



NÁVRH HYBRIDNEJ POHONNEJ JEDNOTKY PRE EXPERIMENTÁLNY LETÚN STRATON D7

Oliver Longauer
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Jozef Čerňan
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina

Abstract

The aim of this article is designing hybrid power unit for the needs of experimental aircraft Straton D7. Article describes different options of hybridization of power units on basis of their architecture and the function of electric component in relation to the whole power unit. Compares different designs of automotive and aircraft solutions of hybridization of power units. After that, article offers solution for hybrid engine of Straton D7 on basis of gained theoretical knowledge, comparison of shown conceptions and basic calculations, with the needs and predisposition of the original aircraft in its best interest.

Keywords

Hybrid power unit, design, 2-stroke engine, mild hybrid

1. Úvod

Hybridné pohonné ústrojenstvá sú trendom v oblasti automobilového priemyslu v dosiahnutí možného kroku k efektívnemu využitiu paliva a zvyšovania účinnosti pohonnej jednotky ako celku. Vývoj v tomto smere prebieha s ohľadom na viaceré faktory, akými sú napríklad zvyšovanie celkového výkonu, znižovanie emisií a vplyvu na životné prostredie, alebo samotný vplyv na cenu prevádzky vozidla v podobe zníženej spotreby paliva. Od konca dvadsiateho storočia sa táto technológia dostala do štádia, kedy je možné sa pokúsiť o uplatnenie aj v iných sektoroch dopravy, ktorou je napríklad aj letecká doprava.

Cieľom je dosiahnuť návrh hybridnej pohonnej jednotky pre experimentálny letún Straton D7 v smere, ktorý dáva zmysel z pohľadu leteckej dopravy a uplatniteľnosti aj pre ďalšie motory bez nutnosti kompletnej náhrady pôvodného spaľovacieho motora. Tým bude dvojtaktný zážihový motor Trabant P63, ktorý je súčasťou modelu dostupného v rámci Žilinskej univerzity v Žiline. Keďže je to motor, ktorého úloha bola pôvodne taktiež v rámci automobilovej dopravy, je toto spojenie technológií viac než prihodné.

2. Hybridizácia piestových motorov

Hybridizácia piestových spaľovacích motorov prebieha už dlhodobo najmä v rámci automobilového priemyslu. Vývoj prebiehajúci v tomto odvetví však môže byť s ohľadom na isté koncepcie účelný aj z hľadiska leteckej dopravy, keďže ponúka možnosti zlepšiť vlastnosti piestového spaľovacieho motora v oblastiach, ktoré môžu byť zaujímavé z ekonomického, ekologického alebo výkonnostného hľadiska. Pod týmto pojmom sa predstavuje doplnenie piestového spaľovacieho motora o ďalší zdroj energie, či už sa jedná o batériu, zotrvačník alebo iný ďalší zdroj. Účely a výsledky tohto procesu môžu byť rôzne.

Prvým priamočiarým účelom je snaha dosiahnuť väčšiu prejednú vzdialenosť s použitím rovnakého množstva paliva. To by

prinášalo ekonomické výhody v podobe nižších nákladov na prevádzku. V automobilovom priemysle sú tieto snahy viac než úspešné. Priemerný hybridný motor môže v rámci rôznych motorových režimov dosiahnuť výrazné zlepšenie úspornosti s ohľadom na spotrebu paliva až do výšky 50% v závislosti od koncepcie motora, požadovaných rýchlostí a požadovaných módov prevádzky. [1]

Zlepšenie výkonnostných vlastností v daných režimoch je ďalšou motiváciou hybridizácie piestového motora. Využitie elektromotora v istých režimoch prevádzky vozidla je nie len ekonomicky výhodné, ale môže takáto technológia slúžiť aj ako spôsob krátkodobého zvýšenia výkonu v určitých situáciách. V ponímaní leteckej dopravy by mohla byť takáto požiadavka počas fázy vzletu, kedy je vo všeobecnosti záujem využívať motor v maximálnom režime, čo vedie k predpokladu o záujme zvýšenia výkonu pomocou napríklad hybridnej zložky. Druhou stranou mince je poznámka, kedy maximálna záťaž na motor priamo ovplyvňuje jeho spoľahlivosť v dlhodobom hľadisku. V prípade doplnenia výkonu skrz hybridnú zložku motora by piestový spaľovací motor mohol obmedziť svoj výkon práve tak, aby sa v súčte maximálny výkon nezmenil, avšak zároveň sa predĺžila jeho bezpečná prevádzka o množstvo hodín.

So správnou úvahou nad využívaním zložiek hybridného motora vieme dospieť aj k zníženiu ekologickej záťaže. Hybridný motor má k dispozícii dva zdroje výkonu, čím dokážeme optimalizovať spotrebu a emisie podľa našich požiadaviek chodu. Potenciál využitia výhod piestového spaľovacieho motora a zároveň výhod elektromotora nám prináša možnosti, kedy prevádzka motora môže dosiahnuť nižšiu úroveň ekologickej záťaže. Takýto počin je vo všeobecnosti vítaný v akejkol'vek podobe a má efekt na široké spektrum oblastí.

