



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

AKTIVNÍ ŘÍZENÍ PROUDĚNÍ PŘI OBTÉKÁNÍ VÁLCE

ACTIVE CONTROL OF FLOW PAST A CYLINDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Daniel Kukrle

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.

BRNO 2022

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Daniel Kukrle
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Fluidní inženýrství
Vedoucí práce:	doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
Akademický rok:	2021/22

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Aktivní řízení proudění při obtékání válce

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Periodické odtrhávání mezní vrstvy se vznikem vírové stezky vyvolává silové buzení obtékaného tělesa (fluid–structure interaction) a je provozně komplikujícím jevem, který může při vzniku rezonance potenciálně vést až k destrukci dané konstrukce. Potlačení tohoto nechtěného jevu lze realizovat pasivními prostředky (např. vložení žebra za obtékaný válec) nebo aktivním řízením (např. vefukování nebo odsávání mezní vrstvy).

Cíle diplomové práce:

Cílem diplomové práce je provedení rešerše v oblasti aktivního řízení proudění s odtržením mezní vrstvy obecně a se vznikem periodické vírové stezky speciálně. Na základě výpočtové simulace proudění za válcovou překážkou pak analýza proudění a vytipování míst pro aktivní zásah, navržení možných přístupů k realizaci aktivního řízení a vlastní realizace aktivního řízení v prostředí numerických simulací CFD.

Seznam doporučené literatury:

GAO, D., G. CHEN, W. CHEN, Y. HUANG a H. LI. Active control of circular cylinder flow with windward suction and leeward blowing. *Experiments in Fluids*. 2019, 60(26), 1-17.

CHOI, H., W.-P. JEON a J. KIM. Control of Flow Over a Bluff Body. *Annual Review of Fluid Mechanics*. 2008, 40, 113-139.

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2021/22

V Brně, dne

L. S.

doc. Ing. Jiří Pospíšil, Ph.D.
ředitel ústavu

doc. Ing. Jiří Hlinka, Ph.D.
děkan fakulty

ABSTRAKT

Diplomová práce se zabývá aktivním řízením proudění. V první části popisuje odtržení mezní vrstvy a vznik Kármánových vírů. Také vysvětluje, proč je potřeba řídit proudění a rozděluje metody řízení do základních kategorií. Následně jsou popsány známé aktivní metody řízení proudění. Další část práce definuje výchozí úlohu s tvořenými Kármánovými víry za válcovým tělesem, analyzuje proudění a navrhuje použitelné principy pro řízení proudění. Poslední část práce testuje jednotlivé metody řízení. Nejprve jsou ověřovány metody bez zpětné vazby a na závěr i metody se zpětnou vazbou.

Klíčová slova

Aktivní řízení proudění, Kármánovy víry, odtržená mezní vrstva, řízení proudění bez zpětné vazby, řízení proudění se zpětnou vazbou

ABSTRACT

The diploma thesis is considering active flow control. At first part describes boundary layer separation and Kármán vortices formation. It also explains why it is important to control the flow, and the control is divided into basic categories. Then there are described known active flow control methods. Next part defines default problem with Kármán vortices formed behind a cylinder, analyzes flow and suggests useable flow control principles. In last part of the thesis are tested chosen flow control methods. At first there are verified open-loop methods, then closed-loop methods too.

Key words

Active flow control, Kármán vortices, boundary layer separation, open-loop flow control, closed-loop flow control

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

KUKRLE, Daniel. Aktivní řízení proudění při obtékání válce. Brno, 2022. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/143029>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Pavel Rudolf.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **Aktivní řízení proudění při obtékání válce** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

Datum

Jméno a příjmení

PODĚKOVÁNÍ

Rád bych tímto poděkoval doc. Ing. Pavlu Rudolfovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a také za jeho motivující nadšení do tématu. Děkuji také Ing. Ondřeji Urbanovi za jeho vstřícnost, obětavost a poskytnutí vlastního softwaru. V neposlední řadě patří obrovské poděkování mé rodině, bez které bych tuto práci nemohl dokončit.

OBSAH

ÚVOD.....	11
1 Održení mezní vrstvy	12
2 Kármánova vírová stezka	13
3 Řízení proudění	15
4 Možnosti aktivního řízení.....	17
4.1 Tryska	17
4.2 Syntetická tryska.....	18
4.3 Rotující válce	18
4.4 Piezoelektrické klapky.....	19
4.5 Elektrický výboj.....	19
4.6 Pohybující se obtékané těleso	20
5 Numerická simulace	21
5.1 Geometrie.....	22
5.2 Síť	23
5.3 Řešič.....	24
5.4 Vyhodnocování	25
6 Numerická simulace bez řízení proudění	27
6.1 Analýza proudění	27
6.2 Navržení přístupů řízení a vytipování umístění.....	32
6.3 Nalezení bodu odtržení	34
7 Numerická simulace s řízením proudění	35
7.1 Pasivní tryska v ose x.....	35
7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s).....	35
7.3 Dvě trysky (-10° 0°, konstantní vstřikování)	36
7.4 Dvě trysky (5° 15°, konstantní vstřikování)	37
7.5 Dvě trysky (5° 15°, vstřikování tvar sinus)	38
7.6 Dvě trysky (5° 20°, vstřikování tvar sinus)	39
7.7 Dvě trysky (5° 20°, konstantní vstřikování)	41
7.8 Dvě trysky (5° 20°, vstřikování tvar sinus s konstantní složkou).....	42
7.9 Dvě trysky (5° 20°, odsávání/vstřikování tvar sinus)	43
8 Řízení bez zpětné vazby – posilované učení	45
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s).....	45
8.2 Dvě trysky (5° 20°, konstantní odsávání)	48
8.3 Dvě trysky (5° 20°, odsávání tvar sinus)	49
9 Řízení se zpětnou vazbou – posilované učení	51
9.1 Dvě trysky (5° 20°, odsávání/vstřikování).....	51
9.2 Dvě trysky (5° 20°, odsávání).....	54
DISKUSE	58
ZÁVĚR.....	59
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	62
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	64
SEZNAM PŘÍLOH	65
PŘÍLOHY	66

ÚVOD

Studium vírových struktur vznikajících za obtékání tělesy patří k důležitým kapitolám v mechanice tekutin. I nepatrné a okem nepostřehnutelné vírové struktury mohou mít významné dopady při kontinuálním působení na obtékané těleso. Obtékaná tělesa jsou všechna ta, která se nacházejí v prostředí s prouděním, zkrátka téměř všechna tělesa, co existují. Většina vírových struktur vzniká bez pomoci člověka a není nijak řízena. Anténa automobilu vydávající hvízdavé zvuky, kmitající pouliční osvětlení – to je pro člověka v dnešním světě, kdy je zvyklý mít vše pod kontrolou, nezvyklé. Opravdový problém pak nastává, když „zanedbatelné“ vírové struktury poškodí lopatku vodní turbíny, zdemoluje pár chladících věží nebo nekontrolovatelně rozkmitají most. Pro zajištění bezpečnosti a předejití nechtěných událostí přichází na řadu řízení proudění. Pasivní řízení je dostačující pro kmitající komíny nebo dlouhé potrubí. U sofistikovanějších zařízení, jako jsou například letadla, je využíváno aktivního řízení. Hlavní výhodou je adaptabilita řízení na aktuální proudění, což je při širokém spektru letových podmínek velmi důležité. Aktivní řízení proudění bude v blízké budoucnosti častěji a častěji využíváno. U mnoha oblastí techniky, které se potýkají s prouděním, je vývoj tak daleko, že dalším směrem zdokonalování a zvyšování efektivity by mohlo být právě aktivní řízení.

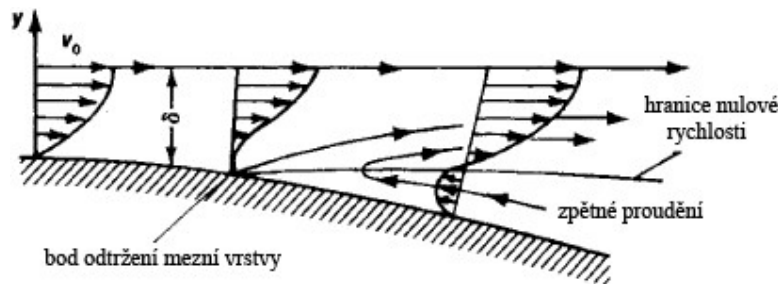
Tato práce se zabývá aplikací aktivních metod na proudění kolem obtékaného válcového tělesa. V první části zkoumá odtrženou mezní vrstvu a s ní spojené Kármánovy víry. Následuje shrnutí známých metod aktivního řízení. V druhé části pak definuje výchozí úlohu, na kterou bude aplikováno aktivní řízení s cílem potlačit odtržení mezní vrstvy, vznik Kármánových vírů a zmírnit silové působení na obtékané těleso. Proudění v základní úloze je analyzováno a poté jsou navrženy možné přístupy řízení. Třetí část práce aplikuje navržené přístupy řízení a hledá jejich nejlepší nastavení pro dosažení maximálního zmírnění silového působení na obtékané těleso. Hodnotícím kritériem je účinnost řízení a energetická náročnost.

1 Odtržení mezní vrstvy

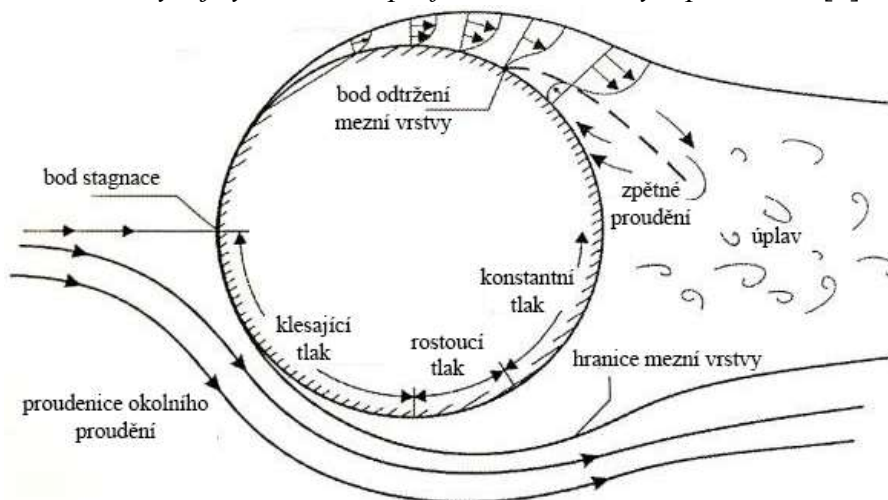
Rozhodující vlastnost reálné tekutiny při vzniku a odtržení mezní vrstvy je viskozita, tzv. odpor proti tečení. V tekutině se dají uvažovat tenké vrstvy sestávající z makroskopických částic tekutiny a každá z nich má svoji rychlost. Přenos hybnosti mezi jednotlivými vrstvami je uskutečňován pomocí viskozity. V tekutině obtékající těleso je v kontaktu s tělesem tenká vrstva, která má vzhledem k tělesu nulovou rychlost. Tato podmínka ulpívání je dána fyzikálními zákony. V závislosti na viskozitě média pak narůstá rychlost tekutiny v tečném směru na směr proudění.

Mezní vrstva je definována jako oblast proudění v blízkém okolí tělesa, kde jsou viskózní síly nezanedbatelně velké vzhledem k setrvačným silám tekutiny. Podle zákona zachování mechanické energie je rychlost proudění provázána se statickým tlakem. Začne-li tekutina obtékat těleso, tenká vrstva tekutiny v kontaktu s tělesem se zastaví dle zákona ulpívání. Vlivem viskozity je další přilehlá vrstva tekutiny bržděna vrstvou s nulovou rychlostí. Se změnou rychlosti se mění i tlak, rychlost klesá, tlak narůstá. Zvýšení tlaku vede ke zvyšování viskózního tření a většímu snížení rychlosti. Nad obtékanou plochou se vytvoří rychlostní profil (obr. 1.1) měnící se s postupem proudění podél tělesa. Jednotlivé vrstvy jsou zpomalovány natolik, až na profilu rychlosti vznikne inflexní bod – bod odtržení. Za ním dochází mezi odtrženou mezní vrstvou a tělesem k otočení smyslu proudění, ke zpětnému a silně zavířenému proudění (obr. 1.2).

