

# IMPLEMENTÁCIA PALIVOVÝCH ČLÁNKOV V ALTERNATÍVNEJ POHONNEJ SÚSTAVE LETÚNOV

## IMPLEMENTATION OF FUEL CELLS IN THE ALTERNATIVE AIRCRAFT PROPULSION SYSTEM

**Laura Valentovičová**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
valentovicova.laura@gmail.com

**Jozef Čerňan**

Air Transport Department, University of Zilina, Slovakia  
jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

**Abstract** – This paper is focused on the research of the implementation of fuel cells in an alternative aircraft propulsion system. Regarding the fact that the world's population is growing and fossil fuel reserves are gradually depleting, the aviation industry considers fuel cells as a substitute for traditional aircraft propulsion systems. The first chapter deals with the generation of thrust in aircraft propulsion units, where the principle of thrust generation is defined as well as the factors affecting it. This chapter further compares engine thrust generation with jet propulsion and propeller propulsion and includes division of aircraft propulsion units, too. The second chapter begins with the history of the origin, development, analysis, and principle of operation of fuel cells. The chapter also includes information about the hydrogen fuel cell, description of hydrogen production and its fundamental information, and the use of hydrogen or fuel cells in aviation. The possibilities of using fuel cells in the creation of alternative aircraft propulsion, where the analysis of the issue is defined from the point of view of several companies, are discussed in the third chapter. The fourth chapter is devoted to the socio-economic problem of an alternative aircraft propulsion system based on fuel cells. Comparison of the overall effectiveness of two propulsion units (namely turboprop engine and fuel cell combined with electric motor) resulting in the fuel cell being favourable due to its greater efficiency is included as well. The chapter defines the application of fuel cells not only in aircraft propulsion system but emphasises their other advantageous functions. The fourth chapter is concluded with the description of the role of hydrogen and fuel cells from an environmental point of view as well as economic challenges in commercialisation. In conclusion, although the costs of the implementation of fuel cells are significantly higher than combustion engine costs, the overall costs should be comparable after a longer period of fuel cell operation due to their higher efficiency and thus lower fuel consumption.

**Key words** – Fuel cell. Hydrogen. Propulsion. Electrical energy. Fuel.

### ÚVOD

Prvá významná aplikácia palivových článkov v letectve bola už v 50. rokoch minulého storočia, keď boli použité ako zdroj energie vo vesmírnom programe. Palivový článok predstavuje zariadenie v ktorom dochádza k priamej premene chemickej energie paliva na elektrickú energiu pri vysokej účinnosti. Cieľom ich využitia by malo byť zníženie nákladov na pohonné hmoty, zvýšenie bezpečnosti a samozrejme pozitívny dopad na životné prostredie, ktoré Európska komisia definovala ako zníženie emisií oxidu uhličitého o 75 %, zníženie emisií oxidov dusíka o 90 % a taktiež zníženie hluku o 65 %.

Keďže sa odhaduje, že zásoby fosílnych palív v dohľadnej budúcnosti dôjdu a globálne otepľovanie sa stáva rastúcim problémom, hľadanie alternatívneho paliva pre dopravu je nanajvýš dôležité. Musí sa nájsť udržateľné, ekologické a cenovo dostupné riešenie, ktoré bude v nasledujúcich desaťročiach podporovať letecký priemysel. Vodík ako palivo je v priemysle predmetom záujmu takmer tridsať rokov.

V civilnom letectve sa palivové články poháňané vodíkom považujú za najlepšiu možnosť poskytovania energie s nulovými emisiami, vzhľadom k tomu, že ich jedinými vedľajšími produktami je teplo a voda. Letecký priemysel v budúcnosti plánuje použiť práve vodíkové palivové články ako náhradu za tradičné pohonné systémy lietadiel.

Polymérne elektrolytické palivové články sú najvhodnejšie typy palivových článkov vďaka ich vysokej hustote energie či vysokej účinnosti. V porovnaní s tradičnými spaľovacími motormi dokážu vyprodukovať podstatne viac využiteľnej energie z rovnakého množstva paliva, čím poskytujú až o 30 % vyššiu účinnosť ako bežné benzínové spaľovacie motory.

Technológia palivových článkov by sa však mohla uplatniť najprv v sekundárnych systémoch výroby energie, ako sú napríklad pomocné energetické jednotky a až neskôr by mali poskytovať primárnu energiu pre veľké komerčné lietadlá, kde sú potrebné ďalšie výskumy.

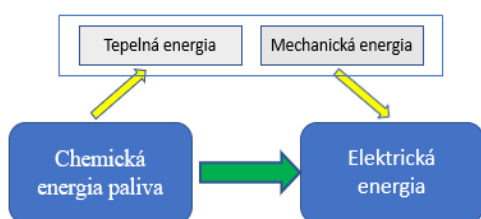
Táto diplomová práca sa venuje výskumu implementácie palivových článkov v alternatívnej pohonnej

sústave letúnov. Práca obsahuje aj teoretické poznatky o vzniku, vývoji a princípe činnosti palivových článkov a ich možnostiach použitia v letectve, kde rozbor tejto problematiky je definovaný z pohľadu viacerých spoločností. Pre pochopenie sociálno-ekonomického problému, práca obsahuje výpočet celkovej efektivity vodíkového palivového článku v kombinácii s elektrickým motorom a porovnáva ho s výsledkom výpočtu efektivity turbovrtulového motora. Na základe ekonomických faktorov, ktoré sa stávajú výzvou pri komercializácii palivových článkov, je možné ich výrazne vyššie náklady porovnať po dlhšom období prevádzky s nákladmi na spaľovacie motory, a to práve vďaka ich vyššej účinnosti a nižšej spotrebe paliva.