2.1. Možnosti hybridizácie na základe konštrukčnej schémy hybridizácie

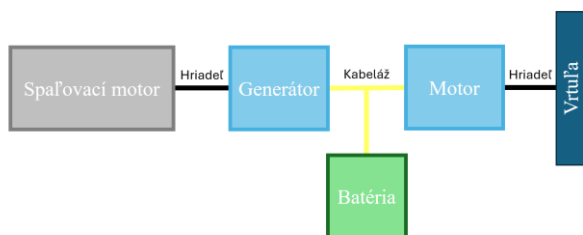
Pri stavbe hybridného motora existuje viac možností, ako takúto úlohu poňať z konštrukčnej stránky. Požiadavky na funkcie a účel hybridizácie sú kľúčovým faktorom výberu koncepcie stavby

hybridnej pohonnej jednotky. Rozdeľujúcou stránkou je poňatie úlohy zakomponovania elektrickej zložky do architektúry motora a spôsob prenosu energie oboch zložiek a ich následný stret.

2.1.1. Sériové radenie hybridného motora

Pri sériovom radení motora sú súčasti hybridnej pohonnej jednotky usporiadané za sebou v rade. Spaľovací motor má za úlohu poháňať generátor elektrickej energie. Ak sa úroveň nabitia akumulátora dostane na kritickú hodnotu, môže ho aj začať dobíjať, ak mu to umožňuje aktuálna situácia požiadavky na jeho dodávaný výkon. V záujme využitia potenciálu tejto koncepcie je spaľovací motor nutné nastaviť tak, aby za každých okolností pracoval len vo svojom optimálnom okne otáčok, kedy jeho efektívnosť je maximálna. Ak je táto podmienka splnená, môžeme dosiahnuť výrazné zníženie spotreby paliva a záťaže voči životnému prostrediu. Schematicky túto koncepciu zobrazuje Obrázok 1. Energiu získanú spaľovacím motorom premieňa generátor na elektrickú energiu v striedavom prúde. Problém nastáva v momente stretu s elektrickou energiou z akumulátora, ktorý ju poskytuje v podobe jednosmerného prúdu. Znamená to potrebu transformácie prúdu tak, aby sme vedeli využiť možnosti akumulátora. Následne je potrebné túto transformáciu vykonať druhý raz, aby sme mohli poháňať elektrický motor, ktorý je následne už zodpovedný za prenos výkonu smerom na pohonné ústrojenstvo v podobe vrtule. Z popisu vyplýva nutnosť viacnásobnej transformácie energie, čo vedie k stratám. [2] [3]

Keďže generátor je mechanicky spojený priamo s piestovým spaľovacím motorom, je nutné mať generátor veľkosti, ktorý bude zvládať takúto záťaž. Zároveň je táto požiadavka prenášaná aj na elektrický motor, ktorý musí tiež vyhovieť takejto požiadavke, aby dokázal využiť a doručiť dostupný výkon. Z tohto dôvodu sa sériový hybridný motor stretáva s problémom vysokej hmotnosti pohonného ústrojenstva ako celku. [2] [3]



Obrázok 1: Schéma sériového radenia hybridnej pohonnej jednotky [2] [autor]

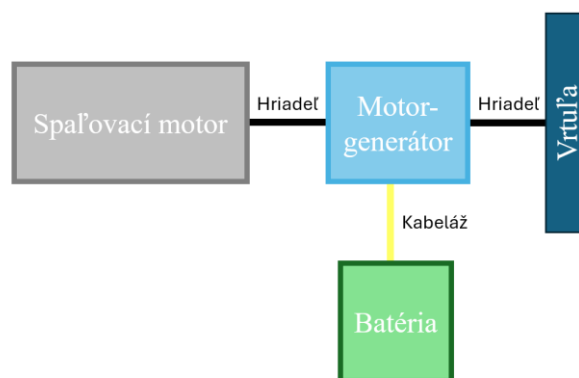
2.1.2. Paralelné radenie hybridného motora

Paralelné radenie hybridného motora môže byť charakterizované ako úplný opak voči sériovej koncepcii z hľadiska ponúkaných možností a vlastností, danými stavbou pohonnej jednotky. Ako zobrazuje Obrázok 2, výrazným rozdielom je priame mechanické prepojenie motora s vrtuľou. Zároveň hriadeľ otáča aj rotormi potrebnými pre funkciu motor-generátora. Ten je v tomto prípade spojený, a nemusí prebiehať viacnásobná premena energie. Taktiež môže byť prepínaný medzi módmí nabíjania akumulátora, alebo vybíjania v móde dodávania výkonu pohonnému ústrojenstvu. Pre obidve vetvy je

spoločná potreba konvenčnej prevodovky, kedy maximálne otáčky by mali byť spolu zosynchronizované. [2] [3]

Výhodou hybridnej pohonnej jednotky radenej paralelne je jej výrazne nižšia hmotnosť, získaná nutnosťou použitia len jedného elektrického stroja. Znižovanie hmotnosti súvisí aj s tým, že ak je elektrická zložka mienená len na dodatočný výkon na obmedzený čas, napríklad počas vzletu, máme možnosť zmenšiť a odľahčiť pohonnú jednotku, čo pri sériovom radení nie je možné.

