

# WING MAGNETOHYDRODYNAMIC FACILITY OF AIRCRAFT PROPULSION SYSTEM

## KRÍDLOVÝ MAGNETOHYDRODYNAMICKÝ PROSTRIEDOK POHONNEJ SÚSTAVY LETÚNOV

**Pavol Miča**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina  
pavolmica96@gmail.com

**Jozef Čerňan**  
Air Transport Department  
University of Žilina  
Univerzitná 8215/1  
010 26 Žilina  
Jozef.cernan@fpedas.uniza.sk

### Abstract

*Magnetohydrodynamics is one of the relatively new fields of physics studying the dynamics of magnetic fields in electrically conductive fluids. The implementation using magnetohydrodynamic principles applied to aircraft propulsion systems is so far only in a range of experiments. So far, real applications have occurred only a few times and always only at the level of experiments and prototypes. In my paper, I deal with the application of a magnetohydrodynamic device built into the wing of an airplane. This means should work as a secondary type of drive in cooperation with the primary drive, which is represented by a turbofan motor. The device's main function is to reduce the fuel requirements of the primary drive and reduce noise and other harmful emissions. The work also includes drawings created in the program AutoCAD, where I designed the location and implementation of a wing magnetohydrodynamic device in the wing of general construction. In this work, I also explore the advantages and disadvantages of using different tips of the primary drive. I am also researching the current state of the problem where I am analyzing the Japanese project of the YAMATO-1 semi-catamaran with magnetohydrodynamic propulsion and a prototype of an ion-powered crawler from IMT scientists. I also examine in detail all the theoretical knowledge concerning magnetohydrodynamics and wing design. Finally, I compare the advantages and disadvantages of using this tool as well as other technical issues related to construction. This work can serve as a basis for further future research into the application of magnetohydrodynamic principles in aviation.*

### Keywords

*magnetohydrodynamics in aviation, wing facility, magnetohydrodynamic propulsion, the principle of magnetohydrodynamics*

### 1. Úvod

Súčasná doba núti celý svet vráťane leteckých konštruktérov radiť ekológiu a vplyv na životné prostredie medzi hlavné body každého projektu. Medzi najdôležitejšie vlastnosti každého nového nápadu či myšlienky neodmysliteľne patrí minimum škodlivých emisií a čo najmenšia environmentálna záťaž a dopady na životné prostredie. Cieľom každého leteckého konštruktéra je v súčasnej dobe minimalizácia spotreby a emisií, a čo najväčšia využiteľnosť recyklovaných materiálov. Minimalizácia využitia fosílnych palív dáva priestor na výskum nových druhov pohonných jednotiek letúnov a samozrejme aj ostatných dopravných prostriedkov. Do pozornosti výskumníkov sa dostáva predovšetkým vodík predstavujúci náhradu leteckého paliva. Problém vyplývajúci z použitia vodíka ako leteckého paliva reprezentuje predovšetkým problém s jeho uskladnením a s tankovaním. Ide o pomerne nestabilnú látku. Pri bežnej izbovej teplote existuje vodík ako plyn. V prípade jeho premeny na tekutú formu je nutné vodík ochladiť na teplotu – 235 °C. Využitie takejto možnosti taktiež núti vybudovanie novej distribučnej siete a kompletne prebudovanie súčasných letiskových distribučných staníc. No nahradenie fosílnych palív iným tekutým médiom výrazne uľahčuje a zjednodušuje vývoj nových leteckých motorov, keďže princíp činnosti viacerých systémov zostáva v takom prípade veľmi podobný. Vedci a výskumníci venujú svoju pozornosť taktiež ekologickým

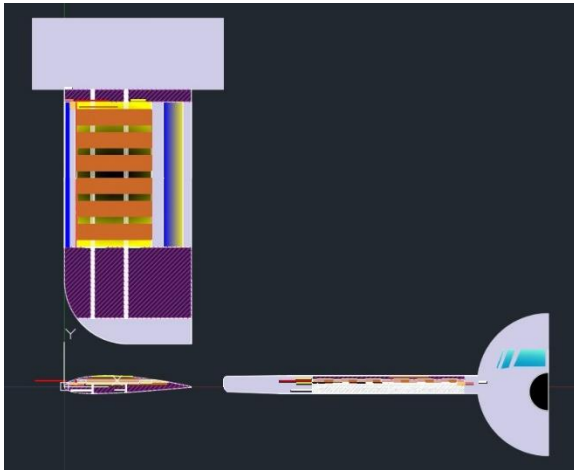
prímesiam do leteckých palív, ktoré by znížili zložku fosílnych palív.