## I. ROZBOR A PRINCÍP ČINNOSTI PALIVOVÝCH ČLÁNKOV

Pojem palivový článok predstavuje čistú technológiu výroby elektrickej energie pri vysokej účinnosti. V tomto zariadení dochádza k priamej premene vnútornej energie paliva na elektrickú energiu na základe elektrochemických procesov, bez potreby tepelného či mechanického prechodného medzistupňa (viď. obr. 1). Môžeme ich teda považovať za podobné k primárnym a sekundárnym článkom – batériám. Avšak medzi palivovým článkom a batériou existujú zásadné rozdiely.

Prvý rozdiel spočíva v tom, že aktívne chemické látky v palivovom článku nie sú súčasťou anódy a katódy, ale sú k nim priebežne privádzané z vonkajška. Obe elektródy pôsobia výlučne ako katalyzátor chemických premien a počas činnosti článku sa takmer vôbec neopotrebovávajú a nemení sa ani ich chemické zloženie. Článok môže prakticky pracovať neobmedzenú dobu, pokiaľ sú aktívne látky (palivo a oksyličovadlo) doň neustále privádzané. Na rozdiel od batérii sa nevybija a teda pojem kapacita článku sa v tomto prípade celkom vytráca. Používajú sa parametre ako napätie [V], výkon odoberaný z 1 dm<sup>2</sup> elektród a často sa uvádzajú aj hodnoty merného výkonu [W/kg], objemového výkonu [W/dm<sup>3</sup>] alebo výkonu plochy elektród [W/cm<sup>2</sup>]. Ďalší rozdiel spočíva v tom, že u väčšiny palivových článkov je pracovná teplota vyššia (u niektorých typov veľmi výrazne) než v batérii. [1],[2]



Obrázok 46: Schéma premeny energie v palivovom článku

Pre všetky palivové články je princíp transformácie chemickej energie na energiu elektrickú v podstate rovnaký. Jednotlivé palivové články sa však líšia palivom, materiálom elektród, oksyličovadlom, elektrolytom, pracovnou teplotou a tým aj prebiehajúcou chemickou reakciou na katóde a anóde.

## POUŽITIE PALIVOVÝCH ČLÁNKOV V LETECTVE

Globálny prechod na čistú a udržateľnú energetickú infraštruktúru v leteckej doprave neustále prebieha. Európska komisia definovala súbor environmentálnych cieľov pre víziu „Flight Path 2050“ nasledovne: zníženie emisií oxidu uhličitého (CO<sub>2</sub>) o 75 %, zníženie emisií oxidov dusíka (NO<sub>x</sub>) o 90 % a zníženie hluku o 65 %. Vodík ako nosič energie spĺňa všetky tieto ciele. Ak by sa teda použil vodík, neexistuje lepšie zariadenie ako palivový článok na premenu jeho uloženej chemickej energie. V civilnom letectve sa palivové články poháňané vodíkom považujú za potenciálnych poskytovateľov energie pre lietadlá, pretože už nejaký čas sa pohybujú vo vzdušnom priestore. S cieľom navrhnuť systémy palivových článkov pre osobné lietadlá je však potrebné špecifikovať požiadavky, ktoré musí systém spĺňať. [3]

Letectvo predstavuje 2 % všetkých emisií uhlíka spôsobených ľudskou činnosťou a očakáva sa, že počet cestujúcich sa v priebehu nasledujúcich 18 rokov zdvojnásobí. Letecký priemysel má zreteľný nedostatok elektrických lietadiel v dôsledku ťažkostí so substitúciou a zavedením technológií. Priama elektrická energia je použiteľná na pohon vrtule, ale dosť ťažko môže nahradiť veľký prúdový motor dopravného lietadla, ktorý vyžaduje ťah spôsobený spaľovaním veľkého množstva paliva (rádovo sú to desiatky megawatov výkonu). Napájanie vrtule lietadla batériou tiež spôsobuje problémy. Batérie, ktoré by sa použili na pohon väčších lietadiel vyžadujú vyššiu hmotnosť. Veľkosť batérie je priamo úmerná množstvu energie, ktorá sa z nej musí čerpať. .

Podľa profesora Richarda Andersona [4], riaditeľa leteckého výskumného centra Embry - Riddle Aeronautical University, by bola hmotnosť teoretickej batérie poháňajúcej model 787 Dreamliner, približne 4,5 milióna libier, čo predstavuje viac ako 2000 ton. Tieto problémy zaradili leteckú dopravu do vhodne pomenovanej kategórie „ťažko dekarbonizovať“.