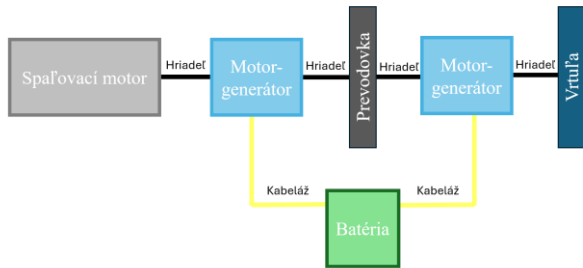
Aj paralelné radenie sa stretáva so svojím koncepčným problémom. Otáčky spaľovacieho motora sú priamo naviazané na otáčky vrtule, čo predstavuje problém pri snahe o zaručenie najnižšej novej spotreby paliva. Táto nevýhoda by bola obzvlášť podčiarknutá pri používaní pevnej vrtule. Riešením problému môže byť využitie pomocného systému, ktorým môže byť napríklad uplatnenie elektrickej spojky v letectve, avšak riešenia tejto koncepčnej nevýhody znižujú existujúce pozitíva využitia paralelného radenia hybridného motora.



Obrázok 2: Schéma paralelného radenia hybridnej pohonnej jednotky [2] [autor]

2.1.3. Kombinované radenie hybridného motora

Existujú riešenia architektúry hybridného motora, ktoré sa snažia zachovať výhody oboch spôsobov radenia. Problémom však je zachovanie takej hmotnosti vzhľadom na poskytovaný výkon, ktorý ešte dáva zmysel pre leteckú dopravu. Obrázok 3 zobrazuje práve jednu možnú konfiguráciu, kedy v sériovom radení nájdeme prvý motor-generátor so spaľovacím motorom, za ním je hriadeľ vedený do špecifickej planetárnej prevodovky. Následne koncepcia pripája druhý motor generátor, ktorý už je aj zároveň spojený s vrtuľou. Akumulátor je pripojený zároveň podľa sériovej koncepcie k prvému motor-generátoru, aj podľa paralelnej koncepcie k druhému motor generátoru. Znamenalo by to možnosť využiť optimalizovaný zmenšený spaľovací piestový motor pri konštantných otáčkach, zodpovedajúcich najideálnejšej spotrebe paliva alebo výkonu podľa aktuálnej požiadavky od motora. Avšak so spojením výhod sériového radenia hybridného motora a výhod paralelného radenia hybridného motora je spojená aj cena v podobe ešte výraznejšieho navýšenia hmotnosti takejto pohonnej jednotky ako celku. [2]



Obrázok 3: Schéma kombinovaného radenia hybridnej pohonnej jednotky [2] [autor]

2.2. Možnosti hybridizácie na základe funkcie elektrickej zložky motora

Hybridizáciu piestového spaľovacieho motora môžeme navrhnúť vo viacerých stupňoch pomeru výkonnosti medzi spaľovacím motorom a jeho elektrickým doplnujúcim motorom. Voľbu z možností pri návrhu koncepcie je dôležité urobiť na základe našich požiadaviek a predstáv, do akej miery chceme, aby sme sa spoliehali na elektrickú zložku.

2.2.1. Micro hybrid (Mikro hybrid)

Stupeň micro hybrid je úrovňou, kedy elektrická zložka slúži len na určité úkony nie nutne spojené s prevádzkou počas jazdy, v respektíve počas letu. V automobilovom priemysle je najčastejšie spájaný s funkciou štart/stop, kedy elektricky po zastavení vozidla je spaľovací motor vypnutý bez nutnosti zásahu vodiča. Účelom je zníženie spotreby paliva počas doby, kedy nie je záujem o výkon motora. Následne po zošliapnutí pedálu je elektricky opäť spaľovací motor naštartovaný a pripravený. Súčasťou funkcie micro hybridov je doplnenie o jednotku spravovania energie. Funkciou je dosiahnuť zníženie spotreby paliva vďaka využitiu 12V batérie, ktorá už je súčasťou spúšťacej sústavy motora, na napájanie všetkých potrebných elektrických systémov. Vďaka tomuto riešeniu je záťaž a využitie alternátora znížené na minimum, čo nepriamo vedie k zníženej spotrebe paliva spaľovacieho motora. Výraznou výhodou tejto koncepcie je schopnosť relatívne jednoduchšej implementácie a je lacnou možnosťou v smere hybridizácie. Nie je nutný takmer žiadny zásah do stavby motora alebo do celej konštrukcie daného vozidla, pre ktoré platí využitie batérie v rámci spúšťacej sústavy. [4] [5] [6]

2.2.2. Mild hybrid (Mierny hybrid)

Mild hybrid je nasledovnou vyššou úrovňou pre pomer elektrickej zložky voči celkovému výkonu motora. Napriek navýšeniu ani v tomto prípade nedokáže elektrická zložka byť plnohodnotnou náhradou spaľovacieho motora a nemôžeme sa naň spoliehať samostatne. Účelom je stále len asistancia spaľovaciemu motoru, avšak už nie len nepriamym vplyvom, ktorým je nahradenie funkcie alternátora a náhrada konvenčnej štartovacej sústavy. Nikdy sa pohon neskladá len z elektromotora, avšak už sa môže pri tejto koncepcii priamo podieľať na celkovom výkone motora.