Cieľom tejto práce je čo najviac preskúmať a porozumieť magnetohydrodynamike a jej využitiu k pohonu letúnov. Pri použití MHD pohonu je potrebná na vytvorenie ťahu iba elektrická energia. Tá môže byť dodávaná do systému čiastočne z palubných akumulátorov ale najmä, ako v prípade mojej práce, vyrábaná priamo na palube letúna v hlavnej pohonnej jednotke, či pomocnej energetickej jednotke tzv. APU. V takomto prípade by nebolo nutné disponovať na palube veľkým množstvom akumulátorov, čo by v opačnom prípade malo za následok výrazné navýšenie hmotnosti letúna a taktiež zvýšenie rizík vyplývajúcich z prípadného požiaru na palube. Ja som sa zameral na využitie MHD pohonu ako sekundárneho pohonu pre letún, ktorý by zastával svoju hlavnú úlohu pri nízkej rýchlosti letu (vzlety, stúpania, priblíženie a pristátia). Funkciu primárneho pohonu by naďalej reprezentoval ideálne dvojprúdový motor na klasické letecké palivo, poprípade inú ekologickejšiu formu leteckého paliva napríklad tzv. letecké biopalivá (BAF). MHD pohon zabezpečuje krídlový magnetohydrodynamický prostriedok pohonnej sústavy letúna. Ide o MHD propulznú jednotku implementovanú do konštrukcie krídla letúna. Energetickú efektívnosť nie je možné v súčasnosti spoľahlivo a presne určiť keďže veľmi závisí od mnohých premenných ako napríklad od použitých materiálov, typu primárneho pohonu, konštrukcie trupu a mnoho ďalších. Zatiaľ ide iba o formu

návrhov a výkresov zobrazujúcich môj pohľad na vec a mnou navrhnuté riešenia implementácie MHD zariadenia.

## 2. Výsledky práce – implementácia MHD prostriedku

Výsledkom mojej práce je výkresová dokumentácia implementácie krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúnov do krídla letúna. Na výkresoch sú zobrazené základné časti MHD prostriedku, ich rozmiestnenie a konštrukčná konfigurácia. Je umiestnený v hornej tretine krídla tak aby nezaberal viac ako jednu tretinu profilu krídla. V pôvodnom návrhu zaberol takmer polovicu vnútorného objemu krídla, čo však malo za následok že význame uberal priestor pre nosníky. Stojiny nosníkov bolo príliš krátke v čoho dôsledku neboli schopné zachytávať také veľké ohybové momenty pôsobiace na krídlo. Tým pádom bolo nutné celé zariadenie výrazne zmenšiť. Obrázky nižšie zobrazujú moje konštrukčné návrhy a riešenia implementácie krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúnov a jeho základne časti. Výkresy boli zhotovené v programe AutoCAD.



Obrázok 5: Nárys, pôdorys a bokorys. Zdroj: Autori.

V mojom návrhu uvažujem o konštrukcii krídla ako o nosníkovej pološkrupine. To znamená že časť potáhu by bola tuhá a vystužená pozdĺžnymi rebami a tým by bola schopná prevziať na seba časť ohybového zaťaženia a znížiť tým zaťaženie nosníkov. Nosníky tým pádom môžu byť o niečo menej robustné. V mojom návrhu sú umiestnené 2 nosníky a to hlavný a vedľajší. Tie však zasahujú iba do dvoch tretín vnútorného objemu krídla a preto je dôležité aby okrem aerodynamických síl prenášal potah krídla aj ohybové zaťaženie. Veľkú úlohu pri konštrukcii by zohrával aj materiál konštrukcie. Z hľadiska pomeru váhy a pevnosti by bolo najvhodnejšie zvoliť kompozitný materiál.

Samotný krídlový magnetohydrodynamický prostriedok pozostáva z niekoľkých kľúčových častí. Pri vstupnom ústrojenstve sa jedná o medenú sieťku s maximálnym priemerom otvor 2 mm ktorá v spolupráci so zabudovaným magnetronom v spodnej časti prostriedku zabezpečuje zionizovanie vstupujúceho vzduchu.

