pojednává o rozdílech neelektrických systémů (mechanické, hydraulické a pneumatické), kterých se v letecké dopravě hojně využívá a jejich alternativy na bázi elektřiny. Klasická letadla kombinují tyto čtyři různé zdroje energie, kde elektrické energie je využito pro osvětlení a dodatečný komfort cestujících, pneumatická energie je využita pro Bleed Air systém, mechanická energie je spotřebována v palivových a olejových čerpadlech a hydraulické energie pohání řízení letu a pomocné systémy. Všechny tyto systémy při nejvyšší vytížení dávají dohromady výkon přesahující 1MW. Nahrazení těchto všech systémů jedním se jeví jako logická volba a elektrická energie je do budoucna tou jedinou smysluplnou volbou.

V následujícím textu budou vybrány a detailně rozebrány jednotlivé elektrické stroje využívané ve více elektrických či plně elektrických letadlech

2.1 Auxiliary Power Unit

Zkráceně APU, byla již zmíněna u Boeingu 787 a Airbusu A380, jako systém, který dovoluje letadlu snížit závislost na externím zdroji energie. Více elektrická letadla ji využívají k rozběhnutí hlavních motorů a k pohybu na zemi [8]. Mimo to ji lze využít, také jako rezervní zdroj při selhání všech hlavních motorů.

Dle autora [53] činnost APU v rámci jednoho letu končí při vzletu a opět je uvedena v provoz jakmile letadlo dosedne na runway při přiletu a bezpečně opustí přistávací plochu. Dále článek zmiňuje, že první APU byla použita již u letadla americké výroby B-29 Superfortess, které se zúčastnilo druhé světové a korejské



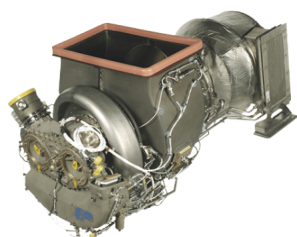
Obr. 2.1: Průřez a funkčnost APU [54].

války [55]. U letadel, které využívají vzduch z kompresoru ke kontrole teploty kabiny (Bleed Air) než se cestující dostanou na palubu, je zdrojem tohoto vzduchu právě APU. V letních měsících v oblastech s teplým klimatem trvá vychlazení kabiny v průměru 30 minut. Stejnou dobu trvá vyhřátí kabiny v chladných oblastech za zimních měsíců.

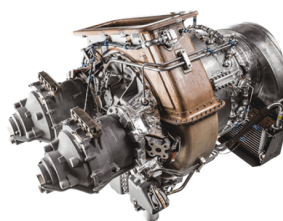
Práce [56] popisuje konstrukci a děje uvnitř APU. Na obrázku 2.1 lze vidět vstupující vzduch, který se rozděluje mezi dva odstředivé kompresory. První stlačí vzduch a vede ho do spalovací komory. Zde je do vzduchu vstříkováno letecké palivo, které je poté spalováno, čímž vytváří moment na hřídeli. Výfukové plyny následně opustí APU výfukovou tryskou. APU za jeden let letadla využije přibližně 2% veškerého paliva spotřebovaného motory za celý let. Druhý tok nasávaného vzduchu vede do druhého kompresoru poháněného hlavní hřídelí. Zde je tlak vzduchu zvýšen na 350kPa a veden k napájení pneumatických systémů a ECS. Na hlavní hřídel je zároveň připojen generátor, který napájí hlavní motory.

2.1.1 APU Pratt & Whitney

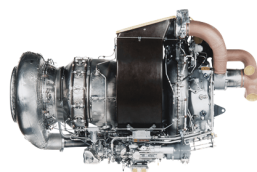
Na obrázku 2.2 lze vidět všechny typy APU vyráběné společností Pratt & Whitney [57]. V současnosti patří mezi největší výrobce motorů a motorových jednotek pro turbovrtulová, turboventilátorová a turbohřídelová letadla. Na podobrázku 2.2a je



(a) PW980



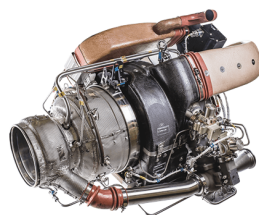
(b) APS5000



(c) PW901A/C



(d) APS2300



(e) APS3200

Obr. 2.2: APU Pratt & Whitney [57].

vyobrazena jejich doposud největší APU využívaná v komerční letecké dopravě. Její dvojhřídelový design je přímo přizpůsoben Airbusu A380, přičemž její dva generátory namontované na převodovce dohromady vydají výkon 120kVA. Jednotka APS5000 (viz. Obr. 2.2b) je vůbec první plně elektrickou APU využívanou ve velkých komerčních letadlech. Jednohřídelová plynem poháněná turbína s proměnnými otáčkami je schopna poskytovat výkon o velikosti 450kVA. Tento výkon platí na úrovni moře a APU může operovat až ve výšce 13140m. Tato jednotka byla vyvinuta exkluzivně pro Boeing 787 a ve své třídě je nejtišší, produkuje nejméně emisí a zároveň nevyžaduje tak frekventovanou údržbu jako jiné APU. Dvouhřídelová PW901A/C (viz. Obr. 2.2c) vychází svou konstrukcí z původního turboventilátorového motoru Pratt & Whitney pro soukromé letouny. Současný model vyrábí elektřinu v Boeingu 747-8 a její předchůdce PW901A lze nalézt v Boeingu 747-400. Dva generátory na převodovce generují výkon o velikosti 90kVA. APS2300 (viz. Obr. 2.2d) je přizpůsobena

náročnému provozu v letadlech operujících na regionální úrovni. Přesněji se jedná o letadla Embraer E170/E175/E190/E195 a Embraer Lineage 1000. Sám výrobce ji považuje za nejspolehlivější jednotku na trhu. Tato APU pracuje při konstantních otáčkách a její cyklus prochází přes jednostupňový odstředivý kompresor, prstencový spalovací motor s reverzním průtokem a dvoustupňovou axiální turbínu. Posledním typem APU, kterou Pratt & Whitney vyrábí je APS3200 (viz. Obr. 2.2e). Tuto jednotku s výkonem 90kVA využívá Airbus A320. Její konstrukce sestává z jednohřídelového jádra se stálou rychlostí a vysokým tlakovým poměrem, které pohání kompresoru.

2.1.2 APU Honeywell

Společnost Honeywell patří mezi světovou špičku ve vývoji leteckých systémů a jejich jednotky APU nejsou žádnou výjimkou. Svůj vývoj orientují jak na krátké lety, tak i na lety dlouhé. Mimo to vyvíjejí APU i pro vojenské využití. [58]

Série 131 (viz. Obr. 2.3) je jednou z nejúspěšnějších řad APU na světě s více než 100 miliony hodin provozu. Model 131-9, která byla původně navržena pro Boeing MD-90 odstartovala úspěch této řady. Její pokračování v podobě 131-9A a 131-9B se využívá v Boeingu B737NG a Airbusu A320. Mimo to generuje elektřinu v Airbusu A220 Bombardier C-Series. Řada 9 se skládá z dvoustupňové axiální turbíny, která umožňuje prodloužení životnosti motoru. [59]



Obr. 2.3: Honeywell APU série 131-9B [59].

Jednotka RE220 (viz. Obr. 2.4) je určena pro regionální lety a soukromé letouny. Je schopna vyrábět výkon 45kW a zároveň disponuje inovovaným komunikačním kanálem mezi jednotkou sběru dat k údržbě (MDAU), díky čemuž mohou piloti sledovat stav a řešit problémy s jednotkou z kokpitu. [60]

HGT400 je APU další generace, která konstrukčně vychází z RE220. Samotná jednotka je o téměř 14kg lehčí než ostatní ve stejné třídě. Mezi její přednosti se



Obr. 2.4: Honeywell APU RE220 [60].

řadí nová elektronická kontrolní technika, která umožňuje plynulou komunikaci s kokpitem. Dále má nejnovější certifikaci ohnivzdorných úchytnů ke kostře letadla a zdvojnásobená spolehlivost v čase mezi údržbami. Mezi letadla, která ji využívají patří například soukromé letouny Gulfstream G500 a G600. [61]

Při konstrukci HGT750 (viz. Obr. 2.5) byl kladen maximální důraz na spotřebu a množství emisí, aby byli splněny požadavky letadel COMAC C929 a Irkut MC-21. Jednotka pracuje s proměnlivou rychlostí a zároveň se podařilo snížit hmotnost klíčové komponenty, startér/generátoru. HGT750 produkuje o 25% méně emisí než ostatní APU na trhu. Dále je APU schopna vydržet 10 000 hodin provozu mezi nutnou výměnou. Kombinací těchto všech výhod dokáže jednotka ušetřit více než 20 000 dolarů ročně na provozu letadla. [62]



Obr. 2.5: Honeywell APU HGT750 [62].

Cílem série 36 (viz. Obr. 2.6) bylo snížit cenu a tím zvýšit dostupnost při zachování či zvýšení výkonu a spolehlivosti. APU má své využití převážně mezi helikoptéry a soukromými letouny krátkého až středního doletu. Její konstrukce

kompresoru s porézním pláštěm zvyšuje maximální pneumatický výkon a dovoluje vyšší zatížení hřídele. To vše při o 10dB tišším pozemním provozu. [63]



Obr. 2.6: Honeywell APU 36-150 [63].

RE100 (viz. Obr. 2.7) je o poznání lehčí a kompaktnější než ostatní APU podobných vlastností. Je proto vhodnou volbou do letadel středních rozměrů. Tato jednotka exceluje hlavně v oblastech spadajících do ECS a zároveň nabízí výbornou spolehlivost. [64]



Obr. 2.7: Honeywell APU RE100 [64].

Série 331 nabízí nejvyšší poměr výkonu a hmotnosti ve své třídě. Této jednotky využívá mnoho velkých komerčních letadel jak od Boeingu, tak od Airbusu. Jednotka 331-200 byla první APU řízena elektronicky a zároveň první, která využívá stejnou vnitřní konstrukci jako turbovrtulový motor, čímž tento krok pomohl snížit náklady na výrobu. Honeywell u jednotky 331-500 zavedl eduktor, neboli tryskové čerpadlo, čímž se zároveň zbavil potřeby ventilátorů sloužících k chlazení oleje. Po úspěšných testech tuto komponentu zavedl i u jednotek 131-9B a RE220. [65]

APU HGT1700 (viz. Obr. 2.8) je vychází ze série 331 a je speciálně uzpůsobena pro provoz v Aibusu A350 XWB, tak aby co nejvíce šetřila hmotnosti a maximalizovala výkon. Kombinací s dalšími systémy je HGT1700 zodpovědná za 10% redukcí spotřeby paliva a emisí oxidu uhličitého v samotné APU. Jednotka funguje s proměnlivou rychlostí, čímž snižuje spalování paliva. [66]

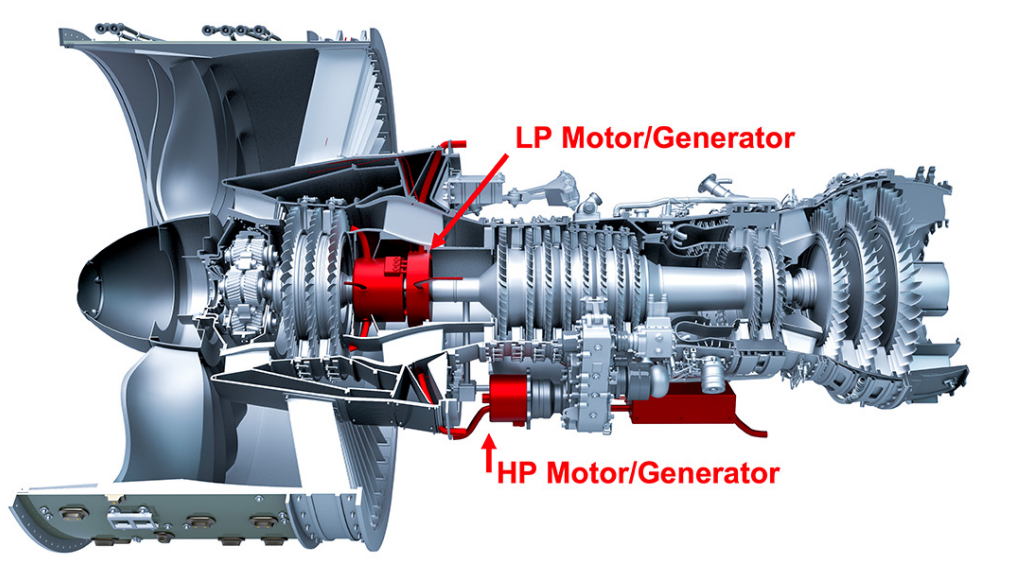


Obr. 2.8: Honeywell HGT1700 [66].

2.2 Motorové generátory

Generátory letadel jsou na mnoha místech, ale tím primárním jsou hlavní motory. Ať již se jedná o velká komerční letadla s kapacitou pro stovky pasažerů nebo malá dvoumístná letadla pro regionální provoz, jejich motory jsou opatřeny generátorem, který vyrábí elektřinu důležitou pro veškeré elektrické stroje či přístroje na palubě. Jako v automobilech kde kliková hřídel pohání alternátor, motorová hřídel letadla pohání generátor. Jedním z rozdílných parametrů mezi klasickými letadly a více elektrickými je výkon, který mohou generátory na motorech dodat. Z pravidla se posuzují právě tyto generátory, jelikož proudový motor je nejvýkonnější komponentou letadla z čehož vyplývá, že je z něj možné vygenerovat největší množství energie. Generátory klasických letadel se svým výkonem drží v desítkách kilowatt, více elektrická letadla generují až stovky.

Dle autora [67] vypadá budoucnost rozložení komponent v motorech letadel tak, že generátory budou rozmístěny na vysokotlaké i nízkotlaké hřídeli, jak lze vidět na obrázku 2.9, na rozdíl od současného stavu, kdy je generátor umístěn mimo samotný proudový motor na hřídeli ovládané skrz komplexní převodovky. Jedna z výhod generátorů na obou hřídelích spočívá v tom, že vysokotlaký generátor může nahradit funkci startéru a při výpadku motoru může nízkotlaký generátor dodávat energii z ventilátoru, který se otáčí na volnoběh. Dále se autor zabývá



Obr. 2.9: Generátor na nízkotlaké a vysokotlaké turbíně [68].

řešením nízkotlakého generátoru s permanentními magnety. Požadavky na takový generátor uvádí následující:

- 250kW nominální výkon
- letové otáčky od 1050 do 3100
- nouzový výkon při 250 otáčkách za minutu 25kW
- chladicím médiem je motorový olej nebo vzduch, který generátor obtéká
- generátor musí být umístěn uvnitř motoru na jeho konci
- musí být řízen napřímo bez použití převodovky

Autor zvolil tento typ generátoru, protože nabízí dobrou účinnost napříč různými otáčkami, jednoduchost v chlazení a potenciálně vyšší spolehlivost než generátor s vinutým polem.

Autor [69] dále řeší problematiku generátorů s permanentními magnety. Uvádí, že výzkum v oblasti magnetických slitin přinesl materiály s až dvojnásobnou energií než dříve využívané magnety AlNiCo 9. Přesněji se jedná o samarium-kobaltové magnety, které disponují silnou koercitivní silou, neboli že dobře odolávají demagnetizaci. Takové magnety mohou pracovat s velkou vzduchovou mezerou a zároveň jim nehrozí permanentní demagnetizace při průchodu přetěžování proudů. Limitací při konstrukci vysoce výkonných strojů se samarium-kobaltovými magnety je chlazení. Nejefektivnější metodou je chlazení kapalinou, kdy chladicí kapalina přímo obtéká měď ve statoru.

Britská společnost Rolls-Royce [70] v roce 2021 testovala 2,5MW generátor. Tento motor byl vyroben na popud programu E-Fan X, který měl za cíl vývoj velkého letadla pro regionální dopravu s hybridním pohonným systémem, který využívá tur-

bohrádlového motoru AE2100 k tomu, aby z generátoru vytvořil několik elektrických ventilátorových motorů. Účelem tohoto programu není jen letadlo produkující méně emisí, ale také letadlo, které je lehčí, konstrukčně jednodušší, levnější na údržbu a v neposlední řadě dokáže být více řízeno počítačem. Hlavní konstruktér Adam Newman přirovnává generátor velikostí k sudu piva a dodává, že generátor musí být schopen nepřetržitě vyrábět takový výkon, aby dokázal napájet 2500 domů.

