

Dmychadlový pohon pro ultralehký letoun – CFD analýza výstupního kanálu

Bc. Zdeněk Ilich
Vedoucí práce: Ing. Martin Helmich

Abstrakt

Příspěvek se zabývá CFD analýzou výstupního kanálu dmychadlového pohonu pro ultralehký letoun. Tento nekonvenční pohon je v ultralehké kategorii letounů zcela unikátní. Ventilátor je poháněn sériově vyráběným motocyklovým motorem. Součástí výstupní proudové cesty je obtok, ve kterém jsou umístěny chladiče motoru. Výstupní kanál s tryskou je tedy zajímavým objektem zkoumání pro vnitřní aerodynamiku. V této práci je prezentováno sestavení výpočtové sítě pro numerické řešení, nastavení numerického výpočtu a následný rozbor výsledků. Pro řešení je použito komerčního programu Fluent.

Klíčová slova

Dmychadlový pohon, CFD výpočet, vnitřní aerodynamika

1. Úvod

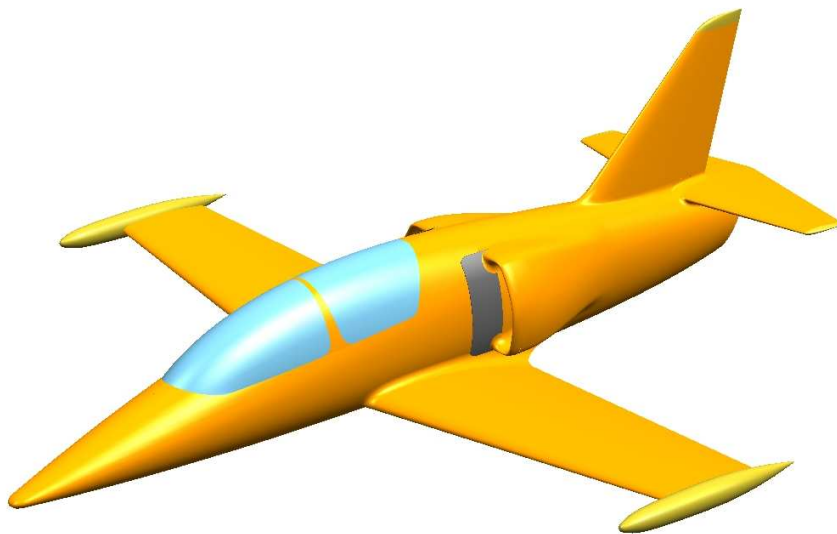
Výzkum a vývoj dmychadlového pohonu jsou na Ústavu letadlové techniky, FS ČVUT v Praze úzce spjaty s projektem ultralehkého letounu UL-39. V další kapitole bude tedy kromě popisu samotného ventilátorového pohonu uveden i stručný technický popis letounu UL-39. Ten, díky svému nekonvenčnímu řešení propulsní jednotky, tvoří unikát v ultralehké kategorii. Hlavní náplň toho příspěvku tvoří vyšetřování proudového pole ve výstupní části dmychadlového pohonu. K tomu bude použito metody CFD (Computational fluid dynamics) prostřednictvím komerčního programu Fluent. Budou popsány dva výpočtové modely od samotné tvorby výpočtové sítě, přes nastavení výpočtu až po vyhodnocení výsledků a jejich porovnání s experimentem.

2. Technický popis

Pro lepší orientaci čtenáře a seznámení se s problematikou jsou uvedeny stručné popisy letounu UL-39 a samotného dmychadlového pohonu.

2.1 Letoun UL - 39

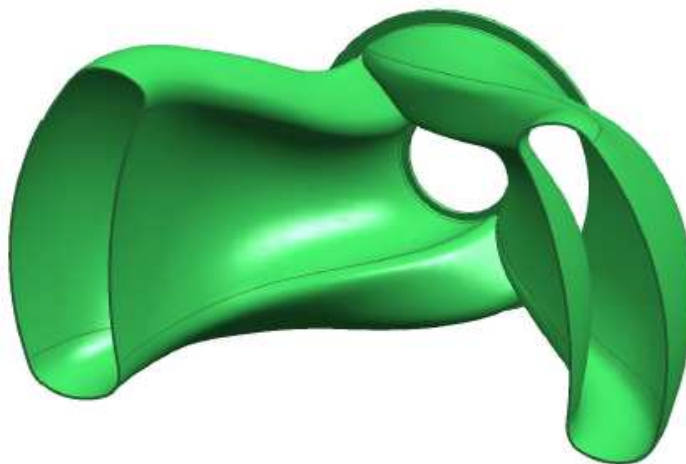
Jedná se o dvoumístný dolnoplošník se samonosnou celokompozitovou konstrukcí. Uspořádání sedadel je tandemové. Letoun má tříkolový podvozek příďového typu (obrácený tricykkl). Uspořádání ocasních ploch je klasické, přičemž výškové kormidlo je konstruováno jako plovoucí. Lichoběžníkové křídlo je složeno z profilů řady MS (1)-03XX. Je využito geometrické i aerodynamické zkroucení. Na křídle jsou umístěny účinné Fowlerovy klapky, zajišťující požadovanou přistávací rychlost. Letoun je konstruován podle stavebního předpisu UL-2 (vydáno LAA ČR 17.10.2002), zároveň je kontrolováno splnění požadavků předpisu CS-VLA (vydáno EASA 5.3.2009). Celý letoun má být ultralehká replika letounu L-39 Albatros vyráběného v Aeru Vodochody.



Obr. 1. Ultralehký letoun UL -39

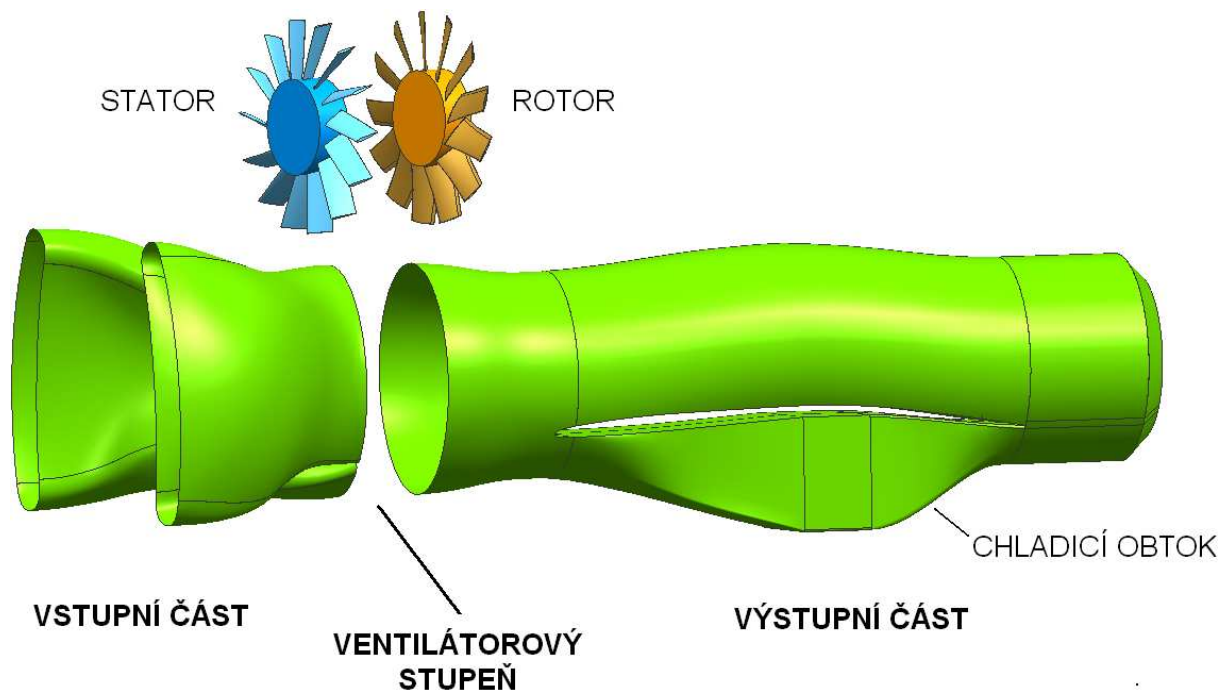
2.1 Dmychadlový pohon

Dmychadlový pohon sestává z pohonné jednotky, transmisní hřídele, ventilátorového stupně a proudovodu. Jako pohonná jednotka slouží motocyklový čtyřválcový zážehový motor o objemu 998 cm³ používaný v motocyklu Yamaha YZF-R1 modelové řady 2004. Maximální výkon činí 134 kW při 12500 ot/min. Výkon je přes primární převod pomocí transmisní hřídele přiváděn na rotor ventilátorového stupně. Před rotorem je umístěná statorová mříž. Proudovod je možno rozdělit na vstupní a výstupní část. Vstupní část je tvořena dvěma kanály, které jsou po své délce vhodně zkrouceny (Obr. 2.). To, spolu s poněkud netradičním uspořádáním předstator – rotor, zajišťuje dostatečně rovnoměrné proudové pole před rotorovými lopatkami. Řešení této problematiky je podrobně rozebráno v práci [1] a [2].



