

ČVUT V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ

ÚSTAV LETADLOVÉ TECHNIKY



Bakalářská práce

Vliv konstrukčních parametrů na
hodnoty tlakové ztráty ve vstupní
soustavě turbovrtulového motoru

Influence of design parameters on
pressure drop values in the inlet
system of a turboprop aircraft

Autor:

Jan Maur

Vedoucí práce:

prof. Dr. Ing. Tomáš Vampola

Studijní program:

TZSI

Rok:

2023

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá výpočtem tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru Walter M-601E. V první části je analyzován vliv okrajových podmínek, konkrétně vliv změny úhlu směru proudění na vstupu na hodnotu tlakové ztráty. Ve druhé části je vyšetřen vliv změny konstrukčních parametrů vstupní soustavy na hodnotu tlakové ztráty. Hlavním předmětem změny konstrukčních parametrů je geometrická konfigurace plechu odledňovací klapky.

KLÍČOVÁ SLOVA

CFD analýza, citlivostní studie, tlaková ztráta, vstupní soustava, turbovrtulový motor M-601, letoun L-410, okrajové podmínky, konstrukční parametry,

ABSTRACT

This thesis deals with computation of the pressure drop in the inlet system of the Walter M-601E turboprop engine. In the first part, the influence of boundary conditions is analysed, namely the influence of the change in the angle of the inlet flow direction at the inlet on the value of the pressure drop. In the second part, the influence of changing design parameter of the inlet system on the value of the pressure loss is investigated. The main subject of the change in design parameters is the geometry of the de-icing flap sheet.

KEYWORDS

CFD analysis, sensitivity study, pressure drop, inlet system, M-601 turboprop engine, L-410 aircraft, boundary conditions, design parameters,



PODĚKOVÁNÍ

Rád bych poděkoval mému vedoucímu Bakalářské práce prof. Dr. Ing. Tomáši Vampolovi a mým konzultantům Ing. Romanu Veselkovi a PhD. Ing. Michalu Čížkovi za odbornou přípravu a metodologickou pomoc při zpracování mé práce. Dále bych rád poděkoval za neuhasínající podporu mé rodiny včetně mé trpělivé přítelkyně a mým přátelům.

OBSAH

Úvod	9
Teoretická část	10
1 O letounu LET L-410 Turbolet	10
2 Letadlová pohonná jednotka	11
2.1 Turbouvrtulový pohon	11
2.2 Vstupní soustava pohonné jednotky.....	14
3 Proudění tekutin.....	15
3.1 Řešení proudění tekutin.....	16
3.2 Fyzikální vlastnosti.....	17
3.3 Proudění vazké tekutiny.....	19
3.3.1 Laminární proudění	19
3.3.2 Turbulentní proudění	19
3.3.3 Přechod laminárního proudění v turbulentní	21
3.3.4 Tlaková ztráta	22
3.4 Obtékání těles	24
3.4.1 Mezní vrstva	24
3.4.2 Odpor při obtékání těles	27
3.5 Matematické modelování proudění.....	27
3.5.1 Přímá diskretizace Navier - Stokesových rovnic.....	27
3.5.2 Metoda velkých vírů.....	28
3.5.3 Metody časového středování N – S rovnic.....	28
3.5.4 Modely k-ε.....	29
3.5.5 Modely k-ω.....	30
4 Obecný princip CFD výpočtu	31
4.1 Postup řešení CFD úloh	31
4.1.1 Preprocessing – tvorba geometrie	32
4.1.2 Preprocessing – tvorba výpočetní sítě	33
4.1.3 Definice vlastností tekutiny	33
4.1.4 Definice okrajových podmínek.....	33
4.1.5 Numerické řešení – solver.....	34
4.1.6 Vyhodnocení výsledků – postprocesor	34
5 Předešlé práce	35
5.1 Výsledky.....	36
Analýza proudění vstupní soustavy turbouvrtulového motoru M-601E	37
Úvod	37
6 Vstupní data a parametry	39
6.1 Spolupráce	39
6.2 Vstupní data	39
6.2.1 Okrajové podmínky pro specifický režim letu	39
6.3 Výpočetní technika	39
6.3.1 Osobní notebook.....	39
6.3.2 Výpočetní cluster.....	39
6.4 Výpočetní software.....	40
6.4.1 CAD pro 3D modelování	40

6.4.2	Software pro CFD	40
6.5	Řešení úlohy a požadované výsledky	40
7	Výpočet citlivosti tlakové ztráty na okrajové podmínky	41
7.1	Příprava geometrie	41
7.2	Tvorba sítě.....	43
7.2.1	Obecné nastavení.....	43
7.2.2	Nastavení povrchových prvků	43
7.3	Definice okrajových podmínek a fyziky proudění	44
7.3.1	Nastavení jednotlivých domén.....	44
7.3.2	Změna úhlu proudění	45
7.4	Nastavení numerického řešení	46
7.5	Nastavení výstupu analýzy	47
7.6	Spuštění výpočtu a kontrola	47
7.6.1	Spuštění.....	47
7.7	Kontrolní úloha.....	48
7.8	Výsledky	49
7.8.1	Výsledek úlohy s kolmým prouděním v porovnání s kontrolní úlohou.....	51
7.8.2	Výsledky citlivosti tlakové ztráty na změnu úhlu proudění.....	51
7.9	Diskuze výsledků.....	52
7.9.1	Diskuze výsledků kontrolní úlohy a porovnání s danou sítí	52
7.10	Diskuze citlivosti tlakové ztráty proudění na velikost vstupního úhlu.....	52
7.10.1	Tlaková ztráta vstupního kanálu	56
7.10.2	Tlaková ztráta v uklidňovací komoře.....	56
7.10.3	Tlaková ztráta celé soustavy.....	56
7.10.4	Rozbor grafických výstupů	56
8	Výpočet citlivosti tlakové ztráty na změnu geometrie.....	58
8.1	Příprava geometrie	58
8.2	Tvorba sítě.....	60
8.3	Definice okrajových podmínek a fyziky proudění	60
8.4	Ostatní nastavení.....	60
8.5	Výsledky	61
8.6	Diskuze výsledků.....	61
8.6.1	Rozbor grafických výstupů (kontur, vektorů a proudnic).....	62
9	Závěr	63
	Zdroje	64
	Seznam použitých symbolů.....	66
	seznam zkratek	68
	Seznam obrázků	69
	Seznam Tabulek	72
	Seznam příloh	73
	Přílohy	74
	Příloha 1.....	74
	Příloha 2.....	80



Příloha 3.....	86
Příloha 4.....	90
Příloha 5.....	102
Příloha 6.....	108
Příloha 7.....	114
Příloha 8.....	118

Úvod

Turbovrtulový pohon má v historii letectví velmi důležitou roli. Turbovrtulové letouny mají v dnešní době široké využití díky jejich úspornosti a ekonomičnosti. Tato práce je vytvořena pod záštitou společnosti General Electric Aerospace, jejichž motory dnes pohánějí přes 30 různých typů letadel provozovaných na 6 kontinentech [1].

Pro správnou funkci turbovrtulového motoru je však z aerodynamického hlediska důležitá hodnota ztrát ve vstupní soustavě motoru. Proudění vzduchu ve vstupní soustavě motoru při manévrech a letových režimech může měnit svůj charakter a tím silně ovlivňovat tlakové ztráty [2].

Tato práce se zabývá výpočtem tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru Walter M-601E používaného na letounech LET L-410 Turbolet. Zkoumaná vstupní soustava je vymezena od vstupu do motorové gondoly až k vlastnímu vstupu do motoru, kterým je síto kompresoru. Cílem práce je zkoumat a analyzovat 2 faktory, a to jaký vliv na samotnou tlakovou ztrátu má směr vektoru rychlosti nasávaného vzduchu a jaký vliv na tlakovou ztrátu má změna geometrie vnitřní konstrukce vstupní soustavy.

Výpočet tlakové ztráty je proveden pomocí CFD metod v programu ANSYS CFX. Po úvodním seznámení se zvoleným letounem, pohonnou jednotkou a problematikou celé analýzy proudění tekutin byl proveden samotný výpočet ztráty celkového tlaku ve vstupní soustavě motoru M-601E, která je tvořena vstupním kanálem a uklidňovací komorou. Vstupní soustava není pro proudění vzduchu ideální – především uklidňovací komora má složitý tvar, navíc obsahuje mnoho dalších konstrukčních prvků, tvořících překážku pro proudící vzduch.

CFD metody se v současnosti běžně používají k modelování proudění tekutin namísto zkoušek v aerodynamických tunelech, které jsou dražší a náročnější, i když užitečné, například k ověření výsledků. V rámci této práce k praktickému měření nedošlo, jelikož v rámci BP není dostatečný prostor, ani finanční prostředky pro rozšíření práce o praktický experiment potřebného rozsahu.

TEORETICKÁ ČÁST

1 O letounu LET L-410 Turbolet

Letouny řady L-410 jsou víceúčelové turbovrtulové hornoplošníky české výroby (původně československé produkce, v současnosti vyráběné firmou LET v Kunovicích). Vyznačují se celokovovou konstrukcí, vysokou spolehlivostí, bezpečností a schopností provozu v extrémních klimatických podmínkách (od -50 do +50 °C), také ekonomičností provozu, a také schopností přistání a vzletu na krátkých nezpevněných drahách [3].

Vývoj tohoto letounu začal již v polovině 60. let, tehdy ještě s označením L-400. Tento koncept byl následně přepracován a dostal nové označení L-410. Prvotně byl osazen dvěma motory Pratt & Whitney Canada PT6-A27 a třílistými vrtulemi Hamilton Standard. Až v roce 1974 byl uskutečněn první let letounu s označením L-410M, s motory československé výroby M601A a třílistými vrtulemi Avia V508. V dalším vývoji došlo na prodloužení trupu, zvětšení rozpětí křídla a úpravu vzepětí stabilizátoru. Křídlo bylo nově vybaveno interceptory a na podvozku byly vylepšeny brzdy. Těmito změnami vznikl typ L-410UVP. Tento nový typ řady letounů L-410 byl nejprve osazen motory M601B, následně pak účinnější verzí M-601D [4].

Následovala další, dnes nejrozšířenější verze a to L-410UVP-E. V roce 1984 byly vyrobeny první prototypy tohoto letounu. Tato verze měla mnohá vylepšení. Mohla nabídnout o 4 sedadla pro cestující více než předchozí verze, letoun tedy mohl nově pojmout až 19 cestujících. Na konci každého zesíleného křídla byly umístěny 2 palivové nádrže, čímž se zvýšil dolet, ale i maximální vzletová hmotnost. L-410UVP-E mohl také využít vyšších cestovních hladin až do 4200 m díky zvětšení maximální výchylky dvoušterbinových klapek a instalaci přenosných kyslíkových dýchačů. Stroj byl mimo další vybavení osazen zcela novou variantou pohonné jednotky, a to motorem M-601E s pětistupňovou vrtulí Avia V510, vybavenou systémem ručního i automatického praporování, která udělala letoun méně hlučným.

Počet vyrobených letounů L-410UVP-E přesáhl 300 kusů, a kromě jeho největšího odběratele – SSSR byl stroj zakoupen společnostmi z mnoha zemí, včetně České, nebo Slovenské republiky [5].



Obr. 1 - LET L-410UVP-E ve službách SSSR [6]



Obr. 2 - LET L-410UVP-E na dráze [6]

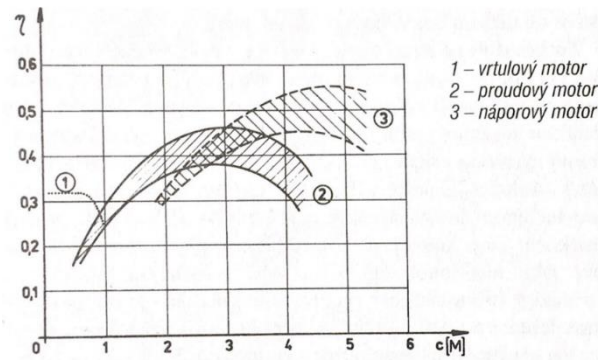
2 Letadlová pohonná jednotka

Jedna z nejdůležitějších součástí letadla je pohonná jednotka, což je zařízení, které mění energii obsaženou v palivu na tah. Skládá se ze zdroje mechanické energie (motoru) a prvku, který následně mechanickou energii mění na tahovou sílu. Takovým prvkem může být například vrtule, u vrtulových pohonů, nebo turbína u proudových motorů. Princip vývinu tahové síly u všech typů letadlových pohonů spočívá v urychlování tekutiny. V zásadě se jedná o zákon akce a reakce. Tekutina, kterou pohonná jednotka letadla urychluje je nejčastěji okolní vzduch. Toho využívají proudové a vrtulové pohony. Lze však použít i látky, které si letadlo nese s sebou, čehož se využívá u raketových pohonů [7].

Principem vytváření tahu jsou vrtulové a proudové pohony stejné. Rozdíl je v tom, že vrtulový pohon vytváří tah urychlením vzduchu, který obtéká motor, kdežto proudový vytváří tah urychlením vzduchu, který protéká přímo motorem. Typ motoru a jeho konstrukce závisí na druhu pohonu. Vrtulové pohonné jednotky rozlišujeme na pístové, turbovrtulové a reaktivní, tryskové pohonné jednotky na lopátkové, bezlopatkové a raketové [7].

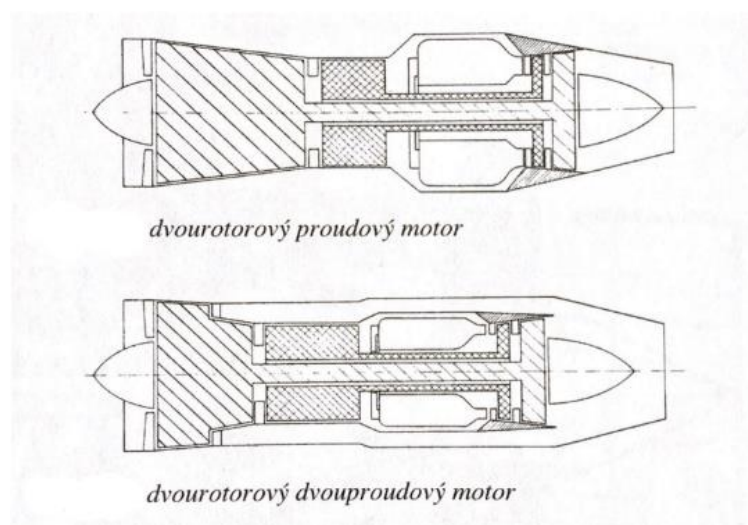
2.1 Turbovrtulový pohon

Ani v dnešní době nejsou vrtulové pohony ani zdaleka zapovězeny. Jedná se totiž o neekonomičtější typ pohonu v kategorii letadel pro dopravu na kratší vzdálenosti. Jak můžeme vidět na Obr. 3, účinnost vrtulových motorů je vyšší v oblasti nižších Machových čísel [7].



Obr. 3 - Oblasti použití jednotlivých druhů pohonu [7]

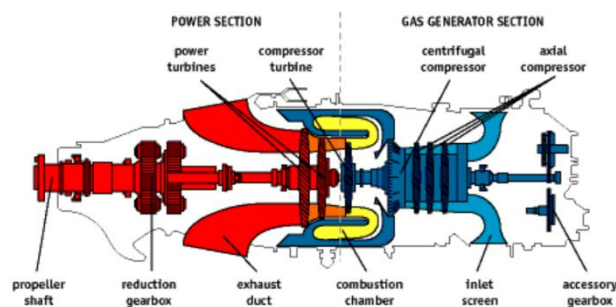
Turbovrtulové motory jsou v podstatě kombinací proudového a vrtulového pohonu. Mají tudíž částečně podobnou konstrukci motorům proudovým, avšak její využití je u turbovrtulových motorů jiné. Oba typy motorů mají turbínu, spalovací komoru, kompresor a vstupní i výstupní soustavu. V turbíně turbovrtulového motoru však vyžadujeme přebytek výkonu $P_T > P_K$, který vzniká na úkor energie výtokových plynů. Tah vznikající ve výstupním ústrojí je tedy velmi malý, což je zásadní rozdíl oproti proudovému motoru. Konstrukci turbovrtulového motoru můžeme rozdělit na dva typy, a to motor s volnou turbínou, kde volná turbína pohání přes reduktor výhradně vrtuli (kompresor je poháněn tzv. generátorovou turbínou) nebo motor, kde turbína pohání jak kompresor, tak vrtuli na jednom společném hřídeli. První varianta motoru s volnou turbínou vlastně sestává ze dvou na sobě mechanicky nezávislých modulů, hnací částí a generátorem plynů [7][8].



Obr. 4 - Schéma turbovrtulového motoru [7]

Motor Walter M-601E je turbovrtulový motor československé výroby. Jedná se o vylepšenou původní variantu motoru Walter M-601 vyvinutou pro letoun L-410 vyráběný v Kunovicích. M-601 je typ motoru s dvouhřídelovým uspořádáním. Generátor plynů pro pohon volné turbíny, tedy turbíny otáčející vrtulí, disponuje smíšeným kompresorem složeným ze dvou axiálních a jednoho radiálního stupně. Kompresor zde pohání jednostupňová generátorová trubína. Celý generátor plynů je uložen s obráceným směrem průtoku plynů (plyny tečou proti směru letu). Kompresor je tedy v zadní části motoru. Zde se nachází po obvodu rozmístěné vstupní otvory vzduchu, do kterých je vzduch přiváděn vstupní soustavou, která je tvořena kanálem, jež vede pod motorem. Vpředu v motoru je uložena volná hnací turbína, ze které vede hřídel do reduktoru, který je připojen k vrtuli. M-601 je koncepčně podobný kanadskému motoru Pratt & Whitney Canada PT-6 [8][9].

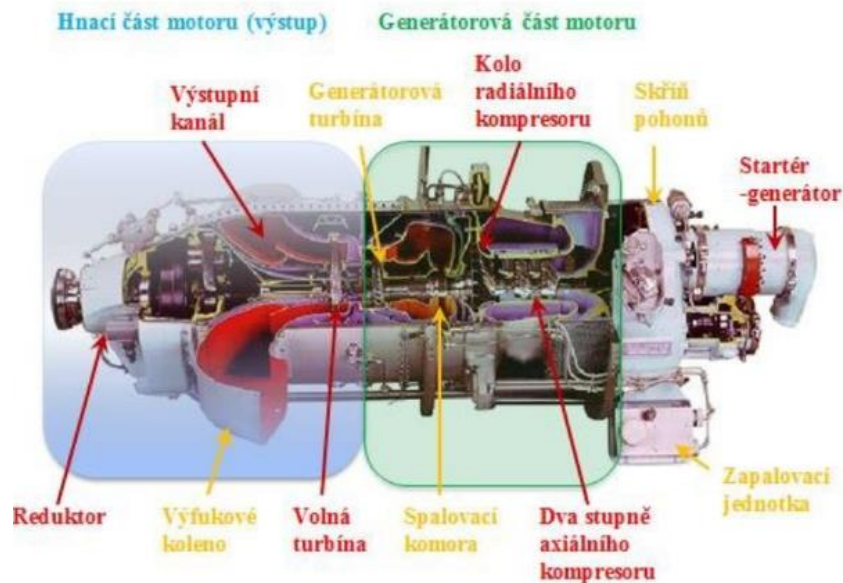
Tato původní verze se postupně vylepšovala na verzi M-601B, dále M-601D na niž navazuje samotná verze M-601E vyvinutá pro letoun L-410E (L-410UVP-E) která vznikla na základě požadavku zvýšení výkonu a prodloužení intervalu do generální opravy. Tato verze měla být používána v kombinaci s novou pětistou vrtulí se zvýšenou spotřebou el. energie (kvůli odmrazování), což vyžadovalo zásadnější rekonstrukci motoru M-601. Změnil se mimo jiné profil statorových lopatek druhého stupně axiálního kompresoru, což vedlo ke zvětšení průtočného množství vzduchu a stlačení kompresoru, nově byla zvětšena šířka disku volné turbíny a oběžných lopatek v oblasti okolo zámků pro zvýšení nízkocyklové únavy a další. Maximální trvalý výkon verze M-601E zůstal na hodnotě 490 kW, vzletový



Obr. 5 - Schéma turbovrtulového motoru s volnou hnací turbínou se zpětným prouděním plynů [10]

výkon se ale zvýšil až na 560 kW. Doba mezi generálními opravami byla zvýšena

na 2000 hodin (2250 letových cyklů). Motor M-601E se stal dalším vývojovým milníkem řady M-601 a platformou pro vývoj dalších typů [8].



Obr. 6 - Řez motorem M-601 [11]

2.2 Vstupní soustava pohonné jednotky

Vstupní soustava je komplex konstrukčních prvků, které zajišťují přívod vzduchu z okolního prostředí do vstupu kompresoru. Kromě toho se ve vstupní soustavě mění kinetická energie vzduchu na tlakovou energii. Jednou z priorit konstrukce vstupní soustavy je, aby zajistila minimální ztráty celkového tlaku vzduchu vstupujícího do motoru. Dále by měla mít vstupní soustava minimální tzv. čelní odpor a měla by spolehlivě fungovat v různých letových podmínkách [12].

3 Proudění tekutin

Tekutiny jsou definovány jako látky složené z molekul, které se za působení vnějších sil vždy nevratně deformují, nemají vlastní tvar – zaujímají tedy tvar nádoby ve které se nachází.

Proudění je pohyb tekutin. Tvar proudící tekutiny je vymezen pevnými stěnami daného kanálu a tekutinami vytvořeným rozhraním – hladinou. Silové působení na tělesa, která jsou obtékána vzduchem zkoumá obor Aerodynamika.

Vyšetřování proudění se uskutečňuje v prostoru, rovině, nebo po křivce. Sleduje se pohyb částic tekutiny (hmotných bodů), či celý proud v určitém čase.

Podle kinematických hledisek můžeme proudění tekutin rozdělit na uspořádání v prostoru:

1. 1D, proudění, kde rychlost závisí na poloze na křivce $u = u(s)$,
2. 2D, proudění, kde rychlost závisí na poloze v rovině $u = u(x, y)$
3. 3D, proudění v prostoru, kde rychlost závisí na poloze v prostoru $u = u(x, y, z)$

a podle závislosti na čase:

1. stacionární (nezávislé na čase)
2. nestacionární (závislé na čase).

Podle fyzikálních vlastností pak proudění tekutin lze rozlišit na proudění ideální (nevazké) tekutiny, které lze dále dělit na:

1. Potenciální (nevířivé)
2. Vířivé

a proudění skutečné (vazké tekutiny), které lze dělit na:

1. Laminární
2. Turbulentní [13]

Částice proudění se pohybují po trajektorii (dráze). Trajektorie je obecná čára, kterou prochází částice tekutiny v čase. Tato dráha může být nezávislá na čase, což pozorujeme u stacionárního proudění, či závislá, čímž vzniká nestacionární proudění.

Obálky rychlostních vektorů nazýváme proudnice. Tečny proudnic udávají směr vektorů rychlosti. Při stacionárním proudění jsou proudnice totožné s trajektoriemi, při nestacionárním proudění proudnice s trajektoriemi totožné nejsou [14].

Proudová trubice je fiktivní trubice tvořená svazkem proudnic, které prochází průřezem tvořeným uzavřenou křivkou. Z hlediska proudění má proudová trubice stejný charakter, jako reálná trubice s nepružnými nepropustnými stěnami. Pláštěm proudové trubice tekutina neprotéká, tudíž složky vektoru normálové rychlosti u_n jsou všude nulové.

3.1 Řešení proudění tekutin

Mezi nejdůležitější vlastnosti tekutin patří stlačitelnost a viskozita. Podle stlačitelnosti je můžeme rozdělit na stlačitelné, které jsou i rozpínavé a vyplňují celý objem nádoby a nestlačitelné, které za působení vnějších prakticky nemění svůj objem. Mezi stlačitelné patří plyny a páry, mezi nestlačitelné patří především kapaliny [13].

Pokud uvažujeme tyto vlastnosti tekutin, pak k exaktnímu řešení jejich proudění musíme použít Navier – Stokesovy rovnice (nelineární parciální diferenciální rovnice 2. řádu) [14]

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \frac{1}{3}\mu \nabla \nabla \cdot \vec{u} + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f}. \quad (3.1)$$

Kde ρ je hustota tekutiny, \vec{u} je vektor rychlosti, p je tlak, $\mu [Pa \cdot s]$ je dynamická viskozita, \vec{f} je vnější objemová síla. Pokud považujeme tekutinu za nestlačitelnou, rovnice (3.1) se zjednoduší na tvar

$$\rho \frac{D\vec{u}}{Dt} = -\nabla p + \mu \nabla^2 \vec{u} + \rho \vec{f}. \quad (3.2)$$

Analytické řešení rovnice (3.2) (kterým je rychlostní profil) však lze získat v případě pouze jedné nenulové složky rychlosti, přičemž nelineární složky na levé straně vymizí. V případě 3D úlohy (jako je ta, kterou se zabývá tato práce) však exaktní řešení nelze získat. I přibližné řešení je však velmi obtížné, proto počítáme s matematickým modelem tekutiny jejíž vlastnosti jsou zjednodušeny pro potřeby konkrétní úlohy [15].

Pro nestlačitelnou tekutinu také platí zákon zachování hmotnosti:

$\dot{m}_1 = \dot{m}_2$. Z tohoto zákona lze odvodit rovnici kontinuity, která má pro 3D prostor tvar

$$\nabla u = 0. \quad (3.3)$$

Složkově v kartézském systému pak [15]

$$\frac{\partial u_x}{\partial x} + \frac{\partial u_y}{\partial y} + \frac{\partial u_z}{\partial z} = 0. \quad (3.4)$$

3.2 Fyzikální vlastnosti

Stav tekutin, které jsou v rovnováze, je popsán hustotou, teplotou a tlakem. Pro plyny a páry platí, že jejich hustota je závislá na tlaku a teplotě. Hustota tekutin se ve většině případů považuje za konstantní. Další vlastností je objemová stlačitelnost. Jedná se o úbytek objemu při působení tlaku za konstantní teploty a je definována součinitelem stlačitelnosti δ [Pa^{-1}]. Platí vztah

$$\delta = -\frac{1}{V} \left(\frac{dV}{dp} \right). \quad (3.5)$$

Při zahřátí tekutiny mění svůj objem. Tomuto jevu se říká tepelná roztažnost, která je definována součinitelem tepelné roztažnosti β [$^{\circ}C^{-1}$],

$$\beta = \frac{\Delta V}{V \Delta t}. \quad (3.6)$$

U proudících tekutin se projevuje vlastnost známá jako viskozita. Je to schopnost tekutiny přenášet tečná napětí, která se projevuje jako odpor částic proti vzájemnému posunu. Jinak řečeno jedná se o vnitřní tření tekutin. Toto tečné napětí je definováno Newtonovým zákonem [14].

Newtonův zákon pro nestlačitelné tekutiny má tvar

$$\vec{\tau} = 2\mu \vec{\Delta}. \quad (3.7)$$

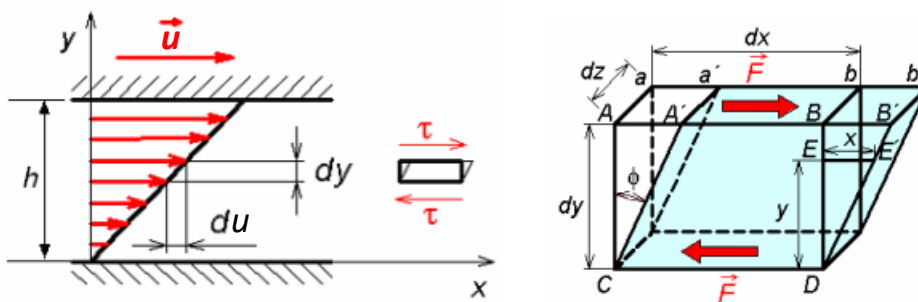
Kde $\vec{\Delta}$ je tenzor rychlosti deformace, $\vec{\tau}$ je tenzor dynamického napětí. Tekutiny, které se obecně řídí Newtonovým zákonem – kdy je závislost mezi tenzorem dynamického napětí a tenzorem rychlosti deformace lineární, nazýváme Newtonské [15].

Pro laminární proudění Newtonských tekutin mezi 2 deskami pak platí

$$\tau = \mu \frac{du}{dy}, \quad (3.8)$$

kde u [$m \cdot s^{-1}$] je rychlost smykové deformace, které se při rovinném proudění nazývá rychlostní gradient [14].

Dynamická viskozita se řádově pohybuje okolo $1 - 3 \cdot 10^{-5}$ [$Pa \cdot s$]. Je závislá na druhu tekutiny. Její závislost na tlaku je pro ideální plyn zanedbatelná. Je však silně závislá na teplotě, u plynů viskozita s teplotou vzrůstá, na rozdíl od kapalin, a to přibližně podle vztahu $\mu \sim T^{0,65-0,85}$ [15].



Obr. 7 - Smykové napětí při laminárním proudění [13]

Kromě dynamické viskozity existuje i kinematická viskozita ν [$m^2 \cdot s^{-1}$]. Je to vlastně dynamická viskozita přepočtená na jednotku hustoty

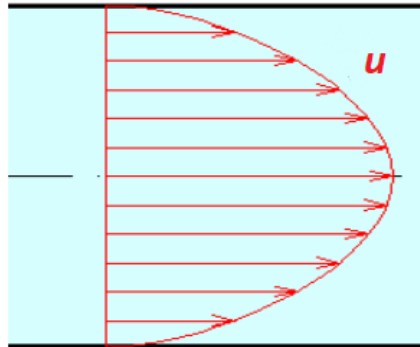
$$\nu = \frac{\mu}{\rho}. \quad (3.9)$$

Již zmíněný Newtonův zákon platí pro newtonské tekutiny, jejichž tečné napětí je lineárně závislé na rychlosti smykové deformace. Reálné tekuté látky však nikdy nejsou ideálně newtonské. Kromě toho existují i nenewtonské látky, kde zmíněná závislost není lineární, případně i takové látky, jejichž viskozita je závislá na čase. Jsou jimi výhradně nestlačitelné tekutiny (kapaliny) [15].

3.3 Proudění vazké tekutiny

3.3.1 Laminární proudění

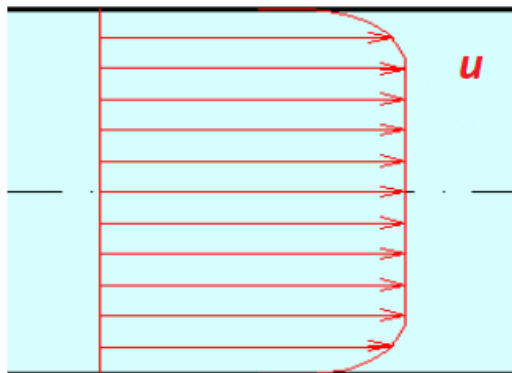
Laminární proudění je stav, kdy se částice proudící tekutiny nepřemísťují po průřezu a proudí v tenkých vrstvách. Grafickým znázorněním rychlostního profilu laminárního proudění je v prostoru rotační paraboloid, v rovině kolmé na průřez kanálu je jím parabola. Na stěně pro $r = r_{max}$ bude rychlost rovna nule, naopak v ose potrubí $r = 0$ bude rychlost maximální.



Obr. 8 - Rychlostní profil laminárního proudění [13]

3.3.2 Turbulentní proudění

Turbulence jako taková je velmi těžko definovatelná, k jejímu popisu se proto používá soubor vlastností. Při turbulentním proudění se částice přemísťují po průřezu, na rozdíl od laminárního proudění. Kromě rychlosti stejnosměrné s rychlostí proudu mají také rychlost fluktuální. Dochází zde k intenzivnímu míšení částic, jelikož částice přechází z jedné vrstvy do druhé a k jejich vzájemné výměně kinetické energie. Jejich rychlosti se po průřezu značně vyrovnávají, hodnoty okamžité rychlosti pak kolísají kolem střední hodnoty. Při chaotických změnách



Obr. 9 - Rychlostní profil turbulentního proudění [13]

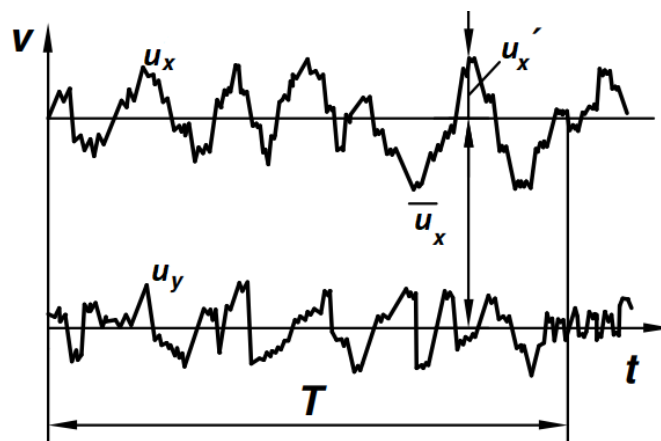
pohybu částic dochází ke změně hybnosti, která vede k většímu odporu proti pohybu, než jaké odpovídá smykovému napětí při laminárním proudění. Rychlostní profil se zde podobá obdélníku. Čím vyšší je míra turbulence, tím více se rychlostní profil tvarem blíží obdélníku [14].

Charakteristickým jevem pro turbulentní proudění jsou fluktuace rychlosti, tlaku a dalších veličin, zdánlivá nahodilost změn, difuzivita, víry různých velikostí atd. Disipace energie turbulentního proudění vychází z faktu, že je turbulentní proudění složeno z velkých vírových struktur, obsahujících energii, které se následně rozpadají na menší víry a uplatňuje se zde zákon zachování energie. Velké víry mají velký moment setrvačnosti J oproti malým vírům. Po rozpadu se menší moment setrvačnosti malých vírů kompenzuje jejich vyšší úhlovou rychlostí, aby energie byla zachována. Menší víry kinetickou energii mění na teplo a přitom zanikají [13][17].

Okamžitá rychlost je dána součtem střední a fluktuační složky rychlosti. Např. ve směru x platí

$$u_x = \overline{u_x} + u_x', \quad (3.10)$$

kde $\overline{u_x}$ je střední hodnota rychlosti a u_x' je fluktuační složka.



Obr. 10 - Časový průběh rychlosti při turbulentním proudění [14]

Střední hodnoty rychlosti jsou v technické praxi důležité pro popis rychlostního profilu, ztrát potrubí, nebo určení Reynoldsova čísla [14].

3.3.3 Přechod laminárního proudění v turbulentní

Existence obou druhů proudění lze názorně ukázat pomocí Reynoldsova pokusu. Přechod laminárního proudění v turbulentní provází kvalitativní změny rychlostního profilu. Tento přechod pro určitou tekutinu proudící v určitém průřezu je závislý na kritické rychlosti. Hranice přechodu se určuje Reynoldsovým (kritickým) číslem, které je definováno jako

$$Re = \frac{vd}{\nu}, \quad (3.11)$$

kde ν je kinematická viskozita, v je střední rychlost proudění a d je charakteristický rozměr. Jako příklad může sloužit kruhové potrubí. Zde je charakteristickým rozměrem jeho průměr a kritická hodnota Reynoldsova čísla je zde $Re_{krit} = 2320$ [14].

I při hodnotách vyšších, než je Re_{krit} je možné, že laminární proudění stále existuje, nicméně je nestabilní. Pro přechod do turbulentního pak stačí jen malé poruchy proudění ve vstupním průřezu, neboť dále exponenciálně narůstají. Naopak pro nižší Reynoldsova čísla, než je Re_{krit} jsou tyto poruchy utlumeny. Přechod laminárního proudění v turbulentní zpravidla není skokový – v určité fázi se vyskytují krátké úseky turbulentního proudu zároveň s většími laminárními úseky. Této fázi se říká intermitentní proudění. S rostoucím Re rostou turbulentní úseky na úkor laminárních, až nakonec laminární úseky zcela vymizí [13].

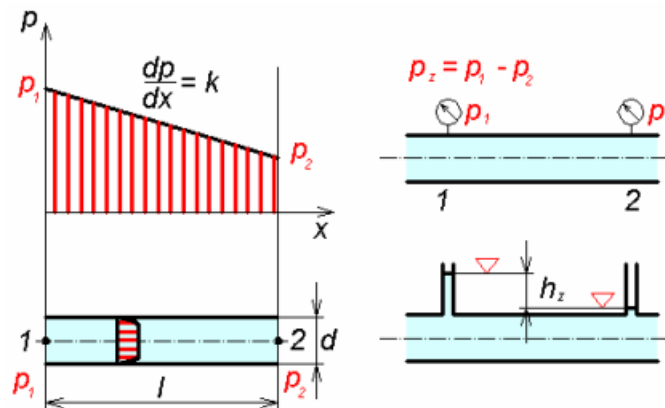
Relativní velikost amplitud fluktuací rychlosti vzhledem ke střední hodnotě rychlosti definuje tzv. intenzita turbulence. V plně vyvinutém turbulentním proudění je intenzita turbulence závislá na směru. To se projevuje tak, že její podélné fluktuace jsou větší než příčné. Její maximum je v těsné blízkosti u stěny, na stěně jsou rovny nule a v ose mají minimum. Pro směr x je dána vztahem

$$I_x = \frac{\sqrt{\overline{u_x'^2}}}{\overline{u_x}}, \quad (3.12)$$

$\overline{u_x'}$ je střední hodnota fluktuační složky. Lze ji určit aritmetickým průměrem okamžitých hodnot fluktuačních složek rychlosti [13].

3.3.4 Tlaková ztráta

Vlivem hydraulického odporu dochází k přeměně energie, často na její nežádoucí formy. Tento odpor je závislý hlavně na rychlosti proudění, dále pak na viskozitě a drsnosti obtékaných stěn. V příkladu na Obr. 11 je projevem hydraulického odporu tlaková ztráta $\Delta p = p_z$. Pro laminární proudění je tato závislost lineární, pro turbulentní proudění pak velikost ztrát narůstá s druhou mocninou rychlosti.



Obr. 11 - Tlaková ztráta v potrubí [13]

Z hlediska fyziky lze ztráty rozdělit na dva typy, a to ztráty třecí, které závisí na délce daného kanálu (obecného potrubí), a jsou způsobeny třecími silami, a dále místní ztráty. Místní ztráty vznikají v místech, kde se vlivem geometrie kanálu mění velikost a směr rychlosti a vytváří se víry [13][14].

Třecí ztráty

Třecí ztráty závisí na charakteru proudění určeném Reynoldsovým číslem a délce kanálu, velikosti jeho průřezu či drsnosti kanálu, ve kterém proudí. Při turbulentním proudění jsou třecí ztráty větší než pro laminární. Součinitel λ je závislý na velikosti Reynoldsova čísla, ale také na relativní drsnosti, což je podíl průměru potrubí k jeho absolutní drsnosti. V potrubí se pro výpočet třecích ztrát používá Weisbachův vztah

$$e_z = gh_z = \frac{p_z}{\rho} = \lambda \frac{lv^2}{2d}, \quad (3.13)$$

Kde h_z [m] je ztrátová výška, p_z [Pa] je tlaková ztráta, λ je součinitel třecích ztrát, d [m] je průměr a l [m] je délka potrubí.

Třecí ztráty v nekuhovém průtočném průřezu se opět liší v závislosti na charakteru proudění. U laminárního proudění platí Newtonův zákon pro tečné napětí. Vlivem viskozity se v tomto případě brzdí tekutina v celém průtočném průřezu – mezní vrstva v podstatě vyplňuje celý průřez. Naopak pro turbulentní proudění platí, že vliv tření na obtékaných stěnách se na výsledném rychlostním profilu daného průřezu projeví jen málo. Tloušťka mezní vrstvy je tedy ve srovnání s rozměrem průřezu malá a závisí na Reynoldsově čísle [13].

Pro výpočet ztrát potrubí nekuhového průřezu dosadíme do Weisbachova vzorce tzv. hydraulický průměr d_H nebo jiný rozměr, který charakterizuje geometrii daného nekuhového potrubí. Pro hydraulický průměr pak platí vztah

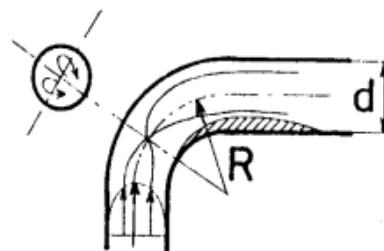
$$d_H = \frac{4A}{o}, \quad (3.14)$$

kde A je průřez proudění v potrubí v počítaném místě a o je smáčený obvod [14].

Místní ztráty

Místní ztráty se projevují jako disipace energie v místech, kde dochází ke změně velikosti a směru vektoru rychlosti proudění. Tyto změny vektoru rychlosti mohou vyvolat nežádoucí jevy – odtržení proudu tekutiny od stěny nebo víření. Popsaná změna vektoru rychlosti je důsledkem změn průřezů či tvarů kanálu, ve kterém tekutina proudí. Tvarové změny v potrubí mohou být např. kolena, odbočky, vyčnívající prvky, nebo také náhlá změna průřezu [13].

V případě proudění v ohybu jako na Obr. 12



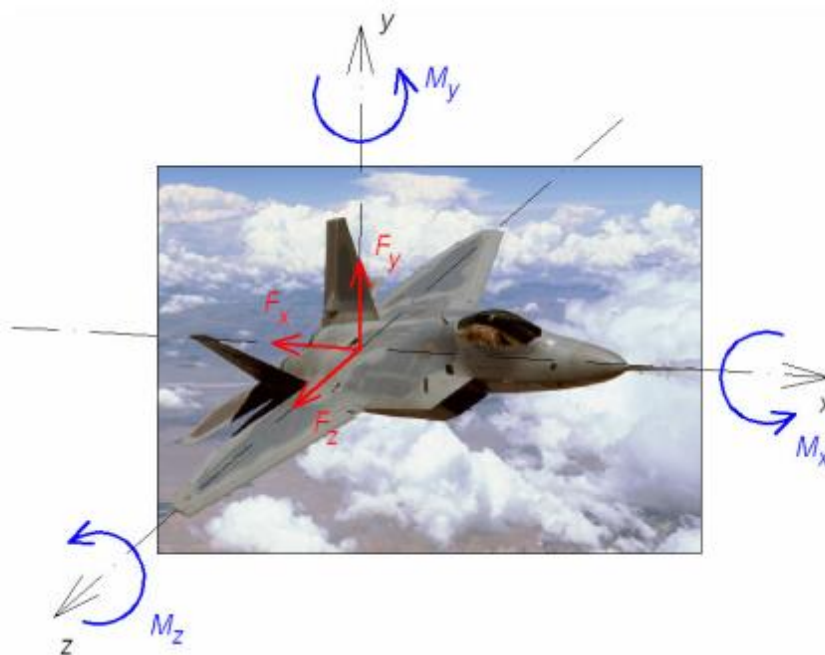
Obr. 12 - Proudění v ohybu (příklad místních ztrát) [14]

se částice proudění v ohybu pohybují po šroubovici, což je důsledek daného rychlostního profilu. Za ohybem pak dochází k odtržení proudu.

Příkladem, u kterého dojde k víření může být náhlé rozšíření průřezu. Po průchodu místem s náhlým rozšířením průřezu totiž proud tekutiny nebude sledovat měnící se geometrii stěny potrubí a dojde k odtržení proudu, které se začne rozšiřovat a vytvoří se víry, které zapříčiní disipaci energie [14].

3.4 Obtékání těles

Při obtékání těles vznikají síly a momenty působící na samotné těleso. Výslednou sílu a výsledný moment pak lze v kartézském souřadnicovém systému rozložit na všechny 3 složky: odpor F_x , vztlak F_y , boční sílu F_z , klopivý moment M_z , klonivý moment M_x a zatáčivý moment M_y . Geometrie tělesa a jeho poloha vůči směru proudění tekutiny jsou pak rozhodujícími faktory pro velikost jednotlivých sil a momentů. Určité složky, jako například boční síla, klouzavý a zatáčivý moment, budou rovny nule při symetrickém obtékání tělesa [14].



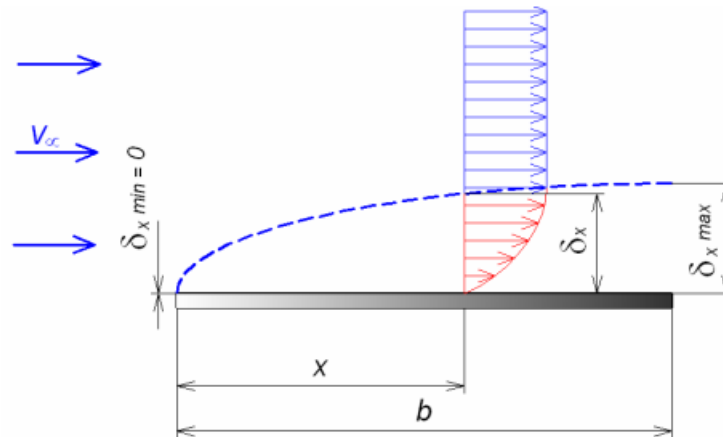
Obr. 13 - Síly a momenty působící na obtékané těleso

3.4.1 Mezní vrstva

Určením Reynoldsova čísla v experimentu bylo zjištěno, že při jeho velkých hodnotách se vliv viskozity projevuje pouze v blízkosti povrchu tělesa. Tato oblast se nazývá mezní vrstva, úplav je pak odplavovaná mezní vrstva [13].

Mezní vrstva je oblast, ve které existuje gradient rychlosti. Vzniká vazkým chováním tekutiny při obtékání stěny těles. Nejjednodušší je mezní vrstvu znázornit na tomto jednoduchém příkladu. Na Obr. 14 je zobrazen případ tenké desky

umístěné paralelně s proudem tekutiny v jejímž celém objemu je konstantní tlak, proudící tekutina na stěně ulpí a její rychlost je zde nulová: $v_0 = 0$. Další vrstvy se vlivem viskozity výrazně brzdí, rychlost však roste s rostoucí vzdáleností od stěny



Obr. 14 - Schéma vizualizace mezní vrstvy laminárního proudění [13]

δx až na hodnotu rychlosti nenarušeného proudu v_∞ . Tato oblast, ve které se rychlost proudění dramaticky mění, je právě zmíněná mezní vrstva (červeně vyznačeno na Obr. 14), která může mít laminární, či turbulentní charakter [13].

V oblasti mezní vrstvy kolem desky proudnice netvoří paralelní přímky, ale mírně se rozevírají. Hranice mezní vrstvy není totožná s proudnicemi. Složka rychlosti kolmá k desce je zanedbatelná ve srovnání s rychlostí volného proudu v okolí desky [13].

Tímto způsobem se zmenšuje mechanická energie proudící kapaliny, jejíž součástí je také energie tlaková. Nežádoucí tlaková ztráta (hydraulický odpor) je tak přeměnou mechanické energie v tepelnou. Tloušťka mezní vrstvy je u náběžné hrany nulová a u odtokové hrany maximální (jak je ostatně vidět z Obr. 14). Ve vzdálenosti x od náběžné hrany se určí vztahem (platí pro laminární mezní vrstvu)

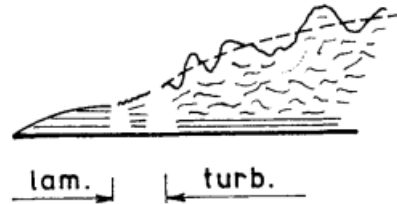
$$\delta_x = \frac{3,46x}{\sqrt{Re_x}}, \quad (3.15)$$

kde Re_x je Reynoldsovo číslo v místě x

$$Re_x = \frac{u_\infty x}{\nu}, \quad (3.16)$$

ν je kinematická viskozita [13].

Mezní vrstvu můžeme také rozdělit na laminární a turbulentní. K určení typu mezní vrstvy se použije opět Reynoldsovo číslo. Pro různá Reynoldsova čísla jsou stanoveny různé stupně turbulence.



Obr. 15 - Smíšená mezní vrstva na desce [14]

Z Obr. 15 je patrná laminární mezní vrstva, pak přechodová a turbulentní. Jak můžeme vidět, hranice turbulentní mezní vrstvy je nepravidelná časově proměnná křivka. Proto se uvažuje její střední hodnota, která je vyznačena přerušovaně. Odpor v turbulentní mezní vrstvě je větší než v laminární.

V Tab. 1 jsou uvedeny vztahy empiricky odvozené pro různé režimy proudění v mezní vrstvě. $Re_L = Re_x$ kde $x = L$ kde L je délka desky.

Tab. 1 - Tabulka vztahů pro různé režimy proudění v mezní vrstvě [13]

druh mezní vrstvy	tloušťka mezní vrstvy	součinitel odporu desky	pozn.
laminární	$\delta_x = \frac{3,46x}{\sqrt{Re_x}}$	$c_x = \frac{1,33}{\sqrt{Re_L}}$	$Re_x \ll Re_k$
turbulentní	$\delta_x = \frac{0,37x}{\sqrt[5]{Re_x}}$ pro $x > x_k$	$c_x = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_L}}$	$Re_x \gg Re_k$
smíšená	$\delta_x = \frac{3,46x}{\sqrt{Re_x}}$ pro $x < x_k$	$c_x = \frac{0,074}{\sqrt[5]{Re_L}} - \frac{1700}{Re_L}$	$Re_x \approx Re_k$

Odpor uvedené desky pak vypočítáme vztahem

$$F_x = c_x S \rho \frac{u_\infty^2}{2}, \quad (3.17)$$

kde c_x je součinitel odporu, S je obtékaná plocha desky, ρ je hustota tekutiny [13].

3.4.2 Odpor při obtékání těles

Odpor těles lze rozdělit na tlakový a třecí. Tělesa pak můžeme rozdělit podle toho, která složka odporu při jejich obtékání převládá. Třecí odpor je při obtékání dominantní v případě těles deskovitého tvaru paralelně umístěných s prouděním. Typickým příkladem mohou být např. ocasní plochy letadel. Tlakový odpor je dominantní také u desek, nicméně umístěným kolmo ke směru proudění. Před deskou vzniká přetlak, za deskou potom podtlak, odtržení proudů na hranách a tvoří se víry. Bod, ve kterém dochází k odtržení nemění svoji polohu. Oblast, ve které dochází k vírům je pak ohraničena obtékaným povrchem a odtrženými proudnicemi. Kombinace třecího a tlakového odporu lze pak pozorovat u spojitě zakřivených těles s relativně velkou tloušťkou, jako je koule, či válec. U těchto těles při určitých hodnotách Reynoldsova čísla dochází vlivem přechodu proudění v mezní vrstvě z laminárního na turbulentní k posunutí bodu odtržení dále za těleso (ve směru proudu). Důsledkem toho se zmenší úplav i odpor, tudíž i součinitel odporu. Tomuto jevu se říká nadkritické obtékání. Při turbulentním proudění v mezní vrstvě se vytvoří plnější rychlostní profil, což znamená, že částice mají u stěny větší kinetickou energii než při laminárním proudění. K odtržení mezní vrstvy dochází, když tekutina proudí do oblasti, kde je vyšší tlak. Částice musí při pohybu podél stěny překonávat tlakové a třecí síly, čímž se zpomaluje až má v určitém místě rychlost nulovou. V tomto místě má rychlostní profil inflexní bod, za tímto místem se rychlost otočí do opačného směru, než je směr hlavního proudění [13].

3.5 Matematické modelování proudění

V praktických úlohách lze často problematiku proudění přesně definovat, ale nelze ji analyticky řešit. V takovém případě nezbyvá než k řešení použít některé z numerických metod. Jedná se o iterační metody a jejich výpočet je nutné provádět na výkonných počítačích [15].

Pro řešení turbulentních proudění zatím neexistuje žádný všeobecně použitelný model. Existuje více způsobů, jejichž volba závisí na řadě parametrů, mimo jiné i na výpočetním výkonu počítače, nebo požadované přesnosti řešení [17].

3.5.1 Přímá diskretizace Navier - Stokesových rovnic

Jedním ze způsobů řešení turbulentního proudění je přímá simulace DNS (Direct Numerical Simulations) tedy přímé řešení Navier - Stokesových rovnic a rovnice kontinuity. Tato metoda má velmi vysoké nároky na výpočetní čas a výkon.

