

DESIGN OF A BLADELESS ENGINE COMPRESSOR BASED ON MAGNETOHYDRODYNAMICS

NÁVRH BEZLOPATKOVÉHO KOMPRESORU MOTORU NA BÁZI MAGNETOHYDRODYNAMIKY

Jana Stachová
Air Transport Department
University of Žilina
Univerzitná 8215/1
010 26 Žilina
stachova5@stud.uniza.sk

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

Abstract

This article is a technical analysis focusing on the design of a bladeless compressor based on magnetohydrodynamics and the possibilities of its use. The aim of this work is to design new solutions in the field of aircraft compressors and to provide a comprehensive overview of scientific information on the topic. Emphasis is also placed on acquainting the reader with the basic principles of magnetohydrodynamics and the possibilities of its application in the field of aircraft propulsion units. The work is a combination of professional research of scientific information in the field of plasma and magnetohydrodynamics and a practical part whose goal is to create new design of a bladeless compressor using scientific observation and modelling methods. This design was also examined in the work using the method of comparison, which aimed to examine the design and its behaviour in different configurations. The main goal was to combine essential and key information from the researched area and apply it in a completely new way in designing new solutions in issued area.

Keywords

magnetohydrodynamics, bladeless compressor, plasma, magnetohydrodynamic accelerator, magnetohydrodynamic drive

1. Úvod do problematiky

V současné době bereme leteckou dopravu jako samozřejmost. Letecká přeprava nákladů či osob se stala součástí běžného života, bez které si náš současný život již nedokážeme představit. Stejně tak si nedokážeme představit život bez pohonných hmot z fosilních zdrojů, které tyto dopravní prostředky pohánějí. Důležité je si ovšem uvědomit, že ani tyto zdroje nejsou nevyčerpatelné. Zásoby fosilních zdrojů se zmenšují a doba, ve které jejich množství bude velice omezené je neodvratná. Problémem fosilních paliv není ovšem pouze jejich neobnovitelnost, ale také produkce emisí, které vznikají při spalování těchto paliv. Vzniklé emise následně negativně ovlivňují životní prostředí a v konečném důsledku přispívají také ke globálnímu oteplování. Problém týkající se dalšího využívání fosilních paliv v dopravě, a nejen v letecké, bude tedy nezbytné do budoucna vyřešit.

Letecká doprava bude do budoucna čelit nemalým výzvám. Jednou z největších výzev bude bezesporu přechod na nefosilní zdroje pohonných hmot. Velkou nevýhodou těchto nefosilních paliv je kromě omezené dostupnosti také vysoká cena, která mimo jiné souvisí s technicky i cenově náročnými výrobními procesy. Zvýšení cen pohonných hmot se samozřejmě promítne i do finální ceny letecké dopravy, a pokud nebudeme hledat nová řešení, je zcela možné, že letecká doprava se stane cenově nedostupnou. Právě z toho důvodu je nezbytné se zaměřit na hledání nových řešení právě v oblasti pohonných jednotek. A nadále hledat nové technologie, které do budoucna přinesou co nejvyšší ekonomickou úsporu a zajistí tak budoucnost letecké dopravy.

Z následujícího důvodu vznikl tento vědecký článek, který se zaměřuje na hledání nových konstrukčních řešení v oblasti leteckých pohonných jednotek, konkrétně v oblasti leteckých kompresorů. Hlavním cílem je prozkoumat nové oblasti a zaměřit se na návrh vhodného řešení, které by našlo v oblasti letecké dopravy své budoucí uplatnění.

2. Současný stav dané problematiky

Letecké pohonné jednotky si bezesporu prošly dlouhou cestu vývoje. Neustále se zlepšující technologie, inovované výrobní procesy a nové materiály velkým dílem přispěly k současnému vzhledu leteckých motorů. Nezbytnou součástí proudových motorů jsou lopatkové části motoru, konkrétně lopatkový kompresor a lopatková turbína.

Současné konstrukční řešení proudových motorů lze bezesporu považovat za vrchol vědeckého pokroku. Ovšem nastává důležitá otázka, zda prostor, posouvat se neustále vpřed, nebyl již v tomto směru vyčerpán. Samozřejmě další nová inovace, vylepšený povrch lopatek, či nový odolnější materiál může přispět k větší efektivitě, výraznější odolnosti či delší životnosti motoru. Je ovšem otázkou, zda tato již malá vylepšení budou do budoucna stačit. Bohužel ani sebelepší inovace nedokážou zcela odstranit určité problémové charakteristiky proudových motorů, které vyplývají z jejich podstaty.

Jedná se především o hydraulické ztráty, které souvisejí s prouděním vzduchu uvnitř kompresoru, konkrétně s prouděním vzduchu při obtékání lopatek. Tyto ztráty lze samozřejmě eliminovat, ale nikdy je nelze naprosto odstranit.

