

ČESKĚ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE
FAKULTA DOPRAVNÍ

Branislav Kadlec

**PERSPEKTIVY POUŽITÍ ELEKTRICKÉHO POHONU
V LETECKÉ DOPRAVĚ**

Bakalárska práca

2021



K621 **Ústav letecké dopravy**

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení studenta (včetně titulů):

Branislav Kadlec

Kód studijního programu a studijní obor studenta:

B 3710 – PIL – Profesionální pilot

Název tématu (česky): **Perspektivy použití elektrického pohonu v letecké dopravě**

Název tématu (anglicky): The Prospect of Electric Propulsion application in Air Transport

Zásady pro vypracování

Při zpracování bakalářské práce se řiďte následujícími pokyny:

- Cílem práce je přinést informaci o současném stavu projektů v řešení dané problematiky a kriticky zhodnotit perspektivu dalšího vývoje
- Víze EU letecké dopravy do roku 2050
- Princip elektrického pohonu letadel
- Hybridní a čistě elektrický pohon, hlavní prvky systému a jejich uspořádání
- Akumulátory elektrické energie, provozně-technické parametry a perspektiva vývoje
- Konstrukční koncepty elektrických a turboelektrických letadel
- Srovnání elektrického pohonu s konvenčním pohonem, výhody a nevýhody
- Vývojové trendy, integrace draku letounu s pohonem, distribuovaný pohon, výhledové konstrukční koncepce pro splnění cíle do roku 2050 a nutné předpoklady pro jeho splnění
- Ekonomicko-environmentální zhodnocení elektrického pohonu



Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího bakalářské práce

Rozsah průvodní zprávy: minimálně 35 stran textu (včetně obrázků, grafů a tabulek, které jsou součástí průvodní zprávy)

Seznam odborné literatury: Brelje, Benjamin J. a Joaquim R.R.A. MARTINS.
"Electric, Hybrid, and Turboelectric Fixed-wing Aircraft (2019)

Cinar, Gokcin: A Methodology for Dynamic Sizing of Electric Power Generation and Distribution Architect., Georgia Institute of Technology, Atlanta, USA, 2018

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Ing. Daniel Hanus, CSc.**

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
(datum prvního zadání této práce, které musí být nejpozději 10 měsíců před datem prvního předpokládaného odevzdání této práce vyplývajících ze standardní doby studia)

Datum odevzdání bakalářské práce: **9. srpna 2021**
a) datum prvního předpokládaného odevzdání práce vyplývajících ze standardní doby studia a z doporučeného časového plánu studia
b) v případě odkladu odevzdání práce následující datum odevzdání práce vyplývajících z doporučeného časového plánu studia

doc. Ing. Jakub Kraus, Ph.D.
vedoucí
Ústavu letecké dopravy



doc. Ing. Pavel Hrubeš, Ph.D.
děkan fakulty

Potvrzuji převzetí zadání bakalářské práce.

Branislav Kadlec
jméno a podpis studenta

V Praze dne..... 9. října 2020

PodĎakovanie

Rád by som touto cestou poĎakoval vedúcemu mojej bakalárskej práce panu doc. Ing. Danielovi Hanusovi, CSc.za odborné vedenie práce. Velké poĎakovanie patrí aj mojej rodine a priateľom za ich bezhraničnú podporu, ktorú mi celé štúdium poskytovali.

Prehlásenie

Predkladám týmto k posúdeniu a obhajobe bakalársku prácu, zpracovanú na záver štúdia na ČVUT v Prahe Fakulte dopravnej.

Prehlasujem, že som predloženú prácu spracoval samostatne, a že som uviedol všetky použité informačné zdroje v súlade s Metodickým pokynom č.1/2009 „O dodržiavaní etických princípov pri príprave vysokoškolských záverečných prác.“

Nemám závažný dôvod proti užívaniu tohto školského diela v smyslu § 60 zákona č. 121/2000 Sb., o autorskom práve, o právach súvisiacich s právom autorským a o zmene niektorých zákonov (autorský zákon).

V Prahe dňa 09.08.2021

.....

podpis

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

Fakulta dopravní

PERSPEKTIVY POUŽITÍ ELEKTRICKÉHO POHONU V LETECKÉ DOPRAVĚ

Bakalárska práca

2021

Branislav Kadlec

ABSTRAKT

Predmetom tejto bakalárskej práce je zosumarizovanie už súčasného výskumu a jednotlivých projektov a následne zhodnotenie perspektívneho využitia elektrického pohonu v leteckej doprave. Možnosti využitia sa líšia podľa rôznych dizajnových konštrukcií pohonného systému a podľa rôznych kategórií prevádzkovania využitého elektrifikovaného lietadla sa zohľadňujú iné faktory, výhody a nevýhody, ktoré ovplyvňujú potencionálne využitie elektrického pohonného systému konkrétnych konštrukčných architektúr. V tejto práci sú teoreticky popísané jednotlivé pohonné systémy spolu s ich výhodami a nevýhodami a mala by slúžiť prevažne ako uľahčenie orientácie v danej problematike.

Kľúčové slová:

Elektrický pohon, sériový pohon, hybridný pohon, batérie, flighpath 2050, green aviation

CZECH TECHNICAL UNIVERSITY IN PRAGUE

Faculty of Transportation Sciences

THE PROSPECT OF ELECTRIC PROPULSION APPLICATION IN AIR TRANSPORT

Bachelor Thesis

2021

Branislav Kadlec

ABSTRACT

The subject of this bachelor thesis is to summarize the current research and individual projects and then evaluate the perspective use of electric propulsion in air transport. The possibilities of use vary according to the different design constructions of the propulsion system and according to different categories of operation of the used electrified aircraft, other factors, advantages and disadvantages are taken into account that affect the potential use of the electric propulsion system of specific construction architectures. In this work, the individual drive systems are theoretically described together with their advantages and disadvantages and should serve mainly to facilitate orientation in the given issue.

Key words:

Electric drive, serial drive, hybrid drive, batteries, flightpath 2050, green aviation

ZOZNAM SKRATIEK

FAA	Federal Aviation Administration	Federálny letecký úrad
ACARE	Advisory Council for Aeronautics Research in Europe	
EASA	European Union Aviation Safety Agency	
NAE	National Academy of Engineering	
BLI	Boundary Layer Ingestion	Nasávanie medznej vrstvy
VFR	Visual Flight Rules	Pravidlá letu za vidu
IFR	Instrumental Flight Rules	Pravidlá letu podľa prístrojov
MTOW	Maximum Take-Off Weight	Maximálna vzletová hmotnosť
H_P	Degree of Power Hybridization	Stupeň hybridizácie výkonu
P_m	Power of the motor	Výkon motoru
P_{tot}	Total Power	Výkon celkový
H_E	Degree of Energy Hybridization	Stupeň hybridizácie energie
P_b	Power of the battery	Výkon batérie
E_b	Energy of the battery	Energia batérie
E_{tot}	Total Energy	Energia celková
η_e	Effectiveness	Účinnosť
η_g	Generator Effectiveness	Účinnosť generátoru
η_r	Rectifier Effectiveness	Účinnosť usmerňovača
η_{bus}	Bus Effectiveness	Účinnosť zbernice
η_i	Invertor Effectiveness	Účinnosť invertoru
η_m	Motor Effectiveness	Účinnosť motoru

OBSAH

1 Úvod	10
2 Analýza súčasného stavu projektov	12
2.1 Airbus	12
2.1.1 EcoPulse	12
2.2 NASA	13
2.2.1 X-57 Maxwell.....	13
2.2.2 PEGASUS	14
2.2.3 STARC-ABL.....	15
2.3 Pipistrel	16
2.3.1 Alpha Electro	16
2.3.2 Velis Electro.....	16
2.3.3 MAHEPA Projekt	17
2.4 Ampaire.....	17
2.4.1 Electric EEL	17
2.4.2 Eco Otter SX	18
2.4.3 Tailwind.....	18
2.5 MagniX	19
2.5.1 eBeaver	19
2.5.2 eCaravan	19
2.6 Eviation	19
2.6.1 Alice.....	19
2.7 ZeroAvia	20
2.7.1 HyFlyer	20
2.8 VoltAero	21
2.9. ByeAerospace.....	22
2.9.1 eFlyer 2.....	22
2.9.2 eFlyer 800.....	22
2.10 Boeing	22
2.10.1 SUGAR Volt.....	22
3 Flightpath 2050	23
3.1 Európska letecká doprava 2050	24

3.2 Spoločenské a trhové ciele:	25
3.3 Ciele udržania a rozširovania priemyselného vedenia:.....	25
3.4 Ochrana životného prostredia a dodávka energie:.....	26
3.5 Zaistenie "safety" a „security“:	26
4 Electrické pohonné systémy	26
4.1 Čisto elektrický pohonný systém	30
4.2 Hybridný pohonný systém	31
4.2.1 Sériovo-hybridný pohonný systém	32
4.2.2 Paralelno-hybridný pohonný systém	33
4.2.3 Kombinovaný pohonný systém	34
4.3 Turboelektrický.....	36
5 Akumulátory.....	37
6 Ekonomicko-environmentálne zhodnotenie	41
7 Záver.....	43
Zoznam zdrojov	44
Zoznam tabuliek.....	49
Zoznam obrázkov	50

1 Úvod

V posledných niekoľkých rokoch sa zvyšuje úsilie o zníženie emisií skleníkových plynov súvisiacich s letectvom. V roku 2009 sa Akčný program ICAO pre medzinárodnú leteckú a klimatickú zmenu dohodol na stanovení cieľa 2% ročného zlepšenia palivovej účinnosti do roku 2050. Európska komisia pre klimatické opatrenia však uvádza, že globálne emisie z letectva sa do roku 2020 predpovedajú na 70 % vyššie ako v roku 2005 aj pri ročnom ciele zlepšiť palivovú úspornosť o 2%, poznamenáva, že do roku 2050 by mohol rásť o ďalších 300-700%.

Konvenčné zdroje energie na báze fosílnych palív, aj keď môžu trvať mnoho ďalších desaťročí sú v konečnom dôsledku obmedzené. Na druhej strane je elektrická energia odolná voči budúcnosti a potenciálne efektívnejšia. Mnoho ďalších odvetví už úplne alebo čiastočne elektrifikovalo, od bytovej energetiky a lokomotív až po prebiehajúcu revolúciu v automobilovom priemysle. S komplexnejšími a náročnejšími požiadavkami zostáva letecký priemysel ťažším orieškom, ale všetky indície naznačujú, že nakoniec bude nasledovať. Trend More Electric Aircraft už začal vyplácať dividendy dodávateľom, ktorí konali včas v rámci obmedzení súčasnej leteckej architektúry a v rámci súčasného ekosystému. Rastúci trend elektrického pohonu sľubuje úplnú revolúciu v tomto odvetví, pričom úplne nové architektúry a ekosystémy sa stanú realitou zajtrajška. Spotrebiteľia sa môžu v budúcnosti tešiť na čistejší, ekologickejší, lacnejší a potenciálne bezpečnejší let. Súčasnú leteckú spoločnosť musia teraz pracovať na identifikácii pokroku a zistiť, ako sa zviezť na vlnu zmien, noví účastníci sa musia rozhodnúť, kedy a ako vstúpiť, investori sa musia rozhodnúť, ktoré podniky budú podporovať; a vlády by mali zvážiť, ako najlepšie uľahčiť hospodársky a priemyselný rast.

Elektrické letectvo je zatiaľ ešte v plienkach. Rovnako ako v automobilovom priemysle, aj tu bude vyžadovať rozkvet vynaliezavosti a experimentovania. V dohľadnej budúcnosti budú elektrické lietadlá obmedzené v tom, ako ďaleko môžu cestovať. Najlepšie dnešné batérie vydávajú oveľa menej energie na pomer hmotnosti ako tradičné palivá: energetická hustota 250 Wh/kg oproti 12 000 Wh/kg pri leteckom palive. Batérie potrebné na daný let sú preto oveľa ťažšie ako štandardné palivo a zaberajú viac miesta. Približne polovica všetkých letov na celom svete má menej ako 800 kilometrov, čo sa očakáva do roku 2025 v dosahu elektrických lietadiel poháňaných batériami.

Tento vývoj čelí nákladovým a regulačným prekážkam, ale investori, korporácie a vlády excitované pokrokom tejto technológie výrazne investujú do jej vývoja. Stimulovaný pokrokom v

technologickom vývoji v zábavnom a automobilovom priemysle, záujem o elektrické pohonné systémy pre lietadlá v posledných rokoch výrazne vzrástol. Podľa mnohých vedeckých a všeobecných publikácií skladovanie elektrickej energie v batériových systémoch sľubuje čistý nový svet s novými fantastickými príležitosťami.

Hlavným dôvodom, prečo sa táto zmena deje, je menej pohyblivých častí, menšia údržba a lacnejšia elektrická energia, čo znamená, že náklady môžu klesnúť o viac ako polovicu a dlhšia životnosť motorov. Nejde o to, či sa to stane, ale kedy sa to stane.

Elektrický pohon takmer rieši ďalší problém letectva: emisie uhlíka. Letectvo emituje viac ako 2% svetových emisií CO₂ a do polovice storočia môže dosiahnuť takmer štvrtinu. Bez alternatívneho paliva pripraveného opustiť zem a počtu cestujúcich v leteckej doprave, ktoré by sa do roku 2035 mali zdvojnásobiť, môže elektrická energia ponúknuť priemyslu najlepšiu cestu vpred vo svete obmedzenom klímou.

Bude to však trvať mnoho rokov, kým budú všetky lietadlá nahradené tými novej generácie, a na druhej strane rast leteckej dopravy povedie k zvýšeniu celkovej spotreby paliva a tým aj emisií z leteckej dopravy.

2 Analýza súčasného stavu projektov

2.1 Airbus

2.1.1 EcoPulse

EcoPulse je testovacie lietadlo s hybridným pohonom vyvinutom v spolupráci s firmami Daher a Safran. Airbus poskytuje technológiu batérií a dohliada na aerodynamické modelovanie tohto projektu, ktorého cieľom je využiť výhody distribuovaného pohonu na zlepšenie environmentálnych výkonov lietadla [1]. Nedávno EcoPulse úspešne absolvoval testy vo veternom tuneli, ktoré sú kľúčové k správnej validácii letových vlastností [2]. Tento projekt je základom na ceste spoločnosti Airbus k dekarbonizácii a udržateľnejšej leteckej doprave pre budúce generácie.