Tento přístup se uplatní zejména pro proudění s malými Reynoldsovými čísly, jelikož velikost sítě, kterou je nutno pro použití této metody vytvořit je závislá na velikosti Reynoldsova čísla, a to až do hodnoty $Re^{\frac{9}{4}}$. Metoda DNS je atraktivní hlavně kvůli její přesnosti, jelikož nám poskytuje téměř dokonalý obraz fyzikálního děje.

3.5.2 Metoda velkých vírů

Metoda LES (Large Eddy Simulation) úlohu rozdělí na 2 části. V jedné části řeší velké víry jejichž velikost je dána určitou hranicí metodou DNS. V druhé části pak řeší malé víry a na jejich řešení používá tzv. „subgrid model“. Výhodou tohoto modelu je, že díky rozdělení úloh na menší a větší víry lze použít hrubší síť, nicméně v místech, kde se jsou měřítka v turbulentním spektru malá je potřeba použít jemnější síť.

3.5.3 Metody časového středování N – S rovnic

Metoda RANS (Reynolds-Avareged Navier-Stokes equations) je nejčastěji využívána v běžných inženýrských úlohách. Je méně náročnou alternativou k předešlým metodám. Umožňuje mnohem méně náročný výpočet proudění i pro složité úlohy.

Principem této statistické metody je středování rovnic a fyzikálních veličin podle času. Středování obecné fyzikální veličiny je provedeno podle rovnice

$$\phi(x, t) = \bar{\phi}(x) + \phi'(x, t), \quad (3.18)$$

kde se okamžitá hodnota obecné fyzikální veličiny ϕ rozděljuje na střední hodnotu veličiny $\bar{\phi}(x)$ a flukтуаční složky $\phi'(x, t)$. Středováním rovnice kontinuity se získá její středovaná forma

$$\nabla \vec{u} = 0. \quad (3.19)$$

Středovaná Navier – Stokesova rovnice pro nestlačitelné proudění, také nazývaná Reynoldsova rovnice je ve tvaru

$$\frac{\partial}{\partial t}(\rho \vec{u}) + \nabla \cdot (\rho \vec{u} \vec{u}) = -\nabla \bar{p} + \mu \nabla^2 \vec{u} - \nabla \cdot (\rho \vec{u}' \vec{u}'), \quad (3.20)$$

kde poslední člen $-\nabla \cdot (\rho \vec{u}' \vec{u}')$ je Reynoldsovo napětí. Tyto rovnice však obsahují více neznámých než kolik z nich lze vypočítat. Způsob, jakým lze docílit řešení nám poskytuje metoda modelování Reynoldsových napětí a metoda založená na Boussinesquově hypotéze. Na druhé zmíněné hypotéze je založeno několik metod matematického modelování turbulentního proudění. Boussinesquova hypotéza je

vlastně analogií Newtonova zákona vazkosti, kde celková viskozita je definována jako součet molekulární a turbulentní viskozity. Reynoldsova napětí jsou úměrná gradientům rychlosti stejně jak říká Newtonův zákon. Molekulová viskozita je v porovnání s turbulentní viskozitou velmi malá a lze ji tedy zanedbat, ale turbulentní viskozita je dále závislá na prostoru a čase. Proto je potřeba zavést další rovnice, abychom mohly vyřešit Reynoldsovy rovnice [17][18][19].

Prvním je zavedení Nularovnicového (Algebraického) modelu. Algebraické modely jsou určeny pro dvourozměrné proudění v mezní vrstvě a úplavu [20].

Jako další způsob řešení existují složitější modely, např. jednorovnicový model. Tento model využívá transportní rovnici pro stanovení turbulentní kinetické energie, která slouží pro výpočet turbulentní viskozity. Jednorovnicový model je výhodný zejména pro výpočet proudění v blízkosti stěn (mezní vrstvy), proto je časté jeho použití kombinovat s jinými, většinou dvourovnicovými modely.

Dvourovnicové modely využívají transportních rovnic, což umožňuje jejich aplikaci v pro 3D úlohy. Existuje několik typů dvourovnicových modelů. Nejčastěji využívaným dvourovnicovým modelem je model $k-\varepsilon$ [18][19].

3.5.4 Modely $k-\varepsilon$

Dvourovnicový model $k-\varepsilon$ definuje výpočet turbulentní viskozity pomocí kinetické turbulentní energie k a disipace kinetické energie malých vírů na teplo, kterou reprezentuje ε . Existují jednotlivé typy modelu $k-\varepsilon$, a to např. Standart, RNG, Realizable. Liší se ve způsobu určení turbulentní viskozity. Často využívaný je model $k-\varepsilon$ Standart, který vychází především z empirie a úvah. Je použitelný především pro vysoká Reynoldsova čísla, jelikož se zakládá na předpokladu, že efekt molekulární viskozity je plně zanedbatelný a proudění je plně turbulentní. Model $k-\varepsilon$ RNG je podobný modelu $k-\varepsilon$ Standart, nicméně obsahuje několik vylepšení, je přesnější a spolehlivější pro větší rozsah typů proudění. Nejnovější z výše zmíněných je model $k-\varepsilon$ Realizable. Tento model odlišně formuluje turbulentní viskozitu a transportní rovnici pro ε . Jedná se o nejvýkonnější ze zde zmíněných modelů turbulence $k-\varepsilon$ [17][18][19].

3.5.5 Modely k- ω

Dvourovnicový model k- ω přidává 2 diferenciální rovnice pro řešení turbulentní viskozity, podobně jako model k- ϵ . Oproti ϵ je zde zavedena rovnice pro specifickou disipaci ω . Ta je výhodná zejména proto, že ji lze integrovat bez aplikace dalších podmínek přes viskózní podvrstvu. Model k- ω Standart je model založený na empirii. Jeho přesnost je nejvyšší u obtékané stěny, dále od stěny jeho přesnost klesá. Tento nedostatek řeší model k- ω SST, který používá modely k- ω a k- ϵ zároveň. Kombinuje přesnost a obecně dobrou aplikaci modelu k- ω v blízkosti stěny a lepší vlastnosti modelu k- ϵ ve volném proudění. Tímto je model k- ω SST lepší a spolehlivější oproti modelu k- ω Standart [22].

4 Obecný princip CFD výpočtu

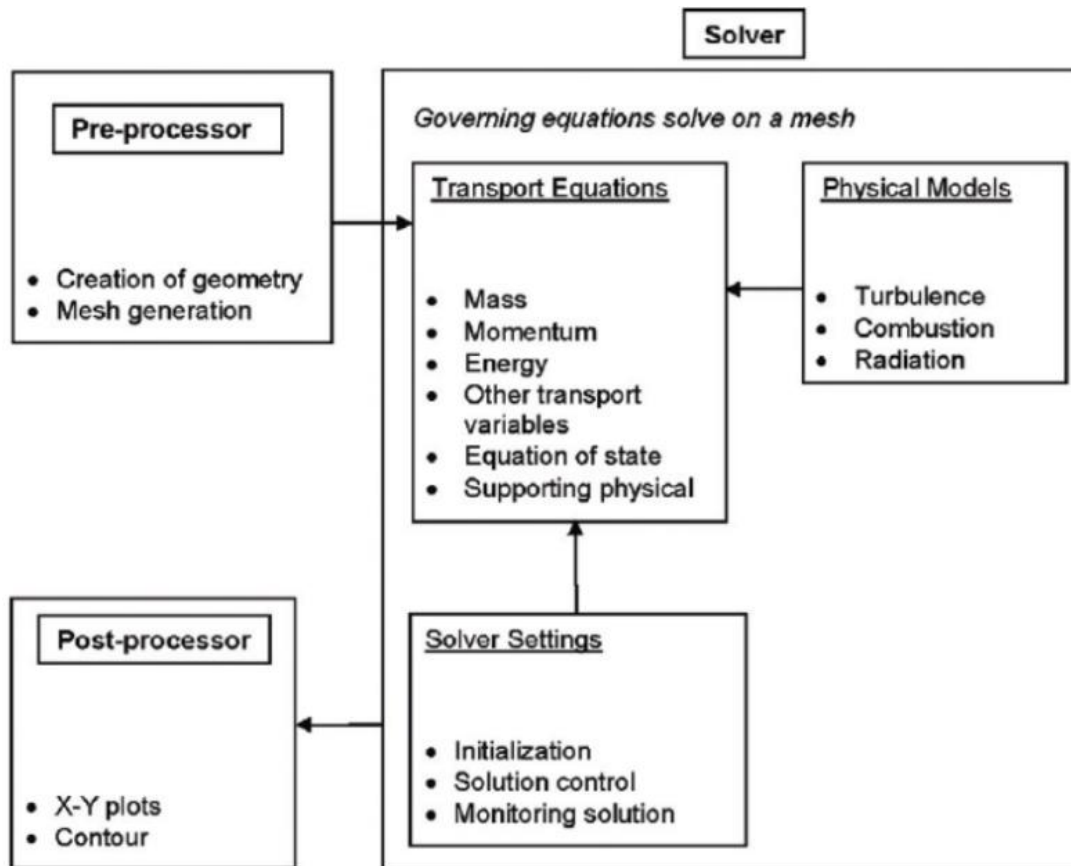
CFD (Computational Fluid Dynamics), do českého jazyka přeloženo jako výpočetní dynamika tekutin, je vědní disciplína zabývající se predikováním proudění tekutin a jeho analýzou. Tento obor je syntézou mechaniky tekutin, matematiky a informatiky. Nejvíce se na CFD (jak lze vyrozumět z názvu – Fluid Dynamics) podílí dynamika tekutin, která řeší fyzikální charakteristiky pohybu tekutin, jako je např. přenos tepla nebo chemické reakce při tocích spalování. Tyto základní charakteristiky lze popsat pomocí matematických rovnic, obvykle v parciálním diferenciálním tvaru, často nazývané řídicími rovnicemi.

Ty popisují zákony zachování energie, hmotnosti a hybnosti. Těmito rovnicemi pak mohou být Navier-Stokesovy rovnice, rovnice kontinuity a energetická rovnice.

K jejich řešení se používá příslušný software. Termín „výpočetní“ pak odkazuje na to, že k analýze dynamiky tekutin se využívají numerické simulace, které zahrnují použití počítačových programů na vysoce výkonných výpočetních strojích. Dříve byla CFD záležitostí hlavně letectví a kosmonautiky. V poslední době je však přizpůsobena rozsáhlým problémům celého spektra průmyslu a stala se silným nástrojem pro optimalizaci konstrukcí. Příkladem může být automobilový průmysl, kde se pomocí CFD stanovuje např. aerodynamický odpor. Dále v biomedicínském inženýrství (proudění krve), chemické inženýrství, stavební inženýrství, inženýrství životního prostředí či energetiky [21].

4.1 Postup řešení CFD úloh

Současné CFD programy jsou vzhledem ke složitosti kódu uživatelsky přívětivé. Komerční CFD programy nabízí většinou balíčky aplikací, které jsou potřebné pro provedení kompletního výpočtu, tedy zadávání parametrů problému a analýze výsledku. Na Obr. 16 je schematicky znázorněn příklad těchto jednotlivých aplikací s jejich účelem.



Obr. 16 - Vzájemné propojení 3 hlavních prvků programů pro CFD a jejich funkce

Postup lze rozdělit do 3 částí analogicky ke schématickému rozdělení na Obr. 16:

1. Tzv. pre-procesing = vytvoření geometrie a výpočetní sítě, definování problému
2. Vlastní výpočet řešení
3. Tzv. post-procesing = vyhodnocení výsledků (grafy, barevné mapy, vektory) [21]

4.1.1 Preprocessing – tvorba geometrie

Prvním krokem je vytvoření požadované geometrie výpočetní oblasti (domény – anglicky „computational domain“ která tvoří objem zabraný tekutinou). Tuto oblast můžeme definovat pro tzv. vnitřní proudění (tím může být např. proudění uvnitř trubek) a vnější proudění (jako je obtékání křídel letadla). Pro tyto 2 typy proudění existují odlišné přístupy řešení. V prvním případě je oblast ohraničená pevnými stěnami a předpokládáme, že proudění je plně vyvinuté při opuštění počítané oblasti, což neplatí pro 2. případ. Zde musí být oblast předepsané velikosti, aby okrajové podmínky, které nesouvisí s realitou příliš neovlivňovaly výpočet [21].

4.1.2 Preprocessing – tvorba výpočetní sítě

Velmi důležitým krokem je vytvoření sítě. Aby mohla být fyzika toku vyřešena, je potřeba výpočetní oblast rozdělit na diskrétní buňky. Síť může být strukturovaná nebo nestrukturovaná sestávající z kombinace šestistěnných, pyramidových, čtyřstěnných, prizmatických, nebo dalších mnohostěnných prvků. V každém takovém prvku jsou pak numericky vypočítány diskrétní hodnoty pomocí řídicích rovnic, které popisují vlastnosti proudění. Takovými hodnotami je např. rychlost, či teplota, tlak atd. Přesnost celého řešení závisí na mnoha faktorech. Mezi hlavní faktory se však řadí počet prvků sítě a typ sítě. Typem sítě se rozumí kupříkladu strukturovaná a nestrukturovaná síť. Jedná se o jeden z nejnáročnějších úkolů CFD úlohy [21].

4.1.3 Definice vlastností tekutiny

Proudění tekutin může být v některých aplikacích velmi komplikovaný fyzikální děj. Pečlivá identifikace základních fyzikálních vlastností daného proudění a formulace problému je proto dalším nezbytným krokem. Definuje se, jestli má být vytvořena simulace pro stabilní/nestabilní řešení, dále se definuje proudění tekutiny jako viskózní nebo neviskózní. Neviskózní proudění bývá bráno jako zároveň stlačitelné. Viskózní proudění pak může být laminární a turbulentní. Dále se definuje přenos tepla, který významně ovlivňuje řešenou úlohu. Lze stanovit dominantní přenos tepla (kondukcce, konvekce, radiace), či bez přenosu tepla. Dále je potřeba stanovit tekutinu a s ní spojené fluidní vlastnosti. Ty lze obvykle vybrat v obsahu komerčně dostupných CFD programů, kde jsou již definované vlastnosti pro jednotlivé látky, jako je voda či vzduch [21].

4.1.4 Definice okrajových podmínek

Pro napodobení reálné fyzikální reprezentace je nutné stanovit správně okrajové podmínky pro proudění tekutiny. Těmi základními jsou podmínky hranice na vstupu a výstupu domény, kde se v reálné úloze nachází přítok a odtok. Doména může mít i otevřené hranice. Pro vstupní a výstupní okrajové podmínky univerzální CFD kódy umožňují mimo jiné definici vstupního a výstupního tlaku jako okrajovou podmínku, či hmotnostní tok. Dále je potřeba okrajové podmínky stanovit i pro obtékané stěny, jako je vnější pevná hranice celé geometrie a vnitřní plochy překážek, vhodnými parametry (jako je např. nulová rychlost) tak, aby jimi tekutina neprotékala. Na stěnách je pak nutné definovat teplotu nebo tepelný tok [21].

4.1.5 Numerické řešení – solver

Procedura řešení sestává z několika úkonů. Jsou jimi inicializace, řízení průběhu řešení, monitorování průběhu řešení, CFD výpočet a kontrola konvergence.

Následuje tedy inicializace a řízení průběhu řešení. Jelikož výpočet je realizován pomocí iteračních metod, bývá pro průběh výpočtu a rychlost jeho konvergence výhodné definovat na základě odhadu počáteční podmínky. Mohou být dokonce rozhodující pro iterační postup. Nevhodné počáteční podmínky mohou vést k dlouhému trvání dosažení požadované konvergence, nebo dokonce divergování [21].

Monitorování průběhu řešení, výpočet CFD a sledování konvergence jsou propojené úkony. Abychom mohli kompletní CFD výpočet považovat za úspěšný, je třeba dosáhnout 2 aspektů. A to konvergence iteračního výpočtu a nezávislost na mřížce sítě. Konvergence se běžně vyhodnocuje pomocí sledování nerovnováh v postupu numerických výpočtů iterací. Tyto nerovnováhy neboli rezidua poskytují informaci o zachování charakteristik proudění. V průběhu iteračního výpočtu mohou mít různou monotonii. Konvergované řešení je pak takové řešení, pro které tyto rezidua klesnou pod konvergenční kritéria nebo tolerance. Dosažení určité nezávislosti na síti vyžaduje dobrý počáteční návrh sítě. Správná hrubost sítě se může stanovit postupným zjemňováním a počítáním celé úlohy až do míry, kdy je dosaženo minimálních odlišností jednotlivých výsledků důležitých veličin [21].

4.1.6 Vyhodnocení výsledků – postprocesor

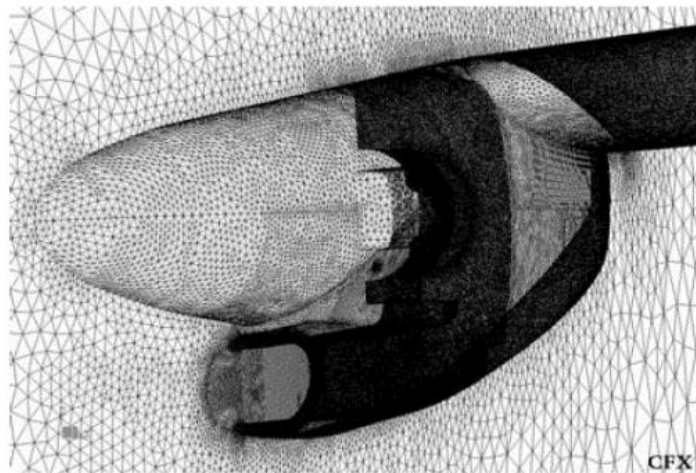
Komerčně dostupné CFD programy, jako je ANSYS CFX obsahují vizualizační nástroje, pomocí kterých lze vytvářet tolik známé a zároveň cenné barevné vizualizace. Tyto nástroje lze rozdělit do různých kategorií. Některými jsou

- Grafy x-y – obecně známé grafy závislostí
- Vektorové grafy – zobrazuje vektorové veličiny formou např. šipek s daným směrem a velikostí, typicky rychlost
- Vykreslování kontur – globálně popisují chování tekutiny pomocí vrstevnic
- Animace atd... [21]

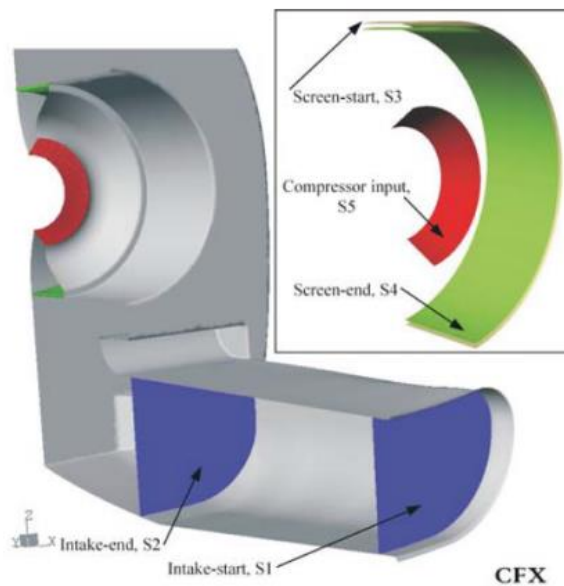
5 Předěšlé práce

O problematice tlakové ztráty vstupního ústrojí turbovrtulového motoru M-601E již pojednává např. článek z časopisu Acta Polytechnica. Cílem této práce bylo primárně poskytnout data o aerodynamice vstupní soustavy pro různé geometrické konfigurace [2].

Zde autoři taktěž prováděli výpočet tlakové ztráty ve vstupním ústrojí motoru M-601E pomocí metody CFD. Do analýzy byla zahrnuta i ztráta vlivem odporu celé motorové gondoly, jak napovídá vytvořená síť na Obr. 17. Počet prvků této sítě dosahuje hodnoty 1,3 milionu. Postup zde uvedený je v zásadě analogický postupu,



Obr. 17 - vytvoření sítě pro výpočet odporu motorové gondoly [2]



Obr. 18 - Řez vstupním ústrojím a tzv. uklidňovací komorou [2]

kteřý je uveden v této práci, jelikož se jedná o podobný typ výpočetní úlohy.

Na Obr. 18 je v řezu vstupního ústrojí ukázáno, v jakém místě byla počítána již tlaková ztráta a jak je vymezená oblast vstupního ústrojí, zvláště je zde vyznačen vstup do kompresoru, což je oblast, kterou se zabývá i tato práce. Celá vstupní soustava je pak zde rozdělena na dvě části, a to na tzv vstupní kanál (podlouhlá oblast dole uložena pod motorem) a uklidňovací komoru – část kolem motoru, která zároveň slouží jako jeho kryt – kapota. Této terminologie je využito i v této práci [2].

5.1 Výsledky

Výsledky jejich práce jsou součástí optimalizace procesu, který se zaměřuje na zvyšování výkonu motoru. Výsledky byly vypočítány pro několik variant. Použit byl výpočetní turbulentní model k- ω pro originální vstupní soustavu a k- ϵ pro všechny ostatní varianty. V jedné variantě byla měněna geometrie průřezu (velikost) +- 10%, v jiné byla přidána prizmatická vložka. Pro jednu variantu byla geometrie vstupního kanálu optimalizována. Uklidňovací komora byla ve všech případech zachována beze změny [2].

Tab. 2 - Souhrn výsledků analýzy [2]

Air intake case	Pressure loss channel	Pressure loss stilling chamber	Total pressure loss	Ratio chamber/channel
-	[Pa]	[Pa]	[Pa]	[1]
Original k- ϵ	158.13	278.02	436.15	1.758
Original k- ω SST	53.77	255.79	309.56	4.757
Insert	63.13	240.23	303.36	3.805
-10 %	49.97	237.02	286.99	4.743
+10 %	45.40	231.08	276.48	5.090
Optimized	127.30	223.53	350.83	1.756

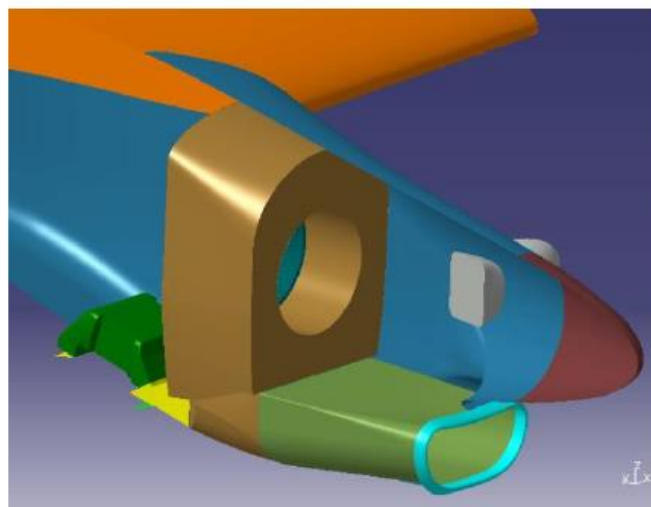
Po výpočtu byl proveden experiment. Cílem experimentu bylo potvrdit výskyt separační vrstvy při proudění vzduchu do originální vstupní soustavy motoru, což se vydařilo. Ve výsledcích je vidět největší rozdíl tlakových ztrát mezi modelem k- ϵ a k- ω [2].

ANALÝZA PROUDĚNÍ VSTUPNÍ SOUSTAVY TURBOVRTULOVÉHO MOTORU M-601E

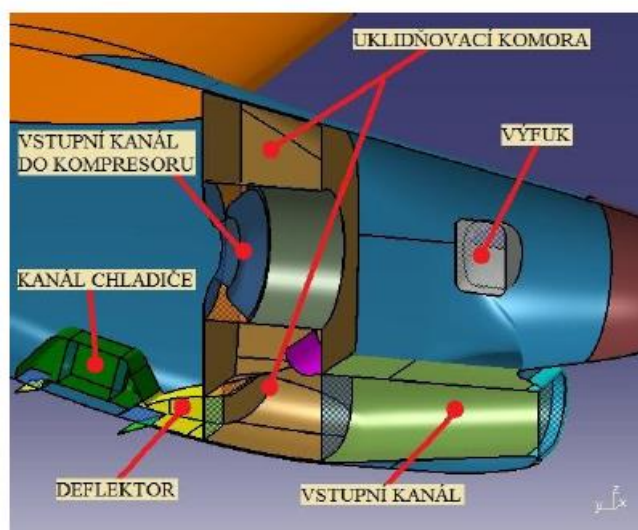
Úvod

Provedení CFD analýzy proudění ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru je analogické k dříve popsanému obecnému postupu. 3D model - geometrie vstupní soustavy turbovrtulového motoru M-601E, byl poskytnut společností GEAC. Tento model se skládá ze dvou částí.

- Vstupního kanálu (duct)
- Uklidňovací komory (plenum)



Obr. 19 - Zobrazení počítaného modelu v gondole motoru Walter M-601E [25]



Obr. 20 - Řez gondoly motoru Walter M-601E a detail počítaného modelu vstupní soustavy [25]

Cílem práce je výpočet tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru. První část práce se zabývá určením velikosti ztráty celkového tlaku v závislosti na změně směru proudění na vstupu. Druhá část zkoumá citlivost tlakové ztráty na změnu geometrie konstrukčních prvků, především „plechu odledňovací klapky“.

Každá úloha sestávala z následujícího postupu. V počátku byl pro obě části vytvořen projekt v programu ANSYS_Workbench z důvodu přehlednosti a automatizace řešení většího množství úloh. Preprocessing úlohy (příprava a úprava geometrie, síťování a zadávání vstupních parametrů pro CFD) byl proveden na osobním notebooku. Vlastní výpočet byl proveden na výpočetním serveru CLKV a postprocessing (zpracování výsledků) opět na osobním notebooku.

6 Vstupní data a parametry

6.1 Spolupráce

General Electric Aerospace Czech s.r.o.

Tato Bakalářská práce „Vliv konstrukčních parametrů na hodnoty tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru“ byla zpracována s použitím důvěrných informací a se souhlasem společnosti General Electric Aerospace Czech s.r.o.

6.2 Vstupní data

- Zjednodušený 3D model geometrie vstupní soustavy turbovrtulového motoru M-601E složený ze dvou částí
 - Kanál (duct)
 - Uklidňovací komora (plenum)

6.2.1 Okrajové podmínky pro specifický režim letu

- Hmotnostní tok
- Hodnota absolutního tlaku
- Vliv vrtule na vstupní parametry proudění byl zanedbán

6.3 Výpočetní technika

6.3.1 Osobní notebook

- Typ: ASUS
- Procesor: Intel core i5 8300 H, 4 fyzická jádra (8 virtuálních) 4 GHz
- RAM: 8 GB DDR4
- OS: Windows 10

6.3.2 Výpočetní cluster

Informace o využitém výpočetním výkonu na 1 úlohu

- Počet výpočetních uzlů: 5
- Počet jader jednoho uzlu 40
- OS: Linux

6.4 Výpočetní software

6.4.1 CAD pro 3D modelování

- Autodesk Inventor 2021

6.4.2 Software pro CFD

- ANSYS 2021 R1

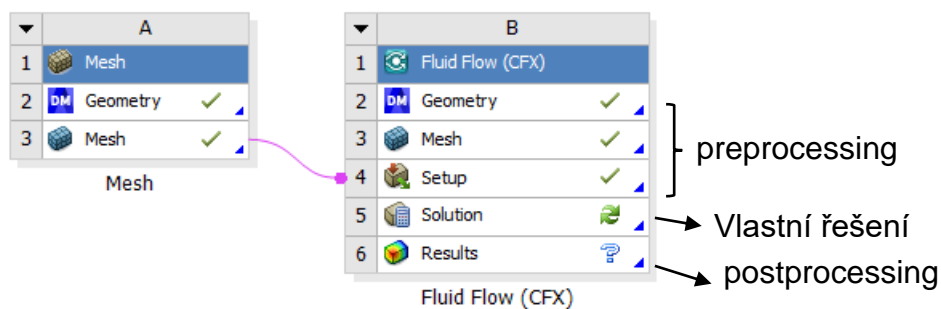
6.5 Řešení úlohy a požadované výsledky

Informace týkající se volby parametrů a nastavení v postupu byly v případě potřeby brány z manuálu ANSYS CFX [23].

7 Výpočet citlivosti tlakové ztráty na okrajové podmínky

Tato citlivostní analýza má za cíl zjistit, jakým způsobem se změní tlaková ztráta ve vstupní soustavě motoru, když se v určité rovině změní směr proudění vzduchu na vstupu. Tento směr je určen úhlem směru proudění k normále vstupního průřezu ve vodorovné rovině procházející osou kanálu (úhlem náběhu). Tyto změny směru proudění mohou ovlivňovat tlakovou ztrátu vstupní soustavy a mohou též ovlivnit celkový výkon motoru. K těmto změnám směru proudění do vstupní soustavy turbovrtulového motoru může docházet např. vlivem činnosti vrtule.

Pro přehlednost a maximální automatizaci řešení byl pro tuto úlohu vytvořen projekt v programu ANSYS_Workbench viz Obr. 21. Každá položka vyžaduje použití jiného software z portfolia systému ANSYS.

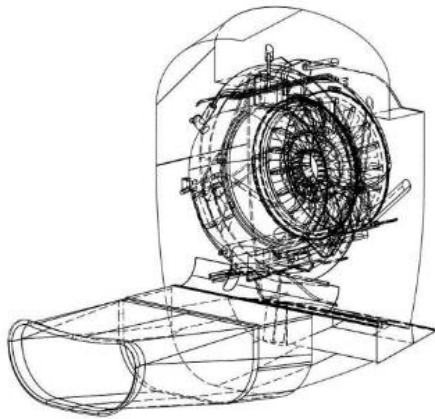


Obr. 21 - Schéma projektu ANSYS_Workbench

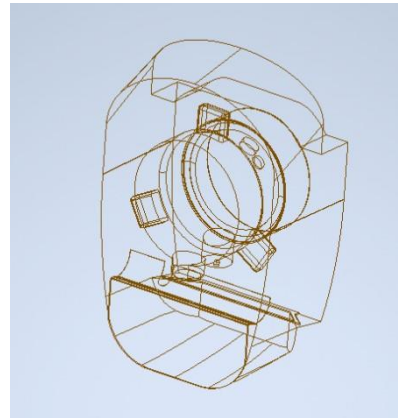
Vlastní výpočet byl nejprve proveden pro nulový úhel proudění (neboli normálový směr proudění ke vstupu). V rámci kalibrační úlohy byla tato varianta následně přepočítána pro hrubší síť a porovnána s variantou nulového úhlu náběhu, aby byla ověřena kvalita použité sítě. Následně byly spočítány úlohy pro různé úhly směru proudění.

7.1 Příprava geometrie

Pro analýzu citlivosti tlakové ztráty na úhel vektoru rychlosti byly zvoleny stávající modely geometrie vstupní soustavy poskytnuté společností GEAC. Model uklidňovací komory motoru Walter M601-E, obsahuje mnoho dalších prvků (trubek, hadic), které značně komplikují tvorbu výpočetní sítě. Z tohoto důvodu byla pro potřeby této práce část těchto prvků zanedbána a geometrie zjednodušena, viz Obr. 22, Obr. 23.



Obr. 22 - Geometrie vstupní soustavy [24]



Obr. 23 - Zjednodušená geometrie uklidňovací komory

Oba modely byly zvlášť importovány do programu ANSYS Design Modeler. Zde byly plochy obou modelu rozděleny do sekcí – „named selections“ z důvodu zjednodušení následného síťování a definice okrajových podmínek v CFX_pre.

Nejprve byl importován model kanálu. Jedná se o jednodušší z modelů. Seznam sekcí, na které byly rozděleny plochy modelu ukazuje Tab. 3.

Tab. 3 – Rozdělení ploch kanálu na jmenovité oblasti

Named selection - duct	Typ
inlet	PRESSURE INLET
interface	OUTLET
wall	WALL

Plocha vstupu soustavy byla na modelu kanálu určena jako oblast inlet. Plocha, která tvoří výstup kanálu, zároveň pak vstup uklidňovací komory byla definována na obou modelech jako přechod – interface. Stěny neprostupné pro proudění pak zahrnuje oblast wall.

Dále byl zvlášť importován model uklidňovací komory. Seznam sekcí, na které byly rozděleny plochy tohoto modelu ukazuje Tab. 4.

Tab. 4 – Rozdělení ploch kanálu na jmenovité oblasti

Named selection – plenum	Typ
interface	INTERFACE
outlet	OUTLET
smallareas	WALL
largeareas	WALL
sheet	WALL

Výstupem celého modelu je oblast outlet. Neprostupné stěny jsou pak rozděleny na oblast smallareas, largeareas a sheet. Toto dělení proběhlo především z důvodu následného síťování.

7.2 Tvorba sítě

7.2.1 Obecné nastavení

Síť byla tvořena v programu ANSYS Meshing. Síťovány byly opět oba modely zvlášť, nicméně obě sítě byly definovány obdobnými parametry. Síť byla zvolena nestrukturovaná (kvůli tvarové složitosti modelu) složená z prvků typu čtyřstěn (tetrahedron).

V obecném nastavení sítě byla zvolena fyzikální preference pro CFD a preference solveru pro CFX. Dále zde byl definován obecný rozměr prvku na $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$ a nastaven maximální rozměr prvku také na $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Dále bylo na všech plochách typu WALL zvoleno vymodelování mezní vrstvy, pro jejíž vytvoření byl použit model „first layer thickness“, který odvozuje tloušťku jednotlivých vrstev hodnotou tloušťky první vrstvy, tzv. růstovým faktorem („growth“) a celkovým počtem vrstev. Parametry mezní vrstvy jsou uvedeny v Tab. 5.

Tab. 5 - Parametry mezní vrstvy

Tloušťka první vrstvy [mm]	Počet vrstev	Růstový faktor	
		typ	velikost
0,1	15	exponenciální	1,2

7.2.2 Nastavení povrchových prvků

Pro všechny plochy typu WALL byly definovány velikosti prvků každé jmenovité oblasti vytvořené v design modeleru. Velikosti prvků jednotlivých oblastí modelu uklidňovací komory jsou zobrazeny v Tab. 6.

Oblast	Rozměr prvků [mm]	Účast v mezní vrstvě
interface	5	Ne
smallareas	1	Ano
largeareas	5	Ano
sheet	0,5	Ano
outlet	5	Ne

. Oblasti „smallareas“ a „sheet“ obsahuje plochy, které tvoří přechody a jsou tvarově složitější. Z tohoto důvodu zde byl zvolen menší rozměr prvků. Velikost prvků jednotlivých oblastí v doméně kanálu byla zvolena všude $5 \cdot 10^{-3} \text{ m}$.

Tab. 6 - Rozměry prvků jednotlivých oblastí ve výpočetní síti modelu uklidňovací komory

Oblast	Rozměr prvků [mm]	Účast v mezní vrstvě
interface	5	Ne
smallareas	1	Ano
largeareas	5	Ano
sheet	0,5	Ano
outlet	5	Ne

Tab. 7 uvádí počet prvků kanálu, uklidňovací komory a celkový počet prvků pro obě domény po vygenerování jednotlivých sítí.

Tab. 7 - Počty prvků sítě jednotlivých částí modelu a jejich součet

Doména	Počet prvků
Kanál	5047563
Uklidňovací komora	45493345
Kanál + Uklidňovací komora	50541808

7.3 Definice okrajových podmínek a fyziky proudění

Vytvořené síť kanálu a uklidňovací komory byly importovány do CFX-Pre a zde byly spojeny pomocí funkce interface. Tím byly vytvořeny 2 výpočetní oblasti – domény jednotlivých importovaných sítí stejnojmenné jako modely – duct a plenum.

7.3.1 Nastavení jednotlivých domén

Nastavení obou domén bylo totožné. V nastavení domén byl zvolen typ „FLUID“. Jako proudící médium byl zvolen ideální plyn s následujícími fyzikálními vlastnostmi:

- Molární hmotnost $28,96 \text{ kgkmol}^{-1}$
- Měrná tepelná kapacita za konst. tlaku $1,044 \cdot 10^3 \text{ Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}$
- Referenční hodnoty
 - Ref. teplota $25 \text{ [}^\circ\text{C]}$
 - Ref. tlak 1 [atm]
 - Ref. Měrná entalpie $0 \text{ [Jkg}^{-1}\text{]}$
 - Ref. Měrná entropie $0 \text{ [Jkg}^{-1}\text{K}^{-1}\text{]}$

Referenční tlak byl zvolen 0 [atm] . Dále zde byl definován model tekutiny. Přenos tepla byl zvolen jako „total energy“ a byla zde zahrnuta práce od viskozity.

V sekci turbulence byl z nabídky zvolen model $k - \omega$, další možnosti zůstaly beze změny.

V obou doménách byly definovány okrajové podmínky. Pro oblasti, které tvoří pro hmotu neprostupnou stěnu (largeareas, smallareas, sheet, wall duct) a tekutina ji obtéká, byl zvolen typ hranic „wall“. Tyto obtékané stěny typu byly definovány jako „no-slip wall“ a „smooth wall“. V pořadí první z těchto funkcí zajišťuje, aby tekutina ulpívala na stěně a tvořila mezní vrstvu. Přenos tepla zde byl určen funkcí „adiabatic“. Detail nastavení vstupu, a výstupu soustavy viz. Tab. 8.

Tab. 8 - Detail nastavení okrajových podmínek v CFX-Pre

inlet	outlet	parametry
inlet	opening	Boundary type
Subsonic	subsonic	Flow regime
Mass flow rate	Opening pres. and dirn	Mass and momentum
Normal to boundary condition		Flow direction
Medium (intensity = 5 %)		turbulence
Total temperature	Opening temperature	Heat transfer

Hodnoty zadané do okrajových podmínek byly určeny zadavatelem:

- Hmotnostní tok pro „mass flow rate“ $3,637 [kg \cdot s^{-1}]$
- Tlak pro „total temperature“ a Opening pres. and dirn $101325 [Pa]$
- Total/opening temperature $288,15 [K]$

Spojení pomocí funkce přechodu „interafce“ bylo obecně nastaveno na proudění tekutiny a model byl nastaven na obecné spojení bez bližší specifikace.

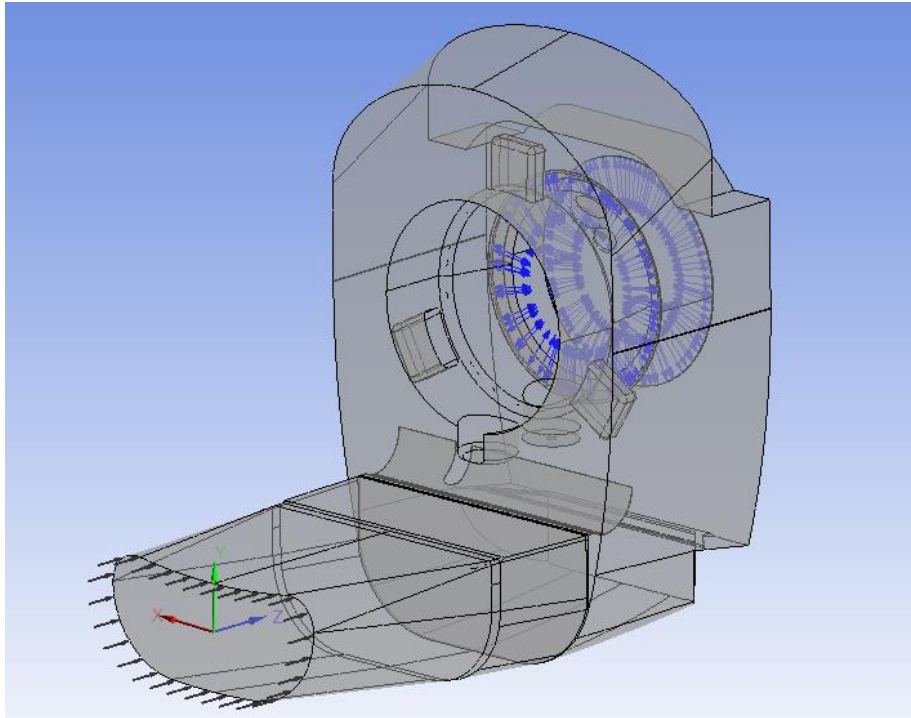
7.3.2 Změna úhlu proudění

Výše uvedené nastavení okrajových podmínek, jak vyplývá z Tab. 8, bylo použito pro případ kolmého směru proudění ke vstupnímu průřezu.

Okrajové podmínky pro úlohy se změnou úhlu směru proudění byly zadány totožně, až na parametr „Flow direction“, který byl upravován podle potřeby tak, aby odpovídal daným úhlům. Pro změnu úhlu byla zvolena vodorovná rovina, podle souřadnic v Obr. 24 rovina os xz. Tzv. úhel proudění pak byl určen jako úhel, který svírá osa z s vektorem rychlosti proudění.

Byly zvoleny úhly v rozsahu -15 až $15[^\circ]$ s krokem $3[^\circ]$. V parametru „Flow direction“ byla nastavena možnost „Cartesian components“. Změna úhlu pak proběhla pomocí parametrů souřadnic, které můžeme vidět na Obr. 24 (červeně,

zeleně, modře). Černé šipky pak naznačují obecný směr proudění na vstupu a modré šipky směr proudění na výstupu vstupní soustavy.



Obr. 24 - model vstupní soustavy – spojené modely kanálu a uklidňovací komory

Tab. 9 - Zadané hodnoty souřadnic pro jednotlivé vstupní úhly směru proudění

Úhel [°]		Souřadnice osy x		Souřadnice osy z
0		0		1
3	-3	0,05233	-0,05233	0,99863
6	-6	0,10453	-0,10453	0,99452
9	-9	0,15643	-0,15643	0,98768
12	-12	0,20791	-0,20791	0,97815
15	-15	0,25882	-0,25882	0,96593

7.4 Nastavení numerického řešení

V základním nastavení solveru CFX bylo zvoleno „high resolution“ pro advekci a turbulentní numeriku.

Výpočet byl omezen podmínkou maximálního počtu iterací. Při kalibraci nastavení úlohy byla tato hodnota stanovena odhadem na 5000 iterací. K ustálení hodnot však docházelo při výrazně nižších hodnotách, jak můžeme vidět na Obr. 26, tak byla tato podmínka upravena na 3000 iterací. Další podmínkou bylo dosažení hodnoty reziduí RMS pod hodnotu 10^{-6} . Vzhledem k složitosti úlohy se však prolomení této hranice všemi hodnotami odchylek nepředpokládalo.

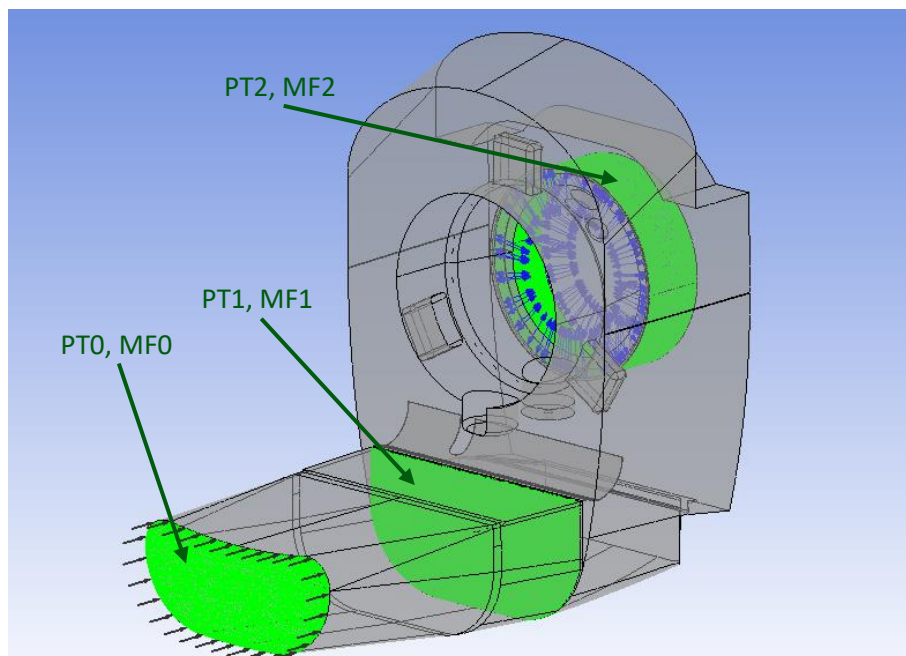
7.5 Nastavení výstupu analýzy

Aby bylo pomocí analýzy dosaženo výpočtu hodnot tlakové ztráty celé soustavy, byly vytvořeny oblasti pro odečítání hmotnostních toků a celkových tlaků pomocí funkce Monitor. Celá soustava byla od počátku vytvořena ze 2 částí, a tak bylo odečítání těchto hodnot nastaveno pro každou z nich, tedy kromě vstupu a výstupu celé soustavy také v průřezu spojení obou domén – duct a plenum.

Zmíněné oblasti odečítání – monitory tedy byly definovány viz. Tab. 10.

Tab. 10 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech

oblast	Značení monitoru tlaku	Značení monitoru hmotnostního toku
inlet	PT0	MF0
interface	PT1	MF1
outlet	PT2	MF2



Obr. 25 - Monitorované oblasti vstupní soustavy motoru

7.6 Spuštění výpočtu a kontrola

7.6.1 Spuštění

Vlastní výpočet jednotlivých úloh proběhl na výpočetním serveru (clusteru) CLKV. Všechny úlohy se počítaly paralelně na 5 uzlech a 40 jádrech na každém uzlu. Pro výpočet jedné úlohy tedy bylo použito 200 jader. Požadované konvergence na hodnotu 10^{-6} se nepodařilo dosáhnout. Výpočet každé úlohy byl ukončen po 3000 iteracích. Úlohy lze považovat za zkonvergované, jelikož hodnoty průtočného množství a celkového tlaku se již neměnily (viz Obr. 27).

7.7 Kontrolní úloha

Pro kontrolu vlivu počtu prvků sítě na hodnotu tlakové ztráty byla vypracována tatáž úloha s okrajovými podmínkami normálového proudění, avšak s hrubší sítí. Globální rozměry prvků byly nastaveny na 10 mm, stejně tak i maximální velikost prvků. Ostatní rozměry jsou udány v Tab. 11.

Tab. 11 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech

Oblasti	Rozměr prvků [mm]
interface	5
smallareas	1
largeareas	5
sheet	1
outlet	5

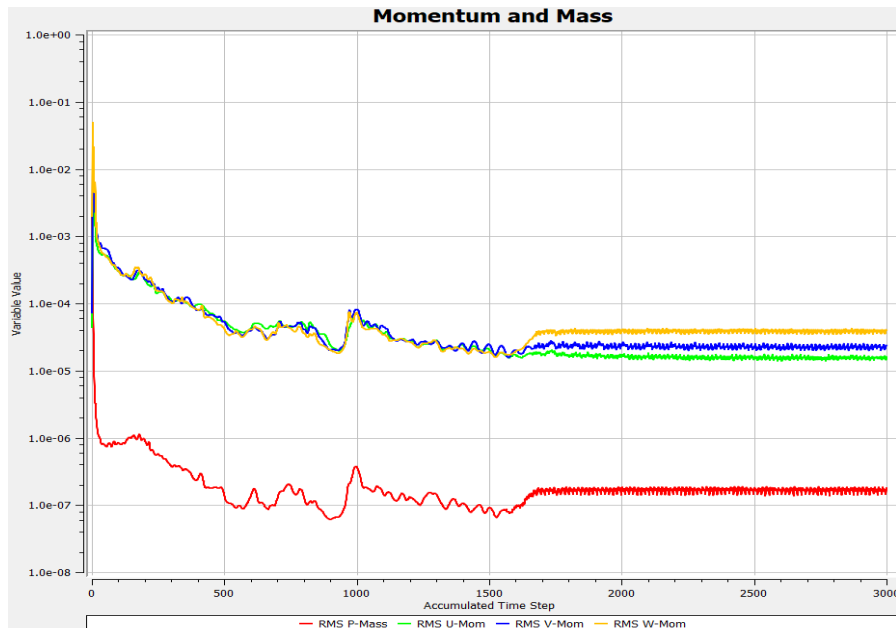
Všechna ostatní nastavení zůstala totožná s předešlým. Počet prvků po vygenerování sítě můžeme vidět v Tab. 12.

Tab. 12 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech

Doména	Počet prvků
Kanál	5047563
Uklidňovací komora	20098305
Kanál + Uklidňovací komora	25145872

7.8 Výsledky

Nejdůležitějším kritériem relevance výsledku je konvergence vlastního výpočtu. Konvergence dosahovala ustálení hodnot residuí mezi řádem 10^{-4} a 10^{-5} .



Obr. 26 - Průběh residuí v závislosti na iteracích pro úhel 0 stupňů

Cílem analýzy bylo získání velikosti tlakové ztráty. Ta byla stanovena jako rozdíl celkových tlaků v jednotlivých místech odečítání. Z každé úlohy tedy byly vyhodnocovány 3 hodnoty celkových tlaků, a to na vstupu soustavy (inlet), na přechodu (interface) a na výstupu (outlet). Jelikož hodnoty tlaků v závislosti na iteračních krocích mírně oscilovaly, byl zvolen postup průměrování celkového tlaku. Celkový tlak v jednotlivých místech odečítání byl získán jako aritmetický průměr z posledních 500 iterací. Tímto byly získány průměrné hodnoty celkových tlaků $\overline{PT0}$, $\overline{PT1}$, $\overline{PT2}$. Hodnoty tlakových ztrát potom byly vypočteny jako rozdíly těchto průměrných (středních) hodnot.

Tlaková ztráta samotného kanálu $\Delta PT_{kanál}$ [Pa] byla určena vztahem

$$\Delta PT_{kanál} = \overline{PT0} - \overline{PT1}, \quad (7.1)$$

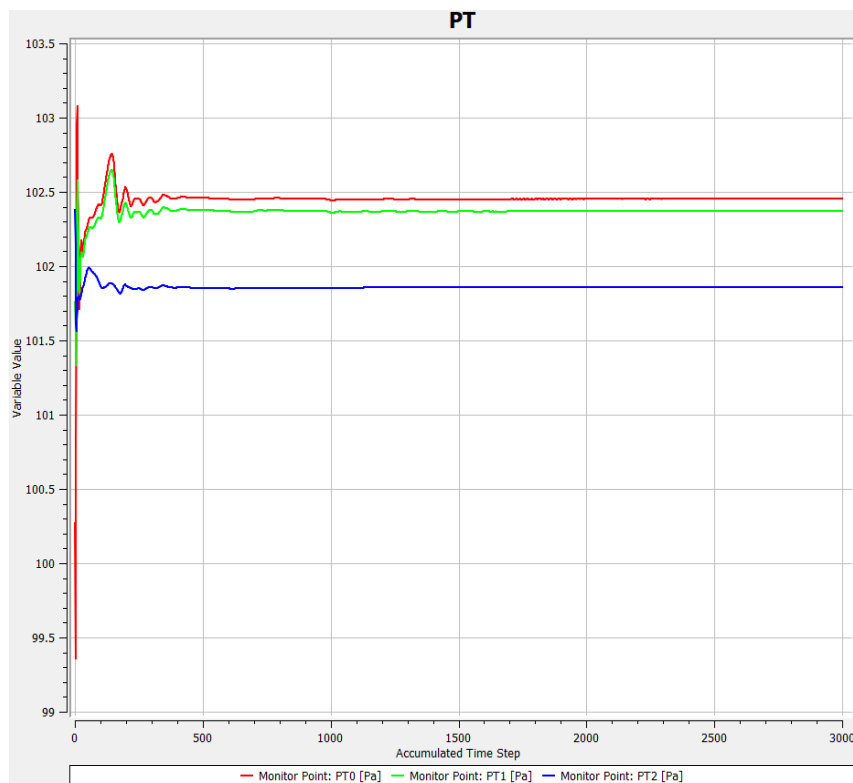
tlaková ztráta uklidňovací komory ΔPT_{komora} [Pa] byla určena vztahem

$$\Delta PT_{komora} = \overline{PT1} - \overline{PT2}. \quad (7.2)$$

Celková tlaková ztráta vstupní soustavy turbovrtulového motoru ΔPT_{celkem} [Pa] byla vyhodnocena součtem tlakové ztráty kanálu a uklidňovací komory

$$\Delta PT_{celkem} = \Delta PT_{kanál} + \Delta PT_{komora}. \quad (7.3)$$

Po výpočtu všech úloh, byly vypočteny procentuální hodnoty tlakových ztrát vzhledem k počáteční úloze s kolmým směrem proudění.