První případ fatálního nebezpečí vzniklého odtrženým prouděním je na křídle letadel. Zhoršení vzlaku a letových vlastností je následkem zcela nechtěným. Odtržená mezní vrstva může navíc generovat různé vírové struktury, které následně mohou svou případnou periodicitou způsobit únavové namáhání materiálu.



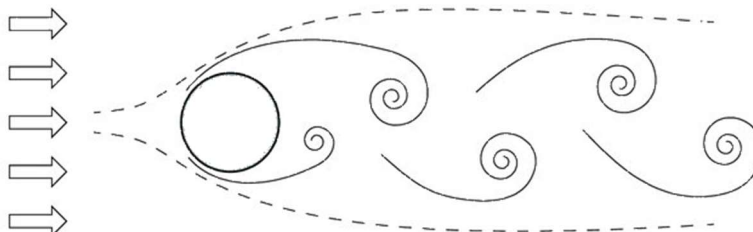
obr. 1.1 Vývoj rychlostního profilu nad obtékaným povrchem [8]



obr. 1.2 Charakter proudění v okolí obtékaného válce [9]

2 Kármánova vírová stezka

Přesně takové vírové struktury se nazývají Kármánovy víry. Tento často uváděný „základní“ problém způsobuje výrazné změny v tlakovém poli, což vede k proměnlivému silovému působení na obtékané těleso ve formě odporové a vztahové síly. Tyto víry se střídavě tvoří a následně odtrhávají od horní a dolní strany obtékaného tělesa (obr. 2.1). V momentě tvorby víru se na straně tělesa snižuje tlak (ve středu víru je tlak nejnižší) a těleso je do této oblasti „vtahováno“ – na těleso působí vztahová síla. Směr vztahové síly se mění v závislosti na tom, na které straně tělesa se zrovna tvoří vír, a tedy klesá tlak.



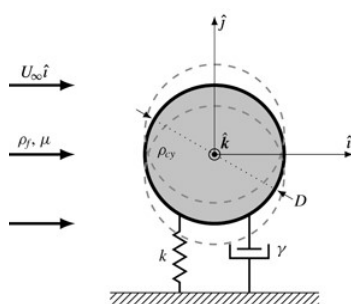
obr. 2.1 Kármánova vírová stezka za tělesem [10]

Tuhost a tlumení tělesa jsou zásadním faktorem pro rozkmitání tělesa. Dostatečná tuhost a tlumení dovolí tělesu kmitat v omezených amplitudách a musí být uvažována možnost únavového namáhání tělesa. Při nedostatečné tuhosti a tlumení systému hrozí kmitání s neomezeným růstem amplitudy, což většinou vede k trvalému porušení nebo zničení kmitající konstrukce. Dalším důležitým faktorem je možnost vzniku rezonance. Frekvence kmitání se přiblíží nebo ztotožní s vlastní frekvencí kmitajícího tělesa, amplituda výrazně naroste, což opět může vést k destrukci kmitajícího tělesa.

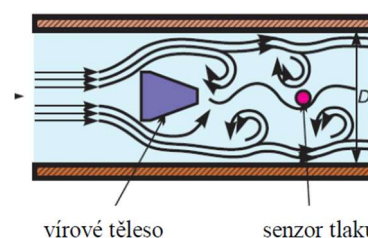
Rozkmitání tělesa je nežádoucí ve většině případů – křídla letadel, lopatky čerpadel a turbín, komíny, potrubí, pilíře mostů atd. Jejich rozkmitání není požadovanou funkcí těchto konstrukcí a je nutné ho zmírnit nebo nejlépe úplně potlačit. Destrukce konstrukce je nežádoucí ve všech případech. Existuje pár výjimečných případů, kdy je kmitání naopak vyžadováno ke splnění funkce konstrukce. Kmitání může sloužit například pro výrobu elektrické energie v alternativních větrných elektrárnách (obr. 2.2) nebo zařízení instalovaných pod vodou (obr. 2.3). Úplně jinak jsou odtrhávané víry využity v měřicí technice – vírovém průtokoměru (obr. 2.4), kde se ze známé frekvence odtrhávání určí rychlost proudění tekutiny a následně i k určení průtoku. Nadále bude uvažována situace nechtěného vzniku odtrhávané vírové struktury a snaha potlačit ji aktivním řízením. [1]



obr. 2.2 Větrná elektrárna [11]



obr. 2.3 Podvodní generátor [12]



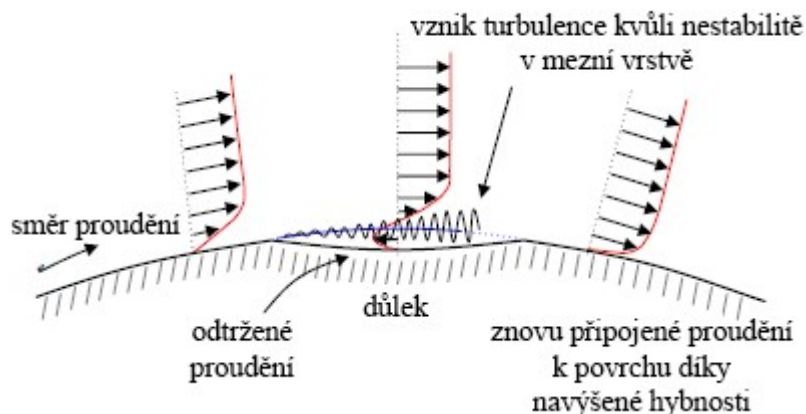
obr. 2.4 Vírový průtokoměr [13]

Zabránit vzniku nežádoucích jevů v úplavu obtékaného tělesa a jejich následkům je možné několika způsoby. Pokud se obtékané konstrukci změni tuhost a tlumení, buzení tím může být dostatečně zeslabeno a zároveň mají tyto změny přímý vliv na vlastní frekvenci konstrukce. To má velký význam při vzniku rezonance a je možné touto cestou rozkmitání zabránit. Další možný přístup uplatňuje princip odstranění nebo alespoň zeslabení zdroje energie kmitání. Kármánovy víry jsou v mnoha případech pouze buzením, na které naváže rezonance s daleko větší amplitudou kmitání. Bude-li zeslabeno nebo odstraněno buzení, problém bude vyřešen a k rezonanci nedojde. Toho se dá dosáhnout řízením proudění okolo tělesa. [1]

3 Řízení proudění

Pozitivních důsledků ovlivňování mezní vrstvy je hned několik: zvýšení vztlaku, zabránění či oddálení odtržení proudění, redukce indukovaného a tlakového odporu, řízení cirkulace, nebo i chlazení. Metody řízení proudění se mohou rozdělit do dvou kategorií.

Do první kategorie řadíme metody pasivní. Princip metod spadajících do této kategorie spočívá v úpravě geometrie tělesa. Přidáním tvarovaného opláštění, které lépe nasměruje proudění, nebo přidáním prvků rozrušujících vírové struktury v úplavu za tělesem. Jinou možností jsou prvky na tělese vytvářející specifické víry, které promíchávají jednotlivé vrstvy v mezní vrstvě, tím se dostanou částice s vyšší energií blíže k tělesu a navýší tak setrvačnost proudění těsně u tělesa. To ve výsledku způsobí oddálení bodu odtržení nebo úplné přimknutí. Dobrým příkladem zde může být golfový míček, na jehož povrchu jsou důlky, které plní přesně tuhle funkci – oddálení bodu odtržení mezní vrstvy (obr. 3.1). Golfový míček má ve výsledku menší tlakový odpor a doletí dál. Výhodou pasivního řízení proudění je skutečnost, že k jeho fungování není potřeba dodávat žádnou energii, což se pozitivně promítne do provozních nákladů. Oproti aktivním metodám řízení, ale nejsou tak flexibilní ve svém použití a většina z pasivních metod není schopna reagovat na výraznější změnu okrajových podmínek určujících tvorbu vírových struktur. Obecně lze specifikovat jako nejlevnější variantu, kdy cena, jednoduchost aplikace a bezúdržbovost hrají hlavní roli při jejich volbě. O pasivních metodách je pojednáno v bakalářské práci na téma Metody pro potlačení Kármánových vírů [7].



obr. 3.1 Řízení proudění kolem golfového míčku [6]

Aktivní metody řízení uplatňují naprosto odlišný princip než metody pasivní. Dodávají do proudění energii (nebo ji odebírají). U těchto metod je nutné myslet na přidanou energetickou náročnost oproti pasivním metodám. Jejich energetická náročnost je pouze relativní nevýhoda, vždy záleží na míře pozitivního výsledku jejich aplikace, a jak moc je tento výsledek ceněný. Na druhou stranu se dají mnohem lépe a jednodušeji přizpůsobit proměnlivým podmínkám aplikace. Tyto jsou dále rozlišitelné dle užití zpětné vazby.

Aktivní metody bez zpětné vazby jsou řízeny předem určeným signálem, jehož charakteristika vychází z předchozí analýzy problematického proudění a predikce na základě znalostí mechaniky tekutin, ze zkušeností s podobným případem nebo ze závěrů testování řízení na daném tělese. Aktivní metody řízení se zpětnou vazbou mají charakteristiku signálu řízení závislou na odezvě z proudového pole, například na měření tlaku v předem určeném bodu atd. Aktivní řízení se zpětnou vazbou je oproti aktivnímu řízení bez zpětné vazby flexibilnější v případě změny okrajových podmínek, kdy je schopné se adaptovat díky vyhodnocení dat z proudového pole. Také je možné díky zpětné vazbě a vhodné úpravě signálu uspořit energii

do řízení vloženou. Řízení bez zpětné vazby (stejně jako pasivní metody řízení) nemá samořídící schopnost a v tomto ohledu tedy za řízením se zpětnou vazbou zaostává. [2]

Princip aktivního řízení spočívá v zásahu do odtržené mezní vrstvy. Je-li mezní vrstva přimknutá k obtékanému tělesu, proudnice dokonale sledují tvar tělesa. Na těleso nepůsobí tlakový odpor, je téměř nulový, a za tělesem se netvoří žádné vírové struktury, není zde silně zavířený úplav. Aby proudnice dokonale kopírovaly těleso by bylo možné pouze v ideální tekutině bez viskozity. V reálné tekutině proudnice nekopírují dokonale tvar tělesa. Na to má vliv právě existence mezní vrstvy kolem tělesa, která vzniká kvůli viskozitě tekutiny. V ní jsou viskózní síly řádově stejné jako setrvačné síly, a tedy významně ovlivňují charakter proudění. [3]

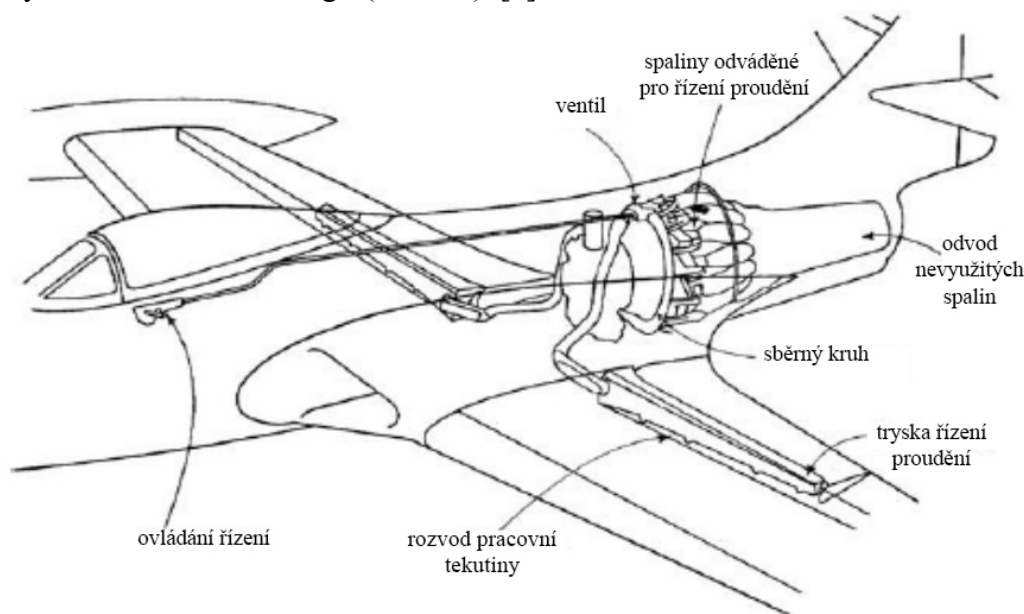
4 Možnosti aktivního řízení

4.1 Tryska

První a nejjednodušejí představitelnou metodou je prostá tryska, jejíž použití je možné jak ve vzduchu, tak i ve vodě. Z trysky proudí tekutina o určité rychlosti, tedy s určitou kinetickou energií. Tato energie je vpravená do mezní vrstvy, kde urychluje tekutinu zpomalenou viskózním třením. Tekutina může z trysky proudit stabilní konstantní rychlostí nebo může být tento signál libovolně upraven – např. charakteristika obdélníkové vlny atd. [4] Druhou možnou variantou je odsávání mezní vrstvy tryskou. Ve finále je pak kombinace vstřikování a následného odsávání tekutiny v mezní vrstvě, o tom bude podrobněji pojednáno v kapitole 4.2.