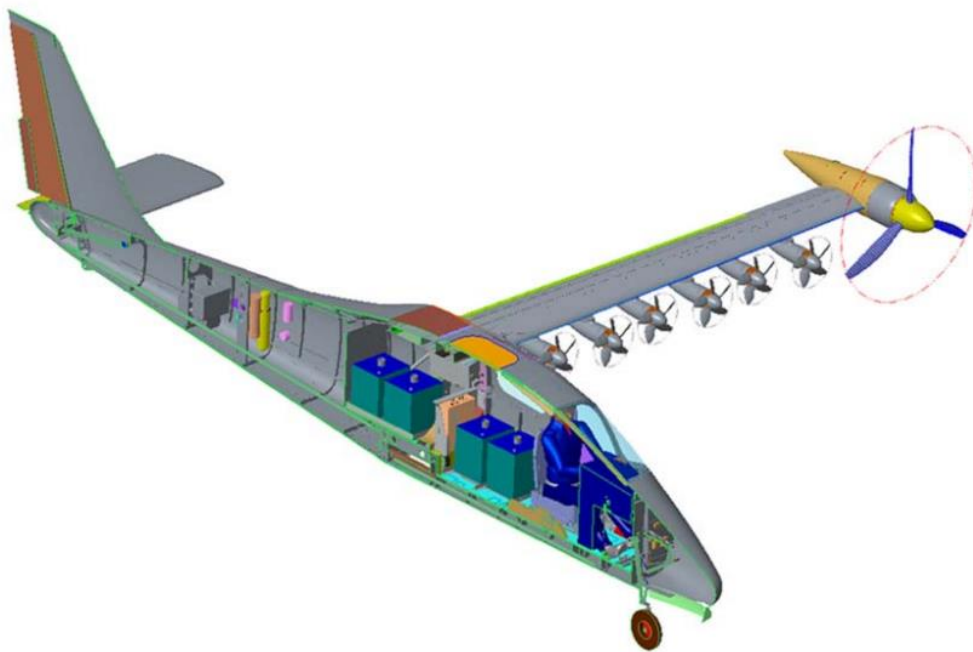
Obrázok 1 – Koncept EcoPulse [3]

2.2 NASA

2.2.1 X-57 Maxwell

Je projekt založený na talianskom lietadle Tecnam P2006T doplneným krídlami distribuovaného elektrického pohonu. Každé krídlo pozostáva zo šiestich motorov na nábežnej hrane určených na vzlety a pristátia, a jedným väčším motorom na konci krídla na použitie pri lete v hladine. [4]

“Maxwell” pokračuje v podrobovaní sa pozemnému testovaniu s vysokým napätím s úspešným pretáčaním vrtúľ pod elektrickou energiou v kalifornskom výskumnom stredisku Armstrong pod záštitou NASA. Hlavnými cieľmi projektu X-57 je demonštrovať redukciu palivu, emisií a hluku, a zdieľať proces návrhu a letovej spôsobilosti s regulačnými orgánmi a normalizačnými organizáciami, a vytvoriť model ako referenčnú platformu pre integrované prístupy k technológiám distribuovaného elektrického pohonu. [5]



Obrázok 2 - Izometrický model X-57 so stredovou osou, zobrazujúci batériový systém, krídlo s vysokým pomerom strán a elektrické motory [6]

2.2.2 PEGASUS

“Parallel Electric-Gas Architecture with Synergetic Utilization Scheme”

PEGASUS je 48-miestne hybridné-elektrické regionálne lietadlo založené na ATR42-500 [7]. Tento model bol vybraný na základe predchádzajúcich štúdií zameraných na trh a dopyt [8].

Koncept sa skladá z dvoch paralelných hybridných-elektrických motorov v koncoch krídiel, dvoch vnútorných elektrických motorov a jedného elektrického motoru v zadnej časti lietadla. Tieto motory sú strategicky umiestnené tak, aby poskytovali synergické výhody vďaka hnacím a aerodynamickým interakciám. Hybridný-elektrický pohon je navrhnutý tak, aby poskytoval väčšinu ťahu počas letu v hladine, a je umiestnený na koncoch krídiel, aby sa znížil indukovaný odpor. Cieľom zabudovaných motorov pod krídlami je zabezpečiť dodatočný ťah počas vzletu a stúpania. Vnútorne vrtule je možné počas letu v hladine sklopiť, aby sa znížili účinky odporu na vrtule. V prípade potreby by sa ľahko dali použiť, napr. pri závade jedného z hlavných motorov.[7]

Elektrický pohon poskytuje aerodynamické výhody pri pohlcovaní a opätovnom urýchlení vzduchu z medznej vrstvy trupu [9].



Obrázok 3 - Koncept PEGASUS so zloženými vnútornými vrtuľami [7]

2.2.3 STARC-ABL

“Single-aisle Turboelectric Aircraft with Aft Boundary Layer propulsion”

Cieľom tohto projektu je byť akýmsi “mostom” medzi dnešným dopravným lietadlom poháňaným spaľovacími motormi a budúcimi plne elektrickými. STARC-ABL je tradičná “jedno-uličková” koncepcia lietadla s kapacitou 150 cestujúcich. Lietadlo má pod krídlami umiestnené dva turbínové motory, ktoré sú napojené na elektrické generátory, a tie následne poháňajú elektrický motor v zadnej časti trupu lietadla. Tento elektrický motor je umiestnený tak sofistikovane, aby využíval aerodynamického benefitu javu s názvom “boundary layer ingestion” (BLI). [10]

Požítie BLI zvyšuje účinnosť tým, že z trupu alebo medznej vrstvy krídla absorbuje pomalší vzduch. Nasávanie na vstupe ventilátora mení distribúciu tlaku proti prúdu a výstup z ventilátora dodáva energiu vzduchu v úplave, čo spôsobuje určité polemiky, či by sa BLI malo považovať za zníženie odporu alebo zvýšenie účinnosti [11, 12]. Prínos BLI je úmerný percentuálnemu podielu prietoku hraničnej vrstvy zachyteného na vstupe ventilátora [13].



Obrázok 4 – Koncept STARC-ABL s BLI motorom [14]

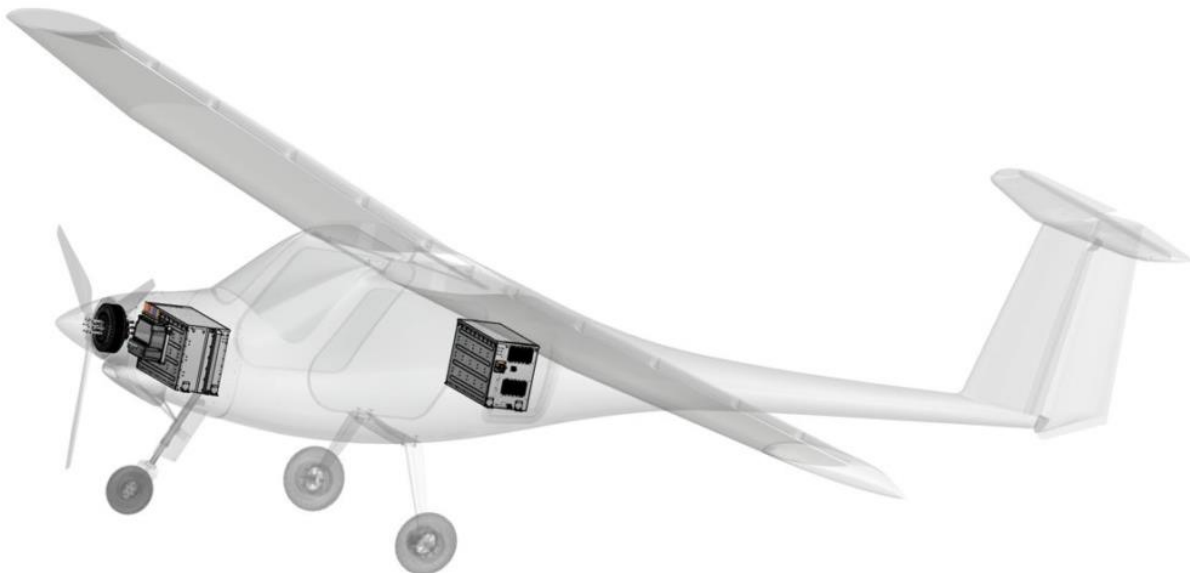
2.3 Pipistrel

2.3.1 Alpha Electro

Alpha Electro je 2-miestne elektrické lietadlo typu „trainer“, ktorého výkon je šitý na mieru potrebám leteckých škôl. Má krátku vzletovú vzdialenosť, výkonné stúpanie až 1 000 fpm a výdrž 1 hodinu plus 30-minútovú VFR rezervu. Je optimalizované pre operácie na okruhu, kde sa pri každom priblížení rekuperuje až 13% energie. Elektromotor s výkonom 60 kW váži iba 20 kg a je výkonnejší ako populárna séria Rotaxu 912. [15]

2.3.2 Velis Electro

Toto dvojmiestne lietadlo vďaka svojej tichosti, len 60 dB, môže posunúť letecký výcvik oveľa bližšie k mestským oblastiam bez nepriaznivého ovplyvnenia kvality života spoločnosti. Pohonnú jednotku tvorí synchronný elektromotor s permanentným magnetom s axiálnym tokom E-811, prvý typovo certifikovaný elektrický motor na použitie v lietadlách všeobecného letectva (TC No. EASA.E.234). Vrtuľa je namontovaná priamo na rotore. Ponúka výkon až 57,6 kW napájaný z 2 separátne oddelých akumulátorov s maximálnou kapacitou energie 24,8 kWh. Jeden akumulátor je umiestnený v čele lietadla, druhý za kabínou, to zaisťuje redundanciu zdroja energie. [15]



Obrázok 5 – Model Velis Electro s výraznenými batériami a motorom [15]

V prípade poruchy batérie by sa nesprávne fungujúca batéria automaticky odpojila od systému. Jedna batéria je schopná samostatnej prevádzky a má dostatočnú kapacitu na podporu stúpania pokračovania letu. Výrobca uvádza pri MTOW 600 kg výdrž až 50 minút bez VFR rezervy s cestovnou rýchlosťou 90 kt. [12] Zdroj energie tvoria lítiové batérie DO-311A [16].

Je to prvé elektrické lietadlo na svete, ktoré 10. júna 2020 získalo typové osvedčenie (EASA.A.573 TCDS) za podmienok VFR Day a je plne schválené na výcvik, ako aj na iné operácie. [17]

2.3.3 MAHEPA Projekt

„**Modular Approach to Hybrid-Electric Propulsion Architecture**“

Pipistrel v spolupráci s niekoľkými európskymi univerzitami vyvíja a uvádza na trh dve nové hybridné elektrické pohonné jednotky. Po absolvovaní úspešných pozemných ukážok hybridného pohonu v predchádzajúcom projekte HYPSTAIR dodá MAHEPA nové optimalizované komponenty pohonu so zvýšenou spoľahlivosťou vhodné na testovanie za letu a budúce komerčné nasadenie v malých lietadlách. Prvý používa na nabíjanie batérií a napájanie elektromotora generátor poháňaný palivom, zatiaľ čo druhý sa pri výrobe energie spolieha na palivové články umožňujúce let s nulovými emisiami. [18]

2.4 Ampaire

2.4.1 Electric EEL

EEL je predovšetkým testovacím lietadlom na vývoj vysoko výkonnej elektroniky, invertorov, motorov a súvisiacich systémov. Je to platforma pre vývoj škálovateľnej technológie a certifikačných procesov. Toto hybridné elektrické lietadlo je modifikáciou Cessny 337 Skymaster. Vpredu sa nachádza ťažná vrtuľa poháňaná elektromotorom s výkonom 160 kW a navyše vzadu na konci trupu je umiestnená tlačná vrtuľa poháňaná konvenčným spaľovacím motorom s výkonom 220 kW. Ušetrené náklady za palivo sú v rozsahu od 50 do 70 percent a v údržbe lietadla je to 25 až 50 percent. Užitočné zaťaženie sú 3 pasažieri alebo až do 450 lbs. [19]

V októbri 2020 EEL preletel 549 kilometrov medzi letiskami Camarillo a Haywardom v Kalifornii, čo je momentálne podľa spoločnosti najdlhší let pre elektrifikované lietadlo. Let trval 2 hodiny a 32 minút vo výške 8 500 ft s priemernou rýchlosťou 117 kt. [20]

Začiatkom decembra 2020 začali s novým projektom v spolupráci s Mokulele Airlines, ktorý má simulovať pravidelnú prevádzku s typickým užitočným zaťažením na Havajských ostrovoch. [21]



Obrázok 6 – Ampaire Cessna 337 Skymaster [20]

2.4.2 Eco Otter SX

V spolupráci s NASA spoločnosť Ampaire overuje možnosti elektrifikovaného lietadla so svojim doteraz najväčším lietadlom: Twin Otter DHC6 s dvoma paralelne hybridnými motorami o celkovom výkone až 1MW. Náklady za palivo sú ponížené o 20 až 30 percent a v údržbe lietadla je to od 10 do 25 percent. Užitočné zaťaženie je 19 pasažierov alebo do 4000 lbs. Cieľom tohto projektu je redukcia hluku aspoň o 22 dB, emisií o 65% a spotreby paliva/energie o 40%. [19]

2.4.3 Tailwind

Ampaire Tailwind je koncept, ktorý stelesňuje budúcnosť efektívneho cestovania s nulovými emisiami. Jeho dizajn a technológia novej generácie znamená plne elektrický a plne optimalizovaný výkon z hľadiska doletu, výdrže, efektívnosti a rýchlosti. Tailwind je dokonale čistý stroj: elektrický a aerodynamický. Pre budúcu generáciu cestujúcich to znamená viac priamych letov s nižšími nákladmi bez uhlíkovej stopy. [19]

2.5 MagniX

2.5.1 eBeaver

Hydroplán DHC-2 De Havilland Beaver prevádzkovaný spoločnosťou Harbour Air, vybavený elektromotorom magni500 s výkonom 560 kW, predstavil prvý let na svete ako plne elektrické komerčne zamerané lietadlo. [22]

Pri maximálnej vzletovej hmotnosti lítium-iontové batérie poskytujú dostatok energie na 15 minút letu s 25 minútovou rezervou. [23]

2.5.2 eCaravan

208B Cessna Grand Caravan vyvinutá v spolupráci s AeroTec, poháňaná elektromotorom magni500 a je momentálne najväčším komerčným čisto elektrickým lietadlom. [23]

Jeho prvý testovací let trval 30 minút a môže doletieť až 160km so 4 až 5 pasažiermi pri zachovaní rezervy energie podľa pravidiel VFR. [24]

2.6 Eviation

2.6.1 Alice

Alice je čisto elektrické lietadlo navrhnuté tak, aby pojalo 9 pasažierov s dvoma členmi posádky. Cieľom spoločnosti je nahradenie klasických dopravných lietadiel na regionálnych linkách.