Obr. 27 - Průběh hodnot celkových tlaků v závislosti na iteracích pro úhel 0 stupňů

7.8.1 Výsledek úlohy s kolmým prouděním v porovnání s kontrolní úlohou

Výsledná tlaková ztráta úlohy s okrajovou podmínkou směru proudění „normal to boundary“ je vidět v Tab. 13.

Tab. 13 - Absolutní hodnoty tlakových ztrát v původní úloze s kolmým prouděním

Úhel proudění [°]	Vstupní kanál [Pa]	Uklidňovací komora [Pa]	Celkem (kanál + komora) [Pa]
0	82,13	511,40	593,52

Výsledná tlaková ztráta vypočítaná v rámci kontrolní úlohy pro hrubší síť je uvedena v Tab. 14. Zde je také uveden procentuální rozdíl oproti původní úloze.

Tab. 14 - Procentuální hodnoty rozdílů tlakových ztrát kontrolní úlohy s původní úlohou

Úhel proudění [°]	Vstupní kanál		Uklidňovací komora		Celkem (kanál + komora)	
	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
0	79,96	-2,64	508,9	-0,49	588,9	-0,78

Znaménko " – " v tomto případě znamená menší tlakovou ztrátu vzhledem k původní úloze.

7.8.2 Výsledky citlivosti tlakové ztráty na změnu úhlu proudění

Analogickým postupem jako v případě kontrolní úlohy byly pro každou další úlohu s určitým úhlem proudění vzduchu na vstupu vypočteny hodnoty jednotlivých tlakových ztrát obou domén a celkové tlakové ztráty. Následně byly porovnány tlakové ztráty s tlakovou ztrátou úlohy s kolmým prouděním a vypočteny jejich procentuální odchylky od této úlohy. Výsledky lze vidět v Tab. 15.

Tab. 15 - Procentuální hodnoty tlakových ztrát vzhledem k úloze s úhlem 0

Úhel [°]	Vstupní kanál		Uklidňovací komora		Celkem (kanál + komora)	
	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
15	265,1	222,80	474,6	-7,20	739,7	24,62
12	225,4	174,47	494,8	-3,25	720,2	21,34
9	196,0	138,61	519,2	1,53	715,2	20,50
6	162,9	98,31	502,7	-1,70	665,6	12,14
3	112,8	37,37	542,1	6,01	655,0	10,35
0	82,1	0,00	511,4	0,00	593,5	0,00
-3	109,1	32,88	527,2	3,08	636,3	7,21
-6	141,0	71,67	444,8	-13,03	585,8	-1,31
-9	220,1	167,96	508,8	-0,50	728,9	22,81
-12	225,3	174,34	463,9	-9,29	689,2	16,12
-15	269,1	227,67	467,4	-8,61	736,5	24,08

Záporná znaménka spolu se zeleným zbarvením znamenají pokles tlakové ztráty, naopak kladná znaménka spolu s červeným zbarvením znamenají procentuální růst tlakové ztráty vzhledem k úhlu 0.

7.9 Diskuze výsledků

Z absolutních hodnot celkové tlakové ztráty zobrazené v Tab. 13 bylo zjištěno, že tlaková ztráta vstupní soustavy turbovrtulového motoru se pohybuje v řádu stovek pascalů a je relativně malá (ve srovnání např. s atmosférickým tlakem).

7.9.1 Diskuze výsledků kontrolní úlohy a porovnání s danou sítí

Z Tab. 14 lze vidět, že celková tlaková ztráta kontrolní úlohy se oproti původní úloze snížila o 0,78 [%]. Ve srovnání s faktem, že počet prvků sítě vytvořené pro kontrolní úlohu byl více než dvakrát menší (jak lze vidět v Tab. 16) lze prohlásit, že síť zvolená pro výpočet této úlohy měla dostačující jemnost (počet prvků). Při zachování přibližně stejných procentuálních hodnot jako v Tab. 14 lze taktéž prohlásit, že by se i s násobným zvýšením počtu prvků sítě výsledek tlakové ztráty prakticky neměnil.

Tab. 16 - Porovnání počtu prvků jednotlivých sítí kontrolní úlohy s původní úlohou

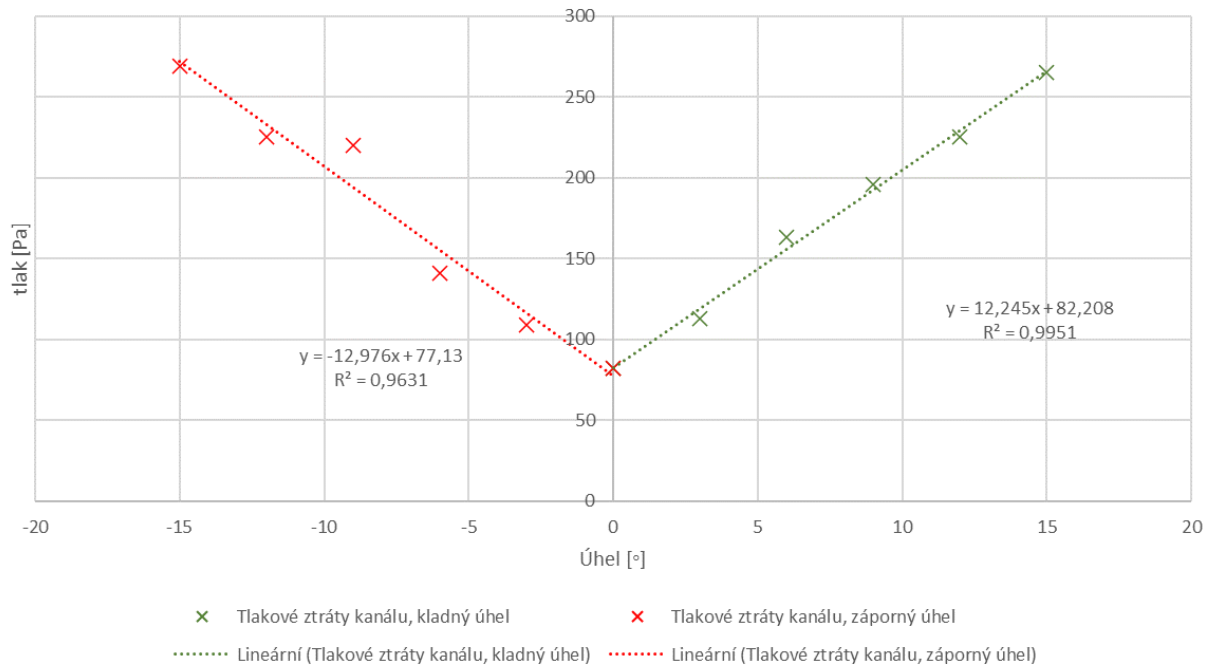
	Kontrolní úloha	Původní úloha
Celkový počet prvků sítě	25145872	50541808

7.10 Diskuze citlivosti tlakové ztráty proudění na velikost vstupního úhlu

Z Tab. 15 je jasně patrné, že se zvětšujícím se vstupním úhlem proudění tekutiny se celková tlaková ztráta zvyšuje. Nejvíce se růst tlakové ztráty projevil samotném kanálu. Pro úhel 15 [°] se tlaková ztráta oproti původnímu výsledku zvýšila o 222,8 [%]. Citlivost tlakové ztráty na hodnotu vstupního úhlu v uklidňovací komoře není úplně jednoznačná jako v případě vstupního kanálu. Pro většinu hodnot úhlů dokonce dochází ke snížení tlakové ztráty oproti původnímu modelu. To může být způsobeno složitější geometrií uklidňovací komory, lepším charakterem proudění v uklidňovací komoře po zbrzdění v kanálu apod.

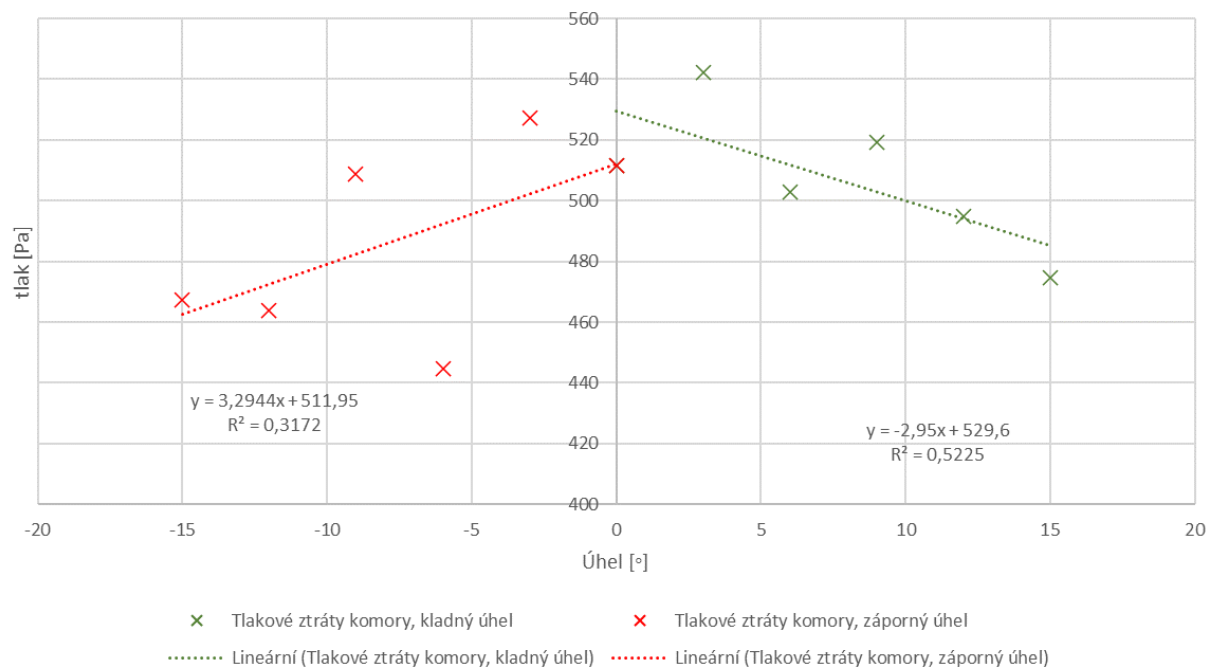
Pro lepší názornost výsledků byly vytvořeny grafy závislostí jednotlivých tlakových ztrát na vstupním úhlu.

Závislost tlakové ztráty kanálu na vstupním úhlu vektoru rychlosti



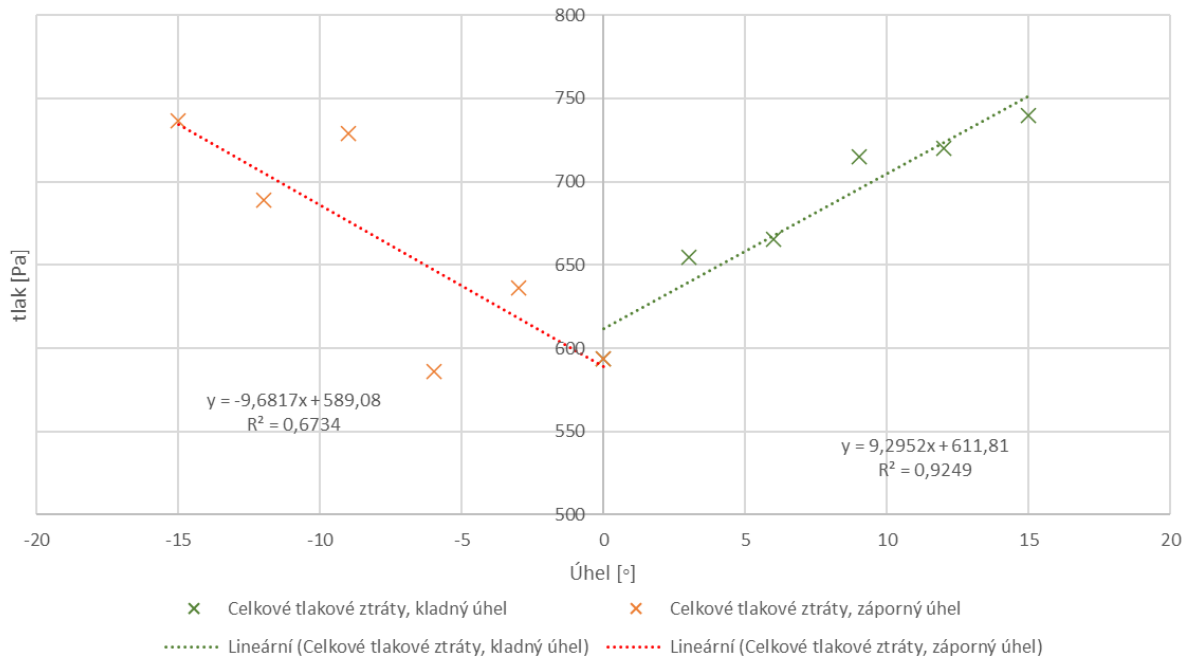
Obr. 28 - Závislost tlakové ztráty kanálu na vstupním úhlu proudění

Závislost tlakové ztráty komory na úhlu vstupním vektoru rychlosti



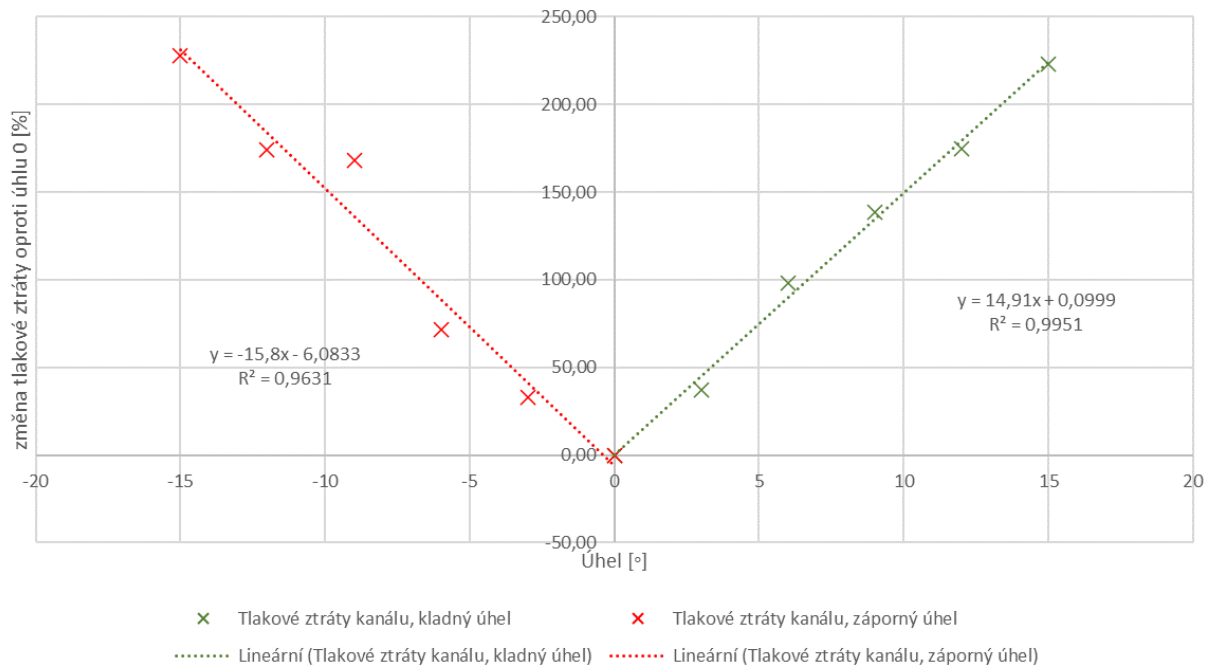
Obr. 29 - Závislost tlakové ztráty komory na vstupním úhlu proudění

Závislost celkové tlakové ztráty na vstupním úhlu vektoru rychlosti



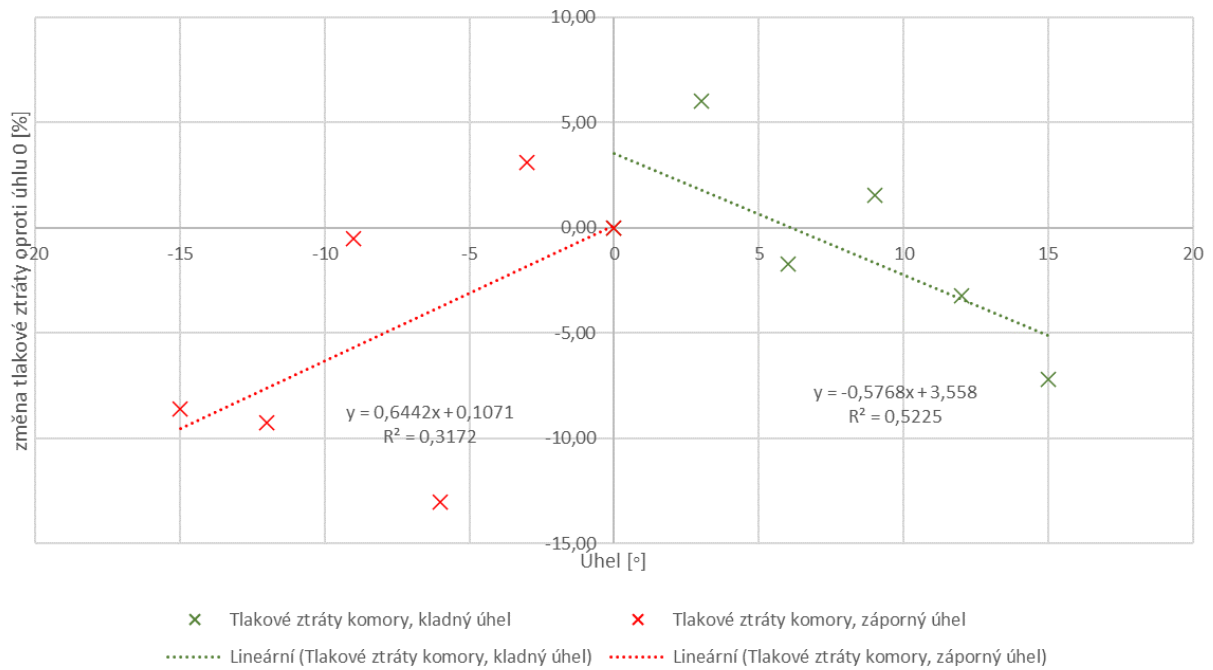
Obr. 30 - Závislost celkové tlakové ztráty na vstupním úhlu proudění

Závislost tlakové ztráty kanálu na vstupním úhlu vektoru rychlosti



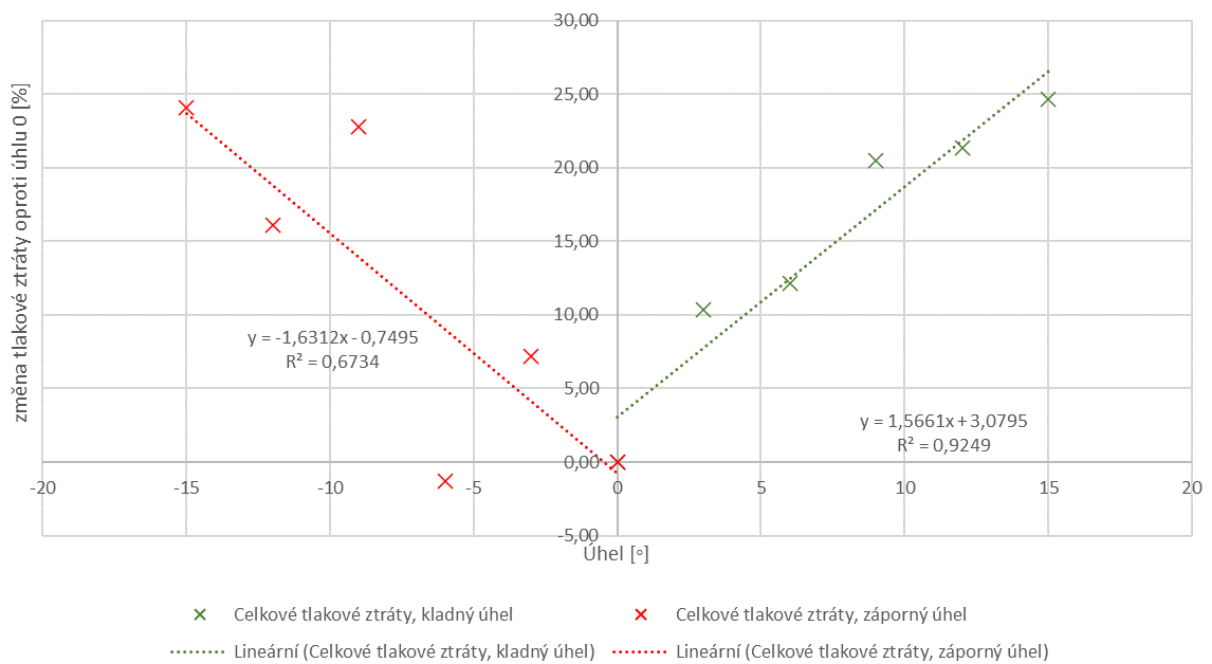
Obr. 31 - Závislost tlakové ztráty kanálu v % na vstupním úhlu proudění

Závislost tlakové ztráty komory na úhlu vstupním vektoru rychlosti



Obr. 32 - Závislost tlakové ztráty komory v % na vstupním úhlu proudění

Závislost celkové tlakové ztráty na vstupním úhlu vektoru rychlosti



Obr. 33 – Závislost celkové tlakové ztráty v % na vstupním úhlu proudění

7.10.1 Tlaková ztráta vstupního kanálu

Na Obr. 28 jsou znázorněny vypočítané absolutní hodnoty ztrát celkového tlaku a na Obr. 31 jejich procentuální hodnoty.

Z uvedených grafů lze říct, že ve vstupním kanálu hodnoty ztrát celkového tlaku v závislosti na velikosti vstupního úhlu proudění lineárně rostou, a to v případě kladných i záporných hodnot úhlu. Speciálně pro kladné hodnoty vykazuje lineární závislost vysokou přesnost ($R^2 = 0,9951$). Z uvedených hodnot a trendu vyplývá, že citlivost tlakové ztráty kanálu ke změně úhlu je poměrně vysoká.

7.10.2 Tlaková ztráta v uklidňovací komoře

Grafy s vypočtenými hodnotami tlakových ztrát jsou znázorněny na Obr. 29 (absolutní hodnoty) a na Obr. 32 (procentuální vyjádření)

Lze usoudit, že průběh tlakových ztrát v uklidňovací komoře vykazuje velkou nestabilitu a na rozdíl od průběhu v kanálu, kde tlaková ztráta téměř lineárně roste, zde s měnícím se úhlem pozvolna klesá. Když porovnáme kladný a záporný úhel, ve všech 3 grafech vykazuje záporný úhel větší nestabilitu a méně se tak blíží k lineárnímu průběhu změny tlakových ztrát. Nejvíce lze toto odchylení pozorovat v grafu na Obr. 32.

7.10.3 Tlaková ztráta celé soustavy

Vypočtené hodnoty tlakových ztrát pro celou vstupní soustavu jsou znázorněny na Obr. 30 (absolutní hodnoty) a na Obr. 33 (procentuální vyjádření).

Změna celkové tlakové ztráty je pak se zvyšujícím se úhlem rostoucí, a pro kladný úhel také téměř lineární. Pro záporné hodnoty úhlu vykazuje lineární trend o třetinu nižší přesnost. Celkový procentuální růst změny tlakové ztráty je nižší než u kanálu, jelikož je kompenzován klesající ztrátou v uklidňovací komoře. Hodnoty pro kladný a záporný úhel v některých případech vykazují tzv. „nesymetrie“, pro absolutní hodnotu jednoho úhlu se velmi liší, například v případě úhlu ($\pm 6^\circ$).

7.10.4 Rozbor grafických výstupů

Pro jednotlivé hodnoty vstupního úhlu proudění byly vyobrazeny kontury, vektory a proudnice.

Rozložení celkových tlaků v rovině symetrie jsou vyobrazena v příloze 1. Na Obr. 40 můžeme vidět odtržení proudu na spodní stěně soustavy. Při porovnání všech těchto obrázků lze vidět měnící se hodnoty tlaků v rovině symetrie v závislosti

na úhlu vstupního proudění. S rostoucím úhlem se hodnoty celkových tlaků snižují a ztráty tedy rostou. Maximální hodnoty celkových tlaků se přesouvají v závislosti na vstupním úhlu proudění po příčném průřezu. To je patrné v příloze 2, kde jsou zobrazeny tlaková pole v rovinách vstupu, přechodu (interface) a výstupu. Zde lze pro nulový vstupní úhel na Obr. 51 pozorovat oblast (zakroužkováno), ve které je značný pokles celkového tlaku, což je pravděpodobně způsobené obtékáním upouštěcího ventilu válcovitého tvaru, umístěným před vstupním sítím (šipka). S rostoucím vstupním úhlem se tato oblast vytrácí.

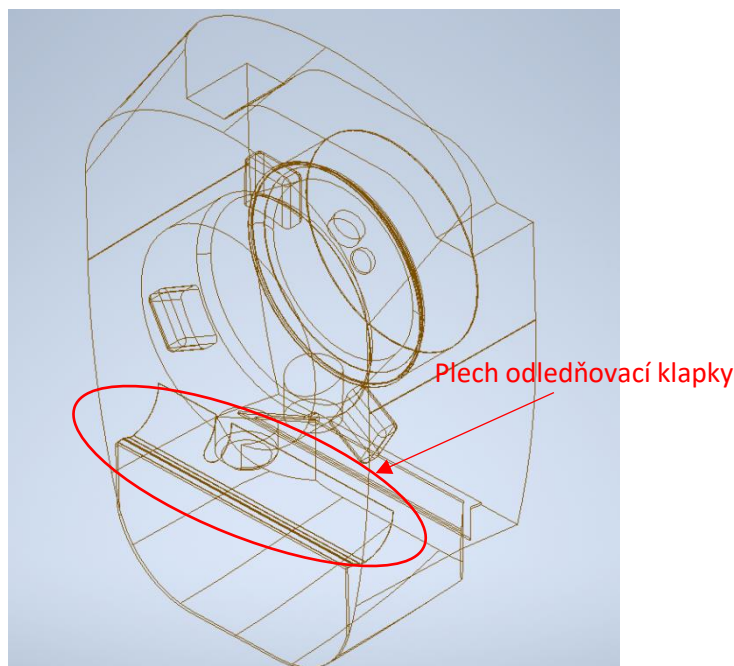
Příloha 3 zobrazuje tzv. 3D proudnice. Zde je patrné, že pro záporný úhel se proudění chová chaotičtěji – viz Obr. 57 a Obr. 63 ($\pm 15^\circ$). Zvláště na Obr. 57 můžeme vidět odtržení proudnic hned poblíž vstupu. Na Obr. 60 je dobře vidět, jak se v oblasti zavřené klapky tvoří vír, který může být jednou z hlavních příčin disipace energie a tlakové ztráty. Pro vyšší vstupní úhel se sice zmenšuje, ale proudění v horní části uklidňovací komory je provázáno dalšími víry. To lze pozorovat i v příloze 4, kde jsou vyobrazeny vektory rychlost v rovině symetrie. V dolní části uklidňovací komory (u zavřené klapky) lze vidět snižující se rychlosti a zmenšování velikosti víru. V této příloze také lze vidět, že vlivem geometrie plechu odledňovací klapky vzniká oblast, kde dramaticky roste rychlost – Obr. 67. To je také významnou příčinou disipace energie. Dále jsou v příloze 4 obrázky zobrazující vektory rychlosti ve vodorovném řezu, z nichž je velmi dobře patrná změna směru proudění v celé vstupní soustavě při změně vstupního úhlu. Je vidět, že celý proud „uhýbá do strany“ a vyšší rychlosti se nachází poblíž stěny (např. Obr. 71), což může opět zapříčinit ztráty. Výše popsané rozdíly v hodnotách tlakových ztrát pro kladný a záporný úhel pak mohou být příčinou podobného „nesymetrického“ chování proudění jako je tomu na Obr. 72 a Obr. 76 ($\pm 9^\circ$). Vektory rychlosti v příčném řezu také mohou být vypovídající o těchto „nesymetriích“.

8 Výpočet citlivosti tlakové ztráty na změnu geometrie

Cílem této analýzy je zjistit, jaký vliv má geometrie „plechu odledňovací klapky“ na tlakovou ztrátu ve vstupní soustavě motoru M-601E. Původní plech je vytvářen tak, aby směřoval proudění na vstupní síto kompresoru. Předpoklad firmy GEAC je takový, že tvar plechu může výrazně ovlivnit tlakovou ztrátu. Pro tuto analýzu byl ze stejných důvodů jako doposud vytvořen projekt v programu ANSYS Workbench.

8.1 Příprava geometrie

Pro úpravu geometrie byl využit program Autodesk Inventor. Bylo vytvořeno několik geometrických variant. Pro každý z těchto návrhů byly stanoveny hodnoty ztrát celkových tlaků, které byly následně porovnány s úlohou odpovídající normálovému vstupu vektoru rychlosti a původnímu tvaru odledňovací klapky.



Obr. 34 - Původní verze plechu odledňovací klapky

Jako první byla vytvořena varianta, kde byl plech odstraněn. V dalších konfiguracích byl plech nově vytvořen. Obr. 34 zobrazuje stávající geometrickou konfiguraci geometrie plechu odledňovací klapky, která byla řešena.

3D modely jednotlivých variant geometrie plechu odledňovací klapky jsou uvedeny v příloze 5. Celkem bylo vytvořeno 12 nových návrhů.

- Návrh 0 - Obr. 85
 - varianta bez plechu odledňovací klapky
- Návrh 1 - Obr. 86
 - zjednodušená varianta původního plechu, představuje především jednoduché konstrukční provedení
- Návrh 2 - Obr. 87
 - prodloužená a upravená varianta Návrhu 1 dosahující za odvodušňovací ventil, přidáno zešíkmení a zaoblení ze stran
- Návrh 3 - Obr. 88
 - zalomený plech (bez radiusu) který je dalším tvarovým zjednodušením
- Návrh 4 - Obr. 89
 - zaoblený plech (radius) v nejkratší variantě
- Návrh 5 - Obr. 90
 - stejná konstrukce plechu jako návrh 4, odstraněno vybrání, aby se geometrie ještě více zjednodušila
- Návrh 6 - Obr. 91
 - stejná konstrukce plechu jako návrh 5, přidáno zaoblení na odvodušňovacím ventilu a plech spodní části vstupní soustavy
- Návrh 7 - Obr. 92
 - zvlněný plech – má za cíl co nejvíce zachovat průtočný průřez ale zároveň zachovat navedení proudu vzduchu na síto kompresoru
- Návrh 8 - Obr. 93
 - kapsovitý plech – tvarově náročný, cílem zde bylo snížit rozdíly ve velikosti jednotlivých průřezů proudění

- Návrh 9 - Obr. 94
 - masivnější verze návrhu 8, cílem zde bylo zjednodušit tvar
- Návrh 10 - Obr. 95
 - zmenšený kapsovitý plech
- Návrh 11 - Obr. 96
 - návrh 9 opatřený dalšími geometrickými úpravami – pokus o zlepšení aerodynamiky v oblasti odvodušňovacího ventilu a přidání plechu spodní stěny vstupní soustavy pro nasměrování proudění na síto kompresoru

Návrhy 0-6 představují do určité míry pokus o zjednodušení stávající konstrukce a zároveň zachování či zlepšení celkové tlakové ztráty vstupní soustavy. Návrhy 7-11 pak představují především pokus o snížení tlakové ztráty vstupní soustavy bez ohledu na konstrukční nároky těchto variant. Tyto varianty vznikly po dalších dodatečných úpravách, jelikož některé předešlé návrhy obsahovaly konstrukční prvky, které byly problematické z hlediska tvorby výpočetní sítě.

Každá geometrie byla importována ve formátu parasolid do programu design modeler a zde rozdělena na oblasti „named selection“ stejně jako v kapitole 7.1.

8.2 Tvorba sítě

Pro tvorbu sítě byla použita stejná nastavení jako v kapitole 7.2. Díky využití programu ANSYS Workbench se tvorba sítě zjednodušila, jelikož bylo možné zajistit duplikaci nastavení. Nicméně pro každou variantu musela být výpočetní síť pro model uklidňovací komory kompletně znovu vytvořena, což bylo časově velmi náročné.

8.3 Definice okrajových podmínek a fyziky proudění

Okrajové podmínky a další nastavení zůstalo shodné s předchozí úlohou, viz kapitola 7.3 s tím rozdílem, že se v tomto případě neřešila změna směru proudění na vstupu. V okrajových podmínkách tedy zůstala beze změny podmínka „Flow direction“ = „normal to boundary“.

8.4 Ostatní nastavení

Nastavení numerického řešení, výstupu CFD analýzy a spuštění výpočtu bylo opět kopíruje předešlé kapitoly, 7.4, 7.5, vyjma podkapitoly 7.3.2.

8.5 Výsledky

Tlaková ztráta v této úloze byla určena analogicky k předchozímu případu. Výsledky byly opět porovnávány s tlakovou ztrátou verze s původním plechem a podmínkou kolmého směru proudění na vstupu.

Tab. 17 – Absolutní a procentuální hodnoty tlakové ztráty jednotlivých variant vzhledem k původní verzi

Varianta	Vstupní kanál		Uklidňovací komora		Celkem (kanál + komora)	
	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]	[Pa]	[%]
Návrh 0	90,6	222,80	474,6	-7,20	739,7	24,62
Návrh 1	84,1	174,47	494,8	-3,25	720,2	21,34
Návrh 2	74,8	138,61	519,2	1,53	715,2	20,50
Návrh 3	85,4	98,31	502,7	-1,70	665,6	12,14
Návrh 4	117,2	37,37	542,1	6,01	655,0	10,35
Návrh 5	99,3	0,00	511,4	0,00	593,5	0,00
Návrh 6	99,9	32,88	527,2	3,08	636,3	7,21
Návrh 7	101,4	71,67	444,8	-13,03	585,8	-1,31
Návrh 8	87,8	167,96	508,8	-0,50	728,9	22,81
Návrh 9	88,8	174,34	463,9	-9,29	689,2	16,12
Návrh 10	88,3	227,67	467,4	-8,61	736,5	24,08
Návrh 11	88,3	222,80	474,6	-7,20	739,7	24,62

Stejně jako v předchozích případech kladné znaménko s červeným zbarvením písma znamená zvýšení, záporné znaménko se zeleným zbarvením znamená snížení tlakové ztráty.

8.6 Diskuze výsledků

Z Tab. 17 je jednoznačné, že se nepodařilo dosáhnout žádného významného zlepšení. Dále je i jasně vidět, že samotná změna geometrie plechu odledňovací klapky silně ovlivňuje tlakovou ztrátu jak v uklidňovací komoře, tak i v kanále.

Některé návrhy vykazují zhoršení především pouze v kanále, jiné především v uklidňovací komoře, některé v obou součástech podobně. Nejlepší výsledek byl dosažen u návrhu 4. Tento návrh jednoznačně představuje konstrukční zjednodušení plechu se zhoršením tlakové ztráty o 4,63 % což je poměrně nízká hodnota. Tlaková ztráta v kanálu naopak představuje u návrhu 4 nejvyšší zhoršení. V uklidňovací komoře pak jako jediný návrh vykazuje snížení hodnoty tlakové ztráty. Naopak nejhůře vychází návrh 2, který vykazuje změnu tlakové ztráty o 37,92 % oproti původnímu řešení, ačkoliv v oblasti kanálu tento návrh vykazuje dokonce zlepšení o téměř 9 %.

8.6.1 Rozbor grafických výstupů (kontur, vektorů a proudnic)

Na Obr. 104 přílohy 6 zobrazující tlakové pole návrhu 2 je na sítu kompresoru možné pozorovat velkou oblast s nízkými hodnotami celkového tlaku. Podobné rozložení se vyskytuje na Obr. 106 návrhu 9. Rozdíl v tomto místě je možné vidět v porovnání s Obr. 51 v příloze 2, kde je zobrazena původní varianta úlohy s totožnou okrajovou podmínkou. Stejný efekt je patrný i na Obr. 98 a je zde také vidět, jak se oblast s vyššími hodnotami tlaků přimyká k zadní stěně a nevzniká zde kruhovitá oblast s nižšími hodnotami tlaků, způsobená obtékáním válcovitého tvaru ventilu, která je viditelná např. na Obr. 51 v příloze 2.

Naopak návrh 4, který má lepší výsledky vykazuje na Obr. 99 v příloze 6 rozložení vyšších hodnot celkových tlaků dále od zadní stěny a lepší nasměrování proudění na výstup ze soustavy. Zakroužkovaná oblast zde označuje výraznou změnu v rozložení celkových tlaků oproti ostatním návrhům.

Ve vizualizaci proudnic návrhu 2 v příloze 7 (Obr. 110) proudnice obtékají plech ze stran, kde bylo vytvořeno zešíkmení. V těchto místech nabývá proudění střední a vyšší rychlosti, a protože se jedná o rychlosti v blízkosti stěny, může být tento jev příčinou větší disipace energie. Lépe je tento jev patrný ve vizualizaci vektorů rychlosti v příčném řezu uklidňovací komory na Obr. 118 přílohy 8. Mimo to je zde možné vidět, že vektory jdoucí normálově k rovině řezu ve směru k výstupu mají nižší rychlost, než v případě návrhu 4 na Obr. 119. Proudnice návrhu 4 na Obr. 111 přílohy 7 ukazují, že došlo ke zvětšení velikosti víru v oblasti uzavřené klapky (zakroužkované černě). Červeně zakroužkovaná oblast označuje místo, kde se víření zvětšilo. V příloze 8 Obr. 115 je zakroužkována tatáž oblast, jako na Obr. 111 přílohy 7. Je zde patrné, že v oblasti dochází ke zpětnému proudění, které zasahuje i do oblasti kanálu. To může být důvodem, proč má návrh 2 největší tlakovou ztrátu právě v kanálu. Obr. 111 v příloze 7 je pak důkazem chybného předpokladu, že by zvlněný plech mohl vír u zavřené klapky odstranit, či zredukovat.

9 Závěr

Cílem této práce bylo stanovit velikost tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru M-601E. Konkrétně vyšetřit citlivost této tlakové ztráty na změnu okrajových podmínek na vstupu (první část práce), a také na změnu geometrie (druhá část práce). Tato Bakalářská práce „Vliv konstrukčních parametrů na hodnoty tlakové ztráty ve vstupní soustavě turbovrtulového motoru“ byla zpracována s použitím důvěrných informací a se souhlasem společnosti General Electric Aerospace Czech s.r.o. Společnost poskytla model vstupní soustavy rozdělený na 2 části a počáteční okrajové podmínky proudění vzduchu. Celá analýza byla provedena v programu ANSYS CFX 2021 R1. Nejdříve byly vytvořeny sítě pro obě části poskytnuté geometrie, které byly následně spojeny v programu CFX-Pre do jedné úlohy. Jako první byl proveden výpočet pro počáteční úlohu, ve které bylo proudění definováno jako kolmé ke vstupnímu průřezu. Následoval přepočítání této úlohy pro hrubší síť, který prokázal, že použitá síť je dostačující. Změnou okrajových podmínek (vstupního úhlu směru proudění ve vodorovné rovině) bylo prokázáno, že tlaková ztráta na výstupu oproti vstupu se změnou okrajových podmínek roste. V kanálu se relativní přírůstek tlakové ztráty téměř lineárně zvyšuje, v uklidňovací komoře naopak klesá.

Pro analýzu citlivosti tlakové ztráty na geometrii bylo vytvořeno 12 nových návrhů geometrie uklidňovací komory. Hlavním předmětem změny geometrie byl plech odledňovací klapky. Ten byl nejprve odebrán a dále tvarově měněn. Příprava úloh probíhala analogicky k úloze předešlé. Bylo zjištěno, že dané tvarové změny ovlivňují tlakovou ztrátu především negativně. Zlepšení se podařilo dosáhnout pouze v jednotlivých částech soustavy, k celkovému zlepšení, tedy celkovému snížení tlakové ztráty oproti původní konfiguraci nedošlo. Bylo zjištěno, že ačkoliv se plech odledňovací klapky může ovlivnit celkovou tlakovou ztrátu, je v původní verzi navržen optimálně vzhledem k okrajovým podmínkám.

ZDROJE

- [1] ...létají po celém světě. *GE Aerospace* [online]. 2016 [cit. 2023-02-23]. Dostupné z: <https://www.geAerospaceturboprop.com/cz/spolecnost/onas>
- [2] Aerodynamic Analysis of Turboprop Engine Air Intake. *Acta Polytechnica* [online]. 2004, 2004(3), 66-70 [cit. 2022-12-08]. Dostupné z: <https://ojs.cvut.cz/ojs/index.php/ap/article/view/584>
- [3] L410. *LET Aircraft Industries* [online]. Kunovice [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <http://www.let.cz/l410uvp>
- [4] LET L-410 Turbolet. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2023 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Let_L-410_Turbolet
- [5] L410UVP, L420. *Orlita.net* [online]. [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <https://www.ortita.net/l-410/historie-l-410/l410uvp-e-l420/>
- [6] L410 UVP-E. *L410.cz* [online]. 2023 [cit. 2023-02-18]. Dostupné z: <http://www.l410.cz/wp/fotogalerie/l-410-uvp-e/nggallery/page/8>
- [7] ADAMEC, Josef a Jindřich KOCÁB. *Letadlové motory*. Praha: KANT cz, 2000. ISBN 80-902914-0-6.
- [8] KUBEŠ, Josef. Historie motoru Walter M601. *Walter Jinonice* [online]. 2002 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://web.archive.org/web/20190811013731/http://www.walterjinonice.cz/historie-motoru-walter-m601>
- [9] Poválečné konstrukce motorů a vrtulí. In: NĚMEČEK, Václav. *Československá letadla II.* 3. vyd. Praha: Naše vojsko, 1984, s. 172-174. ISBN 28-122-84.
- [10] Pratt & Whitney Canada. *Propulsion Web Page* [online]. Purdue University, 1998 [cit. 2023-02-21]. Dostupné z: <https://engineering.purdue.edu/~propulsi/propulsion/jets/tprops/pt6a.html>
- [11] WALTER M601 engine with descriptions [2]. *ResearchGate* [online]. 2013 [cit. 2023-02-22]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/figure/WALTER-M601-engine-with-descriptions-2_fig3_304584482
- [12] Vstupní soustavy. In: LINHART, Zdeněk a Ján KAMENICKÝ. *Konstrukce leteckých motorů I.*. Praha I, Husova 5: ČVUT v Praze, 1982, s. 25-26.
- [13] DRÁBKOVÁ, Sylva. *Mechanika tekutin: učební text* [online]. Ostrava: Ediní středisko VŠB – TUO, 2007 [cit. 2022-12-09]. ISBN 978-80-248-1508-4.

Dostupné

z: <http://www.elearn.vsb.cz/archivcd/FS/MT/Mechanika%20tekutin.pdf>

- [14] Noskievič, Jaromír. Mechanika tekutin. Praha: SNTL, 1987.
- [15] ŠESTÁK, Jiří a František REIGER. Přenos hybnosti, tepla a hmoty. Praha: Vydavatelství ČVUT, 1993. ISBN 80-01-00957-2.
- [16] ŠKORPÍK, Jiří. *Transformační technologie: Vznik tlakové ztráty při proudění tekutiny a její výpočet* [online]. Brno, 2010-12, [last updated 2021-05-19] [cit. 2023-04-20]. ISSN 1804-8293. Dostupné z: <https://www.transformacni-technologie.cz/38.html>.
- [17] URUBA, V., 2009. Turbulence. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 130 s. ISBN 987-80-01-04330-1
- [18] [Kozubková, 2008] Kozubková, M.: Modelování proudění tekutin. VŠB-TU Ostrava, Ostrava, 2008
- [19] PŘÍHODA, J., P. LOUDA, 2009. Matematické modelování turbulentního proudění. 1. vyd. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 111 s. ISBN 987-80-01-03623-5.
- [20] HALÍK, J., 2008. Hydrodynamika a hydrodynamické stroje [online]. Vysoká škola báňská Technická univerzita Ostrava. [vid. 1. 11. 2014]. Dostupné z: <http://www.338.vsb.cz/PDF/JanalikHYDRODYNAMIKAHYDRODYNAMIKESTROJE.pdf>
- [21] TU, Jiyuan, Guan-Heng YEOH a Chaoqun LIU. Computational Fluid Dynamics: A Practical Approach. 2. Waltham (USA): Elsevier, 2013. ISBN ISBN: 978-0-08-098243-4.
- [22] MENTER, Fr., M. KUNTZ, and R. LANGTRY, 2003. Ten Years of Industrial Experience with the SST Turbulence Model. Turbulence, Heat and Mass Transfer 4, ed: K. HANJALIC, Y. NAGANO, and M. TUMMERS. Begell House. page 625 - 632.
- [23] ANSYS Fluent User's Guide [Online]. (2013) (15 ed.). Canonsburg, USA: ANSYS.
- [24] SKÁLA, Adam. Analýza inerčního odlučovače částic na vstupu vzduchu do turbovrtulového motoru. Brno, 2019. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/117606>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Letecký ústav. Vedoucí práce Robert Popela
- [25] PRZECZEK, J. CFD analýza vstupního kanálu turbovrtulového motoru. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2011. 85 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Robert Popela, PhD.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ

Fyzikální veličina	Popis	Jednotka
c_x	součinitel odporu	
d	charakteristický rozměr	[m]
d	průměr potrubí	[m]
d_H	hydraulický průměr potrubí	[m]
e_z	měrná ztrátová energie	[$J \cdot kg^{-1}$]
\vec{f}	objemové síly působící na jednotku hmotnosti	[$N \cdot kg^{-1}$]
g	tíhové zrychlení	[$m \cdot s^{-2}$]
h_z	ztrátová výška	[m]
l	délka potrubí	[m]
o	omočený obvod	[m]
p	tlak	[Pa]
p_z	ztrátový tlak	[Pa]
r	poloměr	[m]
t	čas	[s]
u	rychlost	[$m \cdot s^{-1}$]
x	souřadnice	
y	souřadnice	
z	souřadnice	
A	plocha průřezu potrubí	[m^2]
F	síla	[N]
I_x	intenzita turbulence	
L	délka desky	[m]
M	moment	[$N \cdot m$]

P_T	výkon turbíny	$[W]$
P_K	výkon kompresoru	$[W]$
Re	Reynoldsovo číslo	
Re_{krit}	kritické Reynoldsovo číslo	
S	obtékaná plocha desky	$[m^2]$
T	teplota	$[K]$
V	objem	$[m^3]$
β	součinitel tepelné roztažnosti	$[K^{-1}]$
δ	součinitel stlačitelnosti	$[m^2 \cdot N^{-1}]$
δ	tloušťka mezní vrstvy	$[m]$
λ	součinitel třecích ztrát	
μ	dynamická viskozita	$[Pa \cdot s]$
ν	kinematická viskozita	$[m^2 \cdot s^{-1}]$
ρ	hustota	$[kg \cdot m^{-3}]$
$\vec{\tau}$	tenzor dynamického napětí	$[Pa]$
$\vec{\Delta}$	tenzor rychlosti deformace	$[s^{-1}]$
ϕ	obecná fyzikální veličina	

Vektorové veličiny jsou značeny šipkou

Střední hodnoty jsou značeny pruhem nad veličinou

Flukтуаční hodnoty veličin jsou značeny čárkou

SEZNAM ZKRATEK

CFD	Computational Fluid Dynamics – Výpočetní dynamika tekutin
CLKV	Centrum leteckého a kosmického výzkumu
DNS	direct numerical simulation – metoda přímé numerické simulace
GEAC	General Electric Aerospace Czech, s.r.o.
LES	Large Eddy Simulation
N-S	Navier – Stokes
PT0	celkový tlak na vstupu
PT1	Celkový tlak na přechodu
PT2	Celkový tlak na výstupu
RANS	Reynolds-Avareged Navier-Stokes equations
RNG	metoda renormalizačních grup
SST	Shear Stress transport
$\Delta PZ_{\text{kanál}}$	Tlaková ztráta v kanálu
$\Delta PZ_{\text{komora}}$	Tlaková ztráta komory
$\Delta PZ_{\text{celkem}}$	Tlaková ztráta celková – celé vstupní soustavy

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 - LET L-410UVP-E ve službách SSSR [6]	11
Obr. 2 - LET L-410UVP-E na dráze [6].....	11
Obr. 3 - Oblasti použití jednotlivých druhů pohonu [7].....	12
Obr. 4 - Schéma turbovrtulového motoru [7]	12
Obr. 5 - Schéma turbovrtulového motoru s volnou hnací turbínou se zpětným prouděním plynů [10].	13
Obr. 6 - Řez motorem M-601 [11]	14
Obr. 7 - Smykové napětí při laminárním proudění [13].....	18
Obr. 8 - Rychlostní profil laminárního proudění [13].....	19
Obr. 9 - Rychlostní profil turbulentního proudění [13]	19
Obr. 10 - Časový průběh rychlosti při turbulentním proudění [14].....	20
Obr. 11 - Tlaková ztráta v potrubí [13]	22
Obr. 12 - Proudění v ohybu (příklad místních ztrát) [14].....	23
Obr. 13 - Síly a momenty působící na obtékané těleso	24
Obr. 14 - Schéma vizualizace mezní vrstvy laminárního proudění [13].....	25
Obr. 15 - Smíšená mezní vrstva na desce [14].....	26
Obr. 16 - Vzájemné propojení 3 hlavních prvků programů pro CFD a jejich funkce.....	32
Obr. 17 - vytvoření sítě pro výpočet odporu motorové gondoly [2]	35
Obr. 18 - Řez vstupním ústrojím a tzv. uklidňovací komorou [2]	35
Obr. 19 - Zobrazení počítaného modelu v gondole motoru Walter M-601E [25]	37
Obr. 20 - Řez gondoly motoru Walter M-601E a detail počítaného modelu vstupní soustavy [25].....	37
Obr. 21 - Schéma projektu ANSYS_Workbench.....	41
Obr. 22 - Geometrie vstupní soustavy [24]	42
Obr. 23 - Zjednodušená geometrie uklidňovací komory	42
Obr. 24 - model vstupní soustavy – spojené modely kanálu a uklidňovací komory.....	46
Obr. 25 - Monitorované oblasti vstupní soustavy motoru	47
Obr. 26 - Průběh residuí v závislosti na iteracích pro úhel 0 stupňů	49
Obr. 27 - Průběh hodnot celkových tlaků v závislosti na iteracích pro úhel 0 stupňů.....	50
Obr. 28 - Závislost tlakové ztráty kanálu na vstupním úhlu proudění	53
Obr. 29 - Závislost tlakové ztráty komory na vstupním úhlu proudění	53
Obr. 30 - Závislost celkové tlakové ztráty na vstupním úhlu proudění	54
Obr. 31 - Závislost tlakové ztráty kanálu v % na vstupním úhlu proudění.....	54
Obr. 32 - Závislost tlakové ztráty komory v % na vstupním úhlu proudění	55
Obr. 33 – Závislost celkové tlakové ztráty v % na vstupním úhlu proudění	55
Obr. 34 - Původní verze plechu odledňovací klapky.....	58
Obr. 35 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -15 stupňů	74
Obr. 36 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -12 stupňů.....	75
Obr. 37 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -9 stupňů	75
Obr. 38 - Tlakové pole pro úhel -6 stupňů.....	76
Obr. 39 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -3 stupně	76
Obr. 40 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 0	77
Obr. 41 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 3 stupně	77
Obr. 42 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 6 stupňů	78
Obr. 43 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 9 stupňů	78
Obr. 44 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 12 stupňů	79
Obr. 45 - Tlakové pole pro v meridiálním řezu úhel 15 stupňů	79
Obr. 46 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -15 stupňů	80
Obr. 47 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -12 stupňů	81
Obr. 48 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -9 stupňů	81
Obr. 49 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -6 stupňů	82
Obr. 50 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -3 stupně.....	82
Obr. 51 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 0 stupňů.....	83
Obr. 52 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 3 stupně.....	83