2.3 Aktuátory

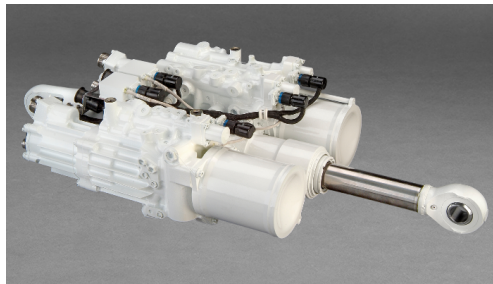
Aktuátory již byly zmíněny u Airbusu A380, kde elektro-hydrostatické aktuátory slouží k ovládní letu. Autor [71] definuje aktuátory jako stroje, které převádí vstupní energii na jiný druh energie. Nejčastěji se jedná o elektrický signál na vstupu a mechanickou energii na výstupu. Specificky pro letectví je vhodným parametrem dynamická síla, kterou je aktuátor schopen vyvinout a zároveň zachovat nízkou hmotnost a rozměry. Aktuátory lze najít jako součást ECS, hydraulických, kyslíkových a palivových systémů. Dále mohou aktuátory sloužit jako bezpečnostní prvek, kdy při výskytu požáru aktuátor u motoru zastaví dodávky paliva. Firma maxon, která dodává DC motory do aktuátorů, používá v konstrukci permanentní magnety a patentované neželezné vinutí. Toto vinutí je tvořeno z čisté mědi a bez železné kotvy. Tímto způsobem došlo ke snížení hmotnosti sestavy a vylepšení vlastností zrychlení.

Článek [72] dělí aktuátory do tří základních kategorií podle toho jaký druh energie je na vstupu. Tyto tři kategorie jsou pneumatické, elektrické a hydraulické aktuátory. Pneumatické aktuátory přijímají stlačený vzduch na vstupu a pomocí pístu a ventilů ovládají tok vzduchu. Stlačený vzduch, který prochází aktuátorem přeměňuje při expanzi svou potenciální energii na kinetickou, čímž uvádí mechanickou část aktuátoru do pohybu. Dále lze pneumatické aktuátory dělit na jednočinné a dvojčinné. Jednočinné vytváří mechanický pohyb v jednom směru, jsou lineární. Dvojčinné vytváří rotační pohyb, například roztáčí turbínu na jejímž konci je hřídel. Hydraulické aktuátory jsou založeny na principu spojitých nádob. Uvnitř aktuátoru jsou dva válce s písty a na základě síly působící na píst v jednom válci se změni výška hladiny kapaliny ve druhém válci, čímž dojde k lineárnímu posunu pístu. Elektrické aktuátory obsahují elektromotor a řídicí systém. Magnetická pole vytvořená průchodem proudu statorem a rotorem společně vytváří rotační pohyb na hřídeli. Elektrické aktuátory jsou z těchto tří kategorií tou většinou nejlepší variantou. Stejný výkon nabízí s nižšími rozměry a hmotnostmi, jsou spolehlivější a mají mnohem širší využití.

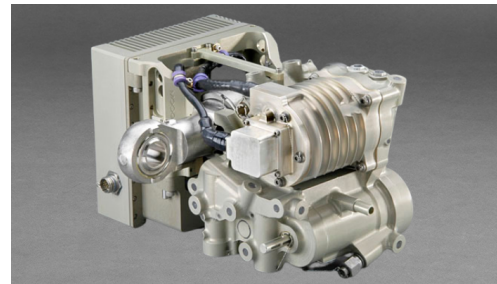
Společnost Moog [73] se specializuje na výrobu aktuátorů v letectví. Vyvíjí aktuátory dle nejrůznějších požadavků letadel a v současnosti lze nalézt jejich techniku v téměř každém letadle. Dále jsou jejich aktuátory rozděleny podle využití.

Řízení letu - aktuátory v této kategorii ovládají nejrůznější součástky, které přímo či nepřímo ovlivňují trajektorii letu, jedná se například o klapky či letky [74]

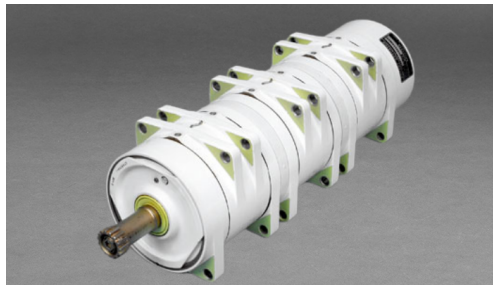
- Primární řízení letu 2.10a
- Sekundární řízení letu 2.10b
- Manévrování náběžnou hranou 2.10c
- Řízení vysokého zdvihu 2.10d



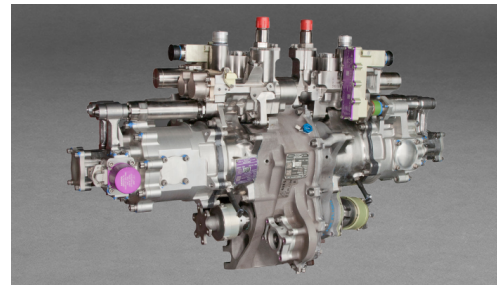
(a)



(b)



(c)

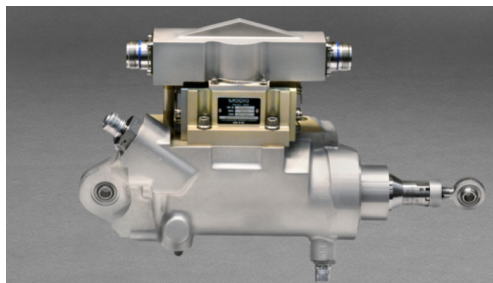


(d)

Obr. 2.10: Aktuátory Moog Inc. pro řízení letu [74].

Řízení motoru - ovládání přísunu paliva nebo jiných vlastností motoru [75]

- Řízení proměnlivé geometrie 2.11a
- Řízení vektoru tahu 2.11b



(a)



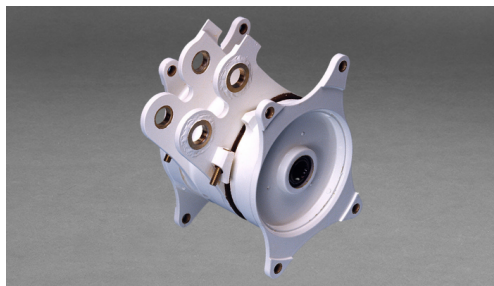
(b)

Obr. 2.11: Aktuátory Moog Inc. pro řízení motoru [75].

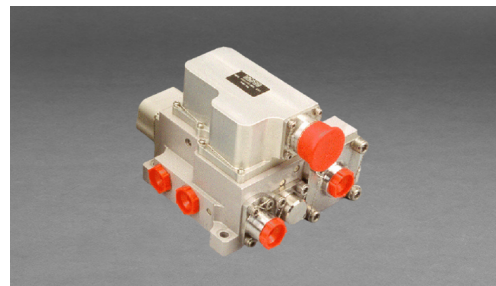
Ovládání dveří zbraňových prostorů - aktuátory Moog jsou využívány nejen v komerčních letadlech, ale také v těch vojenských. Aktuátory spadající do této kategorie jsou zodpovědné za ovládání dveří, jež skrývají zbraně vojenských letadel, ať již se jedná o automatické zbraně nebo rakety [76]

Ovládání dodatečných systémů - aktuátory využívané k ovládání neesenciálních komponent letadla [77]

- Ovládání dveří nákladního prostoru 2.12a
- Ovládání přistávacího podvozku 2.12b
- Stabilizace a směrování nákladu 2.12c



(a)



(b)



(c)

Obr. 2.12: Aktuátory Moog Inc. pro ovládání dodatečných systémů [77].



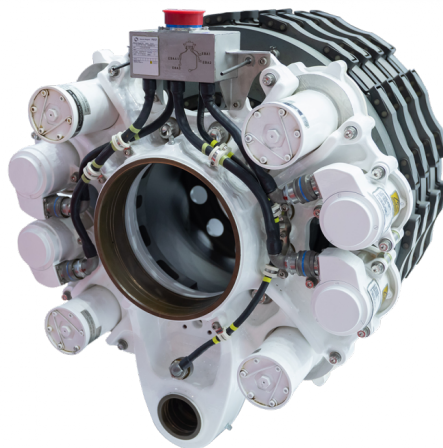
Obr. 2.13: Generátory protiběžné síly [78].

Kontrola vibrací - na předem určených místech na skeletu letadla jsou umístěny dvojice aktuátorů, tyto aktuátory jsou řízeny tak, aby jejich frekvence a fáze vyvolávaly opačné síly k vibracím letadla a tím je vyrušily [78]

- Generátory protiběžné síly 2.13 - dvojice aktuátorů je schopna vyvinout až 500kg síly s frekvencí od 9 do 25Hz

2.4 Elektrické brzdy

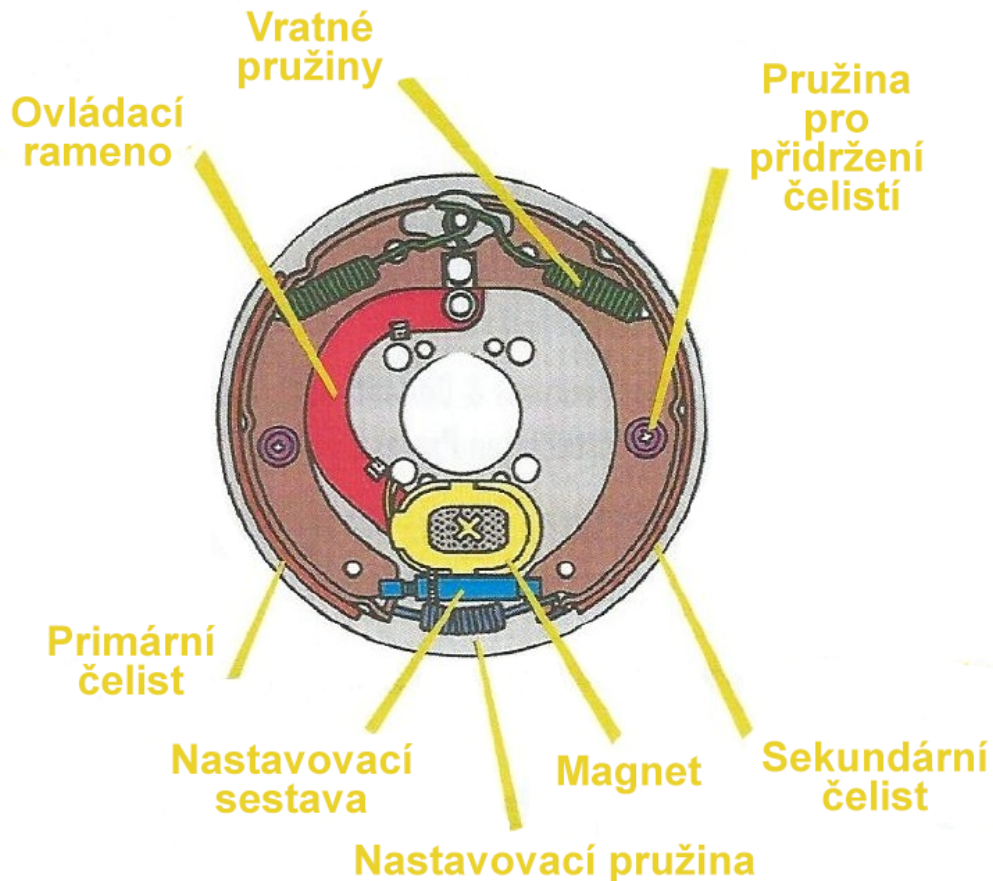
U automobilů jsou již elektrické brzdy do jisté míry značně rozšířené, v letecké dopravě však výrobci spíše preferují brzdové systémy fungující na bázi hydraulických aktuátorů. Společnost Boeing [79] se do svého více elektrického letadla B787 rozhodla zakomponovat elektrické brzdy (viz. Obr.2.14), kterými nahradila konvenční technologii. Tato změna přinesla mnoho výhod jako například zjednodušení celého brzdného systému a odstranění potenciálních případů, kdy by došlo k úniku brzdné kapaliny a brzdy by kvůli tomu nemohly fungovat. Zároveň to celý systém urychlí, jelikož elektrické brzdy nemají takovou prodlevu mezi vstupním impulzem a začátkem brždění a také se bude moci lépe monitorovat stav brzd. Elektrické brzy B787 poskytuje společnost Safran, která dle svých slov [80] umožňuje sledovat opotřebení brzdových disků v reálném čase. Dále jsou tyto brzdy natřeny antioxidačním nátěrem, čímž lépe odolávají korozi a jsou zcela bez obsahu prvků, které jsou buď toxické, nebo svou těžbou poškozují životní prostředí. Přesněji se jedná o tyto prvky, které jsou u hydraulických brzd často využívány: kadmium, chrom, berylium a azbest. Safran se také při výrobě těchto brzd zbavil rozpouštědel, chlorfluorovodíků a halonu.



Obr. 2.14: Elektrická brzda Boeingu 787 od Safran Group [80].

Princip, na kterém elektrické brzdy fungují popisuje článek [81]. V jednoduchosti je jejich funkčnost téměř totožná s hydraulickými brzdami. Piloti nejdříve sešlápnu

brzdový pedál. To vyšle signál řídicímu systému brzd, který do brzd pošle požadovaný proud. Tento proud projde magnetem elektrických brzd, který zmagnetizuje a začne tlačit na bubnu. Třecí síla uvede magnet do rotačního pohybu ve směru rotace bubnu, což natáhne ovládací rameno a přitáhne primární a sekundární čelist směrem k bubnu. Tyto čelisti třením o bubnu zpomalují rotaci kol. Všechny komponenty elektrické brzdy lze vidět na obrázku 2.15 níže.



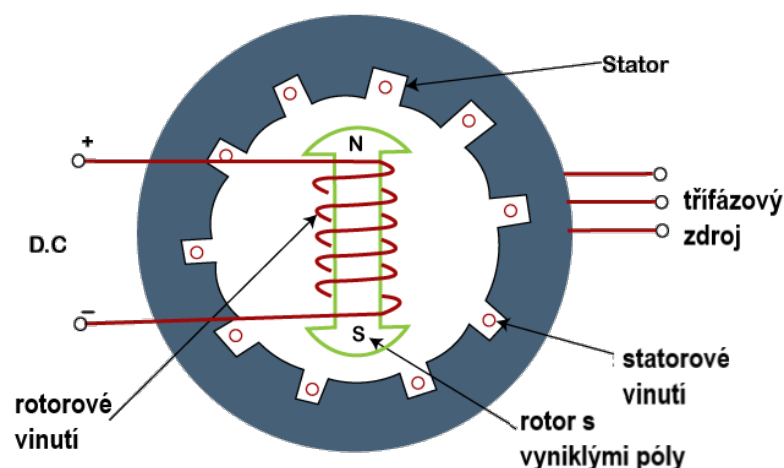
2.5 Hlavní druhy motorů využívaných v letectví

Při konstrukci letadel se primárně řeší jedno téma a je jím hmotnost. Ta má na provozní náklady zdaleka největší vliv. Proto je důležité volit i samotné motory tak, aby z co nejmenší hmotnosti dokázaly vyvinout co možná největší množství výkonu. Tedy je požadována vysoká hustota výkonu vyjádřená ve wattech na kilogram. Dále je nezbytné, aby motory disponovaly robustní a odolnou konstrukcí, jelikož jsou vystavovány extrémním podmínkám, ať už se jedná o teplotní rozdíly od -50°C v

cestovní výšce dopravních letadel do teplot přesahující 50°C na sluncem rozpálených letištních plochách v subtropických podnebných páslech nebo vibrace, kterým letadlo za letu podléhá [82]. V následujících oddílech budou detailněji popsány tři nejběžnější elektrické točivé stroje, synchronní, asynchronní a stejnosměrný motor a budou porovnány dle vlastností, které jsou pro použití v letadlech klíčové.