Obrázok 7 – Alice na Paris Air Show [27]

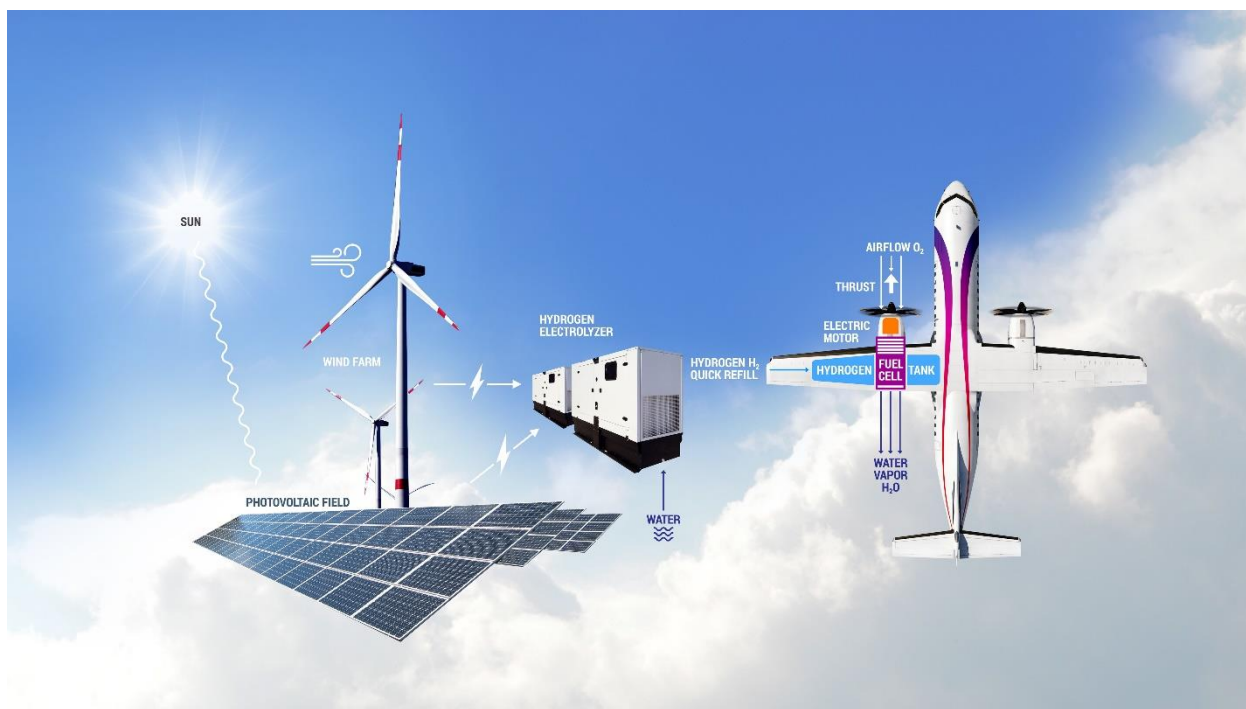
Narozdiel od konkurencie toto lietadlo je od základu vyrobené tak, aby bolo elektrické, nejde o premenu iného lietadla. Preto je aj pomer vztlaku k odporu (25:1) podstatne lepší ako pri bežných lietadlách (17:1). [25]

V rámci konštrukcie sú použité len kompozitné materiály, aby sa čo najviac zredukovala hmotnosť, pretože samotné batérie vážia 3600 kg, čo zaberá až 60% MTOW. Na jedno nabitie Li-ion batérií s kapacitou 920 kWh je dolet 440 NM s 30 minútovou IFR rezervou. [26]

2.7 ZeroAvia

2.7.1 HyFlyer

ZeroAvia sa zameriava na vývoj pohonnej jednotky na vodíkové palivové články. Elektrická energia z vodíku ponúka rovnaký potenciál nulových emisií ako elektrický akumulátor, ale má oveľa sľubnejší pomer energie k hmotnosti, čo ho robí rentabilnejším pre komerčné účely v oveľa väčšom rozsahu a v kratšom časovom horizonte. [28]



Obrázok 8 – Vízia ZeroAvie na obnoviteľne napájané vodíkovo-elektrické lietadlo [28]

Spoločnosť v septembri 2020 uskutočnila sériu testovacích letov pomocou upraveného šesťmiestneho lietadla Piper Malibu vybaveného plne elektrickým motorom a systémom napájania z vodíkových palivových článkov. Jednalo sa o vôbec prvý let poháňaným vodíkovými článkami. [16]

2.8 VoltAero

Spoločnosť VoltAero vyvíja jedinečný hybridný napájací modul pre rôzne účely a už aj s ním uskutočnili prvý úspešný testovací let. Tento modul kombinuje výkon 300 kW spaľovacieho motora s tromi elektromotormi po 60 kW v konfigurácii do trojuholníka a poskytuje celkový výkon 480 kW (obr. 9). Týchto niekoľko zdrojov energie zaisťuje veľmi bezpečné režimy prevádzky s využitím jedného zdroja energie (elektrického alebo mechanického) alebo oboch v závislosti od scenára použitia. V typickom lete by sa elektrické motory používali na veľmi málo hlučné vzlety a pristátia, pričom spaľovací motor by slúžil na predĺženie doletu. Pretože sú elektromotory aj spaľovací motor spojené so spoločným hriadeľom poháňajúcim päťlistú „tlačnú“ vrtuľu, schopnosť každého z nich pracovať nezávisle poskytuje vysokú úroveň bezpečnosti, pričom jeden zdroj slúži ako záložný. [29]



Obrázok 9 – Hybridný modul v konfigurácii do trojuholníka [29]

2.9. ByeAerospace

2.9.1 eFlyer 2

Toto dvojmiestne lietadlo je určené pre trh leteckého výcviku. Obsahuje jeden elektrický motor poháňaný šiestymi lítium-iónovými batériami. Dizajn má hmotnosť 860 kg a motor o váhe len 26 kg pochádza od spoločnosti Safran s maximálnym výkonom 90 kW, ktorý poskytuje cestovnú rýchlosť až 135 kt [30]. Výrobca udáva výdrž až 3,5 hodiny.

Bye Aerospace je momentálne v procese získavania certifikácie FAA Part-23 pre eFlyer 2 pre profesionálny letecký výcvik [31].

2.9.2 eFlyer 800

Spoločnosť Bye Aerospace oznámila toto osemmiestne plne elektrické dvojmotorové lietadlo triedy turbo-prop, v reakcii na rastúce požiadavky na regionálne plne elektrické lietadlá s výrazne zníženými prevádzkovými nákladmi [31].

Odhady výkonu pre eFlyer 800 zahŕňajú cestovnú rýchlosť až 320 kt, výškovú hranicu 35 000 ft a dolet 500 NM so 30-minútovými rezervami IFR pri normálnej cestovnej rýchlosti 280 kt [31].

2.10 Boeing

2.10.1 SUGAR Volt

„Subsonic UltraGreen Aircraft Research“

Projekt SUGAR vedie pokročilú koncepciu a technologickú štúdiu, ktorá skúma rôzne alternatívne palivá a energetické technológie. Jeden z konceptov vyvinutým v tejto štúdii je SUGAR Volt, koncept stredne veľkého hybridného elektrického lietadla. SUGAR je spolupráca medzi Boeingom, General Electric, Virginia Tech a Georgia Tech. [32]

V návrhu je, že Volt by používal dva hybridné turbínové motory, ktoré spaľujú konvenčné palivo, pri vzletoch, a potom pri letu v hladine by poháňanie turbín prevzali elektromotory. Konštrukcia pozostáva z dlhých, vystužených krídiel s vysokým pomerom strán, ktoré znižujú indukovaný odpor. Tento dizajn by umožňoval vzlietnuť z kratších vzdialeností a produkovať menej hluku. Vonkajšie krídla by sa sklápali aby ušetrili priestor na zemi podobne ako na tom sú winglety Boeingu 777x, ale samozrejme za cenu zvýšenia hmotnosti. [33]



Obrázok 10 - Koncept SUGAR Volt [34]

3 Flightpath 2050

Letecká doprava v Európe vytvára ekonomický rast, bohatstvo a poskytuje vysoko kvalifikované pracovné miesta - generuje takmer 600 miliárd EUR ročne a podporuje 8,7 milióna pracovných miest. Predpokladá sa, že celosvetová osobná letecká doprava porastie o 4 až 5% ročne [35]. V spojení s týmto rastom, je nutné zároveň minimalizovať jeho negatívny vplyv na životné prostredie. Leteckú dopravu v roku 2050 bude treba vyzerat' veľmi odlišne od tej dnešnej.

Letectvo je pre európsku mobilitu a ekonomiku životne dôležité, a preto I' vydala v marci 2011 dokument s názvom "Flightpath 2050", ktorým si stanovuje náročné ciele pre budúce desaťročia. Členovia tohto fóra sú od samostatných členských štátov Eúropskej únie, cez aerolinky, letiská, EASA, EUROCONTROL až po univerzity a energetické inštitúcie. Táto nová vízia pre výzkum a inovácie v leteckej doprave bola predstavená pod vedením Eúropskej komisie za účelom udržanie európskeho vedúceho postavenia v čoraz konkurenčnejšom prostredí. Táto konkurencia pochádza nielen od tradičných súperov, ako je USA, ale čoraz viac od silných vyzývateľov z Brazílie, Kanady, Číny, Indie a Ruska. Európa musí uspieť napriek tejto zvýšenej konkurencii.

Aby sa tak stalo, musí Európa riešiť tri kľúčové body:

- zvýšiť úroveň investícií do technológií,
- zvýšiť jeho konkurencieschopnosť vo svetovej leteckej doprave,
- urýchliť tempo integrácie politiky.[36]

Prelomové technológie budú potrebné pre zabezpečenie tejto konkurenčnej výhody, najmä z hľadiska energií a dopadu na životné prostredie. Nejde už len iba o úspech, ale aj o prežitie. Letectvo bude rovnako cenné pre budúce európske generácie ako je pre tú našu.

Na dosiahnutie cieľov stanovených v tejto vízii do roku 2050 je potrebné konať už dnes.

3.1 Európska letecká doprava 2050

V roku 2050 integrovaný európsky systém leteckej dopravy je v kompletom logistickom dopravnom reťazci a súčasťou úplne vzájomne prepojeného globálneho leteckého systému.

Populácia a ekonomický rast výrazne zvýši globálny objem prevádzky na asi 16 miliárd cestujúcich ročne (v porovnaní s 2,5 miliardy cestujúcich v roku 2011). V rámci Európy počet komerčných letov je na 25 miliónoch oproti 9,4 miliónom v roku 2011 [36].

Priemysly závislé od kvapalných uhľovodíkových palív musia pristupovať koordinovane k vývoju a inováciám paliva. To je kľúčovou súčasťou riadenia emisií oxidu uhličitého z odvetvia dopravy ako celku. Prístup na letiská je rýchly, pohodlný a jednoduchý pre všetkých obyvateľov Európy. Obzvlášť intermodálne spojenia letecká-železničná doprava poskytuje obojstranne výhodnú situáciu, pokiaľ ide o pohodlie cestujúcich a udržateľnosť. Návrh letiska, procesy a služby sú založené na nových konceptoch a sú vysoko efektívne. Prevádzka letiska je odolná proti vplyvom počasia a ďalším možným narušeniam. Plánovanie letov, veľkosti lietadiel a infraštruktúra sú

optimalizované. V dôsledku úsilie spoločnosti vloženého do výskumu a vývoja do roku 2050 je letecká doprava považovaná za "eco-friendly".

3.2 Spoločenské a trhové ciele:

- Občania sú informovaní o možnostiach mobility a majú cenovo dostupný prístup, zohľadňujúc: ekonomiku, rýchlosť a úroveň služieb. Cestujúci môžu používať nepretržitú, bezpečnú a vysokorýchlostnú sieť spojov.
- 90% cestujúcich dokončí svoju cestu z domu do domu do 4 hodín. Cestujúci a náklad môžu jednoducho prestúpiť medzi jednotlivými druhmi dopravy s dosiahnutím cieľovej destinácie hladko, predvídateľne a načas.
- Lety priletia do 1 minúty od plánovaného času príchodu bez ohľadu na poveternostné podmienky. Dopravný systém je odolný voči rušivým udalostiam a je schopný automaticky a dynamicky prekonfigurovať cestu v rámci siete tak, aby vyhovovala potrebám cestujúcich ak dôjde k narušeniu.
- Je zavedený systém riadenia letovej prevádzky, ktorý je schopný zvládnuť minimálne 25 miliónov letov ročne všetkých typov lietadiel a systémov, ktoré sú integrované do leteckého dopravného systému s 24-hodinovou efektívnou prevádzkou letísk.
- Je vyvinutá súvislá pozemná infraštruktúra vrátane: letísk, vertiportov a heliportov s príslušným servisným vybavením a spojeniami. [36]

3.3 Ciele udržania a rozširovania priemyselného vedenia:

- Celý európsky letecký priemysel je silne konkurencieschopný, dodáva najlepšie produkty a služby na celom svete a má podiel viac ako 40% na globálnom trhu.
- Európa si zachová špičkový dizajn, výrobu a systémovú integráciu schopností a pracovné miesta podporované strategickými projektami, ktoré pokrývajú celý inovačný proces.
- Procesy pre strojné inžinierstvo, dizajn, výrobu a modernizáciu efektívne znížili náklady na vývoj, vrátane 50% zníženia nákladov na certifikáciu. Sú vytvorené nové štandardy. [36]

3.4 Ochrana životného prostredia a dodávka energie:

V roku 2050 je vplyv letectva na atmosféru úplne pochopený. Environmentálne vplyvy leteckej dopravy boli znížené a takú mieru, že prevyšuje vplyv zvyšujúcej sa prevádzky.