Obr. 2. Vstupní část proudové cesty

Na ventilátorový stupeň navazuje výstupní část, jejíž součástí je chladicí obtok a výstupní tryska. Chladicí obtok sloužící pro umístění chladičů motoru je složen s difusorem a konfusorem. Náběžná hrana vzniklá rozdělením proudu na hlavní a obtokový je konstruována jako stavitelná. Návrh dále počítá s pevnou výstupní tryskou optimalizovanou pro cestovní režim. Celou proudovou cestu ilustruje Obr. 3.



Obr. 3. Proudová cesta

3. Výpočtové modely

Tato kapitola nastiňuje důvody pro volbu daných výpočtových modelů, popisuje jejich samotnou tvorbu a nastavení.

3.1 Uvažovaná konfigurace propulzoru

Dmychadlový pohon má za sebou řadu let vývoje, který dosud pokračuje. Existuje tedy mnoho jeho konfigurací. V celém příspěvku bude uvažována pouze jedna konfigurace, kterou charakterizuje Tabulka 1.

Tabulka 1. – Konfigurace propulzoru

	Hodnota	Poznámka
Průměr trysky	455 mm	
Počet chladičů	2	
Rychlost letu	0 km/hod	statický případ
Úhel náběžné hrany	0°	
Otáčky motoru	10800 ot/min	přístrojové
Otáčky ventilátoru	6781,52 ot/min	vázané na skutečné otáčky motoru

3.2 Typy modelů

Dosavadní CFD analýzy proudové cesty dmychadlového pohonu řešily jednotlivé části odděleně. Ve své podstatě se jedná o dva případy. V prvním šlo o výpočet konkrétní části, ať už vstupní nebo výstupní, přičemž okrajové podmínky byly nastavovány podle experimentálních měření. Ve druhém případě již byl řešen ventilátorový stupeň, který byl ale vložen do zjednodušené proudové cesty. Nejčastěji byl uvažován pouze objem obsahující jednu lopatku s připojením periodické okrajové podmínky.

Hlavním cílem je tedy vytvořit celkový CFD model proudové cesty, který bude mít přiměřené nároky na výpočtový výkon a umožní reálněji simulovat proudové pole ve výstupní části proudovodu. Zejména se jedná o zohlednění stočení proudu vlivem ventilátoru. Bude tak

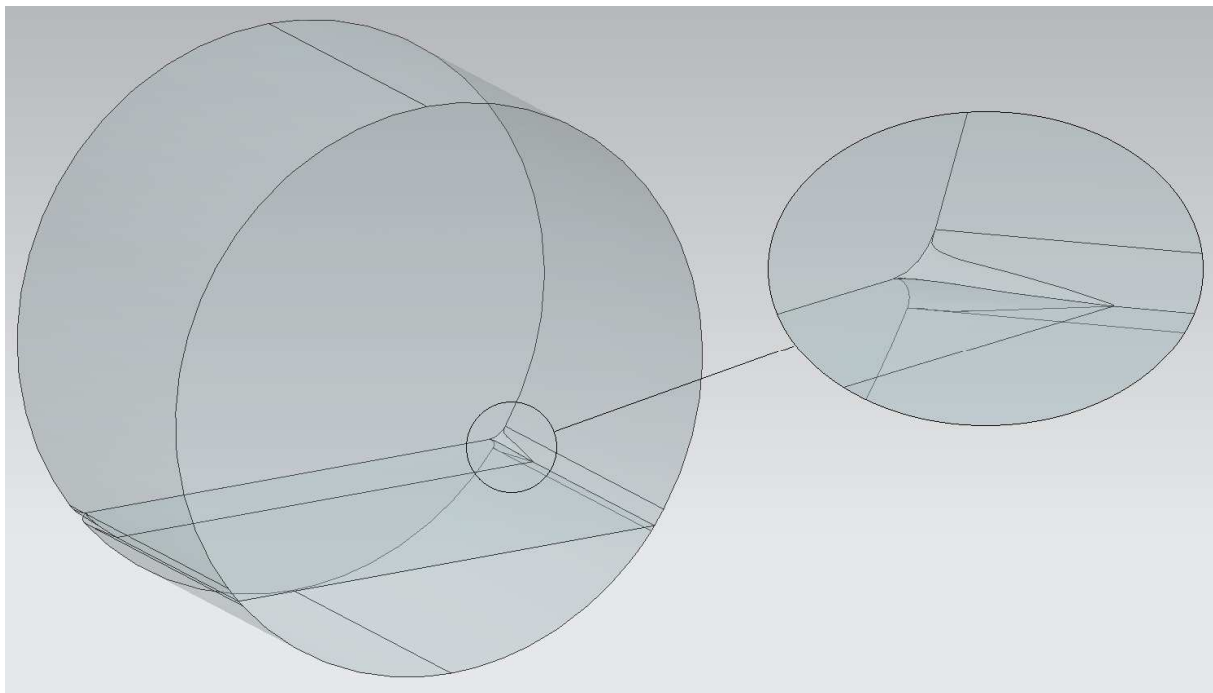
například možné studium rozložení teplot a rychlostí na chladičích a ve výstupní trysce a stanovení tahových křivek pohonu.

V tomto příspěvku budou uvažovány dva typy modelů. První, klasický model výstupní části, na kterém budou nastaveny okrajové podmínky vycházející z experimentu. Výpočet bude prováděn jako symetrický vůči svislé rovině. A druhý, modelující celou proudovou cestu včetně ventilátorového stupně.

3.3 Tvorba výpočtové sítě

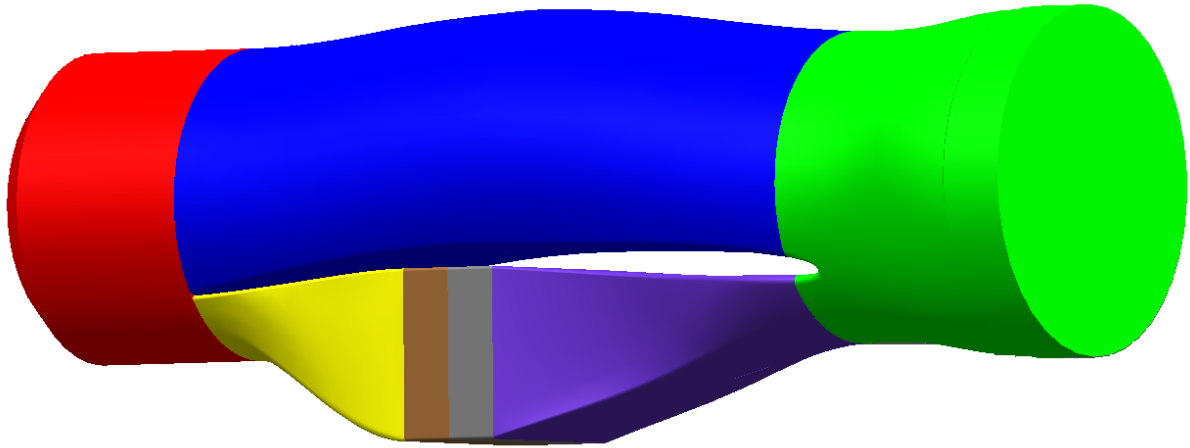
Postup bude demonstrován zejména na symetrickém modelu, kde jeho jednoduchost přispěje k přehlednosti. Tvorba celkového modelu je analogická a případná její specifika budou zmíněna.

Jako výchozí zdroj geometrické informace posloužil již existující model proudové cesty vytvořený v programu Unigraphics NX 7.5. Pro účely výpočtu proudění je podstatný pouze vnitřní objem proudovodu. Práce na tvorbě výpočtové sítě tedy začínaly právě tímto krokem. Objem definovaný vnitřními plochami modelu proudové cesty bylo nutno upravit tak, aby bylo možno dosáhnout rozumné kvality sítě. Zmíněná úprava spočívala v nepatrném přepracování odtokové hrany, kde se spojuje hlavní proud s proudem, který přechází přes chladiče motoru. Tento zásah do geometrie zásadně neovlivňuje výpočet, a proto je akceptovatelný. Rozsah úprav na odtokové hraně ilustruje Obr. 4.