Pri tomto stupni už vo veľkej miere vstupuje do procesu nutnosť dobíjania zdroja elektrickej energie. Keďže je v záujme tohto konceptu mať podiel aj na výkone motora, musíme zdroj elektrickej energie spojiť s motorom pomocou motor-

generátoru. Na základe toho, akým spôsobom motor-generátor je zaradený v rámci stavby motora, rozlišujeme dve vedúce varianty. Prvou je riešenie BiSG (Belt-integrated Starter Generator). Vo všeobecnosti je považované za najbežnejšie riešenie v oblasti automobilového priemyslu. Náprotivným riešením je CiMG (Crankshaft-integrated Motor Generator). Rozdielom je poňatie konceptu umiestnenia elektrického stroja. Kým variant BiSG spája elektrický stroj s piestovým motorom remeňom, CiMG koncepcia využíva elektrický stroj umiestnený na kľukovom hriadele za spaľovacím motorom. [4] [6]

2.2.3. Full hybrid (Úplný hybrid)

Full hybrid je najvyššou kategóriou z hľadiska hybridizácie motora. Tento variant sa vyznačuje tým, že elektrická zložka pohonu má dostatočný výkon na to, aby vyhoveli samostatne požiadavke potrebného výkonu na pohon a aby tomu vyhovel, mala by byť zložka výkonu elektrickej časti na celkovom výkone aspoň 40%. Potrebný zdroj elektrickej energie je teda výrazne väčší oproti mild hybridom, čo dáva možnosť výrazne zmenšiť potrebný piestový spaľovací motor, kedy požiadavka na jeho výkon je omnoho menšia. Módy takéhoto motora sa môžu buď opierať výhradne o výkon elektromotora, o spoluprácu elektromotora so spaľovacím motorom alebo môže počas nutnosti dobitia zdrojov elektrickej energie pracovať len spaľovací motor. Pri správnom nastavení týchto módov podľa režimov prevádzky môžeme dosiahnuť najvýraznejšie zníženie spotreby paliva pre spaľovací motor, emisii, aj záťaž a zvýšenie spoľahlivosti spaľovacieho motora. [4] [6]

2.2.4. Plug-in hybrid

V spojitosti s full hybridmi je problémom vysoká závislosť na možnostiach dobíjania akumulátora počas jazdy. Tento problém rieši verzia plug-in hybridov s možnosťou dobiť zdroj skrz akýkoľvek externý zdroj elektrickej energie, pri správnom napätí. To vedie k možnosti neuvažovať počas prevádzky nad nutnosťou dobíjania batérie, keďže dobiť ju môžeme aj následne po dosiahnutí cieľovej destinácie. Zároveň si udržiava výhody full hybridov. To znamená, že pri tejto koncepcii môžeme využiť kapacitu akumulátora na čo najdlhšiu vzdialenosť a následne pri potrebe pokračovať ďalej sa spustí spaľovací motor, ktorý umožní pokračovať až na miesto, kde bude možné opäť umožniť proces dobíjania. Tento koncept zároveň môže uplatňovať rovnaké princípy z hľadiska dobíjania počas prevádzky, čím sa opäť rozširujú scenáre pre efektívne využitie takejto pohonnej jednotky ako celku. [4]

3. Návrh hybridnej pohonnej jednotky pre Straton D7

Pri navrhovaní riešenia vylepšenia akejkoľvek súčasti je nutné uvažovať nad tým, či je smer, ktorý je cieľom úpravy, zhodný s potrebami daného stroja. Straton D7 ako experimentálny letún má svoje základné vlastnosti, ktoré môžu výrazne oponovať poskytovaným výhodám hybridnej pohonnej jednotky. Je dôležité sa preto zamyslieť a vybrať koncepciu, ktorá bude dávať zmysel vzhľadom na predispozíciu letúna.

Straton D7 je experimentálne ultraľahké lietadlo v podobe motorového klzáku. Jeho autorom je firma ProFe, ktorej zakladateľmi boli v roku 1992 Václav Brandejs a Ivan Brandejs. Lietadlo sa dodávalo vo forme tzv. stavebnice, kedy záujemca dostal lietadlo v neposkladanom stave a musel si ho za relatívne jednoduchého postupu poskladať v rámci svojho priestoru

a času v garáži, hangári alebo inom vhodnom priestore. Doba potrebná na kompletizáciu stavebnice bola v rozmedzí 250 až 300 človek/hodín práce. Následné zloženie alebo rozloženie pre jednoduchý presun zvyčajne netrval dlhšie ako 30 minút. Je priamym predchodcom vylepšenej verzie D8, ktorý primárne bol mierený na americký trh a bol dodávaný firmou Aero Dorvron. Cieľom bolo dosiahnuť na pilotov so záujmom o vlastné lietadlo a možnosť samostatného lietania za dostupnú cenu. Väčšinou časť výroby sa konala v Českej republike, v respektíve koncept prvý lietajúci model D7 pochádza roku 1988, čiže sa jednalo ešte o Československo. [7]



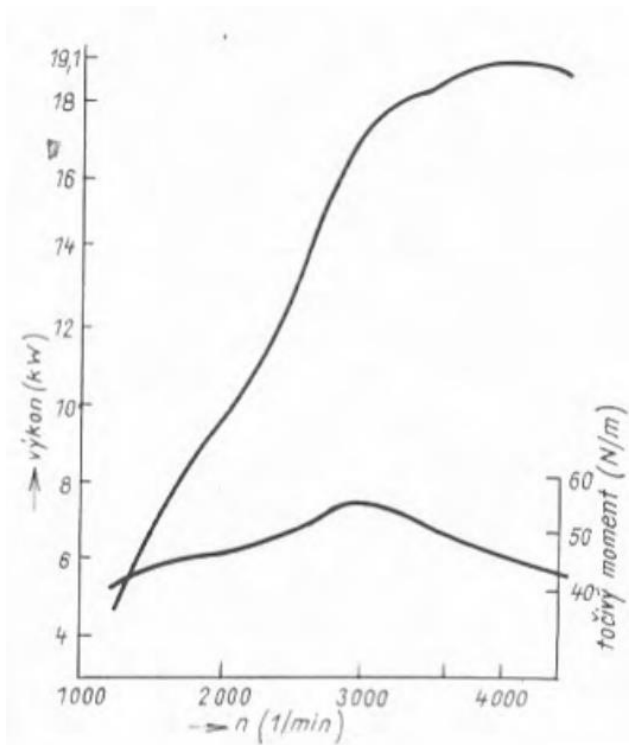
Obrázok 4: Experimentálny letún Straton D7 [7]