Letecký priemysel považuje vodíkové palivové články ako náhradu za tradičné pohonné systémy lietadiel. Palivové články by okrem iného poskytovali cestovanie s nulovými emisiami, pretože jediné vedľajšie produkty sú teplo a voda. Vodík je výrazne ľahší oproti batériám, čo prináša výhodu a vytvára z neho reálnu možnosť pre let. Najnovší vývoj v oblasti leteckej dopravy s palivovými článkami a vodíkom približuje odvetvie k dosiahnutiu cieľa – dopravy bez obsahu uhlíka. [5]

Zavedením palivového článku do účinnosti prakticky vedie k zníženiu palivového zaťaženia. Palivové články umožňujú ďalšie výhody elektrických lietadiel, napríklad distribuovaný pohon, ktorý zvyšuje aerodynamickú účinnosť. Navyše, multifunkčná integrácia palivového článku do lietadiel prostredníctvom zberu vedľajších produktov (ako je voda, teplo či odpadový vzduch zbavený kyslíka), umožňuje použitie článku na zabezpečenie dôležitých procesov, ako napríklad odmrzovanie, klimatizácia v kabíne, prívod vody alebo potlačenie ohňa v batožinovom priestore či v palivových nádržiach. [6]

**ZÁKLADNÉ INFORMÁCIE O VODÍKU**

Vodík je považovaný za vynikajúce palivo z mnohých dôvodov. Má najvyššiu účinnosť a jeho spaľovanie je najčistejšie. Vodík možno použiť na výrobu elektrickej energie a elektrickú energiu možno použiť na výrobu vodíka, čím sa vytvára energetická slučka, ktorá je obnoviteľná a nie je škodlivá pre životné prostredie. Vodík sa chemicky viaže s väčšinou prvkov, a preto sa už dlhé roky používa v širokej škále aplikácií ako priemyselná chemikália.

Vodík možno používať dvoma spôsobmi: na výrobu elektrickej energie v palivových článkoch (najčistejšia možnosť) alebo v motore s vnútorným spaľovaním, v ktorom sa v porovnaní s inými palivami významne znižujú emisie. [7]

Nasledujúca tabuľka zobrazuje prehľad základných informácií o vodíku a informácie o tom, prečo je vodík považovaný za najúčinnnejšie a najčistejšie palivo a taktiež ako sa vodík vyrába a používa.

Tabuľka 9: Základné informácie o vodíku [7]

<b>Základné informácie o vodíku</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- veľmi rozšírený prvok;</li> <li>- tvorí približne tri štvrtiny hmoty vo vesmíre;</li> <li>- nachádza sa vo vode, ktorá pokrýva 70 % zemského povrchu a nachádza sa aj vo všetkých organických hmotách;</li> <li>- najjednoduchší plyn vo vesmíre (skladá sa z jedného protónu a jedného elektrónu);</li> <li>- najľahší zo všetkých plynov a je 14-krát ľahší ako vzduch;</li> <li>- uniknutý plyn vodík sa ihneď rozptýli vo vzduchu a neznečisťuje zemský povrch ani povrchové vody;</li> <li>- bezfarebný, bez zápachu, nie je jedovatý;</li> <li>- nespôsobuje kyslé dažde, nenaruša ozónovú vrstvu a neprodukuje škodlivé emisie.</li> </ul>
<b>Prečo je najúčinnnejším palivom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vodík má najvyššiu spaľovaciu energiu na kilogram v porovnaní s inými palivami, čo znamená, že z hmotnostného hľadiska je účinnejší ako všetky ostatné palivá, ktoré sa v súčasnosti používajú;</li> <li>- vodík ponúka 2 až 3-krát viac energie ako väčšina bežných palív;</li> <li>- priamo sa spája s kyslíkom, v dôsledku čoho sa uvoľňuje veľké množstvo energie vo forme tepla.</li> </ul>
<b>Prečo je najčistejším palivom</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- spaľovaním vodíka nevznikajú žiadne škodlivé vedľajšie produkty, na rozdiel od palív obsahujúcich uhlík;</li> <li>- po spojení vodíka a kyslíka v palivovom článku vzniká iba energia a čistá voda.</li> </ul>
<b>Ako sa vyrába</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- v súčasnosti najhospodárnejším spôsobom výroby vodíka je reformovanie zemného plynu aplikáciou tepla;</li> </ul>

	<ul style="list-style-type: none"> <li>- elektrolyticky sa vodík vyrába použitím elektrického prúdu na rozloženie vody na vodík a kyslík.</li> </ul>
<b>Kde sa používa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>- vodík sa denne používa v plynnej a kvapalnej forme v mnohých priemyselných odvetviach vrátane ropného priemyslu a v procesoch na výrobu chemikálií, potravín a elektroniky;</li> <li>- vodík sa taktiež používa ako palivo do raketoplánov NASA.</li> </ul>

## II. MOŽNOSTI VYUŽITIA PALIVOVÝCH ČLÁNKOV PRI TVORBE ALTERNATÍVNEJ POHONNEJ SÚSTAVY LETÚNOV

Letecká doprava prináša okrem množstva výhod pre ľudstvo aj isté nevýhody a to najmä z environmentálneho hľadiska. Takisto hluk, zápach a milióny ton emisií zo spaľovania, vyprodukovaných každý deň do atmosféry po celom svete sú ďalšími faktormi pri ktorých sa vyžaduje zmena k lepšiemu. Najväčší výrobcovia lietadiel sa aktívne zapájajú nezávisle od seba do oblasti alternatívnych palív pre letectvo. Táto problematika je známa ako Airbusu, tak aj jeho najväčšiemu konkurentovi Boeingu.