Medzi ďalšie vedľajšie funkcie medenej sieťky, umiestnenej vo vstupnom ústrojenstve, patrí taktiež vyhrievanie vstupné ústrojenstva, v spolupráci s odporovými drôtmí v nábežnej časti hrán vstupnej sústavy prostriedku a taktiež zabránenie

vniknutie cudzích telies do MHD prostriedku. Pri pohľade spredu si môžeme lepšie predstaviť celkový priestor, ktorý prostriedok zaberá. Z tohto pohľadu je nám taktiež, o niečo viac jasné umiestnenie vstupnej časti prostriedku.

Magnetohydrodynamický systém využíva kombináciu elektrického a magnetického poľa. Kovové platne umiestnené v spodnej a hornej časti vzduchového kanála by boli nabité elektrickým poľom kladného a záporného náboja čím by vytvárali elektrické pole. 6 medených cievok na každom krídle umiestnených okolo kovových platin a vzduchového kanála by zase vytváralo magnetické pole.

Navinuté by museli byť na jednu hrúbku a v spodnej a hornej časti by bolo nutné uhnúť ich o 90 stupňov, tak aby sa zmestili do vnútorného objemu. Ako jedna z ďalších možností materiálu cievok sa javí aj použitie tzv. HITEMALu. Ide o ľahké drôty vyvinuté na navinutie cievok, ktoré majú vo svojom strede supravodivý materiál ba báze boritu horečnatého MgB<sub>2</sub>.



Obrázok 6: Rez profilom. Zdroj: Autori.

Čo sa týka energetickej náročnosti, jej finálna hodnota je veľmi otázná. Konštrukčným a materiálovým vyhotovením vstupuje do výsledného účinku krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúnov veľmi veľa premenných, ktoré významne ovplyvňujú potrebné účinky cievok a v tom dôsledku aj magnetického toku v systéme.

Ak však chceme zistiť aspoň približné hodnoty môžeme vziať do úvahy hodnoty cievok a celého magnetohydrodynamického systému aplikovaného v japonskom projekte polokatomaránu YAMATO-1 na MHD pohon spomínaný vyššie v sekcii skúmajúcej súčasný stav riešenej problematiky. Z dostupných informácií vieme, že YAMATO-1 vyžadoval na svoju prevádzku prúd o hodnote 4 600 A. Tento projekt využíval podobne ako v našom prípade 6 supravodivých cievok. Jednalo sa však o hmotnostne a priestorovo veľmi náročné typy, ktoré by do nášho konceptu principiálne nezapadali. [1]

Tým pádom vieme takmer s určitosťou povedať že požadovaný prúd by bol v našom prípade omnoho menší. K napájaniu celého, veľmi energeticky náročného systému, by som navrhoval využiť primárny pohon letúna tj. dvojrúdový motor. V prípade pomocnej energetickej jednotky umiestnenej priamo na palube letúna vo všeobecnosti vieme, že štandardné pomocné energetické jednotky vedú vyprodukovať výkon od 15 kW do 300 kW. [2] [5]

V našom prípade je najvhodnejšie uvažovať o jednotke s maximálnych výkon a to teda s výkonom 300 kW. Pomocná jednotka štandardne pracuje pri fázovom napätí 115 V AC a združenom napätí 200 V AC. Je vyhotovená pre trojfázovú IT sieť čo znamená že je skonštruovaná pre sieť s izolovaným uzlom.

Výpočet pre takúto trojfázovú sieť pozostáva z činného výkonu P (W) o hodnote 300 kW. Tento výkon môžeme považovať za zdanlivý výkon S. Z toho vieme vypočítať maximálny možný

elektrický prúd ktorý je takáto jednotka schopná vyprodukovať. Zdanlivý výkon  $S = 1.73 \times 200 \times I$ , čiže  $S = 346 \times I$  a teda z toho dostaneme  $300\,000 / 346 = 867$  A. Z výpočtu teda vieme že jedna pomocná energetická jednotka s výkonom 30 kW je schopná dodávať  $I = 867$  A AC.