Podstatným prvkem u trysek vstřikujících tekutinu je právě vstřikovaná tekutina. Musí existovat mechanismus, jak je tekutina do trysky dostávána. Řešení musí být co možná nejjednodušší, jelikož v obtékaných objektech, kde se tato problematika řeší, není místo na složité mechanismy přípravy pracovní tekutiny. Nabízí se řešení, kdy v blízkém okolí tělesa existuje proudění s vyšší energií, než je energie v místě potřeby řízení. Systémem štěrbin a proudových kanálků je tekutina s větší kinetickou energií přepravena do oblasti s nízkou energií. Tento systém je možné používat i jako pasivní řízení, kdy se pouze vhodně navrhne přepravní kanálky a celý systém může fungovat bez jakéhokoliv zásahu. Pokud je ale zmínka o tvarování výstupního signálu tekutiny, už je nutný další zásah a metoda je již označována jako aktivní. To je výhodné při proměnlivých podmínkách aplikace. [5, 6]

V případě, že nikde v okolí tělesa není tekutina s potřebnou kinetickou energií, je nutné ji získat jiným způsobem. U letadel může být například použita kinetická energie výfukových plynů, kdy jsou tyto plyny navedeny do potřebného místa na křídle a použity jako pracovní látka s vysokou kinetickou energií (obr. 4.1). [4]



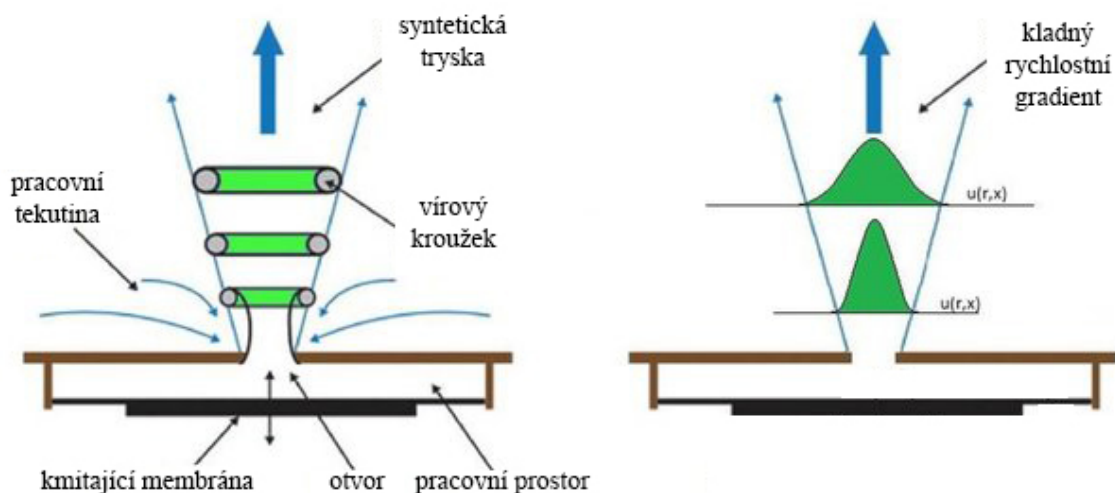
obr. 4.1 Řízení proudění na křídle letadla [4]

Tato metoda je dobře uplatnitelná v případě odtrhávání Kármánových vírů. Pro modelový příklad s tělesem kruhového průřezu bývá zvolena dvojice trysek, umístěných v okolí bodu odtržení. O tomto bude více pojednáno v další kapitole.

4.2 Syntetická tryska

Významně užívaným prvkem v oblasti řízení jsou tzv. syntetické trysky. Jejich značnou výhodou oproti konvenčním tryskám je princip „nulového průtoku“. Základem zařízení je píst nebo membrána, kmitající kolem své rovnovážné polohy. Tím je skrz otvor (výrazně menšího průměru, než je průměr pístu/membrány) pravidelně vytlačována a nasávána tekutina z blízkého okolí trysky. Tímto jsou za určitých podmínek generovány vírové kroužky, které vytváří kladný rychlostní gradient směrem ke svému středu (obr. 4.2). Jediným rysem tohoto zařízení je skutečnost, že ke své funkci využívá pouze tekutinou průtokového systému. Přenáší tak energii do proudového pole bez dodávání přebytečné hmoty, což může být v některých aplikacích nežádoucí.

Uplatnění nalézá zejména v aplikaci v plynném prostředí, a to při odtržení mezní vrstvy na křídlech letadel, kde se klade důraz na jednoduchost, váhu a malé rozměry zařízení. Způsoby aplikace a použití jsou různé, syntetické trysky jsou také používány například jako míšící prvky nebo jako zdroj proudění v chladičích. Jejich výhodou je, kromě dodání energie bez dodání přebytečné tekutiny, nízká spotřeba piezoelektrických membrán a jejich pracovní rozsah od jednotek Hz do jednotek či desítek kHz. Jedinou významnou nevýhodou může být omezení maximální rychlosti vypouštěné kapaliny, která dosahuje přibližně $100 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$. [4]



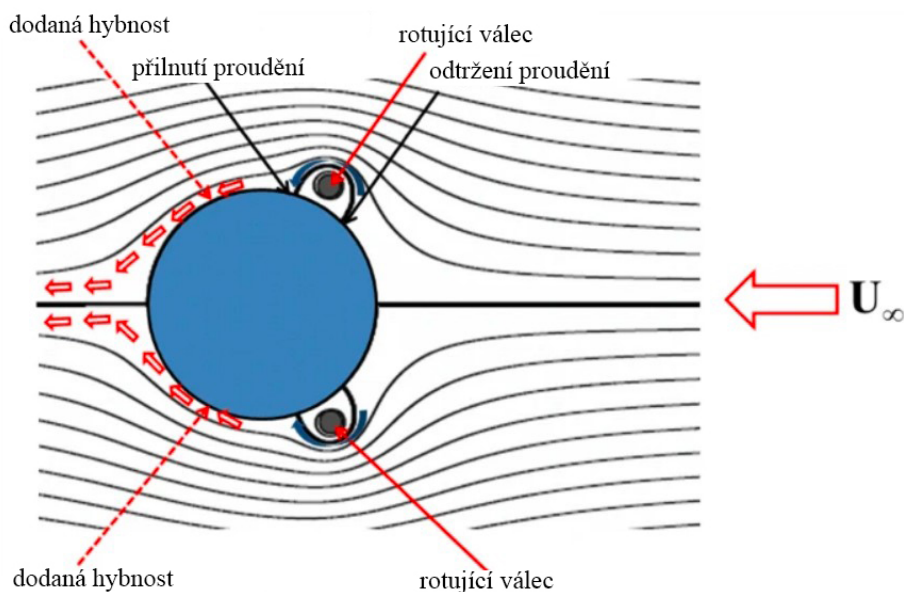
obr. 4.2 Princip fungování syntetické trysky [14]

4.3 Rotující válec

Metoda rotujícího válce je spíše ukázkovým příkladem možností v řízení odtržené mezní vrstvy než prakticky uplatnitelnou metodou. I přes to je ale účinná, a její uplatnění je omezeno pouze možnostmi konstrukčního řešení. Stejně jako u Magnusova jevu, i zde se jedná o obtékaný roztočený válec. Výhodou je, stejně jako u syntetické trysky, fungování bez přívodu další pracovní tekutiny, metoda pracuje pouze s tekutinou v jejím blízkém okolí.

Při rotaci je rychlost rotujícího válce na jedné straně stejně orientovaná jako rychlost proudění a na druhé straně jsou rychlosti orientovány opačně. Na straně s opačně orientovanými rychlostmi dochází k brzdění tekutiny a v tom důsledku navyšování tlaku. Na druhé straně, kde jsou rychlosti souběžné, je rychlost proudící tekutiny naopak zvyšována a v zájmu zákona o zachování energie se musí tlak snížit. Na těleso tím pádem působí vztlačová síla kvůli rozdílu tlaku na stranách tělesa a těleso je vychylováno ve směru nejnižšího tlaku v jeho okolí.

V případě, kdy je rotující válec použitý k přimknutí mezní vrstvy, pozornost se neupírá na vzniklou sílu na něj působící, ale právě na výše popsané specifické tlakové pole. Funkčnost řízení je dána umístěním válce a smyslem rotace. Válec je umístěn do vhodného bodu v odtržené mezní vrstvě, těsně za bodem odtržení. Smysl rotace musí být pak takový, aby oblast s vysokým tlakem vznikla co nejbližší hlavnímu obtékanému tělesu, u kterého se mezní vrstva odtrhla. Vysoký tlak navyšuje v nízkoenergetické mezní vrstvě energii a ta se v ideálním případě hned za rotujícím válcem opět přimkne (obr. 4.3). [7]



obr. 4.3 Řízení proudění rotujícími válci [15]

4.4 Piezoelektrické klapky

Řízení proudění klapkami je standardním prvkem řízení proudění obecně, bez nich by žádné letadlo nebylo schopné řídit svůj pohyb. Stejně tak ponorky a lodě využívají „klapky“ pro řízení jejich pohybu. Piezoelektrické klapky jsou obdobou konvenčních klapek ve zmenšeném měřítku a bývají instalovány zejména jako aktivní pohyblivé prvky obtékaných povrchů. Jejich výhodou je jednodušší mechanismus vychýlování v závislosti na procházejícím proudu a rychlost odezvy.

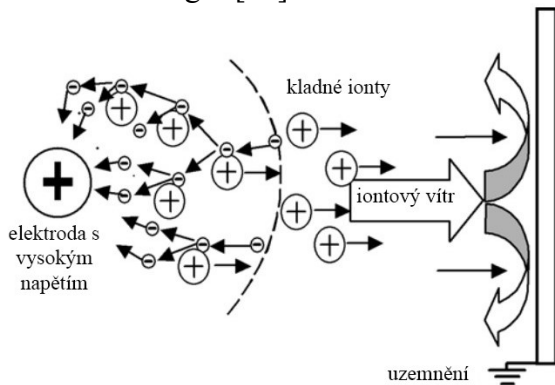
Při použití stejnosměrného proudu se jedná o stabilní vychýlení do určité polohy, častěji bývá ale použitý střídavý proud. Ten piezoelektrickou klapku rozkmitá a kolem klapky vznikají turbulence, které dodají do odtrženého proudění energii. Jak už bylo popsáno u metod výše, tato skutečnost napomáhá opětovnému přimknutí mezní vrstvy nebo alespoň oddálení bodu odtržení. Piezoelektrické klapky bývají menších rozměrů, při potřebě většího efektu se pak používají konvenční mechanické klapky. [4]

4.5 Elektrický výboj

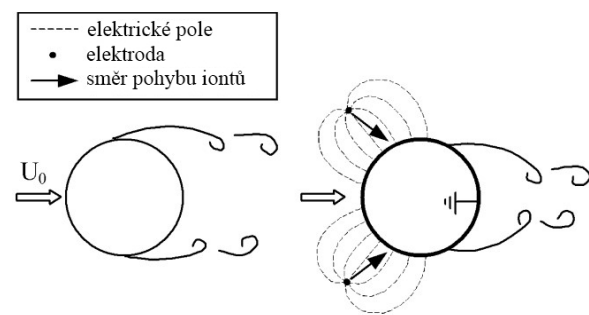
Poměrně novou metodou řízení je použití elektrického výboje. Tohle řízení je použitelné pouze v prostředí, kde je možné pracovat s elektrickým výbojem, tedy ve vzduchu. Ve vodě by byla aplikace možná pouze v případě, že by v ní byla vytvořena se vzduchem. Této kombinace je například využito v novém projektu, kdy je kombinovaná kavitace (bublinky vzduchu ve vodě) a výboj nízkoteplotního plazmatu. Kavitační je ale při proudění vody až na výjimky také nechtěný jev, a proto je řízení elektrickým výbojem omezeno pouze na aplikaci ve vzduchu.