Obr. 53 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 6 stupňů.....	84
Obr. 54 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 9 stupňů.....	84
Obr. 55 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 12 stupňů.....	85
Obr. 56 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 15 stupňů.....	85
Obr. 57 - 3D proudnice pro úhel -15 stupňů	86
Obr. 58 - 3D proudnice pro úhel -9 stupňů	87
Obr. 59 - 3D proudnice pro úhel -6 stupňů	87
Obr. 60 - 3D proudnice pro úhel 0 stupňů.....	88
Obr. 61 - 3D proudnice pro úhel 6 stupňů.....	88
Obr. 62 - 3D proudnice pro úhel 9 stupňů.....	89
Obr. 63 - 3D proudnice pro úhel 15 stupňů.....	89
Obr. 64 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -15 stupňů	90
Obr. 65 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -6 stupňů	91
Obr. 66 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -3 stupně	91
Obr. 67 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 0 stupňů	92
Obr. 68 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 3 stupně	92
Obr. 69 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 6 stupňů	93
Obr. 70 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 15 stupňů	93
Obr. 71 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -15 stupňů.....	94
Obr. 72 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -9 stupňů.....	95
Obr. 73 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -6 stupňů.....	95
Obr. 74 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 0 stupňů	96
Obr. 75 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 6 stupňů	96
Obr. 76 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 9 stupňů	97
Obr. 77 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 15 stupňů	97
Obr. 78 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -15 stupňů.....	98
Obr. 79 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -6 stupňů.....	99
Obr. 80 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -3 stupně.....	99
Obr. 81 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 0 stupňů	100
Obr. 82 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 3 stupně	100
Obr. 83 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 6 stupňů	101
Obr. 84 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 15 stupňů	101
Obr. 85 - Model uklidňovací komory návrh 0 - komory bez plechu	102
Obr. 86 - Model uklidňovací komory návrh 1 – zjednodušený plech (krátká verze) + detail	102
Obr. 87 - Model uklidňovací komory návrh 2 – zjednodušený plech (dlouhá verze) + detail	103
Obr. 88 - Model uklidňovací komory návrh 3 - zešíkmený plech + detail.....	103
Obr. 89 - Model uklidňovací komory návrh 4 - nejmenší plech + detail.....	104
Obr. 90 - Model uklidňovací komory návrh 5 - nejmenší plech (zjednodušený) + detail	104
Obr. 91 - Model uklidňovací komory návrh 6 - nejjednodušší plech s dalšími geometrickými úpravami + detail.....	105
Obr. 92 - Model uklidňovací komory návrh 7 - zvlněný plech + detail	105
Obr. 93 - Model uklidňovací komory návrh 8 - kapsovitý plech	106
Obr. 94 - Model uklidňovací komory návrh 9 - masivní plech + detail	106
Obr. 95 - Model uklidňovací komory návrh 10 - zmenšený kapsovitý plech + detail	107
Obr. 96 - Model uklidňovací komory návrh 11 - masivní plech s dalšími geometrickými úpravami + detail.....	107
Obr. 97 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 0.....	108
Obr. 98 –Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 1	109
Obr. 99 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 2.....	109
Obr. 100 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 4.....	110
Obr. 101 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 7.....	110
Obr. 102 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 0.....	111
Obr. 103 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 1.....	111
Obr. 104 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 2.....	112



Obr. 105 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 4	112
Obr. 106 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 7	113
Obr. 107 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 9	113
Obr. 108 – 3D proudnice návrh 0	114
Obr. 109 – 3D proudnice návrh 1	115
Obr. 110 – 3D proudnice návrh 2	115
Obr. 111 – 3D proudnice návrh 4	116
Obr. 112 – 3D proudnice návrh 7	116
Obr. 113 – 3D proudnice návrh 9	117
Obr. 114 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu návrh 0	118
Obr. 115 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu symetrie návrh 2	119
Obr. 116 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu návrh 4	119
Obr. 117 – Vektory rychlosti řezu rovinou yz návrh 0	120
Obr. 118 – Vektory rychlosti v řezu rovinou yz návrh 2	121
Obr. 119 – Vektory rychlosti v řezu rovinou yz návrh 4	121

SEZNAM TABULEK

Tab. 1 - Tabulka vztahů pro různé režimy proudění v mezní vrstvě [13].....	26
Tab. 2 - Souhrn výsledků analýzy [2]	36
Tab. 3 – Rozdělení ploch kanálu na jmenovité oblasti	42
Tab. 4 – Rozdělení ploch kanálu na jmenovité oblasti	42
Tab. 5 - Parametry mezní vrstvy	43
Tab. 6 - Rozměry prvků jednotlivých oblastí ve výpočetní síti modelu uklidňovací komory	44
Tab. 7 - Počty prvků sítě jednotlivých částí modelu a jejich součet.....	44
Tab. 8 - Detail nastavení okrajových podmínek v CFX-Pre	45
Tab. 9 - Zadané hodnoty souřadnic pro jednotlivé vstupní úhly směru proudění	46
Tab. 10 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech.....	47
Tab. 11 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech.....	48
Tab. 12 - Značení monitorů jednotlivých veličin v oblastech.....	48
Tab. 13 - Absolutní hodnoty tlakových ztrát v původní úloze s kolmým prouděním	51
Tab. 14 - Procentuální hodnoty rozdílu tlakových ztrát kontrolní úlohy s původní úlohou	51
Tab. 15 - Procentuální hodnoty tlakových ztrát vzhledem k úloze s úhlem 0	51
Tab. 16 - Porovnání počtu prvků jednotlivých sítí kontrolní úlohy s původní úlohou	52
Tab. 17 – Absolutní a procentuální hodnoty tlakové ztráty jednotlivých variant vzhledem k původní verzi	61



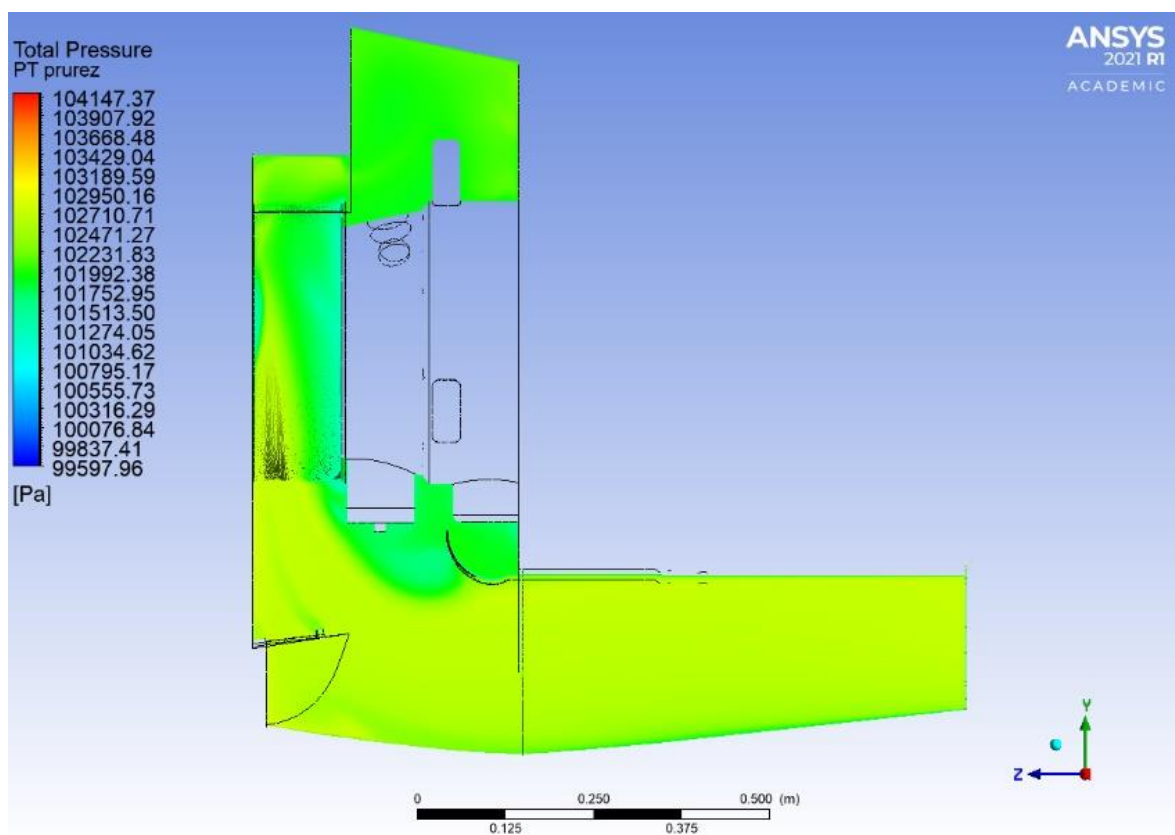
SEZNAM PŘÍLOH

Přílohy	74
Příloha 1.....	74
Příloha 2.....	80
Příloha 3.....	86
Příloha 4.....	90
Příloha 5.....	102
Příloha 6.....	108
Příloha 7.....	114
Příloha 8.....	118

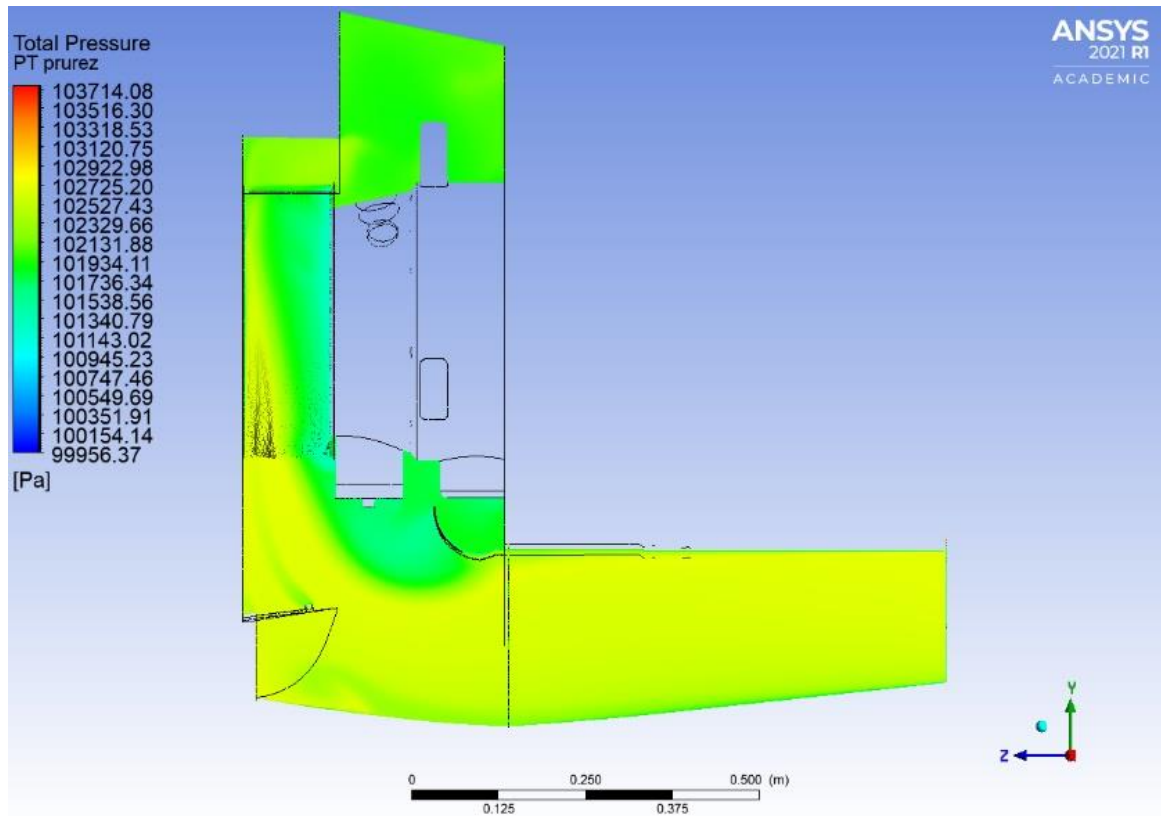
PŘÍLOHY

PŘÍLOHA 1

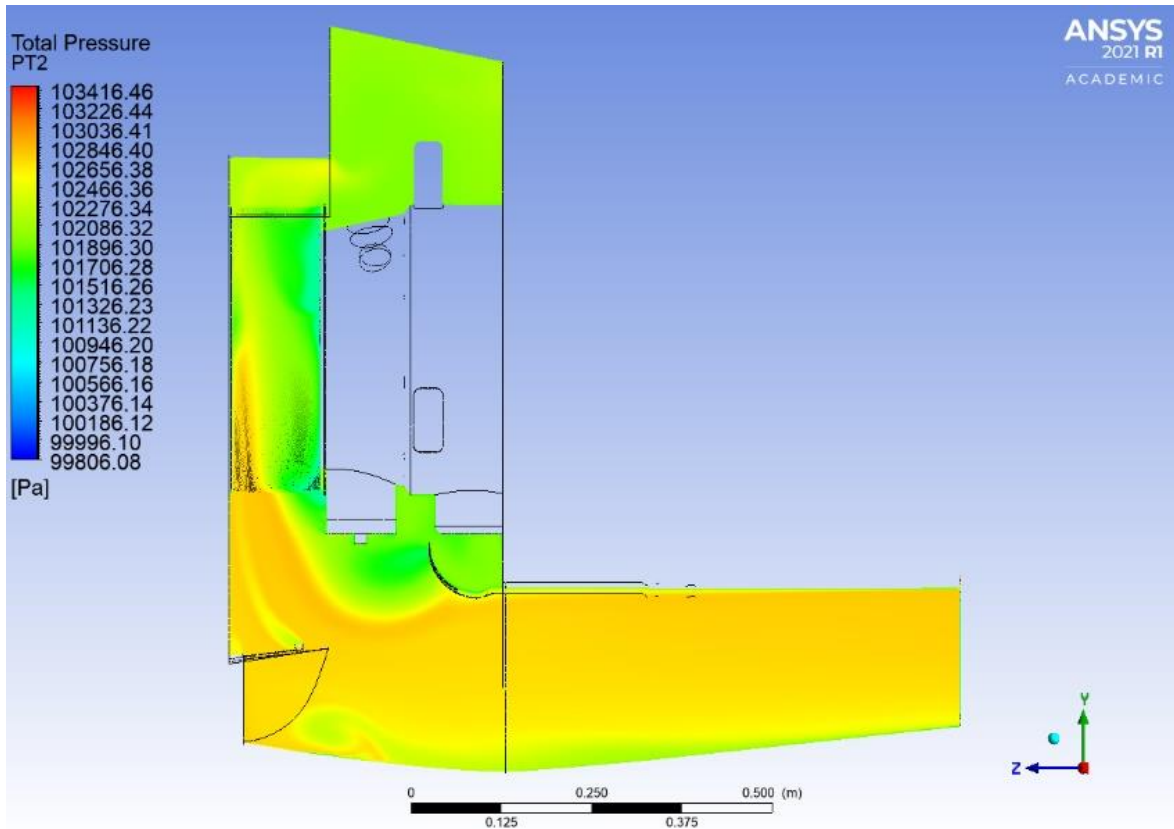
Zobrazení tlakových polí v meridiálním řezu vstupní soustavy turbobvtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



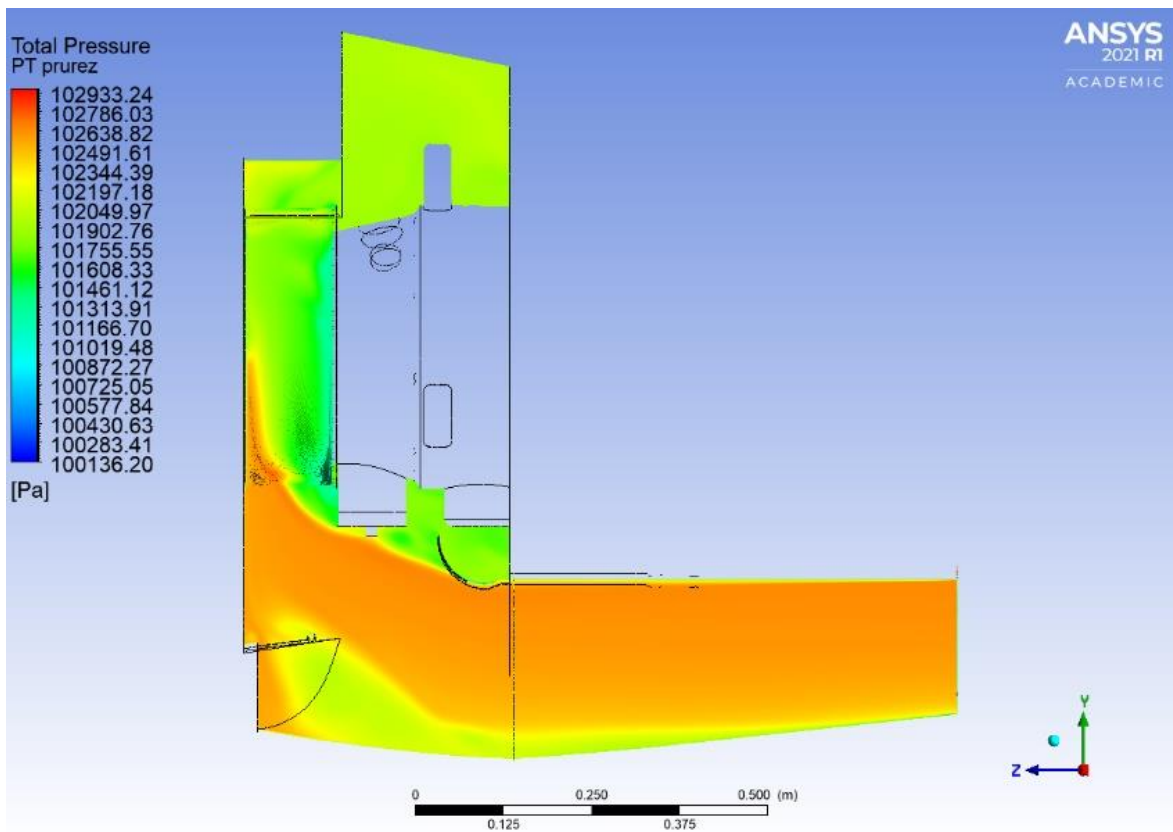
Obr. 35 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -15 stupňů



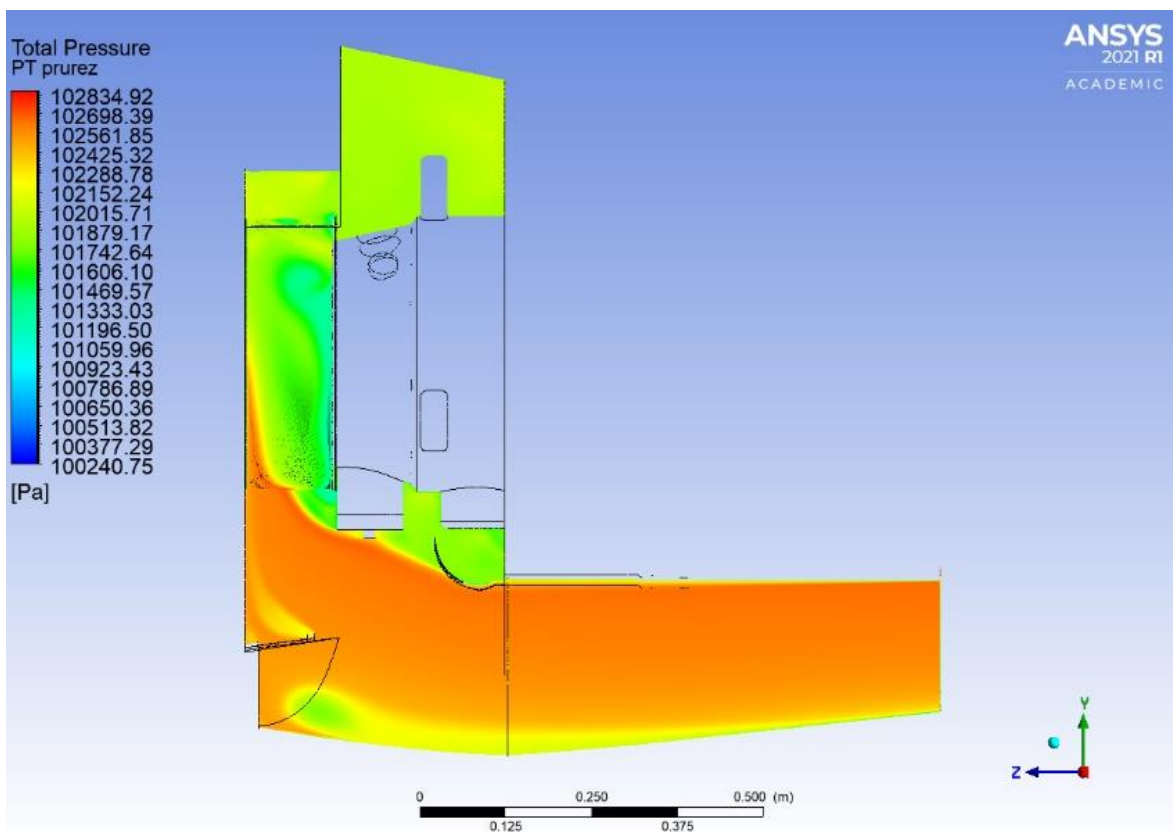
Obr. 36 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -12 stupňů



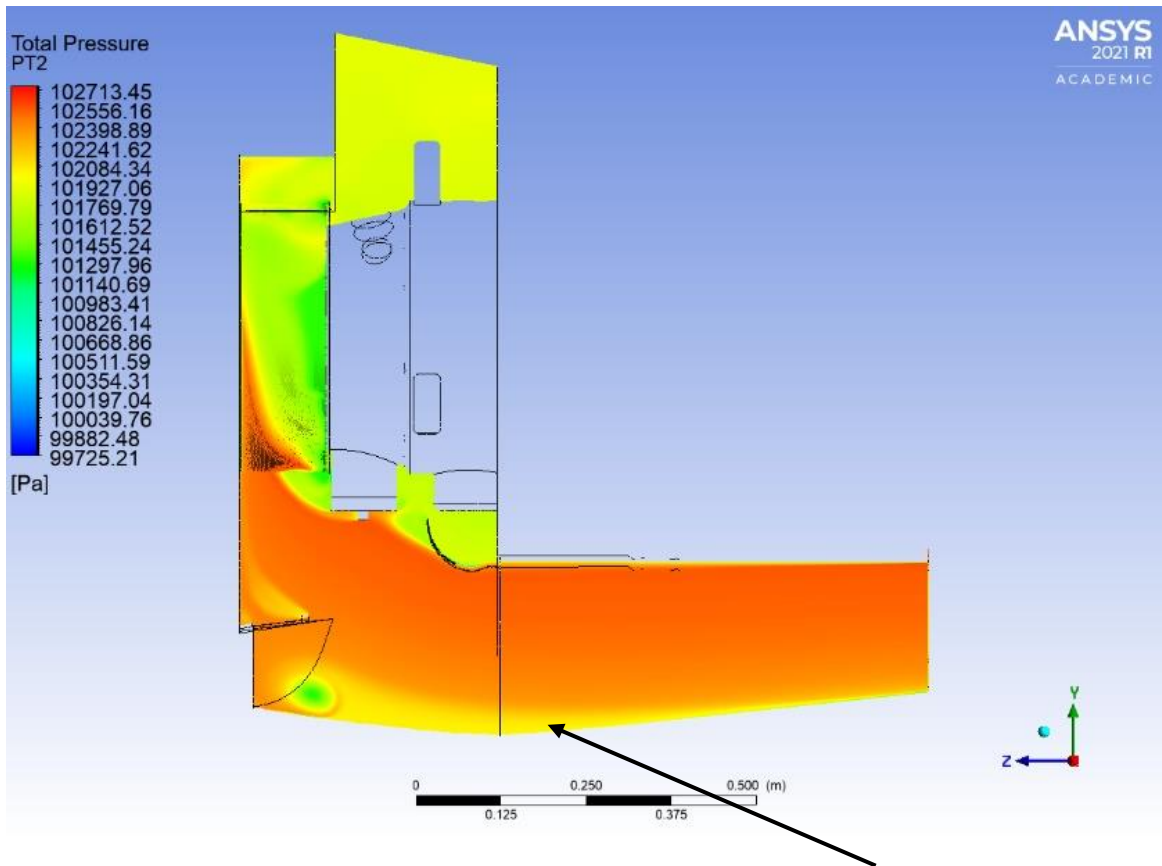
Obr. 37 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -9 stupňů



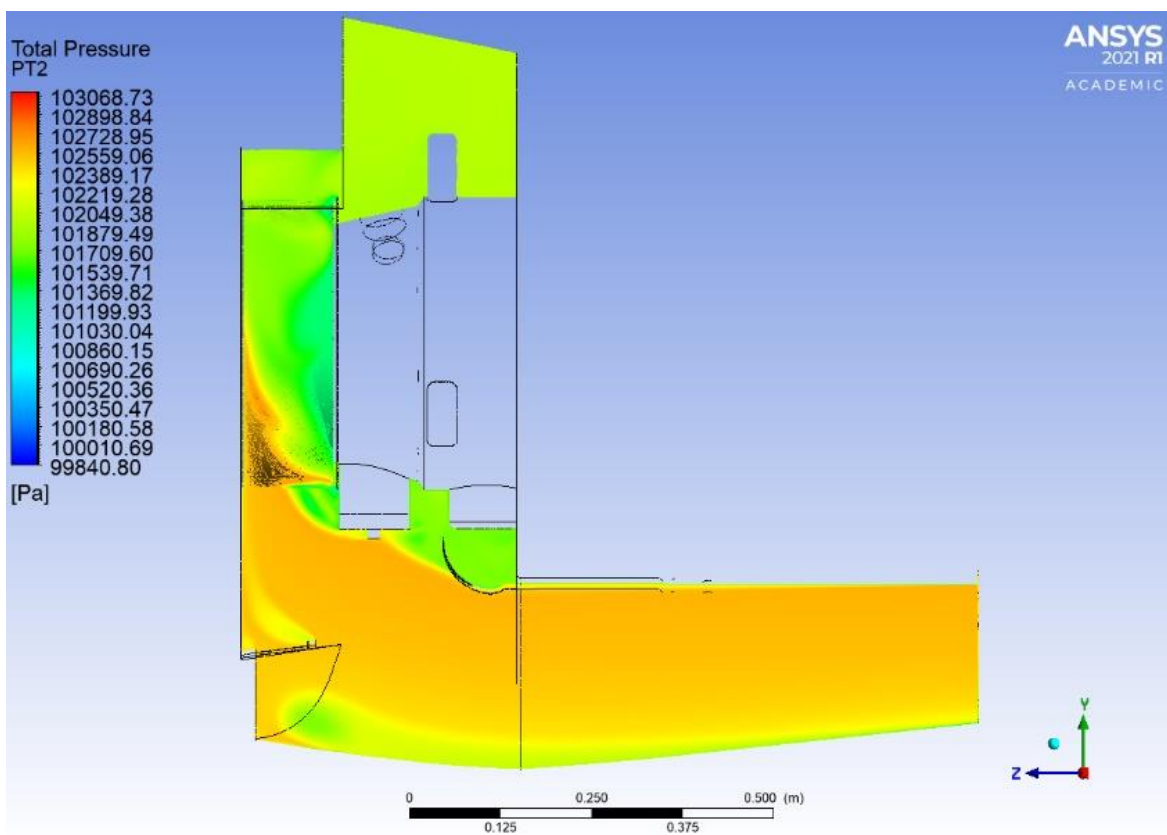
Obr. 38 - Tlakové pole pro úhel -6 stupňů



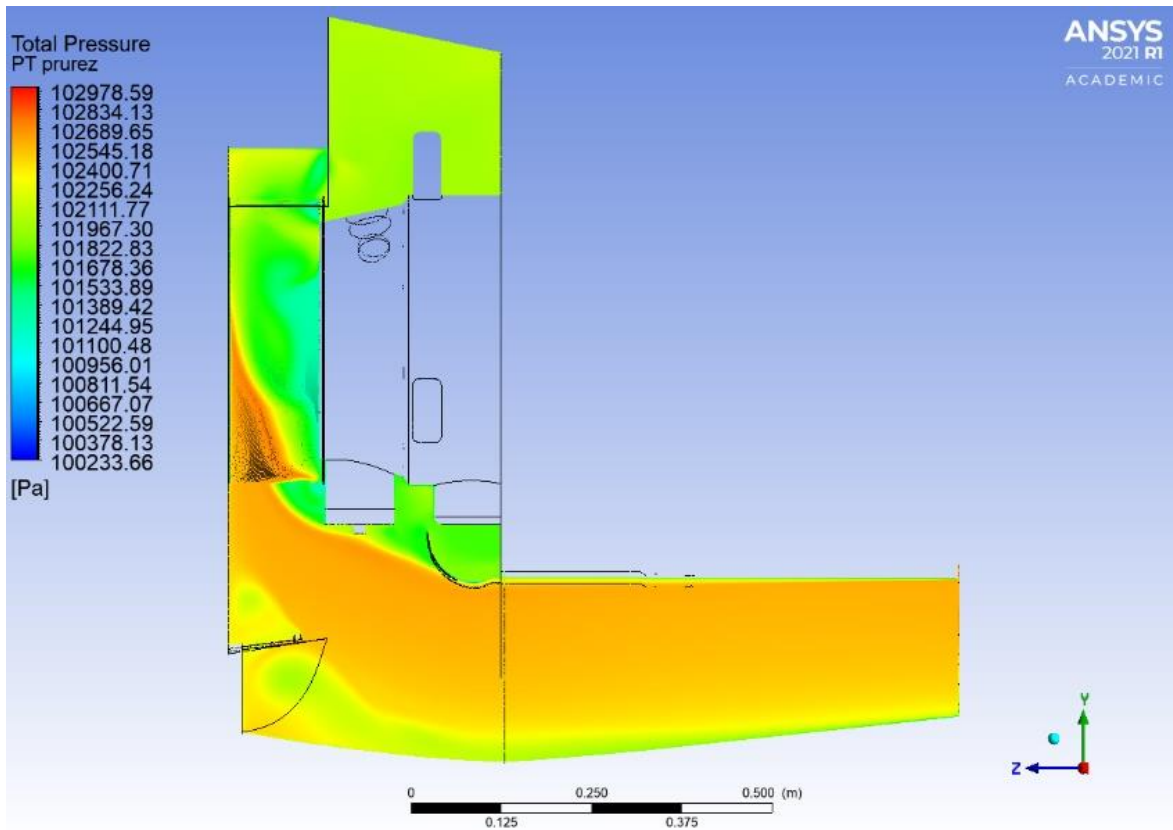
Obr. 39 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel -3 stupně



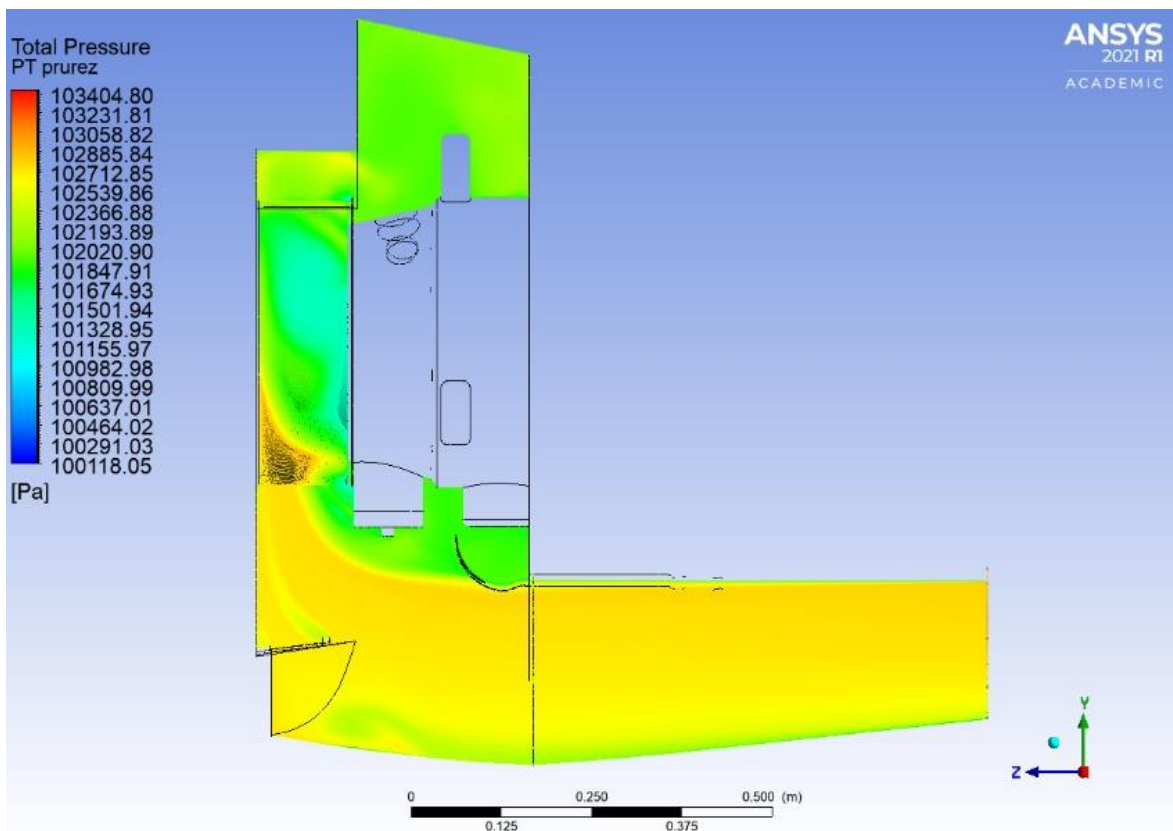
Obr. 40 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 0



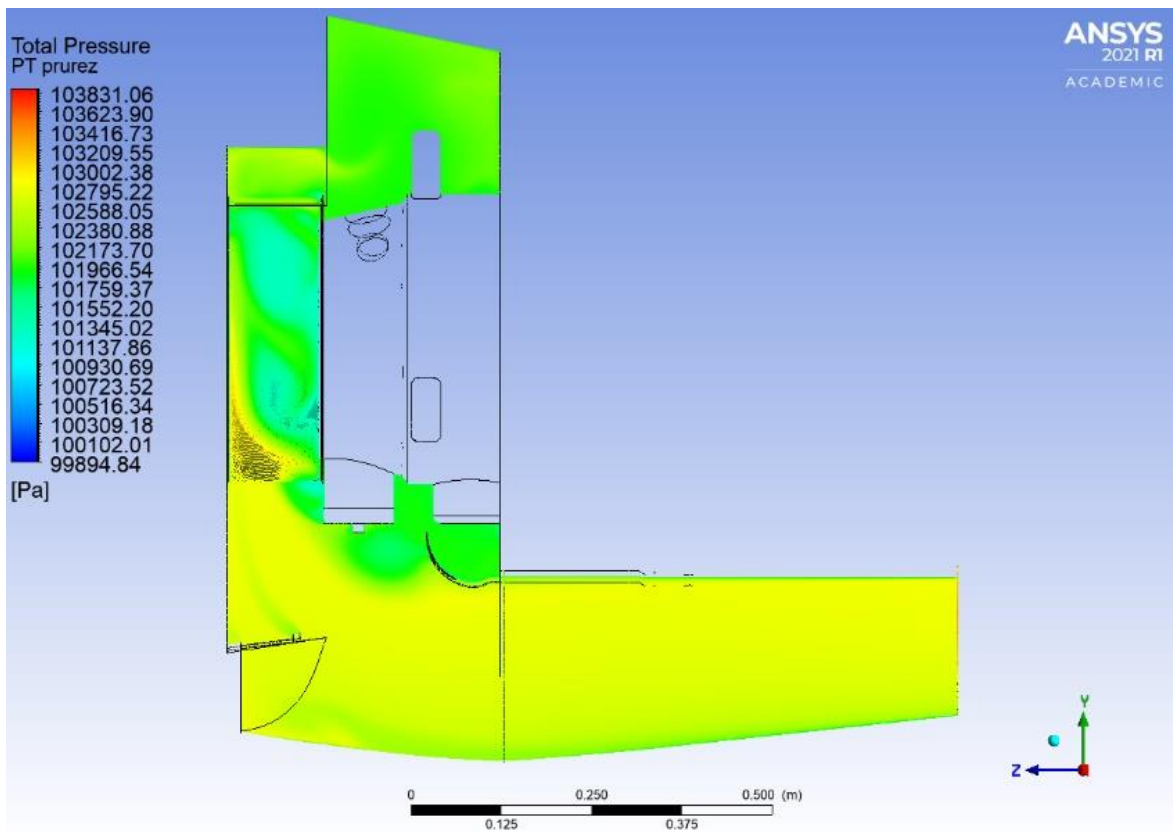
Obr. 41 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 3 stupně



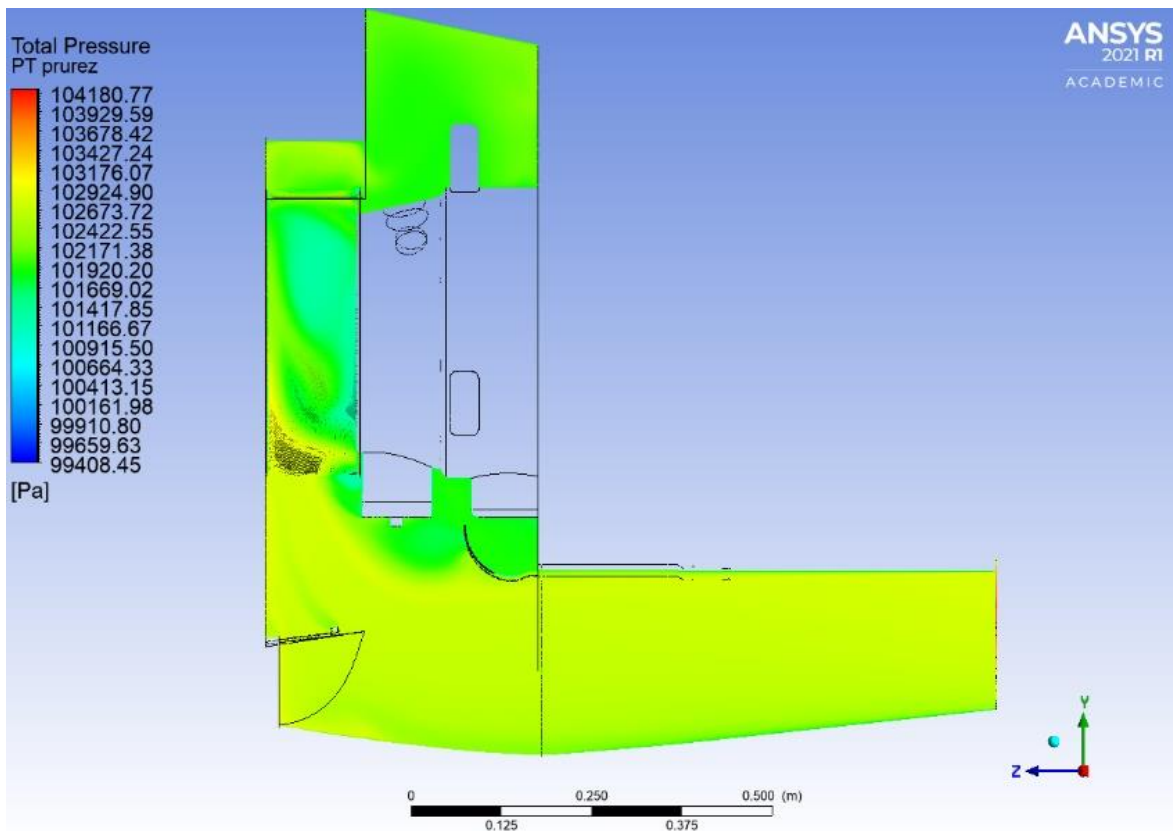
Obr. 42 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 6 stupňů



Obr. 43 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 9 stupňů



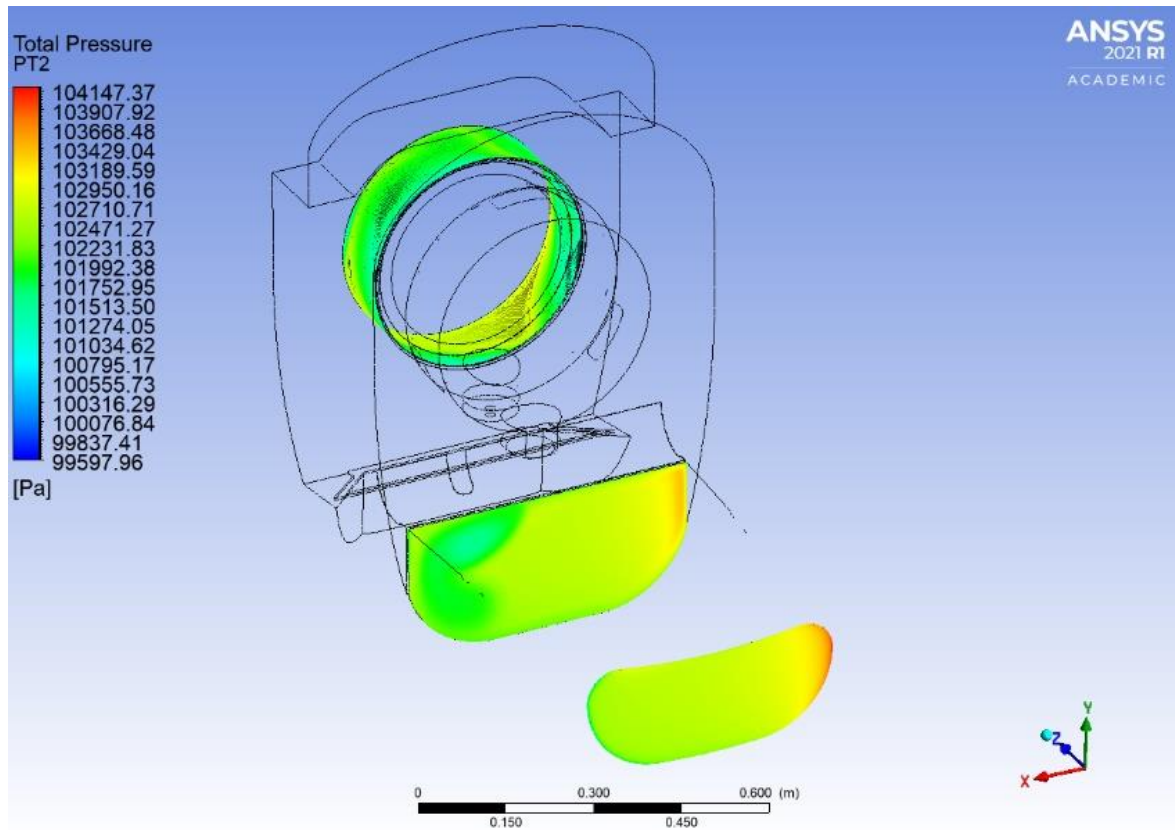
Obr. 44 - Tlakové pole v meridiálním řezu pro úhel 12 stupňů



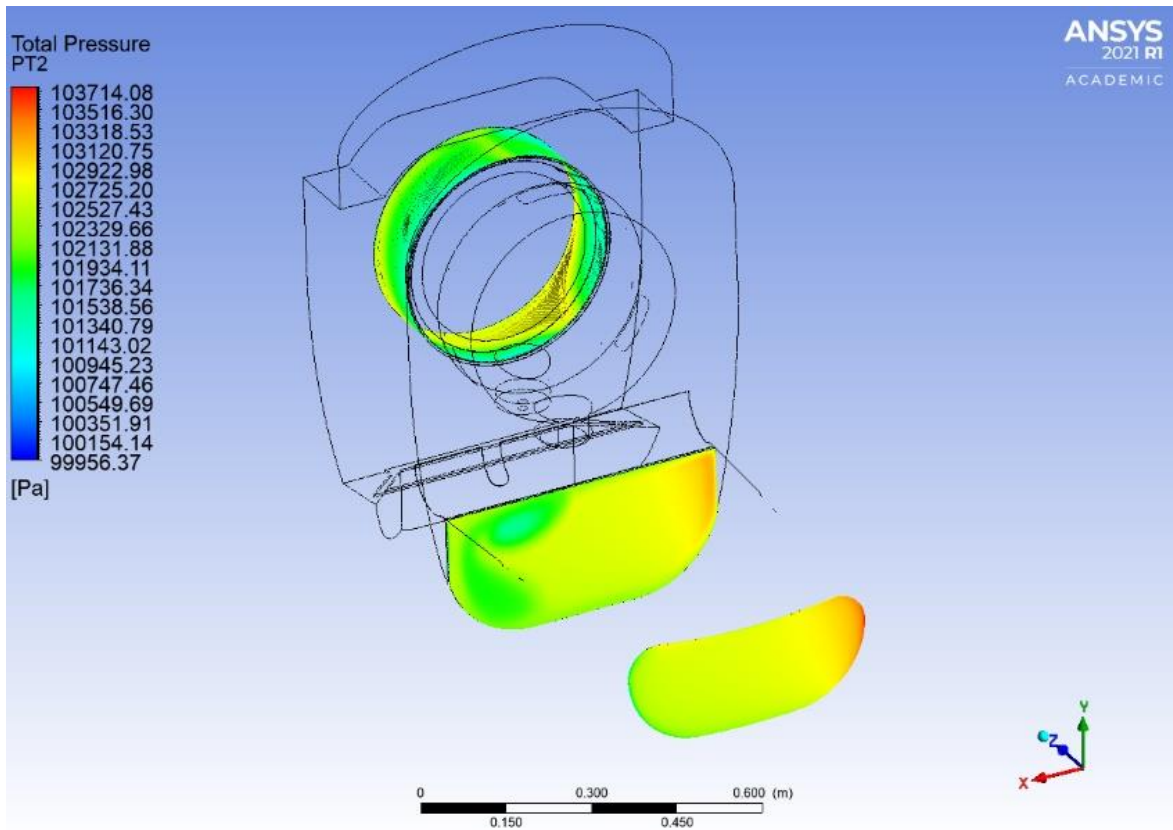
Obr. 45 - Tlakové pole v meridiálním řezu úhel 15 stupňů

PŘÍLOHA 2

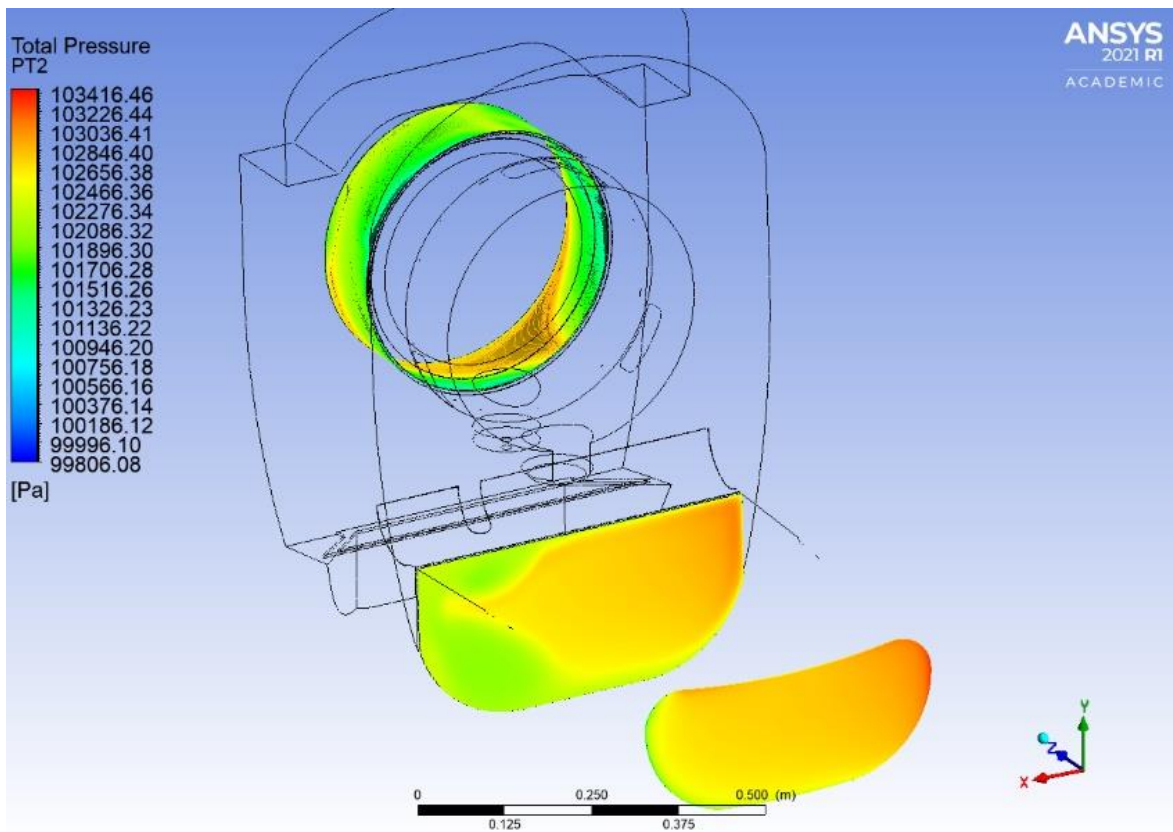
Zobrazení polí celkových tlaků na vstupu, výstupu a přechodu (PT0, PT1, PT2) vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



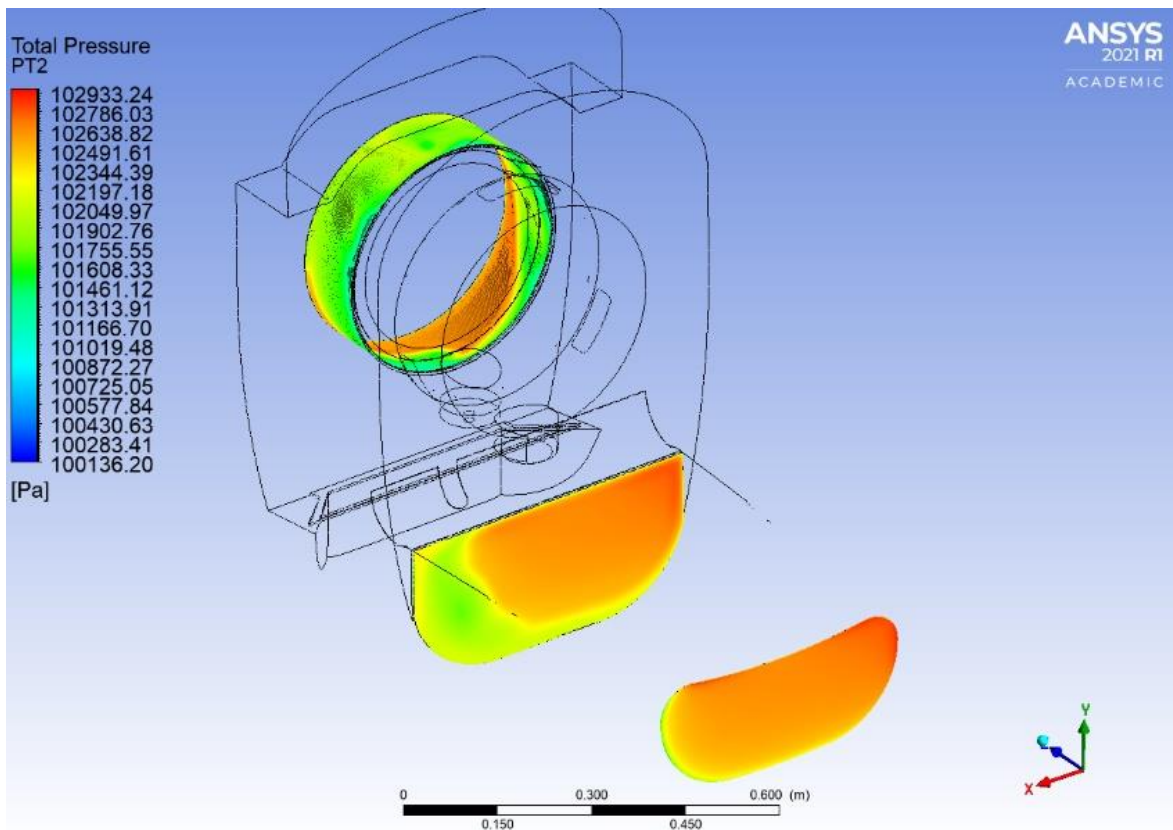
Obr. 46 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -15 stupňů