### VZŤAH SPOLOČNOSTI AIRBUS K ALTERNATÍVNYM ZDROJOM ENERGIE

Spoločnosť Airbus sa považuje za priekopníka implementácie udržateľných zdrojov a biopalív v letectve, prostredníctvom ktorých sa docieli zníženie emisií oxidu uhličitého unikajúceho do ovzdušia.

Nie len uplatňovanie biopalív, ktoré sa považujú za alternatívny zdroj pohonu lietadiel, ale aj uplatnenie palivových článkov ako zdrojov elektrickej energie znamenajú pre spoločnosť Airbus jednu z perspektívnych technológií. Okrem iného predstavujú aj vysoký potenciál v dosiahnutí intenzívneho poklesu vonkajšieho hluku, emisií skleníkových plynov oxidu uhličitého a spotreby paliva.

Spoločnosť Airbus spolu so svojimi partnermi, producentom Michelin a Nemeckým národným výskumným centrom pre letectvo a kozmonautiku vykonali výskum, ktorý bol orientovaný na integráciu palivových článkov na palube lietadla. Počas testovacích letov civilného dopravného lietadla Airbus A320 boli palivové články využívané ako zdroj elektrickej energie pre zálohové systémy lietadla. Systém palivových článkov produkoval v priebehu letu až 20 kW elektrickej energie. Tento systém poháňal elektrické motorové čerpadlo, ktoré slúžilo ako hydraulický záložný okruh lietadla na ovládanie krídeliek, smerového a výškového kormidla. Výskumný program začína aplikáciou tých najjednoduchších technológií a postupne pokračoval v pridávaní nasledujúcich technológií s cieľom dosiahnutia multifunkčného systému palivových článkov využívaných lietadlami.. [8]

V roku 2018 za uznanie dramatických zmien, inžinieri divízie palivových článkov spoločnosti Airbus, získali prestížnu cenu „cena za inováciu v nemeckej leteckej doprave“ v kategórii „zníženie emisií“ za ich prácu na vývoji vodíkových energetických systémov palivových článkov pre lietadlá.

Tím spoločnosti Airbus v skutočnosti stanovil praktickú cestu vývoja, ktorá povedie k revolúcii v zdrojoch energie a pohonných systémoch lietadiel využívajúcich čistý a bezpečný vodík. Spoločnosť tvrdí, že vodík je rovnako bezpečný ako akékoľvek iné palivo a vďaka technickému vývoju v posledných rokoch je umožnené s ním zaobchádzať a používať ho s vysokou bezpečnosťou. Vzhľadom k tomu, že palivový článok vyrába elektrinu z vodíka pri úplne čistom procese, ktorý zanecháva len čistú vodu a vzduch zbavený kyslíka, bolo udelenie spomínanej ceny potvrdením, že letectvo čelí technologickej revolúcii. [9]

K technologickej revolúcii povedú dva kroky. Prvým krokom je vývoj a použitie pomocnej pohonnej jednotky lietadla (Auxiliary Power Unit = APU) poháňanej vodíkovými palivovými článkami. Tento krok by mal byť zrealizovaný do desiatich rokov.

Druhým krokom je pohonný systém lietadla s vodíkovými palivovými článkami a jeho zavedenie v komerčných službách, ktoré sa očakáva o desať až dvadsať rokov. Tento proces bude zahŕňať politiku, medzinárodné regulačné normy a takisto vytváranie novej infraštruktúry po celom svete.

Prvý krok, ktorý vedie k pohonu pomocnej pohonnej jednotky vodíkovými palivovými článkami je veľmi významný, vzhľadom k tomu, že APU dodáva elektrickú energiu a stlačený vzduch, ktorý je potrebný pre palubnú klimatizáciu a takisto aj na spustenie hlavných motorov. Po spustení motorov sa APU vypne. V mimoriadne zriedkavom prípade pri katastrofickej poruche motora môže elektrická energia poskytovaná APU udržať avioniku v chode. APU je v podstate horúce a hlučné zariadenie, ktoré pracuje s účinnosťou pod 20 %.

Z tohto dôvodu je na mnohých letiskách jeho použitie na zemi prísne obmedzené na krátku dobu potrebnú na naštartovanie motorov. Lietadlo sa tak musí potom spoliehať na pozemné napájanie, avšak ani tradičné pozemné zdroje energie nie sú o moc čistejšie alebo tichšie ako samotné palubné APU. Klasické APU neoblubujú nie len letiská, ale aj letecké spoločnosti a to z dôvodu vysokých prevádzkových a údržbových nákladov, z čoho vyplýva, že by ho radi nahradili niečím hospodárnejším. .

Palubný vodíkový palivový článok APU rieši všetky spomenuté problémy klasického APU a jeho hlavné výhody sú:

- žiadne emisie,
- extrémne tichý,
- jednoduchý a lacný na údržbu,
- rýchle spustenie.

Lietadlo môže pracovať úplne nezávisle, bez potreby pripojenia externých zdrojov energie.