Projekt YAMATO-1 počíta s prúdom 4 600 A. Z toho teda vyplýva, že ak by bola v krídle inštalovaná podobná MHD jednotka ako pri YAMATO-1, energetické požiadavky by mali za následok, že na palube letúna by museli byť umiestnených viac ako 5 pomocných energetických jednotiek o výkon 300 kW. [3]

Priemerná váha jednej pomocnej energetickej jednotky je zhruba 120 kg a pri počte 5-tich kusov by zaťaženie letúna len vplyvom pomocných energetických jednotiek stúplo o viac než 600 kilogramov.

Takýto náraz hmotnosti je samozrejme neprípustný. Hlavne ako berieme do úvahy ešte aj hmotnosť samotného krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúna. Tento problém by sa dal z časti vyriešiť vývojom novej oveľa výkonnejšej a výrazne ľahšej pomocnej energetickej jednotky. To však už len v samotnom princípe nijako nerieši samotnú podstatu problému. Z tohto dôvodu uvažujeme o krídlovom MHD prostriedku, iba ako o doplnkovom pohonom systéme.

Hlavnú roľu pohonu by však stále predstavoval dvojprúdový motor ideálne umiestnený v zadnej chvostovej časti letúna. Hlavnú výhodu v použití turbínového motora vidím vtom, že na rozdiel od piestových motorov, kde v jednej jedinej časti prebiehajú všetky cykly pracovného procesu, je v turbínovom motore každá jedna časť prispôbena a vytvorená tak, aby čo najviac vyhovovala cyklu, ktorý v danej časti prebieha. [2]

To má za následok vysokú efektivitu a malé tepelné úniky. Ďalej riešim možnosti použitia vrtulového alebo prúdového motora. Tu by bolo podľa môjho názoru najlepšie použiť dvojprúdový motor vzhľadom na čelnú plochu ktorú motor s vrtulou využíva a tým vytvára veľký tvarový odpor. A samozrejme je tam zohľadnená otázka obmedzenia rýchlosti a výšky. [2]

Funkcia samotného krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúna by bola nasledovná. Pri rolovaní by jej funkcia bola úplne vypnutá. Pri následnom vzlete by plnila iba doplnkovú funkciu pohonu primárnemu pohonu letúna t.j. dvojprúdovému motoru. Po následnom nastúpaní do letovej hladiny by bola funkcia primárneho pohonu tlmená poprípade úplne eliminovaná a hlavnú roľu by prevzal práve magnetohydrodynamický pohon.

Vysoká letová hladina spolu s nízkou okolitou teplotou prostredia a vzduchu by výrazne znížili potreby kryogénneho chladenia supravodivých cievok a tým by znížili aj celkovú energetickú náročnosť samotného systému ako celku. Stabilný let v hladine o rovnakej rýchlosti by taktiež stabilizoval požiadavky na pomocnú energetickú jednotku. Systém by bolo možné využívať predovšetkým v komerčnej sfére letectva.

## 2.1. Výhody použitia MHD prostriedku

Medzi hlavné výhody systému by bola znížená spotreba paliva, zníženie a v kombinácii s bio leteckými palivami takmer úplnú nezávislosť od fosílnych palív, skoro nulové emisie CO<sub>2</sub> a hluku, vyšší ťah, väčší vztlak, možnosť výrazného zmenšenia celého

krídla, čo by mohlo mať za následok aj určité zníženie hmotnosti a menší tvarový odpor. Počas vzletu a pristátia by prostriedok taktiež výrazne navýšil vztlakovú silu, čo by pozitívne ovplyvnilo celkové letové vlastnosti.

## 2.2. Nevýhody použitia MHD prostriedku

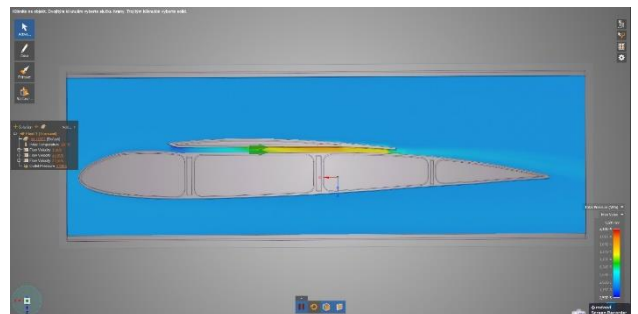
Naopak ako hlavné nevýhody celého konceptu vidím vysokú energetickú náročnosť, výrazne skomplikovanú konštrukciu krídla a mnohé nevyriešené otázky vyplývajúce z magnetohydrodynamického pohonu ako napríklad chladenie systému a celková bezpečnosť systému.