- 75% zníženie emisií CO₂ za pasažiera na kilometer a 90% zníženie emisií NO_x. Vnímaná emisia hluku lietajúcich lietadiel sa znižuje o 65%. Tieto čísla sú relatívne k charakteristikám typických nových lietadiel v roku 2000.
- V rámci pohybu na letisku je pohyb lietadla bez emisií.
- Letecké vozidlá sú navrhnuté a vyrobené tak, aby boli recyklovateľné.
- Európa je vedená ako vzor pri udržateľných alternatívnych palivách vrátane tých pre leteckú dopravu na základe silnej európskej energetickej politiky.
- Európa je v popredí výskumu atmosféry a ujíma sa vedenia pri formulácii priorít environmentálneho akčného plánu a globálnych environmentálnych štandardov. [36]

3.5 Zaistenie “safety” a „security“:

- Európsky systém leteckej dopravy celkovo má menej ako jednu nehodu na desať miliónov komerčných letov. Pre špecifické operácie ako napr. pátranie a záchrana, je cieľom znížiť počet nehôd o 80% v porovnaní s rokom 2000 so vzatím do úvahy zvyšujúcu sa premávku.
- Počasie a ďalšie riziká z prostredia sú presne vyhodnotené a riziká správne zmiernené.
- Európsky systém leteckej dopravy funguje bezproblémovo pre pilotné aj bez pilotné prostriedky v rovnakom vzdušnom priestore.
- Efektívny nástup a bezpečnostné kontroly umožňujú plynulé zabezpečenie globálneho cestovania s minimálnym vplyvom na cestujúcich a nákladu.
- Lietadlá sú konštrukčne odolné voči súčasným aj predikovaným hrozbám.
- Systém leteckej dopravy má plne zabezpečenú globálnu dátovú sieť a je odolný voči kybernetickým útokom. [36]

4 Elektrické pohonné systémy

Pre elektrické pohonné systémy existuje veľké množstvo možných konceptov. Líšia sa v skladovaní a premene energie. V súčasnosti sú zaujímavé hlavne dva systémy: systémy založené na batériách a systémy založené na palivových článkoch. Oba systémy sú v neustálom vývoji, poháňané momentálne predovšetkým automobilovými a inými mobilnými aplikáciami.

Lietadlá možno kategorizovať na základe stupňa hybridizácie, a to podľa ich výkonu a zdroja energie (Tab. 1). Definíciu hybridizácie s ohľadom na výkon a energiu vieme vyjadriť aj následovne [37]:

$$H_P = \frac{P_m}{P_{tot}} \quad (4.1)$$

$$H_E = \frac{E_b}{E_{tot}} \quad (4.2)$$

Podľa konvencie sa hybridizácia zvyčajne definuje s ohľadom na elektrickú energiu výkonu motora a energie batérie (P_m a E_b), aj keď v zásade platí rovnaká metóda analýzy by sa mohla použiť pre iné zdroje, napríklad pre vodík.

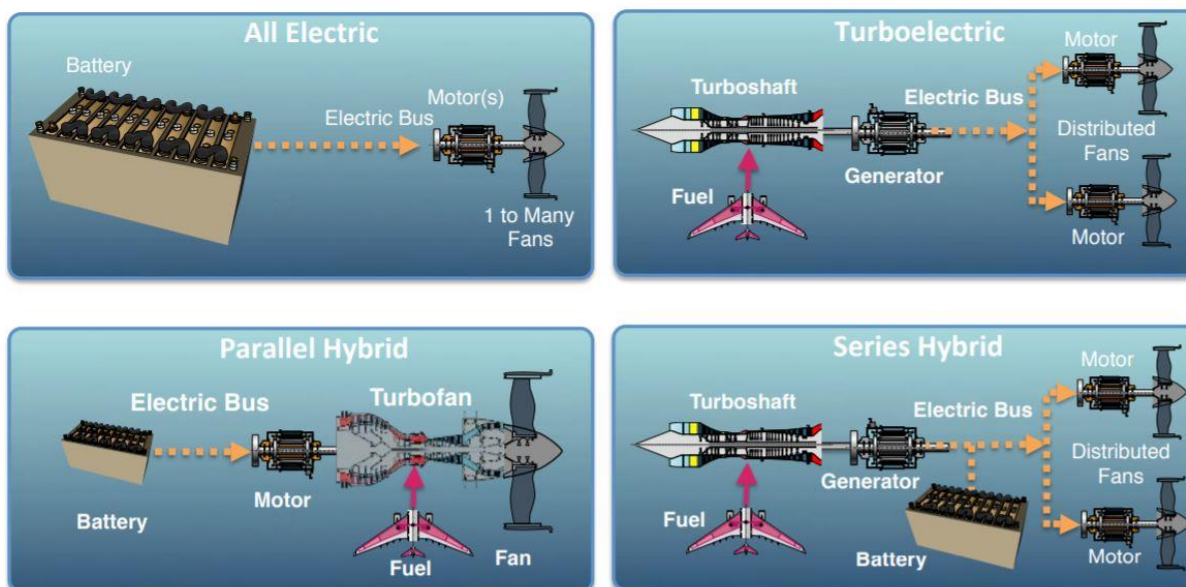
Bežné dopravné lietadlá nevyužívajú na propulziu ani elektrický výkon ani elektrickú energiu ($H_P = 0$, $H_E = 0$). Na druhej strane celo-elektrické lietadlá používajú výhradne elektrickú energiu a výkon na pohon ($H_P = 1$, $H_E = 1$). Hybridné elektrické lietadlá sa spoliehajú na kombináciu paliva a elektrickej energie a výkonu ($H_P > 0$, $0 < H_E < 1$). Nakoniec turboelektrické lietadlá používajú na skladovanie energie horľavé palivo, ale využívajú elektrický prenos energie namiesto mechanického na pohon propulzorov ($H_P > 0$, $H_E = 0$). [34]

Tabuľka 2 - Porovnanie elektrického motoru oproti spaľovaciemu

<i>Faktor</i>	<i>Elektrický</i>	<i>Spaľovací</i>
Účinnosť	Vyššia (+)	Nižšia (-)
Celková hmotnosť	Vyššia (-)	Nižšia (+)
Závislosť na nadm. výške	Nezávislý (+)	Závislý (-)
Emisie	Nižšie (+)	Vyššie (-)
Hlučnosť	Nižšia (+)	Vyššia (-)
Rozsah rýchlostí	Väčší (+)	Nižší (-)

Hybridné elektrické architektúry možno ďalej rozdeliť na sériové a paralelné hybridy. Sériové hybridné konštrukcie vyrábajú elektrickú energiu pomocou spaľovacieho motora a dodávajú energiu z batérie aj paliva do motora cez elektrické zbernice ($H_P = 1, 0 < H_E < 1$). Paralelné hybridy dodávajú energiu generovanú z fosilneho paliva do motora mechanicky ($H_P < 1, 0 < H_E < 1$). [34]

Spaľovací motor môže pracovať nepretržite a pomocou elektrickej energie, len znižovať potrebný prietok paliva alebo motor sa môže odpojiť cez spojku a umožniť tak plne elektrickú prevádzku počas niektorých fáz letu.



Obrázok 11 - Štyri hlavné elektrické pohonné architektúry [38]

Hybridné, turboelektrické a aj čisto elektrické lietadlá budú vyžadovať predovšetkým ľahké a efektívne motory s vysokou hustotou výkonu, aby vyhovovali limitáciám hmotnosti a veľkosti lietadla, najmä v konfiguráciách, ktoré na dosiahnutie vysokej propulzívnej účinnosti využívajú viacnásobné rozloženie ventilátorov. Hybridno-elektrická a turbo-elektrická architektúra bude tiež vyžadovať ľahké, účinné a vysoko výkonné generátory na premenu energie hriadeľa na elektrickú energiu, spolu s ľahkou prevodovkou na zníženie vysokých otáčok turbíny na nižšiu rýchlosť vhodnú pre generátor.

Len pre generátory budú požiadavky na výkon zhruba 40-krát vyššie v celoelektrických veľkých komerčných lietadlách ako v momentálne najelektrifikovanom lietadle na svete Boeingu 787,

ktoré vyrába elektrickú energiu o výkone 1 MW zo štyroch 250 kW generátorov namontovaných na motore, spolu s ťahom o výkone 40 MW. [39]

Pri dnešnom hodnotení uskutočniteľnosti elektrického pohonu lietadla sú dvoma najdôležitejšími technologickými parametrami *špecifická energia* (E_b), energia na jednotku hmotnosti úložiska energie a *špecifický výkon* (P_m), výkon komponentu na jednotku hmotnosti. Špecifická energia je obzvlášť použiteľná pre batérie, zatiaľ čo špecifický výkon je obzvlášť dôležitý pre elektrické motory, elektroniku na premenu energie a zariadenia na skladovanie energie.

Špecifický výkon batérií P_b môže byť dôležitým obmedzením konštrukcie dizajnu. Niektoré časti letovej obálky, ako napríklad vzlet, môžu vyžadovať podstatne viac energie ako pri lete v hladine. Batérie musia byť schopné dostatočne rýchleho dodávania energie, aby uspokojili tento dopyt počas trvania manévru; bohužiaľ, vysoká hodnota P_b sa prísne zamieňa s E_b [34, 40]

Pretože žiadne jediné číslo nezachytáva celú operačnú obálku elektrického zariadenia, výkonom uvažovaným v tejto metrike môže byť menovitý výkon, maximálny výkon alebo konštrukčný výkon. Elektromotory sú často dimenzované na krátkodobý impulzný výkon, ktorý je zvyčajne podstatne vyšší ako maximálny nepretržitý výkon; analogickým hodnotením pre turbínový motor je vzletový ťah a maximálny nepretržitý ťah. [34]

Účinnosť elektrických komponentov je tretím kľúčovým technologickým faktorom. Celková elektrická účinnosť turboelektrickej konfigurácie na jednosmerný prúd môže byť zapísaná ako:

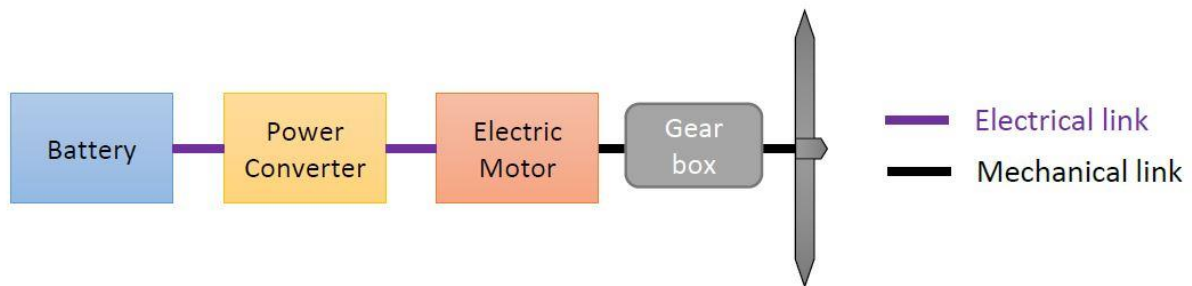
$$\eta_e = \eta_g * \eta_r * \eta_{bus} * \eta_i * \eta_m \quad (4.3)$$

Väčší problém pochádza z tepelného manažmentu odpadového tepla vo vnútri lietadla. Ak predpokladáme, že všetka elektrická neefektívnosť má za následok odporové vykurovanie, zlepšenie η_e z 97% na 99% má za následok 2% vyšší rozsah, ale 67% zníženie odpadového tepla. [34]

Najviditeľnejšou nevýhodou elektrického pohonu je dnes hmotnosť. Každá štúdia elektrických lietadiel musí zohľadniť hmotnosť skladovania energie, prenosu a následného štrukturálneho rastu. [34]

4.1 Čisto elektrický pohonný systém

Elektromotory premieňajú elektrickú energiu na mechanickú (hriadeľovú). Môžu pracovať s veľmi vysokou účinnosťou a majú vysokú spoľahlivosť. Účinnosť elektrického motora je nezávislá na prevádzkovej nadmorskej výške, čo dáva výhodu oproti bežným spaľovacím motorom. Straty výkonu v elektrických motoroch sú väčšinou úmerné krútiacemu momentu, ktorý zase súvisí s uhlovou rýchlosťou. Účinnosť je tiež ovplyvnená veľkosťou motora a spôsobom chladenia. Výkon elektrického motora je určený charakteristikami jeho krútiaceho momentu a rýchlosti otáčania. Krútiaci moment jednosmerného motora je spravidla lineárne úmerný prúdu, ktorý prechádza jeho vodičmi (známy tiež ako prúd rotora). [41]



Obrázok 12 - Schéma čisto elektrického systému [42]

Hlavné prvky elektrických pohonných systémov:

Skladovanie energie: batéria (alebo alternatívna technológia, ako je napr. palivový článok) navrhnutá pre vysokú mieru nabíjania E_b , P_b , nabíjanie/vybýjanie a bezpečnosť.

Generátor: prevádza mechanický výkon hriadeľa na elektrickú energiu striedavého prúdu.

Usmerňovač: prevádza striedavý prúd na elektrický prúd jednosmerný.

Motor: prevádza striedavý alebo jednosmerný prúd na mechanický výkon hriadeľa.

Invertor: prevádza jednosmerný elektrický prúd na striedavý. Môže byť použitý ako menič frekvencie pre striedavé motory.