2.5.1 Synchronní stroj

Tento elektrický točivý stroj je charakteristický tím, že jeho rotor se otáčí stejnou rychlostí jako magnetické pole statoru, tedy synchronními otáčkami. Konstrukce statoru je podobná jako v případě jiných indukčních strojů. Válcová kostra s třífázovým vinutím umístěných do drážek vytváří točivé magnetické pole. Na rotoru je navinuto stejnosměrné vinutí, jelikož se kvůli jeho setrvačnosti nemůže synchronní stroj sám rozběhnout je potřeba jej nejprve nabudit. K tomu se využívá stejnosměrných zdrojů elektrické energie připojené na vinutí rotoru přes sběrné kroužky, čím se rotor zmagnetizuje a lze jej magnetickým polem statoru uvést do pohybu. To navíc umožňuje synchronnímu stroji pracovat s účinnkem rovnému téměř 1, protože magnetické pole rotoru je buzeno stejnosměrně. Účinník lze také přímo ovládat mírou buzení rotoru. Pokud je budící proud nízký, nedochází k dostatečné magnetizaci rotoru a do statoru musí být dodáváno více induktivní zátěže, aby toto vykompenzovala. Účinník tedy bude klesat a bude mít induktivní charakter. V opačném případě, kdy je rotor buzen nadměrným proudem dochází k přemagnetování rotoru a stator bude odebírat kapacitní zátěž. V případě, že dojde k přetížení motoru, tak že bude na rotorové hřídeli připojena nadměrná zátěž, rotor vypadne ze synchronizace přestane vyvíjet jakýkoliv moment [83].



Obr. 2.16: Konstrukce synchronního stroje [84].

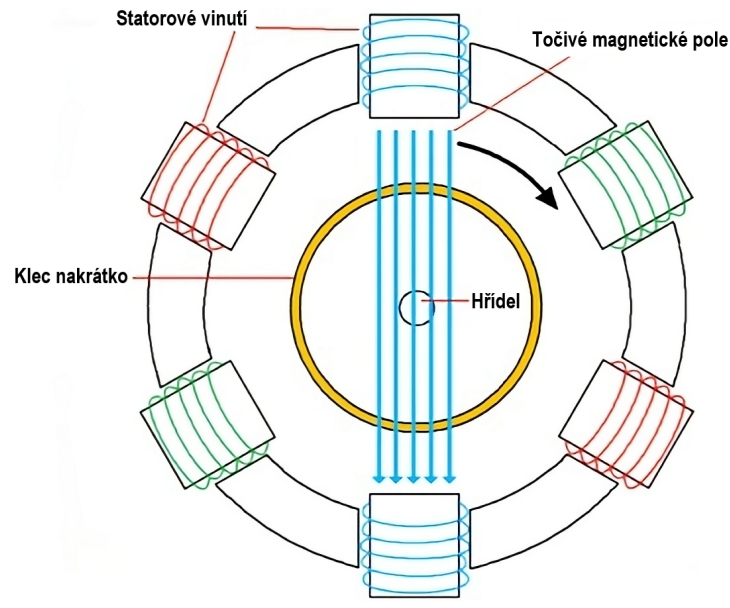
V praxi se synchronních strojů využívá nejčastěji pro aplikace vyžadující vysoké výkony v řádech stovek MVA. Jedná se například o generátory ve velkých energetických závodech jako jsou jaderné elektrárny nebo velká vodní díla. Jedním z příkladů je generátor v Tchajšanské jaderné elektrárně o výkonu 1750 MW [85]. V letectví se poté synchronních generátory využívají například u již dříve zmiňovaného Boeingu 787 [86]. I přestože v letadlech jsou generátory pouze o výkonech v desítkách a v ojedinělých případech ve stovkách kVA, použití synchronních strojů oproti jiným typům je primárně v jejich velikosti a hmotnosti. Jedním z důvodů, proč jsou synchronní stroje lehčí, než například asynchronní je v konstrukci rotoru. Rotor u synchronních strojů může být tvořen permanentními magnety a vinutím, které je typicky lehčí než rotorová klec u asynchronních strojů. V případě rotorů reluktančních synchronních strojů jsou vyráběny s vysokou magnetickou reluktancí, která vede k efektivnějšímu vedení magnetických siločar a tím dovoluje k dalším redukcím v hmotnosti [87]. Pro aplikace v letadlech jsou synchronní generátory výhodné i pro jejich účinník. Jak bylo dříve zmíněno, synchronní stroje pracují s účínkem téměř jedna, takže nevnáší do elektrické sítě parazitní indukčnosti či kapacitu, čímž odpadá nutnost kompenzace jalového výkonu. Také jsou schopné pracovat s účinností přes 90%, jelikož se v něm neindukuje žádný proud a ztráty v rotoru jsou minimální [88].

2.5.2 Asynchronní stroj

Tyto stroje jsou charakterizovány svou rychlostí otáčení rotoru, která je nižší než synchronní rychlost magnetického pole statoru, tzv. pracují se skluzem. Stator je tvořen střídavým vícefázovým vinutím, které při průchodu proudem vytváří točivé magnetické pole. Magnetické pole poté ve vodičích v rotoru vytváří indukované napětí. Toto napětí zapříčiní vznik indukovaného proudu v rotoru, který reakcí s magnetickým polem statoru vytváří moment [89]. Konstrukce statoru je v zásadě stejná jako u synchronních strojů, rozdíly jsou primárně na rotoru. Ten bývá tvořen cylindrickou klecí zakončenou kruhy nakrátko. Magnetické siločáry protínají tyče klece a indukují zde napětí. Těmito tyčemi poté protéká proud. Kruhy nakrátko celý obvod uzavírají a dávají možnost průchodu proudem [90].

Oproti složitým synchronním strojům je výhoda těchto asynchronních převážně v jejich jednoduchosti a z toho důvodu i v ceně. Také nevyžadují téměř žádnou údržbu, jelikož ve své konstrukci nemají kartáče, komutátory ani sběrné kroužky, které by časem degradovaly. Kvůli jejich horší účinnosti a induktivnímu účínku však není výhodné je využívat pro aplikace vyžadující větší výkony nebo jako generátory elektrické energie [91]. Jejich již zmíněná jednoduchost a cena jsou však vlastnosti, které výrobci vyhledávají pro konstrukce malých pohonů, jakými mohou být například aktuátory. Společnost Skurka Aerospace vyrábějící malé asynchronní pohony

o výkonech do 40HP, pracující při napětí od 5 do $480V_{ac}$ a s frekvenci 2-2000Hz do letadel využívá tyto stroje například pro ovládání nákladních dveří, řízení letu, ovládání sedal nebo čerpadel [92].

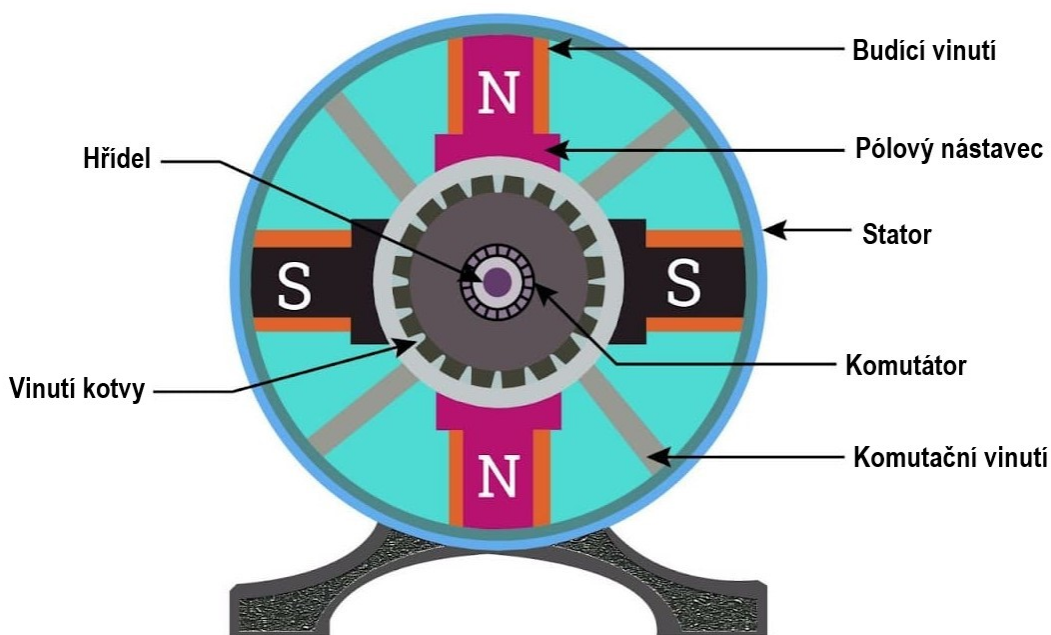


Obr. 2.17: Konstrukce asynchronního stroje [93].

2.5.3 Stejnosměrný stroj

Jak již název napovídá, stejnosměrný stroj převádí stejnosměrný proud na mechanickou energii. Jeho konstrukce sestává ze statoru, na kterém jsou připevněny permanentní magnety, které vytváří konstantní magnetické pole a kotvy, na které je navinuta cívka zapojena do zdroje stejnosměrného napětí přes komutátorové kroužky. Funkčnost tohoto motoru spočívá v komutaci neboli přepólování napájecího vinutí kotvy, jakmile se póly pootočí tak, aby byl stator a kotva v rovnováze, což kotvu opět donutí k otočení [94].

Stejnosměrné stroje jsou v letectví využívány primárně pro aplikace vyžadující minimální rozměry a zároveň nejsou náročné na dodávaný výkon. Společnost FAULHABER vyrábí takové motory, které se v letadlech využívají například k ovládání rolet u oken, zámků u dveří kabiny a nouzových východů a nebo třeba také k ovládání ventilů spadajících do Bleed Air System, který byl již zmíněn u Boeingu 787 [95].

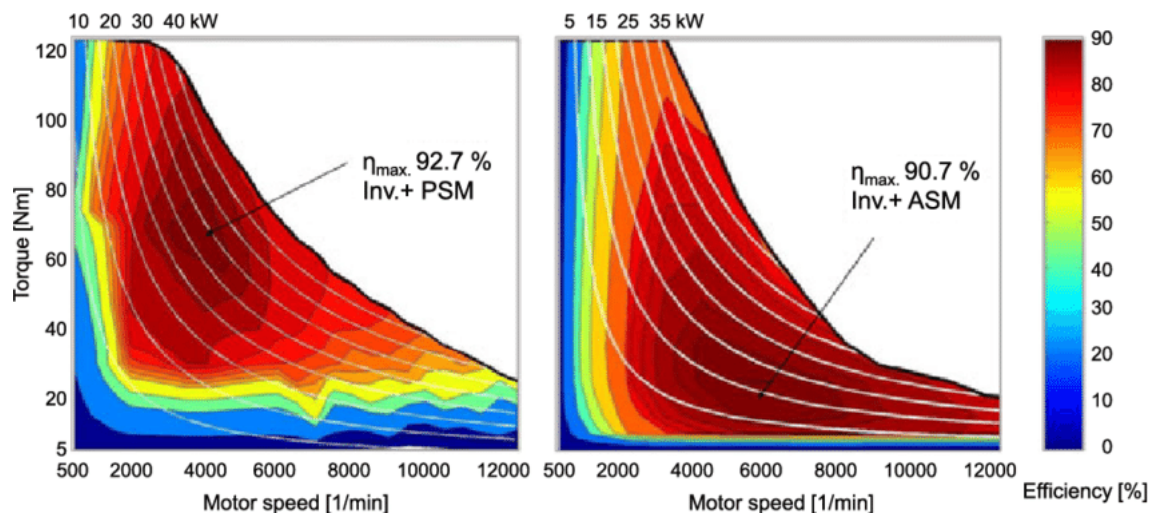


Obr. 2.18: Konstrukce stejnosměrného stroje [96].

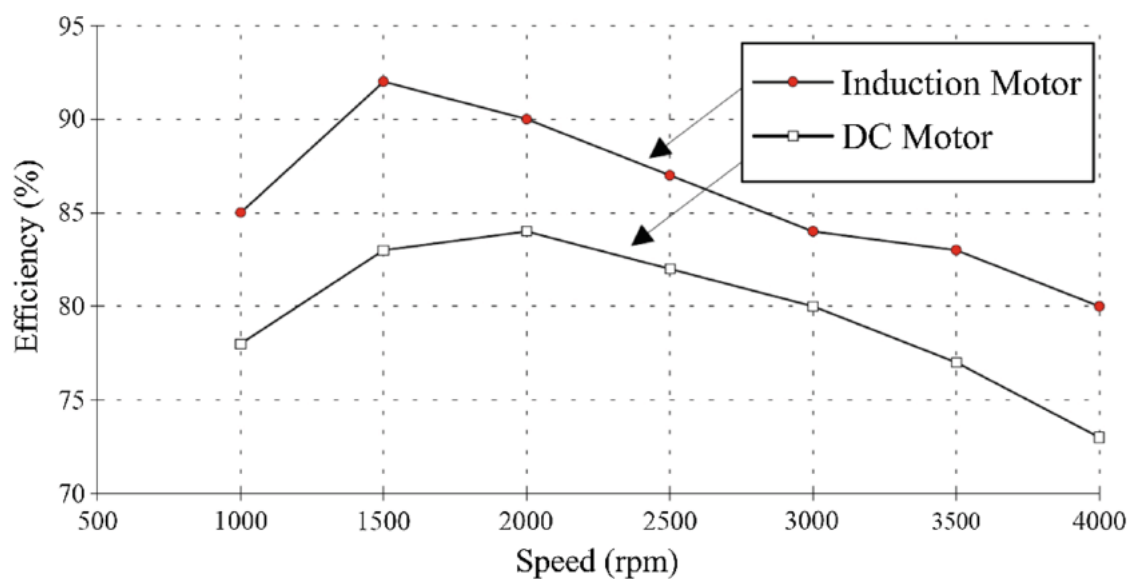
2.5.4 Srovnání jednotlivých motorů

Graf 2.19 zobrazuje hodnoty účinností typických synchronních a asynchronních strojů v závislosti na otáčkách i momentu. Graf vlevo obsahuje hodnoty účinností synchronních strojů, které mají lepší účinnosti při nižších otáčkách a větším zatížení. Naopak asynchronní stroje na grafu vpravo dosahují lepších účinností při vyšších otáčkách a nižším zatížení. Lze z toho tedy vyvodit, že synchronní stroje jsou vhodné pro aplikace, kde je na jejich hřídel připojena velká zátěž, což v případě letadel bývají právě turbíny hlavních motorů, které se typicky otáčejí rychlostí v rozmezí 2500 - 4500 otáček za minutu [97]. Asynchronní stroje jsou naopak vhodné pro aplikace vyžadující vysoké otáčky bez nutnosti vysokých momentů. Na palubě letadel jsou tyto vlastnosti vhodné například jako pohon čerpadel.

Graf 2.20 porovnává účinnosti asynchronních strojů se stejnosměrnými stroji pro stejné aplikace v závislosti na otáčkách. Z grafu lze vyčíst, že asynchronní stroje jsou obecně efektivnější než stejnosměrné. Při porovnání ceny obou typů strojů bývají stejnosměrné stroje i přes nižší účinnost dražší. A to primárně díky jejich složité konstrukci, která obsahuje komutátor, což je komplexní součástka a kartáče, které vyžadují častou údržbu [100].



Obr. 2.19: Grafy účinností typických synchronních strojů s permanentními magnety vzácných zemin (vlevo) a asynchronních strojů (vpravo) [98].



Obr. 2.20: Graf účinností typických asynchronních a stejnosměrných motorů [99].

3 Nároky na elektrické stroje v letectví

Každá komponenta v letadle je vystavována vysokému stresu okolních podmínek a v žádném případě nesmí za provozu selhat. Při porovnání komponent v automobilech a letadlech je očividné, že jakákoliv porucha vede k zásadně odlišným následkům. Automobil lze odstavit u silnice, pro letadlo letící ve výšce přes 10 kilometrů taková možnost neexistuje. Proto se výrobci snaží nejen šetřit provozní náklady, ale zároveň dbají na maximalizaci bezpečnosti. Ta je dále regulována mezinárodně uznávanou normou DO-160G.