3.1. Piestový spaľovací motor

Ako popisuje predchádzajúca časť práce, existovalo viac variant pre pohon letúna Straton D7 v podobe troch rôznych výrobcov. Všetky tri varianty však spája ich spôsob práce zapaľovania, kedy sa jedná o dvojtaktné motory. Výkonnejším variantom bol motor Rotax 447, ktorý poskytoval maximálny výkon pre vzlet 40 konských síl. Avšak originálnou verziou vzhľadom na pôvod tohto letúna je použitie upraveného motora Trabant P63 s o niečo nižším výkonom.

Technické špecifikácie motora Trabant P63: [8]

- Dvojtaktný zážihový motor
- Radový dvojvalcový motor
- Zdvihový objem 594,5 cm³
- Hmotnosť 56kg
- Kompresný pomer 7,6:1
- Výkon 25 konských síl pri 4200 otáčkach za minútu
- Chladenie vzduchom
- Pomer výkon/váha 0,45 konskej sily na kilogram



Obrázok 5: Diagram výkonu v kilowattoch a točivého momentu v newtonmetroch motora Trabant P63 vzhľadom na otáčky za minútu [8]

Z hľadiska výkonnosti je motor Rotax 447 lepším variantom vo všetkých smeroch. Nájde sa však modely Stratónu D7 aj s inými spaľovacími motormi. Populárnou verziou je motor Rotax 503, ktorý v rámci svojho skladania tohto letúna dokázali jemnou úpravou doručiť Stratónu D7 vyšší výkon. Vo všeobecnosti prebiehali úpravy, ktoré často nezodpovedali pôvodným plánom výrobcu, ktoré následne si majitelia registrovali po vlastnej osi. Verziou dostupnou v rámci Žilinskej univerzity v Žiline je práve tá s motorom Trabant P63, ktorá i keď je objektívne výkonnostne horšou, návrh hybridizácie posluží na získanie výhod v iných oblastiach.

3.2. Hybridizácia pohonnej jednotky

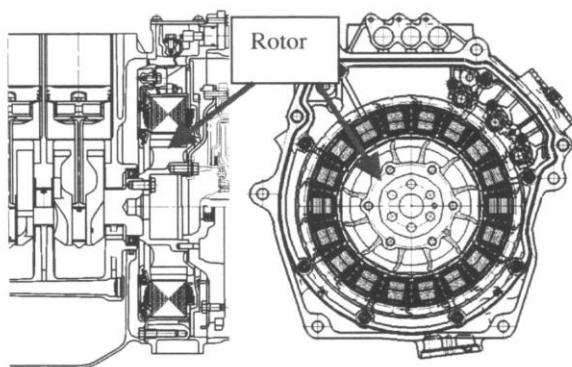
V teoretickej časti popisu hybridných pohonných jednotiek je spoločným denominátorom hmotnosť takéhoto systému. Ako zobrazujú technické parametre Stratónu D7, je práve tento parameter kľúčový pre možnosti akéhokoľvek použitia tohto letúna vzhľadom na to, že už vo svojej pôvodnej verzii je nutné obmedziť použitie vzhľadom na hmotnosť pilota. O možnosti užitočného nákladu sa takmer vôbec nedá uvažovať.

3.2.1. Integrovaný Motorový Asistent

Návrh riešenia hybridizácie pohonnej jednotky Stratónu D7 je založený na koncepte vyvinutom na konci dvadsiateho storočia pre automobilový priemysel. Je ním koncepcia Integrovaného Motorového Asistenta (IMA), ktorý uplatnila spoločnosť Honda pri snahe o dosiahnutie pokroku v automobilizme v smere výrazného zníženia spotreby paliva. Prvá verzia z roku 1999 bola založená na využití štvortaktného radového trojvalcového motora s cieľom znížiť spotrebu paliva vzhľadom na vzdialenosť o 50%, čo bolo pri daných režimoch prevádzky úspešne dosiahnuté, kedy hmotnosť systému nepresiahla 10% hmotnosti

kompletizovaného automobilu. Práve druhá časť je viac než kľúčovým prvkom pre využitie koncepcie pre návrh pohonnej jednotky Stratonu D7. [21]

Návrh pohonnej jednotky je konfigurovaný nasledovne. Piestový spaľovací motor Trabant P63 je hlavný zdroj výkonu. Elektrická zložka má doplnkovú asistenčnú funkciu na obmedzený čas, čo nám umožňuje navrhovať riešenie dostatočne kompaktné a ľahké vzhľadom na nutnosť prídania batérie, elektrického stroja (motor-generátor) a riadiacej jednotky, kedy nepožadujeme od elektrickej časti schopnosť poháňať letún samostatne v akejkoľvek fáze prevádzky. Znamená to, že sa bude jednať o mild hybrid. Funkciu elektrického stroja zastáva bezkartáčový motor na báze jednosmerného prúdu v troch fázach. Ten je umiestnený medzi spaľovací motor a vrtuľu na ich spoločný hriadeľ. Má dve funkcie, prvou je prenášať výkon na hriadeľ a asistovať svojim výkonom pri vzlete, druhá je zabezpečovať možnosť rekuperácie energie. Skladá sa z rotora v podobe permanentného magnetu, ktorý je spojený s hriadeľom a otáčky sa zhodujú s otáčkami vrtule. Stator je v rozdelenej podobe, kedy cievky sa nachádzajú v kruhovom usporiadaní v blízkosti krútiaceho sa hriadeľa so statormi.