Vodíkové palivové články produkujú dva vedľajšie produkty, vďaka ktorým je ich použitie v lietadlách viac atraktívnejšie. Produkujú prisun pitnej vody, čo v závislosti od veľkosti lietadla ušetrí medzi 150 a 700 kg vzletovej hmotnosti. Ďalej produkujú aj vzduch zbavený kyslíka, ktorý sa môže použiť na potlačenie prípadného požiaru v nákladných priestoroch. Vzhľadom k tomu, že halón ako hasiaca látka bol zakázaný

právnymi predpismi EÚ v oblasti životného prostredia, by tak systém palivových článkov priniesol náhradu za túto bezpečnostnú funkciu. [9]

Druhým krokom bude úplná revolúcia v komerčnej leteckej doprave. Počas nasledujúcich dvoch desaťročí sa očakáva, že bude možné celé lietadlo poháňať vodíkovými palivovými článkami umiestnenými pri elektrickom motore poháňajúcom vrtuľu. Takže sa predpokladá návrat k vrtuľovým lietadlám, ktoré prirodzene letia pomalšie ako prúdové lietadlá, ale nie tak nízkou rýchlosťou, aby to predstavovalo praktický rozdiel v drvinej väčšine letov. Bola by to tak záležitosť niekoľkých minút cesty navyše. Od začiatku do konca cesty sa oveľa viac času zvyčajne stráca v riadení letovej prevádzky a odbavenia cestujúcich v porovnaní s niekoľkými minútami navyše v čase letu. Vrtuľové lietadlá sa neustále používajú po celom svete a sú oceňované pre svoju vysokú účinnosť v porovnaní s prúdovými lietadlami.

Lietadlá s palivovými článkami by boli okamžite vhodné pre relatívne krátke trasy, ktoré tvoria väčšinu modernej leteckej dopravy. Doprava práve takýmito lietadlami by sa stala mimoriadne tichou, efektívnou a extrémne čistou, teda neprodukovala by žiadne emisie zo spaľovania uhlíkových, najmä žiadny CO<sub>2</sub> či NO<sub>x</sub>, žiadne zvyšky zo spaľovania. Takisto známa je nízka tepelná signatúra ako aj žiadne aerosóly a veľmi nízka až žiadna tvorba kondenzačných stôp. To znamená, že okrem niekoľko miliónov spokojných cestujúcich, budú aj milióny spokojných ľudí žijúcich v blízkosti letiska.

#### **VZŤAH SPOLOČNOSTI BOEING K ALTERNATÍVNYM ZDROJOM ENERGIE**

Spoločnosť Boeing sa podobne ako spoločnosť Airbus koncentruje na výrobu udržateľných leteckých biopalív produkovaných z obnoviteľných zdrojov. Ujala sa vedúcej úlohy pri vytváraní komplexnej infraštruktúry a takisto podporuje prijatie noriem trvalej udržateľnosti leteckých biopalív.

Spoločnosť Boeing patrí medzi zakladajúcich členov Skupiny pre trvalo udržateľné palivá pre letectvo, ktorej cieľom je zníženie emisií skleníkových plynov vypúšťaných počas prevádzky komerčného letectva.

Boeing ako svetový výrobca lietadiel nevenuje pozornosť len k aplikáciám a využívaniu alternatívnych palív jeho lietadlami, ale realizuje aj výskumy perspektívnych aplikácií systémov palivových článkov, prostredníctvom ktorých je možné dosiahnuť už niekoľkokrát spomenuté a žiadané zníženie emisií skleníkových plynov oxidu uhličitého a taktiež zvýšenie energetickej účinnosti.

Prvý let lietadla s posádkou poháňaný za účasti vodíkových palivových článkov, ktorý predstavoval medzník v histórii letov, vykonával v roku 2008 práve Boeing na základe výsledkov skúšobných letov. Spoločnosť vidí perspektívne možnosti vo využití vodíkových palivových článkov, a to vo funkcii núdzového záložného napájania elektrickou energiou v lietadle. Ich aplikáciu skúma v oblasti komerčných a vojenských lietadiel v kooperácii so Sandia National Laboratories. V súčasnosti tieto lietadlá využívajú rôzne iné

technológie pre poskytnutie záložnej energie v kritických subsystémoch pri mimoriadnych situáciách. [8]

### III. SOCIÁLNO – EKONOMICKÝ PROBLÉM ALTERNATÍVNEJ POHONNEJ SÚSTAVY LETÚNA NA BÁZE PALIVOVÝCH ČLÁNKOV

Systém vodíkových palivových článkov preukáže na palube viacero funkcií. Okrem spomínaného núdzového napájania, môže systém dodávať približne 0,5 - 0,6 litra vody na kWh elektrickej energie, čo znamená, že palivový článok s výkonom 100 kW (vhodný pre veľké lietadlo) generuje približne 50 litrov vody za hodinu. Tento objem vody sa dá následne použiť na toalety a klimatizáciu, čím sa zníži množstvo potrebnej vody, ktorá by mala byť naložená na palube lietadla. Z toho vyplýva, že tvorba vody v palivovom článku pomôže znížiť veľkosť nádrží na vodu v lietadle.