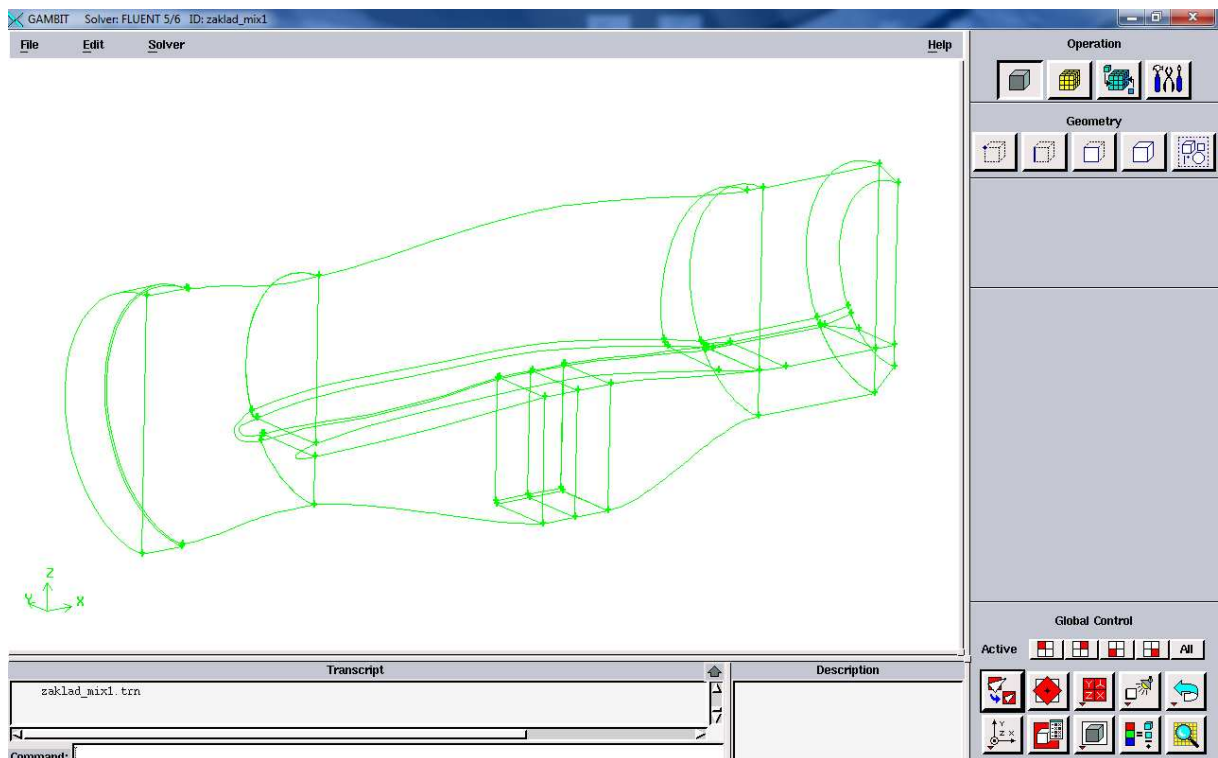
Obr. 4. Odtoková hrana

Výsledný objem byl ještě v programu Unigraphics rozdělen. Toto dělení má vícero důvodů. Prvním je rozčlenění objemu na logické úseky jako je vstupní objem, hlavní proudovod, difusor, prostor chladičů, konfusor, směšovací objem a tryska. Výhoda spočívá v možnosti modifikovat jednotlivé části bez nutnosti pracovat s celým objemem proudovodu. Dalším důvodem je nutnost rozdělit objem z hlediska tvorby výpočtové sítě. Rozdělen je například směšovací prostor tak, aby byla zajištěna kontinuita modelování mezní vrstvy. Dělení je dále nezbytné pro použití tzv. mixing planes, o nichž bude zmíněno dále. Umožňuje také použití různých typů elementů v jednotlivých částech modelu. Celkový pohled na připravené objemy v programu Unigraphics pro symetrický model poskytuje Obr. 5.



Obr. 5. Objemy symetrického modelu

Vlastní tvorba výpočtové sítě se odehrávala v programu Gambit 2.3.16, který tvoří preprocessor CFD systému Fluent Inc. Je tedy nutné objemy vytvořené programem Unigraphics importovat pomocí přenosového formátu Parasolid. V úvahu připadá i přenosový formát IGES. Importovaná geometrie symetrického modelu v prostředí Gambitu je na Obr 6.

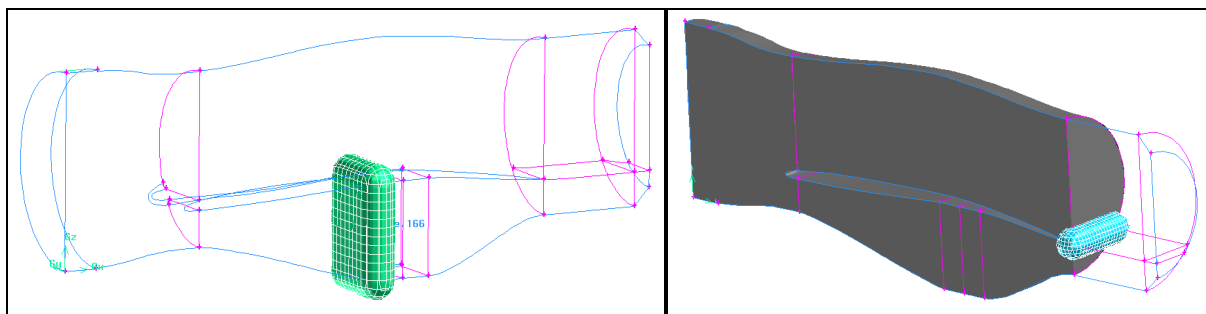


Obr. 6. Importovaná geometrie symetrického modelu

Importovaná geometrie může být tzv. „špinavá“. Tímto termínem se rozumí to, že může obsahovat například malé hrany, malé plochy, duplicitní hrany a plochy, hrany velmi blízko u sebe, ostré úhly apod. Stručně řečeno obsahuje takové entity, které mohou následnou tvorbu sítě znesnadnit nebo dokonce znemožnit. Proto je nutné takto importovanou geometrii vyčistit. Při čištění geometrie máme v podstatě dvě možnosti. Buď využít automatického čištění pomocí modulu, který je součástí programu Gambit nebo geometrii vyčistit manuálně. V této práci se osvědčil postup kombinující obě možnosti, kdy pomocí automatického čištění

byla nalezena slabá místa geometrie a pokud automatická oprava provedená Gambitem nebyla vyhovující, provedla se oprava ručně.

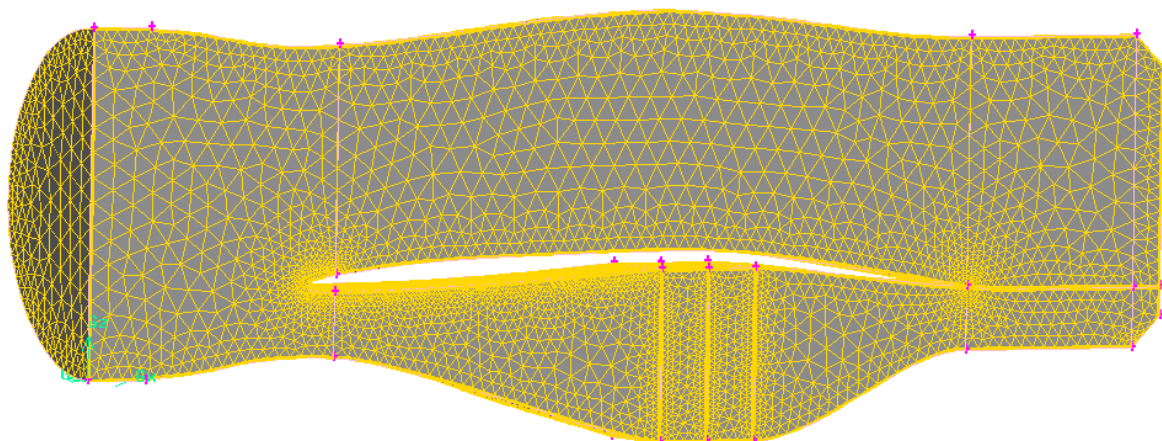
Jak je známo z aerodynamiky, při obtékání stěny reálným médiem se v blízkosti stěny vytvoří tzv. mezní vrstva. Je to oblast velkých gradientů rychlosti a tedy oblast, kde se výrazně projevuje viskozita plynu. Proto je vhodné v těchto místech výpočtovou síť zhuštit. Gambit obsahuje nástroj přímo určený pro modelování mezní vrstvy. S jeho pomocí lze velice snadno řídit velikost a rychlost růstu buněk modelujících mezní vrstvu. Tyto hodnoty bylo ovšem nutno v jednotlivých částech modelu měnit tak, aby bylo dosaženo požadované hodnoty y^+ (představující bezrozměrnou odlehlost od stěny) pro zvolený model turbulence, o němž bude zmíněno v kapitole 3.4. Hodnota y^+ je dána lokálními veličinami, které jsou známy až po provedení výpočtu. Jestliže se ukáže, že nevyhovují, je nutno síť upravit a výpočet opakovat.