Obrázok 6: Schéma rezu radového motora Honda, pohľad na konštrukciu integrovaného motorového asistenta [9]

To, ktorý mód je v danom bode aktívny, musí byť riadený prepínateľnou riadiacou jednotkou. Tá má za úlohu zároveň aj sledovať stav batérie do doby, kým je možné z nej čerpať energiu. Je napájaná z 12V batérie a musí byť umožnené jej chladenie.

K dispozícii musí byť samozrejme ďalej aj samotný akumulátor, ktorý bude možné dobíjať a vybíjať. Proces dobíjania je možný realizovať počas dvoch fáz. Jednoduchším riešením je rekuperácia energie počas doby, kedy potrebujeme vrtuľu spomaliť a zastaviť. To, koľko energie vieme takto získať, môžeme zistiť na základe vzťahu (2) pre výpočet kinetickej energie pre otáčavý pohyb:

$$E_r = \frac{1}{2} * I \omega^2 \quad (2)$$

kde:

E_r – kinetická energia otáčavého pohybu

I – moment zotrvačnosti

ω – uhlová rýchlosť

Hodnotu kinetickej energie otáčavého pohybu v Jouloch je následne potrebné premeniť na vypovedajúcu jednotku. Použijeme vzťah pre prepočet na kilowatthodiny, ktoré budú kľúčové pri výbere akumulátora a možnosti využitia tejto energie na pohon letúna. Ak vezmeme do úvahy vrtuľu s hriadeľom s ich celkovou hmotnosťou a polomerom otáčania v závislosti od dĺžky vrtule, vieme pomocou použitia rôznych variant získať k dispozícii množstvo energie. Pri prepočte musíme ukrátiť tieto hodnoty o odhadované účinnosti motor-generátora a riadiacej jednotky. Pri predpoklade účinnosti motor-generátora na úrovni 90,25% [18] a pristávacej procedúry s rôznymi otáčkami vrtule, sa môžeme dostať na hodnoty uvedené:

	Materiál	Otáčky (rpm)	Hmotnosť (kg)	Dĺžka (m)	E_r (kWh)
Vrtuľa A	drevo	4200	6	1,2	0,23
Vrtuľa B	drevo	3200	7,25	1,6	0,29
Vrtuľa C	karbón	4000	1	1,3	0,04
Vrtuľa A	drevo	2100	6	1,2	0,05
Vrtuľa B	drevo	1600	7,25	1,6	0,07
Vrtuľa C	karbón	2000	1	1,3	0,01

	E_r (kWh)	E_r skut (kWh)
Vrtuľa A	0,23	0,21
Vrtuľa B	0,29	0,26
Vrtuľa C	0,04	0,04
Vrtuľa A	0,05	0,05
Vrtuľa B	0,07	0,06
Vrtuľa C	0,01	0,01

Obrázok 7: Tabuľka vypočítaných hodnôt a ich prepočet

Využitie kinetickej energie vrtule a jej hriadeľa v dobe, kedy máme záujem ich už len zastaviť, však nie jediná zložka možnej rekuperácie energie. Druhá zložka je však o čosi komplexnejšia z hľadiska samotných spôsobov ovládania lietadla. Počas doby, kedy vrtuľové lietadlo klesá sa vrtuľa môže dostať v rámci svojich režimov do autorotačného alebo až brzdiaceho režimu, kedy sa podieľa na odpore letúna ako celku bez akejkoľvek kladnej vlastnosti voči výkonu, rýchlosti a podobne. To nám dáva priestor využiť takúto premrhanú energiu opäť na dobíjanie akumulátorov. Môžeme vrtuľu začať využívať ako formu turbíny, poháňaná práve v rámci práce svojich režimov, prúdiciam vzduchom, ktorý sa tak či onak pokúša spomaľovať letún.

Problémom kvantifikovať, aký konkrétny zisk vieme z takejto idey dostať, je samotná koncepcia predaja Stratonu D7. Keďže sa jedná o letún predávaný v podobe, kedy majiteľ si ho skladá po vlastnej osi, aerodynamické vlastnosti sa môžu výrazne líšiť. Výrazným vplyvom prispieva dizajn vrtule, ktorá môže byť koncipovaná práve podľa potrieb na možnosť využitia brzdiaceho režimu, avšak môže byť jej koncepcia mierená aj úplne opačným smerom. Preto na zistenie, aký vplyv by malo využitie takejto rekuperačnej koncepcie je potrebné mať aspoň zmenšený model Stratonu D7, ktorý by mohol odhaliť jeho vlastnosti. Keďže takýto model nie je k dispozícii, musíme sa oprieť o dáta získané pri inom skutočnom teste a pokúsiť sa o pomerné prenesenie hodnôt smerom na náš experimentálny letún.