## 2.3. Simulácia prúdenia

K simulácií prúdenia vzduchu okolo profilu krídla a cez prietokový kanál krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúna, bolo nutné najprv vytvoriť 3D model. Tento model bol vytvorený v programe CREO. Ako základ profilu bol použitý profil NACA 2412.

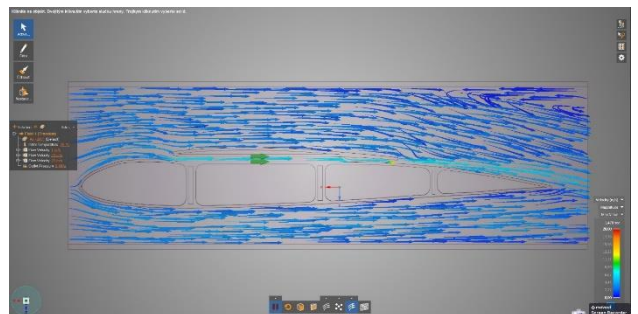
Simulácie boli vytvorené v program ANSYS. Profil krídla použitý pri týchto simuláciách bol podrobnejšie opísaný v predchádzajúcich stranách diplomovej práce.

Na prvom obrázku simulácie je zreteľne vidieť rapidný nárast celkového tlaku spôsobený urýchlením vzduchu vo vzduchovom kanáli krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúna pri teplote vonkajšieho prostredia 20 stupňov celzia. Pri vstupe vzduchu do kanála je hodnota celkového tlaku najnižšia.



Obrázok 7: Vplyv MHD prostriedku na celkový tlak. Zdro: Autori.

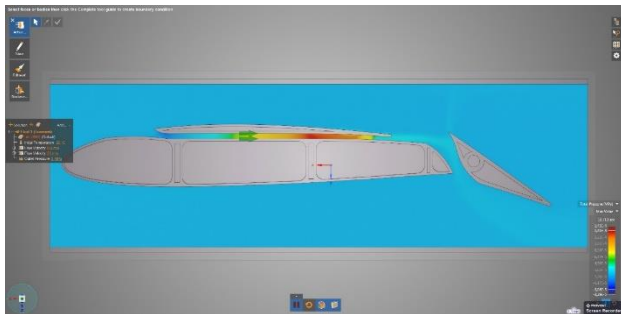
Na nasledujúcich obrázkoch môžeme zasa vidieť vplyv môjho návrhu na celkovú rýchlosť prúdenia vzduchu. Je prirodzené, že pri zúžení kanála dochádza k nárastu rýchlosti prúdiaceho vzduchu. V kombinácii s krídlovým magnetohydrodynamickým prostriedkom pohonnej sústavy letúna je nárast rýchlosti prúdenia ešte niekoľkonásobne väčšia.



Obrázok 8: Vplyv MHD prostriedku na prúdenie vzduchu. Zdroj: Autori.

Obrázok zobrazuje prúdnice vzduchu. Ide vlastne o dráhu prúdiacich častí vzduchu ktorých dotyčnica v ľubovľnom bode určuje smer prúdenia. Taktiež platí, že smer dotyčnice je zhodný so smerom vektora rýchlosti v tom bode.

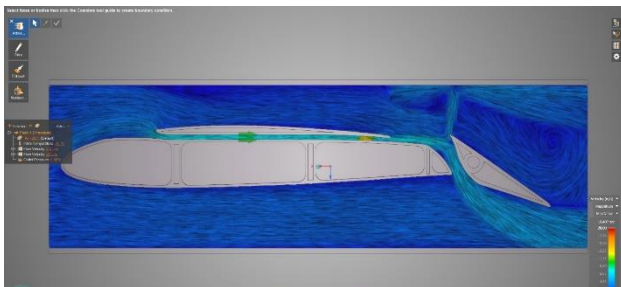
Tak isto ako v prípade dynamického tlaku, tak aj celkový tlak za použitia štrbinovej vztlakovej klapky výrazne vzrástol. Došlo k tomu zhruba v tom istom ako v prípade jednoduchého profilu krídla bez vztlakovej klapky. A podobne ako v predchádzajúcom prípade, celkový tlak v oblasti samotnej vztlakovej klapky je len mierne vyšší ako celkový tlak okolitého prostredia.