Obr. 7. Příklad rostoucích funkcí

Volba hustoty výpočtové sítě představuje kompromis mezi přesností výpočtu a jeho zvládnutelností pomocí hardwarového vybavení, které je momentálně k dispozici. Vyrovnat se s tímto problémem mohou pomoci tzv. rostoucí funkce. Pomocí nich je možné síť v exponovaných místech zhušťovat a naopak zvětšovat velikost buněk v místech, která nejsou pro výpočet důležitá a omezit tak celkový počet buněk sítě. Příklad použití rostoucích funkcí v místě předního chladiče a na odtokové hraně je na Obr. 7.

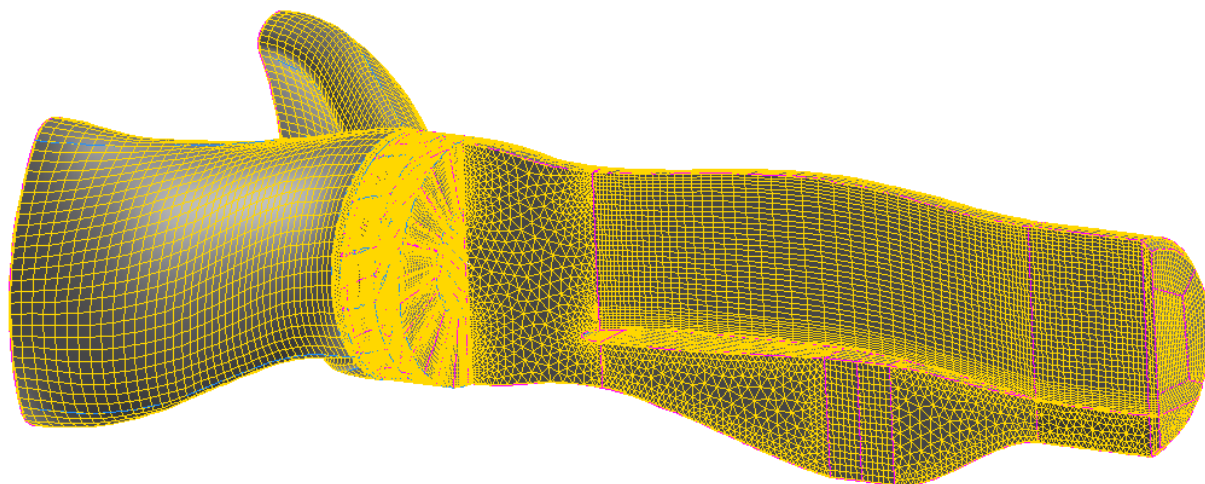
Při samotném síťování se postupuje vždy od nižších entit k vyšším. Tedy od hran, přes plochy až k objemům. U symetrického modelu bylo pro síťování ploch použito trojúhelníkových elementů, konkrétně schématu Triangle, Pave. Objem pak byl vysíťován nestrukturovaně pomocí čtyřstěnných elementů schématem Tetrahedron/Hybrid, TGrid. Výsledná síť je z pohledu do roviny symetrie zobrazena na Obr. 8.



Obr. 8. Výpočtová síť symetrického modelu

U celkového modelu se pro síťování objemů zvolila kombinace čtyřstěnných a šestistěnných elementů. Strukturovaná síť ze šestistěnných elementů umožňuje při jejím použití u vhodných

objemů redukovat výsledný počet buněk. Tvorba této sítě je ale náročnější. Je nejprve zapotřebí plochy, které definují daný objem, rozdělit na logické obdélníky a následně je vysítovat obdélníkovými elementy schématem Quadrilateral, Map. Objemová síť se pak vytvoří schématem Hexahedron/Wedge, Cooper. Je zřejmé, že tento způsob by u složitých objemů vedl ke značně zdeformovaným elementům nebo by vůbec nebyl možný. U takovýchto částí proudovodu je tedy použito stejné schéma jako u symetrického modelu. Přechod od čtyřstěnných elementů k šestistěnným provádí Gambit pomocí pyramidových elementů. Síť celkového modelu je na Obr. 9., kde je skryta polovina výstupního kanálu tak, aby byl možný pohled do svislé roviny.



Obr. 9. Výpočtová síť celkového modelu

Kontrola kvality sítě je provedena pomocí funkce Examine Mesh. Je možné posuzovat kvalitu pomocí několika parametrů. Jako nejvhodnější je zvolen parametr Equiangle Skew, který porovnává, o kolik se liší daná buňka od ideální. Tedy takové, která má mezi svými hranami pro čtyřstěnný resp. šestistěnný element 60° , resp. 90° . Parametr se vypočítá dle následujícího vztahu převzatého z [7].

$$Q_{EAS} = \max \left[\frac{\theta_{\max} - \theta_{eq}}{180 - \theta_{eq}}, \frac{\theta_{eq} - \theta_{\min}}{\theta_{eq}} \right], \quad (1)$$

kde $0 \leq Q_{EAS} \leq 1$.

Q_{EAS} vyšetřovaný parametr popisující kvalitu vytvořené sítě,
 θ_{eq} charakteristický úhel buňky ($\theta_{eq} = 60^\circ$ nebo 90°),
 θ_{\max} maximální úhel mezi hranami buňky,
 θ_{\min} minimální úhel mezi hranami buňky.

Tabulka 2. – Intervaly hodnot parametru Q_{EAS} pro posouzení kvality sítě

Q_{EAS}	Kvalita sítě
$Q_{EAS}=0$	rovnostranná
$0 < Q_{EAS} \leq 0,25$	vynikající
$0,25 < Q_{EAS} \leq 0,5$	dobrá
$0,5 < Q_{EAS} \leq 0,75$	dostatečná
$0,75 < Q_{EAS} \leq 0,9$	špatná
$0,9 < Q_{EAS} < 1$	velice špatná
$Q_{EAS}=1$	degenerovaná

Intervaly hodnot parametru Q_{EAS} jsou uvedeny v Tabulce 2. O kvalitě vytvořené sítě symetrického a celkového modelu vypovídá Tabulka 3.

Tabulka 3. – Parametry sítí symetrického a celkového modelu

Symetrický model				
Počet buněk	464 932			
Q_{EAS}	$0,80 \leq Q_{EAS} < 0,85$	$0,85 \leq Q_{EAS} < 0,90$	$0,90 \leq Q_{EAS} < 0,95$	$0,95 \leq Q_{EAS} < 1$
Počet elementů v daném intervalu [-]	15	1	0	0
Celkový model				
Počet buněk	1 805 525			
Q_{EAS}	$0,80 \leq Q_{EAS} < 0,85$	$0,85 \leq Q_{EAS} < 0,90$	$0,90 \leq Q_{EAS} < 0,95$	$0,95 \leq Q_{EAS} < 1$
Počet elementů v daném intervalu [-]	8 547	3 229	0	0

Jelikož je nevhodné zadávat okrajové podmínky přímo na vstupní a výstupní plochy. Jsou součástí výpočtového modelu i objemy před a za proudovodem simulující okolní atmosféru. Tyto objemy nejsou na Obr. 8 a 9 zobrazeny.

3.4 Nastavení výpočtu

Na začátku této kapitoly bude zmíněno nastavení výpočtu platné pro oba modely. Následně bude shrnuto nastavení okrajových podmínek pro každý model zvlášť. Nicméně, pro možnost verifikace zejména celkového výpočtového modelu vycházejí okrajové podmínky z experimentálně získaných dat.