Řídicí aparatura sestává z elektrody a zemnicí plochy. Elektroda k sobě přitahuje záporně nabitě částice, kladné částice pak směřují k zemnicímu prvku. Při intenzivním pohybu kladných částic vzniká tzv. „iontový vítr“, tedy proudění (obr. 4.4). V závislosti na umístění elektrody a zemnicího prvku je pak řízení proudění dvojího typu. Při umístění elektrody (mimo povrch tělesa) a zemnění (povrch tělesa), dle obr. 4.5, je řízené budící proudění pro odtrhávání. Prouděním iontů je budící proudění modifikováno a výsledkem je posunutí bodu odtržení. [18]

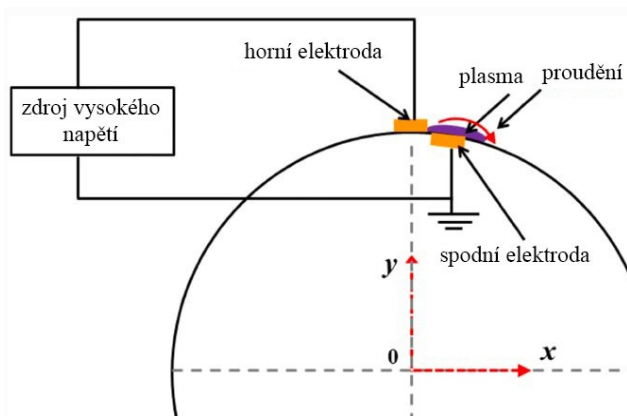
Druhá metoda pracuje přímo s odtrženou mezní vrstvou. Elektroda a zemnicí prvek je umístěn vedle sebe na povrchu tělesa (obr. 4.6). Výboj se vytvoří přímo v mezní vrstvě, urychlená tekutina výbojem interaguje s okolním prouděním a u tělesa vznikne „virtuální rotující válec“ (obr. 4.7) – vír rotující stejně jako válec v kapitole 4.3 (obr. 4.3). Princip metody je pak stejný jako v této kapitole, rotace víru směřuje proudění do mezní vrstvy a dodává jí tak kinetickou energii. [19]



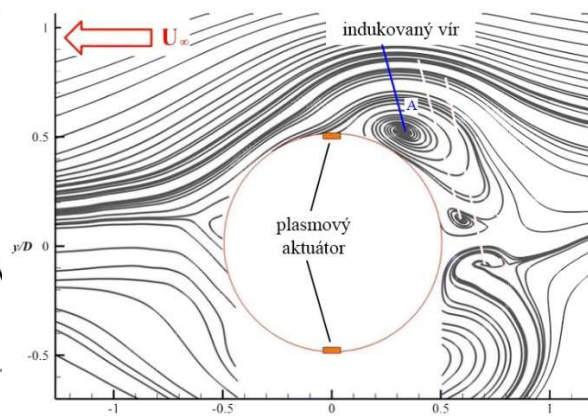
obr. 4.4 Iontový vítr [18]



obr. 4.5 Řízení změnou budícího proudění [18]



obr. 4.6 Umístění elektrod [19]



obr. 4.7 Vznik virtuálního válce (víru) [19]

4.6 Pohybující se obtékané těleso

U aplikací, kde je možné pohybovat s obtékaným tělesem, může být tento pohyb využitý k řízení proudění. Tělesem je možné pohybovat (kmitat) ve směru proudění nebo příčně na směr proudění. Další možností je rotace s tělesem, většinou se tato metoda aplikuje na válcové těleso. Pohyb tělesem může být i jiný, než kmitání nebo rotace, záleží na potřebě u konkrétní aplikace. Speciální metodou je užití pružného povrchu, který svou deformací ovlivňuje proudění v mezní vrstvě. Princip řízení proudění je obdobný jako u povrchu s důlkou nebo vroubkovaného povrchu – vyvolat v mezní vrstvě turbulence, které zvíří proudění v mezní vrstvě, dodají energii a oddálí odtržení.

5 Numerická simulace

Numerické simulace jsou prováděny v programu Ansys s použitím modulů AnsysDesignModeler pro vytvoření geometrie, AnsysMeshing pro zhotovení sítě a AnsysFluent pro výpočet. Pro účely této diplomové práce byl zvolen 2D model. U numerického modelování proudění ve 2D prostoru dochází k odchylce od reality, protože není možné v tomto režimu zachytit třetí složku rychlosti, která má v trojrozměrném prostředí zásadní vliv na vývoj proudění – turbulence je ze své podstaty trojrozměrná. I 3D numerické řešení proudění se ale potýkají s různými úskalími, které mají zásadní vliv na fyzikální korektnost výsledků simulací. Největším úskalím jsou požadavky na hardware a na výpočetní čas řešení. I když se technologie dostávají stále dál, v současné situaci musí být zvolen kompromis mezi přesností řešení a výpočetní náročností. I když jsou numerické simulace silným nástrojem a velkou měrou přispívají k urychlení výzkumu a vývoje, vždy když to bude možné, je dobré jejich výsledky podložit experimentálně. Dokud neexistují naprosto přesné numerické modely popisující realitu, jejich výsledky budou pořád více či méně vzdálené od reality.

V rámci této diplomové práce je problematika odtržení mezní vrstvy řešena ve 2D, tedy pouze jeden řez ve 3D prostoru. Zjednodušení je přípustné za podmínky, je-li třetí složka vektoru rychlosti v prostoru řádově menší než první dvě složky, a lze ji zanedbat s relativně malým dopadem na korektnost řešení. V této práci bude odtržení mezní vrstvy sledováno a řízeno na dlouhém válcovém tělese, kde je předpoklad pro zjednodušení do řešení ve 2D splněný, problém bude tedy řešený v 2D rovině.

V první řadě je nutné zpracovat simulaci výchozího stavu proudění bez použití řízení. S ním budou porovnávány výsledky řízení proudění a vyhodnocována jejich úspěšnost. Pro výchozí stav musely být zvolené takové okrajové podmínky, aby se vyvinula Kármánova vírová stezka, ta je předmětem řízení proudění. Po provedení rešerše byly vybrány okrajové podmínky (viz tab. 5.1) z podobné simulace [6], kdy byla potlačována Kármánova vírová stezka.

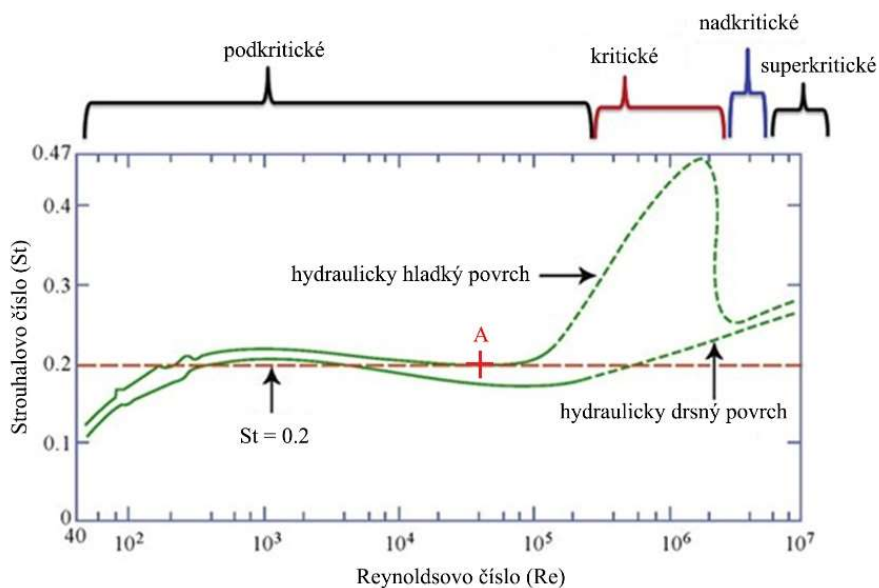
tab. 5.1 Okrajové podmínky pro vznik Kármánových vírů

rychlost proudění	průměr válce	tekutina	Reynoldsovo číslo
8 m/s	78 mm	vzduch	40 000

Ze zvolených podmínek vyplývá Reynoldsovo číslo 40 000, proudění je v režimu turbulentním. Proudění v mezní vrstvě je v oblasti kritického proudění, přechází z laminárního do turbulentního proudění. To je problém pro CFD výpočet, v současné době je velká výzva správně napočítat právě přechod mezi režimy proudění. To má zásadní vliv na polohu bodu odtržení. Předpokládaná hodnota Strouhalova čísla by měla být přibližně 0.2 (obr. 5.1 – A), vzhledem k Reynoldsovu číslu 40 000. Ze Strouhalova čísla pak lze vypočítat frekvence odtrhávání Kármánových vírů (rov. 5.1). Pro $St = 0.2$, rychlost $v_\infty = 8$ m/s a $D = 78$ mm je vypočítaná předpokládaná frekvence 20.51 Hz.

$$f = \frac{St \cdot v_\infty}{D} \quad [\text{Hz}] \quad (5.1)$$

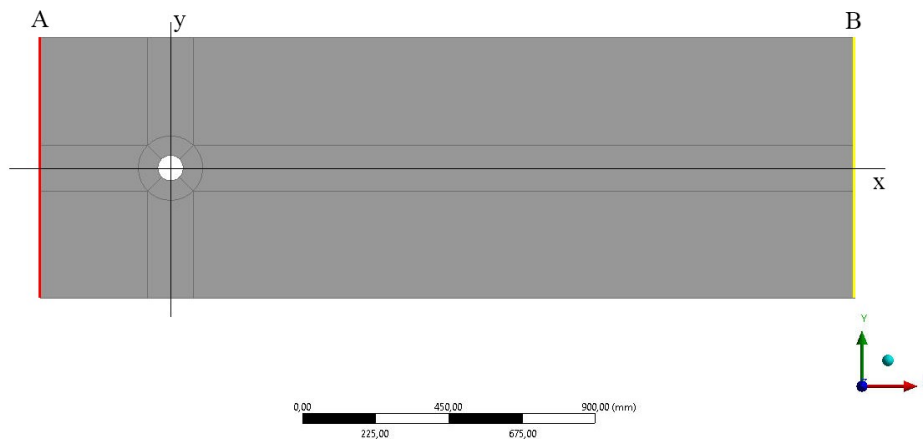
kde f je frekvence odtrhávání vírů, St je Strouhalovo číslo, v_∞ je rychlost proudění a D je charakteristický rozměr (v případě válce průměr)



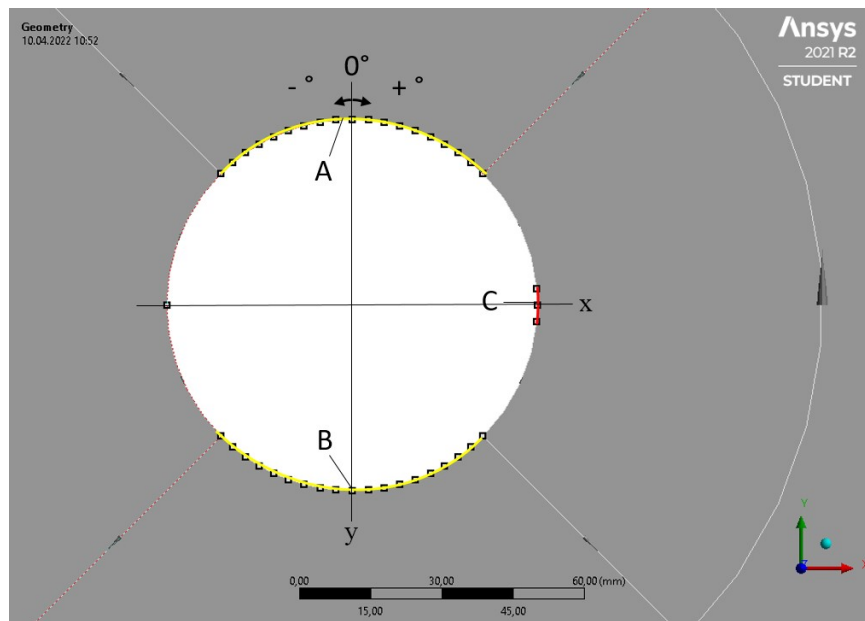
obr. 5.1 Předpokládané Strouhalovo číslo pro zvolené okrajové podmínky [15]