3.1 DO-160G

Tato norma představuje standard při testování palubního vybavení, jenž jsou výrobci povinni respektovat. Norma je rozdělena do 26 oddílů a 3 dodatků, které sestávají ze zkoušek vibrací, citlivosti na rádiové frekvence, blesku, elektrostatického výboje a mnoha dalších. Tuto normu uznává Mezinárodní organizace pro normalizaci (ISO) pod názvem ISO-7137. Norma byla naposledy doplněna dodatkem DO-357, který aktualizoval oddíly 4, 5, 7, 8, 10, 11, 15, 16, 17, 18 a 23. [82]

Za sestavení této normy stojí Radiotechnická komise pro letectví (RTCA), která byla založena v roce 1935 jako nezisková organizace vypracovávající technické pokyny pro různá průmyslová odvětví. Normu DO-160 vydali v roce 1975 a nahradili tak předcházející normu DO-138. V průběhu let procházel tento dokument řadou změn a v prosinci 2010 byl uveden s koncovkou G jako nejnovější verze této normy. [101]

V následujícím textu jsou obecně popsány jednotlivé oddíly zkoušek v rámci normy DO-160G. [82]

3.1.1 Oddíl 4.0 - Teplota a nadmořská výška

Zkoušky spadající do tohoto oddílu udávají schopnost komponent letadla odolávat vlivům proměnných teplot a nadmořské výšky. Letadlo jako vysoce výkonný stroj vytváří velké množství tepla, ať už třením mechanických komponent, průchodem velkých proudů generovaných v generátorech s výkonem desítek až stovek kilowattů nebo spalováním leteckého paliva v proudových motorech. Toto teplo je nutné dobře odvádět mimo letadlo a stoje dobře chladit, tak aby nedošlo k požáru nebo jiné poruše vysokou teplotou. Také je nutné, aby komponenty vydržely nízké teploty, ať už v chladných lokalitách nebo v letových hladinách. Dále musí být komponenty odolné vůči vlivům proměnné nadmořské výšky, což je například nízký tlak. Následující kategorie zahrnují různé kvality prostředí v místě instalace.

Tab. 3.1: Limity pro testy oddílu 4.0

Nadmořská výška		Teplota	
A	do 4600 m.n.m.	1	Řízená teplota
B	do 7620 m.n.m.	2	Neřízená teplota
C	10700 m.n.m.	3	Prostor pohonné jednotky
D	do 15200 m.n.m.	4	Překračující limity 1 a 2
E	do 21300 m.n.m.		
F	do 16800 m.n.m.		

Testy [102]

- Pozemní testy - Nejvyšší a nejnižší teploty, kterým může být zařízení vystaveno při provozu na zemi. Od zařízení se neočekává funkčnost, ale přežití bez poškození.
- Provozní testy - Nejvyšší a nejnižší teploty, kterým může být zařízení vystaveno za letu. Hodnoty jsou definovány dle umístění zařízení (v prostoru pohonné jednotky, za přístrojovou deskou, atd.).
- Krátkodobý test za provozu - Krátkodobé vystavení zařízení extrémním teplotám
- Ztráta chlazení za letu - Test selhání chladicího média za letu. Dodatečné hodnoty jako čas doby bez chlazení jsou specificky definovány pro jednotlivá zařízení.
- Dekomprese
- Přetlak

3.1.2 Oddíl 5.0 - Kolísání teploty

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují výkonnost zařízení při kolísání teplot mezi extrémy. Následující kategorie určují míru kolísání v závislosti na umístění zařízení.

- A - Externí či interní zařízení: 10°C za minutu.
- B - Zařízení v teplotně neřízeném nebo částečně řízeném prostředí: 5°C za minutu.
- Zařízení v teplotně řízeném prostředí: 2°C za minutu.
- S1 - Externí či interní zařízení se známou změnou teploty vyšší než 10°C za minutu.
- S2 - Externí či interní zařízení s neznámou změnou teploty vyšší než 10°C za minutu.

3.1.3 Oddíl 6.0 - Vlhkost

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují schopnost zařízení odolávat vlivům vlhkosti, ať se jedná o korozi či změnu funkčnosti vlivem vlhkosti. Příklad zkoumaných vlivů jsou například: u kovů (mechanické vlastnosti), u vodičů a izolantů (elektrické vlastnosti), u izolantů (teplotní vlastnosti) a u hygroskopických prvků (chemické vlastnosti). Následující kategorie rozdělují zařízení vystavení vlhkosti.

- A - Standardně vlhké prostředí - Prostředí letadel ve kterém se vlhkost běžně nevyskytuje (kabina).
- B - Závažně vlhké prostředí - Prostředí bez řízení (např. ECS), které může být po delší dobu vystaveno atmosférickým vlivům.
- C - Exteriér - Zařízení, které je po delší dobu vystaveno přímým vlivům venkovního prostředí.

3.1.4 Oddíl 7.0 - Provozní otřesy a bezpečnost při nárazu

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují schopnost zařízení pracovat při zatížení nárazem. Jedná se o otřesy vzniklé při klasickém provozu letadla jako je třeba taxi, přistávání, přejezd přes nerovnost na runwaysi nebo v případě turbolencí. Tento oddíl poskytuje dvě otřesové křivky: standardní 11 ms pulz a nízkofrekvenční 20ms pulz. Pro specifická zařízení, pro která může být 20ms pulz nedostatečným testovacím ukazatelem, jelikož vyžadují déletrvající testy s frekvencí pod 100 Hz, lze testovat pulzy trvající 100ms. Bezpečnost při nárazu testuje kvalitu uchycení zařízení ke kostře letadla. Tyto testy se nevztahují na sedadla apod. Následující kategorie dělí zařízení podle požadované odolnosti vůči nárazu.

- A - Zařízení zatížená standardními provozními nárazy
- m B - Zařízené zatížená standardními provozními nárazy a je testováno pro bezpečnost při nárazu
- D - Zařízení zatížená nízkofrekvenčními provozními nárazy
- E - Zařízené zatížená nízkofrekvenčními provozními nárazy a je testováno pro bezpečnost při nárazu nízkofrekvenčními nárazy

3.1.5 Oddíl 8.0 - Vibrace

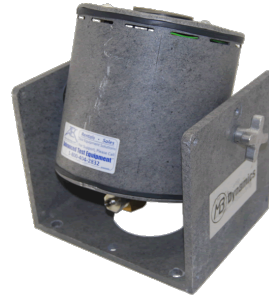
Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují odolnost zařízení vůči vibracím. Zařízení se při vibracích nesmí poškodit a musí si zachovat funkčnost. Následující kategorie rozdělují zařízení podle síly vibrací, kterým jsou vystavena. K testování vibracemi lze využít mnoho pokročilých strojů, např. Cincinnati Sub-Zero TCB-1.3 (viz. Obr.3.1a) nebo MB Dynamics PM250HP (viz. Obr.3.1b). [103]

- S - Standardní vibrace

- R, U, U2 - Silné vibrace
- H, Z - Vysokoúrovňové krátkodobé vibrace



(a) Cincinnati Sub-Zero TCB-1.3 [104]



(b) MB Dynamics PM250H [105]

Obr. 3.1: Vibrační technika využívaná k testům oddílu 8.0.

3.1.6 Oddíl 10.0 - Voděodolnost

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují voděodolnost zařízení proti postřiku či pokapání vodou nebo kondenzaci na povrchu. Nejsou tímto testována hermeticky uzavřená zařízení, která tento test automaticky splňují. Následující kategorie dělí zařízení podle prostředí ve kterém se nachází.

- Y - Zařízení se nachází v prostředí, kde může za normálních provozních podmínek kondenzovat voda.
- W - Zařízení se nachází v prostřední, kde může být vystaveno kapající vodě vzniklé kondenzací.
- R - Zařízení se nachází v prostředí, kde může být vystaveno dešti.
- S - Zařízení se nachází v prostředí, kde může být vystaveno proudu tekoucí vody (umývání letadla, rozmrazování ledu na křídlech).

3.1.7 Oddíl 11.0 - Citlivost na kapaliny

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují schopnosti materiálů, ze kterých se zařízení skládá, odolnost vůči působení různých kapalin. Tomuto testu jsou podrobeny pouze zařízení, které jsou umístěny v prostředí, ve kterém se mohou s takovými kapalinami setkat. Kapaliny, jež jsou součástí testu jsou ty, které se běžně využívají v letadlech.

Kategorie F - Zařízení splňuje požadavky proti působení kapalin v letadle.

3.1.8 Oddíl 12.0 - Prach a písek

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují odolnost zařízení vůči vyfukovanému písku a prachu. Test je zaměřen na to, jestli se částice dostanou do zařízení skrz praskliny, štěrby či spojení, které by mělo za následek ucpání a nefunkčnost zařízení. Dále jestli částice vytváří vodivé mosty, které by mohli vézt ke zkratu nebo by na sebe mohli navazovat vodní výpary, což by mělo za následek korozi.

- D - Zařízení je odolné proti prachu.
- S - Zařízení je odolné vůči prachu a písku.

3.1.9 Oddíl 13.0 - Odolnost proti plísním

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují jestli je zařízení dobrým médiem pro růst plísní. Nejčastější problémy způsobené plísněmi jsou:

- Rozklad organických materiálů a snižování pevnosti povrchu
- Koroze kovů
- Vytváření vodivých mostů, které mohou vést ke zkratu
- Zdravotní obtíže

Kategorie F - Zařízení je odolné vůči působení plísní.

3.1.10 Oddíl 14.0 - Solná mlha

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují zařízení při vystavení atmosféře se zvýšeným obsahem soli, typicky přímořské lokace. Sůl ve vzduchu způsobuje: korozi kovů, ucpání mechanických součástí, poruchy v izolaci či poškození kontaktů a nekryté kabeláže.

- S - Zařízení je vystaveno slané atmosféře při provozu.
- T - zařízení je vystaveno slané atmosféře mimo provoz (zaparkované letadlo).

3.1.11 Oddíl 15.0 - Magnetismus

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují do jaké míry ovlivňuje magnetické pole zařízení ostatní součástky letadla (kompas). Účinek magnetického pole zařízení je určen podle výchylky volného magnetu v magnetickém poli Země o vodorovné intenzitě 14,4 A/m \pm 10%. Následující kategorie dělí zařízení dle blízkosti, do které může být umístěno ke kompasu.

- Y - $D = 0,0$ m. Výchylka kompasu je $\leq 1^\circ$, když bylo zařízení umístěno v těsné blízkosti magnetu.
- Z - $0 < D \leq 0,3$ m. Výchylka kompasu je rovna 1° , když bylo zařízení umístěno ve vzdálenosti do 30 cm v blízkosti magnetu.

- A - $0,3 < D \leq 1$ m. Výchylka kompasu je rovna 1° , když bylo zařízení umístěno ve vzdálenosti do 1 m v blízkosti magnetu.
- B - $1 < D \leq 3$ m. Výchylka kompasu je rovna 1° , když bylo zařízení umístěno ve vzdálenosti do 3 m v blízkosti magnetu.
- C - $D > 3$ m. Výchylka kompasu je rovna maximálně 1° , když bylo zařízení umístěno ve vzdálenosti 3 m v blízkosti magnetu.

3.1.12 Oddíl 16.0 - Příkon

Zkoušky spadající do tohoto oddílu certifikují zařízení pro užití ve specifickém elektrickém systému dle napětí a frekvence. Následující kategorie dělí zařízení dle průběhu napětí, jeho velikosti a frekvenci při jakém pracují.

- A (CF) - Zařízení využívající střídavé napětí v systémech s frekvencí 400Hz.
- A (NF) - Zařízení využívající střídavé napětí v systémech s proměnnou frekvencí 360 - 650Hz.
- A (WF) - Zařízení využívající střídavé napětí v systémech s proměnnou frekvencí 360 - 800Hz.
- A - Zařízení využívající stejnosměrné napětí na hladině $28V_{dc}$.
- B - Zařízení využívající stejnosměrné napětí na hladině $28V_{dc}$ nebo $14V_{dc}$ v elektrických systémech napájených z alternátorů/usměřovačů řízených motorem nebo stejnosměrným generátorem.
- D - Zařízení využívající stejnosměrné napětí na hladině $270V_{dc}$ v elektrických systémech napájených ze střídavého systému.
- Zařízení využívající stejnosměrné napětí na hladině $28V_{dc}$ v elektrických systémech napájených z generátorů s proměnnými otáčkami, kde stejnosměrný zdroj nemá baterii připojenou na stejnosměrnou sběrnici, ochranné prvky mohou odpojit baterii od sběrnice nebo kde je kapacita baterie nedostačující v porovnání s kapacitou generátorů stejnosměrného proudu.

3.1.13 Oddíl 17.0 - Přepětí

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují schopnost zařízení ustát vlivy přepětí jak ve střídavých obvodech, tak ve stejnosměrných. Je zjišťováno nejen trvalé poškození zařízení, ale také jeho zhoršená výkonnost, které se může projevit například sníženou citlivostí. Následující kategorie dělí zařízení dle míry ochrany proti přepětí.

- A - Zařízení je určeno k instalacím s vysokou mírou ochrany proti přepětí.
- B - Zařízení je určeno k instalacím s nižší mírou ochrany proti přepětí.

3.1.14 Oddíl 18.0 - Vodivost zvukové frekvence - Napájecí vstupy

Zkoušky spadající do tohoto oddílu určují, zda zařízení přijme frekvenční složky o velikosti, která se běžně očekává při instalaci zařízení v letadle.

- R(CF), R(NF), R(WF) a R - Zařízení spadající do této kategorie jsou určena do letadel jejichž primární napájení je z transformátorových usměrňovačů.
- B - Zařízení spadající do této kategorie jsou určena do letadel jejichž elektrický systém je napájen motorem řízeným alternátorem/usměrňovačem nebo stejnosměrným generátorem, kde je na stejnosměrné sběrnici umístěna vysokokapacitní baterie
- Z - Stejnosměrná zařízení, která mohou být použita v ostatních elektrických systémech. Jedná se například o stejnosměrný systém napájený VF generátorem s žádnou nebo jen nízkokapacitní baterií připojenou k DC sběrnici.
- K - Zařízení určená do střídavých systémů s vysokou mírou zkreslení napětí

3.1.15 Oddíl 19.0 – Citlivost na indukované signály

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují zda konfigurace obvodu zařízení přijme úroveň naindukovaného napětí vlivem okolního prostředí. Jedná se především o rušivé signály vyvolané zvukovou frekvencí, přechodovými jevy nebo vodiči. Následující kategorie dělí zařízení dle podle systémů ve kterých je provedena instalace.

- C - Použití v elektrických systémech bez rušení a se silnými vazbami v důsledku dlouhého vedení nebo minimálního oddělení vodičů.
- Z - Použití v elektrických systémech bez rušení.
- A - Použití v elektrických systémech kde je provoz bez rušení upřednostňován.
- B - Použití v elektrických systémech kde je rušení potlačeno na únosnou hranici.

Následující podkategorie dělí zařízení dle frekvence letadel, ve kterých jsou instalovány.

- C - Instalace v letadlech s primárním AC napájením o konstantní frekvenci nebo s primárním DC napájením.
- N - Instalace v letadlech s primárním AC napájením s úzkým frekvenčním rozsahem (např. 350 - 650Hz).
- W - Instalace v letadlech s primárním AC napájením s širokým frekvenčním rozsahem (např. 350 - 800Hz).

3.1.16 Oddíl 20.0 – Citlivost na rádiové frekvence

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují zda bude zařízení pracovat dle udávaných specifikací pokud je vystaveno vlivům radiových frekvencí. Testy se dělí do dvou

části: testování rádiovými signály 10kHz - 100MHz a 100MHz - hodní frekvenční limit. Výsledkem těchto testů je zjištění odezvy zařízení na rádiové signály.

3.1.17 Oddíl 21.0 – Emise radiofrekvenční energie

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují do jaké míry zařízení emituje nežádoucí vysokofrekvenční šum, který by mohl negativně ovlivnit další komponenty letadla. Následující kategorie určují vzdálenost zařízení od rádiových antén letadla.

- B - Emise je v rámci tolerovaných mezí.
- M - Zařízení není přímo v dohledu antény (např. kokpit dopravního letadla, kabina pro cestující)
- H - Zařízení je přímo v dohledu antény přijímače. Nejčastěji se tato kategorie uplatňuje pro zařízení na exteriéru letadla.
- P - Zařízení je v blízkosti například antény GPS, nebo kde konstrukce letadla poskytuje dostatečné stínění.
- Q - Mimo detaily podobné kategorii P.