Zbernica: elektrický vodič, ktorý prenáša elektrickú energiu zo zdroja do cieľa.

Motory a generátory pracujú na základe rovnakých všeobecných princípov a existuje niekoľko typov, ktoré môžu mať výhody a nevýhody pre letecké aplikácie. Elektrické stroje používajú na generovanie mechanického momentu interakciu medzi magnetickými poľami rotujúceho komponentu (rotor) a stacionárneho komponentu (stator). Hlavné magnetické pole v elektrickom stroji môže byť konštantné alebo sa môže líšiť v čase a môže byť generované pomocou permanentných magnetov, mäkkých magnetických materiálov (reluktancia), cievok pasívneho poľa („squirrel cage“) alebo cievok aktívneho poľa. Hlavné pole sa spravidla generuje v rotore [43]

Vinutia v statore, ak sú poháňané ako motor, generujú časovo sa meniace magnetické pole a spotrebúvajú veľkú väčšinu elektrickej energie stroja. Statorové prúdy môžu byť poháňané sínusovým zdrojom (striedavý prúd) alebo ľubovoľnými, aktívne riadenými krivkami (jednosmerný prúd). Striedavé stroje zvyčajne pracujú v troch fázach, zatiaľ čo stroje na jednosmerný prúd môžu používať ľubovoľný počet nezávisle riadených cievok. V režime generátora rotujúce hlavné pole indukuje prúd v cievkach statora. [34]

Elektrické stroje možno ďalej rozdeliť na synchronné a asynchronné stroje. Synchronné stroje generujú výkon alebo krútiaci moment, keď sa magnetické pole rotora otáča rovnakou rýchlosťou ako magnetické pole statora. V asynchronných strojoch sa rotor otáča pomalšou rýchlosťou ako pole statora (sklz). Niektoré synchronné stroje nemôžu štartovať z dôvodu zotrvačnosti rotora, zatiaľ čo všetky indukčné stroje sú samočinné. Pohony s premenlivými otáčkami pre striedavé motory riešia problém so štartovaním. [43]

4.2 Hybridný pohonný systém

Hybridnými pohonnými systémami sa rozumie kombinácia viacerých druhov pohonu pre pohon jedného stroja. V súčasnej dobe sa najviac využíva kombinácia spaľovacieho motoru a elektromotoru v rôznych dizajnových usporiadaniach. Pri lietadlách je cieľom dosiahnuť riešenie, ktoré poskytne dostatočné množstvo energie pri energeticky náročnejšiemu vzlete a pristátíu a aby bola elektromotoru dodávaná nielen energia z elektrického generátora, ale aj z akumulátorov, ktoré sú potrebné k plnému výkonu elektromotoru. Naopak pri ustálenom lete v hladine budú akumulátory dobíjané z prebytočnej energie generátorov. Toto riešenie umožňuje spaľovaciemu motoru pracovať rovnomerne v navrhnutom optimálnom režime po celú dobu letu, a tým je dosiahnutá najvyššia účinnosť jednotlivých zariadení hybridného pohonu. Ďalšou výhodou je možnosť zástavby spaľovacieho motoru a generátora do inej časti, než je samotný elektrický motor pro pohon lietadla. [44, 45]

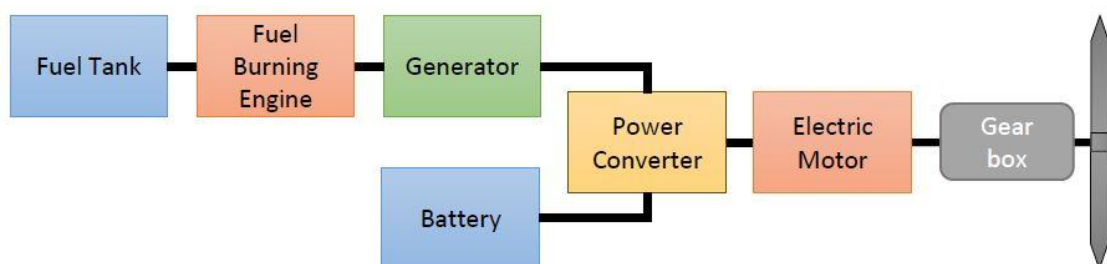
Nevýhodou je, že z dôvodu použitia akumulátorov a invertoru, vyššia hmotnosť oproti samotnému spaľovaciemu pohonu a složitost návrhu celého systému.

Využitím hybridného pohonného systému ide získať stroj s nižšou spotrebou pohonných hmôt, nižšími emisiami, a teda ekologickejšým než súčasné spaľovacie pohony. Oproti čisto elektrickému pohonu, ktorý má radu spoločných predností, rieši hybridný pohon aj problém s vytrvalosťou, ktorá je slabinou čisto elektrických pohonov.

4.2.1 Sériovo-hybridný pohonný systém

V sériovej hybridnej konfigurácii je mechanická energia na výstupe z motora spaľujúceho palivo najskôr konvertovaná na elektrickú energiu generátorom. Túto elektrickú energiu je možné použiť na nabíjanie batérie alebo na pohon elektromotora. Jednou z výhod sériovej architektúry je, že motor spaľujúci palivo je oddelený od prenosovej sústavy, a preto môže pracovať pri najvyššej účinnosti nezávisle od rýchlosti prenosovej sústavy. Má tiež výhodu flexibility, pokiaľ ide o umiestnenie súpravy motor-generátor. Pohonná sústava tiež nie je taká komplexná ako niektoré iné architektúry. [46]

Ako je zrejmé z obrázku 13 v tejto architektúre sú tri pohonné zariadenia (motor na spaľovanie paliva, generátor a elektrický motor). Môže byť integrovaná prevodovka na zvýšenie krútiaceho momentu a zlepšenie výkonu motora, a teda aj na zníženie jeho veľkosti, motor musí byť stále výrazne výkonnejší ako motor používaný v ekvivalentnej paralelnej hybridnej architektúre.



Obrázok 13 - Schéma sériového hybridného pohonu [42]

Podstatou sériového hybridného pohonu je zapojenie jednotlivých častí pohonu za sebou. Spaľovací motor poháňa výhradne elektrický generátor, ktorý energiu dodáva cez inverter do elektromotoru. V praxi tak vlastne spaľovací motor funguje len v roli zariadenia na výrobu elektrického prúdu. Pohonom lietadla je tak výhradne elektromotor, ktorý poháňa vrtuľu buď priamo, alebo cez reduktor. Takže tu neexistuje žiadna mechanická väzba medzi spaľovacím motorom a vrtuľou.

Výhodou tohto usporiadania je možnosť umiestnenia spaľovacieho motora a generátora do inej časti lietadla, než je umiestnený elektromotor. To ponúka viac možností pre konštrukčné riešenie draku lietadla. Ďalšou výhodou je naľadenie spaľovacieho motora vo veľmi úzkom pásme otáčok vedúce k jeho maximálnej efektívnosti. Prednosťou sériového pohonu je takisto jednoduchší návrh jeho koncepcie.

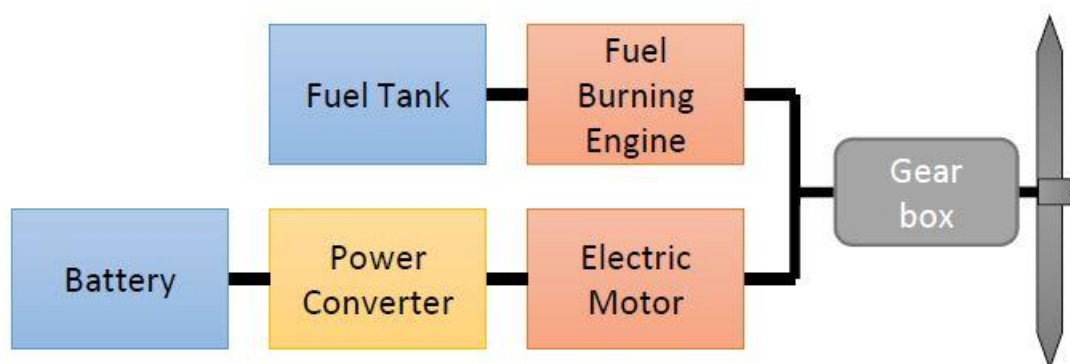
Nevýhodou toho riešenia je neexistujúca záloha pohonu v prípade zlyhania elektromotora či iného dôležitého prvku pohonu, ktorá vedie k zlyhaniu celého systému. Každý prvok pohonu tak vnáša do systému určitú mieru rizika. Pokiaľ je potrebné prenášať väčší krútiaci moment pri menšej rýchlosti alebo pri striedavom zaťažení je sériové usporiadanie hybridného pohonu vhodnejšie.

4.2.2 Paralelno-hybridný pohonný systém

V paralelnej hybridnej elektrickej konfigurácii sú motor spaľujúci palivo a elektromotor spojené s hriadeľom prostredníctvom dvoch spojok, ako je vidieť na obrázku 14. Pri tomto usporiadaní môžu elektromotor a motor spaľujúci palivo dodávať pohonnú silu buď súčasne, alebo oddelene. V kombinovanom režime zostáva spaľovací motor trvale zapnutý, až pri potrebe väčšieho výkonu sa pripojí elektromotor, a tým sa zvýši krátkodobý výkon. Táto možnosť zvýšenia výkonu dáva paralelnému hybridnému pohonu výkonovú rezervu. Rovnako pri elektrickej prevádzke môže byť následným zapnutím spaľovacieho motora zlepšená dynamika pohonu. U paralelného hybridného pohonu tvorí elektromotor a generátor jednu jednotku, čo umožňuje režim dobíjania akumulátorov, teda rekuperáciu energie. U sériového ide o dve rôzne zariadenia. Hlavnou výhodou tejto konfigurácie oproti sériovej konfigurácii je to, že je možné dosiahnuť zmenšenie motora pri súčasnom dosiahnutí rovnakého maximálneho výkonu hriadeľa. Ďalej nie je potrebný generátor v paralelnej architektúre. Hlavnou nevýhodou je, že táto architektúra zvyšuje zložitosť riadenia, vyžaduje zložitejší a drahší prenosový systém, ako aj mechanické spojky. [46]

Paralelná konfigurácia prináša úsporu hmotnosti, pretože vyžaduje iba elektromotor a motor spaľujúci palivo. Pohonné zariadenia je možné tiež znižovať bez straty maximálneho výkonu. V tejto konfigurácii však existuje mechanická spojka, ktorá zvyšuje komplexnosť riadenia. [41]

Výhodou paralelného usporiadania je, narozdiel od sériového, to že funkcia jedného z pohonov v paralelnom usporiadaní preberá v prípade zlyhania druhý pohon. Nevýhoda je, že spaľovací motor musí byť funkčný v celom rozsahu potrebných otáčok, a tým sa znižuje jeho účinnosť. Taktiež možnosti zástavby do draku nie sú tak široké, pretože tu musí byť zachovaná mechanická väzba medzi spaľovacím motorom a hriadeľom vrtule.



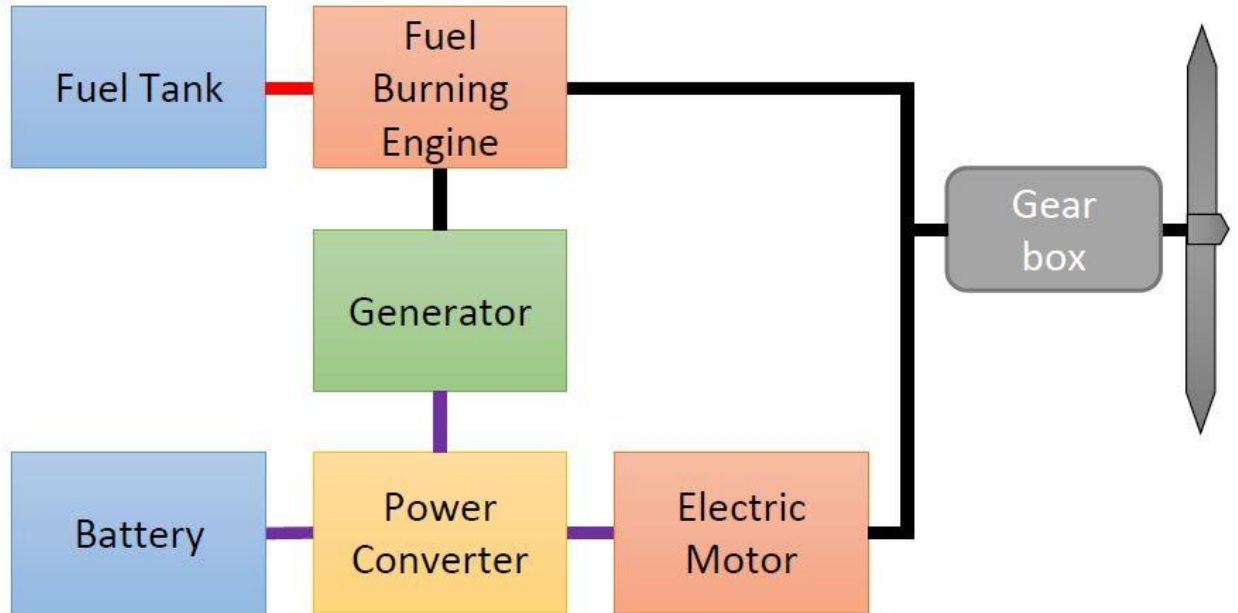
Obrázok 14 - Schéma paralelno-hybridného pohonného systému [42]

4.2.3 Kombinovaný pohonný systém

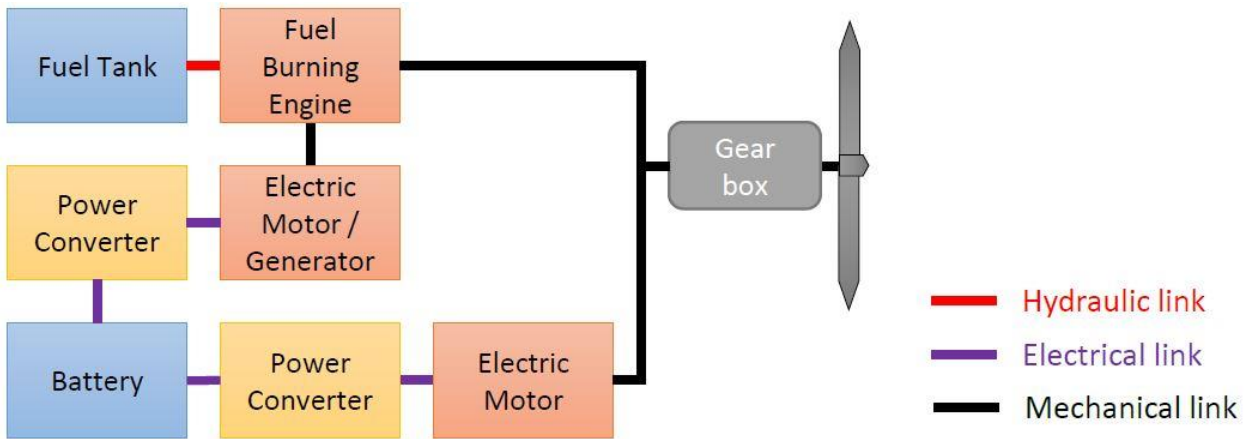
Kombinované hybridné usporiadanie vychádza zo spojenia sériového a paralelného. Z technického hľadiska sa jedná o najkomplikovanejšie a tiež najdrahšie riešenie. Avšak najviac ťaží z myšlienky hybridného pohonu. V tomto prípade môžu hnanú hriadeľ roztáčať ako spaľovací motor aj elektromotor a tiež oba dohromady. Lebo hriadeľ elektromotora je cez spojku mechanicky prepojená so spaľovacím motorom. Pri kombinovanom hybridu sa spaľovací motor, elektromotor / generátor a elektromotor stýkajú v jedinom uzle.