Je důležité si uvědomit, že jakékoli ztráty, které vznikají v kompresoru přispívají ke snížení jeho celkové účinnosti. Nižší účinnost u kompresoru vede k tomu, že kompresor na stlačení vzduchu vyžaduje více práce, než by teoreticky vyžadoval. Pokud porovnáme dva kompresory, jeden axiální a druhý radiální, které budou mít stejné parametry. Zjistíme, že účinnější kompresor, tedy kompresor axiální spotřebuje na stlačení stejného množství vzduchu méně práce. Účinnost axiálního kompresoru se deklaruje v rozmezí $\eta_{kc} = 0,88$ až $0,91$ u podzvukových stupňů. I přesto, že tato účinnost u axiálního kompresoru je poměrně vysoká, stále existuje prostor pro zlepšení a případné zvýšení účinnosti. Už jen fakt, že by se odstranily lopatky z kompresoru by vedlo k odstranění ztrát spojených s obtékáním lopatek.

V případě tedy vhodného návrhu a správného zhotovení mohou bezlopatkové kompresory dosahovat vyšší účinnosti než lze v současnosti považovat za maximálně dosažitelné. Zvýšení účinnosti znamená snížení práce potřebné ke kompresi vzduchu, a tedy ušetření paliva. Také odstranění veškerých lopatek by vedlo ke snížení hmotnosti nejen motoru, ale v konečném důsledku také palivových nádrží. Jelikož zvýšení účinnosti vede k redukci spotřeby paliva, můžeme tedy vzít v potaz i redukci velikosti a hmotnosti nádrží, což povede ve finále k redukci hmotnosti celé konstrukce letadla.

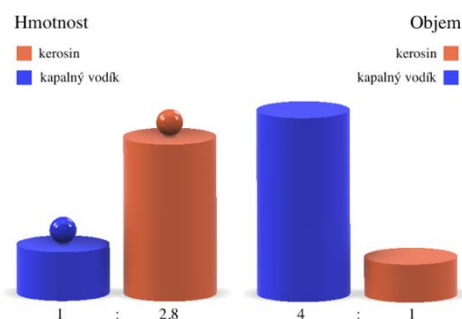
Snížení spotřeby paliva je jistě výhodným benefitem, jak z hlediska finančního, tak i z hlediska ekologického zatížení. Ovšem benefit související se zmenšením palivových nádrží se může zdát v dnešní době poměrně diskutabilní. Pokud především vezmeme do úvahy časovou, technologickou a finanční náročnost související se zavedením nové technologie jako je bezlopatkový kompresor. Ovšem důležité je si také uvědomit, že v rozmezí několika let může být řešení, jak snížit co nejvíce spotřebu paliva, a dokonce i velikost palivových nádrží zásadní pro budoucnost leteckého odvětví. A to hlavně z důvodu snižování emisí a postupného přechodu na ekologická nefosilní paliva. Téma dekarbonizace v letecké dopravě je více než aktuální vzhledem k Zelené dohodě pro Evropu vydanou Evropskou komisí, která si dává za cíl dekarbonizaci a klimatickou neutralitu do roku 2050.

Velice vhodným palivem pro leteckou dopravu se jeví kapalný vodík. Přechod na vodík, jakožto letecké palivo s sebou ovšem přináší hned několik úskalí. Pokud pomineme jeho technologicky náročné uskladnění a složitý transport narazíme na několik dalších výzev. Dalším výrazným problémem je v současné době také omezená produkce vodíku, která je zároveň ekologicky příznivá. V současné době produkce vodíku dosahuje 55 milionů tun za rok, z čehož 96 % celkové produkce je získáno pomocí parního reformování zemního plynu. Při tomto procesu je vyprodukovaný vodík poměrně levný ovšem vzniká z fosilních zdrojů a při jeho výrobě dochází ke značné produkci nežádoucího oxidu uhličitého. Následně zbylé 4 % připadají na výrobu pomocí elektrolýzy vody. Tento způsob je sice ekologicky šetrný, ovšem také velice energeticky náročný, což se ve finále odráží na vysoké ceně finálního produktu. Právě získávání vodíku z obnovitelných zdrojů je naprosto klíčové, pokud chceme docílit snížení emisí a zlepšení životního prostředí. Dalším důležitým aspektem je také cena. Vodík, jakožto nefosilní palivo, které je možné získávat výhradně výrobním procesem, je cenově daleko méně výhodné než současný letecký kerosin. Odhaduje se, že při využití současných technologií turbínových motorů při jejich adaptaci na vodík, by

cena na osobový kilometr vzrostla o 30 až 40 % u letů na střední vzdálenost a o 40 až 50 % u letů na dlouhou vzdálenost.