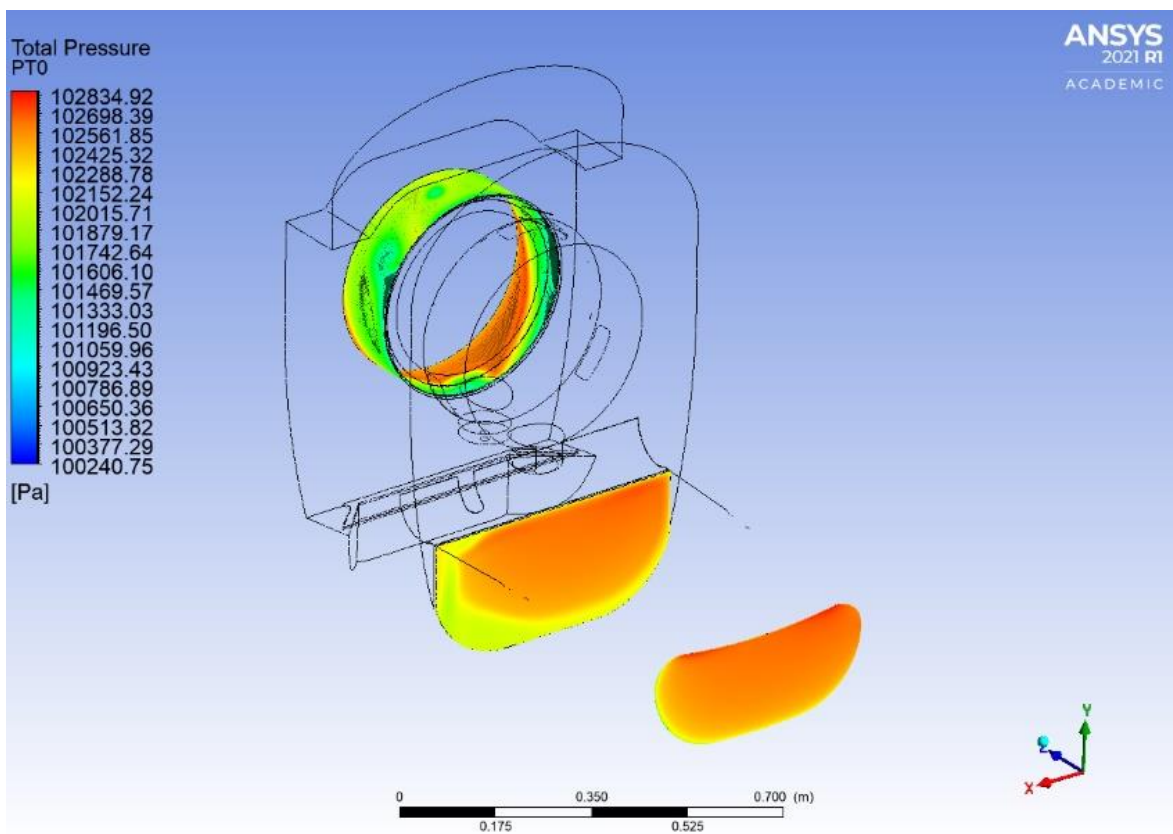
Obr. 47 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -12 stupňů



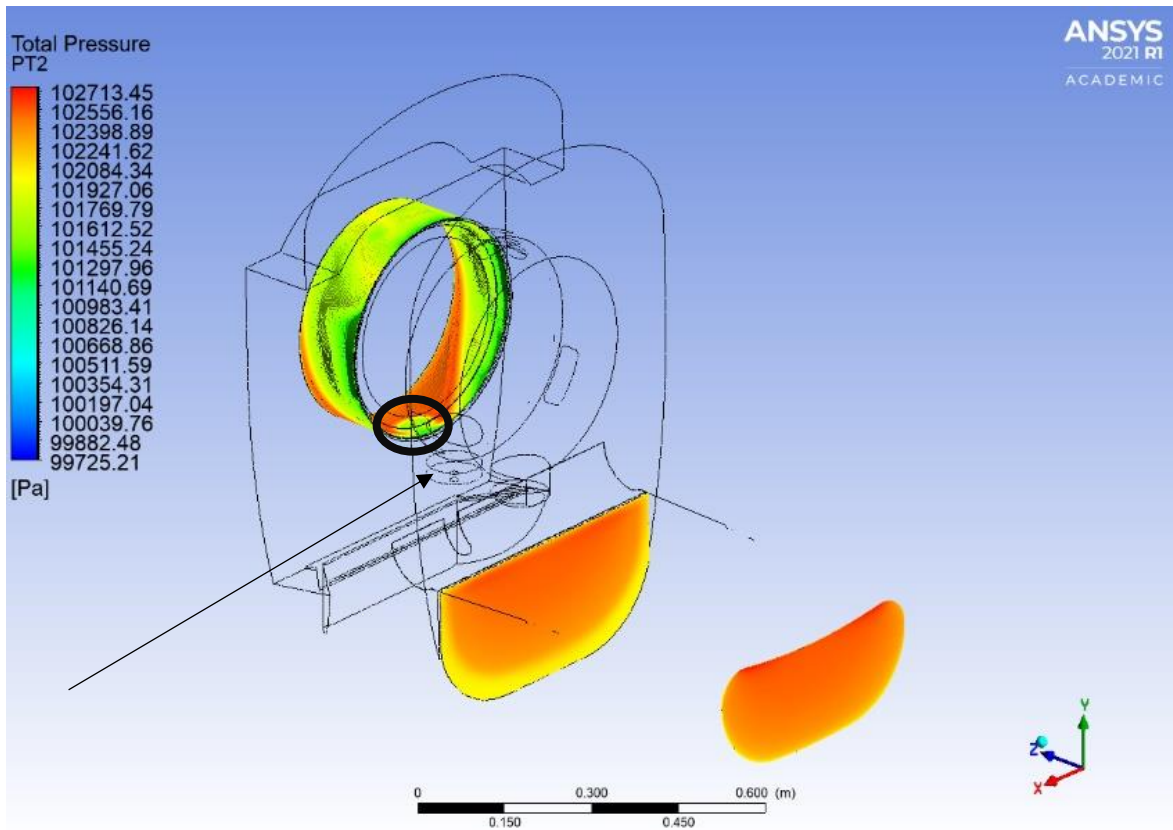
Obr. 48 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -9 stupňů



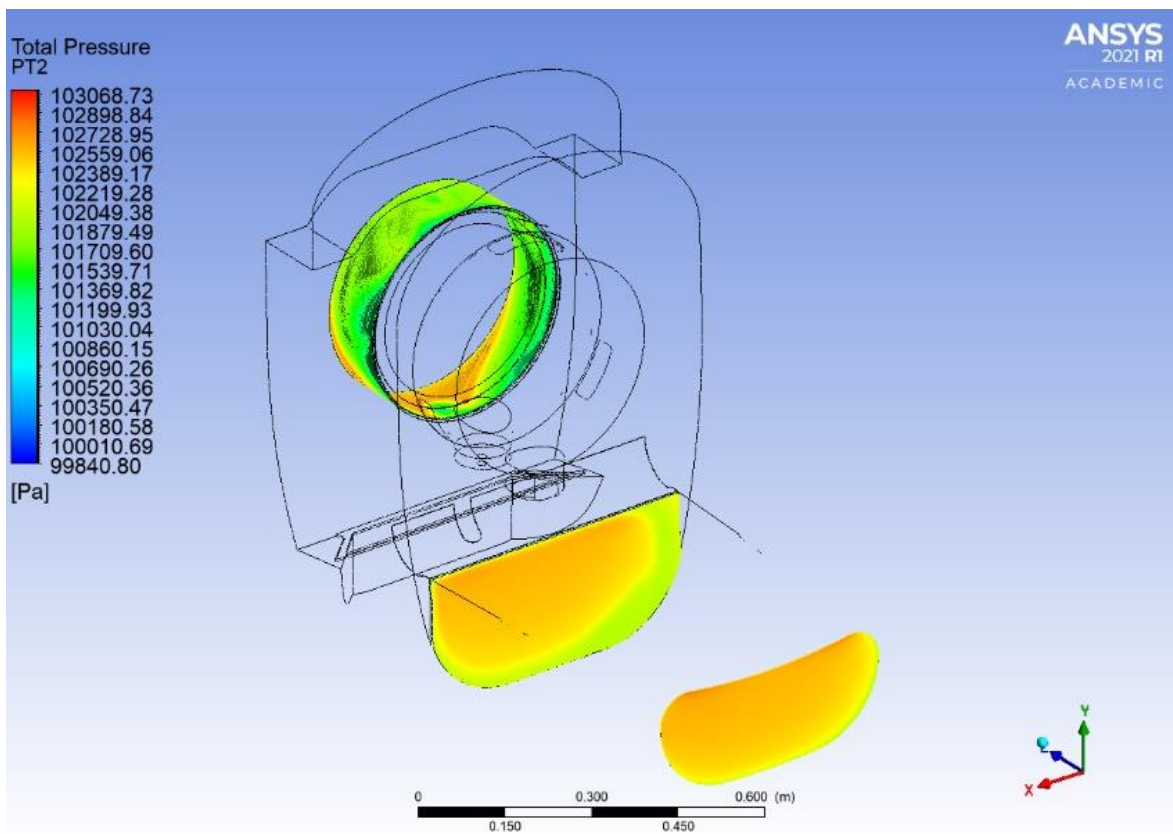
Obr. 49 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -6 stupňů



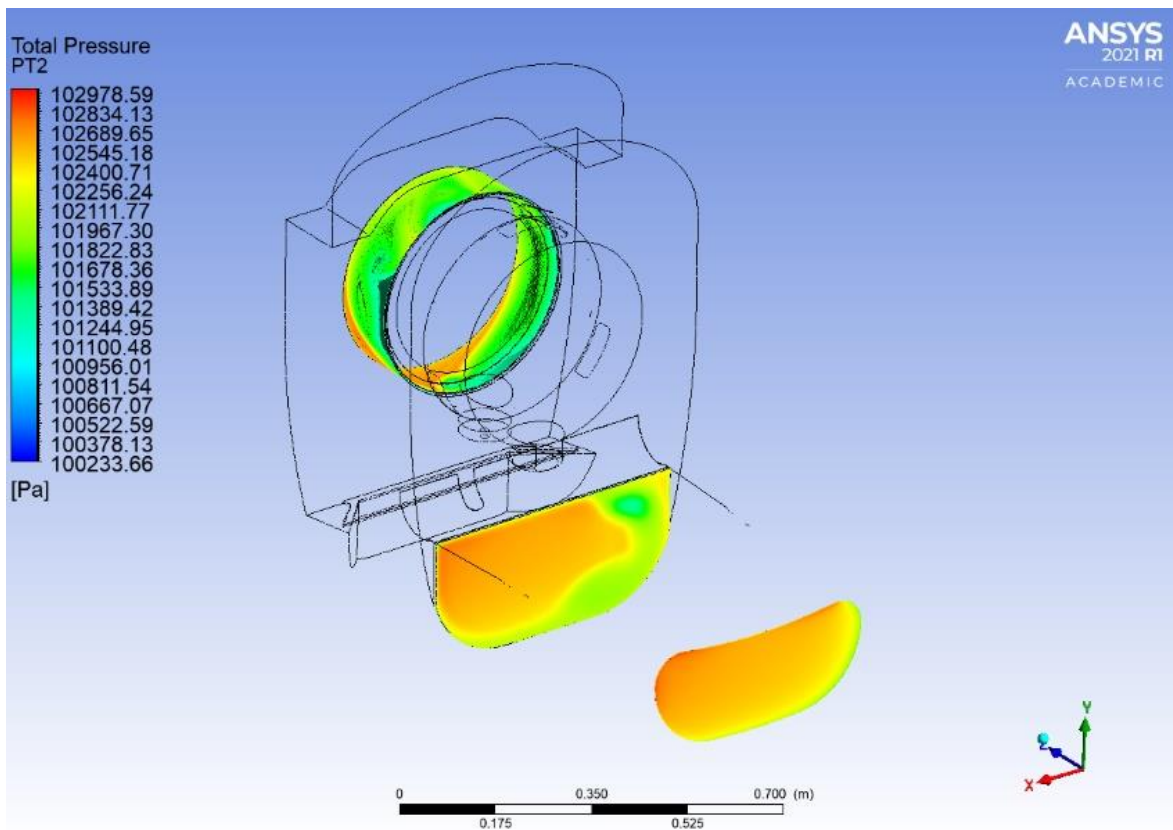
Obr. 50 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel -3 stupně



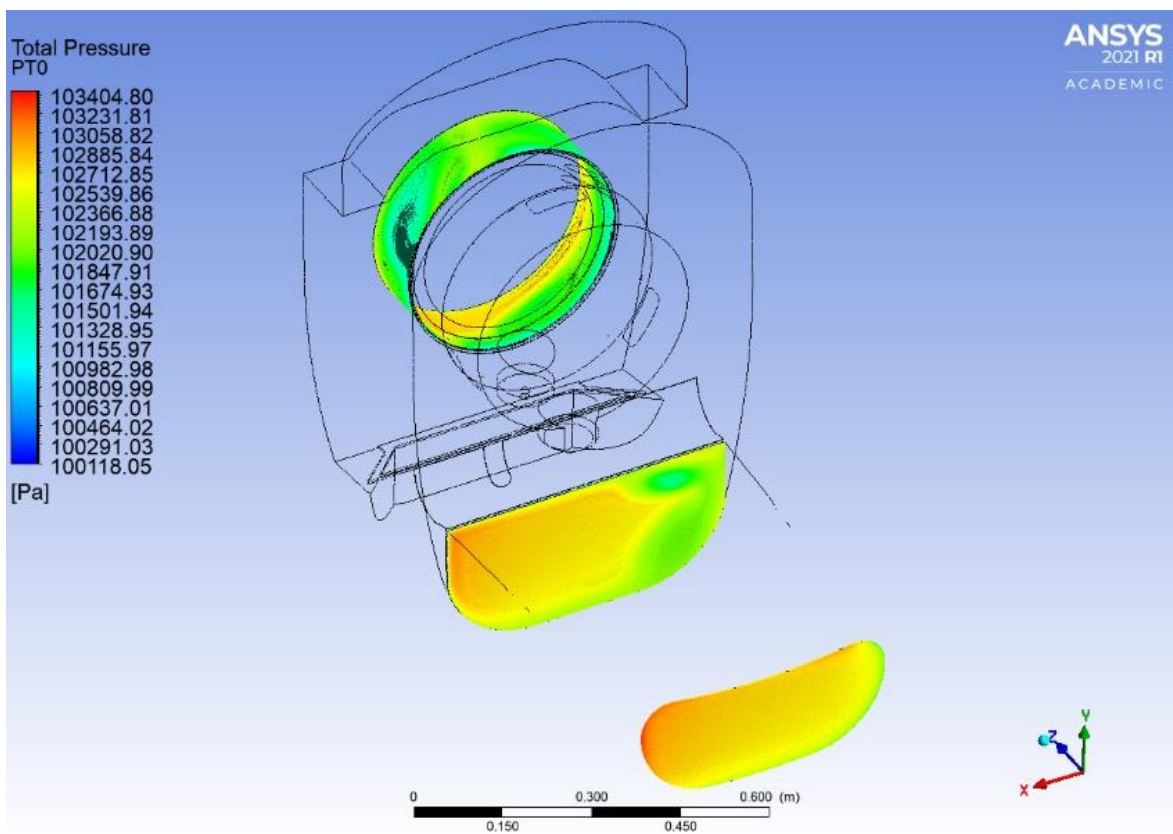
Obr. 51 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 0 stupňů



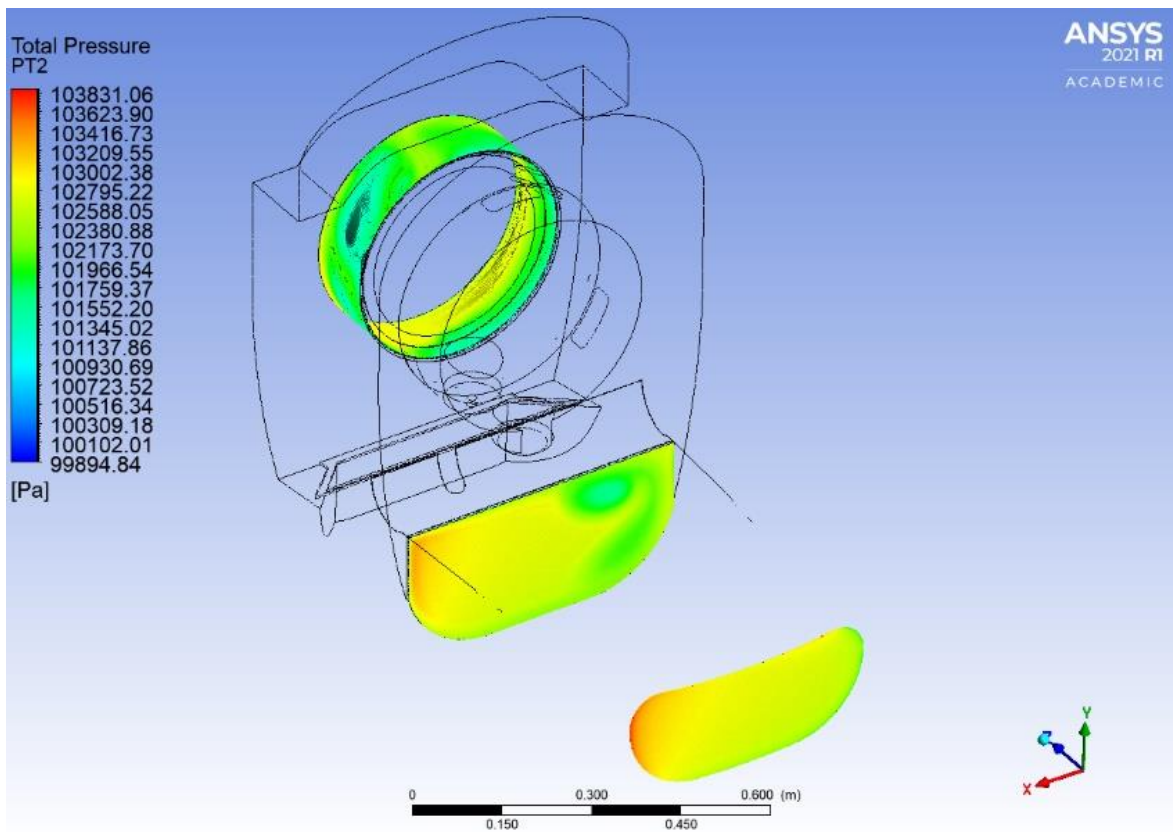
Obr. 52 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 3 stupně



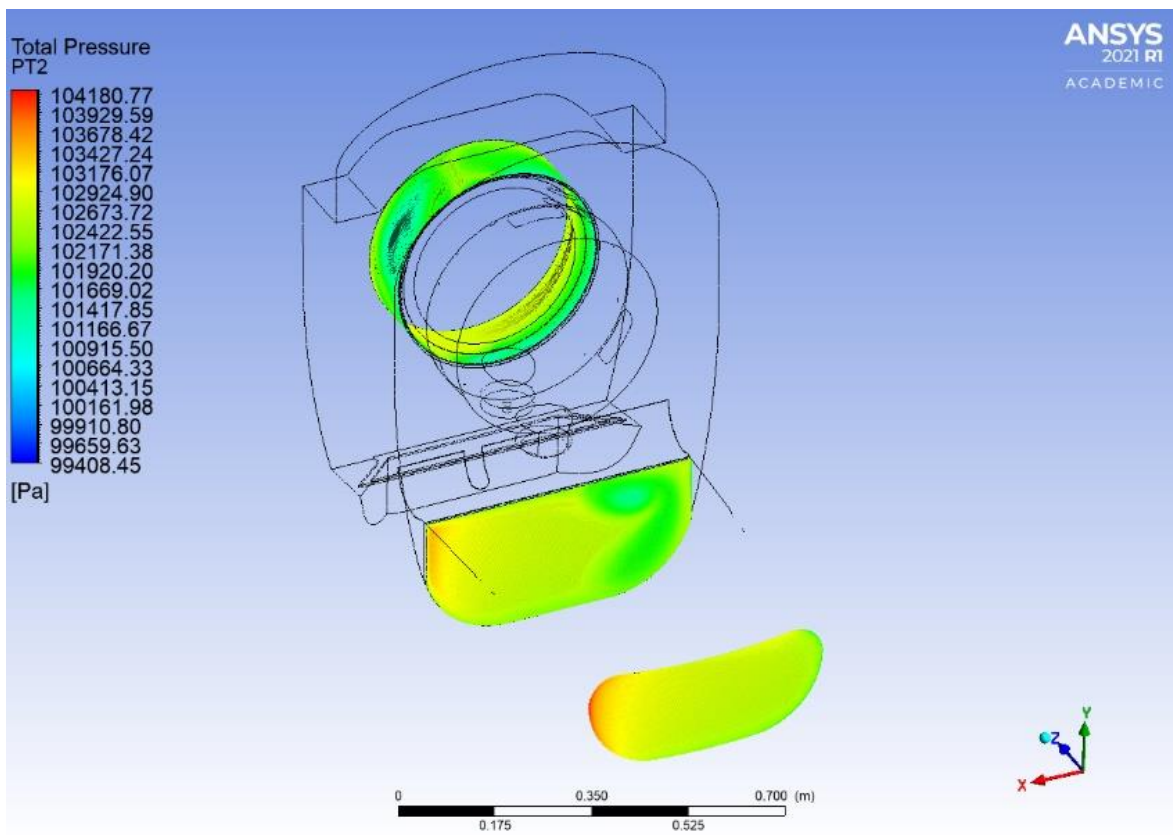
Obr. 53 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 6 stupňů



Obr. 54 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 9 stupňů



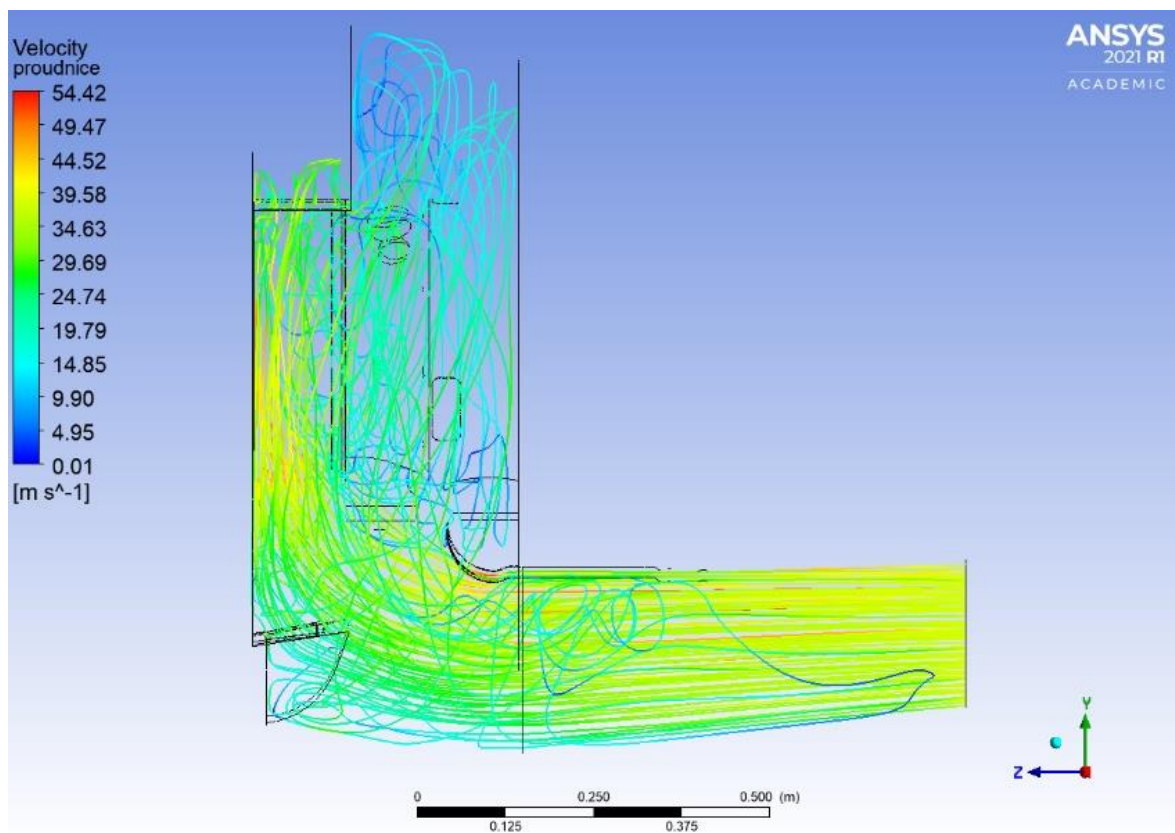
Obr. 55 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 12 stupňů



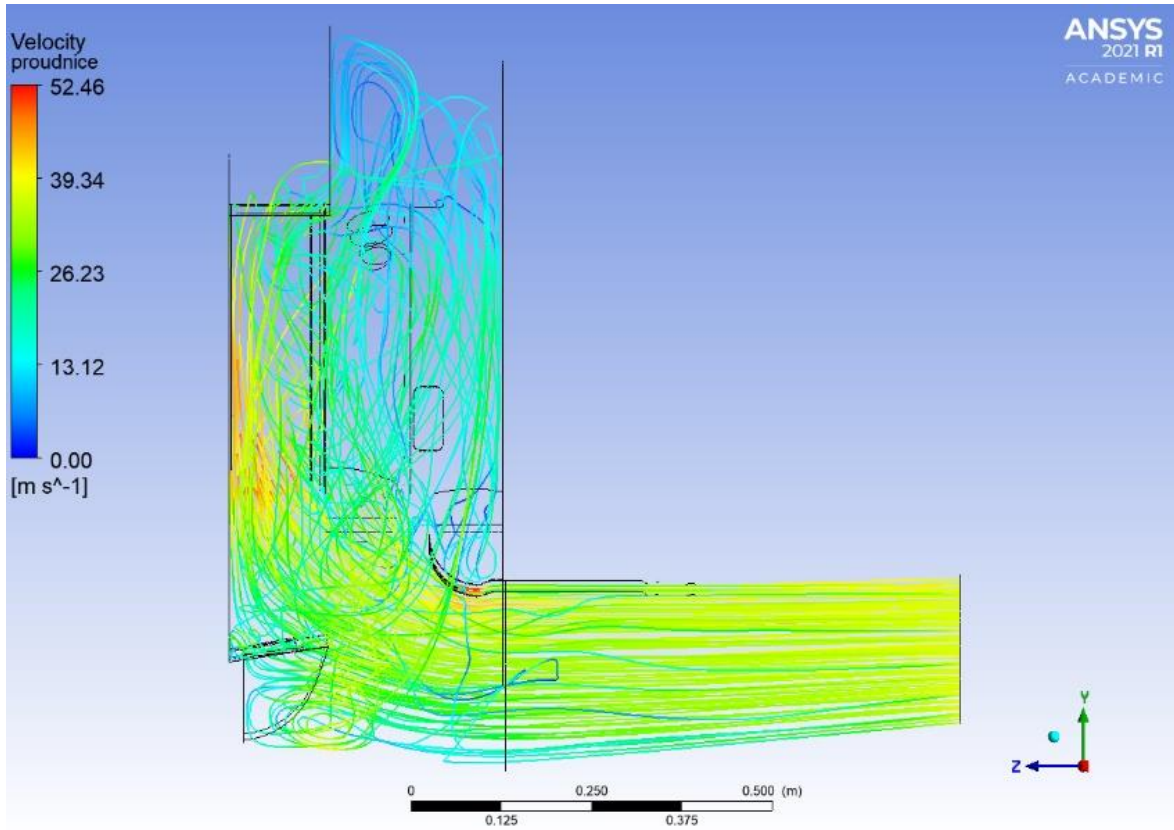
Obr. 56 - Tlakové pole vyobrazené v oblastech PT0, PT1, PT2 pro úhel 15 stupňů

PŘÍLOHA 3

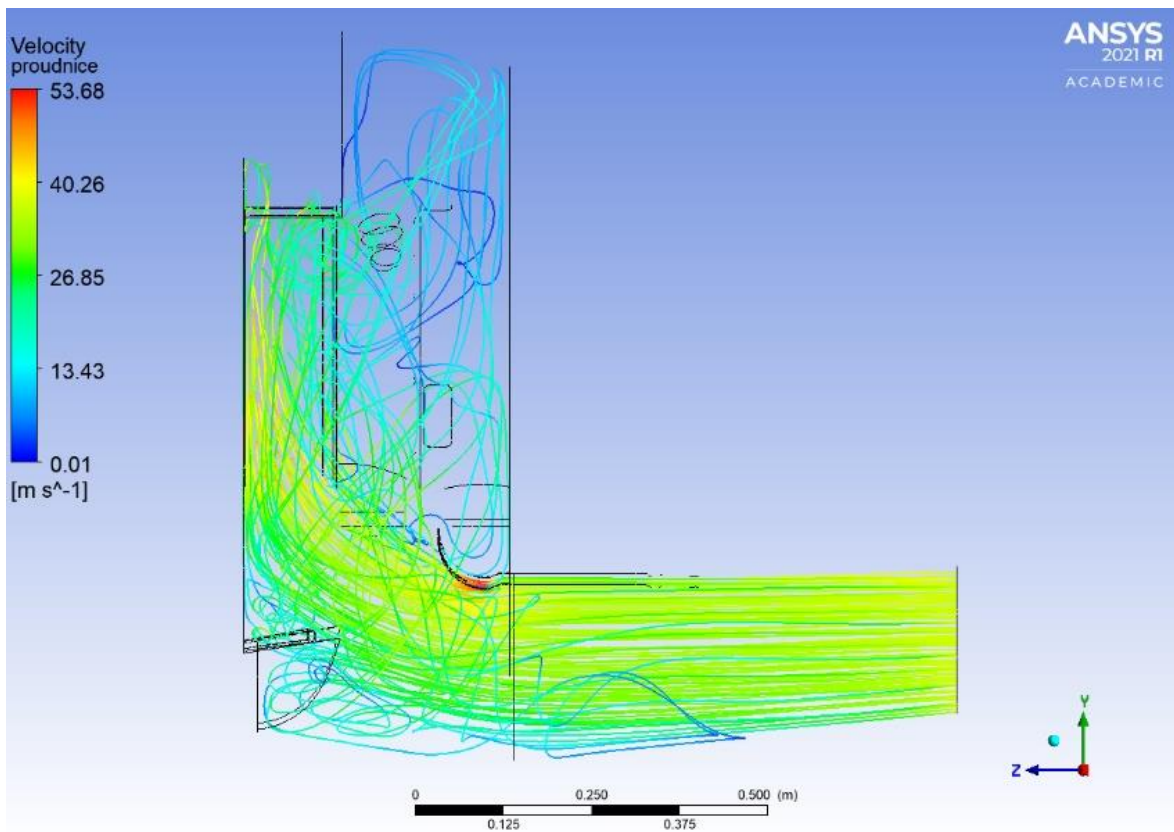
Zobrazení 3D proudnic vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



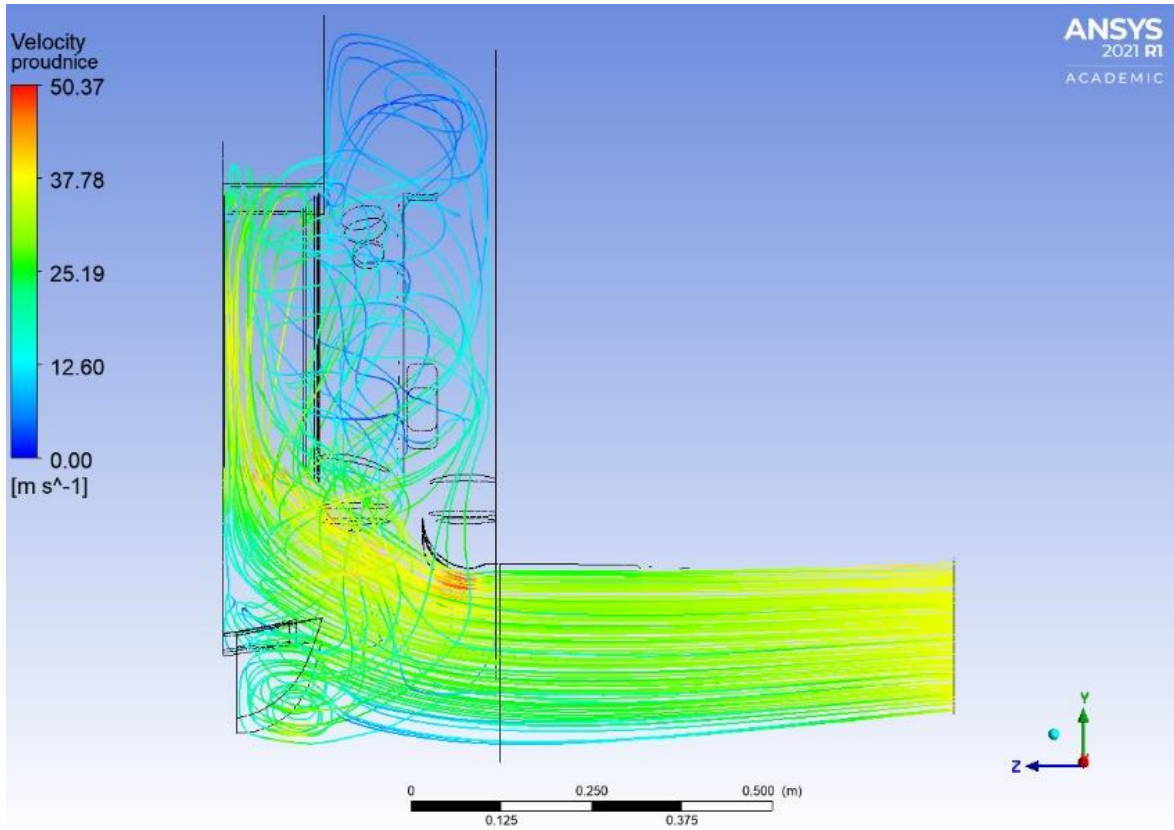
Obr. 57 - 3D proudnice pro úhel -15 stupňů



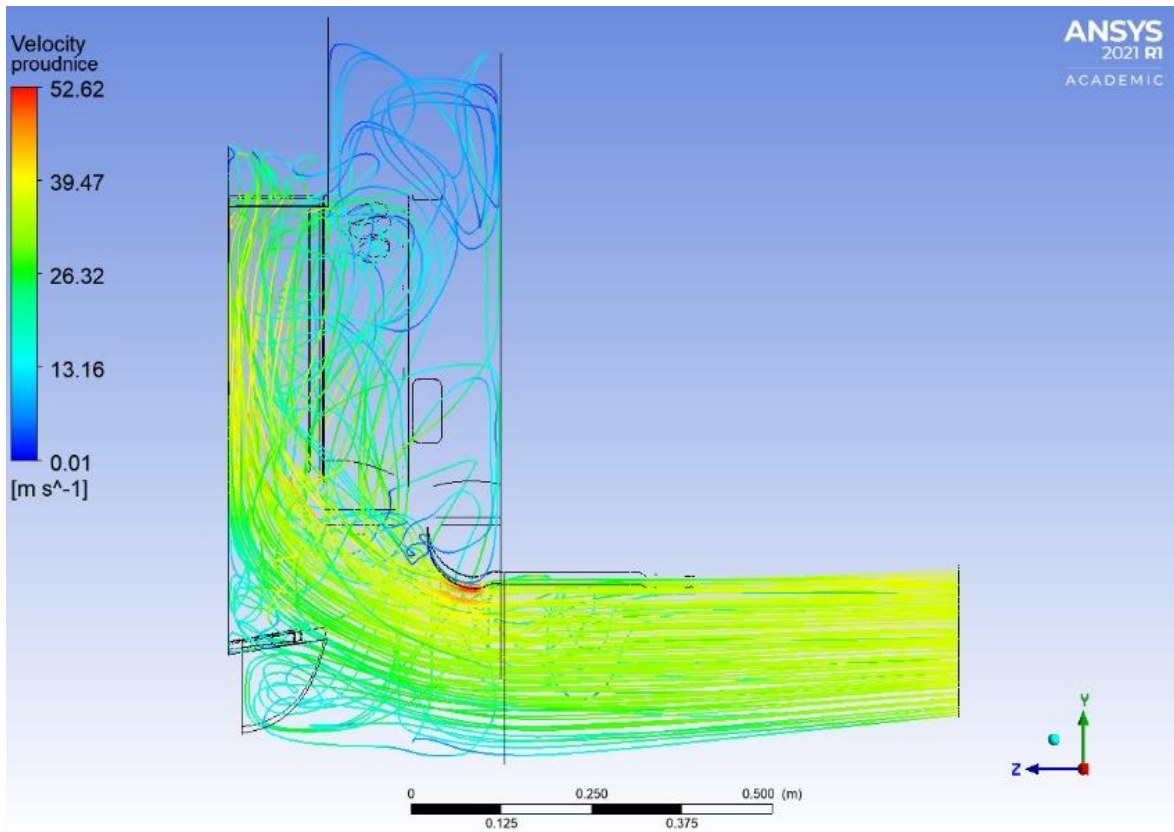
Obr. 58 - 3D proudnice pro úhel -9 stupňů



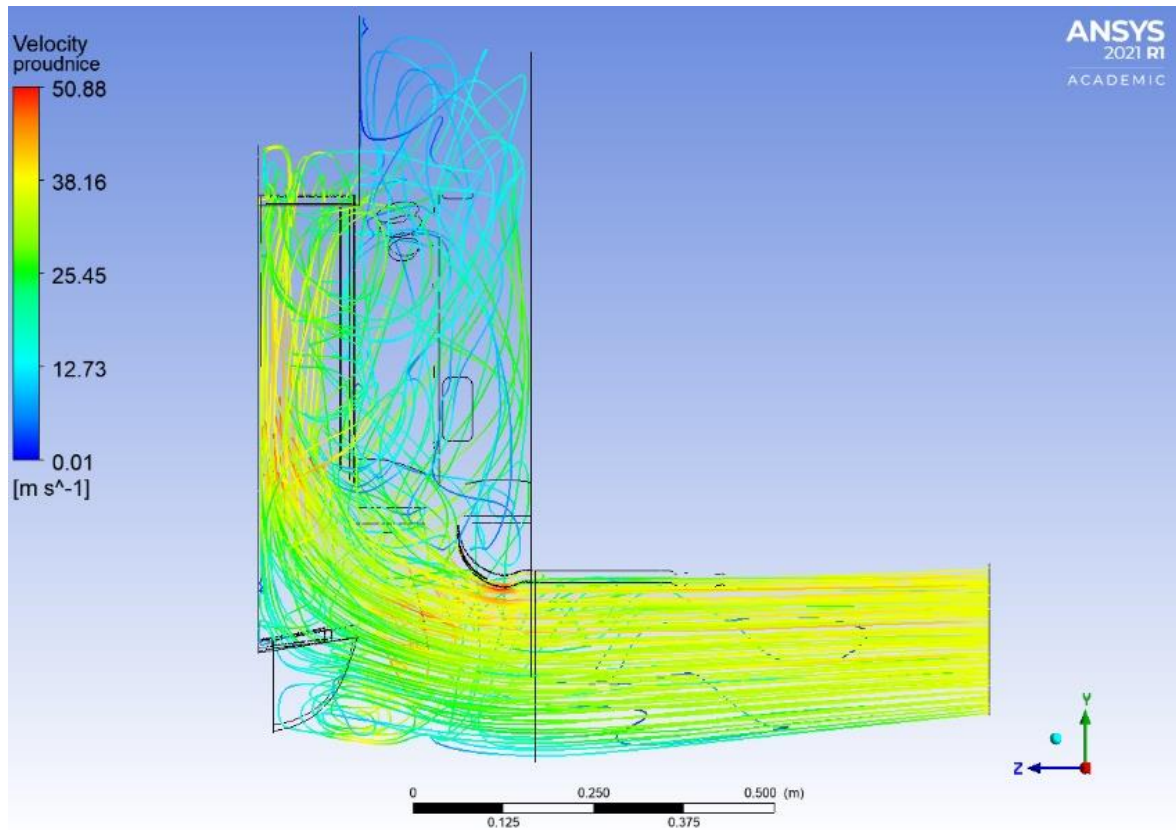
Obr. 59 - 3D proudnice pro úhel -6 stupňů



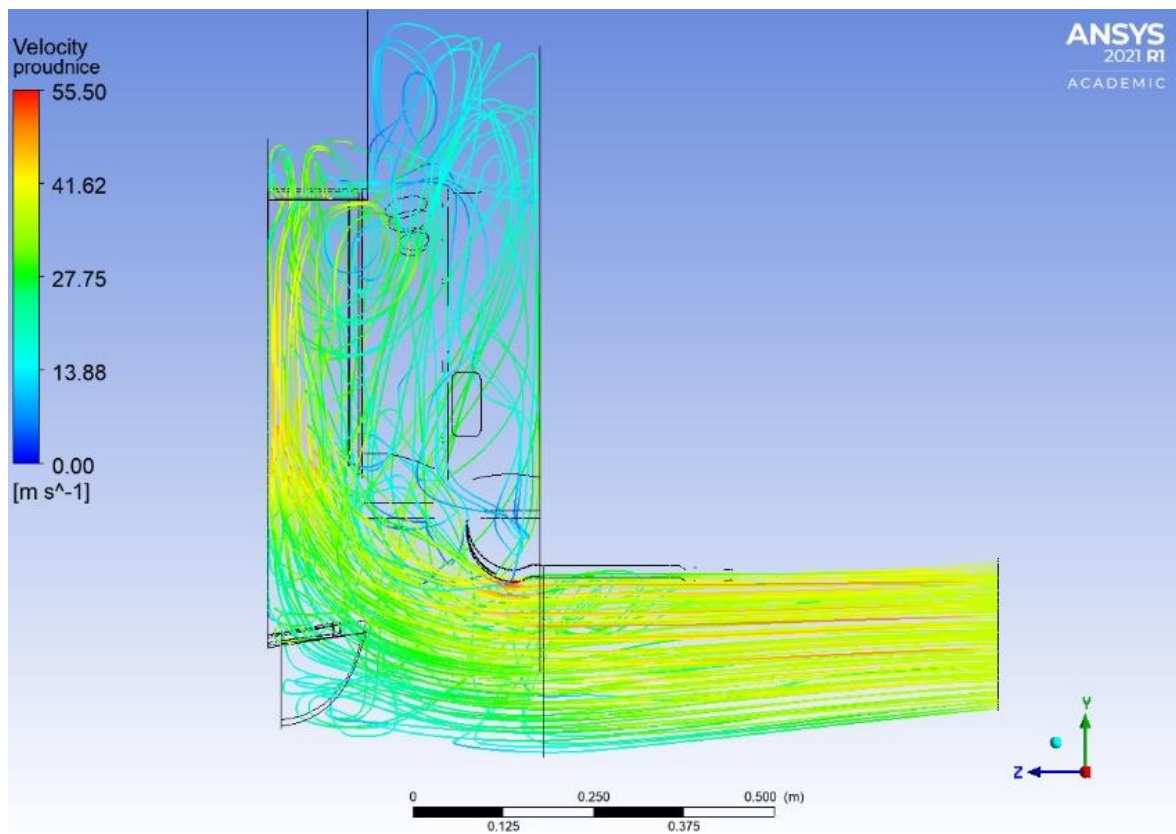
Obr. 60 - 3D proudnice pro úhel 0 stupňů



Obr. 61 - 3D proudnice pro úhel 6 stupňů



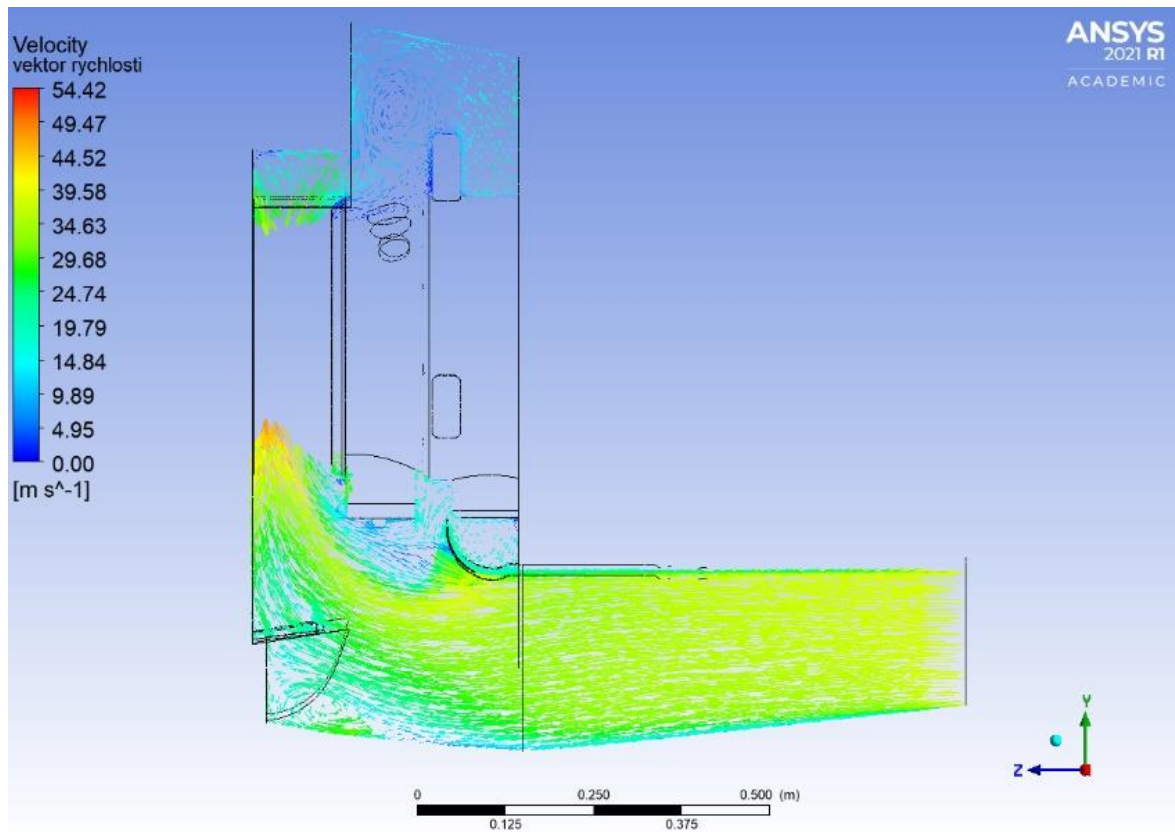
Obr. 62 - 3D proudnice pro úhel 9 stupňů



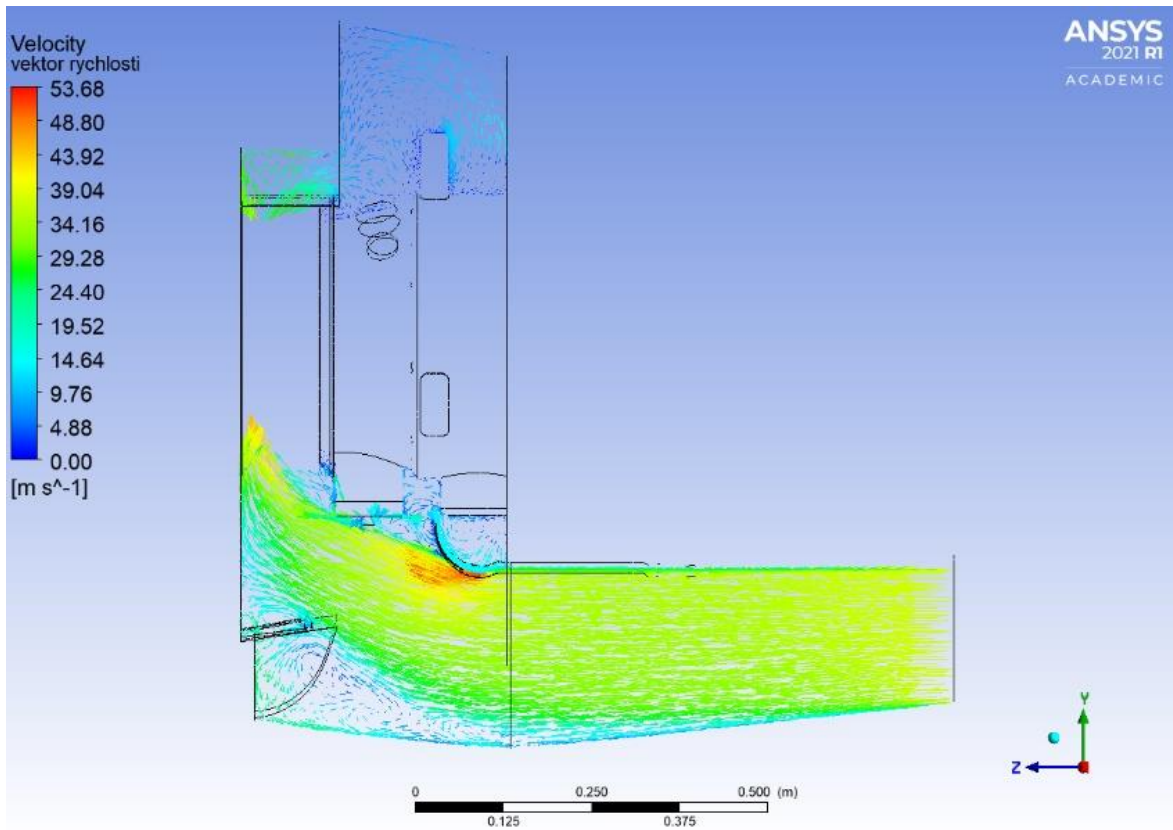
Obr. 63 - 3D proudnice pro úhel 15 stupňů