5.1 Geometrie

Řešená úloha má jednoduchou geometrii. Řešení proběhne jako dvourozměrná úloha, takže obtékaný tvar je kruh o průměru 78 mm. Kolem něj byla vytvořena výpočetní oblast tvaru obdélník s délkou 2500 mm a výškou 800 mm (obr. 5.2). Obtékané těleso je umístěno ve středu souřadnicového systému. Výpočetní oblast je vzhledem k počátku souřadnicového systému, tedy i obtékanému tělesu, umístěna následovně. Při smyslu proudění zleva doprava je vstup (obr. 5.2 písmeno A) 400 mm od počátku, přibližně 5 průměrů kruhu. Výstup z domény je zobrazený na obr. 5.2 písmenem B. Pro lepší kvalitu sítě a ulehčení práce při jejím vytváření byla provedena jednoduchá dekompozice. Vzhledem k tomu, že bude geometrie využita i pro výpočty s aktivním řízením, a nejen pro výchozí stav bez řízení, byl povrch obtékaného tělesa rozdělen na menší prvky, na které se následně bude dát umístit okrajová podmínka představující trysku, viz obr. 5.3. Kruh byl rozdělen na 4 části. Horní a dolní část pak dále rozdělena po 5° , aby byla možnost libovolně umístit trysku do oblasti s předpokládaným bodem odtržení, viz obr. 5.3 – A, B. Pro zvažovanou další možnost řízení byla vytvořena plocha i na úplavové části válce na ose x, jakožto potenciálně zajímavé oblasti pro umístění další trysky (obr. 5.3 – C).



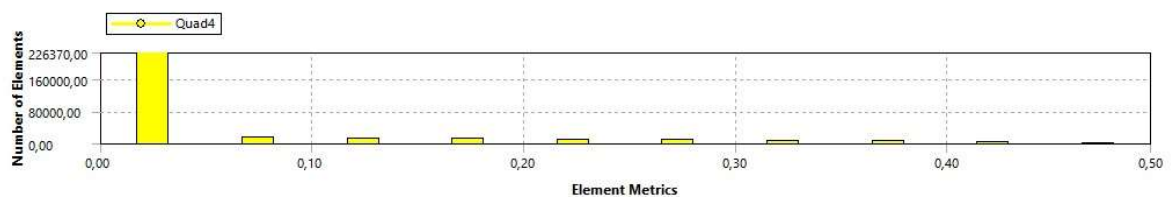
obr. 5.2 Geometrie výpočetní domény a obtékaného tělesa



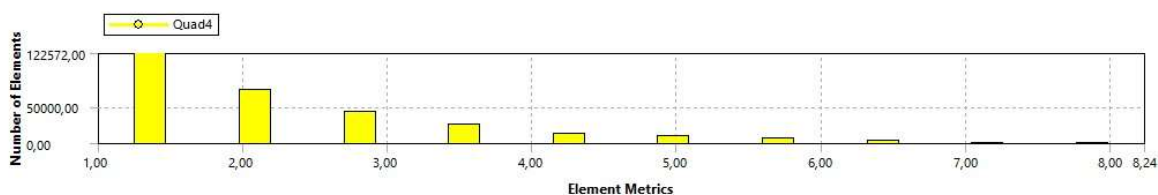
obr. 5.3 Metodika značení ploch pro nastavení okrajových podmínek. Žluté plochy nalevo od osy y jsou značeny se znaménkem mínus, plochy napravo od osy x se znaménkem plus.

5.2 Síť

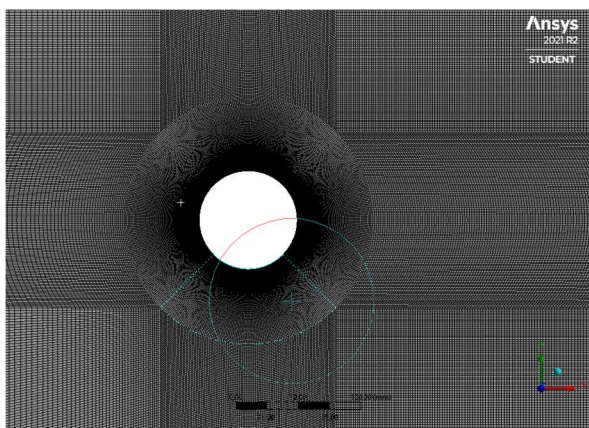
Vzhledem k použitému modelu turbulence SST $k-\omega$ byla síť tvořena s požadavkem $y^+ < 5$ u obtékaného povrchu. Všechny prvky sítě jsou čtyřúhelníky (obr. 5.6, obr. 5.7). Výsledná síť má velmi dobrou kvalitu, kontrolováno je hlavně zkosení buněk a poměr jejich stran. Síť obsahuje téměř 300 000 buněk, jejichž maximální hodnota zkosení je 0.471 (obr. 5.4) a maximální hodnota poměru stran jednotlivých buněk je 7.87 (obr. 5.5). Síť by pro svou kvalitu neměla mít vliv na fyzikální správnost výsledků. Ve výpočetní doméně byly nadále pojmenovány všechny křivky ohraničující tuto doménu. Vnější okraje jsou rozděleny na vstup (inlet), výstup (outlet) a stěnu (wall). Obtékané těleso, jak bylo výše zmíněno, je rozděleno do několika křivek. Křivky, na které je předpokládáno možné umístění rychlostních okrajových podmínek, simulujících trysky, jsou označovány s následnou logikou. Křivky ležící nad osou x jsou označeny písmenem u (up – nahore), křivky ležící pod osou x jsou označeny písmenem d (down – dole). Následně jsou doplněny o informaci o umístění od osy y , kdy osa y je chápána jako počátek s úhlem 0° . Křivky jsou označeny dle polohy jejich krajních bodů v úhlech od osy y . Polohám nalevo od osy y pak náleží znaménko mínus, napravo plus (obr. 5.3 – A, B). Dále tu jsou dvě křivky na úplavové části válce, symetricky kolem osy x , které jsou označeny anglicky `jet_back` (obr. 5.3 – C), tedy zadní trysky. U těchto trysek není předpokládána změna polohy, a tak stačilo jednodušší označení. Zbytek křivek tvořící obtékané těleso je pojmenováno jednotně jako body (těleso). Všechny plochy domény jsou označeny `fluid` (tekutina), řešič AnsysFluent je pak automaticky zařadí jako plochy pro výpočet proudění.



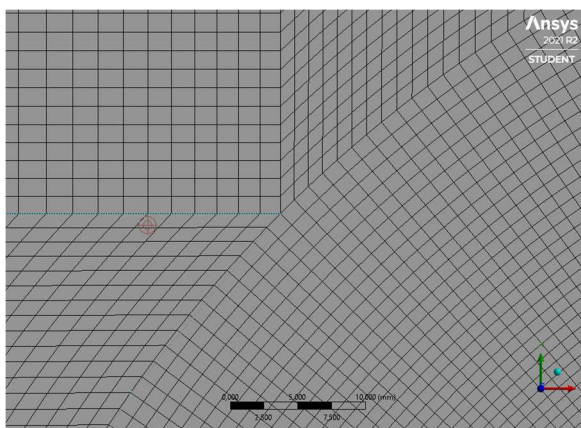
obr. 5.4 Vyhodnocení kvality sítě – zkosení



obr. 5.5 Vyhodnocení kvality sítě – poměr stran jednotlivých buněk



obr. 5.6 Konformní síť



obr. 5.7 Detail sítě na hranicích dekompozice

5.3 Řešič

Simulace byla počítána jako nestacionární. Model turbulence byl použitý SST $k-\omega$, jelikož výpočet integruje až ke stěně (nepoužívá stěnovou funkci). Tím se zajistí zachování detailů proudění u stěny obtékaného tělesa a správné vytvoření mezní vrstvy. Materiál byl zvolen dle vzorové práce [6] jako vzduch s výchozími charakteristikami z knihovny Fluentu.

Na vstupu byla nastavena rychlostní okrajová podmínka 8 m/s podle vzorové práce [6]. Na výstupu byla nastavena tlaková okrajová podmínka, která definovala přetlak 0 Pa oproti atmosférickému tlaku. Míra turbulence byla pro vstup i výstup zvolena 5 % a byla zadána s hydraulickým průměrem 0.8 m. Pro řešení Kármánových vírů bez řízení byl pak celý obtékaný kruh definován jako stěna bez prokluzu s defaultně nastavenou drsností. V případě aplikovaného aktivního řízení byly na kruhu, v místech, kde byly uvažovány trysky řídicí proudění, nastaveny okrajové podmínky definující rychlosti proudění opouštějící trysky. Pro tyto trysky byly nastaveny míry turbulence 5 % a hydraulický průměr 0.0035 m pro každých 5° povrchu kruhu. Tvar signálu rychlosti proudění z trysek byl nastaven jako konstanta nebo přes uživatelsky definovanou funkci. Konkrétní použité tvary signálů budou popsány níže, konkrétně pro každou metodu. Referenční hodnoty změněné z původních defaultních hodnot jsou plocha (area) = 0.078 m², délka (length) = 0.078 m, rychlost (velocity) = 8 m/s.

Schéma metody řešiče bylo zvoleno SIMPLE. Gradientní metoda byla ponechána na metodě nejmenších čtverců. Časový krok byl zpočátku zvolen na základě Courantova čísla, které vychází z podmínky, že během jednoho časového kroku, proudění nepřesáhne jednu výpočetní buňku. Časový krok je tedy roven podílu rychlosti v buňce a nejmenšího rozměru buňky. Na základě konzultace s vedoucím práce doc. Ing. Pavlem Rudolfem, Ph.D. bylo zhodnoceno, že kritérium nebylo správně zvolené. Courantovo číslo je důležitým faktorem hlavně při použití řešiče Coupled, v řešiči SIMPLE je podstatné dostatečně navzorkovat sledovaný děj, ideálně alespoň 100 časových kroků na jednu periodu. Počáteční časový krok $2 \cdot 10^{-5}$ při 15 iteracích byl tedy po několika výpočtech navýšen na $1 \cdot 10^{-4}$ při 20 iteracích.

Po zkoumání rozdílů řešení při různých časových krocích bylo vyhodnoceno, že tato změna nemá žádný vliv na výsledek řešení.

5.4 Vyhodnocování

Vyhodnocování účinnosti aplikovaného řízení je prováděno přes vyhodnocení silového působení na těleso. Úspěšné řízení a přimknutí mezní vrstvy, a s tím spojené potlačení Kármánových vírů, má přímý vliv na vztlak a tlakový odpor působící na těleso. Vyhodnocováním koeficientů těchto veličin a vzájemným porovnáním je vyhodnocována efektivita jednotlivých řízení. To je doplněno analýzou proudění za tělesem z polí rychlosti, vířivosti a případně i tlakového pole. Z vyhodnocených koeficientů vztlaku (C_l) a tlakového odporu (C_d) jsou pak pomocí frekvenční analýzy získány frekvence kmitání tělesa. Frekvenční analýza byla provedena v softwaru Matlab pomocí skriptu v Příloze 2. Frekvence změny vztlaku je zároveň frekvencí odtrhávání Kármánových vírů. Frekvence od tlakového odporu je pak dvojnásobkem frekvence od vztlaku, protože do odporu se promítají víry odtržené shora i zespodu válce.