3.1.18 Oddíl 22.0 – Citlivost na přechodné jevy vyvolané bleskem

Zkoušky spadající do tohoto oddílu ověřují schopnost zařízení odolat vlivům přechodných jevů způsobené zásahem blesku. Zkouška se dělí do dvou částí, první je tolerance poškození, druhá hodnotí toleranci funkčních poruch při průchodu přechodového jevu. Certifikace se dělí do 6 kategorií dle tabulkových hodnot dosažených při testech.

3.1.19 Oddíl 23.0 – Přímé vlivy blesku

Zkoušky spadající do tohoto oddílu zjišťují schopnosti externě instalovaného zařízení ustát zásah blesku. Součástí tohoto oddílu nejsou zkoušky napětí a proudu naindukovaného v zařízení při zásahu. Testovaná zařízení jsou například: antény, sondy pro měření údajů vzduchu, vnější světla a čidla, zařízení proti námraze, víka palivových nádrží a vypouštěcí ventily. Externí zařízení, na která se tento oddíl nevztahuje (např. ne/vyhřívána přední skla) jsou testována přímo výrobcem dle certifikačních programů udávaných přímo výrobcem letadla. Zkoušky sestávají z testu upevnění při vysoké napětí a test fyzického poškození při vysokém proudu. Test vysokého napětí je využíván k určení pravděpodobného místa zásahu blesku na zařízení. Test vysokého proudu určuje míru poškození při zásahu bleskem. Následující kategorie dělí zařízení do bleskových zón.

- 1A - Všechny oblasti letadla, kde je pravděpodobný první zpětný ráz při upevnění bleskového kanálu s nízkým předpokladem zavěšení blesku.

- 1B - Všechny oblasti letadla, kde je pravděpodobný první zpětný ráz při upevnění bleskového kanálu s vysokým předpokladem zavěšení blesku.
- 1C - Všechny oblasti letadla, kde je pravděpodobný první zpětný ráz se sníženou amplitudou během připojení bleskového kanálu s nízkým předpokladem zavěšení blesku.
- 2A - Všechny oblasti povrchu letadla, kde je pravděpodobný následný zpětný ráz s malým očekáváním zavěšení blesku.
- 2B - Všechny oblasti povrchu letadla, do kterých pravděpodobně zasáhne bleskový kanál s následným zpětným rázem s vysokým očekáváním výskytu blesku.
- 3N - Pro zařízení umístěno v oblasti letadla, která má nové prvky, které by mohly snížit ochranu oproti klasickým prvkům

3.1.20 Oddíl 24.0 – Námraza

Zkoušky spadající do tohoto oddílu ověřuje schopnost zařízení pracovat při vystavení námraze. Testy se dělí do tří skupin: vliv vnější námrazy, která na zařízení ulpí, účinky ledu způsobené zmrznutím vodní kondenzace nebo opětovným zmrznutím roztátého ledu, účinky nánosů ledu způsobených přímým působením vody. Následující kategorie dělí zařízení dle místa instalace.

- A - Zařízení je instalováno externě nebo v místě bez řízení teploty, kde může námraza vzniknout důsledkem kondenzace
- B - Zařízení s pohyblivými částmi, jejíž pohyb by mohl být následkem námrazy omezen nebo by se napínáním mohlo zařízení poškodit.
- C - Zařízení je instalováno externě nebo v místě bez řízení teploty, kde může dojít k hromadění kapek vody a vytvořit vrstva ledu.

3.1.21 Oddíl 25.0 – Elektrostatický výboj

Zkoušky spadající do tohoto oddílu testují zařízení, která mohou při kontaktu s člověkem zapříčinit výboj nakumulované statické elektřiny. Faktory, které zvyšují šance na vznik výboje jsou například: nízká vlhkost, teplota, nevodivé koberce, vinylová sedadla a plastové konstrukce a obložení. Tato zkouška se vztahuje na všechna zařízení, která mohou při provozu letadla přijít do styku s člověkem. Zařízení jsou testována 20 elektrostatickými výboji o napětí 15 000V, 10 v každé polaritě.

Kategorie A - Zařízení, které je provozováno během běžného provozu nebo údržby letadla.

3.1.22 Oddíl 26.0 – Oheň a hořlavost

Poslední oddíl normy popisuje zkoušky, které testují odolnost zřízení proti ohni a zároveň jak zařízení předchází vzplanutí. Následující kategorie rozdělují zařízení dle místa instalace a odolnosti proti ohni.

- A - Platí pro zařízení instalovaná v požárních zónách, která si musí zachovat funkčnost po alespoň prvních 5 minut od vypuknutí požáru a musí si zachovat bezpečnostní funkce po 15 minut. V případě, že zařízení obsahují tekutiny, nesmí jejich únik podporovat hoření. Zařízení musí také zůstat pevně připevněno ke konstrukci.
- B - Platí pro zařízení instalovaná v požárních zónách, která nesmí podpořit nebezpečné podmínky při požáru, ani když dojde k narušení jejich schránky do 5 minut od vypuknutí požáru. Pokud obsahují tekutiny platí to, co v kategorii A.
- C - Platí pro rozvodné skříně a další konstrukce tohoto typu v nichž je umístěna elektronika a elektrotechnika, umístěné v nepožárních zónách. Ověřuje se zda nedojde k šíření plamene v případě vznícení uvnitř konstrukce.

4 Budoucnost elektrifikace letecké dopravy

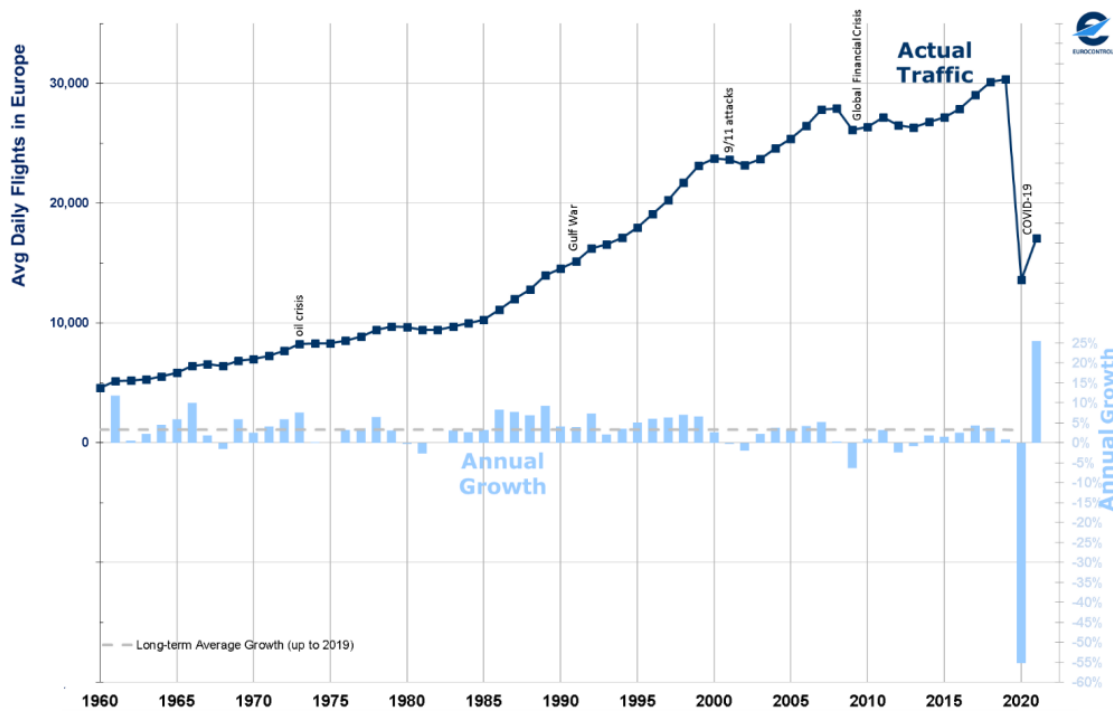
Jak již bylo zmíněno v předchozích kapitolách, letecká doprava se stále vyvíjí, nové technologie nahrazují ty staré, komponenty prochází neustálou optimalizací a výrobci letadla stále hledají nové způsoby, jak celé letadlo zlevnit nejen co se výroby týče, ale také z hlediska provozních nákladů. Letadlo, které generuje velký zisk a zároveň minimalizuje výdaje bude logicky mezi odběrateli nejvíce žádané. Lze tedy očekávat, že elektrifikace bude nadále pokračovat a tempo bude narůstat. Toto tvrzení diskutuje rozsáhlý průzkum od evropské organizace zabývající se právě rozvojem letecké dopravy EUROCONTROL. Ta představuje pohled na evropskou leteckou dopravu až do roku 2050 a předpokládá nejen její složení, ale také míru emisí, či výzvy, které jí stojí v cestě. Průzkum však nepojednává pouze o dálkových letech, ale je zde kladen důraz i na regionální lety krátkého a středně krátkého dosahu. Právě zde je elektrifikace nejaktivnější. Tyto krátké trasy představují ideální začátek pro vývoj plně elektrických letadel. Jelikož je však vývoj teprve v začátcích, nová letadla se potýkají se suboptimálním financováním, nerozvinutým trhem a náročnou legislativou. Proto je mezi mnoha inovátorskými společnostmi zájem o projekt Urban Air, který umožňuje posunout vývoj elektrických letadel kupředu za nižší výrobní cenu, než kdyby byla snaha o výrobu plně elektrických alternativ k transkontinentálním jumbo jetům známých od Airbusu či Boeingu.

4.1 Předpokládaný vývoj

EUROCONTROL, což je evropská organizace pro bezpečnost leteckého provozu, v srpnu roku 2022 představila studii, ve které rozebírá možný vývoj letectví do roku 2050. Rok 2050 je pro tuto studii klíčový z důvodu předsevzetí, které stanovila Evropská Unie v rámci Green Deal, že evropský letecký průmysl dosáhne do tohoto roku uhlíkové neutrality. Studie očekává v tomto roce 16 miliónů letů ve vzdušném prostoru Evropské Unie, což by byl oproti roku 2019 posun o markantních 44%. Důležitým aspektem, který tato studie bere v úvahu je pandemie Covid-19, která měla za následek téměř úplné zastavení jakýchkoliv letů z čehož se letecký průmysl bude několik budoucích let vzpamatovávat než dosáhne původních hodnot.

Uhlíkové neutrality je v plánu dosáhnout několika způsoby (viz. Obr.4.2):

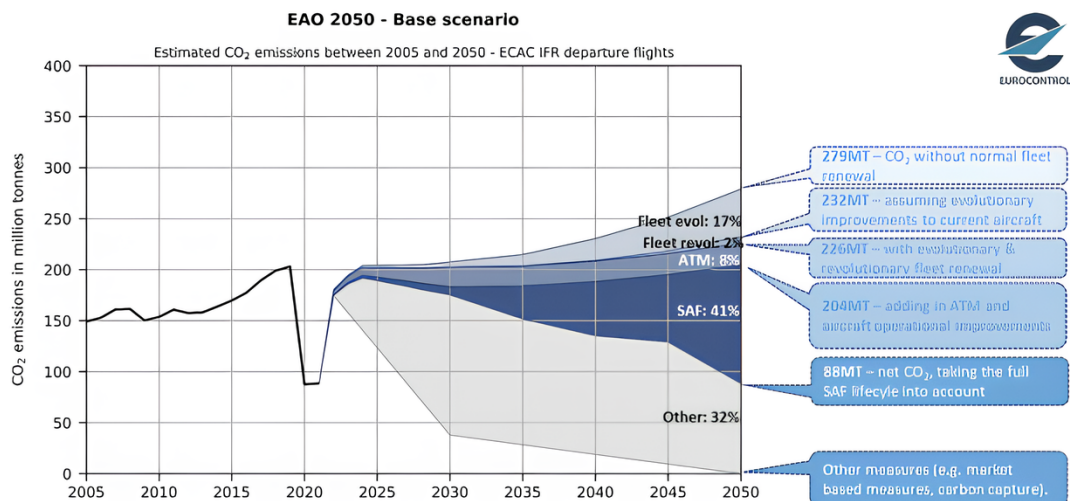
- Efektivnější klasická letadla (17%)
- Elektřinou a vodíkem poháněná letadla (2%)
- Zlepšení práce letové kontroly a operování aerolinek (8%)
- Trvale udržitelné palivo (41%)
- Ostatní opatření (32%)



Obr. 4.1: Detailní zobrazení vývoje denního počtu letů v Evropě [106]

Od roku 1960, kdy byl denní průměr letů pod 5000, toto číslo stabilně rostlo (viz. Obr.4.1). Mezi lety 1988-2007 se roční počet letů zdvojnásobil z 5 miliónů na 10 miliónů. Tento strmý růst byl zpomalen až světovou finanční krizí na přelomu let 2007 a 2008. Finanční situace má tedy zásadní dopad na stav leteckého průmyslu. V současnosti je světový trh značně býčícího charakteru, takže lze předpokládat nadálý růst i v letectví.

Dle EUROCONTROL by měla mít na vývoj letectví v Evropě zásadní negativní dopad také iniciativa na výstavbu vysokorychlostních železničních tratí spojující největší evropské metropole a zároveň renovace stávajících tratí za účelem zvýšení rychlosti. V současnosti operuje v různých zemích velké množství různých železničních dopravců, což má za následek mnoho přestupů při cestě po dlouhých na dlouhých trasách. Například pokud se potřebuje člověk dopravit z Prahy do Paříže, tak vlakem to lze stihnout nejrychleji za více než 12 hodin. Nejen, že už doba cesty mnoho potenciálních pasažérů může odradit, ale po cestě je nutné provést 3 přestupy. Zpoždění jednoho spoje tedy může mít fatální dopad na úspěch celé cesty. Dalším diskomfortem je fakt, že nelze koupit jednu jízdenku a aplikovat ji pro každý spoj z důvodu několika různých dopravců. Pokud by tedy výstavba a modernizace nové železniční sítě znamenala zjednodušení, sjednocení a značné zrychlení evropských železnic, velké množství lidí by si jistě zvolilo dopravu vlakem než letadlem, která bývá nejen dražší, ale také limitovanější z pohledu frekvence letů po jedné trase.



Obr. 4.2: Předpoklad dopadu různých opatření na množství emisí CO₂ [106]

Z ekologické stránky se jedná o téměř jistou volbu ve prospěch vlakové dopravy, jelikož dnes již plně elektrizovaná mezistátní vlaková doprava má oproti té letecké zanedbatelný dopad na produkci emisí skleníkových plynů.

Tab. 4.1: Tabulka porovnání železniční a letecké dopravy mezi evropskými metropolemi

Start	Cíl	t_{vlak}	t_{letadlo}
Praha	Paříž	12h 43m	1h 40m
Řím	Barcelona	17h 13m	1h 40m
Londýn	Berlín	8h 55m	1h 40m
Amsterdam	Budapešť	13h 38m	1h 55m
Atény	Bukurešť	15h 42m	1h 30m
Madrid	Lisabon	9h 11m	1h 20m
Kodaň	Vídeň	14h 14m	1h 40m
Stockholm	Oslo	5h 31m	55m
Varšava	Záhřeb	14h 40m	1h 40m

V tabulce 4.1 jsou porovnány železniční spoje a letecké spoje mezi různými evropskými metropolemi dle času cesty. Města jsou volena náhodně tak, aby byla zachována logika průzkumu. Jsou vybrána pouze města s počtem obyvatel nad 500 tisíc a vzdálená od sebe tak, aby cesta letadlem nebyla jedinou reálnou volbou. Z výsledků vyplývá, že je mnohem lepší volbou cestovat letadlem než vlakem, jelikož úspora času se v mnoha případech pohybuje nad 10 hodin, i s přihlédnutím k

čekací době na letištích a dopravou na ně i z nich. Za předpokladu, že v Evropě vznikne centralizovaná vysokorychlostní železniční síť, cesta vlakem se stane silným konkurentem letecké dopravy a pravděpodobně bude mít znatelný vliv na její vývoj.

V následujících podkapitolách jsou rozebrány jednotlivé kroky vedoucí k bezemisní letecké dopravě do roku 2050 dle EUROCONTROL.