PŘÍLOHA 4

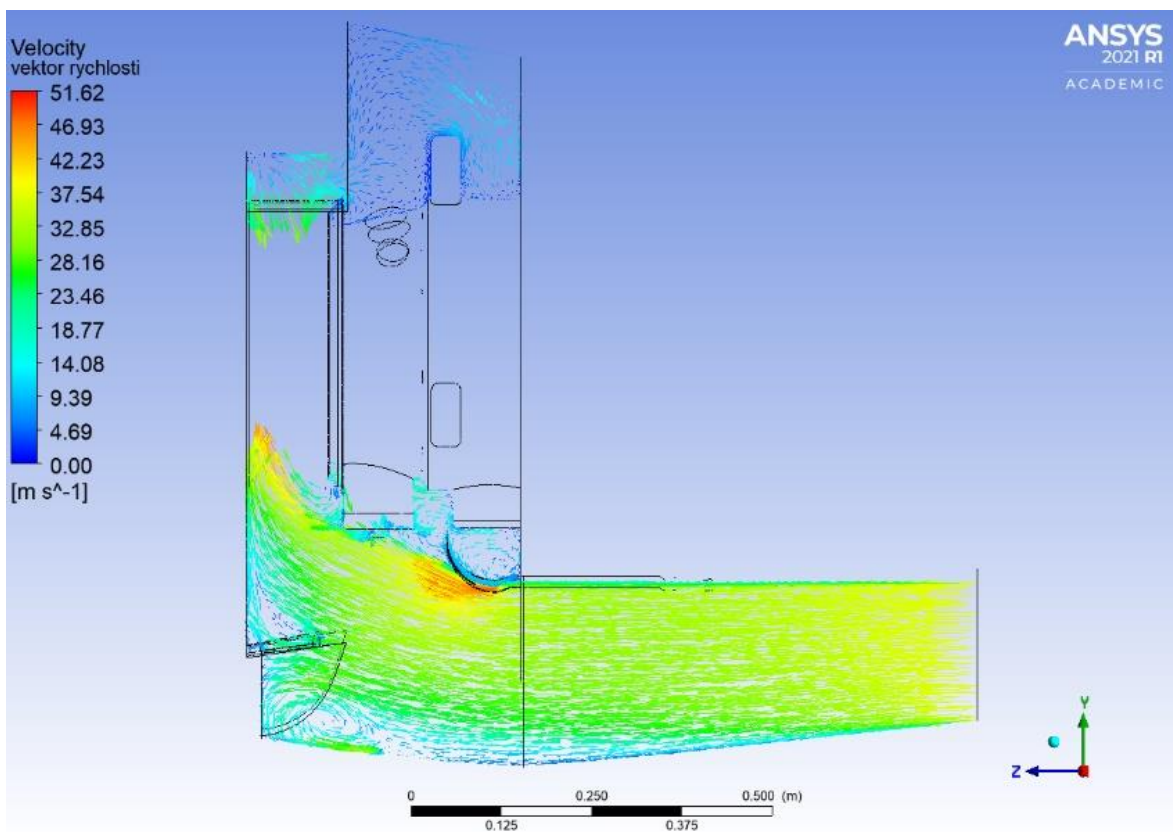
Zobrazení vektorů rychlosti zobrazené v meridiálním řezu vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



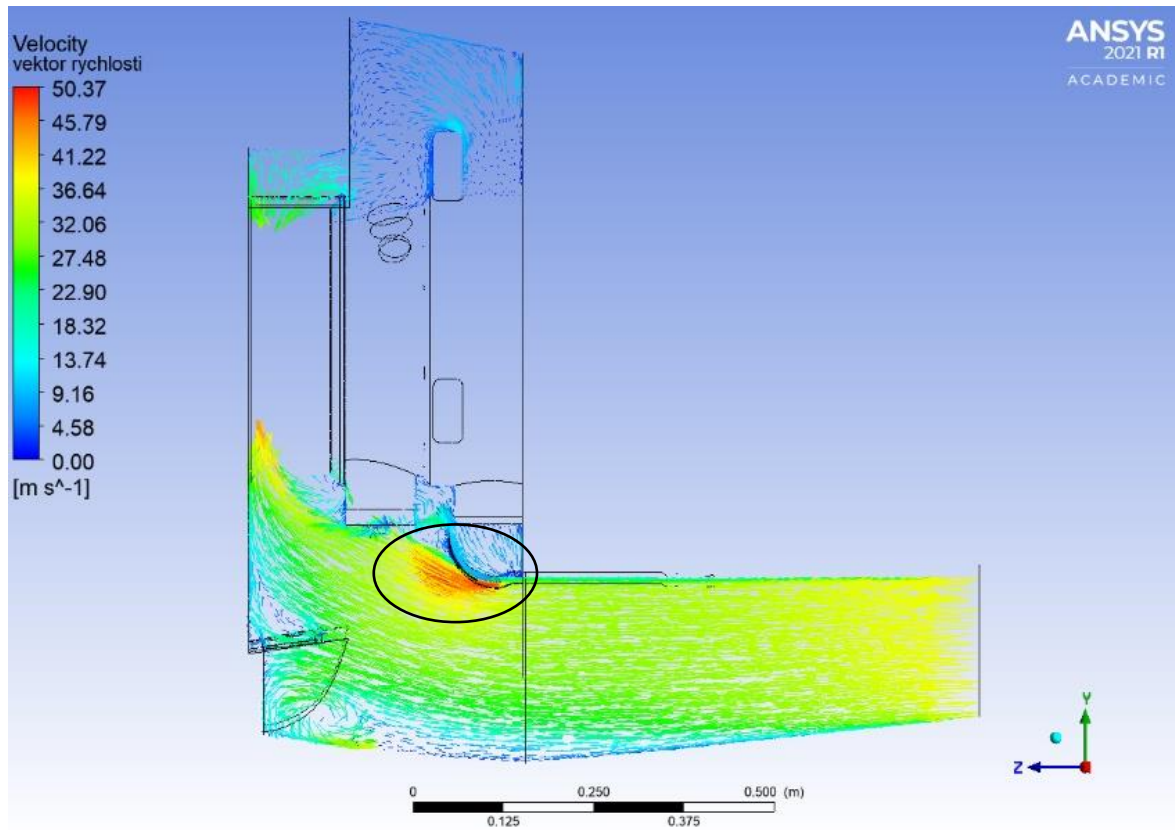
Obr. 64 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -15 stupňů



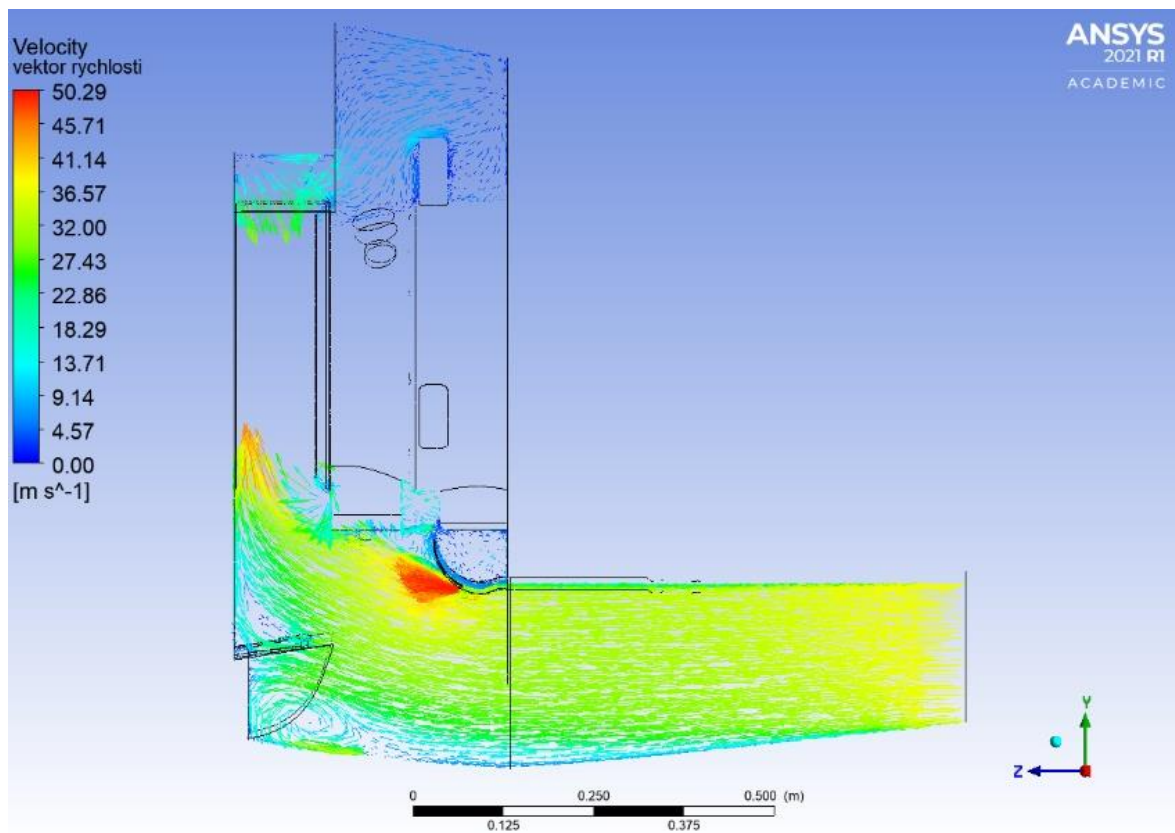
Obr. 65 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -6 stupňů



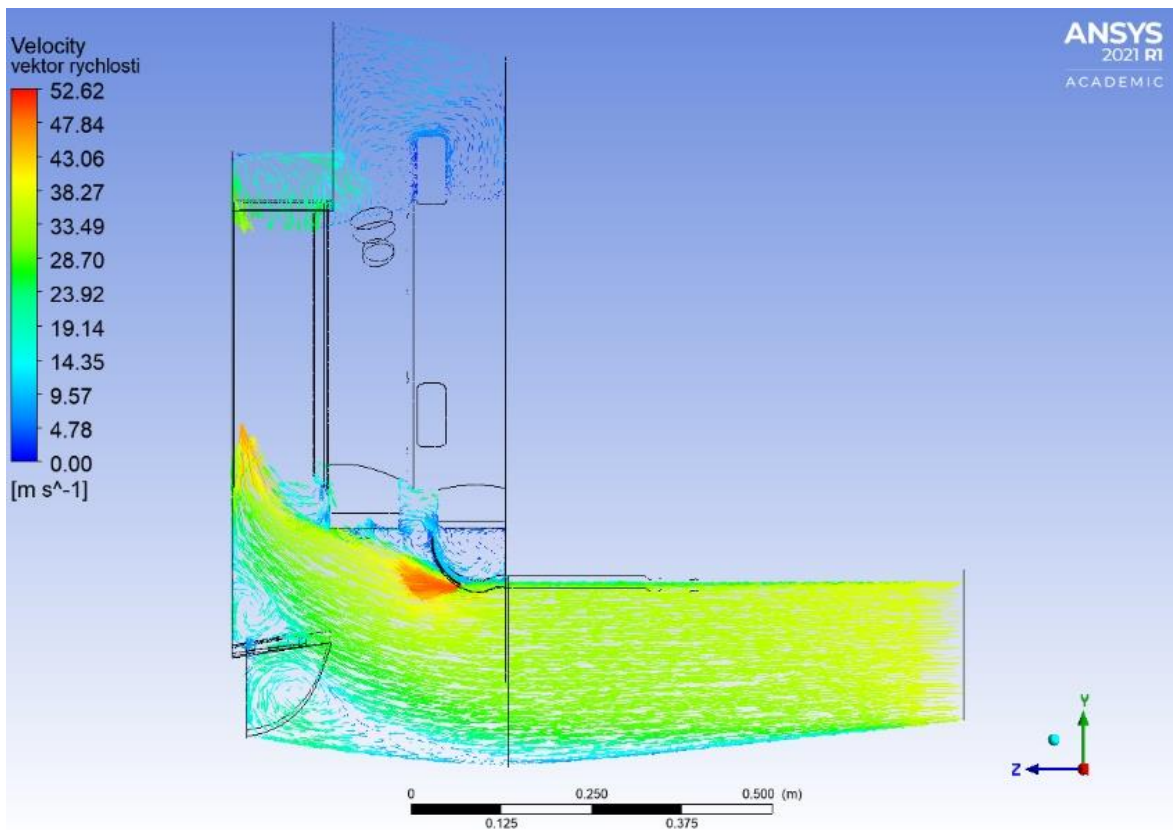
Obr. 66 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel -3 stupně



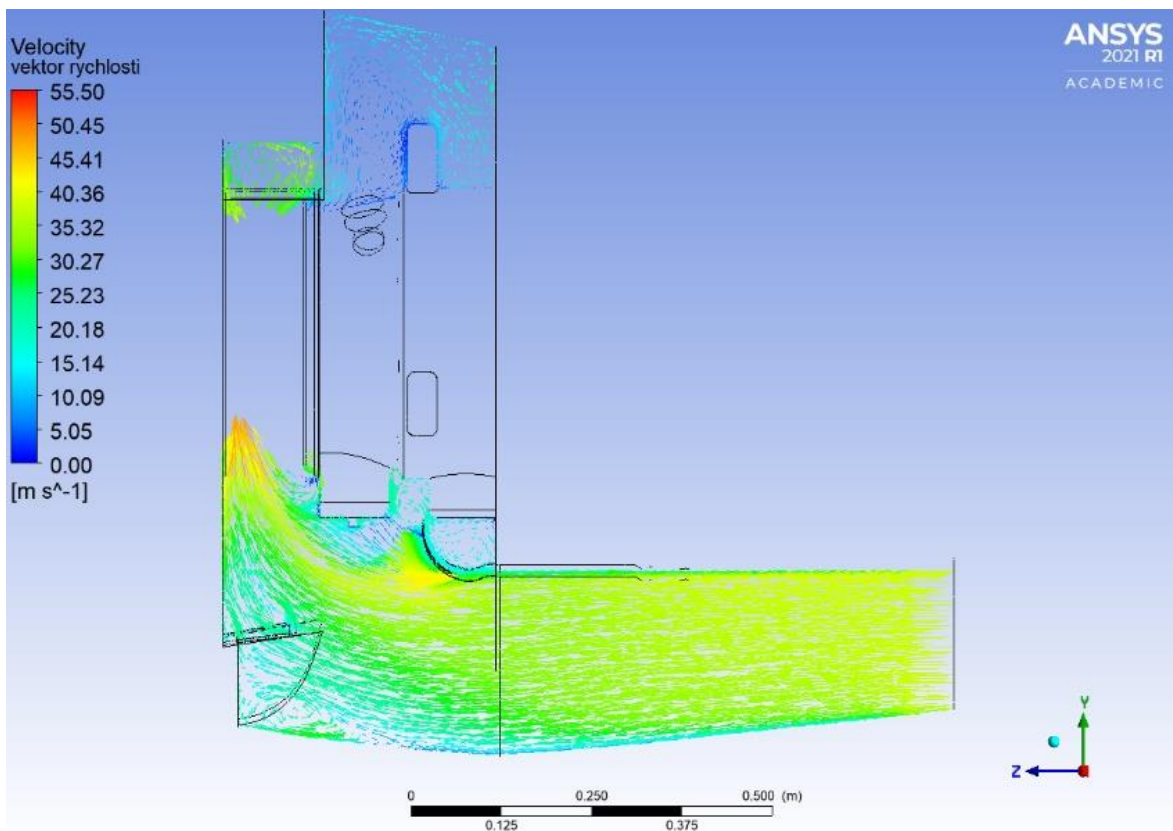
Obr. 67 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 0 stupňů



Obr. 68 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 3 stupně

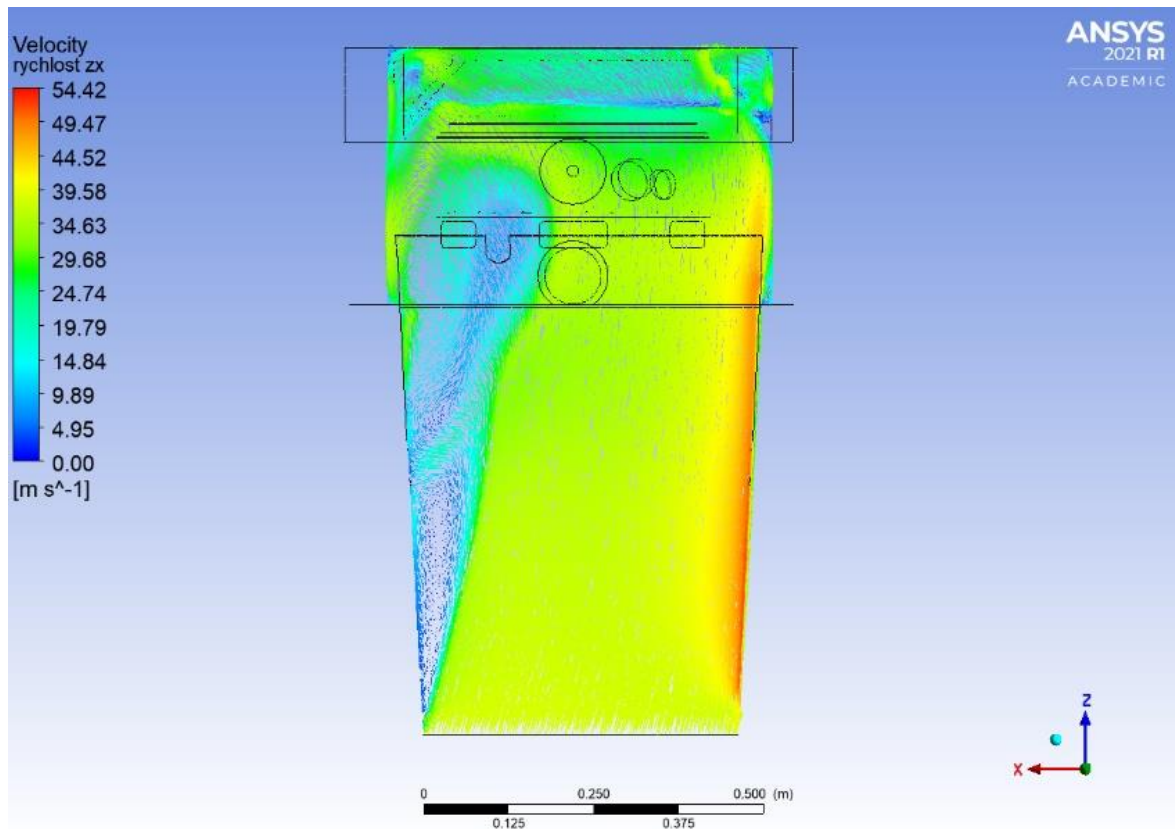


Obr. 69 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 6 stupňů

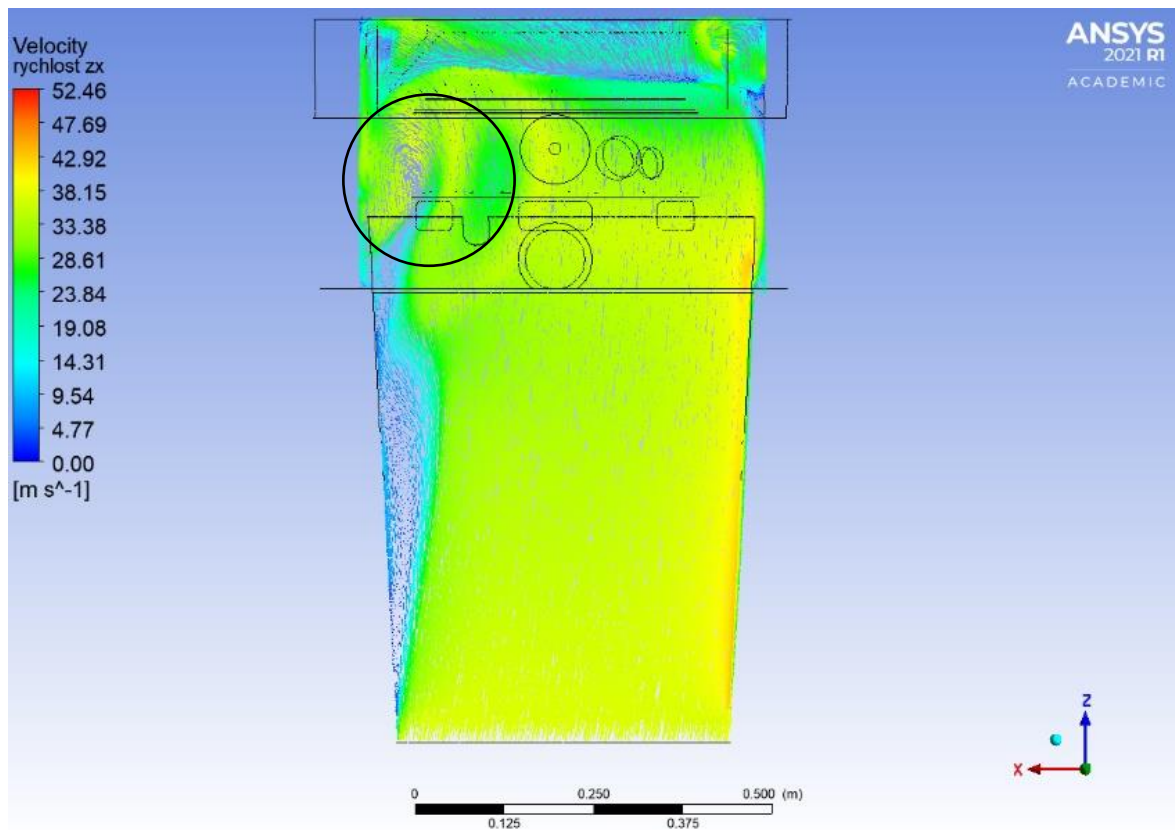


Obr. 70 - Vektory rychlosti v meridiálním řezu pro úhel 15 stupňů

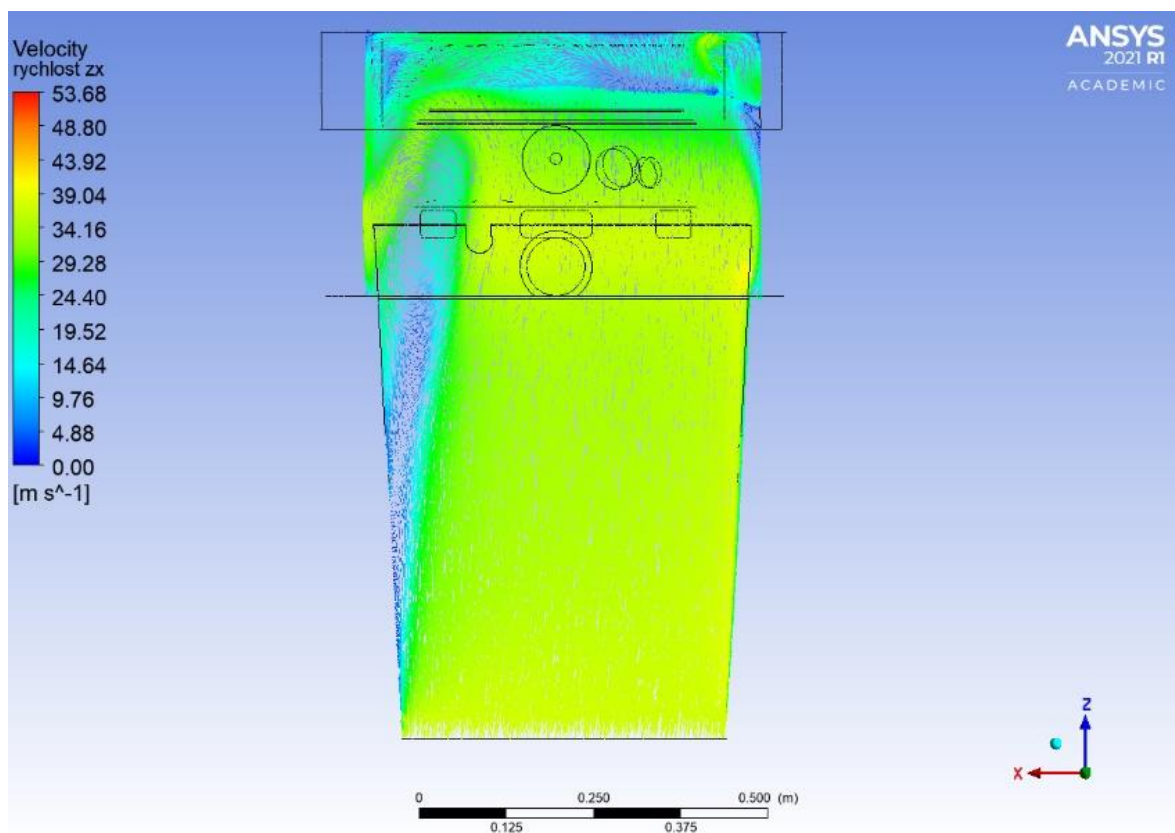
Zobrazení vektorů rychlosti v rovině xz vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



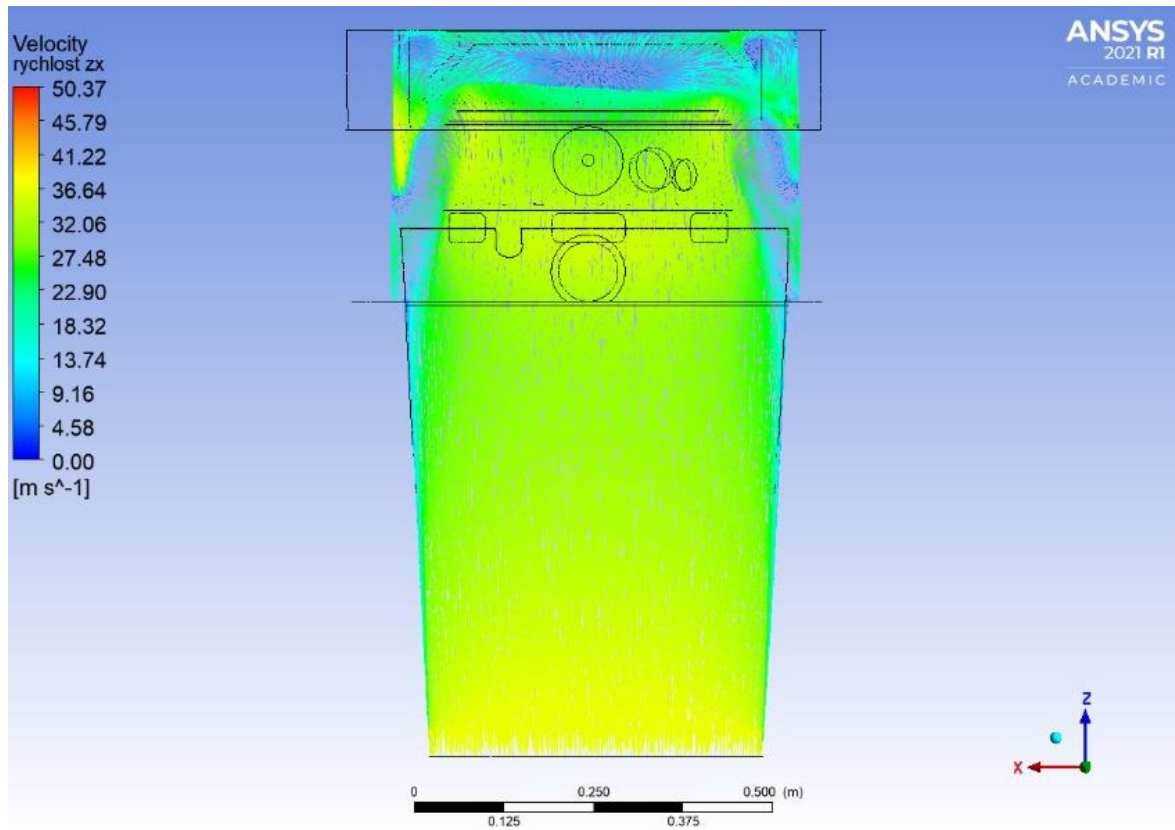
Obr. 71 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -15 stupňů



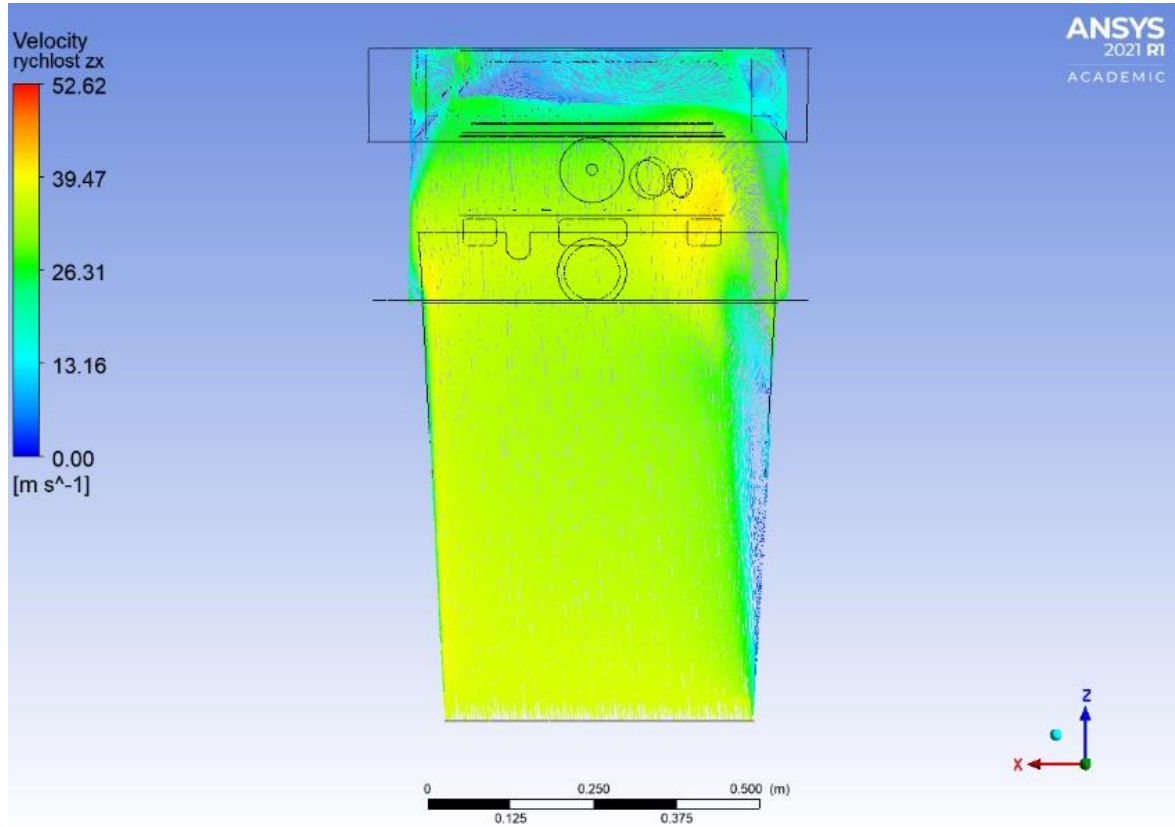
Obr. 72 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -9 stupňů



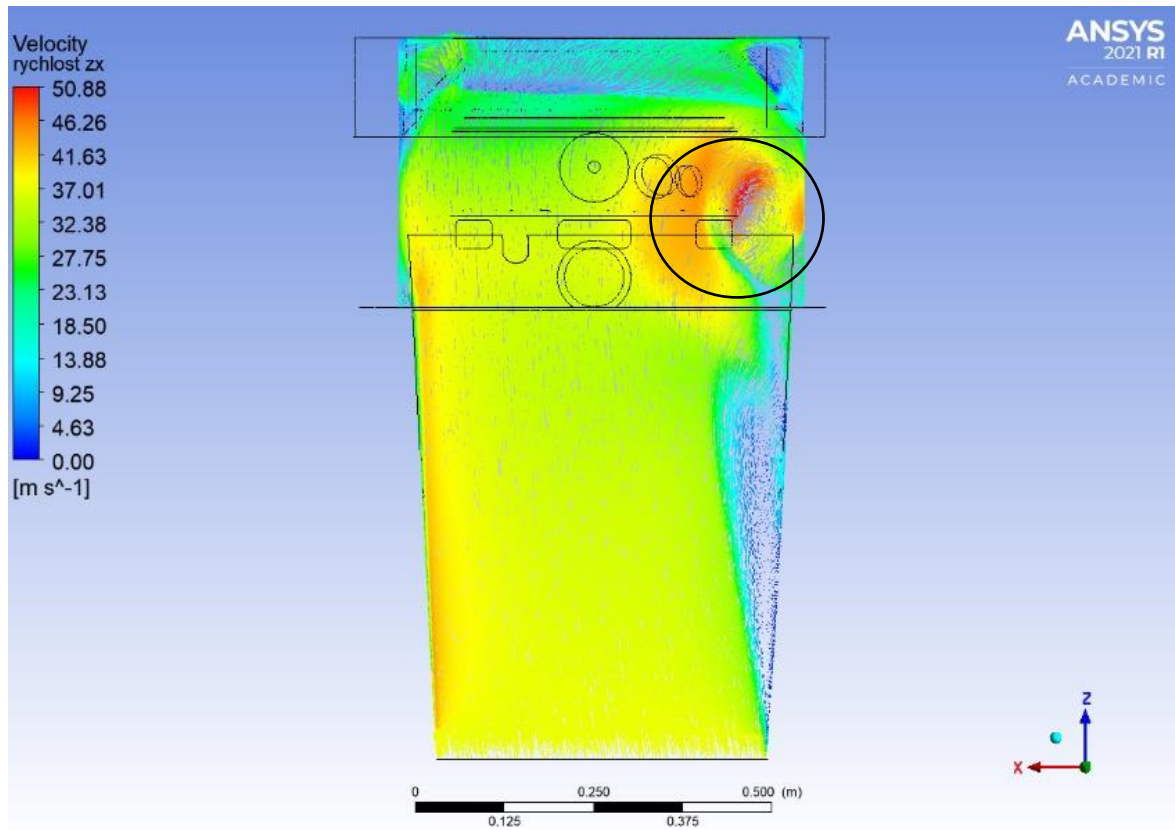
Obr. 73 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel -6 stupňů



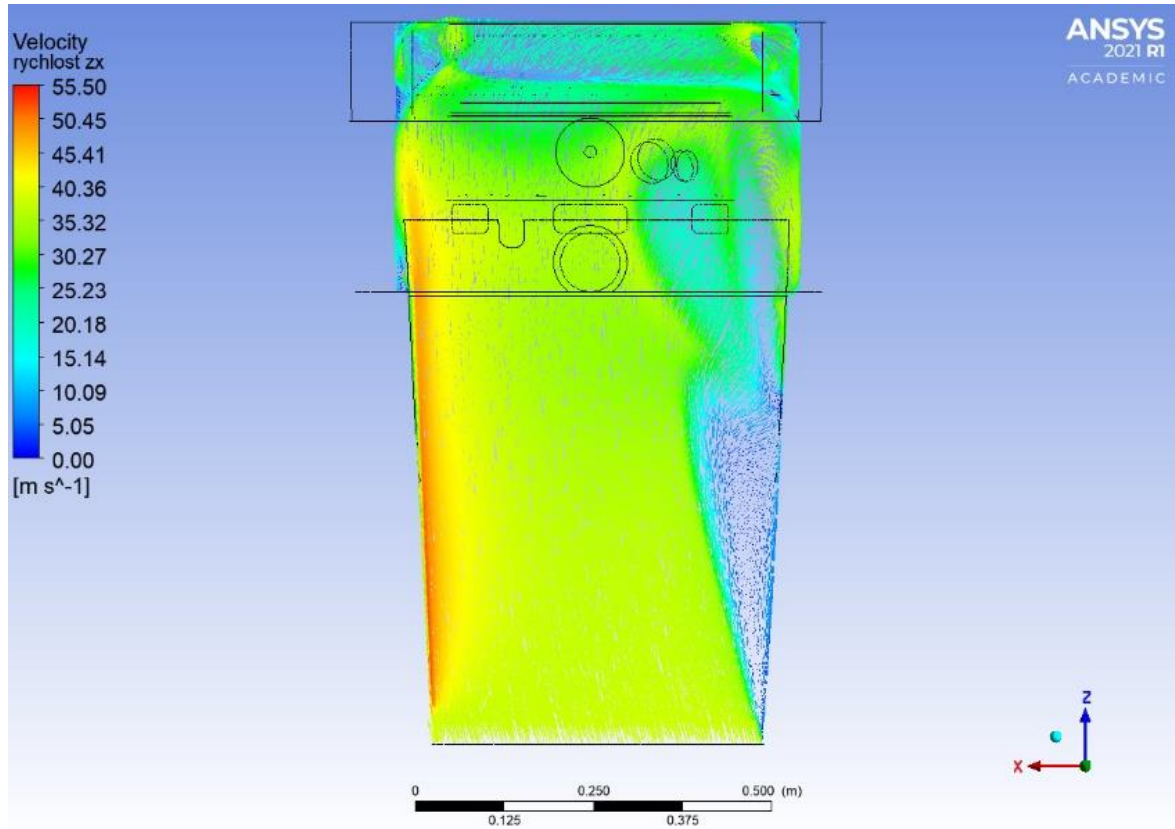
Obr. 74 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 0 stupňů



Obr. 75 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 6 stupňů

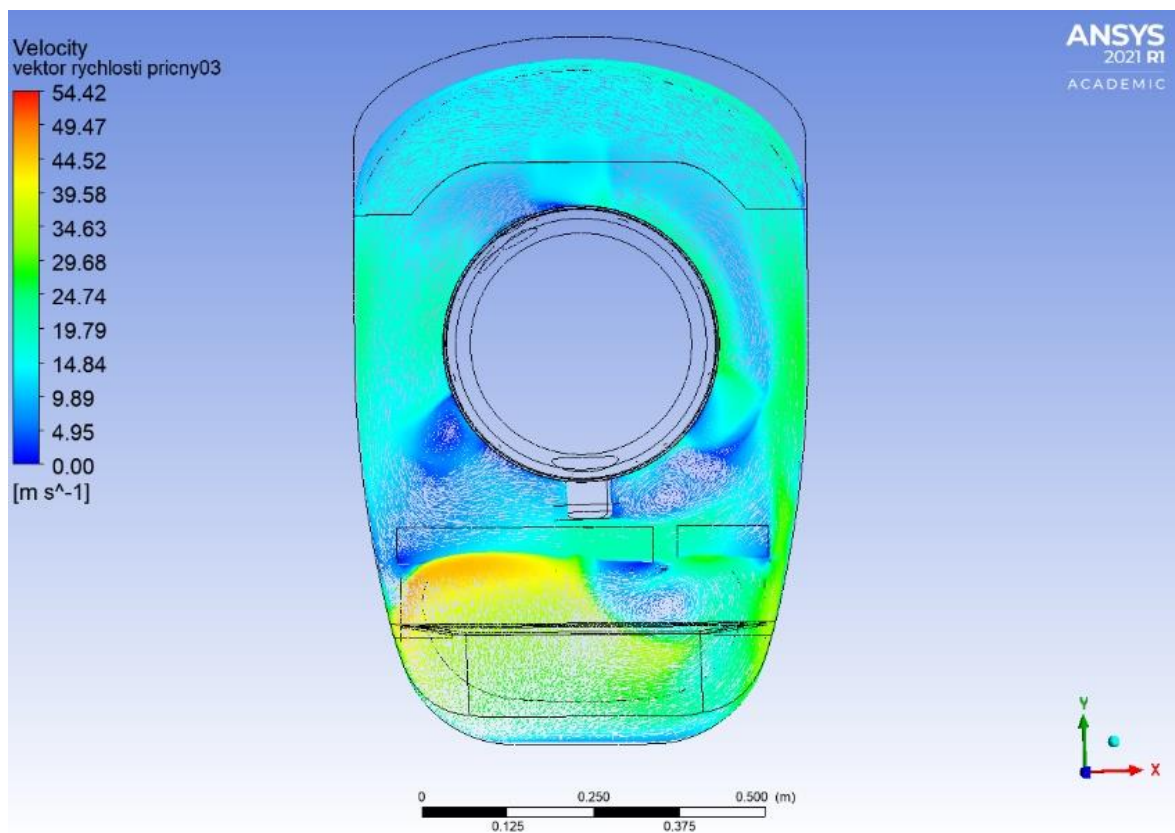


Obr. 76 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 9 stupňů

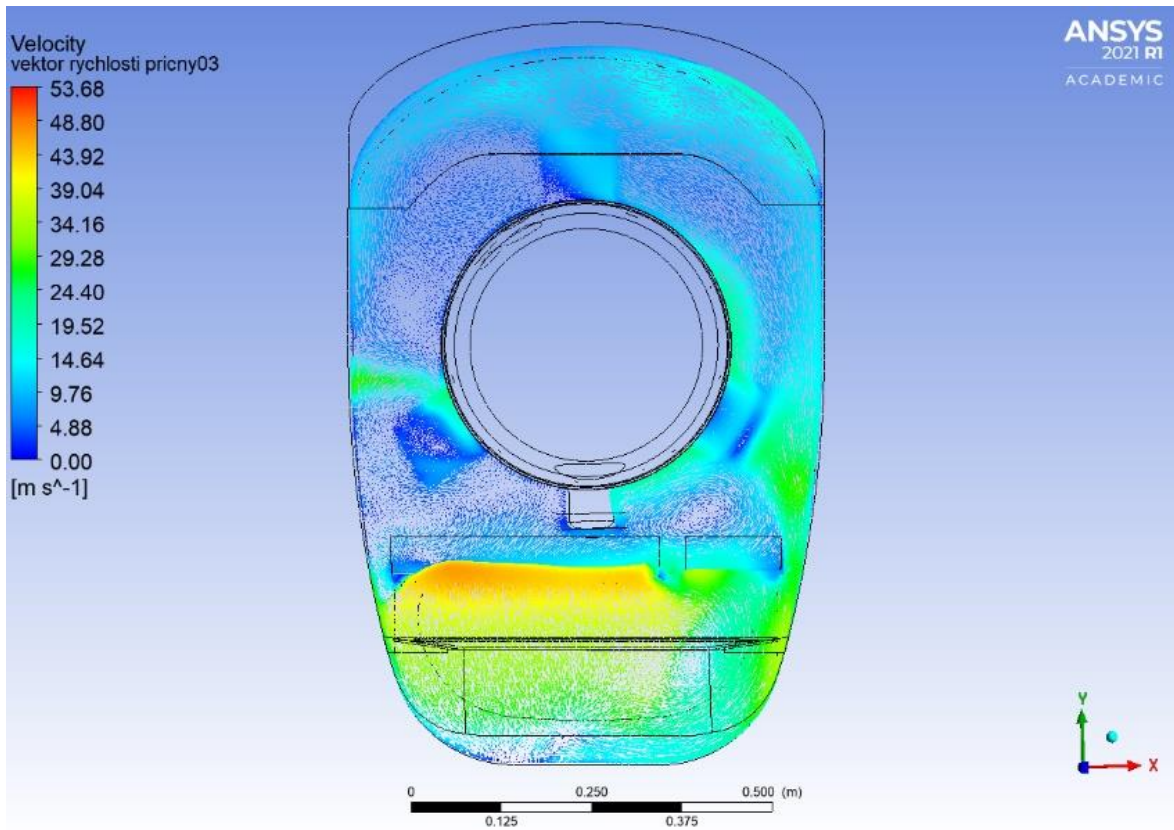


Obr. 77 - Vektory rychlosti v rovině xz pro úhel 15 stupňů

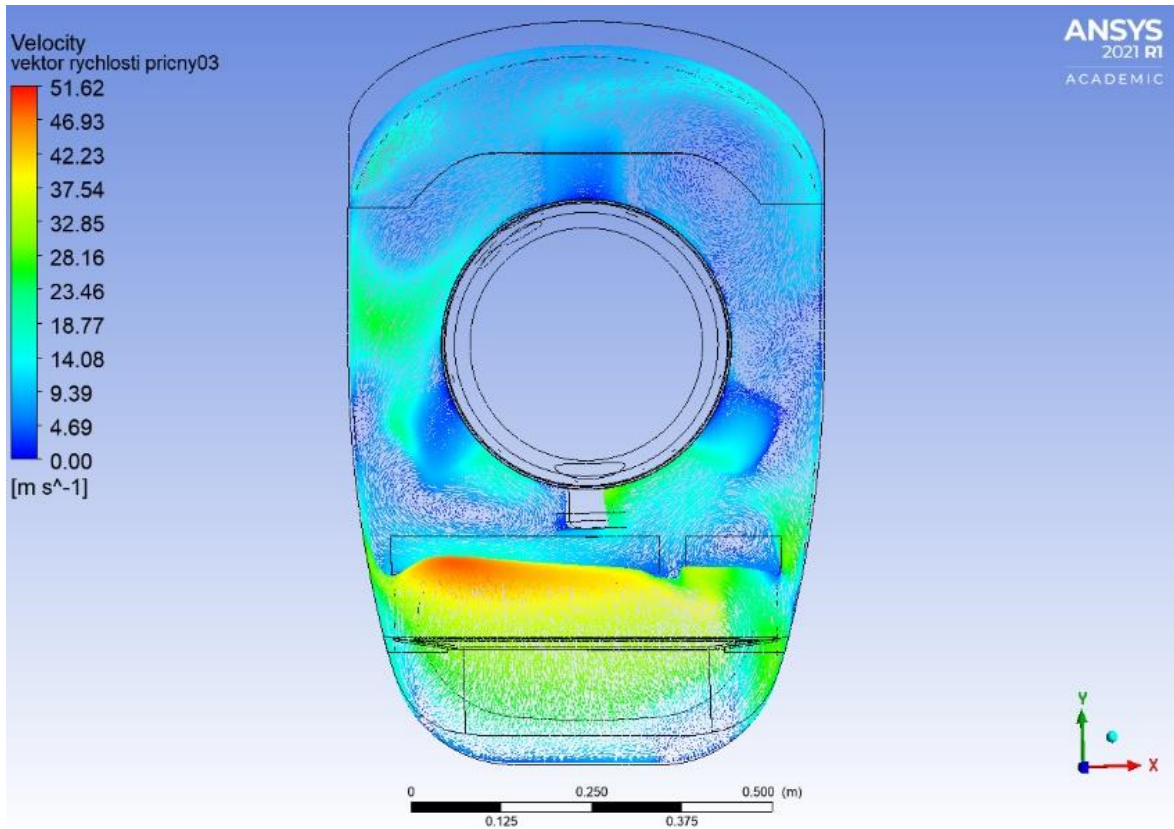
Zobrazení vektorů rychlosti v rovině xy v uklidňovací komoře (v oblasti plechu odledňovací klapky) soustavy turbovrtulového motoru pro rozsah úhlů od -15° do 15° .