I přesto, že se bude produkce vodíku v následujících letech navyšovat, musíme vzít v potaz, že ekologicky šetrný vodík bude stále v následujících letech nedostatkovou surovinou. Pokud navíc zohledníme i jeho vysokou cenu oproti fosilním palivům, je kladení vysokého důrazu na co nejvyšší palivovou efektivitu budoucích pohonných jednotek více než žádoucí.

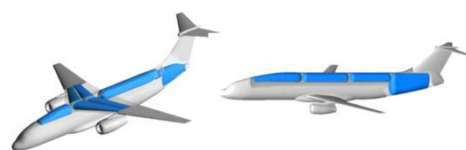
Kromě údaje o navýšení celkové ceny za osobový kilometr můžeme také pozorovat nežádoucí nárůst maximální vzletové hmotnosti (MTOW). Tento nárůst je ovlivněn především palivovými nádržemi specifickými pro vodík. Tvar i velikost nádrží jsou přímo ovlivněny vlastnostmi vodíku. Jak lze vidět na grafu pod tímto odstavcem (Obr. 1), vodík v kapalné fázi (LH₂) disponuje 2,8krát větším energetickým obsahem na jednotku hmotnosti než letecký kerosin. Ovšem jakožto nejlehčí chemický prvek s velice nízkou hustotou je kapalný vodík čtyřnásobně objemnější v porovnání s leteckým kerosinem.



Obrázek 1: Srovnání kapalného vodíku a petroleje z hlediska hmotnosti a objemu. Zdroj: Autori.

Podle provedených studií, pro ekvivalentní množství hustoty energie při využití kapalného vodíku, je tedy zapotřebí čtyřnásobek objemu paliva oproti konvenčnímu kerosinu. Tento požadavek se samozřejmě promítne také na velikosti nádrží, které musí dosahovat čtyřnásobně většího objemu, což bude mít za následek zvětšení jejich hmotnosti.

I přesto, že je vodík v kapalné fázi čtyřikrát objemnější než letecký kerosin, jeví se kapalné skupenství stále jako nevhodnější pro využití v letectví, jelikož dosahuje stále menšího objemu než v plynném stavu. Abychom vodík udrželi v kapalné fázi je nutné teplotu udržovat mezi jeho bodem mrazu a bodem varu, tedy v rozmezí -259 °C až -253 °C. Rozdíl teplot mezi tepelnými podmínkami v nádrži a okolním prostředím může dosahovat až 300 °C. Jedná se tedy o kryogenní pohonnou hmotu. Z tohoto důvodu se jeví jako nevhodnější způsob skladování kapalného vodíku válcová nebo sférická konstrukce s dvojitou stěnou s izolačním systémem na bázi vakua. Výsledkem jsou neintegrální palivové nádrže s nekonvenční konfigurací, které musí být implementovány do konvenční konstrukce letadla (Obr. 2).



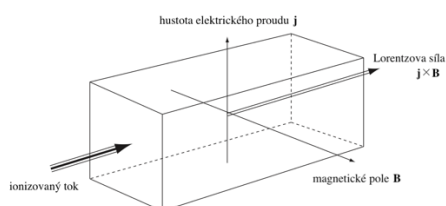
Obrázek 2: Jednotlivé konfigurace vodíkových nádrží. Zdroj: [2.]

I přesto, že se tato práce primárně zaměřuje na návrh bezlopatkového kompresoru. Komplexní pochopení dané problematiky je naprosto zásadní pro návrh budoucích řešení, jak tyto výzvy související s přechodem na vodíkový pohon do budoucna eliminovat. Právě komplexní pohled a inovativní přístup se zaměřením na zefektivnění pohonných jednotek, například ve formě návrhu zcela nového efektivnějšího kompresoru využívající bezlopatkové technologie, může být v budoucnosti jedním z řešení. [1]

3. Návrh řešení dané problematiky

Jedním z možných inovativních řešení je uplatnění principů magnetohydrodynamiky. U bezlopatkového kompresoru založeném na tomto principu by docházelo k postupnému stlačení vzduchu pomocí speciálně tvarovaného kanálu s působením magnetických a elektrických polí přímo uvnitř kompresoru. Vzájemné působení těchto polí v kombinaci s Lorenzovou silou, která bude vzduch stáčet do spalovací komory. Zapříčiní, že schopnost efektivní komprese vzduchu nebude podmíněna žádnou počáteční rychlostí. Motor tedy bude schopen efektivně pracovat během všech fází letu.

Výsledkem zkoumání byl tedy návrh bezlopatkového kompresoru na bázi magnetohydrodynamického akcelérátoru (Obr. 3).



Obrázek 3: Princip funkce magnetohydrodynamického akcelérátoru. Zdroj: [3].

Konstrukční návrh bezlopatkového kompresoru musel splňovat určité podmínky. První a zároveň nejdůležitější podmínkou bylo splnění požadavků na funkčnost konstrukčního řešení daného kompresoru z hlediska fyzikálních principů. Tato funkčnost byla ověřena především uplatněním fyzikálních zákonů, v určitých případech také zavedených vzorců, které vysvětlují určité vztahy a principy funkčnosti. Dalším důležitým aspektem podporující realizovatelnost daného návrhu řešení je také využití principů již existující technologie magnetohydrodynamického akcelérátoru.