4.1.1 Vývoj letadel a technologií

Jedná se o klíčový krok, který je potřeba provést směrem k ekologičtější letecké dopravě. Stávající letadla stále využívají mnohem více paliva, než z něj vyrobí užitečné energie. Nejvyšší dopad na produkci emisí mají dálkové lety nad 4000km. V roce 2019 bylo letů nad 4000km odlétajících z evropského vzdušného prostoru pouze 6%, ale jejich podíl na emisích byl celých 46%. Naopak lety do 500km tvořily 30%, ale jejich dopad na emise byl pouze 7%. Z toho vyplývá, že letadlo letící trasu přes 4000km je až 32krát méně úsporné jako letadlo letící trasu do 500km. Z těchto údajů lze usoudit několik věcí. Dálková letadla jsou již z principu méně úsporná, jelikož musí přepravovat co nejvíce pasažérů najednou, aby se cesta ekonomicky vyplatila, což má dopad na velikost a hmotnost letadla. Tyto dvě veličiny již sami o sobě způsobují vyšší palivovou náročnost letadla. Také na to mají dopad samotné fáze letu. Lety do 500km a nad 4000km mají totožné všechny letové fáze až na tu, kdy je letadlo tzv. En Route (Na cestě). V této fázi letadlo překonává největší vzdálenost a také dosahuje nejvyšší rychlosti. Vyšší rychlost má za následek vyšší spotřebu paliva a po čím delší dobu letadlo spotřebovává velké množství paliva, tím více emisí produkuje. Základní scénář EUROCONTROL pro rok 2050 uvažuje téměř stejné procentuální složení letů dle vzdáleností a také jejich podíl na emisích.

EUROCONTROL dále porovnává jednotlivé evoluční či revoluční změny ve složení letadel. Dle optimistického scénáře by již v roce 2025 mohla být uvedena do provozu elektrická letadla operující na krátkých a velmi krátkých trasách. V případě základního scénáře by nejdříve (již před rokem 2030), mohli vejít do provozu turbovrtulová letadla se specifikacemi podobných regionálním letadlům. Dle pesimistického scénáře je také jako první změna na řadě zavedení elektrických letadel, avšak až v roce 2035. Vzhledem k již existujícím konceptům elektrických letadel a legislativním řešení v průběhu by rok 2025 mohl být tím rokem, kdy budou elektrická letadla převážet první pasažéry, i když jen na malém měřítku. V průzkumu je zmíněna i možnost hybridních pohonů mísící jak elektřinu, tak vodík. Použití H_2 však dle předpokladů není pro letecký průmysl prioritou, a proto je zavedení letadel s vodíkovým pohonem dle optimistických scénářů předpokládáno až v roce 2035. Dále patří mezi 12 r/evolučních letadel hybridní letouny poháněné jak leteckým palivem, tak elektřinou a také modernizovaný Airbus A220. Do roku 2035 je předpokládáno,

že 34% letadel budou evoluční modely (nová generace klasických letadel) a 2% budou revoluční (elektrická, vodíková a hybridní letadla). V roce 2050 by pak mělo být až 89% letadel evolučních a 8% revolučních.

Do první kategorie opatření spadá zlepšení práce letové kontroly a provozu jednotlivých letadel. Toho lze docílit například volbou více palivově efektivních tras letu, snížení času, kdy letadlo navigováno po letišti (taxi), času, kdy musí čekat na pokyn od věže pro povolení odletu a efektivnější váhové a palivové rozložení v letadle.

Druhá kategorie se týká udržitelných paliv. Hlavní výhodou pro zavedení těchto paliv je adaptabilita na letadla, která jsou již v provozu. Udržitelná paliva jsou vyvíjena tak, aby mohla v konvenčním letadle nahradit fosilní palivo bez jakýchkoliv úprav na letadle samotném. I přestože se nejedná o zcela bezuhlíkové palivo, dle odhadů by mohlo dojít až k 80% poklesu emisí. V roce 2025 by mělo udržitelné palivo tvořit 2% používaných paliv a dále by mělo růst až na 63% v roce 2050. Implementace udržitelného paliva je pomalá, jelikož jeho výroba je oproti standardnímu palivu značně nákladnější. Ovšem postupem času, jak se budou vylepšovat technologie, bude docházet ke snižování výrobních nákladů, a tedy celkové ceně paliva.

Třetí kategorie zahrnuje primárně evropskou iniciativu Green Deal, která má zaštitovat změny prováděné v leteckém průmyslu. V jednoduchosti se jedná o snižování příspěvků aerolinkám, které nespĺňují emisní normy. Od roku 2024 má být příspěvek snížen o 25% a dalších 25% z původního příspěvku každý následující rok. Což by znamenalo, že od roku 2027 budou letecké společnosti zcela bez příspěvků, pokud nebudou plnit stanovené emisní cíle.

4.2 eVTOL

Electric vertical takeoff and landing aircraft (eVTOL), neboli elektrické letadlo schopné kolmého vzletu a přistání patří mezi projekty se kterými se do budoucna počítá jako alternativa k letecké ale i pozemní dopravě. Tyto malá letadla spojují výhody obou způsobů dopravy. Umožňují cestujícím rychlou dopravu v rámci velkých měst, která jsou přehušťena auty a zároveň nevnáší negativní vliv na ovzduší spalováním fosilních paliv, jelikož celý pohonný systém těchto letadel postavený na čistě elektrické energii. Jelikož je tento způsob dopravy pouze v začátcích a sériová výroba zatím neprobíhá, cena letadel bude dle předpokladů poměrně vysoká, a to se zároveň promítne i do ceny letenek. Zde se nabízí přirovnání k letadlu Concorde, které taktéž nabízelo za vysokou cenu letenek značně redukovanou dobu letu. První trasy letadel eVTOL by tak mohli spojovat letiště a významná obchodní centra uvnitř světových metropolí. Za předpokladu, že v začátcích tento způsob dopravy budou

využívat primárně majetnější lidé, kteří přiletěli za účelem obchodu a čas, který by strávili v dopravních zácpách by byl nevhodný.



Obr. 4.3: Lilium Jet [107]



Obr. 4.4: Joby Aviation JAS4-1 [108]

Technologický vedoucí ve společnosti Lilium, zabývající se vývojem a výrobou letadel eVTOL, Alastair McIntosh v rozhovoru [109] popisuje model Lilium Jet (viz. Obr. 4.3). Toto letadlo disponuje 36 samostatně ovládanými motory, které jsou řízeny třemi počítači kontroly letu od společnosti Honeywell. Pokud jeden motor selže, ostatní převezmou jeho zátěž, což značně zlepšuje bezpečnost celého stroje. Dále uvádí, že letadlu trvá 10-25 sekund od odlepení od země po vystoupení do požadované výšky, ve které bude moci přejít z vertikálního do horizontálního pohybu. V opačném případě, když se letadlo připravuje k přistání a přechází z horizontálního pohybu do vertikálního, celý proces trvá přibližně 20 sekund. Tyto dvě fáze je



Obr. 4.5: Archer Aviation Midnight [110]

potřeba provést v co nejvyšší rychlosti, jelikož vertikální pohyb je až 10krát energeticky náročnější než pohyb horizontální. Lilium Jet disponuje bateriemi, které jsou vyrobeny tak, aby zvládly 800 cyklů. Jejich nabíjení by mělo trvat 30 minut a při použití rychlo-nabíjecího systému, na kterém pracuje Lilium společně s ABB, by nabití mělo trvat pouze 15 minut. Jedno letadlo by tak dle odhadů mohlo zvládnout přes 20 letů denně.

Didier Papadopoulos, který je vedoucí programového a systémového vývoje v Joby Aviation, jejichž prototyp (viz. Obr.4.4) je už několik let na světě, v rozhovoru [109] popisuje jeho konstrukci. Letadlo má dohromady 6 vrtulí, každá vrtule pak disponuje dvěma motory, měniči a čtyřmi bateriovými soubory. Značně automatizovaný řídicí systém, který si v Joby Aviation sami navrhli, zaručuje maximální bezpečnost z jakýchkoliv okolností. Pro cesty blížící se 40 kilometrům se při vývoji podařilo dosáhnout dobití baterií v kratším čase než dojde k vystoupení a nastoupení pasažérů, což dále přidává na komfortu letu a zredukuje prodlevu mezi přiletem a odletem.

Spoluzakladatel společnosti Archer Aviation Brett Adcock v rozhovoru [109] říká, že v jejich připravovaný letoun (viz. Obr. 4.5) bude sestávat z 12 rotorů, přičemž pro vertikální pohyb je jich v krajním případě potřeba 10 a při horizontálním pohybu jsou potřeba pouze 4. Jako další významnou výhodu letadel eVTOL a primárně jejich modelu považuje Adcock nízko-nákladovou údržbu, která v porovnání s konvenčními helikoptéry na kterých náklady na údržbu činí až třetinu celkových

provozních nákladů bude dle plánu značně redukována. Tomu napomáhají především elektrické pohonné systémy, od nichž se očekává zvýšená spolehlivost oproti spalovacím motorům.

4.2.1 Analýza konkurenceschopnosti letadel eVTOL

Byl proveden průzkum doby dopravy z letiště do zvoleného místa s heliportem, jež byl mohlo být preferovanou destinací pasažérů. Průzkum byl zpracován za pomoci Google Maps pro datum pondělí 11.3.2024 s časem odletu/odjezdu 7:30 místního času. Pro cestu letadlem byla uvažována vzdálenost vzdušnou čarou, pro auta to byla softwarem doporučená trasa.

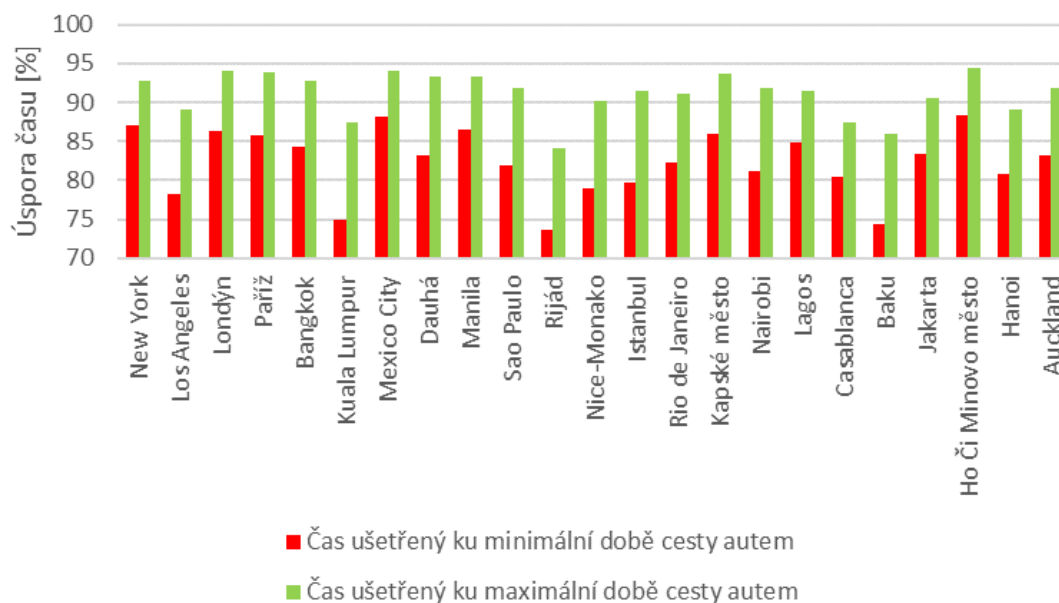
Vzorec pro výpočet doby letu letadla:

$$t_{\text{let}} = t_{\text{vzlet}} + t_{\text{přistání}} + \frac{s_{\text{let}}}{(v_{\text{max}} * k)} \quad (4.1)$$

- t_{vzlet} (doba než je letadlo připraveno k horizontálnímu pohybu) = 25 s [109]
- $t_{\text{přistání}}$ (doba přechodu od horizontálního pohybu k přistání) = 20 s [109]
- v_{max} (cestovní rychlost) = 67 m s^{-1} [111]
- k (koeficient zrychlení - bere v úvahu dobu zrychlování a zpomalování) = 0,8
- s_{let} (letová vzdálenost)

Tab. 4.2: Tabulka porovnání doby cesty autem a letadlem eVTOL

Město	Start	Cíl	s_{auto} [km]	t_{auto} [min]	s_{let} [km]	t_{let} [min]
New York	Letiště J.F.K.	One World Trade Center	41,8	50-90	18,5	6,50
Los Angeles	Letiště LA Int.	U.S. Bank Tower	29,3	30-60	18,5	6,50
Londýn	Letiště Heathrow	22 Bishopsgate	30,3	65-150	26,3	8,93
Paříž	Letiště Charles de Gaulle	Tour Montparnasse	35,2	60-140	24,9	8,49
Bangkok	Letiště Suvarnabhumi	Jewelry Trade Centre	41,1	55-120	25,2	8,59
Kuala Lumpur	Letiště Kuala Lumpur	Menara Telekom	56,8	55-110	41,9	13,78
Mexico City	Letiště Mexico City Int.	Pemex Tower	14,1	35-70	10,8	4,11
Dauhá	Letiště Dauhá Int.	Al Faisal Tower	11,4	18-45	7,3	3,02
Manila	Letiště Ninoy Aquino	Bank of Communication	23,5	40-80	14,9	5,38
São Paulo	Letiště Guarulhos	Edifício Cetenco Plaza	32	50-110	26,6	9,02
Rijád	Letiště Krále Chálida	KAFD Conference Centre	35,4	30-50	23	7,90
Nice-Monako	Letiště Nice	Palazzo Leonardo	32,4	30-65	17,9	6,32
Istanbul	Letiště Sabiha Gökçen	Adalet Sarayi	43,2	55-130	33,3	11,1
Rio de Janeiro	Letiště Galeão	Rio Sul Center	25,1	35-70	17,6	6,22
Kapské město	Letiště Kapské Město	Portside Tower	23,7	45-100	18	6,35
Nairobi	Letiště Jomo Kenyatta	KICC	17	24-55	12,1	4,51
Lagos	Letiště Murtala Muhammed	The Civic Centre	29,9	45-80	19,5	6,81
Casablanca	Letiště Mohammed V	Port of Casablanca	40,8	45-70	25,8	8,77
Baku	Letiště Hejdara Alijeva	SOCAR	20,2	22-40	15,7	5,63
Jakarta	Letiště Sukarno-Hatta	Bank of Indonesia	27,4	40-70	18,9	6,63
Ho Či Minovo město	Letiště Tan Son Nhat	Bitexco Financial Tower	8	24-50	6,6	2,80
Hanoi	Letiště Noi Bâi	Keangnam Landmark 72	28,2	40-70	22,31	7,69
Auckland	Letiště Auckland	Port of Auckland	14,7	22-45	9,4	3,67



Obr. 4.6: Procentuálně vyjádřená úspora času letu letadla eVTOL oproti minimální a maximální době cesty autem

V tomto průzkumu nebyla zohledněna Čína z důvodu nerealistického zobrazení struktury silnic i celých měst. Avšak rychle rostoucí velkoměsta jistě do budoucna představují solidního kandidáta pro Urban Air mobilitu. Dále nebyla uvažována Jižní Korea, jelikož Google Maps zde nekalkuluje osobní automobilovou dopravu, jen hromadnou. Stejně jako Čína však nabízí pro Urban Air trh s vysokým potenciálem. Také zde není zmíněna Indie z důvodu silných restrikcí v oblasti heliportů na výškových budovách. Tento průzkum může sloužit jako motivace pro uvažování o zprovoznění Urban Air mobility v těchto a dalších městech, kde doba dopravy autem mnohonásobně přesahuje dobu letu letadel eVTOL.

Pro fungování Urban Air dopravy je nejprve nezbytné vybudovat dostačující síť přistávacích ploch, protože tam kde se má především využívat, ve městech, není vždy takový komfort dostupný. Například pro Prahu je nejbližší veřejnou přistávací plochou pro vrtulníky heliport Chotouň [112], téměř 40 kilometrů do centra hlavního města a dalších 10 kilometrů na Letiště Václava Havla. Infrastruktura je tedy jednou z klíčových otázek zavedení Urban Air jako alternativy k pozemní dopravě. K využití plného potenciálu letadel je třeba větší vzdálenost mezi jednotlivými destinacemi, aby byl celý proces, co neekonomičtější. Vzdálenější lety budou mít lepší poměr energie spotřebované při vzletu a přistání ku energii využitě pro samotný let. Jak již bylo zmíněno, vzlet a přistání jsou nejvíce energeticky náročné a jsou prakticky konstantní. Z toho důvodu je ideální, aby letadlo spotřebovalo co největší množství energie za letu. Se vzdáleností také roste cena letenek, což umožní přepravním

společnostem lépe financovat službu.