Na konci roku 2017 bol ukončený výskum koncepcie rekuperácie energie počas vykonávania okruhu v rámci letiska. Pozostával z trate, kedy po vzlete počas vykonávania okruhu pilot nastúpil do výšky 1000 stôp a vykonal okruh s tým, že následné klesanie prebiehalo s nečinným spaľovacím motorom s rôznymi modelmi vrtúl a rôznymi rýchlosťami klesania. Pri tomto výskume bola

analyzovaná nie len rekuperovaná energia, ale aj potrebná energia na vykonanie stúpania. Výskum potvrdzuje, že takéto riešenie za použitia vrtule umožňujúcej dosiahnuť režim, kedy ju môžeme využiť ako alternatívnu turbínu, dokázal prinavrátiť do batérie 12% potrebného výkonu pre vykonanie okruhu s dosiahnutou výškou 1000 stôp pri klesaní s hodnotou 700 stôp za minútu. [10]

Uplatnenie pre Straton D7 za týchto okolností je prinajmenšom zaujímavou voľbou. Ak by sme mali vyčíslieť potenciál tohto riešenia, musíme sa jedine oprieť o prepočet dosiahnutia tej istej výškovy hladiny s našimi údajmi. Pri Stratone D7 môžeme počítať, že dokáže stúpať 550 stôp za minútu, čo pri výkone 25 konských síl/18,65 kilowattu sa rovná potrebnej energii o hodnote 0,565 kilowatthodín. Ak uvažujeme s efektívnosťou riešenia podloženého experimentom za použitia vrtule Pipistrel EA-002, návrhom by sme mohli získať pre budúce použitie elektromotora 0,0678 kilowatthodín energie.

Aby sme dokázali ale využiť túto dostupnú energiu na zrekuperovanie, je nutné použitie akumulátora, ktorý kapacitou, hmotnosťou a vlastnosťami vyhovuje požiadavkám. Vzhľadom na je potrebná batéria, ktorá svojou kapacitou dokáže obsiahnuť súčet výsledkov našich uvažovaných rekuperovaných energií. Pre správnu správne zaobchádzanie je našim cieľom nepresiahnuť 80% nabitia batérie kvôli udržiavaniu ideálnej životnosti. Na základe toho batéria je modelovaná na kapacitu dvojnásobnú voči súčtu rekuperačných variant o celkovej hodnote 0,22kWh.

Typ batérie	Olovená batéria	NiCd batéria	NiMH batéria	Li-ion - Kobalt	Li-ion - Mangán	Li-ion - Fosfát
Špecifická energia	50 Wh/kg	80 Wh/kg	120 Wh/kg	190 Wh/kg	135 Wh/kg	120 Wh/kg
Rekuperácia vrtuľa	50 Wh	50 Wh	50Wh	50 Wh	50 Wh	50 Wh
Rekuperácia klesanie	67,8 Wh	67,8 Wh	67,8 Wh	67,8 Wh	67,8 Wh	67,8 Wh
Min. hmotnosť batérie	4,4 kg	2,75kg	1,83kg	1,16kg	1,63kg	1,83kg

Obrázok 8: Tabuľka pre dimenzovanie batérie

3.3. Výsledný návrh

Na základe uvedených údajov, pomocou uplatnenia všetkých predchádzajúcich teoretických poznatkov, predchádzajúcich výskumov a našich prepočtov, náš výsledný návrh hybridnej pohonnej jednotky poskytuje sa skladá zo spaľovacieho motora Trabant P63, ku ktorému je paralelne pripájaná zložka elektrickej energie, poskytujúca asistenciu v podobe 10% výkonu (1,9 kilowattu), čím sme dosiahli stupeň hybridizácie 6,67%, čím sa radí tento návrh medzi klasické rozpätie stupňa hybridizácie pre mild hybridy. Zvýšenie výkonu je následne prevedené do zlepšenia výkonnosti letúna vzhľadom na potreby vzletu na obmedzený čas, kedy pri plnom nabití dokáže takýto systém poskytovať výkon navyše po dobu maximálne 222 sekúnd pri predpoklade použitia správnej vrtuľovej koncepcie a pristáť s otáčkami vrtule rovnej polovičným maximálnym otáčkam. Potrebný elektrický stroj zastávajúci funkciu motor-generátora bezkartáčovej koncepcie s jednosmerným prúdom. Pri požadovanom dodávanom výkone 1,9 kilowattu môžeme očakávať hmotnosť v okolí 12 kilogramov. [35] Pri použití NiMH batérie, ktorá bola súčasťou pôvodného technického riešenia IMA, môžeme rátať s ďalším navýšením hmotnosti o 1,83 kilogramu.

Kvôli technickým zmenám vieme bez nutnosti experimentu pomenovať nastávajúce zmeny v technickej špecifikácii letúna a nasledovných nových limitácii:

- Suchá hmotnosť letúna 127 kilogramov
- Maximálna vzletová hmotnosť 213 kilogramov pri konštrukčnej úprave pevnosti konštrukcie letúna môže byť zvýšená
- Pri dodržaní danej maximálnej vzletovej hmotnosti je priestor pre palivo spaľovacieho motora, pilota a jeho prípadnej batožiny 86 kilogramov
- Pri plnej nádrži je nutné obmedziť hmotnosť pilota a jeho batožiny na 71 kilogramov, prípadne naopak zmenšiť maximálne množstvo paliva pod hodnotu plnej 19 litrovej nádrže.