Vlastní numerický výpočet je prováděn v programu Fluent 6.3.26, do něhož je nutno vytvořenou výpočtovou síť načíst. K tomu slouží formát *.msh. Po načtení je nutné nejprve síť zkontrolovat příkazem Check Grid. Rozměrům délek jsou automaticky přiřazeny metry coby základní jednotky soustavy SI. Pomocí funkce Scale lze nastavit správné jednotky, ve kterých byla síť vytvořena.

Výpočet byl prováděn jako stacionární, stlačitelný, kde vzduch se chová podle stavové rovnice ideálního plynu. Diskretizace byla provedena schématem typu upwind druhého řádu přesnosti. Jako model turbulence byl zvolen dvourovnicový model k- ω SST, bez tzv. transitional flows. Velikost elementů sítě byla tedy volena stejným způsobem jako při použití klasických stěnových funkcí. Tzn. tak, aby bezrozměrná odlehlost od stěny y^+ spadala do intervalu (30;300), viz. [8] kapitola 12.11.1. Pro tuto variantu je zapotřebí menší počet elementů a tím pádem klade menší nároky na výpočtový výkon. Cenou za to je, že charakteristiky proudění vázané na odpor (např. příkon ventilátoru) nabývají vyšších nepřesností.

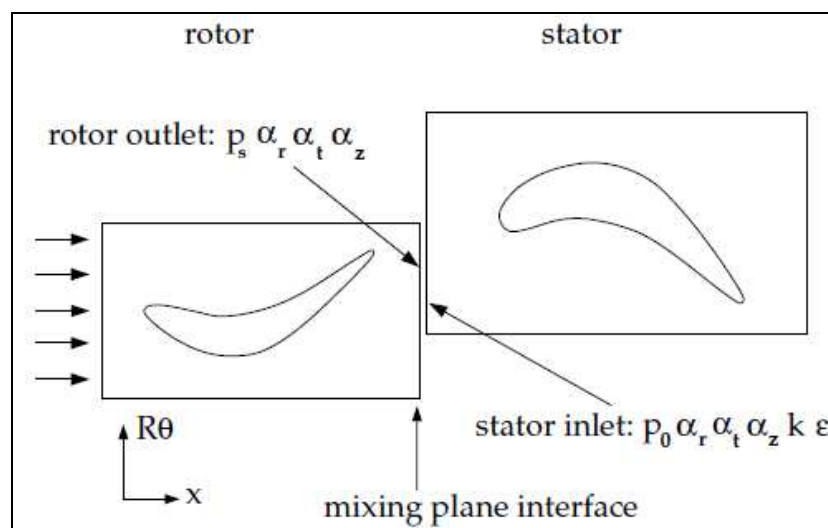
K okrajovým podmínkám by bylo vhodné obecně zmínit dvě záležitosti. První je okrajová podmínka příslušející chladičům. Ty jsou v modelech uvažovány jako nekonečně tenké a okrajová podmínka Radiator se nastavuje na plochy v místech chladičů. Jejich charakteristiky jsou převzaty z práce [6], která se zabývala stejným případem. Souhrnné nastavení okrajové podmínky udává Tabulka 4.

Dále zde rozebereme použití tzv. Mixing planes v celkovém modelu. Je to jeden z nástrojů, jak modelovat navzájem se pohybující oblasti. Druhým, často používaným, je model Sliding mesh, který ale uvažuje nestacionární proudění a je tedy výpočtově náročnější. Spolupůsobení navzájem se pohybujících oblastí je modelováno zjednodušeně. Veličiny proudového pole

jsou z jedné oblasti do druhé předávány jako okrajové podmínky, které jsou středěné v obvodovém směru. Předávané veličiny se dají definovat. V této práci bylo ponecháno výchozí nastavení. Situaci ilustruje Obr. 10, který je převzat z [8] kapitola 10.3.2. Středování veličin pochopitelně nemůže zachytit nestacionarity vznikající ve ventilátorovém stupni. Mohou jimi být kanálové víry nebo rázové vlny při vysokých rychlostech. Pokud bychom tedy chtěli zkoumat ventilátorový stupeň detailně, bylo by použití Sliding mesh a nestacionárního výpočtu nezbytné. Jelikož jsou popisované výpočtové modely primárně určeny pro zkoumání proudového pole ve výstupním kanále, je použití modelu Mixing planes plně dostačující. V celkovém modelu byly použity na třech místech a to na rozhraní vstupní kanál – stator, stator – rotor a rotor – výstupní kanál.

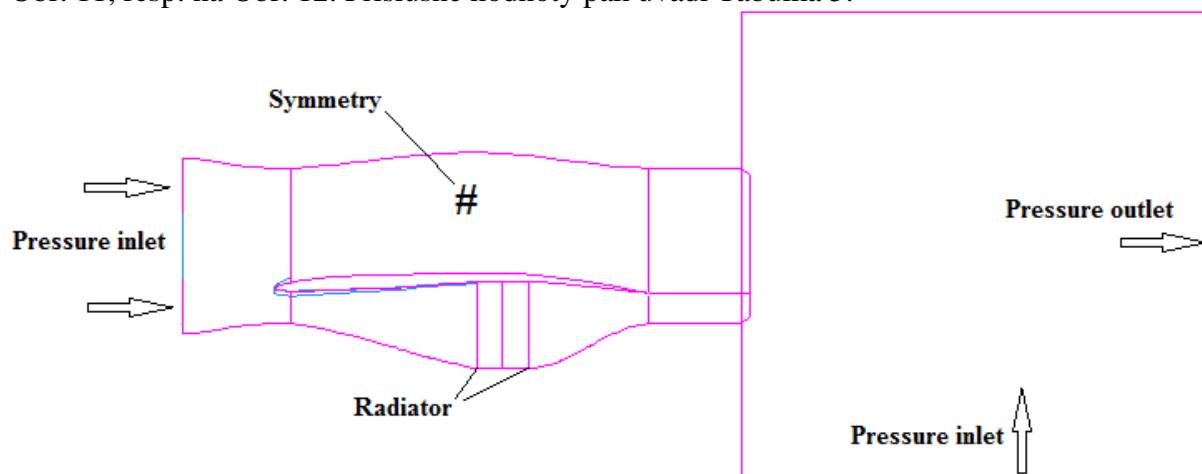
Tabulka 4. – Okrajová podmínka Radiator

Teplota předního chladiče	333,69 K
Teplota zadního chladiče	338,91 K
Koef. tlakové ztráty	3,2581; -0,1677; 0,0023
Konvektivní souč. přestupu tepla	0; 1394,3

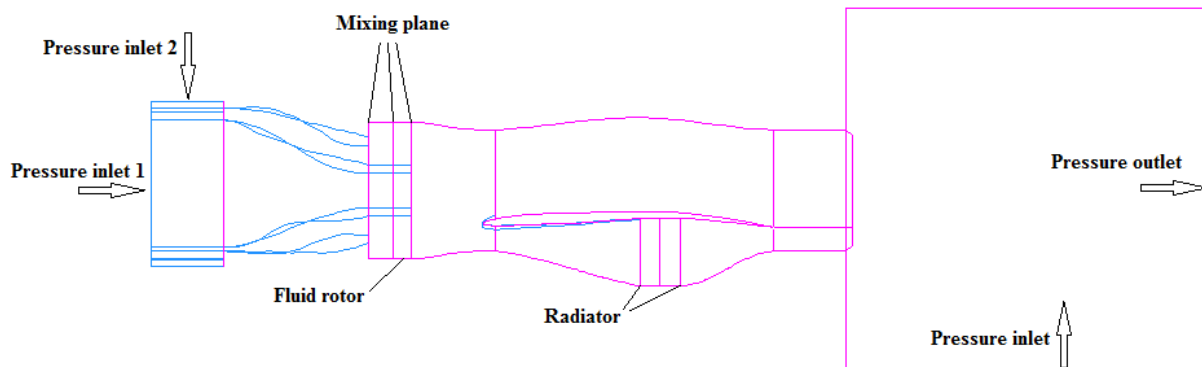


Obr. 10. Mixing plane - model

Nastavení okrajových podmínek pro symetrický, resp. celkový model je naznačeno na Obr. 11, resp. na Obr. 12. Příslušné hodnoty pak uvádí Tabulka 5.