Systém vodíkových palivových článkov môže takisto poháňať elektrický pohon na prednom kolese pre pozemný pojazd. Ďalšou výhodnou funkciou môže byť využitie tepla palivových článkov na odmrazovanie. Tento systém je založený na komerčnom princípe, ktorý je upravený a prispôbený tak, aby spĺňal pravidlá a predpisy pre lietadlá. Vyvíja sa flexibilná platforma pre lietadlá v ktorých bude možné rýchlo meniť rôzne komponenty bez toho, aby boli potrebné všetky opakované kvalifikačné rutiny. S touto platformou sa môže vývoj palivového článku lietadla drasticky urýchliť. [10]

#### ÚLOHA VODÍKA A PALIVOVÝCH ČLÁNKOV Z ENVIRONMENTÁLNEHO Hľadiska

Palivové články sú čistejšie a účinnejšie ako tradičné spaľovacie motory. Ak sa na pohon palivových článkov používa čistý vodík, jedinými vedľajšími produktmi je voda a teplo - nevznikajú žiadne znečisťujúce látky ani skleníkové plyny. Technológia palivových článkov by teda zlepšila kvalitu životného prostredia, znížila zdravotné problémy a taktiež znížila emisie uhlíka, ktoré prispievajú k zmene podnebia.

Už pred tridsiatimi rokmi bol vodík identifikovaný ako kritický a nevyhnutný prvok dekarbonizovaného, udržateľného energetického systému, ktorý poskytuje bezpečnú, nákladovo efektívnu a neznečisťujúcu energiu.

Riešenia na zabezpečenie udržateľnosti dopravy, ktoré sú nákladovo efektívne a svojim spôsobom lákavé pre spotrebiteľov, sú nutne potrebné. Vodíkové technológie a technológie palivových článkov ponúkajú väčší výber pri prechode na nízkouhlíkové hospodárstvo vzhľadom na ich podobnú výkonnosť, prevádzku a skúsenosť spotrebiteľov s fosílnymi palivami.

Vodík predstavuje jednu z troch hlavných možností nízkouhlíkovej dopravy popri biopalivách a elektrických vozidlách. Avšak, vodík sa vyhýba využívaniu pôdy ako to je v prípade biopalív a taktiež dlhým dobíjacím dobám spojených s elektrickými vozidlami.. [11]

Letectvo je jedným z najťažších odvetví na dekarbonizáciu. Biopalivá by mohli byť vhodným palivom, kvôli ich vyššej energetickej hustote ako má vodík alebo batérie, ale nie sú úplne bez emisií a mohli by zostať nákladné s obmedzenou

dostupnosťou. Teda ako pohonné palivo by sa mohol používať vodík, ale na zabezpečenie požadovaného rozsahu sa musí skvapalniť. Vzhľadom k tomu, že palivové články nemajú dostatok energie potrebnej pre vzlet, spaľovacie turbíny budú pravdepodobne potrebné.

Avšak klimatické prínosy vodíka pre letectvo sa spochybnili, pretože produkuje viac ako dvojnásobok emisií vodných pár. Hoci vodná para ako najvýznamnejší skleníkový plyn krátkodobo vydrží v atmosfére, vo vysokých nadmorských výškach spôsobuje žiarenie a tým prispieva k čistému otepľovaniu. Predpokladá sa, že do roku 2050 nedôjde k významnému využívaniu vodíka, s výnimkou pravdepodobne malých alebo nízko lietajúcich lietadiel. Zostáva teda veľa práce na vývoji možností pre pohon lietadiel s nízkymi emisiami. [12], [13]

Vývoj vodíkových palivových článkov bol pomalý. Ešte donedávna bola táto technológia príliš nákladná na to, aby sa reálne zaviedla v akejkoľvek priemyselnej alebo komerčnej aplikácii. Dokonca aj dnes je cena implementácie palivových článkov stále výrazne vyššia ako v prípade konvenčných systémov doplnovania paliva, vzhľadom k tomu, že palivové články používajú vzácne kovy, napríklad platínu ako kľúčovú zložku a vodík ako plyn je zložité skladovať. [14]

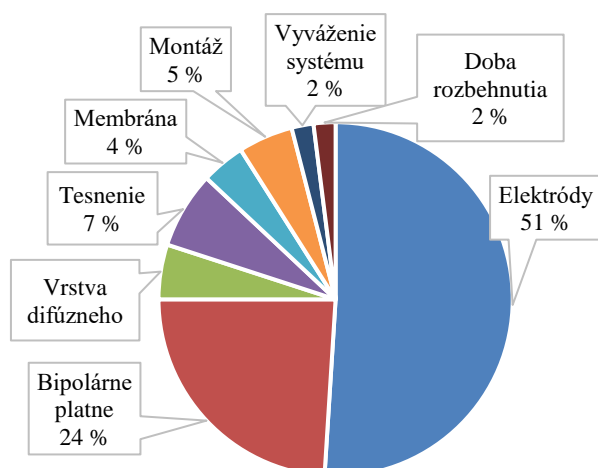
#### Ekonomické výzvy komercializácie palivových článkov

Hlavnými kritériami akceptácie koncového používateľa palivových článkov sú funkcia, cena a spoľahlivosť. Z tohto vyplýva, že palivový článok by mal dosiahnuť, ba dokonca prekonať tieto požadované kritériá v porovnaní so svojimi konkurentmi, teda napríklad so spaľovacími motormi alebo batériami, aby dosiahol konkurenčnú výhodu.

Palivové články, ako nová energetická technológia, ešte významne neprenikli na energetický trh. Náklady na opravu a údržbu palivových článkov (kvôli ich nízkej spoľahlivosti) môžu viesť k podstatnému zvýšeniu nákladov, čo je hlavným faktorom akceptácie koncového používateľa. Priemysel zaoberajúci sa vývojom palivových článkov tak musí čeliť výzve ako prekonať túto bariéru spoľahlivosti.