Nevýhodou těchto zařízení je ovšem obdélníkový tvar průřezu pracovního kanálu. Pokud by došlo k použití obdélníkového tvaru pracovního kanálu i v případě tohoto návrhu, řešení by velice dobře splňovalo podmínku kolmosti elektrických a magnetických polí. Ovšem v případě náporu vstupujícího vzduchu do motoru, by takový kanál mohl při určitých náběžných úhlech narušovat plynulé proudění vzduchu a přispívat ke vzniku turbulencí v oblasti vnitřních hran kanálu. Z tohoto důvodu bylo nutné zachovat kruhový průřez kanálu, čemuž bylo nutné přizpůsobit celkovou konstrukci kompresoru. Především tedy rozložení elektrod a umístění supravodivých magnetů, tak aby bylo zachováno správné působení elektrického a magnetického pole na vstupující částice vzduchu.

Další stanovenou podmínkou bylo zajistit možnost regulace úrovně stlačení kompresoru. Tato podmínka byla stanovena, aby byla zajištěna co nejefektivnější funkčnost kompresoru během všech fází letu. Poslední vytyčenou podmínkou bylo splnění požadavků z hlediska aerodynamiky. Návrh bezlopatkového kompresoru musel splňovat stejné aerodynamické požadavky, které jsou kladeny na konstrukci současných proudových podzvukových motorů používaných v civilním letectví. Tento požadavek musel být splněn z důvodu, aby konstrukce kompresoru, z hlediska aerodynamiky, nebránila případné reálné aplikaci do oblasti civilního letectví. Bylo tedy nutné zachovat kruhový tvar průřezu kanálu kompresoru, tedy stejný tvar, který se využívá v současných lopatkových kompresorech.

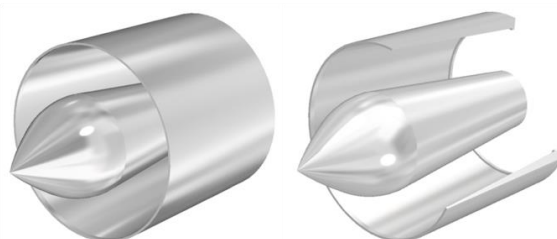
Kruhovému průřezu pracovního kanálu kompresoru bylo taktéž přizpůsobeno vstupní ústrojí (Obr. 4). Tvar vstupního ústrojí vycházel z konvenčního tvaru podzvukového vstupního ústrojí proudových motorů. Vstupní ústrojí je tedy navrženo jako pevné podzvukové, bez přítomnosti regulačních částí s kruhovým průřezem. Kanál vstupního ústrojí je navržen jako divergentní. Tento tvar kanálu umožňuje snížit rychlost proudu a se zvyšující se rychlostí letu zvýšit tlak na vstupu do kompresoru.



Obrázek 4: Schématické zobrazení vstupního ústrojí: v plném zobrazení (vlevo), v průřezu (vpravo). Zdroj: Autori.

Uvnitř pracovního kanálu kompresoru se dále nachází dvě elektrody, které vytváří elektrostatické pole. Tyto elektrody byly navrženy v souladu s kruhovou geometrií průřezu pracovního kanálu, tak aby jejich tvar negativně neovlivňoval celkové aerodynamické vlastnosti kompresoru. Jak lze vidět na obrázku pod tímto odstavcem, vnitřní elektroda je navržena ve formě centrálního kužele a druhá elektroda ve formě vnějšího válce (Obr. 5).

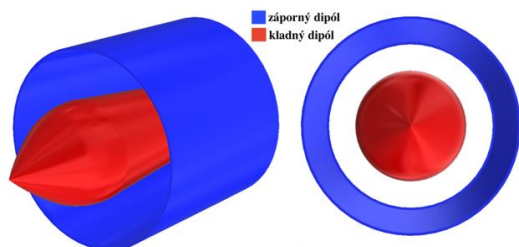
Obě elektrody jsou umístěny v podélné ose pracovního kanálu, který se směrem ke spalovací komoře zužuje. Na vstupu do kompresoru je zvolen větší průměr pracovního kanálu, z důvodu vysokého objemu vstupujícího vzduchu. Tento objem se následně při průchodu pracovním kanálem zmenšuje vlivem postupné komprese. Stlačený vzduch tedy zabírá daleko menší objem, čemuž odpovídá i postupné zúžení kanálu. Toto zúžení je úměrné po celé délce kanálu.



Obrázek 5: Schématické zobrazení elektrod: v plném zobrazení (vlevo), v průřezu (vpravo). Zdroj: Autori.