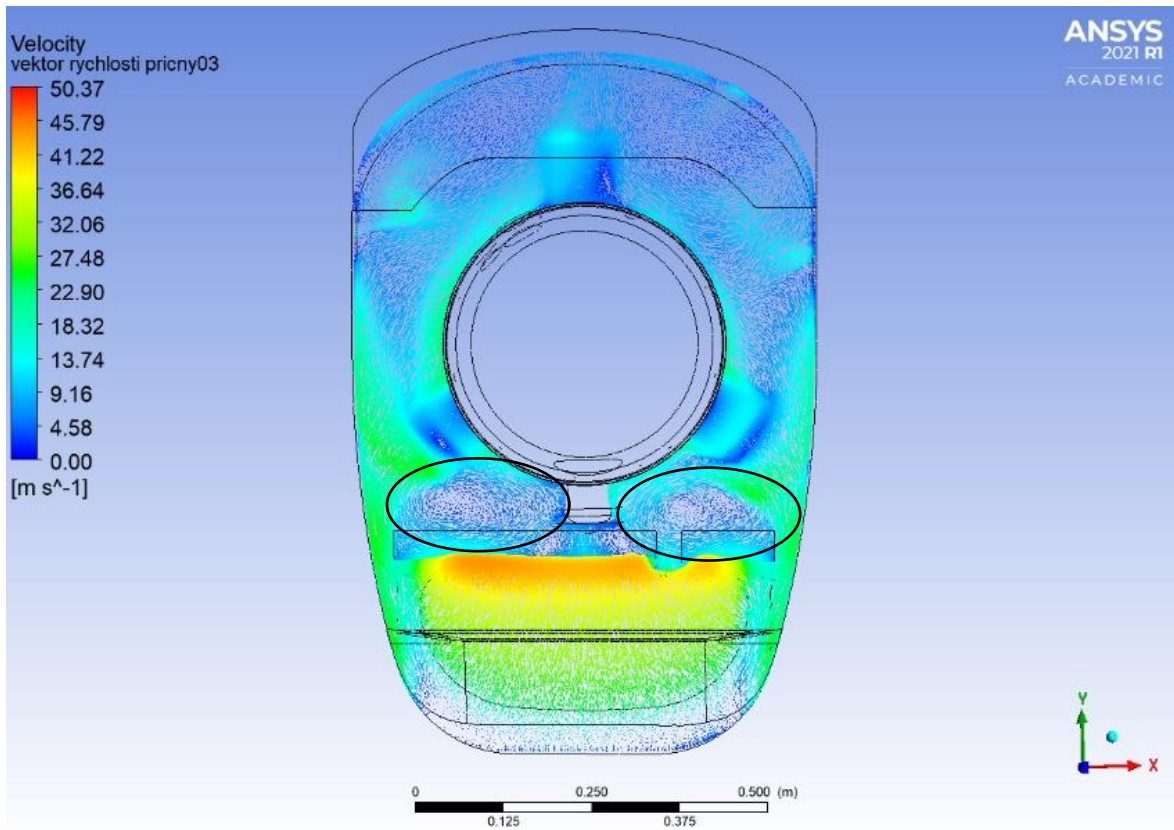
Obr. 78 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -15 stupňů



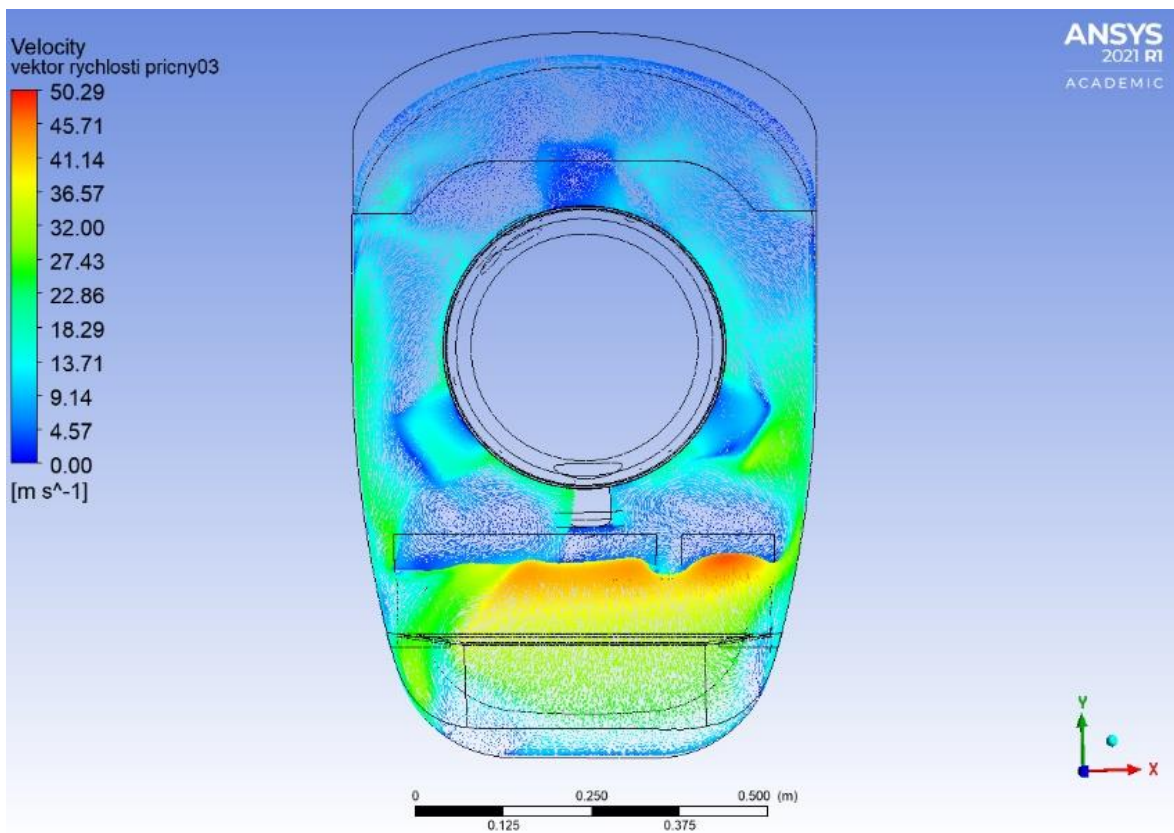
Obr. 79 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -6 stupňů



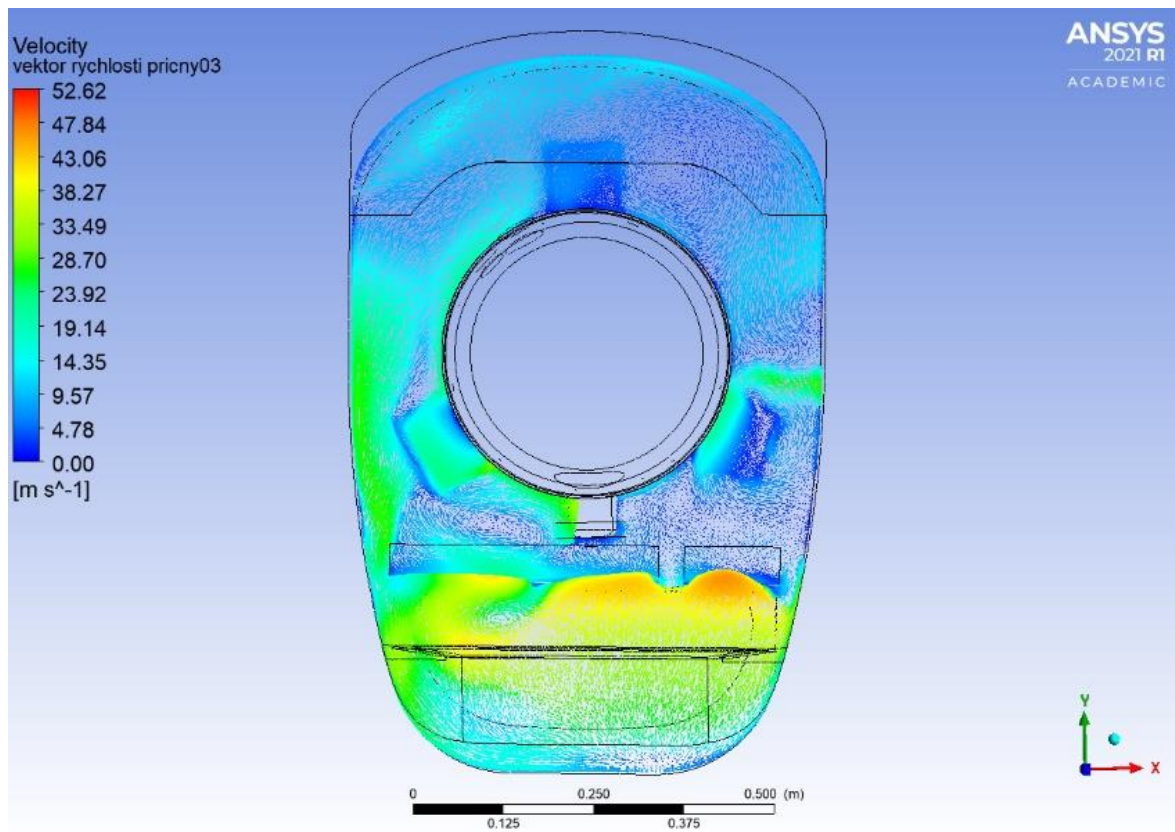
Obr. 80 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel -3 stupně



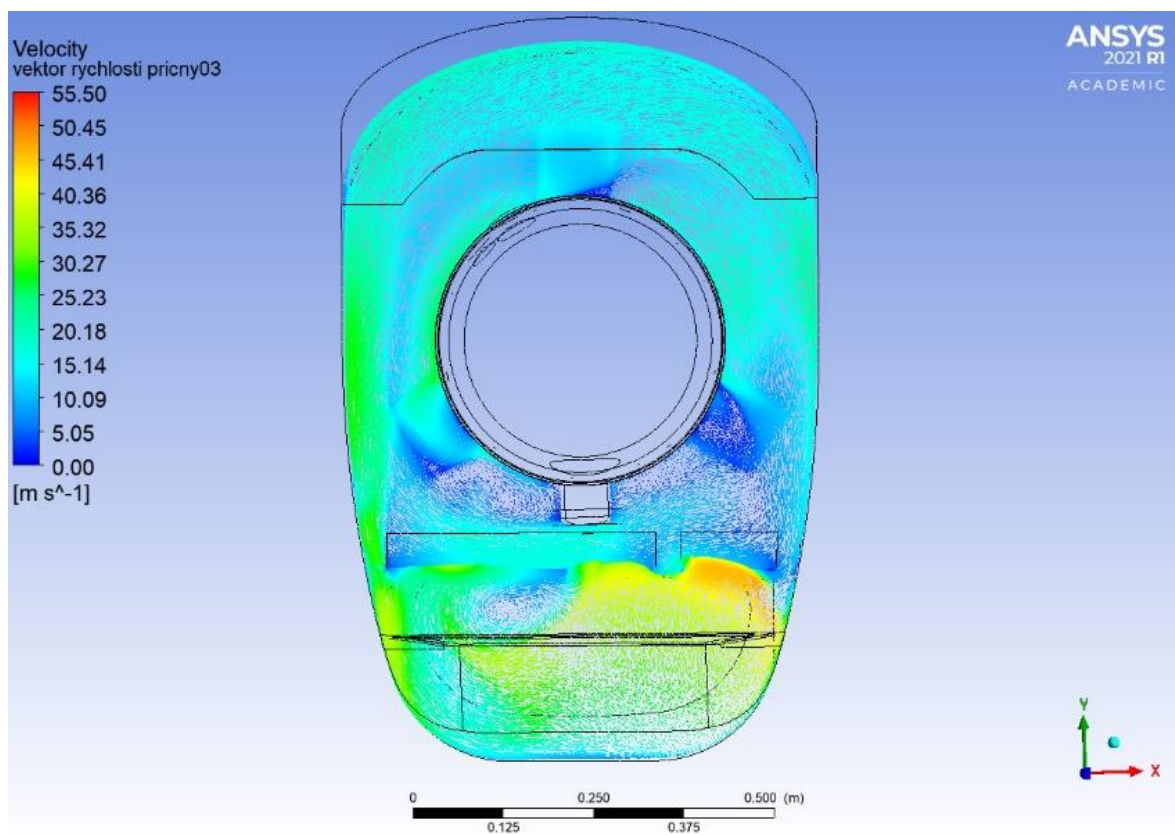
Obr. 81 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 0 stupňů



Obr. 82 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 3 stupně



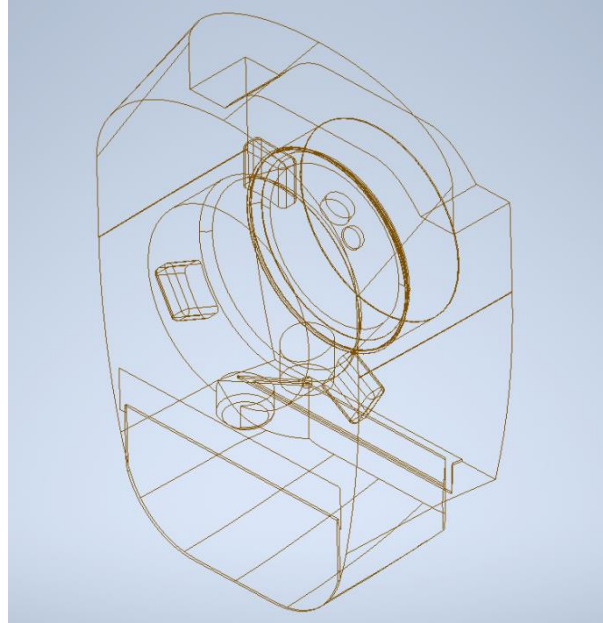
Obr. 83 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 6 stupňů



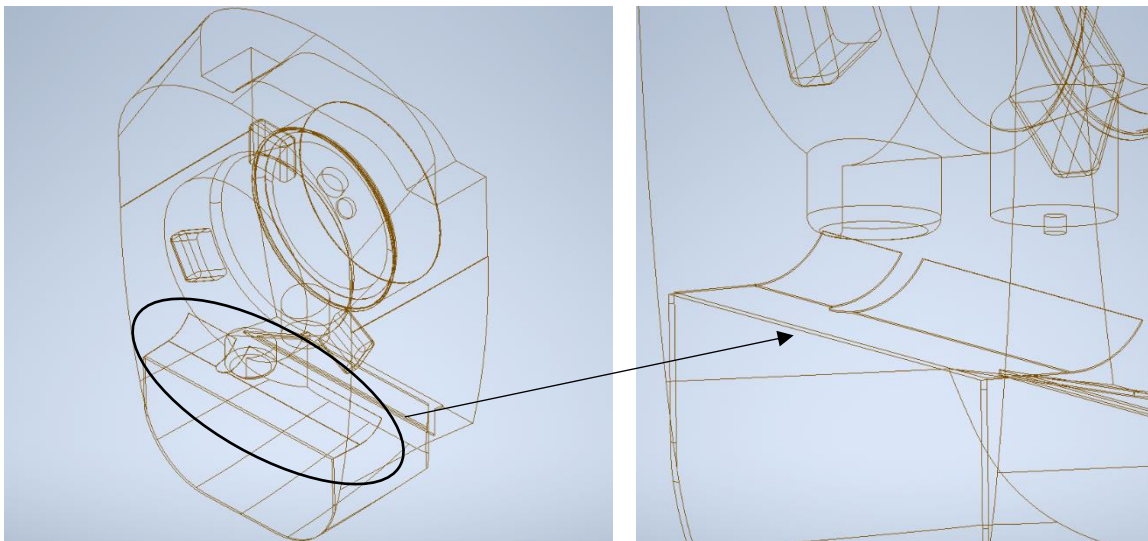
Obr. 84 - Vektory rychlosti v rovině xy pro úhel 15 stupňů

PŘÍLOHA 5

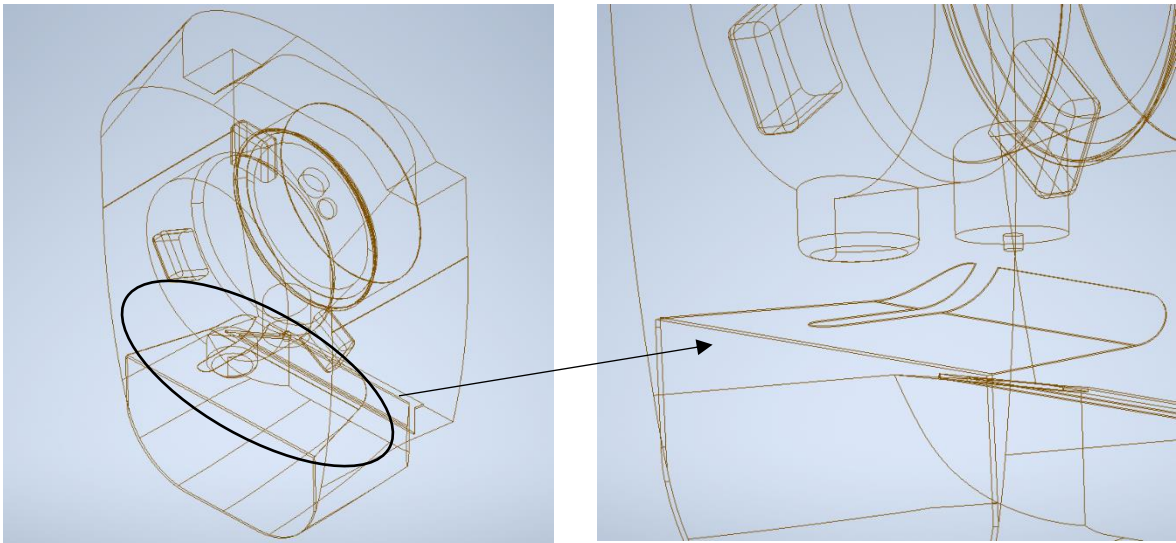
3D modely jednotlivých geometrických konfigurací uklidňovací komory vstupní soustavy motoru navržené pro analýzu citlivosti tlakové ztráty na změnu geometrie. Návrhy 0–11.



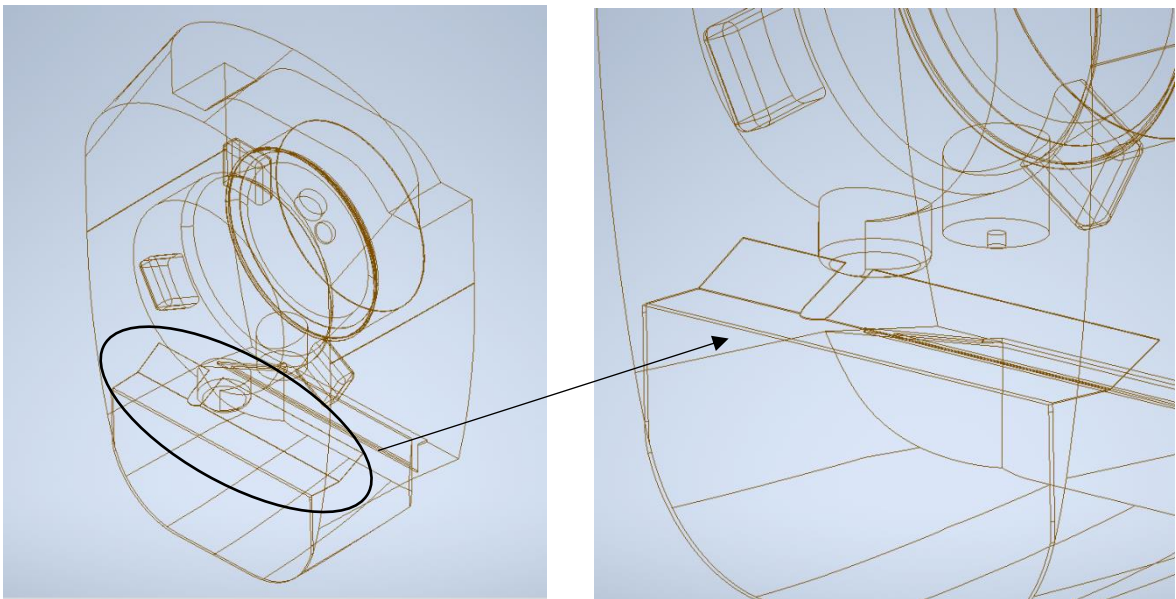
Obr. 85 - Model uklidňovací komory návrh 0 - komory bez plechu



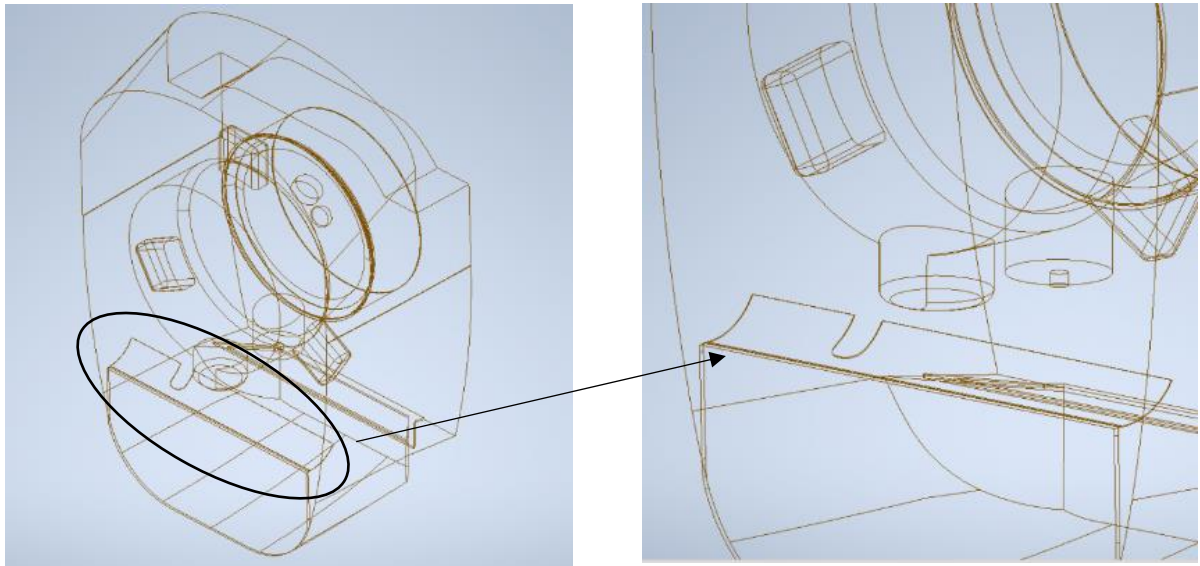
Obr. 86 - Model uklidňovací komory návrh 1 – zjednodušený plech (krátká verze) + detail



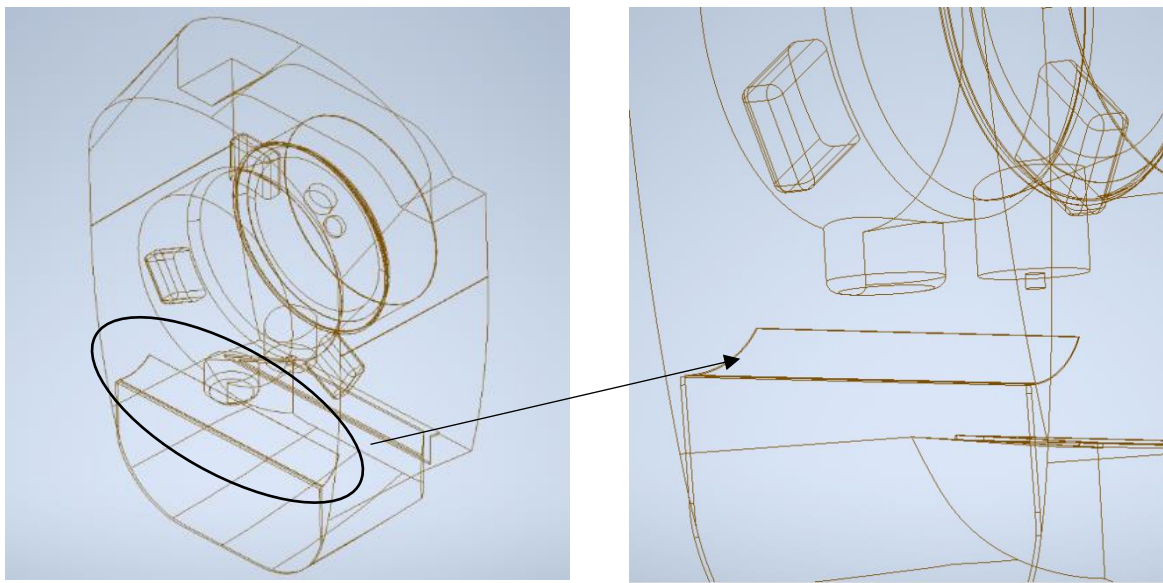
Obr. 87 - Model uklidňovací komory návrh 2 – zjednodušený plech (dlouhá verze) + detail



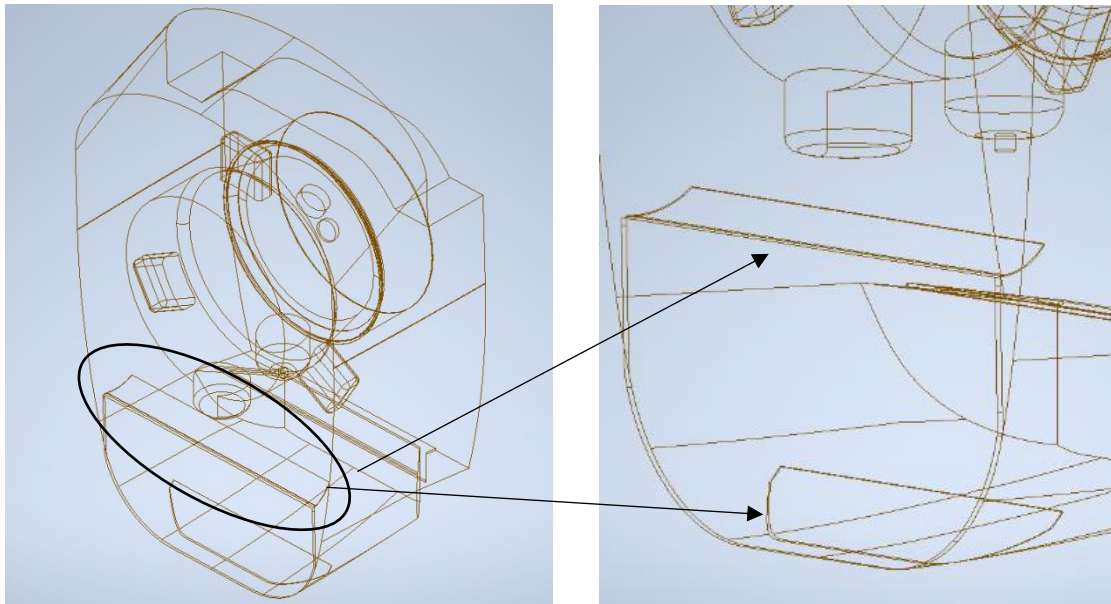
Obr. 88 - Model uklidňovací komory návrh 3 - zešikmený plech + detail



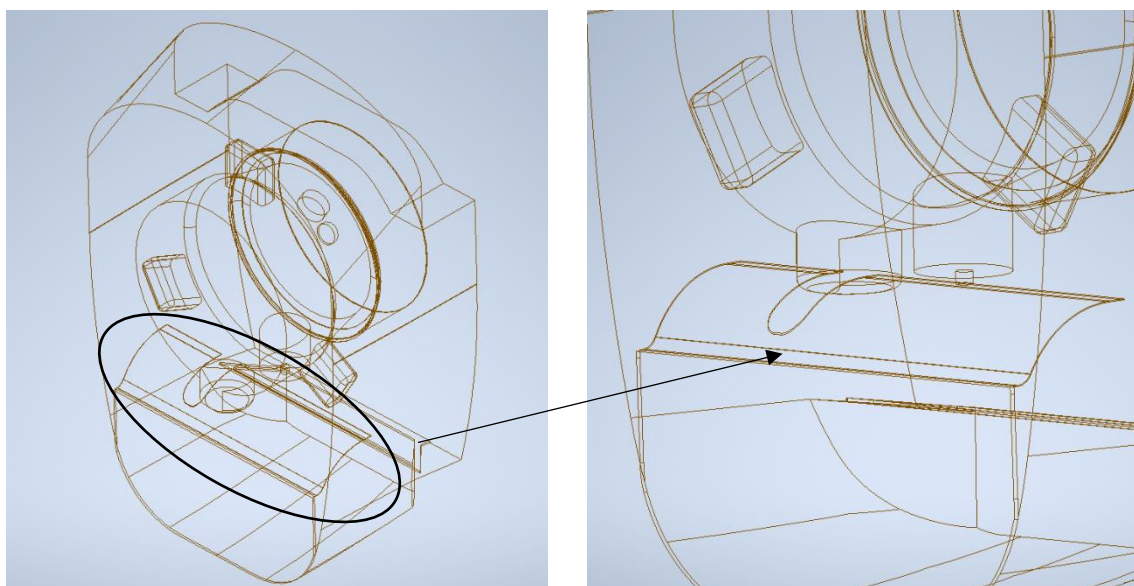
Obr. 89 - Model uklidňovací komory návrh 4 - nejmenší plech + detail



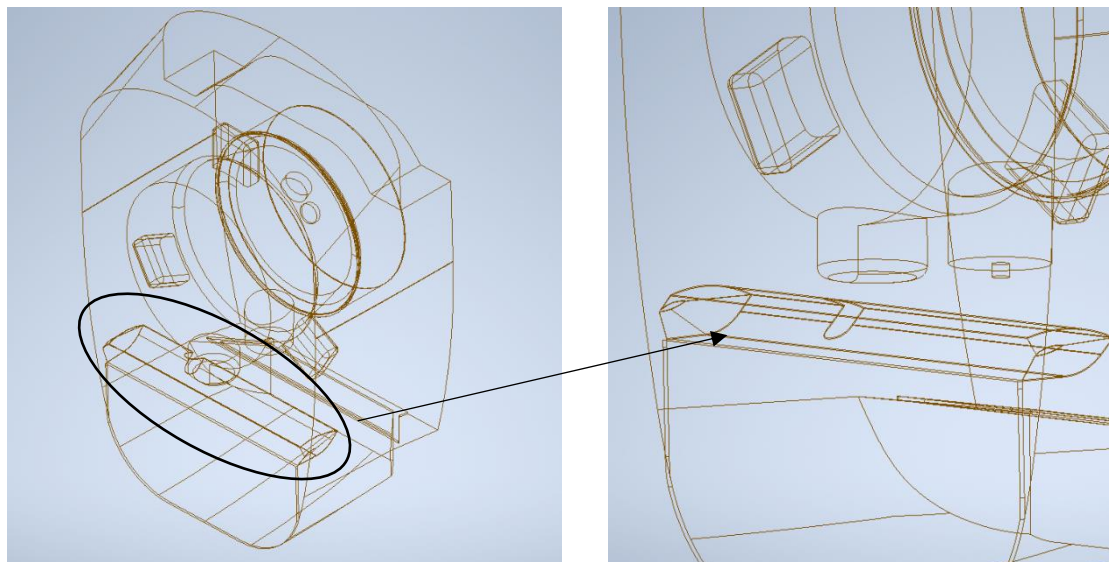
Obr. 90 - Model uklidňovací komory návrh 5 - nejmenší plech (zjednodušený) + detail



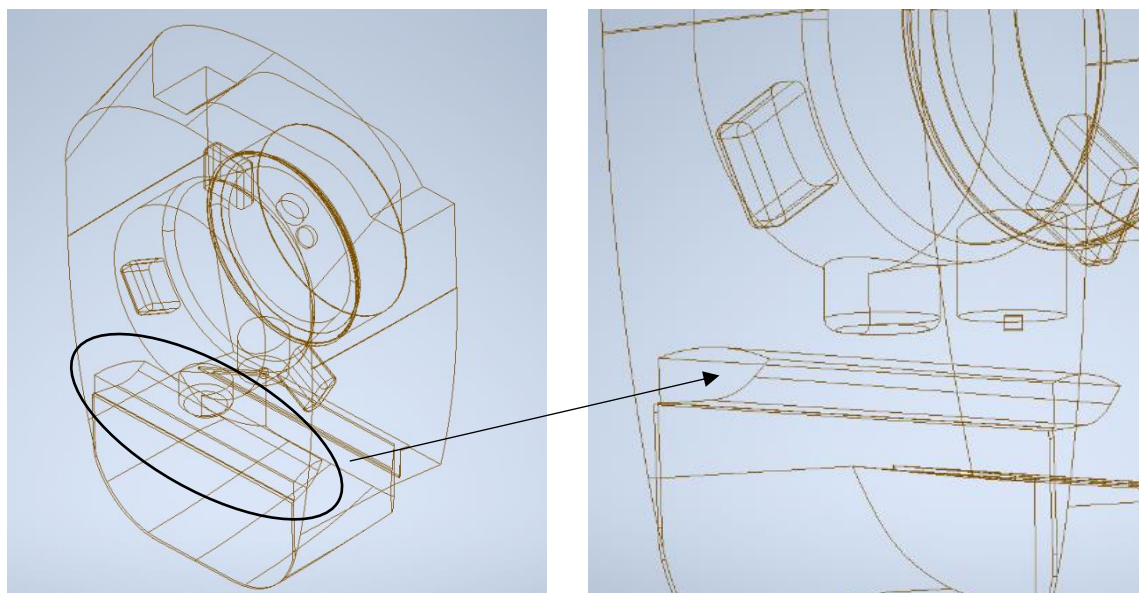
Obr. 91 - Model uklidňovací komory návrh 6 - nejjednodušší plech s dalšími geometrickými úpravami + detail



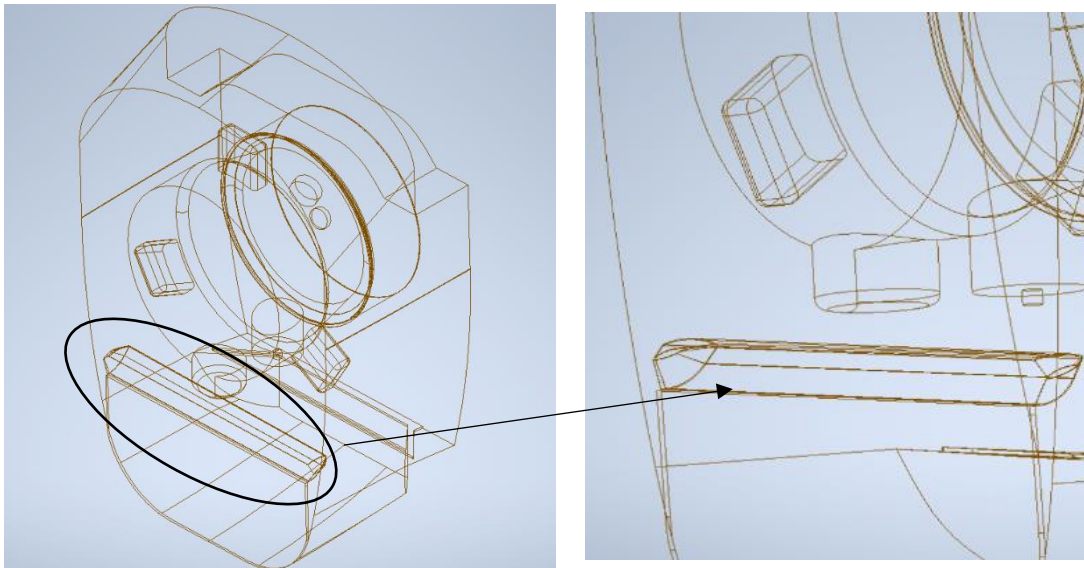
Obr. 92 - Model uklidňovací komory návrh 7 - zvlněný plech + detail



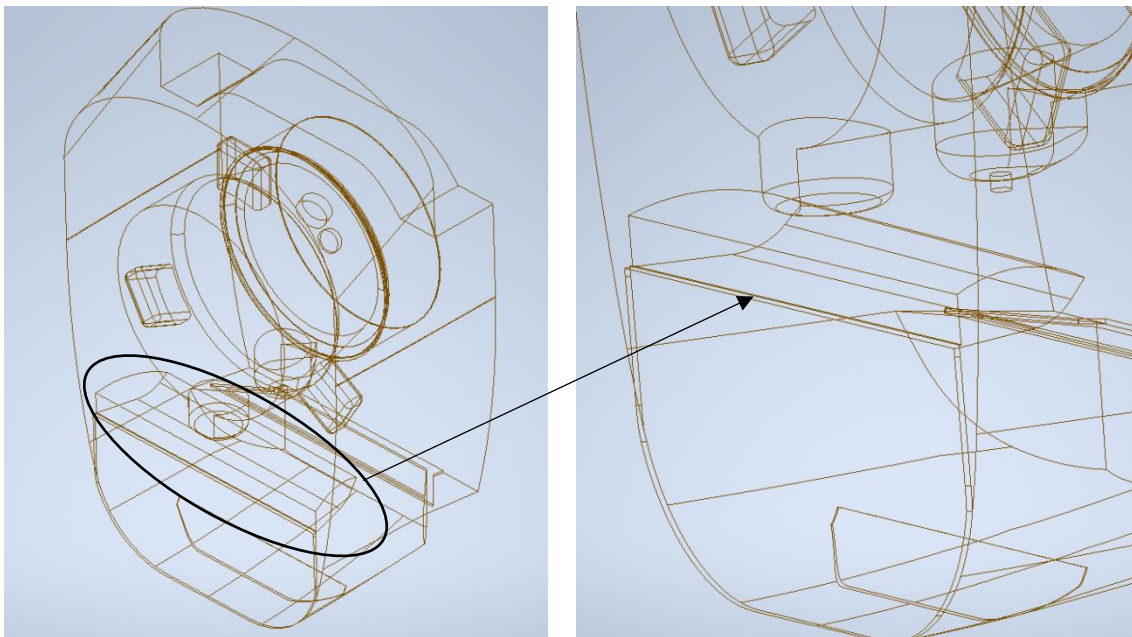
Obr. 93 - Model uklidňovací komory návrh 8 - kapsovitý plech



Obr. 94 - Model uklidňovací komory návrh 9 - masivní plech + detail



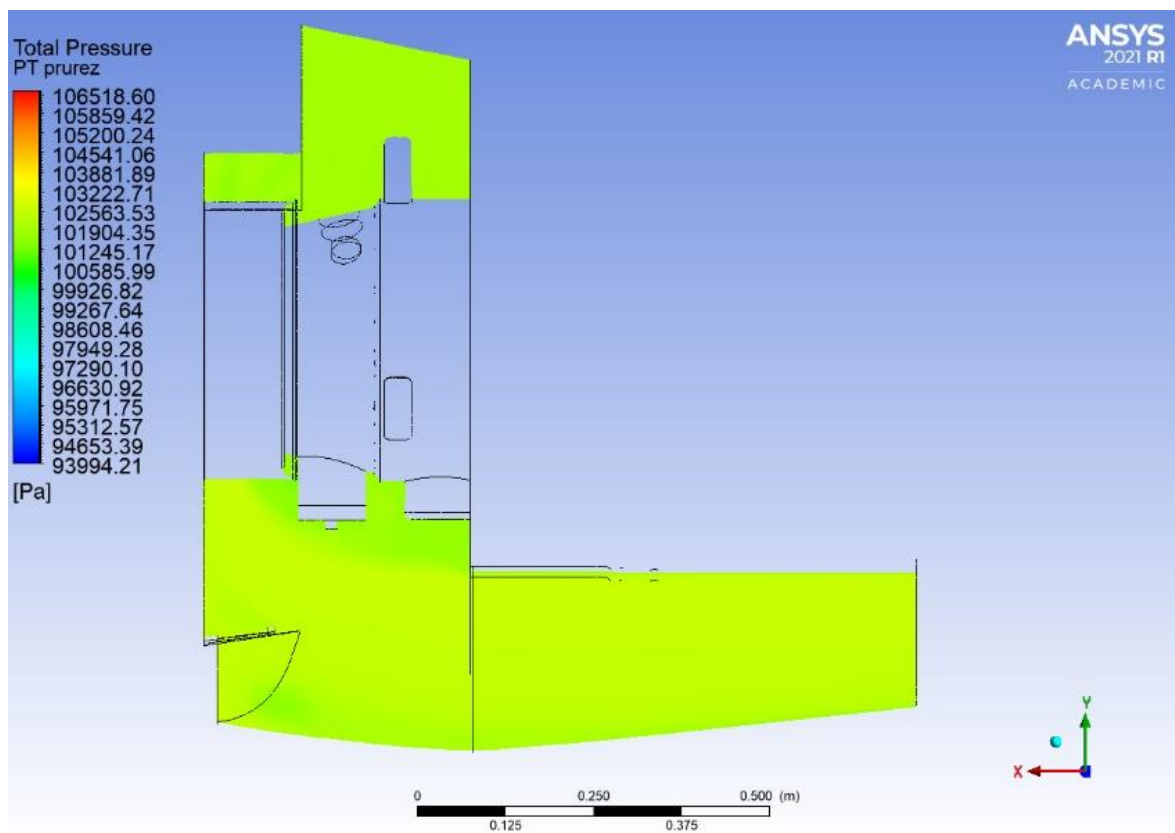
Obr. 95 - Model uklidňovací komory návrh 10 - zmenšený kapsovitý plech + detail



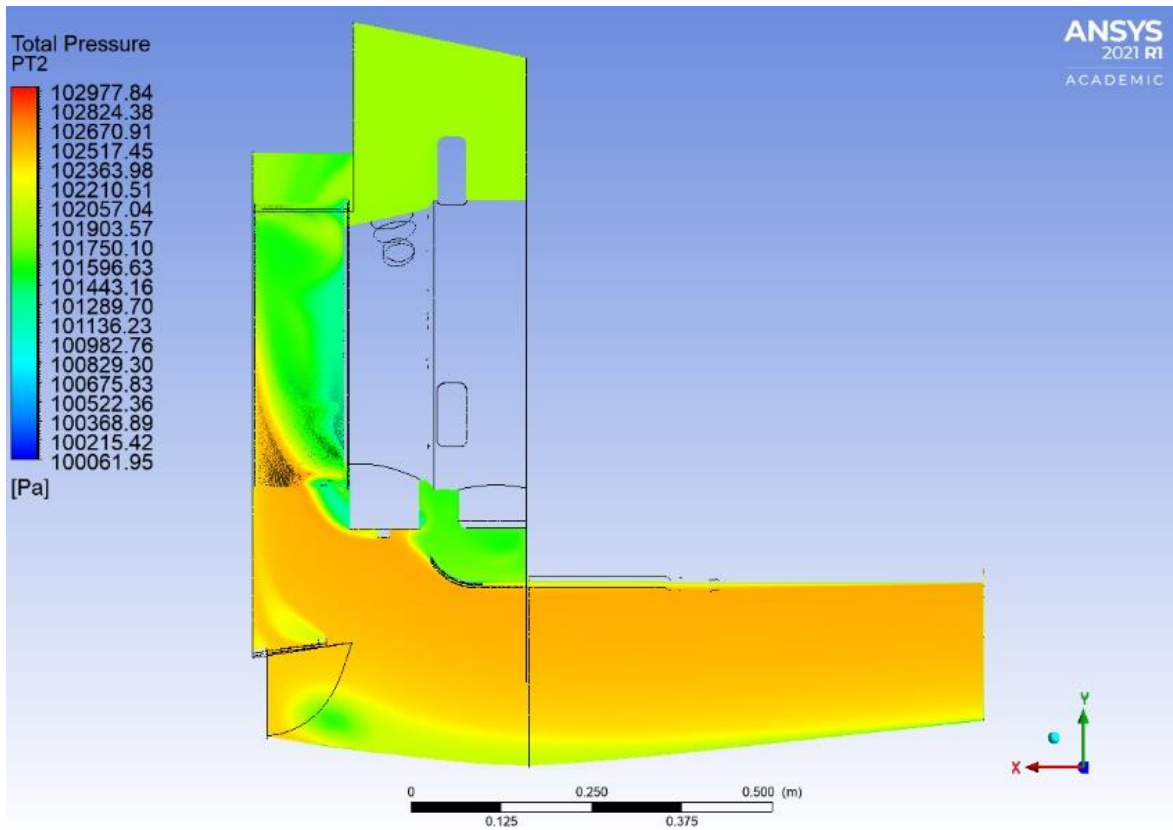
Obr. 96 - Model uklidňovací komory návrh 11 - masivní plech s dalšími geometrickými úpravami + detail

PŘÍLOHA 6

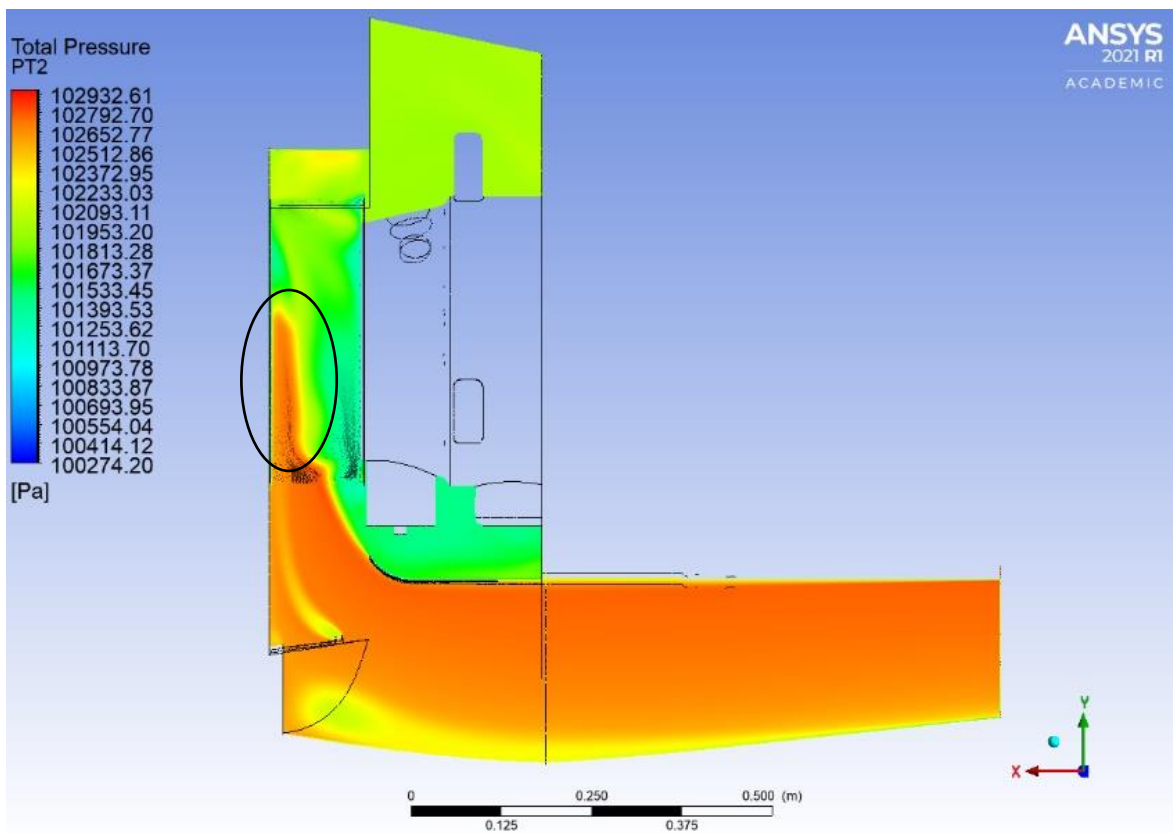
Zobrazení polí celkových tlaků vybraných návrhů vstupní soustavy turbovrtulového motoru v meridiálním řezu a na vstupu, přechodu (interface) a výstupu soustavy.



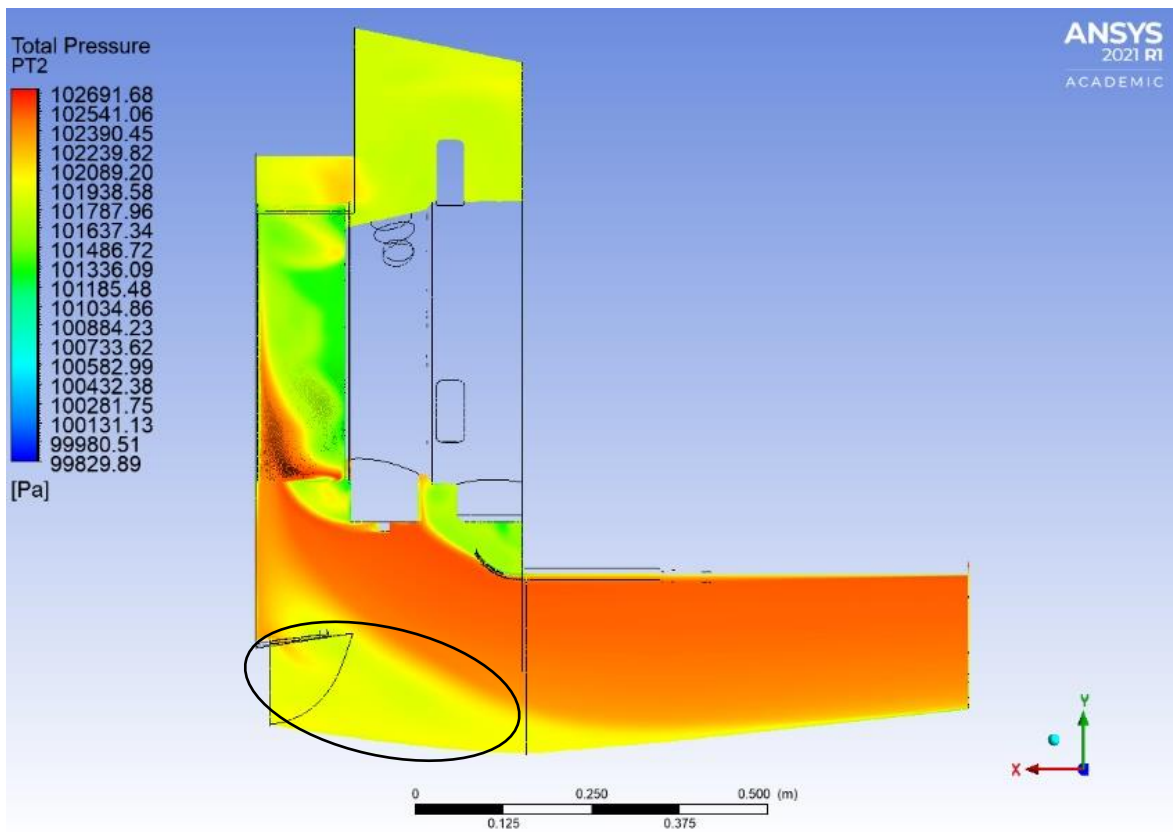
Obr. 97 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 0



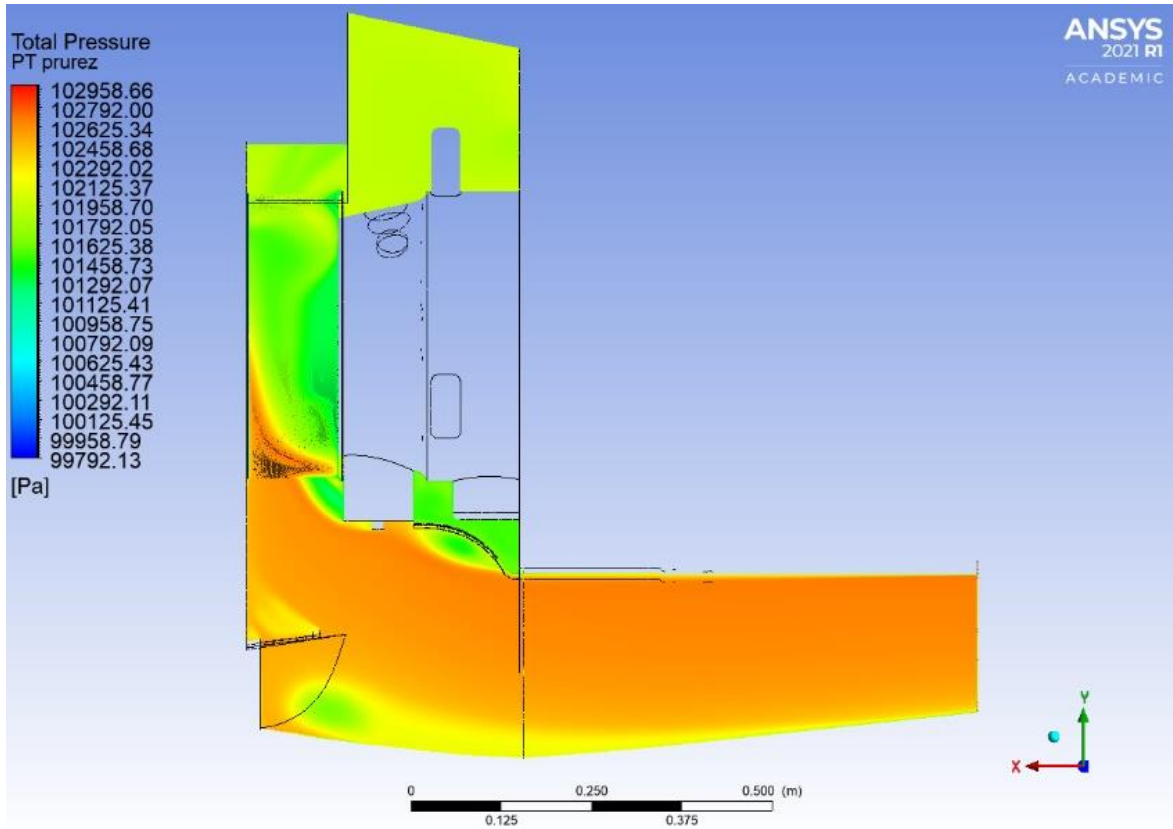
Obr. 98 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 1



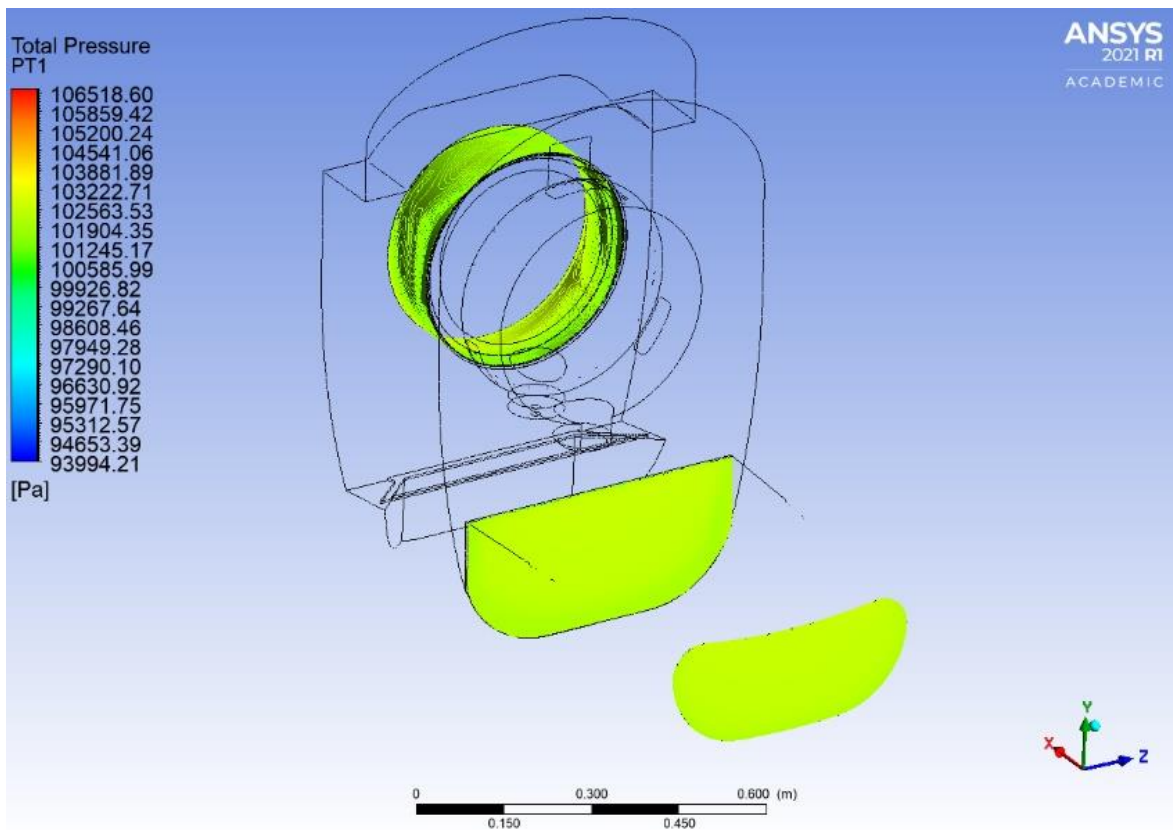
Obr. 99 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 2