Výhodou je dvojitý zabezpečenie chodu v prípade poruchy elektromotora či iného článku elektrickej vetvy a naopak. Úspora paliva pri použití kombinovaného hybridného pohonu sa pohybuje v rozmedzí od 5% do 9% oproti samotnému spaľovaciemu pohonu.

Nevýhodou usporiadania je náročnosť návrhu celého pohonu a realizácia systému riadenia.



Obrázok 15 - Schéma sériovo-paralelného hybridného pohonného systému [42]



Obrázok 16 - Schéma komplexného hybridného pohonného systému [42]

4.3 Turboelektrický

Jedna z hlavných motivácií pre používanie turbo-elektrických pohonných systémov je daná skutočnosťou, že takýto systém umožňuje oddeliť rýchlosť turbíny a rýchlosť ventilátora, a preto môže byť aktivátorom distribuovaných pohonných systémov s viacerými ventilátormi.

V architektúre turboelektrického pohonného systému je mechanická energia na výstupe z motora spaľujúceho palivo najskôr konvertovaná na elektrickú energiu generátorom. Táto elektrická energia sa používa na pohon elektrického motora, ktorý späťne generuje energiu hriadeľa na pohon ventilátora alebo vrtúľ. Túto elektrickú energiu je možné použiť na nabíjanie batérie a/alebo na výrobu energie z hriadeľa elektromotorom. [47]

Ak existuje druhý typ zdroja energie, ako je nabíjateľná batéria, potom sa pohonný systém nazýva hybridná turboelektrická architektúra (známa aj ako sériová hybridná architektúra). [47]

Napriek tomu, že hybridné turboelektrické pohonné architektúry sa čiastočne spoliehajú na motory spaľujúce fosílna palivá, stále môžu poskytnúť úspory pri spaľovaní paliva a ďalšie výhody z hľadiska výkonu. S týmito architektúrami sú spojené tri hlavné zdroje potenciálnych výhod:

- i) odpojenie motora od hlavného prevodového systému,
- ii) zvýšenie energie poskytované batériou,
- iii) pohonná jednotka je v porovnaní s inými hybridnými elektrickými konfiguráciami menej komplexná

Po prvé, keď je motor odpojený, môže pracovať pri najvyššej účinnosti nezávisle od otáčok prevodového systému. Poskytnutá flexibilita umiestnenia generátora motora mimo vrtule tiež umožňuje netradičnú integráciu a konfiguráciu pohonného systému draku lietadla, ktoré môžu zlepšiť aerodynamickú účinnosť. Za druhé, na rozdiel od turbínových a spaľovacích motorov, elektromotory nie sú závislé od výšky a rýchlosti letu. Nabíjateľná batéria v hybridnom systéme môže poskytnúť energiu potrebnú na posilnenie vysoko výkonných letových manévrov a segmentov misií, ako je štart a stúpanie. Táto stratégia sa nazýva „e-boost“. Po tretie, táto architektúra nevyžaduje komplexnú delenú jednotku napájania, ktorá by pridala systému na váhe. Výhody však musia vyvážiť pridanú hmotnosť a faktory účinnosti subsystémov elektrifikovaných pohonných jednotiek. [47]

5 Akumulátory

Batériové články prevádzajú chemickú energiu na elektrickú energiu elektrochemickými reakciami a generujú jednosmernú elektrinu. Toto sa nazýva proces „vybíjania“. Nabíjateľné články batérie môžu zvrátiť túto chemickú reakciu, keď je do batérie privádzaný prúd. Toto sa nazýva proces „nabíjania“. Balíček batérií je veľmi dôležitým komponentom v aplikáciách elektrických a hybridných elektrických vozidiel, pretože je hlavným alebo sekundárnym zdrojom energie a dodáva systému značnú váhu. Preto je výber správneho typu a veľkosti batérie životne dôležitý pre celkový dizajn. [41]

Chémia článku výrazne prispieva k vlastnostiam batérie. Batérie vo všeobecnosti obsahujú kladnú elektródu (katódu), zápornú elektródu (anódu), elektrolyt a rôzne ďalšie neaktívne materiály na viazanie, izoláciu a ďalšie potreby. Ióny Li sú v súčasnosti obľúbené ako nosiče náboja kvôli vysokému potenciálu a nízkej hmotnosti. Elektrochemický článok premieňa uloženú chemickú energiu na elektrickú energiu prostredníctvom energetického rozdielu medzi reakciami prebiehajúcimi na dvoch elektródach. Batéria je praktické zariadenie na skladovanie elektrickej energie pozostávajúce z jedného alebo viacerých článkov zapojených do série a/ alebo paralelne, aby poskytovalo požadované výstupné napätie, kapacitu a výkon. [48]

Energia uložená v batériách, ktoré umožňujú priamy odber elektrickej energie, jej účinnosť je obmedzená chemickými procesmi, ktoré sa vyskytujú počas nabíjania a vybíjania. Hmotnosť systému sa vo väčšine prípadov zvyčajne nemení, s výnimkou niektorých špecifických článkov ako je Li-O₂. [40]

Koncepcie elektrického pohonu budú vyžadovať vyššie prevádzkové napätie v rozsahu nízkych kV, čo si vyžiada investície do vysoko odolných a ľahkých izolačných materiálov [49, 50, 51].

Literatúra v súčasnosti uprednostňuje distribúciu jednosmerného prúdu, najmä pre akékoľvek aplikácie zahŕňajúce používanie batérií, ale aj pre vysokovýkonné turboelektrické. [52, 53]

Distribúcia jednosmerného prúdu eliminuje potrebu synchronizácie fáz viacerých elektrických generátorov a motorov a zjednodušuje „škrtenie“ pre aplikácie distribuovaného pohonu, ale prináša penalizáciu za hmotnosť a účinnosť v dôsledku konverzie striedavého a jednosmerného prúdu na oboch koncoch [54].

Ak batérie pracujú na jednosmerný prúd, nie je potrebné napájanie opravovať, preto tam, kde sa používa skladovanie elektrickej energie, bude výhodnejšia distribúcia jednosmerného prúdu [55].

Dnes väčšina lietadiel poháňaných elektrickou energiou používa batérové systémy lítium-iónového typu. Tieto sú hromadne vyrábané hlavne ako zdroje energie pre mobilné zariadenia a sú ľahko dostupné. Takéto batérie je možné vyrábať relatívne lacno a je možné ich rozšíriť tak, aby stavali väčšie systémy s energetickou kapacitou niekoľko stoviek kWh. [40]

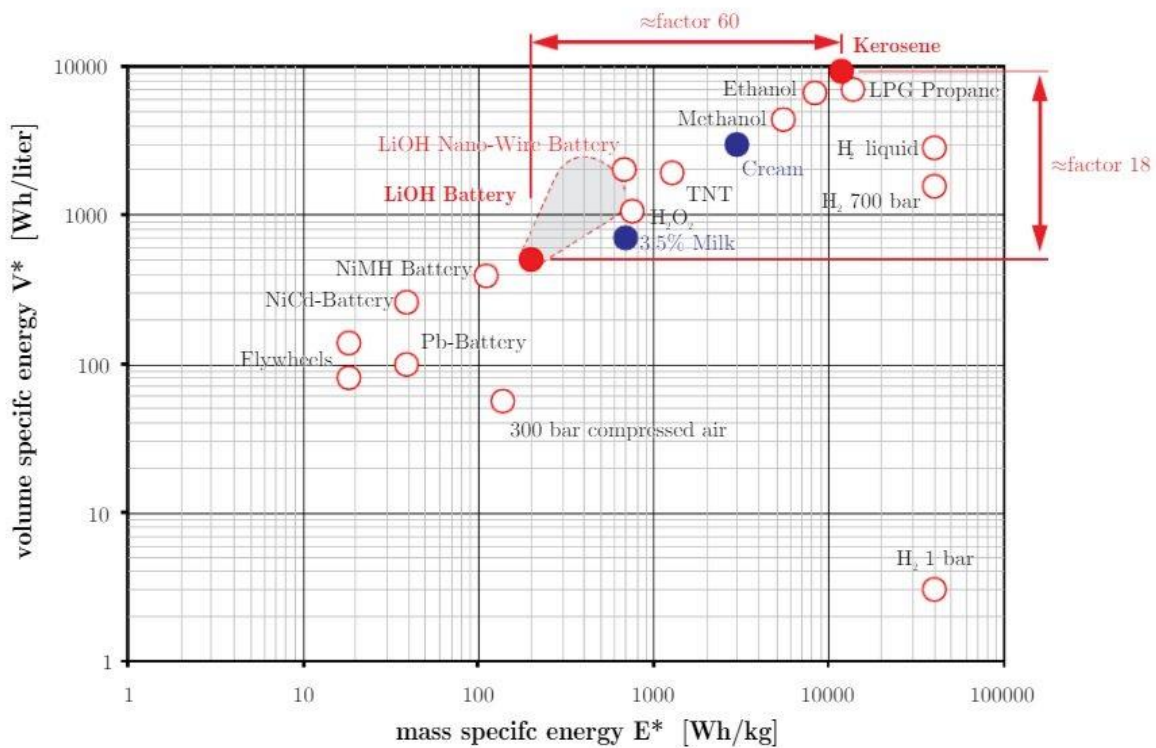
Vývoj ďalších batérových systémov na báze lítia sa posúva dopredu. Lítium-síra a lítium-kyslík sú dva systémy, na ktoré sa zameriava výskum a vývoj. Zatiaľ, čo systémy na báze síry dosiahli praktický prototypový stav (po viac ako 50 rokoch vývoja), systémy na báze kyslíka sú stále na začiatku. Všetky tieto systémy ponúkajú hustotu energie, ktorá je väčšia asi o faktor 3 až 10. Veľmi podrobný prehľad technológie batérií na báze lítia je uvedený v [56]. Tabuľka 3 obsahuje hodnoty prevzaté z tejto publikácie a ukazuje očakávaný vývoj týchto systémov. Pokiaľ ide o možnú aplikáciu, batérové systémy na báze kyslíka v letectve sú mnohé otázky stále otvorené a nemožno očakávať, že budú zodpovedané v priebehu nasledujúcich 10 rokov. Preto sa zdá byť realistickejšie očakávať použitie systémov na báze síry v priebehu nasledujúcich 20 rokov v mobilných aplikáciách. [40]

Tabuľka 3 - Špecifická energetická hustota batérií

<i>System</i>	<i>Theoretická</i>	<i>Očakávaná 2025</i>
Li-Ion (2012)	390 Wh/kg	250 Wh/kg
Zn-air	1090 Wh/kg	400-500 Wh/kg
Li-S	2570 Wh/kg	500-1250 Wh/kg
Li-O ₂	3500 Wh/kg	800-1750 Wh/kg

Energia potrebná na let musí byť uložená na palube. Pre aplikáciu v lietadle sú najdôležitejšími parametrami energia na hmotnosť a v menšej miere energia na objem. Tieto špecifické hodnoty sú znázornené na obrázku 17 pre rôzne systémy skladovania energie. Je vidieť, že aj tie najpokročilejšie súčasné systémy skladovania batérií zaostávajú za parametrami kerosínu. Zatiaľ čo faktor v špecifickom objeme je iba asi 18, faktor hustoty špecifickej hmotnostnej energie je rádovo 60. Toto je hlavný problém aplikácie v letectve a ukladá prísne limity pre systémy napájané batériami. Obsah menšej špecifickej energie je menej kritický, pokiaľ konštrukcia lietadla nie je obmedzená vnútorným objemom. V opačnom prípade by vozidlo vyžadovalo väčšie krídla alebo

trupy, čo by viedlo k stratám celkovej účinnosti lietadla v dôsledku väčšieho povrchu. Samozrejme existujú nápady na začlenené batérií a iných skladovacích systémov do primárnej štruktúry, ale tieto sú stále dosť vzdialené od praktickej aplikácie, pretože batéria vyžaduje puzdrá so systémami regulácie teploty. [40]



Obrázok 17 - Špecifická hmotnosť a objem materiálov na 1kg [40]

Najzákladnejšou výzvou, ktorej čelí elektrický pohon v letectve je, že batérie majú rádovo 50-krát nižšiu špecifickú energiu ako kvapalné palivá. V prípade Jet-A = 11 900 Wh/kg, pričom lítium-iónové batérie sa v roku 2016 pohybujú v rozmedzí $E_b = 200$ Wh/kg [57].