Výrobné náklady zahŕňajú dizajn, materiály, výrobu a montáž komponentov, prácu a kapitál, ktorý je potrebný pri celkovej montáži vyrobených palivových článkov. [15]

V nasledujúcom grafe je zobrazená konfigurácia palivového článku, konkrétne článku s protónovou výmennou membránou (PEM) s výkonom 80 kW a analýza čiastkových nákladov systému palivových článkov uvedených v percentách. Elektrody, vrátane katódy, anódy a katalyzátora predstavujú 51 % z celkových nákladov systému palivových článkov. Montáž a doba rozbehnutia tvorí približne 7 % z celkových nákladov. Z tohto vyplýva, že tri zostávajúce komponenty, teda elektrody, bipolárne platne, ktoré tvoria viacvrstvové jadro systému palivového článku a tesnenia sú najdrahšou časťou tohto systému.



Graf 1: Náklady na systém palivových článkov PEM (zdroj: autor)

Ak vezmeme do úvahy výrobu, materiály použité na výrobu a palivo, tak náklady na systémy s palivovými článkami sú výrazne vyššie ako náklady na spaľovacie motory.

V kapitole 4.1 som porovnávala celkovú efektívnosť dvoch odlišných pohonných jednotiek, pričom z výsledku bolo zrejme, že účinnosť palivového článku je oveľa vyššia v porovnaní s účinnosťou spaľovacieho motora. Z dôvodu tejto vyššej účinnosti sa výrazne zníži spotreba paliva pre palivový článok a celkové náklady na palivový článok by teda mali byť porovnateľné s nákladmi na spaľovací motor po dlhšom období prevádzky.

Náklady na palivové články a náklady na spaľovacie motory budú teda v konečnom dôsledku porovnateľné, vďaka vyššej účinnosti palivových článkov. Z tohto dôvodu by náklady na palivové články nemuseli byť hlavným rozhodujúcim faktorom pri prijímaní koncovým používateľom.

#### IV. ZÁVER

Princíp funkcie palivových článkov bol objavený už v roku 1838, no prvá významná aplikácia vznikla v polovici minulého storočia, keď NASA použila palivové články ako zdroj energie vo svojom vesmírnom programe. Následne na to bol spustený intenzívny pokrok vo vývoji palivových článkov na celom svete. Avšak, s rastúcimi nárokmi na materiály a technológiu výroby sa neskôr ukázalo, že palivové články nemožno považovať k bežne dostupným zdrojom elektrickej energie, a to predovšetkým z cenových dôvodov.

Najvhodnejší nosič energie, ktorý by splňal všetky environmentálne ciele pre prechod na čistú a udržateľnú leteckú dopravu sa ukázal vodík a práve palivový článok je najlepšie zariadenie na premenu jeho uloženej chemickej energie. Letecký priemysel považuje vodíkové palivové články ako náhradu za tradičné pohonné systémy lietadiel, pretože približuje toto odvetvie k dosiahnutiu cieľa, teda dopravy s nulovými emisiami. Používanie vodíka na pohon si však vyžaduje aj oveľa vyššie náklady ako pri používaní fosílnych palív, no vzhľadom na ich klesajúce zásoby a očakávaný pokrok vo vodíkovej

technológií sa v budúcnosti predpokladajú nižšie celkové náklady na vodík ako náklady na letecký petrolej.

Systém vodíkových palivových článkov preukáže na palube viacero výhodných funkcií ako napríklad ich použitie v pomocnej pohonnej jednotke lietadla APU, čo by mohlo byť zrealizované v blízkej budúcnosti. Ďalšou výhodou je využitie ich vedľajších produktov, teda vody a tepla. Objem generovanej vody sa dá následne použiť na toalety alebo klimatizáciu, čím sa zníži množstvo potrebnej vody, ktorá by musela byť za normálnych okolností naložená na palube lietadla. Teplo z palivových článkov by našlo svoje využitie na odmrázovanie.

Pri porovnaní efektivity turbovrtuľového motora a palivových článkov poháňaných vodíkom sa ukázalo, že s palivovými článkami využijeme efektívne viac než 3-násobok uskladnenej energie ako v prípade turbovrtuľového motora. Vzhľadom k tomu, že vodík má objemovú výhrevnosť viac než 3-krát nižšiu ako letecký petrolej, budú potrebné objemnejšie nádrže vodíka, ak majú obsahovať rovnaké množstvo energie uskladnenej v chemickej podobe paliva ako nádrže s petrolejom. Vplyv na životné prostredie v prípade palivových článkov je neoceniteľný, avšak ich nevýhodou je hlavne vyššia hmotnosť a taktiež problémy s uskladňovaním paliva.

Hlavným faktorom akceptácie koncového používateľa palivových článkov sa ukázali práve ich vyššie náklady, no je potrebné si uvedomiť aj ich vyššiu účinnosť, vďaka ktorej sa výrazne zníži spotreba paliva a celkové náklady na palivové články by teda mohli byť porovnateľné s nákladmi na spaľovací motor po dlhodobej prevádzke.