Obr. 11. Okrajové podmínky symetrického modelu



Obr. 12. Okrajové podmínky celkového modelu

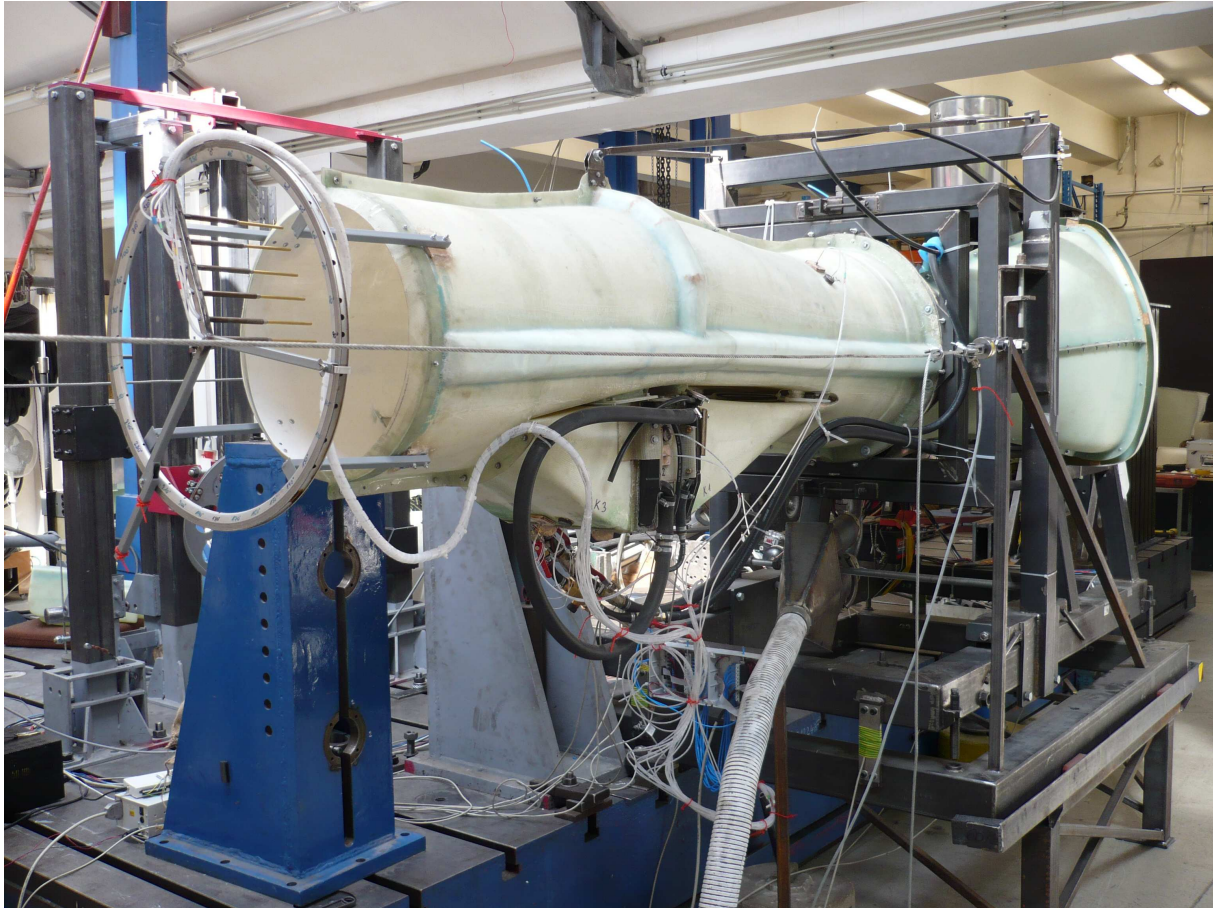
Tabulka 5. – Okrajové podmínky

	Symetrický model	Celkový model
VSTUP	Typ: Pressure Inlet Tlak: 103797,5 Pa Teplota: 294,15K I = 2.7% $D_h = 0.308$ m	Typ: Pressure Inlet Tlak: 100780 Pa Teplota: 294,15K I = 2.7% $D_h = 0.308$ m
VÝSTUP	Typ: Pressure Inlet Tlak: 100780 Pa Teplota: 289,6 K I = 1% $D_h = 1$ m Typ: Pressure Outlet Tlak: 100780 Pa Teplota: 289,6 K I = 2,9% $D_h = 1,5$ m	Typ: Pressure Inlet Tlak: 100780 Pa Teplota: 289,6 K I = 1% $D_h = 1$ m Typ: Pressure Outlet Tlak: 100780 Pa Teplota: 289,6 K I = 2,9% $D_h = 1,5$ m
Chladiče	Viz. Tab. 4.	
Objemy	Motion type: Stationary	<ul style="list-style-type: none"> Fluid rotor Motion type: Moving reference frame Otáčky: $6781,51 \text{ min}^{-1}$ Ostatní objemy Motion type: Stationary
Specifika:	Na plochy v rovině symetrie použita okrajová podmínka typu Symmetry	Použito Modelu Mixing plane

4. Experiment

Pro první zkoušky propulzní soustavy letounu UL-39 byl na Ústavu letadlové techniky, FS ČVUT v Praze zkonstruován laboratorní stand-demonstrátor pohonné jednotky letounu. Ten umožňuje měřit důležité charakteristiky propulzního systému. Mezi nejčastěji sledované patří statický tah od siloměrů a kovových planžet vybavených tenzometry, otáčky motoru a jeho spotřeba, rychlostní potažmo tlakové pole na výstupní trysce, dále pak teploty v místech chladičů, teplota ložiska a výfuku, objemový průtok vody od motoru a olejového chladiče, apod.

Pro verifikaci výpočtového modelu jsou nejdůležitější hodnota statického tahu, rychlostní a tlakový obraz proudového pole na výstupní trysce, popřípadě teplotní obraz v místech chladičů. Samozřejmě spolu se znalostí podmínek, při kterých byl experiment prováděn. Stand-demonstrátor zachycuje Obr. 13, na kterém je vidět proměřování proudového pole na výstupní trysce.