Pro získání koeficientů C_l a C_d odpovídajících realitě je nutné korigovat referenční hodnoty (referenced values) v AnsysFluent, viz tab. 5.2. Bez této korekce je možné výsledky porovnávat mezi sebou, ale pro porovnání například s experimentem je nezbytné. Vliv na správnost vyhodnocení má také správný výběr ploch. AnsysFluent ve výpočtu silových účinků na těleso nepoužívá plochy, na kterých je předepsaná nějaká okrajová podmínka. Pokud tedy budou provedeny dva výpočty, ve kterých jsou různé velké trysky na tělese, tak výsledné silové působení (tedy i C_l a C_d) vyhodnocené v AnsysFluent, při totožném tlakovém poli kolem tělesa, budou rozdílné. V této práci se tato skutečnost projevuje také a není nijak korigována. Rozdíl se projeví jen při změnách velikosti trysky. Většina výpočtů je provedena se stejnou velikostí a umístěním trysky a tyto jsou mezi sebou bez problému porovnatelné, což je hlavní. Rozdíl mezi touto sadou metod řízení (dvě trysky) a druhou sadou (jedna tryska) jsou akceptovány, jelikož výsledky jsou natolik rozdílné, že tento rozdíl s určitostí není způsoben změnou velikosti trysky, ale přímým vlivem řízení proudění.

tab. 5.2 Referenční hodnoty

Plocha [m ²]	Hustota [kg/m ³]	Hloubka [m]	Entalpie [J/kg]	Délka [m]
0.078	1.225	1	0	0.078
Tlak [Pa]	Teplota [K]	Rychlost [m/s]	Viskozita [kg/(m s)]	-
0	288.16	8	1.7894e-05	-

Pro objektivnější posouzení efektivity metod řízení proudění je pro každou metodu vyhodnocena energetická náročnost. Vyhodnocován je bezrozměrný koeficient ε poměru mezi kinetickou energií tekutiny vstupující do výpočetní domény na jejím vstupu E_{ki} (inlet) a kinetickou energií vstupující skrz trysky E_{kt} (rov. 5.1). Jelikož se pokaždé jedná o stejnou tekutinu (vzduch), ve výsledném vztahu se vykrátí všechny konstanty a zůstane pouze poměr ploch vstupů a rychlostí ve třetí mocnině (rov. 5.2). Tento způsob vyhodnocování není nejlepší z hlediska absolutního, jelikož do vzorce vstupuje velikost vstupní plochy, jež není v reálném prostředí přesně stanovena. Pro různě zvolené plochy by pak vycházela různá efektivita. Tuto metodiku lze ale použít jako relativní měřítko pro posouzení zásahů jednotlivých aktivních řízení.

Poměr kinetických energií přiváděných tekutin

$$\begin{aligned}\varepsilon = \frac{E_{k t}}{E_{k \infty}} &= \frac{\frac{1}{2} \cdot m_t \cdot v_t^2}{\frac{1}{2} \cdot m_\infty \cdot v_\infty^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot V_t \cdot \rho \cdot v_t^2}{\frac{1}{2} \cdot V_\infty \cdot \rho \cdot v_\infty^2} = \frac{\frac{1}{2} \cdot Q_t \cdot t \cdot \rho \cdot v_t^2}{\frac{1}{2} \cdot Q_\infty \cdot t \cdot \rho \cdot v_\infty^2} = \\ &= \frac{\frac{1}{2} \cdot v_t \cdot S_t \cdot t \cdot \rho \cdot v_t^2}{\frac{1}{2} \cdot v_\infty \cdot S_\infty \cdot t \cdot \rho \cdot v_\infty^2} \quad [-] \end{aligned} \quad (5.1)$$

kde index ∞ značí veličiny tekutiny přicházející na vstupu výpočetní domény a index t značí veličiny tekutiny přicházející na tryskách. E_k je kinetická energie tekutiny, m je hmotnost tekutiny, v je rychlost tekutiny, V objem přivedené tekutiny, ρ hustota tekutiny, Q je průtok, t je čas a S je průtočná plocha.

Poměr ε kinetických energií se zkrácenými totožnými členy

$$\varepsilon = \frac{S_t \cdot v_t^3}{S_\infty \cdot v_\infty^3} \quad [-] \quad (5.2)$$

Veškeré zpracované animace a obrázkové přílohy jsou k nalezení v Přílohách 7, 8, 9, 10, 11.

6 Numerická simulace bez řízení proudění

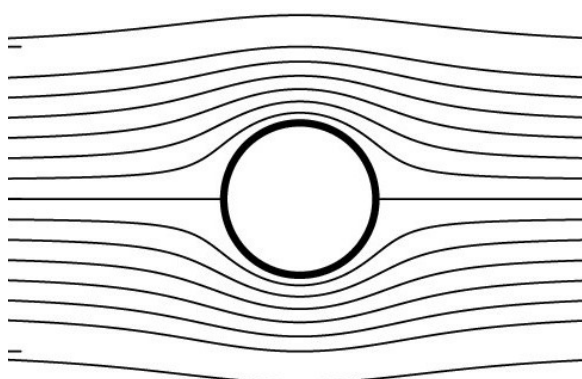
Výchozí simulace, kdy se za tělesem tvoří Kármánova vírová stezka, byla rozpočítána stacionárně a po dostatečném zkonvergování výpočtu byl řešič přepnutý na nestacionární výpočet. Výpočet byl inicializován standardně. Poté bylo napočítáno dle nastavení, viz tab. 6.1, 100 kroků v první a druhé fázi. Následně bylo dle třetí fáze napočítáno 200 časových kroků a pak byl spuštěný výpočet dle finálního nastavení 4. fáze.

tab. 6.1 Nastavení metody řešiče

	1. fáze	2. fáze	3. fáze	4. fáze
	stacionární	stacionární	nestacionární	nestacionární
tlak	standardní	druhého řádu	standardní	druhého řádu
hybnost	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu
turbulentní kinetická energie	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu
specifická rychlost disipace	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu	upwind prvního řádu	upwind druhého řádu
nestacionární člen	Eulerova implicitní metoda prvního řádu	Eulerova implicitní metoda druhého řádu	Eulerova implicitní metoda prvního řádu	Eulerova implicitní metoda druhého řádu

6.1 Analýza proudění

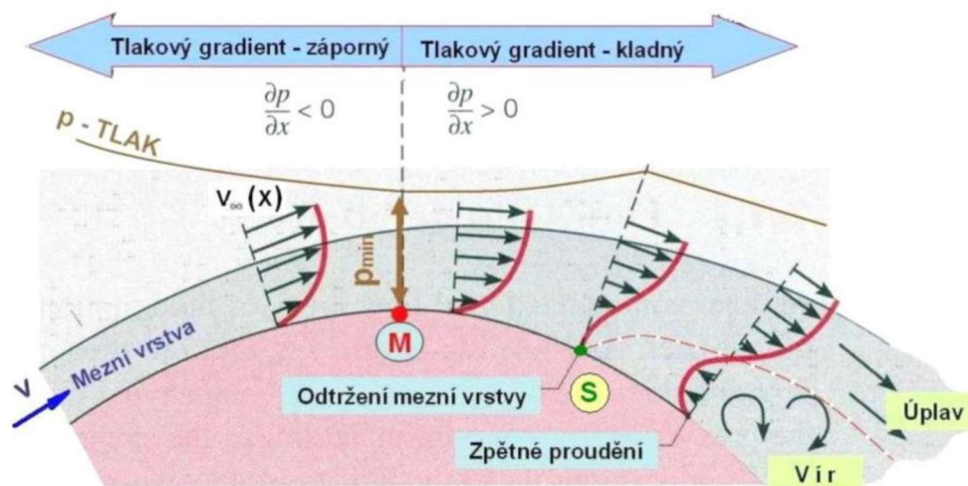
Při proudění tekutiny kolem dlouhého tělesa kruhového průřezu je za určitých okrajových podmínek ($Re > 80$) očekáván vznik vírové struktury Kármánovy vírové stezky. Tato vírová struktura je přímým důsledkem odtržení mezní vrstvy od obtékaného tělesa. Princip odtržení mezní vrstvy byl obecně popsán již v kapitole 1. Při obtékání válcového tělesa je mechanismus odtržení trochu specifičtější.



obr. 6.1 Zmenšená průtočná plocha způsobuje zakřivení proudnic a změny v rychlostním a tlakovém poli [16]

Kromě snižování rychlosti vlivem ulpívání tekutiny na tělese a ztrátám viskózním třením, má na změnu rychlosti vliv ještě zákon zachování hmotnosti, popsáný rovnicí kontinuity. Je-li vložen do proudění předmět, zmenší se v jeho blízkém okolí průtočná plocha (obr. 6.1). Úměrně tomu se musí zvýšit rychlost, aby nebyl tento zákon porušen. Pohybující se tekutina neovlivněná tělesem má určitou setrvačnost. Tekutině v blízkém okolí tělesa je snižována

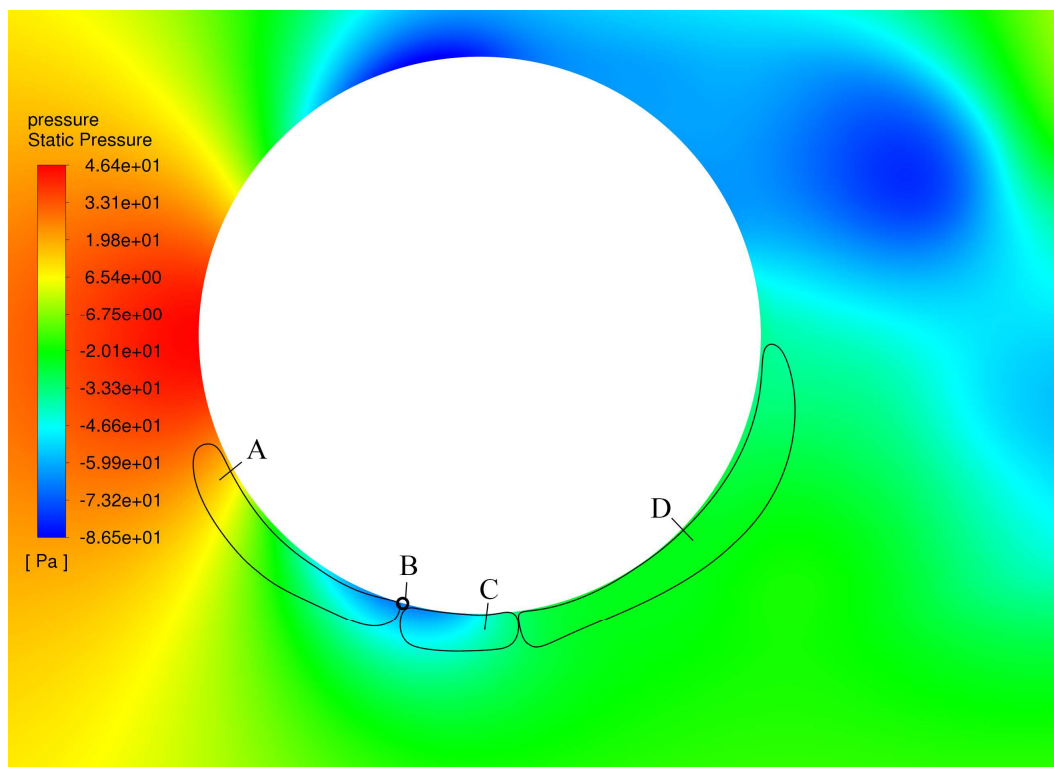
setrvačnost, brzdí jí zde viskózní síly. Tekutina s nižší setrvačností tedy protéká „omezeným prostorem“ ohraničeným tekutinou s vyšší setrvačností a obtékaným tělesem, průtočná plocha se tedy mění. Aby byla kontinuita, se zmenšující se průtočnou plochou se musí zvyšovat rychlost proudění, uvažujeme-li zjednodušeně proudění nestlačitelné tekutiny. Při obtékání v první polovině válce se průtočná plocha zmenšuje a rychlost narůstá. V polovině obtékaného válce je průtočná plocha nejmenší a rychlost tedy nejvyšší, zároveň je zde lokální minimum statického tlaku (obr. 6.2). Od poloviny válce se průtočná plocha zvětšuje, rychlost tedy klesá.