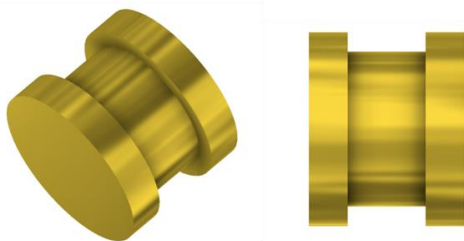
Elektrody tedy mají mezi sebou neustále konstantní vzdálenost. Zachování konstantní vzdálenosti mezi elektrodami je důležité hlavně z důvodu rovnoměrného rozložení elektrostatického pole. Neúměrným přiblížením nebo naopak oddálením elektrod od sebe by vznikaly výkyvy intenzity tohoto pole, což by mohlo ve finále ohrozit stabilní činnost kompresoru.

K vytvoření elektrostatického pole, musí být soustava připojena na zdroj elektrického napětí. Dále je také nezbytné zajistit, aby soustava disponovala opačnými dipóly. Vnitřní elektroda tedy disponuje kladným dipólem a vnější elektroda dipólem záporným (Obr. 6). Také je samozřejmě nutné zvolit vhodný materiál elektrod, tento materiál musí být dobře vodivý a také odolný, aby se zabezpečila vysoká vodivost a zároveň vysoká bezpečnost během provozu. Jako vhodný materiál se jeví například slitiny wolframu či iridia. Oba tyto materiály disponují vysokou odolností a zároveň dobrou vodivostí. Jejich nevýhodou je ovšem vysoká hmotnost. Tento problém by se dal snadno vyřešit nanesením nezbytně nutné vrstvy na povrch elektrody, aby se co nejvíce eliminovala její hmotnost.

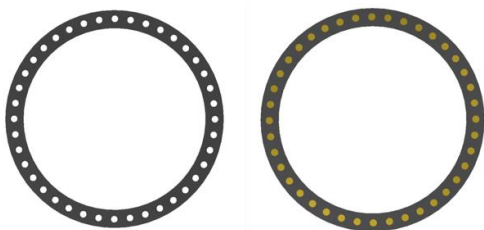


Obrázek 6: Schematické zobrazení kladného a záporného dipólu elektrod. Zdroj: Autori.

Vzhledem k tomu, že kompresor je navržen na principu magnetohydrodynamického akcelérátoru, další nezbytnou součástí je zařízení, které zabezpečí generaci silného a zároveň stabilního magnetického pole. Pro tyto účely byl navržen supravodivý elektromagnet ve tvaru válce, který se skládá ze supravodivých cívek (Obr. 7) a keramických disků (Obr. 8.).



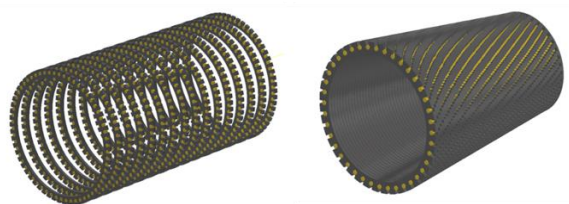
Obrázek 7: Supravodivý element cívky. Zdroj: Autori.



Obrázek 8: Keramický disk: bez supravodivých elementů (vlevo), se supravodivými elementy (vpravo). Zdroj: Autori.

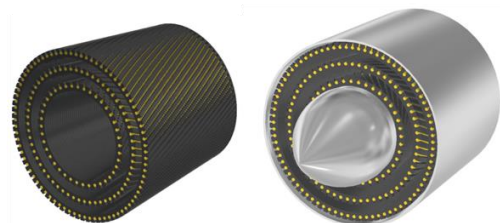
Supravodivý materiál u cívek byl zvolen z důvodu své schopnosti vytvářet silná magnetická pole. Cívka ze supravodiče, při průchodu elektrického proudu, dokáže vytvořit podstatně silnější magnetické pole než běžný nesupravodivý vodič. Supravodivá cívka byla navržena ve formě malých elementů zasazených do keramického disku. Disky slouží jako izolační prvek mezi cívkami a pracovním kanálem. Materiál byl tedy zvolen podle své schopnosti izolace a odolnosti vůči vysokým teplotám. Další výhodou keramiky je také její nízká hmotnost.

Jak již bylo zmíněné dříve, supravodivý element cívky je vložen do keramického disku. Spojením těchto disků do jednoho celku vznikne supravodivý elektromagnet ve tvaru válce (Obr. 9). Keramické disk, stejně jako elektrody jsou navrženy způsobem, aby kopírovali konvergentní tvar pracovního kanálu. Průměr jednotlivých disků se tedy postupně zmenšuje směrem ke spalovací komoře.



Obrázek 9: Zobrazení jednotlivých disků před spojením (vlevo), vzhled finálního válce (vpravo). Zdroj: Autori.