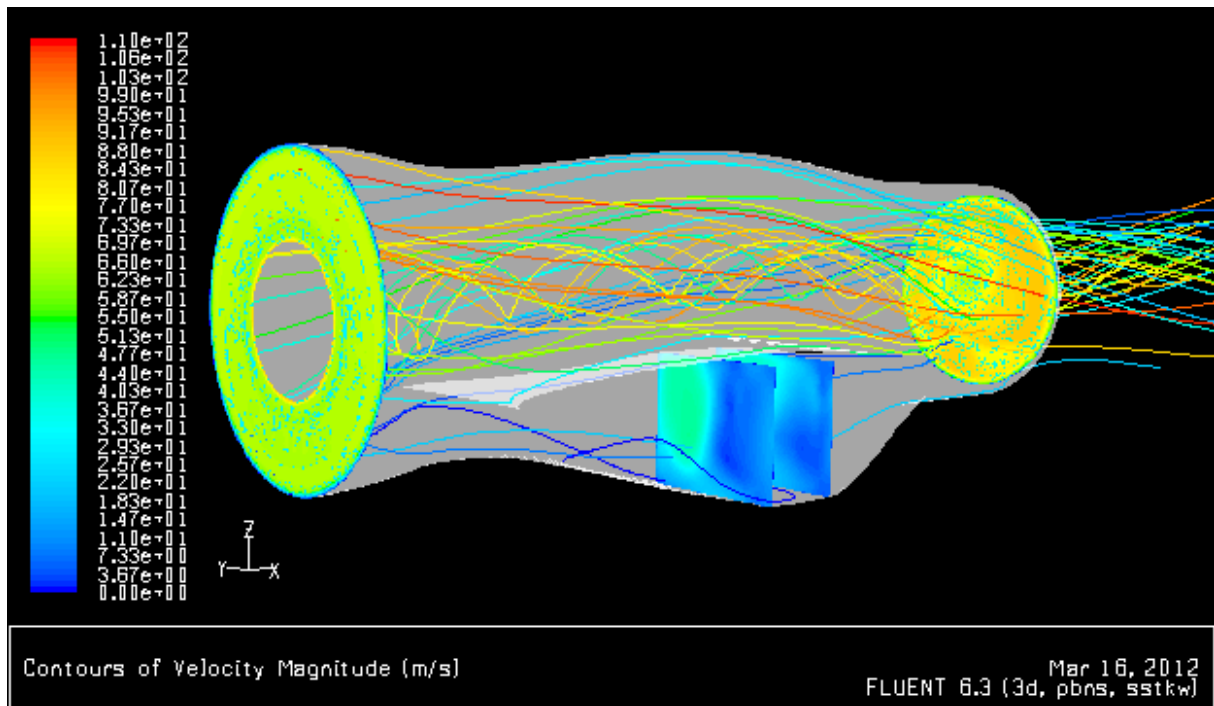


Obr. 13. Stand-demonstrátor pohonné jednotky

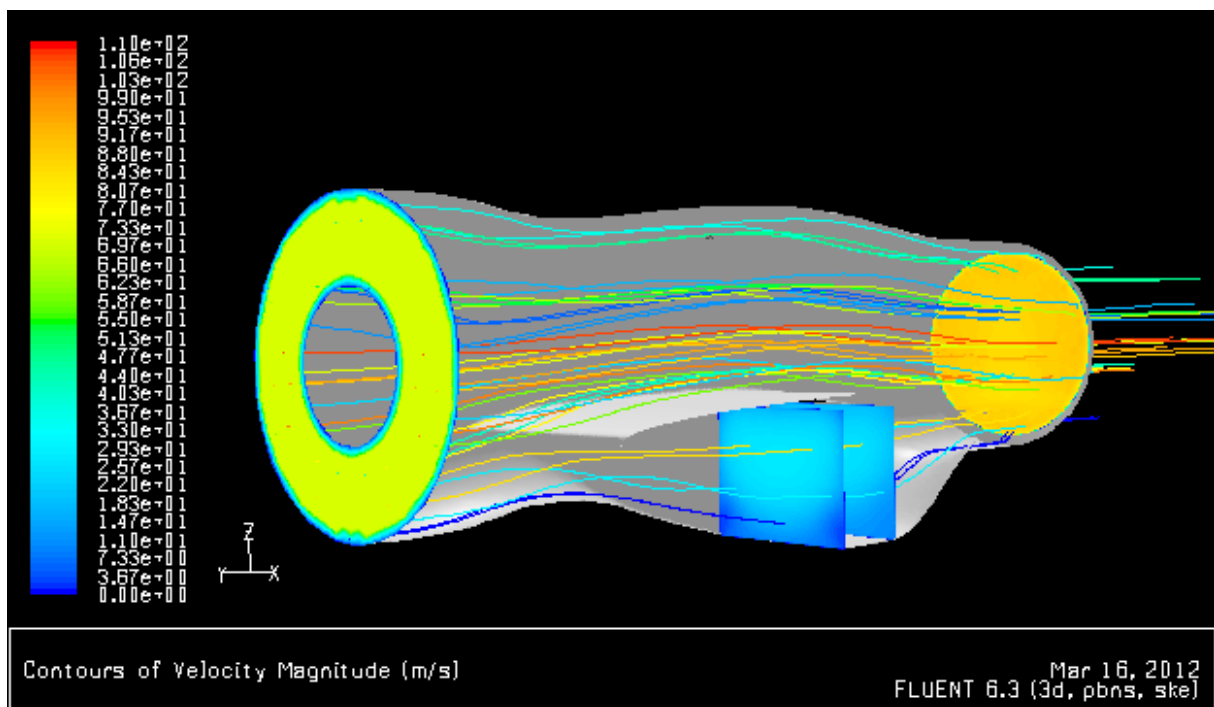
5. Zhodnocení výsledků

Nejprve budou porovnány symetrický a celkový model mezi sebou. Z tvorby symetrického modelu, jsou zřejmé jeho omezení. Zejména zavedení vstupní okrajové podmínky, jejíž hodnota byla stanovena zjednodušeně na základě experimentu. Vychází se přitom z rovnice kontinuity, tedy z fyzikální skutečnosti, že při stacionárním proudění musí být hmotností tok na vstupu a výstupu proudové cesty stejný. Tento model tedy nemůže věrohodně zachytit sekundární proudění vnesené do proudovodu ventilátorem. Sekundárním prouděním se má namysli proudění v rovině (y,z) kolmé na směr základního proudění. Zejména tedy tzv. sekundární proudění 1. druhu mající čistě kinematické příčiny. Tuto skutečnost nejlépe dokumentují Obr. 14 a 15, na kterých jsou zvýrazněny proudnice ve výstupní části proudovodu. Na Obr. 14 je zřejmé stočení proudu, které (jak je vidět na Obr. 15) symetrický model nepostihuje.

Z výše uvedeného vyplývá, že použitelnost symetrického modelu pro predikci konkrétního obrazu proudového pole uvnitř proudovodu je značně omezené. To potvrzuje i Obr. 16 zachycující obraz rozložení rychlostí na prvním chladiči nebo izoplochy rychlostí v rovině symetrie proudovodu na Obr.17. Stejný dopad má tento fakt i na rozložení tlaků a teplot.