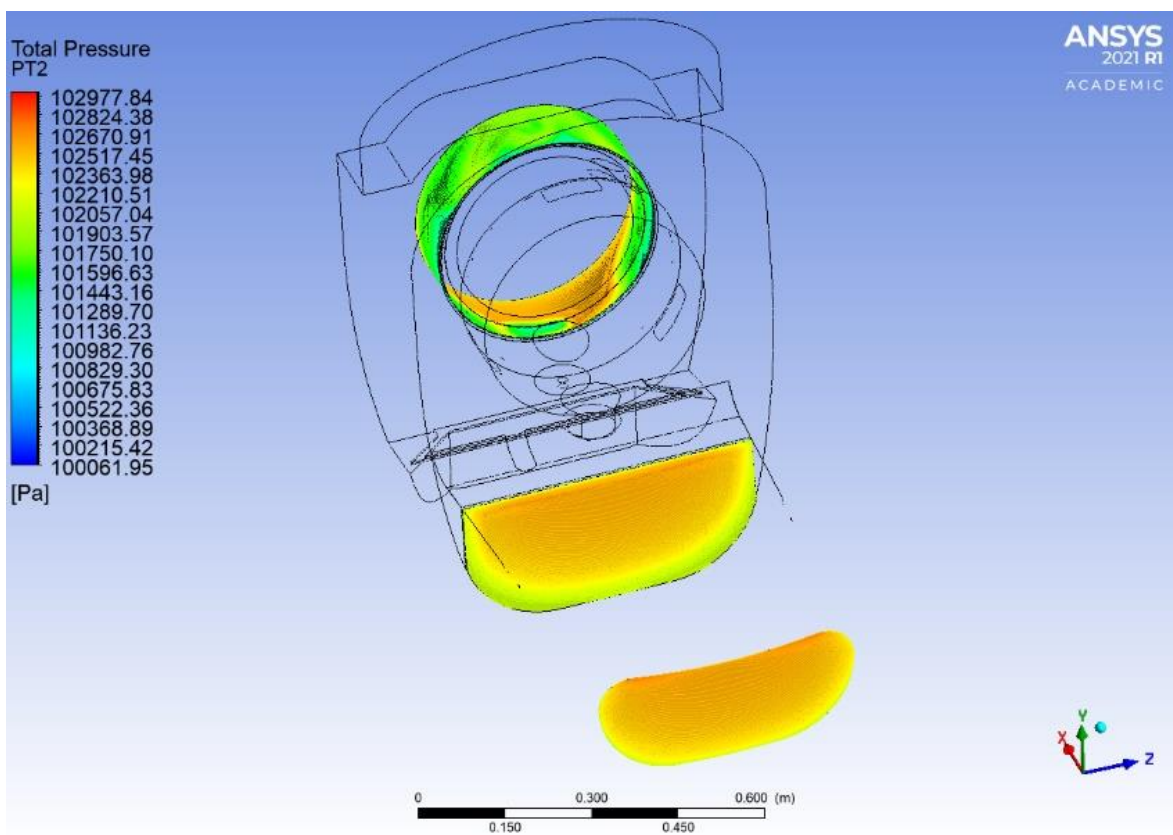
Obr. 100 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 4



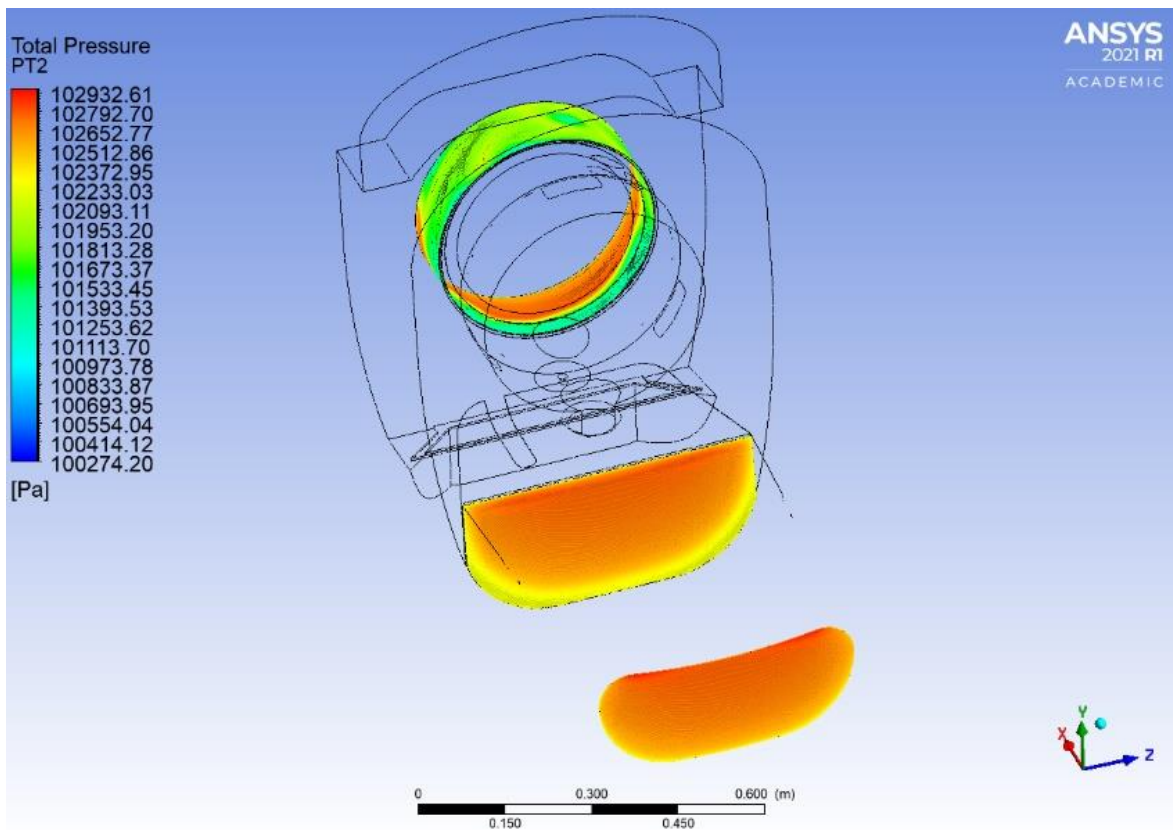
Obr. 101 – Tlakové pole v meridiálním řezu návrh 7



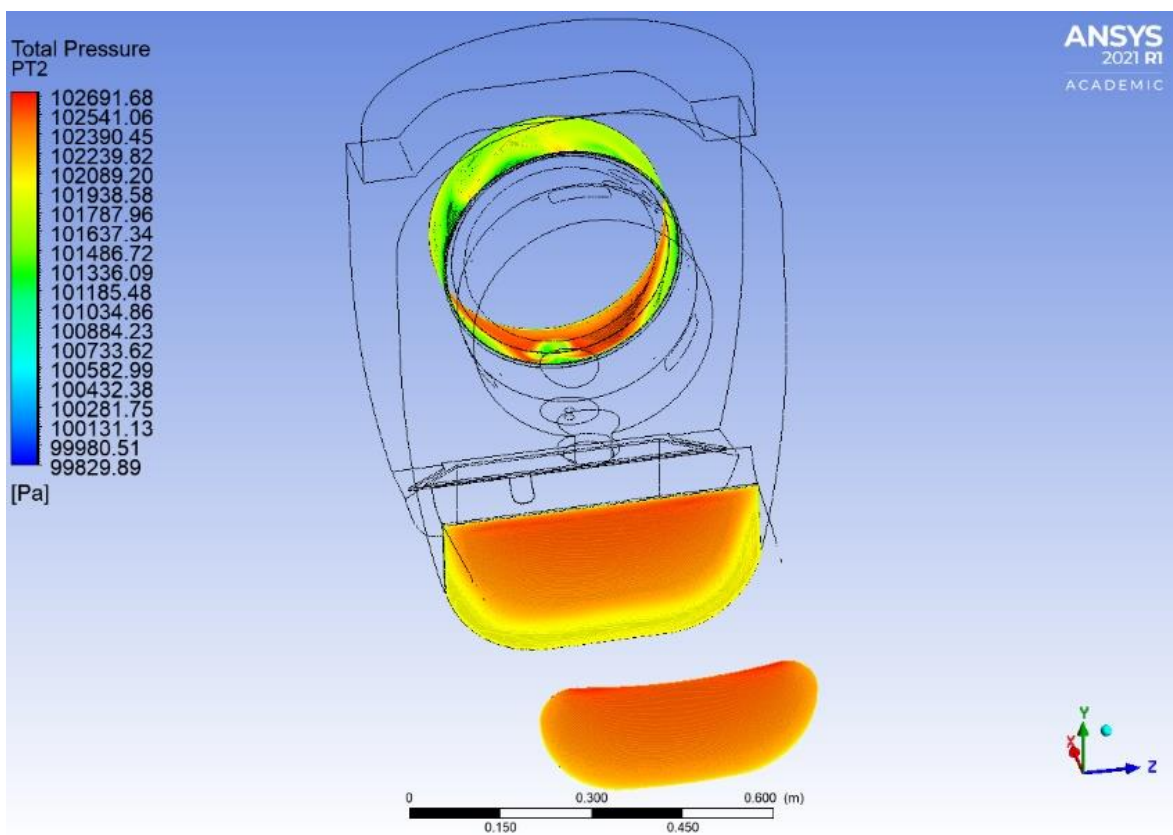
Obr. 102 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 0



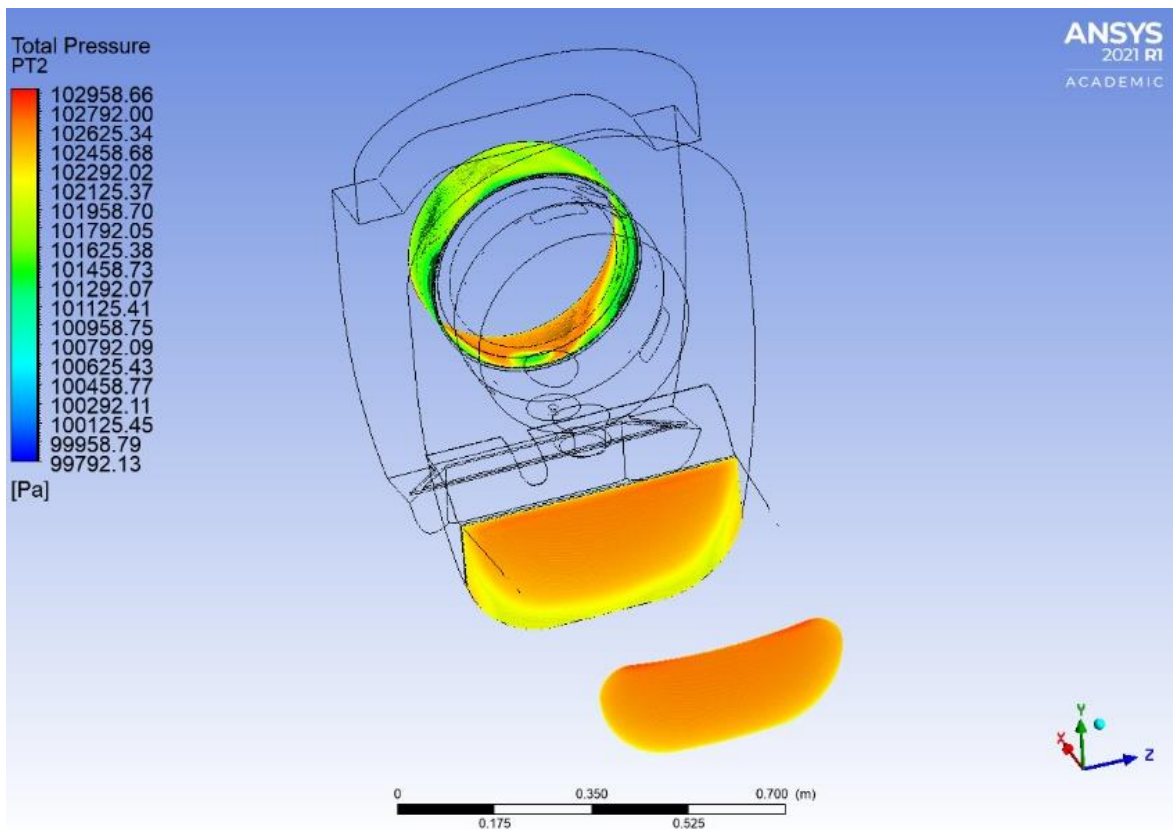
Obr. 103 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 1



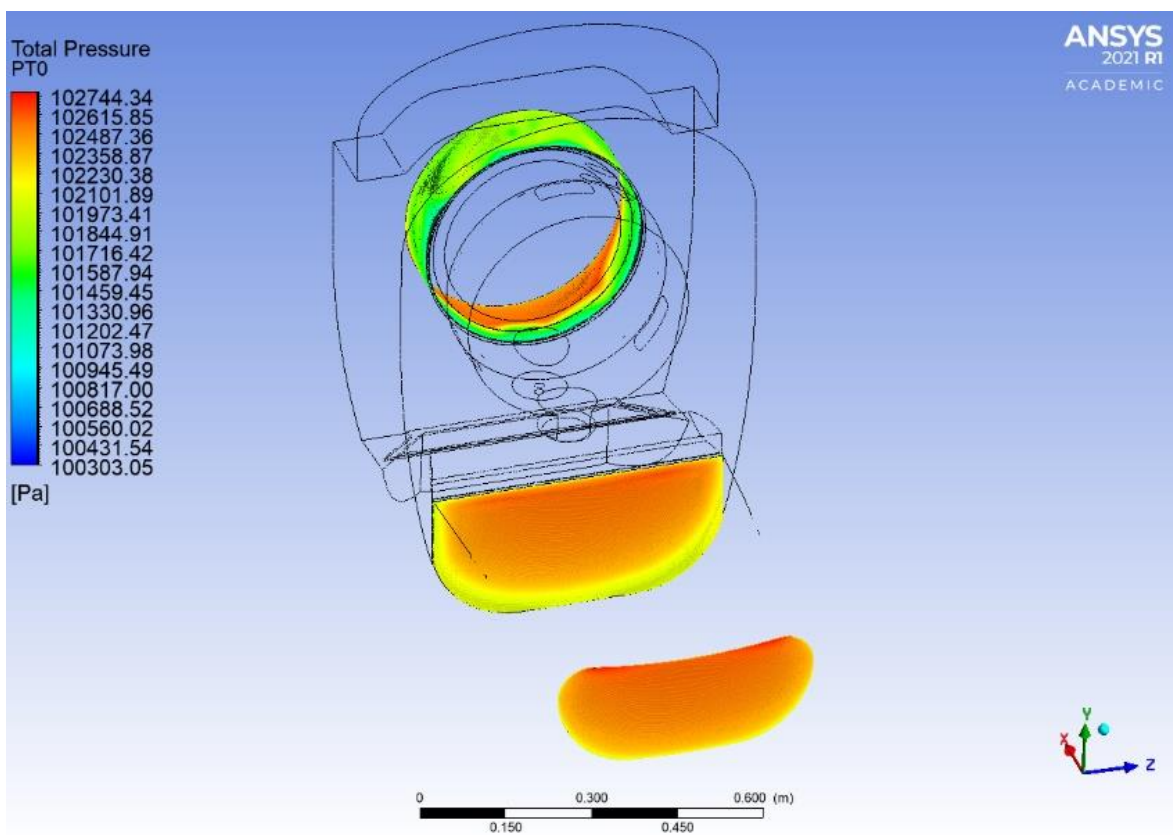
Obr. 104 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 2



Obr. 105 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 4



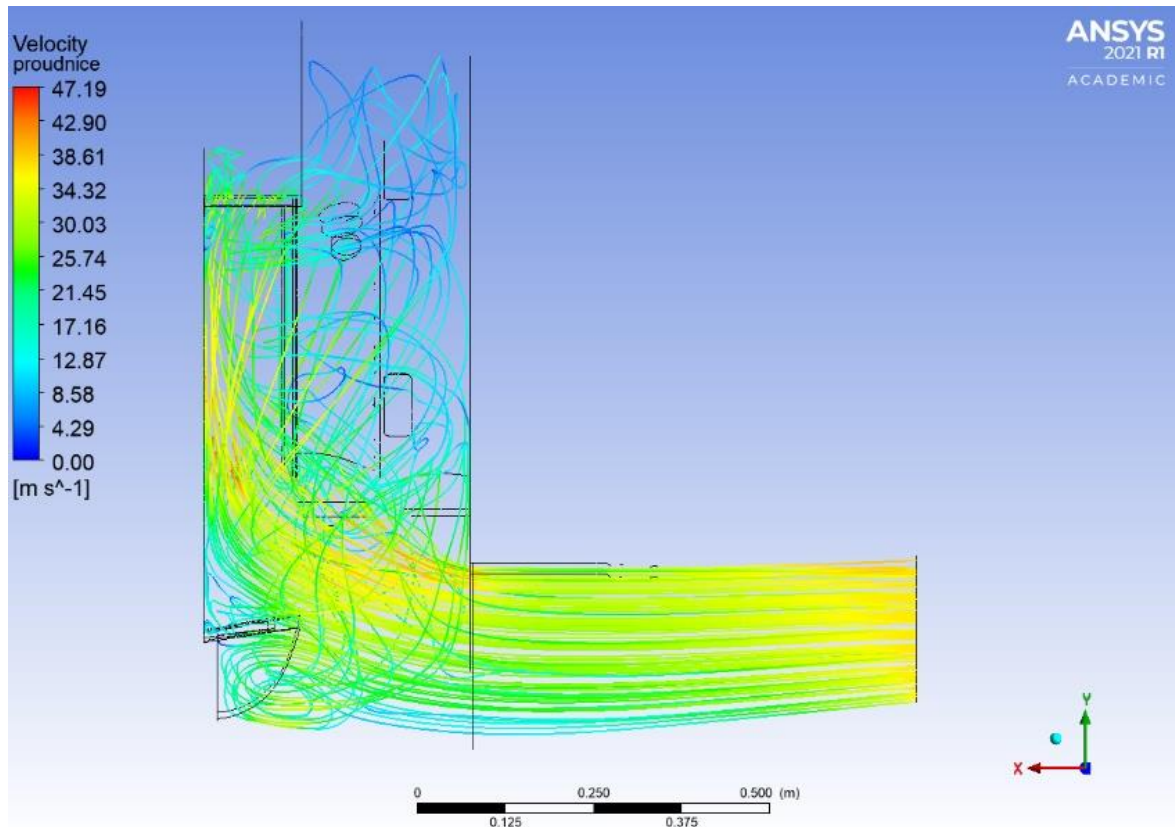
Obr. 106 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 7



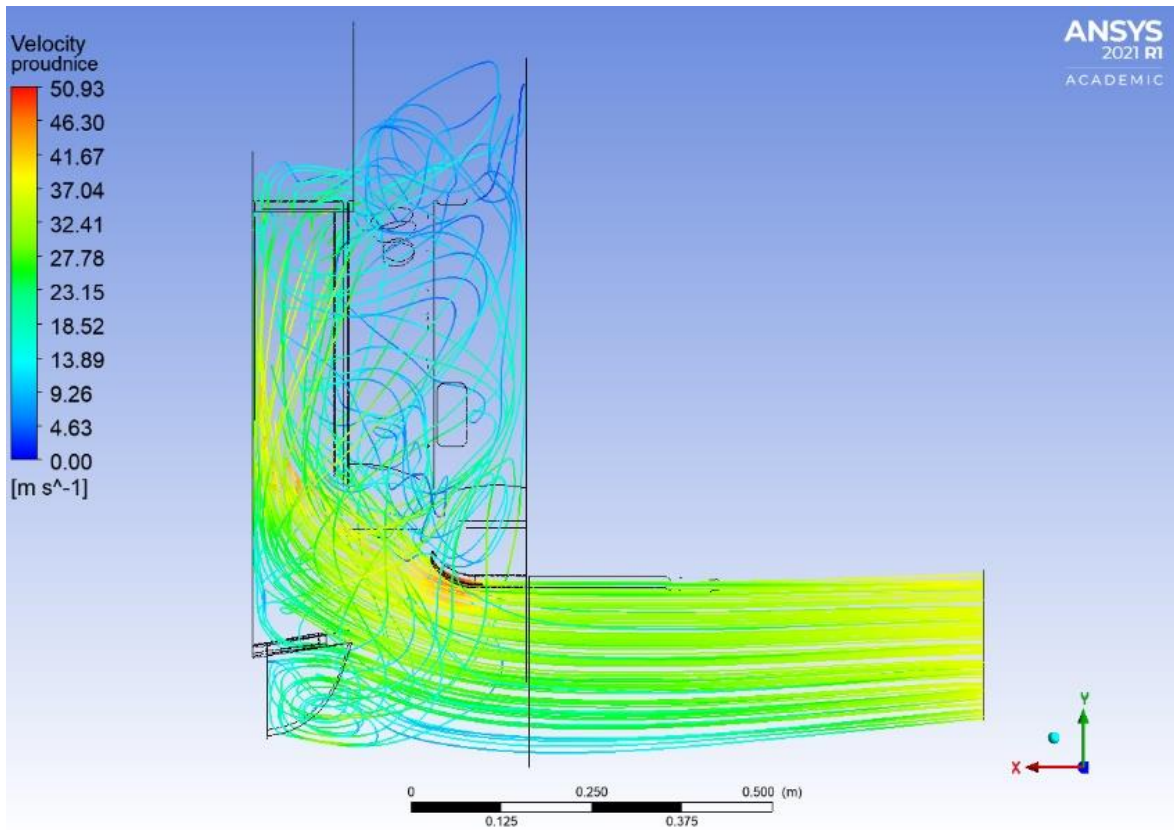
Obr. 107 – Tlakové pole v místech PT0, PT1, PT2 návrh 9

PŘÍLOHA 7

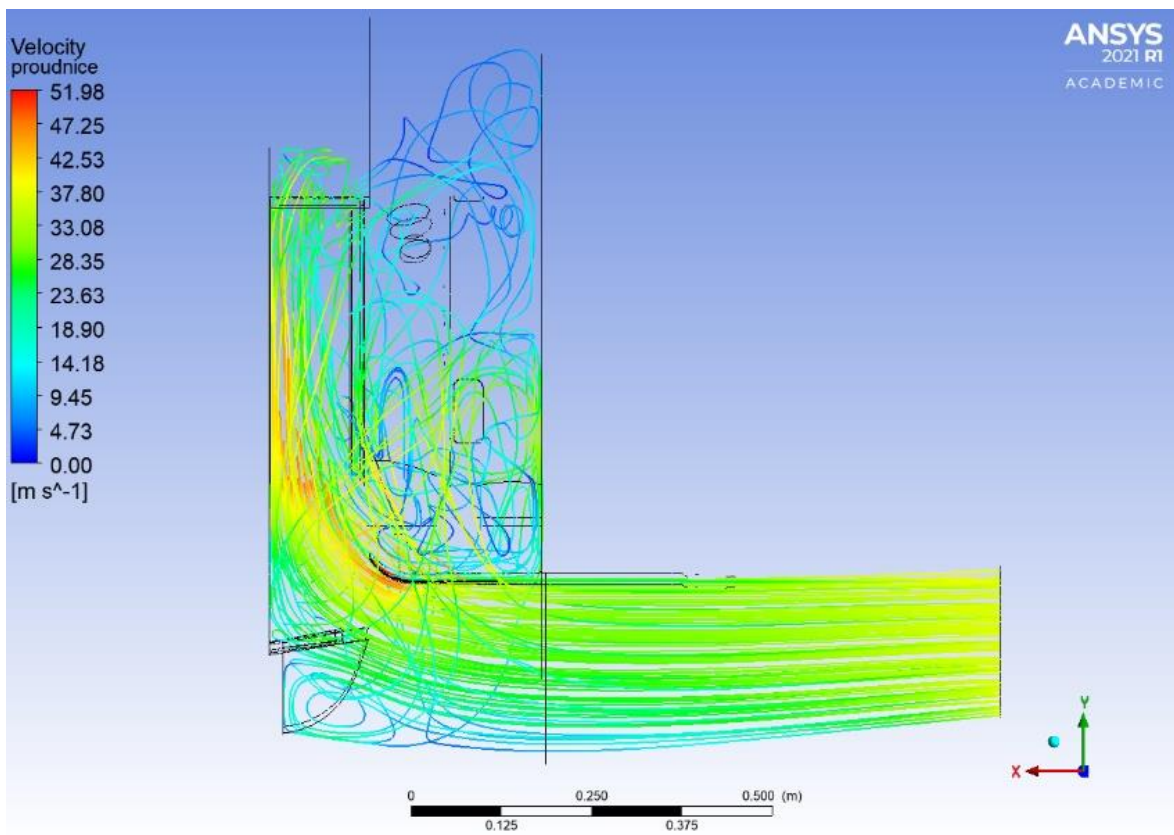
Zobrazení 3D proudnic vstupní soustavy turbovrtulového motoru vybraných návrhů geometrie.



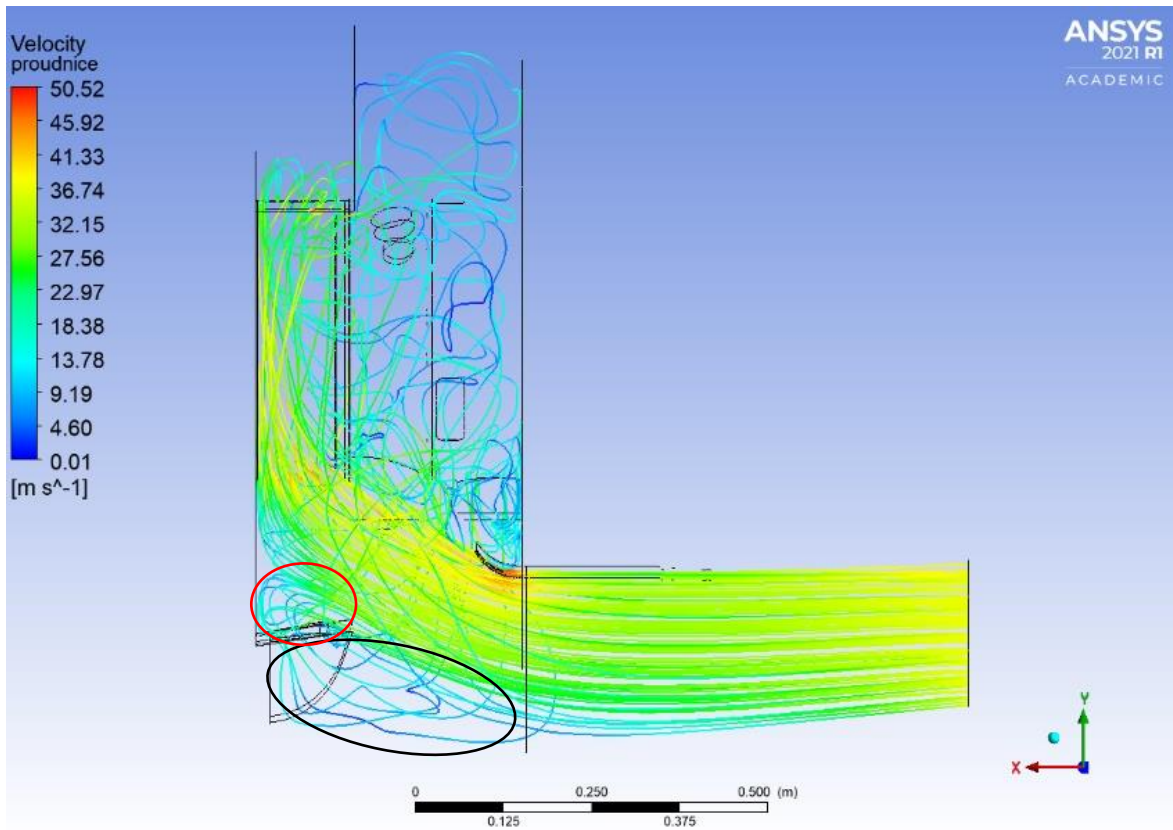
Obr. 108 – 3D proudnice návrh 0



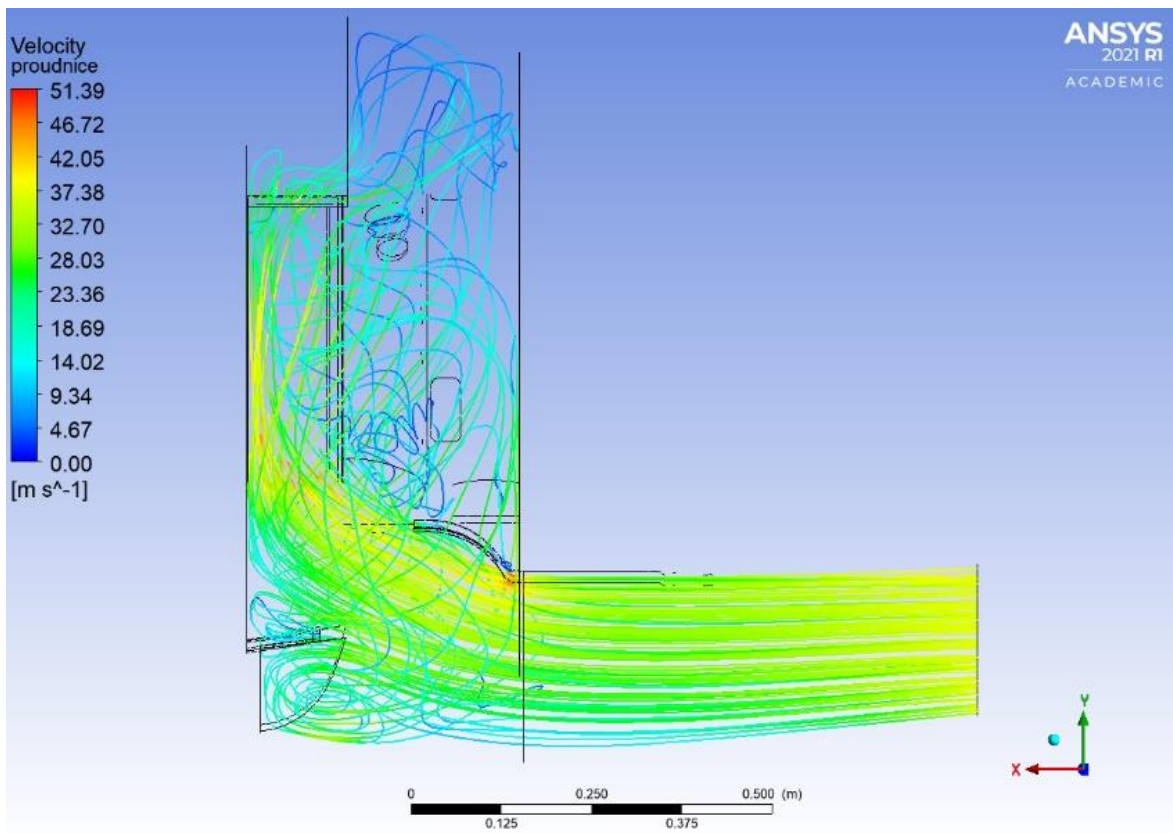
Obr. 109 – 3D proudnice návrh 1



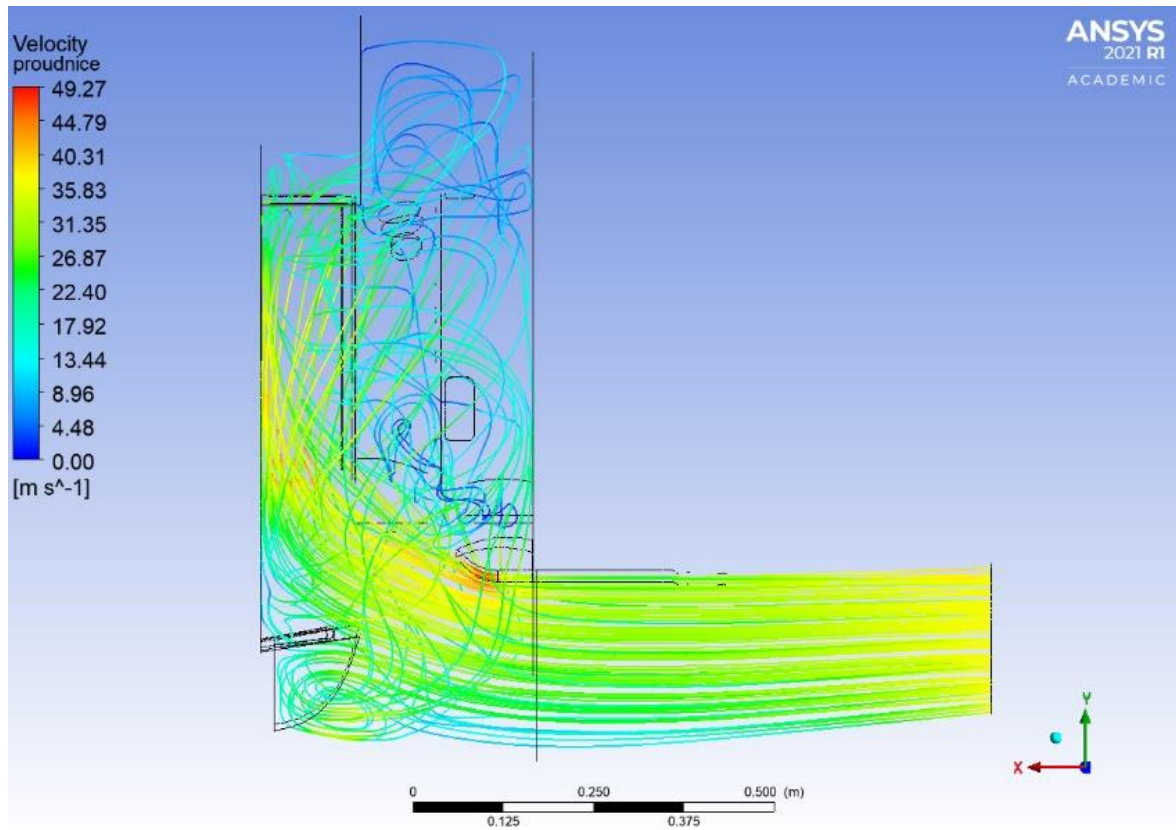
Obr. 110 – 3D proudnice návrh 2



Obr. 111 – 3D proudnice návrh 4



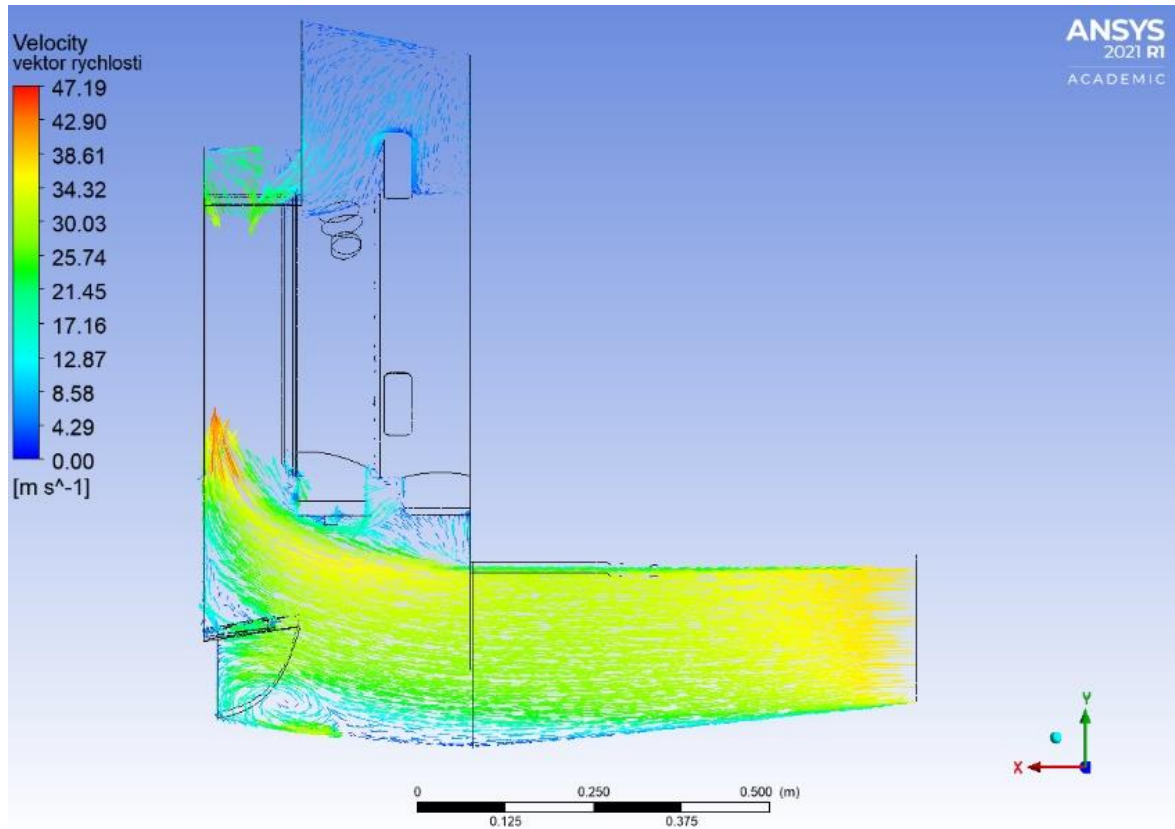
Obr. 112 – 3D proudnice návrh 7



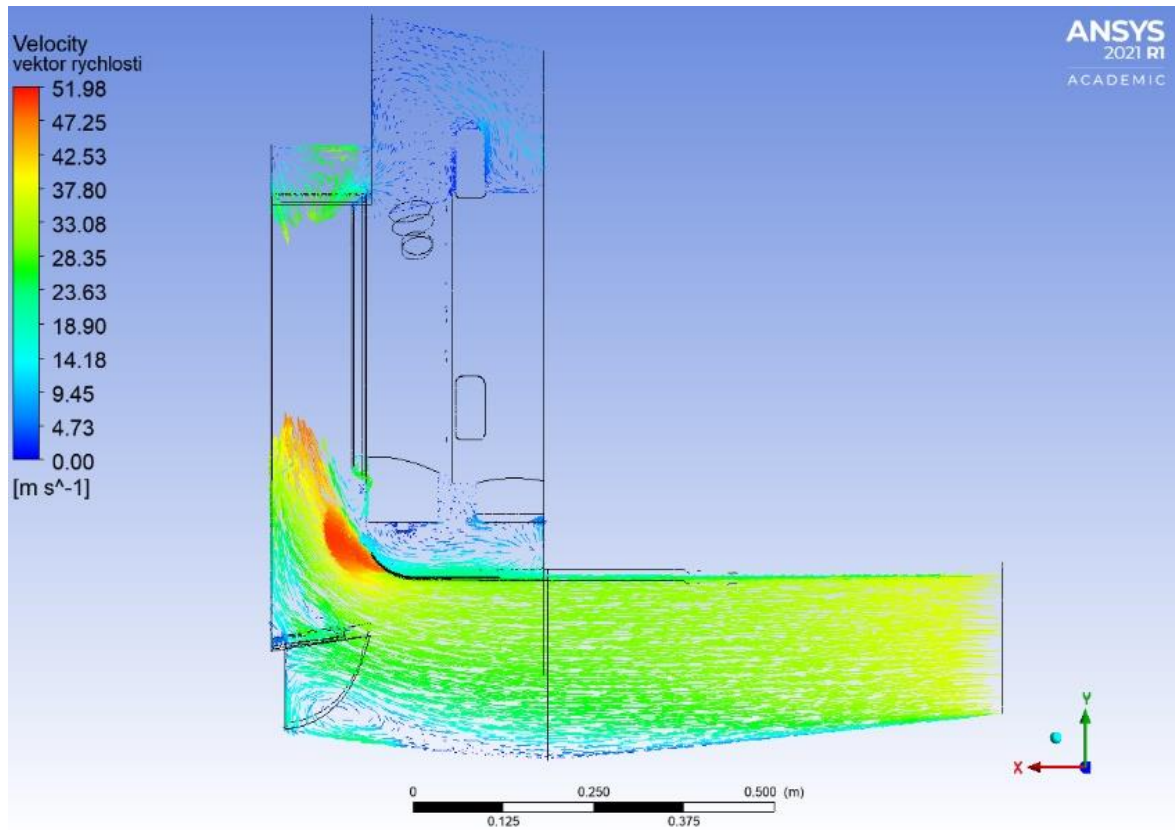
Obr. 113 – 3D proudnice návrh 9

PŘÍLOHA 8

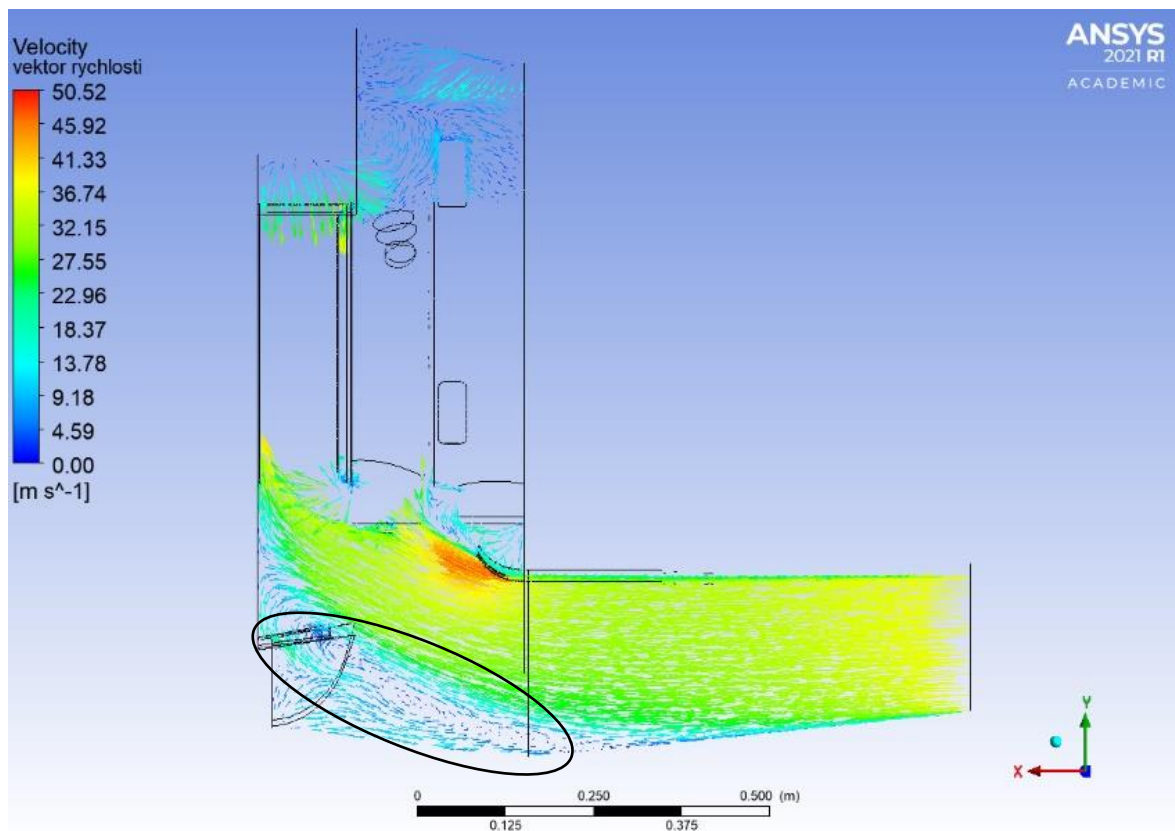
Zobrazení vektorů rychlosti v meridiálním řezu vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro návrh 0, návrh 2 a návrh 4.



Obr. 114 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu návrh 0

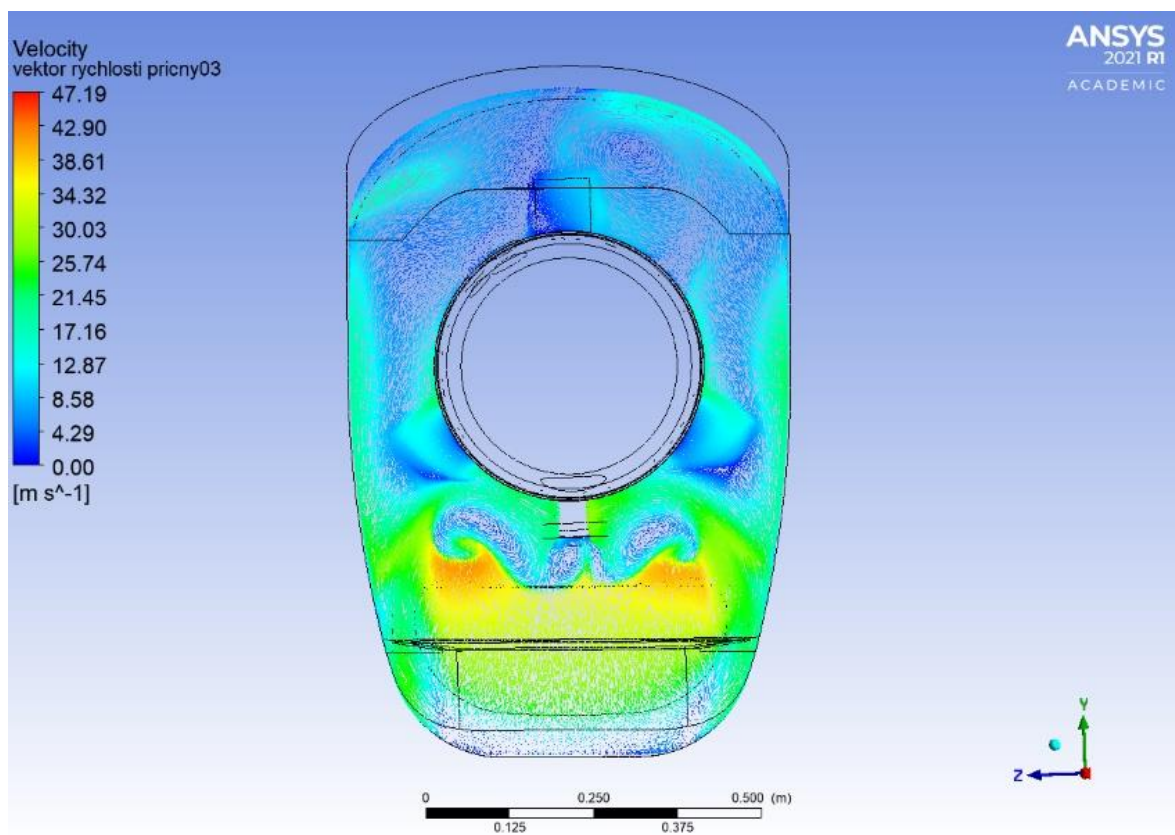


Obr. 115 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu symetrie návrh 2

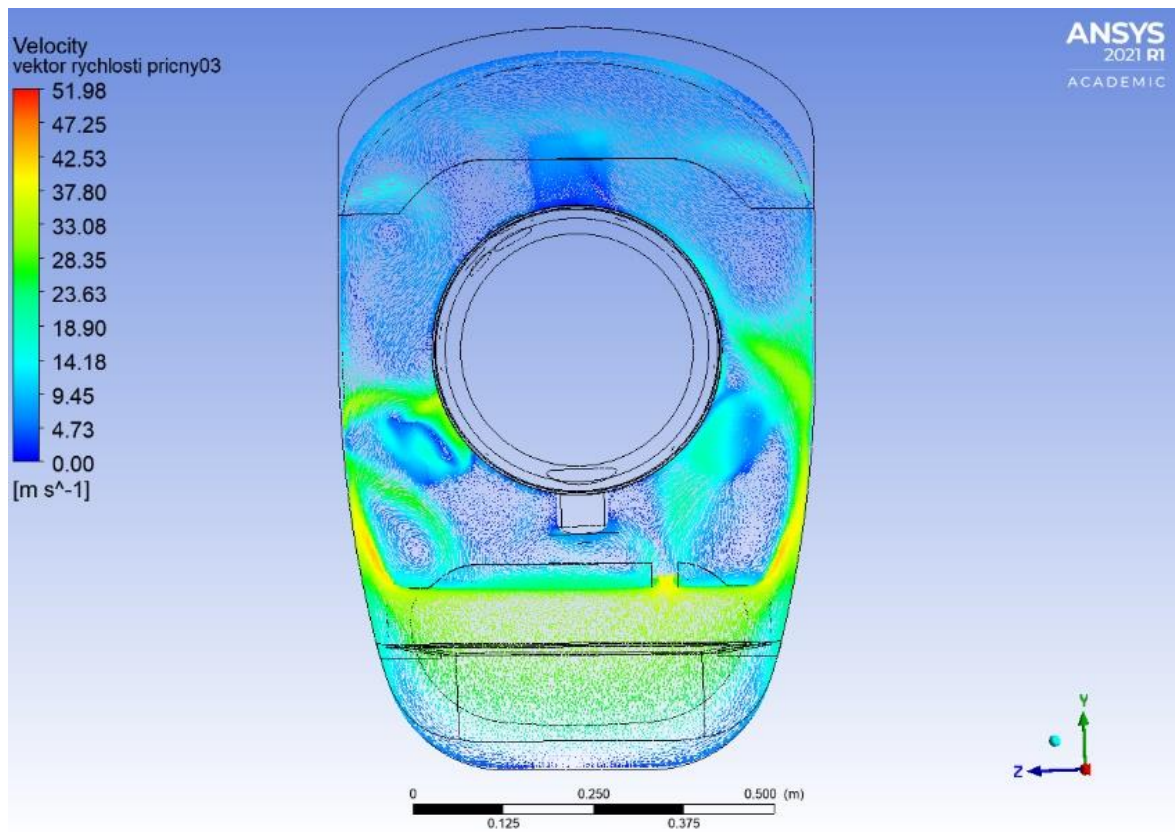


Obr. 116 – Vektory rychlosti v meridiálním řezu návrh 4

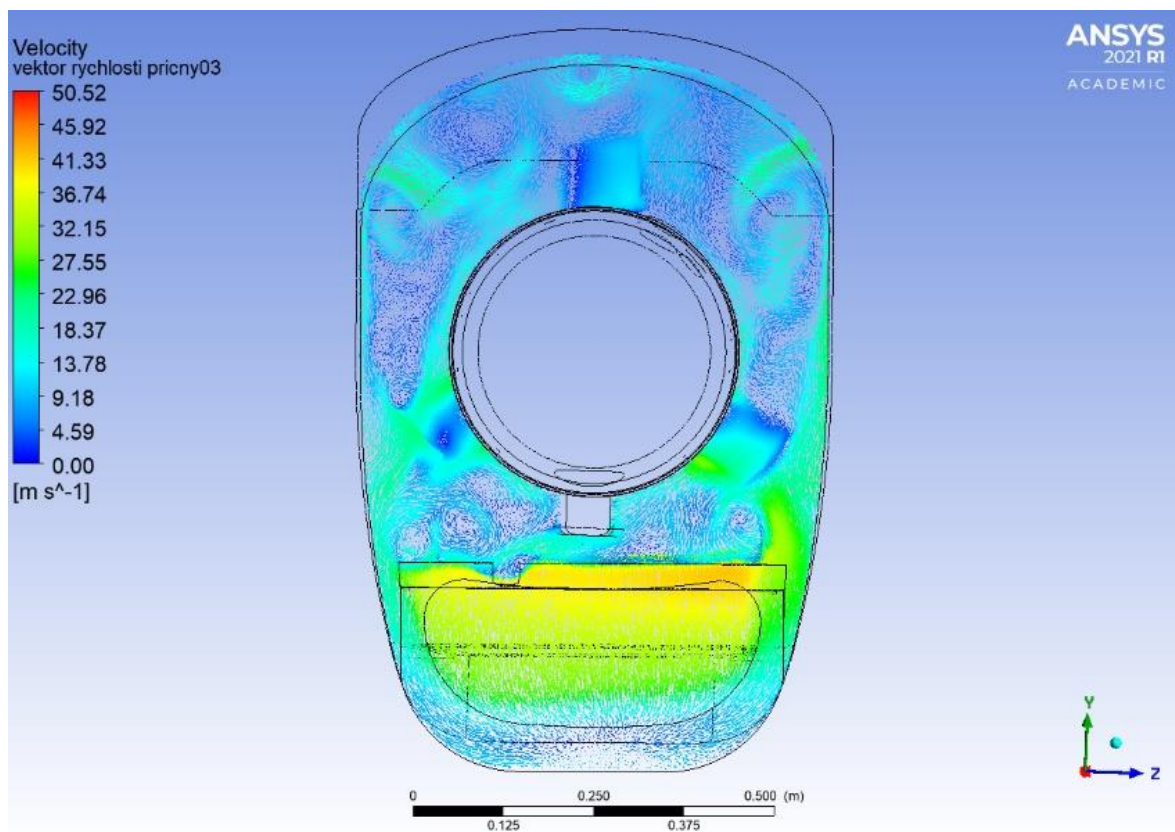
Obrázky vektorů rychlosti v řezu rovinou yz v oblasti plechu odledňovací klapky vstupní soustavy turbovrtulového motoru pro návrh 0, návrh 2 a návrh 4.



Obr. 117 – Vektory rychlosti řezu rovinou yz návrh 0



Obr. 118 – Vektory rychlosti v řezu rovinou yz návrh 2



Obr. 119 – Vektory rychlosti v řezu rovinou yz návrh 4