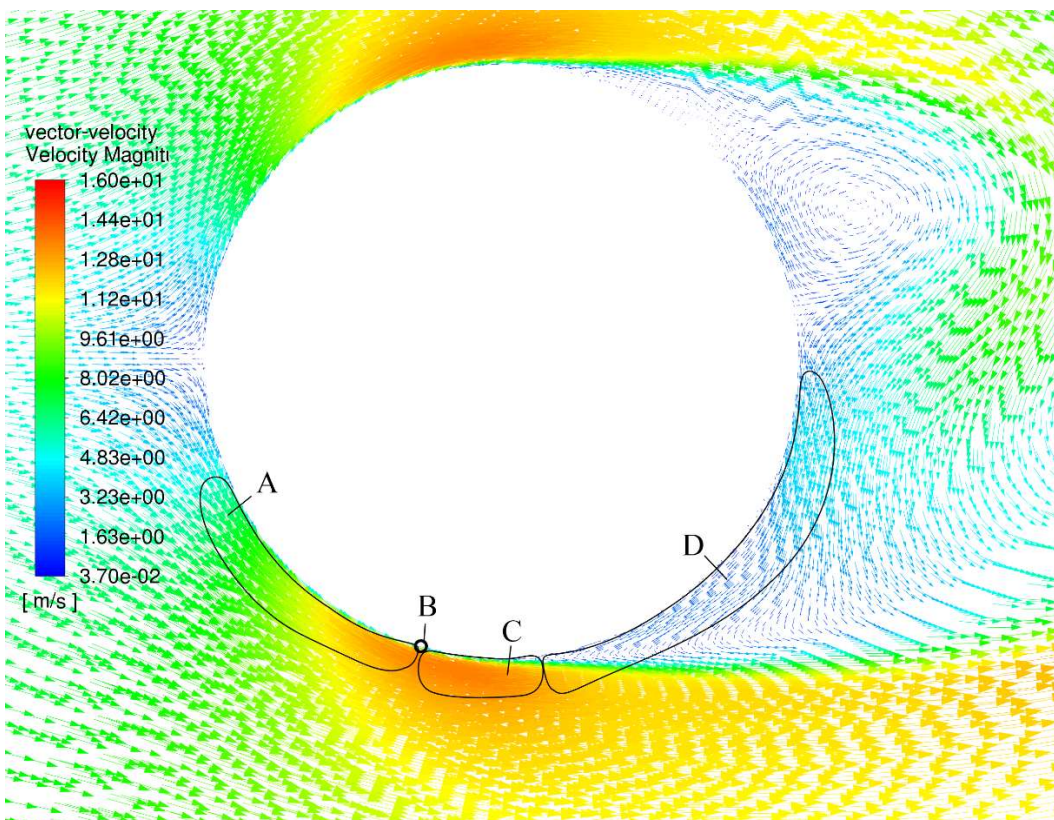
obr. 6.2 Mechanismus odtržení mezní vrstvy [17]

V důsledku viskózního tření tekutina přeměňovanou kinetickou energii nenávratně ztrácí. Tlak kolem tělesa se při obtékání první poloviny snižuje, a svého minima dosáhne přibližně v polovině kruhového tělesa (v závislosti na okrajových podmínkách) (obr. 6.3). Od tohoto místa tlak začíná narůstat a rychlost klesat (obr. 6.3 – C, obr. 6.4 – C). Tlak je provázán s rychlostí přes zákon zachování mechanické energie proudící tekutiny, tzv. Bernoulliho rovnice. Vyšší tlak zároveň způsobuje vyšší viskózní tření, tekutině je třením odebráno víc kinetické energie a celková energie proudící kapaliny se zmenšuje. Rychlost závisí na tlaku. Snížená celková energie tekutiny se projeví ve snížené kinetické energii, rychlost je tedy nižší, než by byla bez ztrát. Rychlost pak již nemůže nabýt původní rychlosti kvůli energetickému deficitu. K odtržení mezní vrstvy dochází v momentě, kdy rychlost klesne na nulu a následně se otočí směr proudění, nastane zpětné proudění. Na rychlostním profilu proudění u stěny se v tu chvíli objeví inflexní bod, za ním se obrací smysl proudění (obr. 6.5). [1]

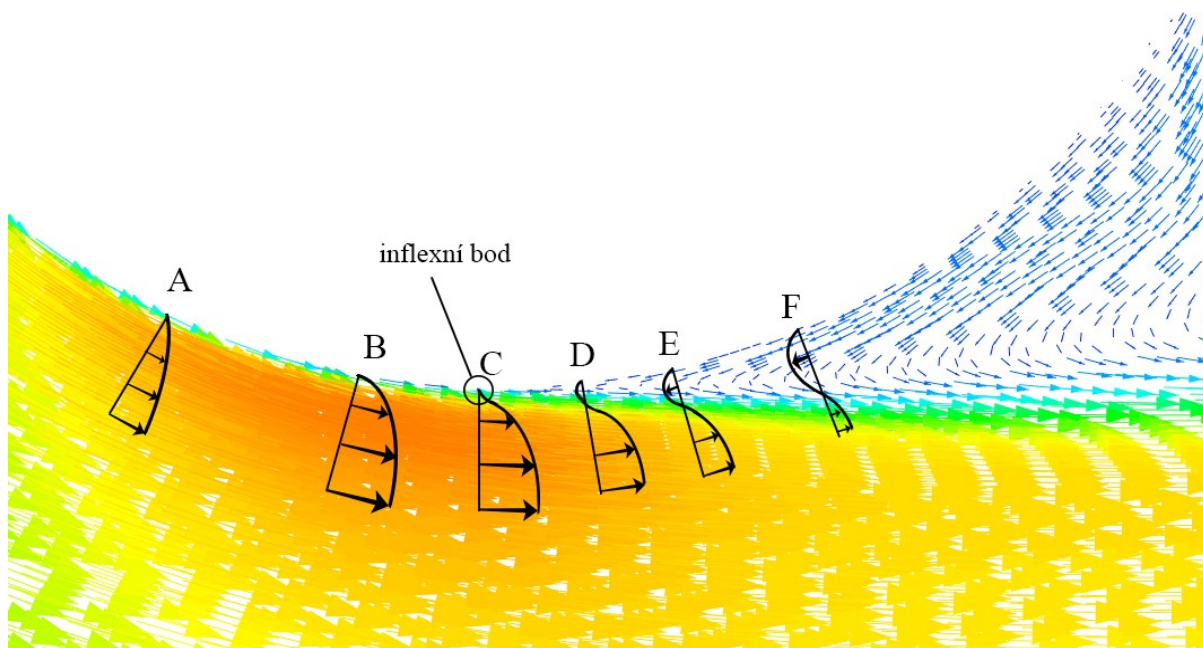
Dochází k odtržení mezní vrstvy, nežádoucímu jevu, na který je aplikováno řízení proudění pro jeho potlačení nebo zmírnění. Při specifických podmínkách se odtržené proudění dále formuje v úplavu do Kármánových vírů. Dva víry vzniklé z odtržení od horní a dolní části obtékaného tělesa spolu interagují a střídavě se odtrhávají (obr. 2.1), viz kapitola 2.



obr. 6.3 Tlakové pole: oblast A snižujícího se tlaku, bod B nejnižší tlak, oblast C rostoucí tlak, oblast D téměř neměnný tlak



obr. 6.4 Rychlostní pole: oblast A zvyšující se rychlost, bod B nejvyšší rychlost, oblast C rychlost klesá, oblast D oblast zpětného proudění



obr. 6.5 Detail odtržení mezní vrstvy, rychlostní profily, inflexní bod profilu

- profil A – rychlostní profil je mírně zakřivený, mírné rozdíly mezi rychlostmi*
- profil B – rychlosti nad tělesem se zvyšují, rychlosti v těsné blízkosti jsou snižovány na nulu ulpíváním, gradient rychlosti roste*
- profil C – na profilu se objevuje inflexní bod, zárodek odtržení mezní vrstvy, nachází se zde tlakové minimum*
- profil D – za inflexním bodem tlak začíná růst na úkor úbytku kinetické energie, v tekutině není dost energie na vyrovnání změny, kladný rychlostní profil mění na záporný, to značí proudění v opačném směru – zpětné proudění*
- profil E – rozšiřující se oblast pod hranicí odtrženého proudění způsobuje zvětšování oblasti se zpětným prouděním*
- profil F – zavířený úplav se zpětným prouděním*

Z numerické simulace byl získán průběh vztlaku působícího na těleso v čase. Frekvenční analýzou byla z tohoto záznamu získána frekvence, která je zároveň frekvencí odtrhávání Kármánových vírů, viz tab. 6.2. Ze získané frekvence 25 Hz bylo dle rovnice 6.1 vypočítáno Strouhalovo číslo 0.244 (obr. 6.6). V kapitole 5 bylo uvedeno předpokládané Strouhalovo číslo 0.2 a z něj vypočítaná frekvence 20.51 Hz.

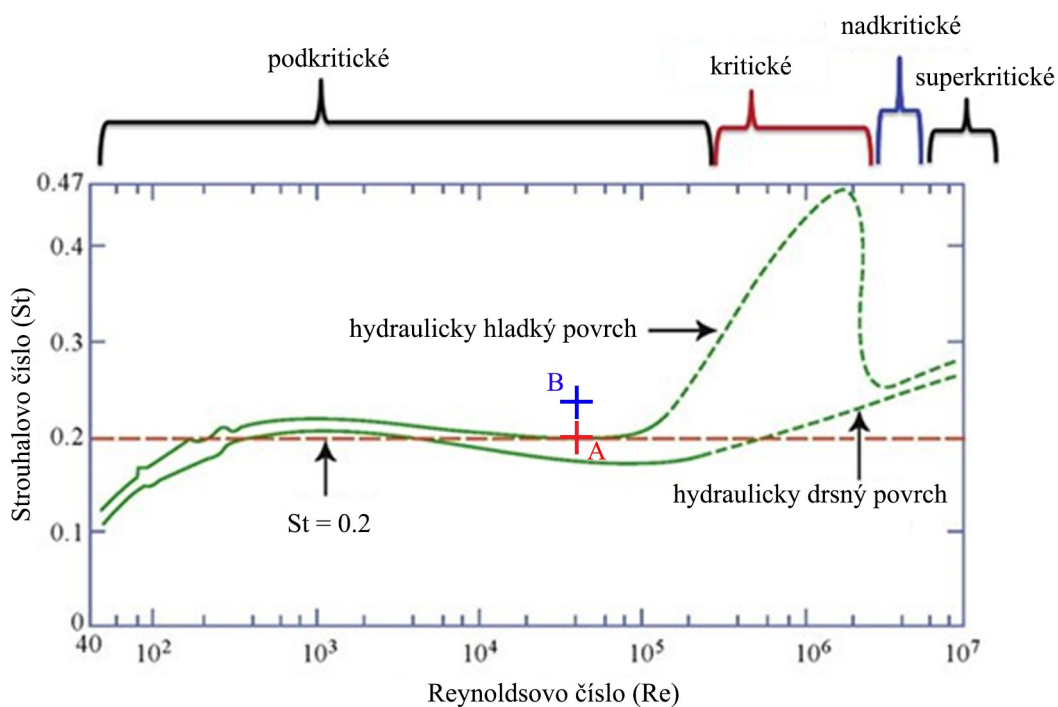
Rozdíl mezi předpokládanými hodnotami a hodnotami získanými ze simulace je velký, důvodem bude něco podstatného. První možností by mohla být rozdílná hydraulická drsnost v experimentu a v simulaci. Strouhalovo číslo je citlivé na hydraulickou drsnost povrchu. Ve zkoumaném případě je ale rozmezí Strouhalova čísla (pro Reynoldsovo číslo 40 000) mezi hodnotami přibližně 0.18 – 0.2. Do tohoto intervalu nepatří získaná hodnota 0.244, hydraulická drsnost tedy nemá souvislost s touto odchylkou. Skutečným důvodem, dle konzultace s vedoucím práce, bude režim proudění v mezní vrstvě a nastavení AnsysFluent. Proudění v mezní vrstvě je při $Re = 40\ 000$ v režimu přechodovém. V AnsysFluent je pro výpočet proudění v mezní vrstvě v přechodovém režimu potřeba přidat rovnici pro výpočet tohoto přechodu mezi laminárním a turbulentním režimem proudění, poté je využíván třírovnicový model s transportní rovnicí pro intermitenční součinitel.