Obrázok 9: Vplyv MHD prostriedku v kombinácii so vztlakovou klapkou na celkový tlak. Zdroj: Autori.

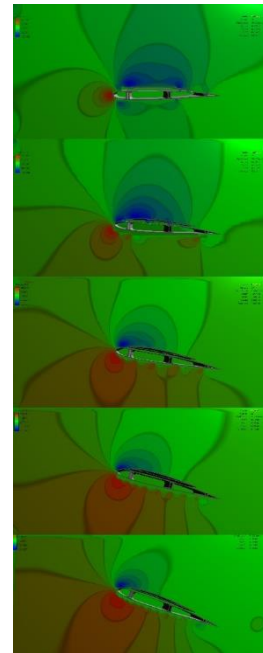
Na demonštrovanie ovplyvňovania prúdenia vztlakovou klapkou v kombinácii s krídlým magnetohydrodynamickým prostriedkom sme zvolili štrbinovú vztlakovú klapku v 20 stupňovej vzletovej konfigurácii. Táto klapka je použitá napríklad aj u letúna U-15. V súčasnosti ide o veľmi často používaný typ klapiek. U tohto typu klapiek vznikne pri vysunutí štrbina. V štrbine dochádza k pretekaniu prúdu zo spodnej pretlakovej časti ponad hornú časť samotnej klapky. [4]

V kombinácii s MHD prostriedkom môžeme vidieť na obrázku vyššie urýchlenie a odklonenie výstupného prúdu zo vzduchového kanála MHD prostriedku. Výrazne tak narušia turbulentnú vrstvu na konci krídla. Urýchlenie prúdu má taktiež za dôsledok urýchlenie prúdu v medznej vrstve a k odtrhnutiu tak dochádza pri väčších uhloch nábehu. Ide o izoplošné zobrazenie kedy výsledné hodnoty sú rozdelené do viacerých oblastí a každej oblasti je priradená farba z farebnej škály. Farebné rozlíšenie rôznych výsledných hodnôt umožňuje rýchle vizuálne zobrazenie a vyhodnotenie výsledkov. Ak porovnáme rýchlosť prúdenia vzduchu zobrazenú na obrázku 4, kedy bola simulácia vytvorená bez použitia vztlakovej klapky, môžeme na obrázku 6 so štrbinovou vztlakovou klapkou vidieť o niečo väčší nárast rýchlosti prúdenia a rozdelenie prúdu na 2 kedy spodný hlavný prúd zväčšuje vztlak na krídle a menší horný prúd vytvára narušenie medznej vrstvy a vytvorenie turbulentného prúdu na odtokovej hrane štrbinovej klapky.



Obrázok 11: Vplyv MHD prostriedku v kombinácii so vztlakovou klapkou na rýchlosť prúdenia. Zdroj: Autori.

Umiestnenie vstupnej časti vzduchového kanála MHD prostriedku je vysvetlené na obrázku 7. Tento obrázok zobrazuje správanie tlakových pásiem pri postupnom naklňaní profilu krídla postupne po 5-tich stupňoch od 0 stupňovej vodorovnej polohy až po 20 stupňovú. Modré zobrazenie ukazuje miesta podtlaku a naopak červené zobrazenie zasa pretlakovú časť. Simulácie boli vytvorené v programe Autodesk Flow Design. Ide v podstate o umiestnenie profilu s magnetohydrodynamickým zariadením do simulovaného aerodynamického tunela.



Obrázok 10: Simulácia aerodynamického tunela. Zdroj: Autori.

### 3. Záver

Magnetohydrodynamika je veľmi zložitá a komplexná časť fyziky. Skrýva mnoho doposiaľ nevyužitých vlastností, ktorými viem prispieť k tvorbe nových technológií. Využitie magnetohydrodynamického pohonu je možné uplatniť naprieč celým spektrom vedy. Predovšetkým o oblasti dopravy či už tovarov alebo pasažierov. Jej energetická náročnosť spočíva iba v dostatočne silnej a stabilnej dodávke elektrickej energie k chodu jej systémov.