Nie len vďaka ich vysokej účinnosti energie, ale aj pozitívnemu dopadu na životné prostredie sa očakáva, že význam palivových článkov v pohonnej sústave letúnov v budúcnosti ešte viac porastie, čo potvrdzuje aj skutočnosť veľkého množstva pracovísk, ktoré vynakladajú nemalé úsilie na ich ďalší intenzívny výskum. Obrovské znečistenie ovzdušia a hluk z leteckej dopravy sa teda jedného dňa stane minulosťou.

#### REFERENCIE

- [1] ŘÍHA, S. 2009. Palivové články v osobní dopravě: bakalárska práca. Brno: Vysoké učení technické v Brně, FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ, 2009. 59 s.
- [2] MATĚJÍK, M. 2012. Palivové články pro motorová vozidla: Bakalárska práca. Brno: Mendelova univerzita v Brně, AGRONOMICKÁ FAKULTA, 2012. 60 s.
- [3] KADYK, T. – SCHENKENDORF, R. – HAWNER, S. – YILDIZ, B. – ROMER, U. 2019. Design of Fuel Cell Systems for Aviation: Representative Mission Profiles and Sensitivity Analyses. In *Frontiers in Energy Research*. [online]. 2019. Dostupné na: <https://www.frontiersin.org/articles/10.3389/fenrg.2019.00035/full#h10>
- [4] ANDERSON, R. 2019. Aviation, In *Fuel Cell & Hydrogen Energy Association*. [online].2019. Dostupné na: <http://www.fchea.org/in-transition/2019/11/25/aviation>
- [5] HOMANN, Q. 2019. Aviation, In *Fuel Cell & Hydrogen Energy Association*. [online].2019. Dostupné na: <http://www.fchea.org/in-transition/2019/11/25/aviation>

- [6] FRIEDRICH, K. A. - KALLO, J. - SCHIRMER, J. - SCHMITTHALS, G. 2009. Fuel cell systems for aircraft application. *ECS Trans.* 25, 193–202. DOI: 10.1149/1.3210571.
- [7] Air products: Základné informácie o vodíku [online]. Dostupné na internete: <http://www.airproducts.sk/Industries/Energy/Power/Power-Generation/hydrogen-basics.aspx>
- [8] SOCHA, L. – KIMLIČKOVÁ, M. – SOCHA, V. – HERALOVÁ, D. 2015. Alternatívne palivá – Vývojové trendy v leteckej doprave. Praha: České vysoké učení technické v Praze, Ústav letecké dopravy, Fakulta dopravní, 2015. 224-234 s.
- [9] MEREDITH, G. 2018. The hydrogen fuel cell takes flight. In *Figures of Speech*. [online]. 2018. Dostupné na: <http://figures-of-speech.com/2018/04/fuel-cell.htm>
- [10] KALLO, J. – VALLET, G.R. – SABALLUS, M. – SCHMITTHALS, G. – SCHIRMER, J. – FRIEDRICH, A. 2010. Fuel Cell System Development and Testing for Aircraft Applications. In *Researchgate*. [online]. 2010. Dostupné na: [https://www.researchgate.net/publication/228836115\\_Fuel\\_Cell\\_System\\_Development\\_and\\_Testing\\_for\\_Aircraft\\_Applications](https://www.researchgate.net/publication/228836115_Fuel_Cell_System_Development_and_Testing_for_Aircraft_Applications)
- [11] BRANDON, N. P. – KURBAN, Z. 2017. Clean energy and the hydrogen economy. In *The Royal Society*. [online]. 2017. Dostupné na: <https://royalsocietypublishing.org/doi/10.1098/rsta.2016.0400>
- [12] IPCC Climate Change. 2013: The Physical Science Basis, Contribution of Working Group I to the Fifth Assessment Report of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge University Press. 2013.
- [13] HART, D. – HOWES, J. – LEHNER, F. – DODDS, P. – HUGHES, N. – FAIS, B. – SABIO, N. – CROWTHER, M. 2015. Scenarios for deployment of hydrogen in contributing to meeting carbon budgets and the 2050 target, 2015.
- [14] Internetová stránka Airport Industry Review. 2019. Dostupná na: [https://airport.nridigital.com/air\\_jan19/issue\\_39](https://airport.nridigital.com/air_jan19/issue_39)
- [15] WANG, J. – WANG, H. – FAN, Y. 2018. Techno-Economic Challenges of Fuel Cell Commercialization. In *ScienceDirect*. [online]. 2018. Dostupné na: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2095809917307750>
- [16] GALIERIKOVÁ, A., MATERNA, M., SOSEDOVÁ, J. 2018. Analysis of risks in aviation. *Transport Means 2018* [print, electronic] : proceedings of 22nd International Scientific Conference. - ISSN 1822-296X. - 1. vyd. - Kaunas: Kaunas University of technology, 2018. - s. 1427-1431 [print, online].
- [17] ČERŇAN, J., HOCKO, M. & CÚTTOVÁ, M. 2017. Safety risks of biofuel utilization in aircraft operations. *Transportation Research Procedia* 28, pages 141-148
- [18] KAZDA, A., CAVES, R.E. 2007. *Airport Design and Operation*. Bingley: Emerald Group Publishing Limited, 2007. 538 s. ISBN 978-0-08-045104-6.
- [19] ČERŇAN, J., HOCKO, M., CÚTTOVÁ, M. & SEMRÁD, K. 2016. Analysis of damaged turbine blades of the engine MPM 20. *Acta Metallurgica Slovaca* 22(2), pages 120-127.