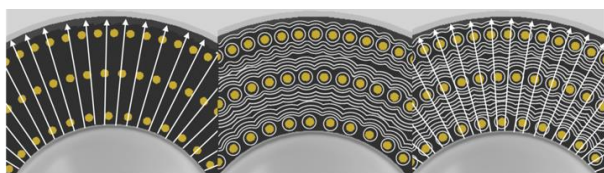
Aby došlo k rovnoměrnému a zároveň silnému působení magnetického pole na částice vstupujícího vzduchu, byl finální návrh kompresoru navržen jako kombinace třech elektromagnetických supravodivých válců vsazených do sebe (Obr. 10). V této konfiguraci docílíme rovnoměrného a zároveň silného magnetického pole během celého procesu komprese. Intenzita magnetického pole bude mít výsledný efekt na Lorentzovu sílu, a tedy i na výslednou kompresi proudu vzduchu. Jak lze vidět na obrázku pod tímto odstavcem, prostor mezi prostředním a vnitřním válcem tvoří první kanál pro vstup vzduchu, druhý kanál je následně tvořen meziprostorem mezi prostředním a vnějším válcem. Kompresor je tedy navržen jako dvou Proudový. Ovšem s tím rozdílem, že oproti dvou Proudovému konvenčnímu motoru se na procesu komprese podílí oba vzduchové kanály. Umístění všech válců je v podélné ose kompresoru mezi elektrodami. Také v tomto případě byl kladen důraz na to, aby vzdálenost mezi jednotlivými válci byla konstantní v celém pracovním kanálu kompresoru, a to především z důvodu rovnoměrného rozložení magnetického pole.



Obrázek 10: Schematické zobrazení třech elektromagnetických válců (vlevo) a kombinace válců s elektrodami (vpravo). Zdroj: Autori.

Pokud tedy dojde ke spojení supravodivých elektromagnetických válců s elektrodami, vznikne zařízení, které je schopno generovat ve stejný okamžik magnetické

i elektrostatické pole (Obr. 11). Mezi opačnými dipóly elektrod dochází ke vzniku pole elektrostatického. Elektrostatické pole má schopnost působit na částice ionizovaného vzduchu. Pokud ionizovaná částice vejde do tohoto pole, začne být tímto polem ovlivňována. Následně na základě svého náboje, bude přitahována k opačně nabitému dipólu elektrody. Pokud tedy náboj částice bude kladný, částice bude přitahována k zápornému dipólu, v tomto případě vnějšímu válci elektrody. Ovšem ve stejný okamžik bude na nabitou částici vzduchu působit také pole magnetické, generováno cívkami. V tomto případě je důležité zajistit, aby směr proudu procházející supravodičem byl ve všech vodičích identický, aby nedocházelo ke vzájemnému odpuzování magnetického pole. Podle Lorentzova silového zákona bude tedy výsledný směr částice kolmý vůči vzájemné rovině elektrického a magnetického pole. Částice bude tedy vytlačována kanálem směrem ke spalovací komoře.



Obrázek 11: Schematické zobrazení siločar uvnitř kompresoru: elektrostatického pole (vlevo), magnetického pole (uprostřed), výsledné působení elektrostatického a magnetického pole. Zdroj: Autori.

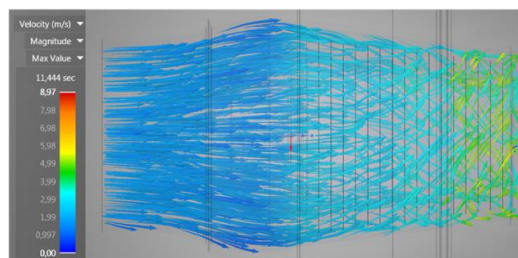
Nyní se již dostáváme k procesu samotné komprese vstupujícího proudu vzduchu. Jak již bylo zmíněno dříve, částice vzduchu budou urychleny pomocí Lorentzovy síly a vytlačovány pracovním kanálem do spalovací komory. Důležitou úlohu během procesu komprese hrají speciálně navržené cívky. Cívky ve formě malých elementů lze pomocí otáčení jednotlivých disků regulovat a tím měnit i výsledný tvar magnetického pole (Obr. 12). Regulací tvaru magnetického pole zároveň docílíme i regulace trajektorie Lorentzovy síly. Pokud by vzduch proudil přímo do spalovací komory, nabíral by průchodem konvergentním kanálem pouze rychlost. Takto urychlený vzduch by následně mohl při svém vstupu do spalovací komory ohrozit stabilitu plamene. Hlavní podstatou je tedy natočit supravodiče cívky pod určitým úhlem tak, aby tvořily spirálu. Spirálovitým pohybem zajistíme snížení rychlosti vzduchu a zároveň zvýšení tlaku. Úhlem natočení daných cívek můžeme tedy regulovat strmost spirály, a tedy i výsledné stlačení vzduchu. Na podobném principu pracují i lopátkové kompresory. Čím více stupňů lopátkového kompresoru do pracovního kanálu zařadíme, tím bude vzduch pomalejší a více stlačený. Vysoká strmost spirály bezlopatkového kompresoru tedy zajistí vysoký počet otáček, které částice vzduchu urazí při průchodu pracovním kanálem, vzduch se v osovém směru více zpomalí a zároveň se zvýší jeho tlak.