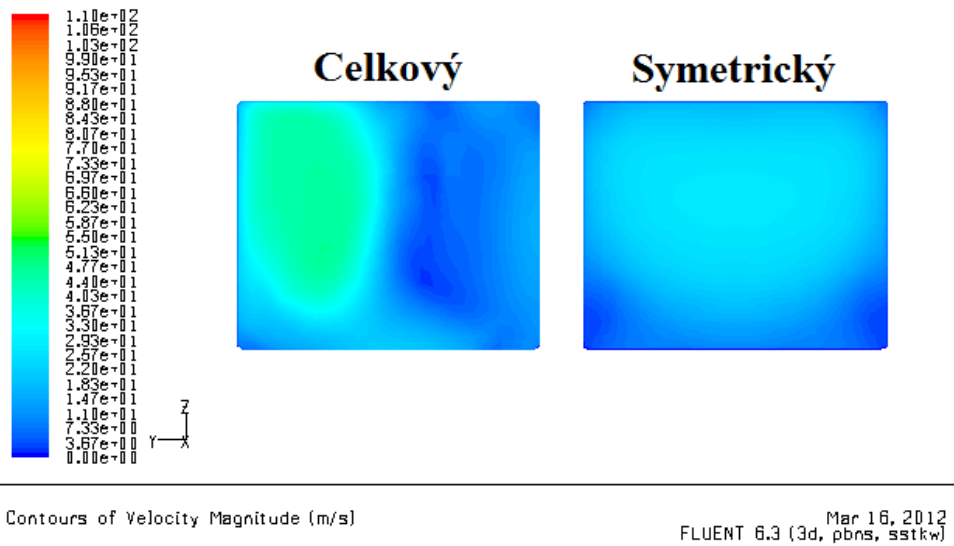


Obr. 14. Proudnice u celkového modelu

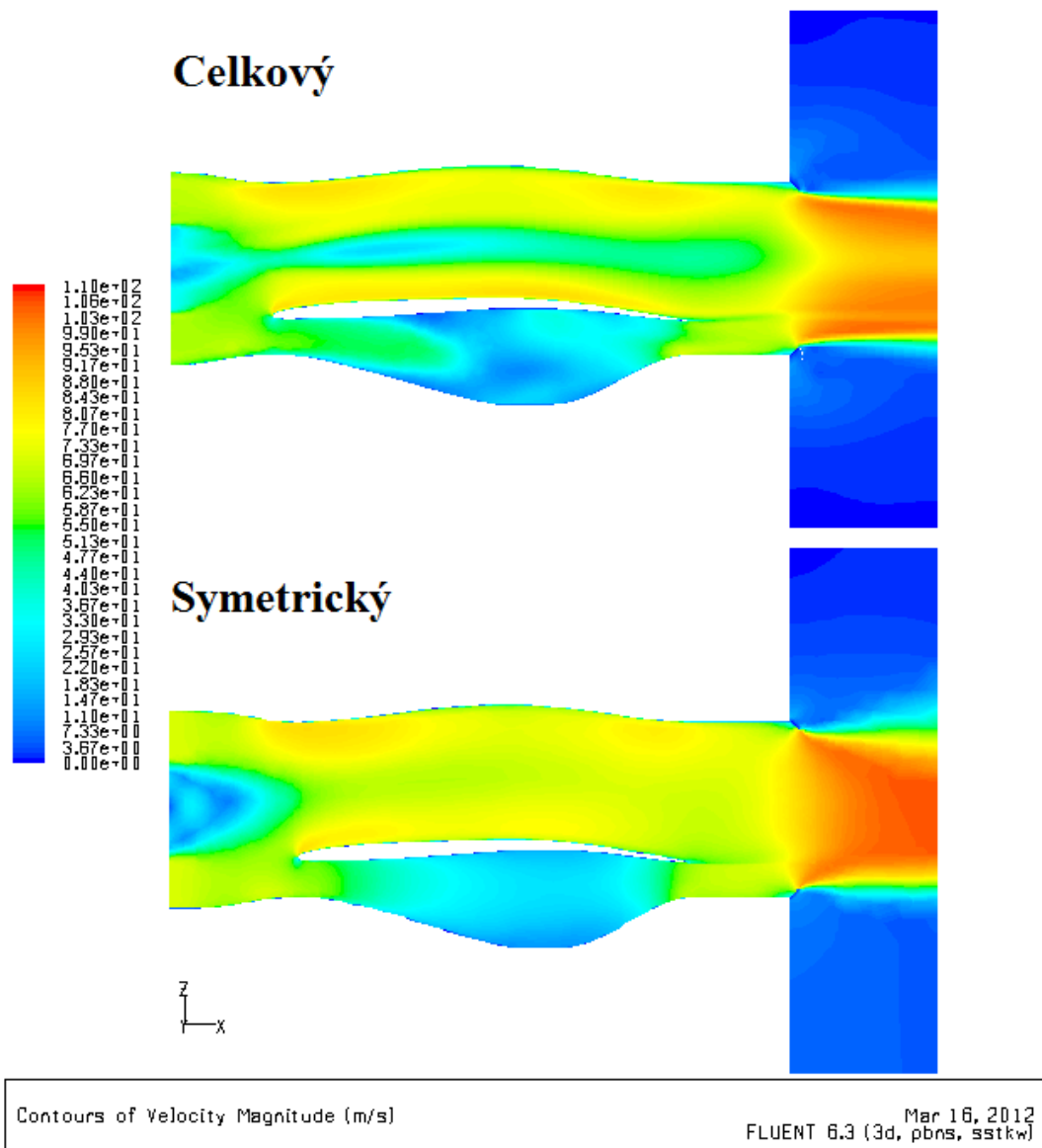


Obr. 15. Proudnice u symetrického modelu

Z experimentu je pro danou konfiguraci pohonu v současné době k dispozici pouze obraz rozložení rychlostí ve výstupním průřezu trysky. Porovnání s výpočtovými modely ukazuje Obr. 18. Je patrné, že na rozdíl od symetrického modelu celkový model vystihuje hlavní charakter proudění správně. Rozdíly mohou být způsobeny zjednodušení, s kterými pracuje výpočtový model, chybami měření a s částí i ovlivněním proudu měřicí aparaturou.

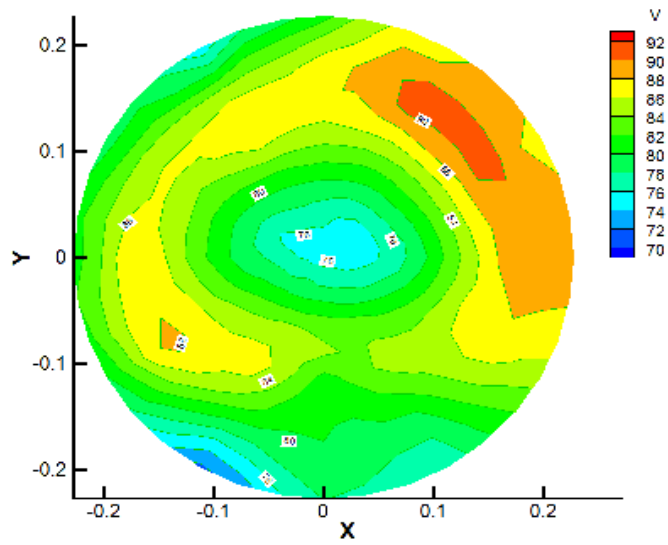


Obr. 16. Porovnání rozložení rychlostí na předním chladiči

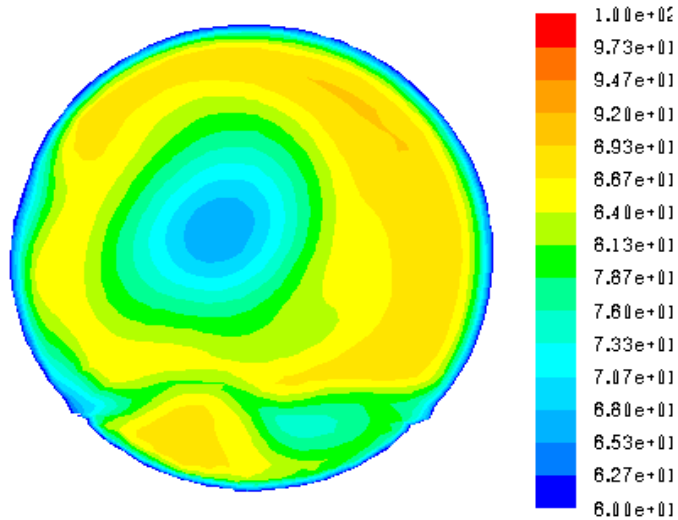


Obr. 17. Porovnání rozložení rychlostí v rovině symetrie proudovodu

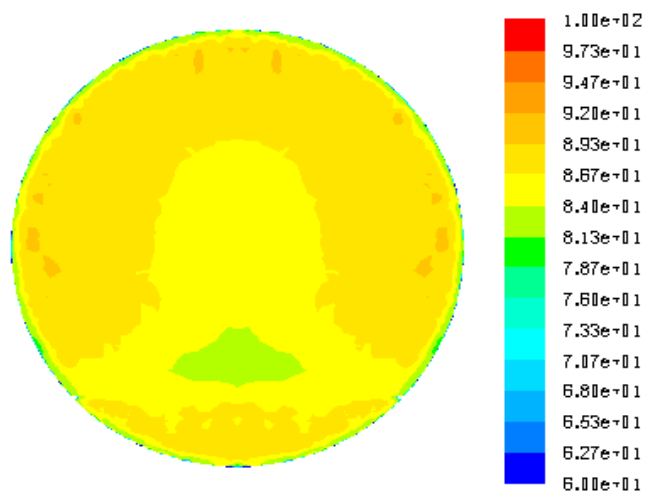
Experiment



Celkový model



Symetrický model



Obr. 18. Porovnání rychlostního pole na výstupní trysce

Protože je celý propulzní systém stále ve vývoji, nebudou zde uvedeny konkrétní hodnoty statických tahů. Lze ale uvést procentuelní rozdíl mezi experimentem a celkovým modelem, který nyní činí přibližně 8 %.

6. Závěr

V tomto příspěvku byla ukázána tvorba dvou výpočtových modelů. První, symetrický model ukazuje dosavadní přístup při vyšetřování proudového pole ve výstupním kanále. Při porovnání s celkovým výpočtovým modelem ale neobstává. Verifikace celkového modelu pomocí experimentálních měření dosud není dokončena. Už teď je ale zřejmé, že hlavní charakter proudění umí celkový model simulovat.

Další kroky po dokončení ladění modelu budou směřovat k výpočtu tahových křivek pohonu, stanovení optimálních průřezů trysky pro různé rychlosti letu, obrazy rychlostí a teplot v místech chladičů a příslušné hmotnostní toky v hlavním kanále a chladicím obtoku. Dále pak bude proveden alespoň hrubý odhad příkonových charakteristik.

Seznam symbolů

Q_{EAS}	parametr Equiangle Skew	[1]
θ	úhel mezi hranami elementu	[°]
I	intenzita turbulence	[%]
D_h	hydraulický průměr	[m]
CFD	počítačová mechanika tekutin	
LAA ČR	Letecká amatérská asociace ČR	
EASA	Evropská agentura pro bezpečnost letectví	

Seznam použité literatury

- [1] RITSCHL, E.: *Rekonstrukce vstupního ústrojí dmyhadlového propulzoru malého sportovního letounu*, diplomová práce, Praha 2002
- [2] RITSCHL, E. – POUL, R.: *The aerodynamic design of a cold jet*, Letecký zpravodaj, 2006. ISSN 1211 – 877X
- [3] SVITÁK, J.: *Výstupní kanál proudového propulzoru sportovního letounu*, diplomová práce, Praha 2007
- [4] CHEN, J.: *Cold jet propulsion unit for an ultra-lightweight aircraft – CFD calculation of outlet nozzle with cooling bypass channel*, diplomová práce, Praha 2007
- [5] KOSTROUN, T.: *CFD analýza dmyhadlového propulzoru*, diplomová práce, Praha 2005
- [6] RITSCHL, E. – CHEN, J.: *Exchanger Integral Property Computation and CFD Simulation of an Unconventional Cooling System*, Letecký zpravodaj, 2007.
- [7] Gambit 2.3.: *User's Guide*, Fluent, Inc., 2006
- [8] Fluent 6.3.: *User's Guide*, Fluent, Inc., 2006