Dalším klíčovým tématem je legislativa. Pro fungování v Evropské Unii musí společnosti nejprve získat certifikaci vydávanou agenturou EASA (Agentura Evropské unie pro bezpečnost letectví). Pro operování ve vzdušném prostoru USA je třeba získat certifikaci vydávanou agenturou FAA. Doposud se žádné společnosti nepodařilo projít celým procesem pro získání plnohodnotné certifikace pro provoz air taxi. Joby v únoru tohoto roku jako první splnila třetí etapu k certifikaci od FAA jejíž součástí bylo poskytnutí veškerých dokumentů popisujících elektrické, mechanické a strukturální rozložení letadla. Pro komercializaci zbývají ještě dvě etapy, nadcházející bude zahrnovat testy a analýzy, aby získala kredity pro jednotlivé prvky letadla, tak i pro letadlo samotné [113]. Lilium jako jediná společnost usilující o certifikaci u EASA a FAA zároveň, kdy v listopadu 2023 získala schválení projekční organizace od EASA a v červnu prošla první etapou u FAA [114]. V případě evropských zemí poté bude stát v cestě následně legislativa jednotlivých států, jak sami budou regulovat tyto letadla. Jakmile bude toto vyřízeno bude implementace Urban Air v rukou měst a obyvatel. Přestože letadla mají pouze elektrický pohon, nelze očekávat, že nebudou vydávat žádný hluk. Hluk způsobený těmito letadly může být způsobený například vibracemi elektromotorů a vrtulí nebo třením hřídelí a jiných mechanických komponent. V České republice stanovuje maximální povolenou hodnotu změny akustického tlaku pro letecké práce, jak je civilní letectví popisováno v ustanovení §73- §74a, Úřad pro civilní letectví [115].

Závěr

První část této semestrální práce se věnovala tématu elektrifikace letecké dopravy a rozebírá letadla, která v tomto směru doposud nejvíce pokročila. Jedná se o dva komerční letouny Boeing 787 a Airbus A380, dále je rozebrán jedna z nejmodernějších vojenských stíhaček F-35 a v neposlední řadě je proveden náhled na první plně elektrický komerční letoun potenciálem na úspěch, Eviation Alice. Tato kapitola, je také doplněna rozborem možností uchování elektrické energie v bateriových člancích.

Druhá část sestává z rešerše v rámci elektrických strojů. Mimo nejzřetelnější komponenty jako jsou APU a motorové generátory, jsou dále popsány elektrické aktuátory a elektrické brzdy. Každý stroj je popsán z hlediska principu funkce a výhod oproti alternativám, které jsou poháněny fosilními palivy. Také je u každého stroje uvedeno několik příkladů z praxe, které jsou již v současnosti integrovány do leteckého provozu. Dále je tato kapitola doplněna o rozbor tří v letectví nejběžnějších druhů motorů a jsou zde přímo zmíněny jejich aplikace v letadlech.

Třetí část se zabývala regulacemi a nároky na provoz zařízení v letadlech. Představuje čtenářům, jakými všemi zkouškami musí zařízení projít, aby získalo certifikaci na provoz v letadle. Tato opatření maximalizují bezpečnost pasažérů, posádky a letadla samotného. Je zde stručně popsáno všech 26 oddílů mezinárodně uznávané normy pro letecká zařízení DO-160G.

Ve čtvrté kapitole byl diskutován potenciální možný vývoj letectví v budoucnosti. Jsou zde zmíněny některé společnosti, které vyvíjí plně elektrická letadla pro Urban Air mobility a také je zde rozebrána studie EUROCONTROL, která předpovídá podobu letecké dopravy v Evropě do roku 2050. Tato kapitola je doplněna o několik průzkumů v oblasti jak Urban Air, tak i porovnání letectví s jinými druhy dopravy.

Tato bakalářská práce představila náhled na problematiku elektrifikace letectví a analyzuje aktuální trendy v tomto směru.

Seznam obrázků

1.1	Porovnání kapacity generátorů více elektrických a klasických letadel [1]	10
1.2	Boeing 787 za letu [6].	11
1.3	Elektrický systém B787 [8].	12
1.4	Auxiliary Power Unit (APU) Boeingu 787 [10].	13
1.5	Airbus A380 za letu [13].	14
1.6	Elektro-hydrostatický aktuátor Airbusu A380 [16].	15
1.7	Ram Air Turbine (RAT) na Airbusu A380 [19].	16
1.8	Přehled různých aktuálních pohonů zajišťujících provoz A380 [22]. . .	17
1.9	F-35 za letu [24].	18
1.10	Pokročilé komponenty pohonného systému F-35 [27].	19
1.11	Motor P&W F135 pohánějící F-35 [33].	20
1.12	Eviation Alice při prvním vzletu [35].	21
1.13	magni650 s vrtulí [38].	23
1.14	Konstrukce olověné baterie [40].	24
1.15	Konstrukce Ni-Cd baterie [41].	25
1.16	Konstrukce lithium-iontové baterie [45].	26
1.17	Srovnání různých druhů lithium-iontových baterií dle kapacity, měrného výkonu, bezpečnosti, výkonosti, životnosti a ceny [46].	27
1.18	Porovnání různých druhů paliva využívaného v letadlech [50].	27
2.1	Průřez a funkčnost APU [54].	30
2.2	APU Pratt & Whitney [57].	31
2.3	Honeywell APU série 131-9B [59].	32
2.4	Honeywell APU RE220 [60].	33
2.5	Honeywell APU HGT750 [62].	33
2.6	Honeywell APU 36-150 [63].	34
2.7	Honeywell APU RE100 [64].	34
2.8	Honeywell HGT1700 [66].	35
2.9	Generátor na nízkotlaké a vysokotlaké turbíně [68].	36
2.10	Aktuátory Moog Inc. pro řízení letu [74].	38
2.11	Aktuátory Moog Inc. pro řízení motoru [75].	38
2.12	Aktuátory Moog Inc. pro ovládání dodatečných systémů [77].	39
2.13	Generátory protiběžné síly [78].	39
2.14	Elektrická brzda Boeingu 787 od Safran Group [80].	40
2.15	Průřez elektrickou brzdou [81].	41
2.16	Konstrukce synchronního stroje [84].	42
2.17	Konstrukce asynchronního stroje [93].	44
2.18	Konstrukce stejnosměrného stroje [96].	45

2.19	Grafy účinností typických synchronních strojů s permanentními magnety vzácných zemin (vlevo) a asynchronních strojů (vpravo) [98]. . .	46
2.20	Graf účinností typických asynchronních a stejnosměrných motorů [99].	46
3.1	Vibrační technika využívaná k testům oddílu 8.0.	50
4.1	Detailní zobrazení vývoje denního počtu letů v Evropě [106]	58
4.2	Předpoklad dopadu různých opatření na množství emisí CO_2 [106] . .	59
4.3	Lilium Jet [107]	62
4.4	Joby Aviation JAS4-1 [108]	62
4.5	Archer Aviation Midnight [110]	63
4.6	Procentuálně vyjádřená úspora času letu letadla eVTOL oproti minimální a maximální době cesty autem	65

Seznam tabulek

1.1	Porovnání výkonových hustot různých paliv	28
3.1	Limity pro testy oddílu 4.0	48
4.1	Tabulka porovnání železniční a letecké dopravy mezi evropskými metropolemi	59
4.2	Tabulka porovnání doby cesty autem a letadlem eVTOL	64

Literatura

- [1] Roland Berger Ltd., 2017. *Aircraft Electrical Propulsion – The Next Chapter of Aviation?* [online] [cit. 16.10.2023] Dostupné z: <https://docplayer.net/59715725-Aircraft-electrical-propulsion-the-next-chapter-of-aviation.html>
- [2] J. Benzaquen, J. He and B. Mirafzal, "Toward more electric powertrains in aircraft: Technical challenges and advancements," in *CES Transactions on Electrical Machines and Systems*, vol. 5, no. 3, pp. 177-193, Sept. 2021, doi: 10.30941/CESTEMS.2021.00022.
- [3] Eviation. *Alice* [online] [cit. 17.10.2023] Dostupné z: <https://www.eviation.com/aircraft/>
- [4] K. Rajashekara, *Parallel between More Electric Aircraft and ElectricHybrid Vehicle Power Conversion Technologies*, in *IEEE Electrification Magazine*, vol. 2, no. 2, pp. 50-60, June 2014, doi: 10.1109/MELE.2014.2312460.
- [5] SLOAN Chris, 2021. *Ten years on, is the Boeing 787 Dreamliner still more dream than nightmare?*, CNN. [online] [cit. 27.9.2023] Dostupné z: <https://edition.cnn.com/travel/article/boeing-787-dreamliner-10th-anniversary/index.html>
- [6] pjs2005, 2016. *all Nippon Airways boeing 787* [online] [cit. 27.9.2023] Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_787_N1015B_ANA_Airlines_\(27611880663\)_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:Boeing_787_N1015B_ANA_Airlines_(27611880663)_(cropped).jpg)
- [7] Moir, I., Seabridge, A. (2011). *Aircraft Systems: Mechanical, Electrical, and Avionics Subsystems Integration*. Německo: Wiley.
- [8] Boeing. *787 Electrical System* [online] [cit. 27.9.2023] Dostupné z: <http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/787-electrical-system>. Upraveno.
- [9] Osman, Reyal, Gul, Aqsa, Bagheshwa, Asma, Elnemr, Maryiam. (2020). Report On the Electric System Design of the B787. 10.13140/RG.2.2.28403.55847.
- [10] Abbott I., 2023. *APS5000 Electric-Only APU, 787-9* [online] Dostupné z: https://www.flickr.com/photos/ian_e_abbott/53039501531
- [11] V. P. Singh Negi, A. S. Tayade and C. Ranganayakulu, *Analysis of Energy saving between Bleed Air and Bleed less Environmental Control Systems in a typical Aircraft*, 2022 International Conference and Utility Exhibition on Energy,

- Environment and Climate Change (ICUE), Pattaya, Thailand, 2022, pp. 1-9, doi: 10.1109/ICUE55325.2022.10113546.
- [12] J. Hardiman, 2021. *The World's First Airbus A380 Is 16 Years Old - Where Is it Now?* Simple Flying. [online] [cit. 6.10.2023] Dostupné z: <https://simpleflying.com/worlds-first-airbus-a380/>
- [13] Visser M., 2013. *A6-EDY A380 Emirates 31 jan 2013 jfk* [online] Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/44939325@N02/8442269364/>
- [14] Lufthansa Group. *AIRBUS A380-800* [online] [cit. 6.10.2023] Dostupné z: <https://www.lufthansagroup.com/en/company/fleet/lufthansa-and-regional-partners/airbus-a380-800.html>
- [15] C. Adams, 2001. *A380: 'More Electric' Aircraft*. Aviation Today. [online] [cit. 7.9.2023] Dostupné z: <https://www.aviationtoday.com/2001/10/01/a380-more-electric-aircraft/>
- [16] Review and Analysis of the Reasons Delaying the Entry into Service of Power-by-Wire Actuators for High-Power Safety-Critical Applications - Scientific Figure on ResearchGate. Available from: https://www.researchgate.net/figure/Local-electro-hydraulic-generation-systems-on-the-Airbus-A380_fig5_354513505 [accessed 30 Oct, 2023]
- [17] Pete, 2021. *Airbus A380 Ram Air Turbine (RAT) - A Pilot's Guide*. Aviation Matters. [online] [cit. 8.10.2023] Dostupné z: <https://www.aviationmatters.co/airbus-a380-ram-air-turbine-rat/>
- [18] Airbus A380 Fact sheet (PDF). Hamilton and Sundstrand (Report). Archivováno z originálního PDF 2. března 2013. [online] [cit. 8.10.2023] Dostupné z: https://web.archive.org/web/20130302205101/http://www.hamiltonsundstrand.com/StaticFiles/HS/Communications/General/Documents/A380%20Fact%20Sheet_June%202011.pdf
- [19] Bernd's Photography, 2012. *Emirates - A380-861, F-WWSI, MSN108 (will become A6-EEA, Emirates 27th)* [online] Dostupné z: <https://www.flickr.com/photos/bernd2011/7759518858>
- [20] Thales Group, 2021. *The dream of all-electric aircraft is getting closer* [online] [cit. 11.10.2023] Dostupné z: <https://onboard.thalesgroup.com/dream-electric-aircraft-getting-closer/>

- [21] V. Madonna, P. Giangrande and M. Galea, 2018 *Electrical Power Generation in Aircraft: Review, Challenges, and Opportunities*, in IEEE Transactions on Transportation Electrification, vol. 4, no. 3, pp. 646-659, Sept. 2018, doi: 10.1109/TTE.2018.2834142.
- [22] elitetest.com, militaryembedded.com, 2022. *More Electric Aircraft (MEA) Systems – Elite Can Test That* [online] [cit. 10.12.2023] Dostupné z: <https://www.elitetest.com/blog/emc-emi-testing/more-electric-aircraft-mea-systems-elite-can-test-that/> Upraveno.
- [23] Federal Aviation Administration, 2021 *Acceleration in Aviation: G-Force* [online] [cit. 13.10.2023] Dostupné z: <https://www.faa.gov/pilots/safety/pilotsafetybrochures/media/acceleration.pdf>
- [24] Donald R. Allen, U.S. Air Force, 2013. *USAF F-35A Lightning II stealth fighter* [online] Dostupné z: [https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F-35A_fligh_\(cropped\).jpg](https://commons.wikimedia.org/wiki/File:F-35A_fligh_(cropped).jpg)
- [25] N. N. McCollom and E. R. Brown, 2021 *PHM on the F-35 fighter*, 2011 IEEE Conference on Prognostics and Health Management, Denver, CO, USA, 2011, pp. 1-10, doi: 10.1109/ICPHM.2011.6024363.
- [26] B. Bullerdick, 2013. *How To Supply Power And Air For The F-35*, Aviation Pros. [online] [cit. 14.10.2023] Dostupné z: <https://www.aviationpros.com/aircraft/defense/article/10943391/how-to-supply-power-and-air-for-the-f35>
- [27] C. Wiegand, 2018. *Advanced technologies selected for F-35 air vehicle and propulsion systems incorporation*. [online] Dostupné z: <https://www.semanticscholar.org/paper/F-35-Air-Vehicle-Technology-Overview-Wiegand/e42a4f3e68917330f96db5cb7d1880e7adddca24>. Upraveno.
- [28] Lockheed Martin. *Unique Integrated System Starts F-35 Engine In Joint Test By Lockheed Martin, Pratt and Whitney* [online] [cit. 14.10.2023] Dostupné z: <https://news.lockheedmartin.com/2005-04-29-Unique-Integrated-System-Starts-F-35-Engine-in-Joint-Test-By-Lockheed-Martin-Pratt-Whitney>
- [29] Airbus. *A350-900 Shaping the future of air travel* [online] [cit. 16.10.2023] Dostupné z: <https://aircraft.airbus.com/en/aircraft/a350-clean-sheet-clean-start/a350-900>
- [30] NATO Days. *F-35 LIGHTNING II* [online] [cit. 16.10.2023] Dostupné z: <https://www.natoday.cz/aircraft/f-35-lightning-ii>