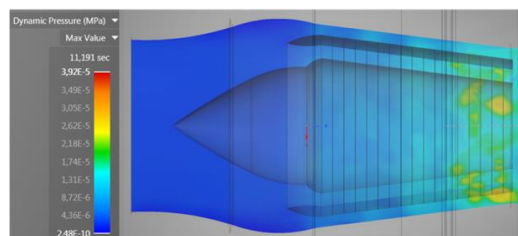
Obrázek 12: Variace supravodivých elementů v elektromagnetickém válci. Zdroj: Autori.

Následující simulace zobrazují změny parametrů vstupujícího proudu vzduchu při průchodu pracovním kanálem kompresoru. Simulace byly provedeny v programu Ansys Discovery, a jejich primárním účelem bylo zkoumat změny rychlosti a tlaku při průchodu vzduchu pracovním kanálem, kdy směr proudění byl nastaven do spirály kolem podélné osy kompresoru.

Na první simulaci (Obr. 13) jsou vzduchové částice vyobrazeny jako vektory rychlosti. Na této simulaci tedy lze pozorovat změny rychlosti procházejícího proudu vzduchu kompresorem. Při průchodu vzduchových částic pracovním kanálem dochází ke zrychlení proudu vzduchu. Důležité je ovšem dodat, že toto zrychlení je ve spirálovém pohybu, v přímém směru podél osy kompresoru ve skutečnosti dochází k výraznému zpomalení rychlosti. Prodloužením trajektorie vzduchových částic ve finále docílíme intenzivnějšího stlačení. Proces změny dynamického tlaku je zobrazen na druhé simulaci (Obr. 14) pod tímto odstavcem. Simulace potvrzuje zvýšení tlaku na výstupu z kompresoru. Důležité je také dodat, že uvedené hodnoty jsou orientační a slouží k názornému zobrazení charakteru proudění. Pokud by došlo k realizaci skutečného kompresoru, naměřené hodnoty by se samozřejmě mohly lišit. Princip zvýšení rychlosti i stlačení proudu vzduchu by ovšem zůstal zachován.



Obrázek 13: Simulace vektorů rychlosti při průchodu vzduchového proudu kompresorem. Zdroj: Autori.



Obrázek 14: Simulace změny dynamického tlaku proudu vzduchu při průchodu kompresorem. Zdroj: Autori.

Natáčení elementů tedy zajišťuje široké možnosti regulace kompresoru. Tato schopnost by se dala efektivně využít k regulaci kompresoru v celém rozsahu rychlostí letadla. V počátečních fázích, kdy je rychlost letu poměrně nízká, nedochází k náporovému stlačení ve vstupním ústrojí. V tomto případě je tedy zapotřebí, aby v pracovním kanálu kompresoru docházelo k maximální úrovni stlačení. Je tedy vhodné, aby v tomto případě byl úhel vzájemného natočení elementů co nevyšší. Naopak při dosažení určité rychlosti, během ustáleného letu, se na procesu komprese podílí také náporové stlačení ve vstupním ústrojí. V tomto případě, lze tedy kompresor nastavit do energeticky výhodnější konfigurace a úhel natočení mezi elementy snížit. Regulace kompresoru je tedy podstatně širší než u lopátkového kompresoru, v případě kterého je jakákoliv regulace poměrně obtížná.

Ke zvýšení výsledné komprese také přispívá dvouprúdová konstrukce kompresoru. Kompresor je navržen se dvěma vstupními kanály, které se oba podílí na procesu komprese. Tato konfigurace také mimo jiné zvyšuje průtokové množství vzduchu, které je kompresor schopen zpracovat.

Nyní se již dostáváme k samotnému způsobu ionizace vzduchu. Aby na částice vzduchu mohla působit Lorentzova síla, musí být částice vzduchu ionizované. Ke způsobu tzv. preionizace lze využít několika způsobů. Mezi současné metody patří například mikrovlnné záření, korónové výboje na ostrých hrottech elektrod nebo očkování vzduchového toku materiálem s nízkým ionizačním potenciálem. Jak již bylo zmíněno dříve v této práci, přechod z plynného skupenství na plazmatické je kontinuální, plazma tedy může být i částečně ionizované. Podle toho, jaký stupeň ionizace je vyžadován, respektive jak koncentrované plazma je zapotřebí pro daný účel, tomu lze přizpůsobit volbu konkrétní metody ionizace. Pro účely této práce byla zvolena metoda odebírání elektronů ze vzduchových částic pomocí mřížky s kladným potenciálem (Obr. 15). Je dosti pravděpodobné, že tato metoda nezaručí vysoký stupeň ionizace a vznik běžného plazmatu. Ovšem měla by zajistit dostatečnou míru ionizace na to, aby částice vzduchu byly ovlivněny magnetickými a elektrickými poli. A působila na ně tedy Lorentzova síla.