Je nutné taktiež pri prevádzke uvažovať aj nad ďalšími vplyvmi takéhoto zásahu do letúna, kedy je možné očakávať ďalšie vplyvy na potrebnú dĺžku pristávacej dráhy, zmeny spôsobu riadenia letúna kvôli ovládaniu prepínača motorového módu nabíjania alebo vybíjania batérie, potrebný ukazovateľ stavu nabitia batérie, a iné ďalšie vplyvy potrebné pre kompletizáciu a komfortné zaobchádzanie s týmto konceptom pre pilota letúna

4. Záver

Pri návrhu riešenia hybridizácie pohonnej jednotky sa postupovalo na základe nadobudnutých informácií z oblasti minulých aj aktuálnych pohonných ústrojenstiev v rámci leteckej aj automobilovej dopravy.

Na základe zistení o technológiách hybridizácie pohonných jednotiek a obzvlášť predchádzajúcich skúseností automobilového priemyslu sa dospieva k záveru, že práve technológia Integrovaného Motorového Asistenta je vhodnou voľbou vo viacerých aspektoch. Tými boli v prvom rade možnosť zabudovania tejto koncepcie do už existujúceho spaľovacieho motora bez nutnosti vážneho zásahu do architektúry motora, ale iba zásahu v podobe nadstavby. To samozrejme je priamo naviazané na požiadavku udržania nízkej hmotnosti pridaných zariadení, vzhľadom na zistenie malého hmotnostného priestoru Stratonu D7 pre umožnenie bezpečného vzletu.

Výkon poskytovaný elektrickou časťou je využitý podľa návrhu pre navýšenie pohonneho ústrojenstva letúna na obmedzený čas počas vzletu. Takáto úprava poskytuje vylepšenie výkonnostných vlastností letúna. Avšak pri návrhu sme dospeli aj k záveru, kedy by bolo možné dimenzovať elektrickú zložku motora tak, aby sme miesto samotného zvýšenia výkonu sa zamerali na zvýšenie spoľahlivosti spaľovacieho motora a zníženie mechanického opotrebenia vďaka zníženému nároku na výkon spaľovacieho motora.

I keď je letún Straton D7 nie úplne relevantný z hľadiska komerčného lietania, návrh slúži ako dôkaz, že hybridizácia pohonnej jednotky je možná pre rôzne lietadlá na ponúkanom spektre s cieľom skutočného zlepšenia vo faktoroch zaujímavých pre leteckú dopravu. Je v budúcom záujme leteckej dopravy ako celku pracovať na vývoji týchto technológií, keďže aktuálny smer vývoja v automobilovom priemysle sa tiež dlhodobou venuje tejto oblasti s dosiahnutím výrazných krokov z hľadiska efektívnosti a úspornosti ich pohonných jednotiek ako celku.

Referencie

- [1] MANZIE, Chris. WATSON, Harry. HALGAMUGE, Salan (2007). Fuel economy improvements for urban driving: Hybrid vs. intelligent vehicles. Dostupné v: Transportation Research Part C: Emerging Technologies. 2007, roč.15, č.1, s. 1-16. ISSN 0968-090X
- [2] OLSEN, John. PAGE, John. (2014). Hybrid powertrain for light aircraft. Int. J. of Sustainable Aviation. 1. 85 - 102. 10.1504/IJSA.2014.062871.
- [3] VLK, František, (2004). Alternativní pohony motorových vozidel. Brno: Vydavatelství František Vlk. ISBN 80-239-1602-5.
- [4] GOVARDHAN, Ojas M., (2017). Fundamentals and Classification of Hybrid Electric Vehicles. Dostupné v: International Journal of Engineering and Techniques. 2017, roč.3, č.5, s. 194-198. ISSN 2395-1303
- [5] CARDOSO, Daniel S., FAEL, Paulo O., ESPÍRITO-SANTO, António (2020). A review of micro and mild hybrid systems. Dostupné v: Energy Reports. 2020, roč.6, č.1, s. 385-390. ISSN 2352-4847
- [6] STARK, Anthony. (bez dáta). *What is the difference between micro, mild, full and plug-in hybrid electric vehicles*. Online. In: x-engineer.org. Dostupné na: <https://x-engineer.org/micro-mild-full-hybrid-electric-vehicle/>[citované 2024-4-20].
- [7] MLÝNEK. R. (bez dáta). Osemdesiaty štvrtý diel fotopohľadov do histórie Letiska Košice: ultraľahký Straton D7. Online. In: [airportkosice.sk](https://www.airportkosice.sk/sk/precestujucich/aktuality/osemdesiaty-stvrty-diel-fotopohladov-do-historie-letiska-kosice). Dostupné na: <https://www.airportkosice.sk/sk/precestujucich/aktuality/osemdesiaty-stvrty-diel-fotopohladov-do-historie-letiska-kosice> [citované 2024-4-20].
- [8] ŠLEHOFER, Vlastislav, (1984). Údržba a opravy vozů Trabant 601. Praha: SNTL, 04-238-84
- [9] AOKI, Kaoru a kol., (2000). Development of Integrated Motor Assist Hybrid System: Development of the "Insight", a Personal Hybrid Coupe. Dostupné v: SAE Transactions, 2000, č.109, s. 1883-1890.
- [10] ERŽEN, David a kol. (2017). D 1.1 ENERGY RECUPERATION, Ref. Ares(2018)56659 - 05/01/2018