Jej implementáciou a využitím v leteckom priemysle som chcel poukázať na nové doposiaľ nevyužitú možnosti pohonu lietadiel. Ide o ďalšiu alternatívu k fosílnym palivám a jej ďalší výskum, vývoj a uplatnenie by mohlo výrazne znížiť ekologickú stopu, ktorú v súčasnosti letecká doprava zanecháva. Aj keď sa letecká doprava v súčasnosti podieľa na produkcii celkového množstva emisií zhruba iba dvoma percentami, ide stále o veľmi sledovanú kategóriu dopravy, ktorej mnohí veľmi neopodstatnene prisudzujú výrazné neblahé účinky na životné prostredie. K ich tvrdeniu prispieva aj fakt, že v rámci dopravy dosahuje podiel znečistenia až 12 percent. Podľa odhadov ročne vyprodukuje 800 miliónov ton CO<sub>2</sub>.

Súčasné modely lietadiel spotrebujú v prepočte na jedného pasažiera cca 3l paliva na 100 km, čo je výrazne viac ako



napríklad v prípade vlakovej dopravy. Aj preto je veľmi dôležité naďalej skúmať a prinášať nové riešenia možnosti pohonu letúnov.

V mojej práci mi išlo predovšetkým o popísanie základných magnetohydrodynamických princípov a o preskúmanie ich využiteľnosti na pohon letúnov. Moje poznatky a riešenia som vložil do grafického návrhu implementácie krídlového magnetohydrodynamického prostriedku pohonnej sústavy letúnov v podobe výkresov zhotovených v grafickom programe AutoCAD. Do mojej práce som začlenil taktiež orientačné prepočty energetickej náročnosti samotného prostriedku podľa hodnôt z magnetohydrodynamického pohonnej systému z japonského projektu YAMATO-1, jeho praktickú využiteľnosť, možnosti napájania, umiestnenie samotného prostriedku a taktiež aj konfiguráciu a umiestnenie primárneho pohonu letúna v podobe dvojprúdového motora. Moja práca by do budúcnosti mohla poslúžiť, ako zdroj dôležitých informácií o magnetohydrodynamickom pohone a jej princípoch, a s určitou istotou by bolo možné využiť aj priloženú výkresovú dokumentáciu v prípade budúcich prototypov. Magnetohydrodynamika je veľmi komplexná a zložitá oblasť fyziky využívajúca mnoho princípov z elektrických a magnetických polí. Do budúcnosti je nutné s jej uplatnením počítať a je taktiež nutné dodať, že jej skúmaním sa otvára mnoho doteraz nevyužitých možností. Zapracovanie tejto technológie do konštrukcie letúna a jej správanie v bežnej prevádzke vyvoláva mnoho ďalších otázok, ktoré však budú zodpovedané pravdepodobne až v budúcnosti. [Autori]

### PodĎakovanie

Článok je publikovaný ako jeden z výstupov projektu Ministerstva školstva, vedy, výskumu a športu Slovenskej republiky KEGA 048ŽU-4/2020 s názvom "Zvyšovanie kľúčových kompetencií v oblasti technológie údržby lietadiel prostredníctvom transferu progresívnych metód do vzdelávacieho procesu".

### Referencie

- [1] S. Motora, S. Takezawa, a H. Tamama, *Development of the Mhd Ship Yamato-1*. New York: I E E E, 1991, s. 1636–1641.
- [2] Prof. Ing. Josef Kříž, CSc., LIETADLOVÉ POHONNÉ JEDNOTKY, Žilinská univerzita v Žiline v EDIS – vydavateľstvo ŽU 2004, 264 s. ISBN 8080703426
- [3] S. Motora, S. Takezawa, a H. Tamama, *Development of the Mhd Ship Yamato-1*. New York: I E E E, 1991, s. 1636–1641.
- [4] Ing. Ladislav KELLER a spol., 1. vydanie/Svet krídel, UČEBNICA PILOTA 2011, vydalo ako svoju 131. publikáciu vydavateľstvo leteckej literatúry SVET KRÍDEL Cheb1, 701 s. ISBN-978-80-86808-90-1
- [5] Bugaj, M. 2015. Aeromechanika 1: základy aerodynamiky. 1. vyd. - Bratislava : DOLIS, 2015. - 208 s., ilustr. - ISBN 978-80-970419-3-9.