- [31] Pratt&Whitney, 2015. *F135 Specs Charts* [online] [cit. 16.10.2023] Dostupné z: https://web.archive.org/web/20150924005241/http://www.f135engine.com/docs/B-2-_F135_SpecsChart.pdf
- [32] Honeywell. *Powering The F-35 With A Symphony Of Systems* [online] [cit. 16.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/industry/defense/f-35>
- [33] Pratt&Whitney. *F135 Engine* [online] Dostupné z: <https://www.prattwhitney.com/en/products/military-engines/f135>
- [34] McGinn M., 2022. *The first electric airplane is here, and its name is Alice* Adventure.com. [online] [cit. 17.10.2023] Dostupné z: <https://adventure.com/the-first-electric-passenger-plane-is-here/>
- [35] Eviation, PR Newswire, 2022. *Eviation's Alice Achieves Milestone with First Flight of All-Electric Aircraft* [online] Dostupné z: <https://www.prnewswire.com/news-releases/eviations-alice-achieves-milestone-with-first-flight-of-all-electric-aircraft-301634614.html>
- [36] CapeAir. *Moving to an Electric Future* [online] [cit. 17.10.2023] Dostupné z: https://www.capeair.com/about_us/future-of-electric-aviation.html
- [37] magniX, 2023. *Industry-Leading Electric Propulsion Systems* [online] [cit. 17.10.2023] Dostupné z: <https://www.magnix.aero/services#motorTab>
- [38] Jackson R., Emobility Engineering. *magniX magni350, 650 and magni-Drive 100* [online] [cit. 17.10.2023] Dostupné z: <https://www.emobility-engineering.com/magnix-magni350-650-and-magnidrive-100/>
- [39] Lambrecht A., InsideEvs, 2023. *Eviation CEO Talks Electrifying The Skies With Its Upcoming Plane* [online] [cit. 18.10.2023] Dostupné z: <https://insideevs.com/news/676120/eviation-electric-airplane-ceo-talk/>
- [40] Study Aircrafts. *Aircraft Batteries* [online] [cit. 9.11.2023] Dostupné z: <https://www.studyaircrafts.com/aircraft-battery>. Upraveno.
- [41] D. Hahn, SolarReviews, 2022. *The best uses for nickel cadmium (Ni-Cd) batteries* [online] [cit. 9.11.2023] Dostupné z: <https://www.solarreviews.com/blog/best-uses-for-nickel-cadmium-batteries>. Upraveno.
- [42] AircraftBattery.com. *Starved Cell* [online] [cit. 9.11.2023] Dostupné z: <https://www.aircraftbattery.com/knowledge-base/glossary/starved-cell.html>

- [43] Boeing. *Batteries and Advanced Airplanes* [online] [cit. 12.11.2023] Dostupné z: <http://787updates.newairplane.com/787-Electrical-Systems/Batteries-and-Advanced-Airplanes>
- [44] Chian, T & Wei, W & Ze, E & Ren, L & Ping, Y & Bakar, N & Fauzan, Ir Ts Dr Mohd Faizal & Sivakumar, S. (2019). A Review on Recent Progress of Batteries for Electric Vehicles. *International Journal of Applied Engineering Research*. 14. 4441-4461.
- [45] J. Shepard, BatteryPowerTips.com, 2021. *The difference between lithium ion and lithium polymer batteries* [online] [cit. 9.11.2023] Dostupné z: <https://www.batterypowertips.com/difference-between-lithium-ion-lithium-polymer-batteries-faq/>. Upraveno.
- [46] Y. Miao, P. Hynan, A. Von Jouanne, and A. Yokochi, “Current li-ion battery technologies in electric vehicles and opportunities for advancements,” *Energies*, vol. 12, no. 6, pp. 1–20, 2019.
- [47] Tran, Dat & Palomino, Jessica & Oliver, Scott. (2018). Desulfurization of JP-8 jet fuel: Challenges and adsorptive materials. *RSC Advances*. 8. 7301-7314. 10.1039/C7RA12784G.
- [48] GlobalSpec.com. *Lithium Batteries Specifications* [online] [cit. 26.11.2023] Dostupné z: https://web.archive.org/web/20110808112807/http://www.globalspec.com/Specifications/Electrical_Electronic_Components/Batteries/Lithium_Batteries
- [49] AllAboutBatteries.com. *Battery energy – What battery provides more?* [online] [cit. 26.11.2023] Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20090428060954/http://www.allaboutbatteries.com/Battery-Energy.html>
- [50] Gangoli Rao, Arvind. (2015). Ahead: Paving the Way for Next Generation Aircraft and Engine. Upraveno.
- [51] Dr. Omar Memon, Simple Flying, 2023. *A Million-Dollar Industry: How Much Do Major Aircraft Engine Parts Cost?* [cit. 4.1.2024] Dostupné z: <https://simpleflying.com/major-engine-parts-cost-guide/>
- [52] P. Wheeler, *Technology for the more and all electric aircraft of the future* 2016 IEEE International Conference on Automatica (ICA-ACCA), Curico, Chile, 2016, pp. 1-5, doi: 10.1109/ICA-ACCA.2016.7778519.

- [53] Mark R., Flying, 2018. *How an Auxiliary Power Unit Works* [online] [cit. 21.10.2023] Dostupné z: <https://www.flyingmag.com/how-an-auxiliary-power-unit-works/>
- [54] Meherwan P. Boyce, in Gas Turbine Engineering Handbook (Fourth Edition), 2012. *Small Gas Turbine* [online] Dostupné z: <https://www.sciencedirect.com/topics/engineering/small-gas-turbine>
- [55] The Editors of Encyclopaedia Britannica, Britanica, 2023. *B-29* [online] [cit. 21.10.2023] Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/B-29>
- [56] Adrian P. Mouritz, 2012. *Materials and material requirements for aerospace structures and engines* Pages 39-56, ISBN 9781855739468, <https://doi.org/10.1533/9780857095152.39>
- [57] Pratt & Whitney. *Auxiliary Power Units (APU)* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://www.prattwhitney.com/en/products/auxiliary-power-units>
- [58] Honeywell. *Auxiliary Power Units* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units>
- [59] Honeywell. *131 Series APUs* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/131-series-apus>
- [60] Honeywell. *RE220 Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/re220-apu>
- [61] Honeywell. *HGT400 Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/hgt400-auxiliary-power-unit>
- [62] Honeywell. *HGT750 Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 24.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/hgt750-apu>
- [63] Honeywell. *36 Series Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 25.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/36-series-apus>

- [64] Honeywell. *RE100 Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 25.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/re100-apu>
- [65] Honeywell. *331 Series Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 25.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/331-series-apus>
- [66] Honeywell. *HGT1700 Auxiliary Power Unit* [online] [cit. 25.10.2023] Dostupné z: <https://aerospace.honeywell.com/us/en/products-and-services/product/hardware-and-systems/auxiliary-power-units/hgt1700-auxiliary-power-unit>
- [67] A. J. Mitcham and J. J. A. Cullen, "Permanent magnet generator options for the More Electric Aircraft," 2002 International Conference on Power Electronics, Machines and Drives (Conf. Publ. No. 487), Sante Fe, NM, USA, 2002, pp. 241-245, doi: 10.1049/cp:20020121.
- [68] NASA. *Turbine Electrified Energy Management (TEEM)* [online] Dostupné z: https://www1.grc.nasa.gov/aeronautics/eap/technology/teem_/
- [69] E. F. Echolds, AiResearch Manufacturing Company. *PERMANENT-MAGNET MOTORS AND GENERATORS FOR AIRCRAFT* [online] [cit. 27.10.2023] Dostupné z: <https://ntrs.nasa.gov/api/citations/19840001995/downloads/19840001995.pdf>
- [70] Rolls-Royce, 2021. *Rolls-Royce generator delivered for most powerful hybrid-electric propulsion system in aerospace* [online] [cit. 25.10.2023] Dostupné z: <https://www.rolls-royce.com/media/press-releases/2021/22-07-2021-rr-generator-delivered-for-most-powerful-hybrid-electric-propulsion-system-in-aerospace.aspx>
- [71] maxon, Automate.org, 2015. *Actuators in Aviation* [online] [cit. 30.10.2023] Dostupné z: <https://www.automate.org/tech-papers/actuators-in-aviation>
- [72] CreativeMechanisms.com *Actuator Mechanisms* [online] [cit. 2.11.2023] Dostupné z: <https://www.creativemechanisms.com/actuators>
- [73] Moog. *Aircraft Actuation Systems* [online] [cit. 30.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft.html>
- [74] Moog. *Flight Control Actuation* [online] [cit. 30.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft/flight-control.html>

- [75] Moog. *Engine Controls* [online] [cit. 30.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft/engine-controls.html>
- [76] Moog. *Weapons Bay Door Actuation* [online] [cit. 31.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft/weapons-bay-door-drive.html>
- [77] Moog. *Utility Actuation* [online] [cit. 31.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft/utility-actuation.html>
- [78] Moog. *Vibration Control Actuation* [online] [cit. 30.10.2023] Dostupné z: <https://www.moog.com/products/actuators-servoactuators/aircraft/vibration-controls.html>
- [79] Boeing, 2008. *Boeing 787 from the ground up* [online] [cit. 2.11.2023] Dostupné z: https://www.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/qt_4_06/article_04_3.html
- [80] Safran Group. *Boeing 787 Dreamliner electric brake* [online] [cit. 6.11.2023] Dostupné z: <https://www.safran-group.com/products-services/boeing-787-dreamliner-electric-brake>
- [81] Hitchweb Team, Hitchweb, 2013. *How Electric Brakes Work* [online] [cit. 6.11.2023] Dostupné z: <https://www.hitchweb.com/blog/post/2013/01/07/how-electric-brakes-work>
- [82] RTCA, DO160.org. *RTCA DO-160G* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://do160.org/rtca-do-160g/>
- [83] Britannica.com. *Synchronous motors* [online] [cit. 22.4.2024] Dostupné z: <https://www.britannica.com/technology/electric-motor/Synchronous-motors>
- [84] Hangzhou Grand Technology, 2023. *Difference between synchronous motor and slip ring motor* [online] [cit. 22.4.2024] Dostupné z: <https://www.grandslipring.com/comparing-synchronous-motor-and-slip-ring-motor/>. Upraveno.
- [85] World Nuclear News, 2013. *Giant generator hits the road* [online] [cit. 22.4.2024] Dostupné z: https://www.world-nuclear-news.org/nn_giant_generator_hits_the_road_2808131.html

- [86] Boeing, 2012. *787 Propulsion System* [online] [cit. 23.4.2024] Dostupné z: http://www.lb.boeing.com/commercial/aeromagazine/articles/2012_q3/2/
- [87] Epoch Automation, 2023. *Synchronous Reluctance Motors Vs Induction Motors* [online] [cit. 24.4.2024] Dostupné z: <https://epochautomation.com/synchronous-reluctance-motor-vs-induction-motor/>
- [88] Pumps&Systems, 2022. *The Advantages of Synchronous Motors* [online] [cit. 24.4.2024] Dostupné z: <https://www.pumpsandsystems.com/advantages-synchronous-motors>
- [89] Duke Electric, 2021. *Induction Motors: What Are They, How Do They Work, and How Are They Used?* [online] [cit. 25.4.2024] Dostupné z: <https://www.dukeelectric.com/blog/all-about-induction-motors-types-applications/>
- [90] Woods Air Movement, 2020. *Motors Basic - Basic Principles - AC Induction Motors - Part 2* [online] [cit. 25.4.2024] Dostupné z: <https://www.woodsairmovement.com/en-us/news/motors-basic-basic-principles-ac-induction-motors-part-2/>
- [91] Inst Tools. *Advantages & Disadvantages Induction Motor* [online] [cit. 25.4.2024] Dostupné z: https://instrumentationtools.com/advantages-disadvantages-induction-motor/#google_vignette
- [92] Skurka Aerospace Int. *AC Induction Motors* [online] [cit. 25.4.2024] Dostupné z: <https://www.skurka-aero.com/product/ac-induction-motors/>
- [93] Science Ready, 2024. *Operation of AC Induction Motors* [online] [cit. 16.5.2024] Dostupné z: <https://scienceready.com.au/pages/ac-induction-motor>. Upraveno.
- [94] Hunter Stephenson, Linak. *Funkce stejnosměrného motoru v průmyslovém pohonu* [online] [cit. 6.5.2024] Dostupné z: <https://www.linak.cz/segmenty/techline/actuator-academyprumyslove-pohony/jak-pracuji-dc-motorky-v-prumyslovem-pohonu/>
- [95] EMS. *DC motors for aerospace and aviation* [online] [cit. 6.5.2024] Dostupné z: <https://www.ems-limited.co.uk/case-studies/aerospace-aviation/>
- [96] IQS Directory. *DC Motors* [online] [cit. 6.5.2024] Dostupné z: <https://www.iqsdirectory.com/articles/electric-motor/dc-motors.html>. Upraveno.

- [97] Omar Memons, SimpleFlying.com, 2023. *How Many Revolutions Do Different Aircraft Engine Types Complete Per Minute?* [online] [cit. 9.5.2024] Dostupné z: <https://simpleflying.com/aircraft-engines-rpm-guide/>
- [98] Göhlich, Dietmar & Fay, Tu-Anh & Jefferies, Dominic & Lauth, Enrico & Kunitz, Alexander & Zhang, Xudong. (2018). Design of urban electric bus systems. *Design Science*. 4. 10.1017/dsj.2018.10.
- [99] Calzada-Lara, G. & Álvarez, Jaime. (2015). Reduced Energy Consumption in Induction Motors with Possible Mechatronic Applications. *Mechanisms and Machine Science*. 25. 219-228. 10.1007/978-3-319-09858-6_21.
- [100] AES International. *AC vs DC Motors* [online] [cit. 11.5.2024] Dostupné z: <https://www.aesintl.com/ac-vs-dc-motors-which-is-right-for-you>
- [101] RTCA.org. *RTCA* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.rtca.org>
- [102] D.L.S. Electronic Systems, Inc. *RTCA DO-160 Temperature & Altitude Testing* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.dlsemc.com/environmental-rtca-do-160-testing/rtca-do-160-temperature-altitude-testing/>
- [103] ATeCorp.com. *RTCA/DO-160 Section 8: Vibration Testing* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.atecorp.com/compliance-standards/rtca-do-160/section-8>
- [104] ATeCorp.com. *Cincinnati Sub-Zero TCB-1.3 Benchtop Vibration Table* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.atecorp.com/products/cincinnati-sub-zero/tcb-1-3>
- [105] ATeCorp.com. *MB Dynamics PM250HP 250 lbf Shaker, DC - 3500 Hz* [online] [cit. 22.11.2023] Dostupné z: <https://www.atecorp.com/products/mb-dynamics/pm250hp>
- [106] EUROCONTROL. 2022. *EUROCONTROL Aviation Outlook 2050* [online] [cit. 26.3.2024] Dostupné z: <https://www.eurocontrol.int/publication/eurocontrol-aviation-outlook-2050>
- [107] Lilium. *Building radically better ways of moving* Dostupné z: <https://lilium.com>. Upraveno.
- [108] Joby Aviation. *Electric Aerial Ridesharing* Dostupné z: <https://www.jobyaviation.com>

- [109] The Engineer. *The Engineer Q&A: Rise of the eVTOL aircraft* [online] [cit. 13.3.2024] Dostupné z: <https://www.theengineer.co.uk/content/in-depth/the-engineer-qa-rise-of-the-evtol-aircraft/>
- [110] Archer Aviation. *Electric Air Taxis Have Landed Vertically* Dostupné z: <https://archer.com/midnight>. Upraveno.
- [111] eVTOL.news. *Vertical Aerospace VX4 (production model)* [online] [cit. 13.3.2024] Dostupné z: <https://evtol.news/vertical-aerospace-VA-1X>
- [112] VFR příručka. *Heliporty* [online] [cit. 14.3.2024] Dostupné z: https://aim.rlp.cz/vfrmanual/actual/hel_1_cz.html
- [113] Joby Aviation. *Joby Completes Third Stage of FAA Certification Process* [online] [cit. 15.3.2024] Dostupné z: <https://www.jobyaviation.com/news/joby-completes-third-stage-faa-certification-process/>
- [114] Lilium. *Lilium Receives EASA Design Organization Approval* [online] [cit. 15.3.2024] Dostupné z: <https://lilium.com/newsroom-detail/lilium-receives-easa-design-organization-approval>
- [115] Frank Bold. *Stanovování limitů hluku pro hudbu, letiště, silnice a další* [online] [cit. 15.3.2024] Dostupné z: <https://frankbold.org/poradna/ochrana-pred-hlukem/hluk/hlukove-limity/rada/stanovovani-limitu-hluku-pro-hudbu-letiste-silnice-a-dalsi#Letiště>

Seznam symbolů a zkratek

Značka	Veličina	Jednotka
DC	Stojnosměrný proud	[A]
AC	Střídavý proud	[A]
U_{dc}	Stojnosměrné napětí	[V _{dc}]
U_{ac}	Střídavé napětí	[V _{ac}]
S	Zdánlivý výkon	[VA]
P	Činný výkon	[W]
m	Hmotnost	[kg]
p	Tlak	[Pa]
G	Gravitační zrychlení na Zemi	[ms^{-2}]
F	Síla	[N]
V	Objem	[m^3]
v	Rychlost	[ms^{-1}]
t	Čas	[s]
E	Energie	[J]
p_{ak}	Akustický tlak	[dB]
l	Délka	[m]
T	Teplota	[°C]
H	Intenzita magnetického pole	[Am^{-1}]
s	Dráha	[m]
k	koeficient zrychlení	[-]