Vzhľadom na to, že v nedávnej minulosti je stále v pamäti zlyhanie lítium-iónových batérií Boeing 787, budú musieť vývojári elektrických lietadiel vyvinúť účinné systémy na ochranu pred nebezpečenstvom pre batérie nielen na splnenie požiadaviek letovej spôsobilosti, ale aj na uspokojenie obáv o bezpečnosť verejnosti. Aj keď sú systémy zadržiavania nebezpečenstva pre batérie pravdepodobne menej náročné ako pre prchavé letecké palivo, potreba týchto systémov sa často prehliaha v pretekoch za vyššou hustotou energie.

Okrem generovania množstva energie rádovo väčšieho ako súčasné lietadlá budú elektricky poháňané lietadlá potrebovať výkonovú elektroniku na premenu, prepínanie a úpravu tohto výkonu. Okrem vykonávania týchto funkcií s minimálnymi elektrickými stratami bude potrebná výkonová elektronika fungovať aj s minimálnym súvisiacim vytváraním tepla. Tento faktor je obzvlášť dôležitý vzhľadom na multi-MW elektrické energetické systémy, ktoré budú potrebné pre regionálne a väčšie komerčné lietadlá, a z toho vyplývajúcu potrebu odvádzať prebytočné generované teplo. Konvenčné lietadlá môžu v súčasnosti používať palivo ako zásobník na prebytočné teplo, ale táto možnosť nebude k dispozícii v elektricky poháňaných lietadlách.

Prenos veľkého množstva elektrickej energie okolo lietadla (napr. z batérií alebo generátorov na motory poskytujúce pohon) sa bude v ideálnom prípade vykonávať pri vysokých napätiach, aby sa minimalizovali odporové straty; prenos vysokého výkonu pri vysokom napätí však nevyhnutne povedie k riziku rozpadu izolácie a elektrického oblúka. Súčasne dlhé káble v konfiguráciách využívajúcich niekoľko hnacích ventilátorov rozmiestnených okolo lietadla zvýšia hmotnosť, čím sa skombinuje dodatočná hmotnosť, ktorá je už potrebná pre palubné batérie. Dve alternatívne perspektívy pomáhajú pochopiť rozdiel medzi súčasnou technológiou a tým, čo bude potrebné pre elektrický pohon. Po prvé, kumulatívny účinok neefektívnosti v reťazci elektrickej energie naznačuje, že viac ako 10% energie by sa stratilo v generátore, výkonovej elektronike (usmerňovač, ochrana obvodu a menič), kabeláži a motore. Pri tejto úrovni strát je hybridno-elektrická architektúra podstatne menej účinná ako konvenčný turbo-ventilátorový motor s vysokým pomerom obtoku, takže spaľovanie paliva v hybridnom elektrickom lietadle by bolo horšie. [39]

Vysoká kapacita akumulátora a nízka hmotnosť sú jednoznačne zásadné pre plne elektrické a hybridno-elektrické architektúry a aby sa umožnilo vytváranie produktov s komerčne životaschopnými charakteristikami rozsahu užitočného zaťaženia, je všeobecne uznávané, že elektrické skladovacie systémy potrebujú energetickú hustotu najmenej 500 Wh/kg. Najvyššie komerčné batérie sa dnes pohybujú okolo 250 Wh/kg, pričom batéria Tesla má udávanú hustotu energie 250-320 Wh/kg. Ďalší vývoj alebo nové chemické technológie batérií budú musieť dosiahnuť hranicu 500 Wh/kg, a aj keď batérie dosiahnu túto úroveň, hustota skladovania energie bude stále o 25-krát nižšia ako približne 12 kWh/kg dodaných prúdom paliva. Okrem vysokej hustoty energie budú pri podpore ekonomiky lietadiel poháňaných batériami rozhodujúce aj vysoké rýchlosti nabíjania a dlhá životnosť batérií. [39]

Správa výboru NAE [11] predpokladá, že E_b dosiahne do roku 2035 400 - 600 Whr/kg.

Alternatívny spôsob, ako sa pozrieť na obmedzenia súčasnej technológie, je zvážiť výmenu motorov v existujúcom lietadle za systém elektrického pohonu a zistiť, aké vlastnosti by tento systém musel mať na generovanie porovnateľnej úrovne výkonu lietadla.

Elektrický pohon predstavuje nové a neznáme výzvy pre konštruktérov lietadiel a bezpečnostných inžinierov, ale aj vzrušujúce príležitosti na odstránenie známych rizík. Úplne elektrické lietadlo nahrádza nebezpečenstvo horľavého leteckého paliva novým nebezpečenstvom lítiových batérií (alebo nejakej budúcej chémie). Výrobcovia lietadiel a regulačné agentúry majú s kvapalnými palivami dlhoročné servisné skúsenosti a výsledné technické kontroly sú veľmi dobre rozvinuté. Batérie sú tiež známym leteckým nebezpečenstvom, ale majú oveľa menšie skúsenosti so servisom a zlyhávajú v zdanlivo zložitejších režimoch. [34]

Primárnym nebezpečenstvom je tepelný útlm, keď v článkoch batérie dochádza k rýchlemu, sebastačnému zvyšovaniu teploty a tlaku a môže dôjsť k externému požiaru. Môžu sa tiež uvoľňovať toxické plyny. Tepelný únik môže byť dôsledkom nadmerného vybíjania, prebývania a vnútorných skratov. [34]

6 Ekonomicko-environmentálne zhodnotenie

Hybridné a čisto elektrické lietadlá môžu využívať výhody priamo tým, že na kratších misiách nahradia palivo elektrickou energiou. Ako narastá E_b , väčší podiel ekonomických misií je možné lietať na elektrickú energiu. Ak je elektrina lacnejšia ako prúdové palivo na jednotku energie, môže to viesť k úspore prevádzkových nákladov. V závislosti od zdroja elektrickej energie môže dôjsť aj k zníženiu emisií uhlíka. To si vyžaduje podrobné porozumenie generátorovým palivám, stratám z prenosu/siete a analýze životného cyklu výroby a likvidácie batérií. Ak sa predpokladá výroba elektrickej energie z obnoviteľných zdrojov, zníženie emisií uhlíka je jasným prínosom elektrického pohonu. [34]

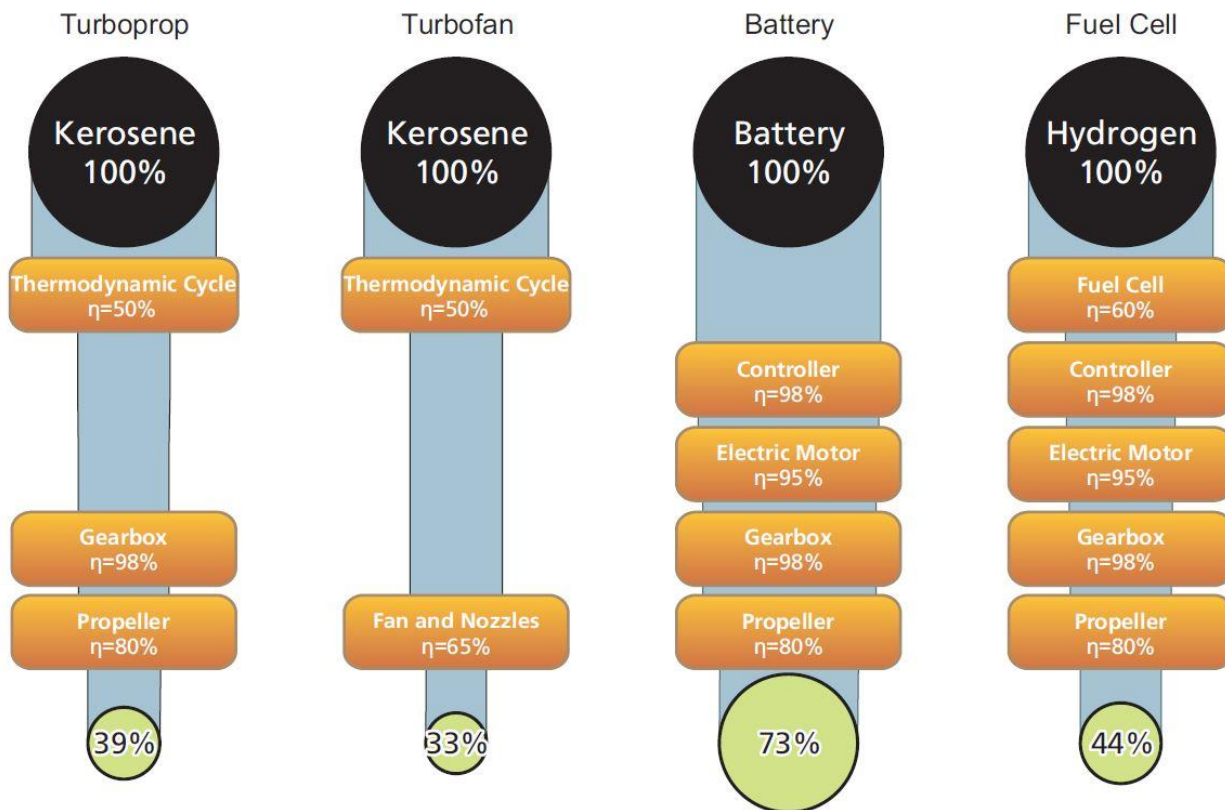
Úplne elektrické lietadlá majú tiež teoretickú výhodu účinnosti, pretože eliminujú termodynamický cyklus. Ak sa používajú supravodivé vodiče a výkonová elektronika, podiel elektrickej účinnosti môže byť veľmi blízky 1. Táto teoretická výhoda je do určitej miery negovaná, ak sa energia z batérie generuje pomocou bežných turbín v elektrárňach (ktoré tiež vykazujú termodynamické straty). Výhoda účinnosti môže byť stále zmysluplná, aj keď sa sieťová energia generuje

neobnoviteľnými prostriedkami, pretože pozemné parné turbíny majú vyššiu tepelnú účinnosť ako letecké turbíny. [34]

Reťazec účinnosti premeny energie uloženej na palube na hnaciu silu zahŕňa niekoľko krokov konverzie. Každý z nich je ovplyvnený stratami, ktoré sú vyjadrené individuálnou účinnosťou. Pri porovnávaní rôznych systémov je potrebné vziať do úvahy palubný konverzný reťazec.

Obrázok 18 zobrazuje štyri typické konverzné reťazce:

- konvenčný turboprotuľový motor
- konvenčný prúdový motor,
- systém napájaný batériami, a
- systém poháňaný palivovými článkami.[40]



Obrázok 18 - Typické palubné konverzné reťazce s typickou účinnosťou komponentov a celkovou účinnosťou reťazca.[40]

Je zrejmé, že všetky elektrické systémy vykazujú vysokú celkovú účinnosť systému. Najmä batériové systémy, ktoré sa v lietadle vyhýbajú premene paliva na elektrickú energiu, ponúkajú najvyššiu účinnosť viac ako 70%v porovnaní s účinnosťou klasických spaľovacích systémov dosahujúcich účinnosť až 40%. Tieto palubné reťazce samozrejme neobsahujú výrobu elektrickej energie na zemi, ani nezahŕňajú výrobu a distribúciu paliva alebo elektriny. Napríklad cyklus nabíjania a vybíjania chemických batérií spôsobuje energetické straty rádovo 15-20%. Napriek tomu sú batériové systémy z hľadiska efektívneho využívania palubnej energie veľmi atraktívne. [40]

7 Záver

Praktické batériové elektricky poháňané lietadlá sú dnes obmedzené na malé vozidlá do 2 cestujúcich a pomerne krátkym dosahom a vytrvalosťou. Bez ohľadu na náklady je súčasná technológia vhodná pre malé ultraľahké lietadlá, nie však pre komerčné letectvo. Na pohon väčších lietadiel by bolo potrebné dramatické zlepšenie technológie batérií. V porovnaní s dnešnou technológiou so špecifickými energetickými hodnotami až 250 Wh/kg by bolo potrebné, aby bola hmotnostná špecifická hustota energie zvýšená najmenej päťkrát, aby bola užitočná. Realistickejšie by tento faktor musel byť rádovo 10, aby sa pritiahol komerčný záujem o väčšie (regionálne) lietadlá.

V súčasnosti prebieha veľký pokrok v batériovej technológii, ktorý je väčšinou poháňaný mobilnými zariadeniami a automobilovými aplikáciami. História vývoja naznačuje, že kým nebudú dostupné požadované vylepšenia, môže to trvať asi 20-40 rokov.

Okrem týchto základných úvah je stále veľa otázok, ktoré je potrebné zodpovedať a ktorými sa v súčasnosti výskum zaoberá, ktoré sa dotýkajú dostupnosti materiálov, certifikácie, infraštruktúra pre prenos elektrickej energie, infraštruktúra na samotnom letisku.