Obrázek 15: Schematické zobrazení mřížky společně s izolantem .Zdroj: Autori.

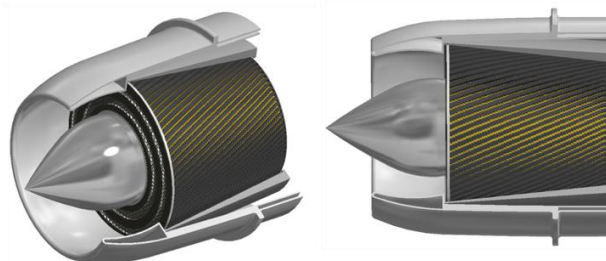
Mřížka je umístěna na vstupu do kompresoru, tak aby umožňovala průchod molekul vzduchu do pracovního kanálu kompresoru (Obr. 16). Důležité je také umístění izolačního materiálu mezi mřížku samotnou a elektrody uvnitř kompresoru, tak aby nedocházelo k jejich vzájemnému negativnímu ovlivnění. Mřížka je navržena z kovového materiálu z důvodu zajištění dobré vodivosti. Její připojení na kladný dipól zajistí vytvoření kladného potenciálu napětí. Mřížka s kladným potenciálem napětí bude mít potřebu svůj potenciál vyrovnat do rovnovážného stavu. Bude mít tedy tendenci odebírat záporně elektricky nabitě částice z prostředí, jinými slovy elektrony. Připojení na kladný dipól musí být aktivní po celou dobu provozu, jinak by brzy došlo k vyrovnání potenciálu přijímanými elektrony, mřížka by se stala neutrální a ztratila svou funkci. Pokud tedy takovým zařízením budou procházet atomy vzduchu, mřížka bude mít tendenci odebírat elektrony z jejich obalů. Pokud tedy odebereme z obalu atomu určité množství elektronů, u atomu začne převažovat kladný náboj v jádře, stává se tedy kladně nabitým kationtem. Z takto upraveného proudu vzduchu se stává ionizovaný plyn, který podléhá zákonům působení Lorentzovy síly. Na podobném principu ionizace vzduchu pracují například elektrostatické odlučovače, či ionizátory vzduchu. U obou těchto zařízení také dochází k ionizaci vzduchových částic na základě bipolárně nabitých vodičů. Samozřejmě účel ionizace a také její intenzita závisí na požadovaném účelu daného zařízení. Funkčnost těchto zařízení

ovšem dokazuje realizovatelnost řešení pracujícím na obdobném principu. Budoucí aplikace do oblasti leteckých pohonných jednotek je tedy rozhodně reálná.



Obrázek 16: Schematické zobrazení umístění mřížky s izolantem na vstupu do kompresoru. Zdroj: Autori.

Spojením veškerých výše zmíněných částí, vzniká komplexní konstrukční návrh bezlopatkového kompresoru na bázi magnetohydrodynamiky. Finální vzhled kompresoru je zobrazen (Obr. 17) pod tímto odstavcem. Pro účely zhotovení modelu bezlopatkového kompresoru byl využit primárně program Autodesk Inventor.



Obrázek 17: Schematické zobrazení finálního sestavy bezlopatkového kompresoru. Zdroj: Autori.

4. Závěr

Samozřejmě veškeré nové technologie, včetně tohoto řešení, vyžadují další výzkumy a rozsáhlá testování předtím, než se naplno projeví jejich finální efektivita, bezpečnost, a především vhodnost aplikace právě do oblasti civilního letectví. Nepřetržitý vědecký pokrok bezesporu povede k dalšímu vývoji a aplikaci nových řešení do oblasti leteckých pohonných jednotek. A je možné že do budoucna právě tento návrh bude jedním z nich. Určitě nás v tomto odvětví čeká ještě zajímavá budoucnost.

Reference

- [1] STACHOVÁ, Jana. Návrh bezlopatkového kompresoru motoru na bázi magnetohydrodynamiky. Žilina, 2021. Diplomová práce. Žilinská univerzita v Žilině. Vedoucí práce Jozef Čerňan, doc., Ing, PhD.
- [2] KHANDELWAL, Bhupendra a kol. Hydrogen powered aircraft: The future of air transport. *Progress in Aerospace Sciences*[online]. Progress in Aerospace Sciences, 2013. ISSN 03760421.
- [3] CARLTON, J.S. Propulsion Systems. *Marine Propellers and Propulsion* [online]. Elsevier, 2019. ISBN 9780081003664.