Zoznam zdrojov

- [1] Airbus Web Page [online]. <https://www.airbus.com/innovation/zero-emission/electric-flight/ecopulse.html>
- [2] Airbus Web Page [online]. <https://www.airbus.com/newsroom/news/en/2021/06/the-ecopulse-hybrid-aircraft-demonstrator-successfully-passed-wind-tunnel-testing.html>
- [3] Airbus Web Page [online]. <https://www.airbus.com/newsroom/press-releases/en/2020/12/the-ecopulse-hybrid-aircraft-demonstrator-achieves-its-first-key-milestone-with-success.html>
- [4] NASA Press Release [online]. <https://www.nasa.gov/press-release/nasa-electric-research-plane-gets-x-number-new-name>
- [5] NASA Web Page [online]. <https://www.nasa.gov/centers/armstrong/features/x57-high-voltage-testing-continues.html>
- [6] CLARKE, Sean, Matthew REDIFER, Kurt PAPATHAKIS, Aamod SAMUEL a Trevor FOSTER. X-57 power and command system design. In: 2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC) [online]. IEEE, 2017, 2017, s. 393-400. ISBN 978-1-5090-3953-1. Dostupné z: doi:10.1109/ITEC.2017.7993303
- [7] ANTCLIFF, Kevin R. a Francisco M. CAPRISTAN. Conceptual Design of the Parallel Electric-Gas Architecture with Synergistic Utilization Scheme (PEGASUS) Concept. In: 18th AIAA/ISSMO Multidisciplinary Analysis and Optimization Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 2017-06-05, s. ISBN 978-1-62410-507-4. Dostupné z doi:10.2514/6.2017-4001
- [8] MARIEN, Ty. Seat Capacity Selection for an Advanced Short-Haul Aircraft Design. In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, 2016-01-04, s. ISBN 978-1-62410-393-3. Dostupné z: doi:10.2514/6.2016-1283
- [9] WELSTEAD, Jason a James L. FELDER. Conceptual Design of a Single-Aisle Turboelectric Commercial Transport with Fuselage Boundary Layer Ingestion. In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, 2016-01-04, s. ISBN 978-1-62410-393-3. Dostupné z: doi:10.2514/6.2016-1027
- [10] NASA Web Page [online]. <https://sacd.larc.nasa.gov/asab/asab-projects-2/starc-abl/>

- [11] National Academy of Engineering Committee on Propulsion and Energy Systems to Reduce Commercial Aviation Carbon Emissions, Commercial Aircraft Propulsion and Energy Systems Research: Reducing Global Carbon Emissions, National Academies Press, 2016, <https://doi.org/10.17226/23490>
- [12] GRAY, Justin S., Charles A. MADER, Gaetan K. KENWAY a Joaquim R. R. A. MARTINS. Approach to Modeling Boundary Layer Ingestion using a Fully Coupled Propulsion-RANS Model. In: 58th AIAA/ASCE/AHS/ASC Structures, Structural Dynamics, and Materials Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 2017-01-09. ISBN 978-1-62410-453-4. Dostupné z: doi:10.2514/6.2017-1753
- [13] WELSTEAD, Jason a James L. FELDER. Conceptual Design of a Single-Aisle Turboelectric Commercial Transport with Fuselage Boundary Layer Ingestion. In: 54th AIAA Aerospace Sciences Meeting [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2016, 2016-01-04. ISBN 978-1-62410-393-3. Dostupné z: doi:10.2514/6.2016-1027
- [14] ANSEN, Ralph, Cheryl BOWMAN, Amy JANKOVSKY, Rodger DYSON a James FELDER. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion (EAP) Research for Large Subsonic Transports. In: 53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 2017-07-10, s. ISBN 978-1-62410-511-1. Dostupné z: doi:10.2514/6.2017-4701
- [15] Pipistrel Web Page [online]. <https://www.pipistrel-aircraft.com>
- [16] GOKCIN, Cinar a Phil ANSELL. Electrified aircraft flight tests moving at full throttle [online]. <https://aerospaceamerica.aiaa.org/year-in-review/electrified-aircraft-flight-tests-moving-at-full-throttle/>
- [17] EASA Type/Certificate [online]. https://www.easa.europa.eu/sites/default/files/dfu/tcds_easa.a.573_is.5_0.pdf
- [18] MAHEPA Web Page [online]. <https://mahepa.eu>
- [19] Ampaire Web Page [online]. <https://www.ampaire.com>
- [20] SAMPSON, Ben. Ampaire hybrid-electric Eel aircraft makes 341 mile test flight [online]. <https://www.aerospacetestinginternational.com/news/electric-hybrid/ampaire-hybrid-electric-eel-aircraft-makes-341-mile-test-flight.html#prettyPhoto>

- [21] Ampaire Press Release [online]. https://fd46bca4-8fdb-4a60-bb5a-984ecb406747.filesusr.com/ugd/63e3b9_a86b919997d34a12a56727b0c110a651.pdf
- [22] MagniX Web page [online]. www.magnix.aero
- [23] WARWICK, Graham. Harbour Air And MagniX Claim First For Electric Aircraft [online]. <https://aviationweek.com/aerospace/harbour-air-magnix-claim-first-electric-aircraft>
- [24] HEMMERDINGER, Jon. All-electric Grand Caravan makes maiden flight [online]. <https://www.flightglobal.com/airframers/all-electric-grand-caravan-makes-maiden-flight/138600.article>
- [25] NARISHKIN, Abby a Alexandra APPOLONIA. Inside a \$4 million electric plane, the first full-size, all-electric passenger aircraft in the world [online]. <https://www.businessinsider.com/inside-alice-first-full-size-passenger-electric-plane-eviation-2020-10>
- [26] Eviation Web Page [online]. <https://www.eviation.co>
- [27] DZIKIY, Phil. Eviation's all-electric Alice airplane coming to US regional airline Cape Air by 2022 [online]. <https://electrek.co/2019/06/18/eviation-electric-cape-air>
- [28] ZeroAvia Web Page [online]. <https://www.zeroavia.com>
- [29] VoltAero Web Page [online]. <https://www.voltaero.aero/>
- [30] ByeAerospace Web Page [online] <https://byeaerospace.com/bye-aerospace-and-safran-announce-cooperation-agreement-to-equip-eflyer-all-electric-aircraft-with-engineus-electric-smart-motors>
- [31] ByeAerospace Web Page [online]. <https://byeaerospace.com/bye-aerospace-unveils-8-seat-all-electric-eflyer-800>
- [32] BRADLEY, M. K. and C. K. Droney, "Subsonic ultra green aircraft research - phase I final report," 2011.
- [33] Boeing Web Page [online]. <https://www.boeing.com/features/innovation-quarterly/aug2017/feature-technical-sugar.page>
- [34] BRELJE, Benjamin J. a Joaquim R.R.A. MARTINS. Electric, hybrid, and turboelectric fixed-wing aircraft: A review of concepts, models, and design approaches. Progress in Aerospace

Sciences [online]. 2019, 104, 1-19. ISSN 03760421. Dostupné z: doi:10.1016/j.paerosci.2018.06.004

[35] ACARE. Aviation in Europe: a vision for 2050 [online].

<https://www.cleansky.eu/sites/default/files/documents/acare-sria-citizen.pdf>

[36] European Commission. Directorate General for Research and Innovation. & European Commission. Directorate General for Mobility and Transport. (2011). Flightpath 2050 :Europe's vision for aviation : maintaining global leadership and serving society's needs. Publications Office. Dostupné z: <https://doi.org/10.2777/50266>

[37] SINGH, Riti, A.T. ISIKVEREN, S. KAISER, C. PORNET a P.C. VRATNY. Pre-design strategies and sizing techniques for dual-energy aircraft. Aircraft Engineering and Aerospace Technology [online]. 2014, 86(6), 525-542. ISSN 0002-2667. Dostupné z: doi:10.1108/AEAT-08-2014-0122

[38] MADAVAN, Nateri. A NASA perspective on electric propulsion technologies for comercial aviation. NASA Ames Research Center, 2016.

[39] BERGER, Roland. Aircraft Electrical Propulsion - The Next Chapter of Aviation?. 2017.

[40] HEPPELLE, Martin J. Electric Flight - Potential and Limitation. Institute of Aerodynamics and Flow Technology Braunschweig, 2012.

[41] CINAR, Gokcin, Dimitri N. MAVRIS, Mathias EMENETH, Alexander SCHNEEGANS, Carsten RIEDIGER, Yann FEFERMANN a Askin ISIKVEREN. Sizing, Integration and Performance Evaluation of Hybrid Electric Propulsion Subsystem Architectures. In: 55th AIAA Aerospace Sciences Meeting [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 2017-01-09. ISBN 978-1-62410-447-3. Dostupné z: doi:10.2514/6.2017-1183.

[42] CINAR, Gokcin. A Methodology for Dynamic Sizing of Electric Power Generation and Distribution Architectures. Dissertation, Georgia Institute of Technology, 2018.

[43] Windings and Rotating Magnetomotive Force. KRAUSE, Paul, Oleg WASYNCZUK a Steven PEKAREK. Electromechanical Motion Devices [online]. Hoboken, NJ, USA: John Wiley & Sons, 2012, 2012-08-16, s. 145-184. ISBN 9781118316887. Dostupné z: doi:10.1002/9781118316887.ch4

- [44] CHAU, K.T a Y.S WONG. Overview of power management in hybrid electric vehicles. *Energy Conversion and Management* [online]. 2002, 43(15), 1953-1968. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/S0196-8904(01)00148-0
- [45] KHAJEPOUR, Amir, FALLAH, M. Saber, a GOODARZI, Avesta. *Electric and Hybrid Vehicles: Technologies, Modeling and Control - A Mechatronic Approach*, Wiley, Feb. 2014.
- [46] CINAR, Gokcin, Yu CAI, Imon CHAKRABORTY a Dimitri N. MAVRIS. Sizing and Optimization of Novel General Aviation Vehicles and Propulsion System Architectures. In: *2018 Aviation Technology, Integration, and Operations Conference* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2018, 2018-06-25. ISBN 978-1-62410-556-2. Dostupné z: doi:10.2514/6.2018-3974
- [47] CINAR, Gokcin, Alexander A. MARKOV, Jonathan C. GLADIN, Elena GARCIA, Dimitri N. MAVRIS a Soumya S. PATNAIK. Feasibility Assessments of a Hybrid Turboelectric Medium Altitude Long Endurance Unmanned Aerial Vehicle. In: *AIAA Propulsion and Energy 2020 Forum* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2020, 2020-08-24. ISBN 978-1-62410-602-6. Dostupné z: doi:10.2514/6.2020-3577
- [48] YAN, Jinyue, ed. *Handbook of Clean Energy Systems* [online]. Chichester, UK: John Wiley & Sons, 2015. ISBN 9781118991978. Dostupné z: doi:10.1002/9781118991978
- [49] JANSEN, Ralph, Cheryl BOWMAN, Amy JANKOVSKY, Rodger DYSON a James FELDER. Overview of NASA Electrified Aircraft Propulsion (EAP) Research for Large Subsonic Transports. In: *53rd AIAA/SAE/ASEE Joint Propulsion Conference* [online]. Reston, Virginia: American Institute of Aeronautics and Astronautics, 2017, 2017-07-10. ISBN 978-1-62410-511-1. Dostupné z: doi:10.2514/6.2017-4701
- [50] ARMSTRONG, Michael J., Christine A. H. ROSS, Mark J. BLACKWELDER a Kaushik RAJASHEKARA. Propulsion System Component Considerations for NASA N3-X Turboelectric Distributed Propulsion System. *SAE International Journal of Aerospace* [online]. 2012, 5(2), 344-353. ISSN 1946-3901. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-2165
- [51] LOWE, Angela a Dimitri N. MAVRIS. Technology Selection for Optimal Power Distribution Efficiency in a Turboelectric Propulsion System. *SAE International Journal of Aerospace* [online]. 2012, 5(2), 425-437. ISSN 1946-3901. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-2180
- [52] BRADLEY, M. K. and C. K. Droney, "Subsonic ultra green aircraft research phase II – hybrid electric design exploration, NASA/CR–2015–218704. doi:2060/20150017039.

- [53] ARMSTRONG, Michael J., Christine A. H. ROSS, Mark J. BLACKWELDER a Kaushik RAJASHEKARA. Trade Studies for NASA N3-X Turboelectric Distributed Propulsion System Electrical Power System Architecture. SAE International Journal of Aerospace [online]. 2012, 5(2), 325-336. ISSN 1946-3901. Dostupné z: doi:10.4271/2012-01-2163
- [54] JONES, Catherine E., Patrick J. NORMAN, Stuart J. GALLOWAY, Michael J. ARMSTRONG a Andrew M. BOLLMAN. Comparison of Candidate Architectures for Future Distributed Propulsion Aircraft. IEEE Transactions on Applied Superconductivity [online]. 2016, 26(6), 1-9. ISSN 1051-8223. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2016.2530696
- [55] WARWICK, G. NASA moves electric-propulsion components closer to reality, Aviation Week, 2017. Dostupné z: <http://aviationweek.com/commercial-aviation/nasamoves-electric-propulsion-components-closer-reality>.
- [56] LUONGO, C.A., P.J. MASSON, T. NAM, D. MAVRIS, H.D. KIM, G.V. BROWN, M. WATERS a D. HALL. Next Generation More-Electric Aircraft: A Potential Application for HTS Superconductors. IEEE Transactions on Applied Superconductivity [online]. 2009, 19(3), 1055-1068. ISSN 1051-8223. Dostupné z: doi:10.1109/TASC.2009.2019021
- [57] RHEAUME, Jonathan M. a Charles LENTS. Energy Storage for Commercial Hybrid Electric Aircraft [online]. In: . 2016-09-20. Dostupné z: doi:10.4271/2016-01-2014

Zoznam tabuliek

Tabuľka 1 - Klasifikácia podľa architektúry elektrických pohonov

Tabuľka 2 - Porovnanie elektrického motoru oproti spaľovaciemu

Tabuľka 3 - Špecifická energetická hustota batérií

Zoznam obrázkov

Obrázok 1 – Koncept EcoPulse.

Obrázok 2 - Izometrický model X-57 so stredovou osou, zobrazujúci batériový systém, krídlo s vysokým pomerom strán, elektrické motory a trakčnú silovú zbernicu.

Obrázok 3 – Koncept PEGASUS so zloženými vnútornými vrtuľami.

Obrázok 4 – Koncept STARC-ABL s BLI motorom.

Obrázok 5 – Model Velis Electro s výraznenými batériami a motorom.

Obrázok 6 – Ampaire Cessna 337 Skymaster

Obrázok 7 – Alice na Paris Air Show

Obrázok 8 – Vízia ZeroAvie na obnoviteľne napájané vodíkovo-elektrické lietadlo

Obrázok 9 – Hybridný modul v konfigurácii do trojuholníka

Obrázok 10 - Koncept SUGAR Volt

Obrázok 11 - Štyri hlavné elektrické pohonné architektúry

Obrázok 12 - Schéma čisto elektrického systému

Obrázok 13 - Schéma sériového hybridného pohonu

Obrázok 14 - Schéma paralelno-hybridného pohonného systému

Obrázok 15 - Schéma sériovo-paralelného hybridného pohonného systému

Obrázok 16 - Schéma komplexného hybridného pohonného systému

Obrázok 17 - Špecifická hmotnosť a objem materiálov na 1kg

Obrázok 18 - Typické palubné konverzné reťazce s typickou účinnosťou komponentov a celkovou účinnosťou reťazca.