tab. 6.2 Vyhodnocení proudění bez řízení – Kármánovy víry

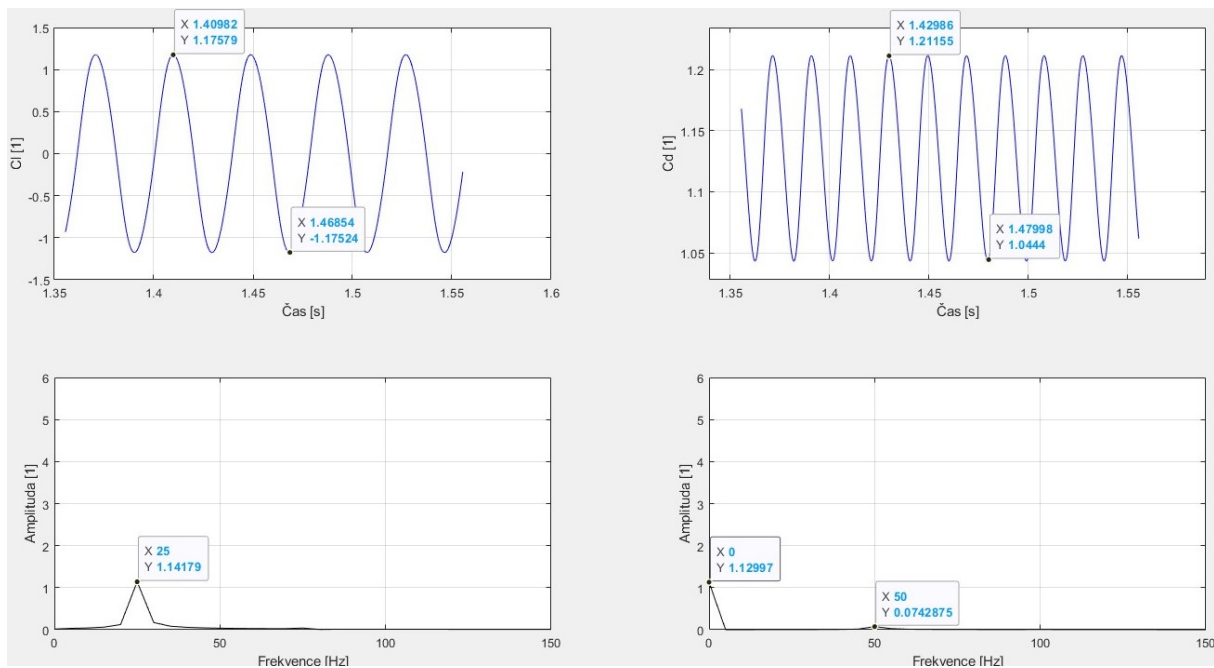
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální
25 Hz	1.179	50 Hz	1.212	1.044

Rovnice pro výpočet Strouhalova čísla

$$St = \frac{f \cdot D}{v} \quad [-] \quad (6.1)$$



obr. 6.6 A – teoretické Strouhalovo číslo, B – Strouhalovo číslo zjištěné výpočtem [15]



obr. 6.7 Časový průběh a frekvenční analýza C_l a C_d (hodnoty v tab. 6.2)

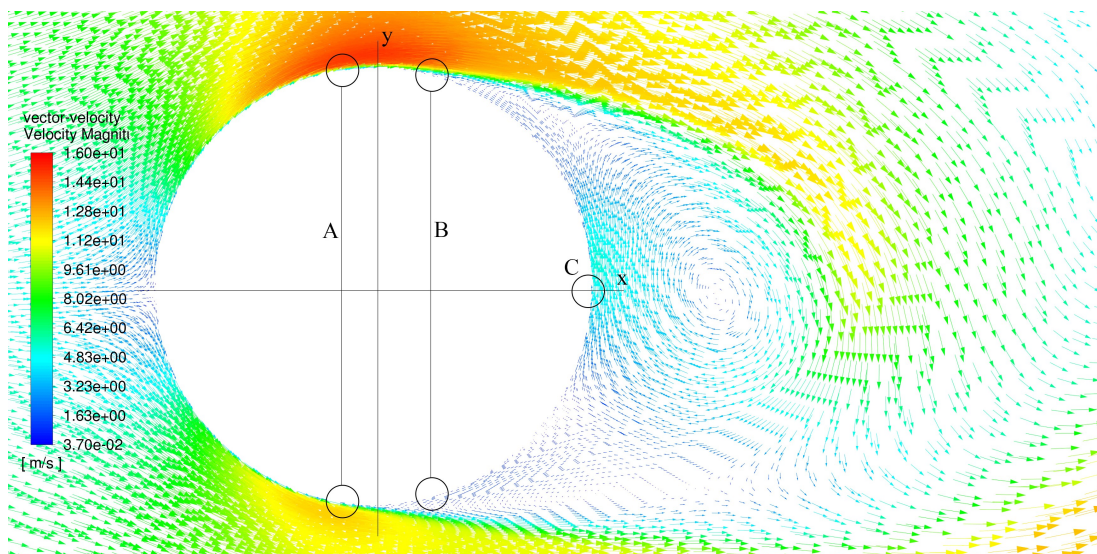
6.2 Navržení přístupů řízení a vytipování umístění

Cílem této práce je potlačit odtržení mezní vrstvy a následně střídavé odtrhávání Kármánových vírů. K tomu bude použito aktivní řízení. Jak bylo popsáno výše, k odtržení dochází, protože tekutina nemá dostatek energie na vyrovnání tlaku a rychlosti. Aktivní řízení do systému dodává energii, která navyšuje disipovanou kinetickou energii, která se transformuje do tepla. Energie je dodávána skrz proudící tekutinu o určité rychlosti, tedy s určitou kinetickou energií. Očekávaným výsledkem je podpoření proudění v požadovaném směru, přimknutí mezní vrstvy a oddálení zpětného proudění. Tím se pak stabilizuje proudění kolem tělesa a v těsné blízkosti za ním. Úplav se zúží, což se pozitivně projeví na tlakovém odporu. Potlačení periodického odtrhávání vírů se odstraní cyklické silové působení na obtékané těleso.

Jednoduchou metodou je prostá tryska vstřikující tekutinu do odtrženého proudění. Ta může tekutinu vstřikovat libovolně tvarovaným signálem závislým na potřebách řízení. Hlavními neznámými pro použití jakéhokoliv aktivního řízení umístění, tvar signálu vstřikování, rychlost vstřikování, průtočná plocha a s tím spojený hmotnostní průtok pracovní tekutiny. Při jiném, než konstantním vstřikování je také důležitá správná synchronizace vstřikování s potlačovaným dějem, jenž je většinou nestacionární.

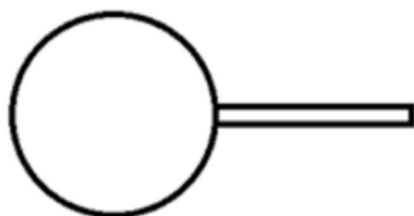
Z principu funkce řízení tryskou se jeví jako vhodné umístění okolo bodu odtržení – před bod odtržení (obr. 6.8 – A) nebo za bod odtržení (obr. 6.8 – B). Tryska má dodat energii do odtržené mezní vrstvy, a tudíž její umístění musí být v blízkém okolí tohoto jevu. Pokud by byla tryska moc daleko za bodem odtržení, může dojít k odtržení a opětovnému přilnutí mezní vrstvy na malé části povrchu, což není úplně optimální a je lepší vyhnout se tomu. Je-li vhodné umístit trysku před nebo až za bod odtržení, je možné určit dopředu pouze na základě analogie s dříve úspěšně řešenými podobnými případy. Nejsou-li tyto informace dostupné, polohu je nutné určit sérií pokusů nebo simulací a postupnou optimalizací řízení. Protože k odtržení dochází na horní a spodní části obtékaného válce, je potřeba umístit ke každému bodu odtržení trysku, budou tedy použity dvě trysky. Stejně tak je nutné určit i ostatní neznámé

ze série simulací a nalézt nejvhodnější kombinaci pro efektivní řízení proudění s malou energetickou náročností a nejlepším potlačením nežádoucích struktur.

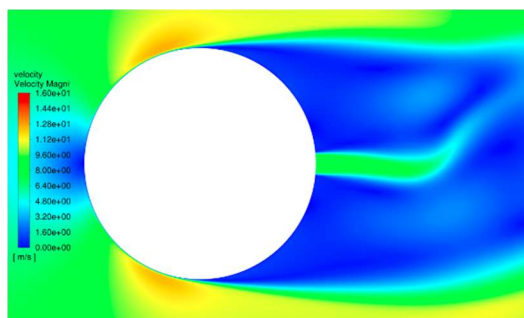


obr. 6.8 Vytipovaná místa pro umístění trysek

Odlíšnou metodou, která se nezabývá přímo přilnutím odtržené mezní vrstvy je metoda s jednou tryskou na úplavové části válce, na ose x. Její princip je ovlivnění proudění ve vzniklém úplavu kvůli odtržení proudění. Soustředí se pouze na odstranění vlivu Kármánových vírů. Řídící prvek je jedna tryska na úplavové části válce na ose x (obr. 6.8 – C). Do této práce je zahrnuta, protože jde o řízení s velmi dobrými výsledky, ke kterým bude možné porovnat dosažené výsledky řízení mezní vrstvy. Řízení jednou tryskou se dá připodobnit k pasivní metodě – žebro umístěné na tělese směřující do úplavu (obr. 6.9). Žebro rozděljuje úplav v blízké oblasti za tělesem a tím zabráňuje interakci proudění a vírů vznikajících od horní a dolní poloviny obtékaného tělesa. Díky tomu je těsně za tělesem zabráněno vzniku Kármánových vírů. Ty buď vůbec nevytvoří nebo se vytvoří, až když se proudění setká za žebrem. Tam ale už víry silově nepůsobí na těleso. Stejný princip uplatňuje i tryska. Vstříkovaná tekutina má podstatně vyšší rychlost a setrvačnost než zbytek tekutiny v úplavu. Tím tvoří hranici, přes kterou není schopna pomalejší tekutina projít (obr. 6.10). Nastává stejná situace jako u pevného žebra. Proudění rozdělené obtékaným tělesem se spojí, až když se rozdíl rychlostí zmenší, tedy dál za tělesem. Tím se na těleso neprojeví silové účinky od změn v tlakovém poli.



obr. 6.9 Pasivní žebro

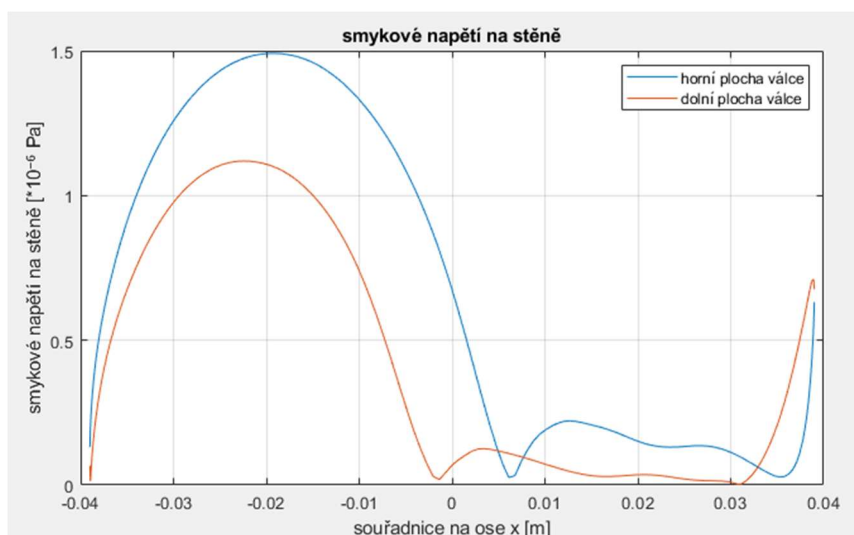


obr. 6.10 Aktivní řízení tryskou, vstříkovaná tekutina má stejnou funkci jako pasivní žebro

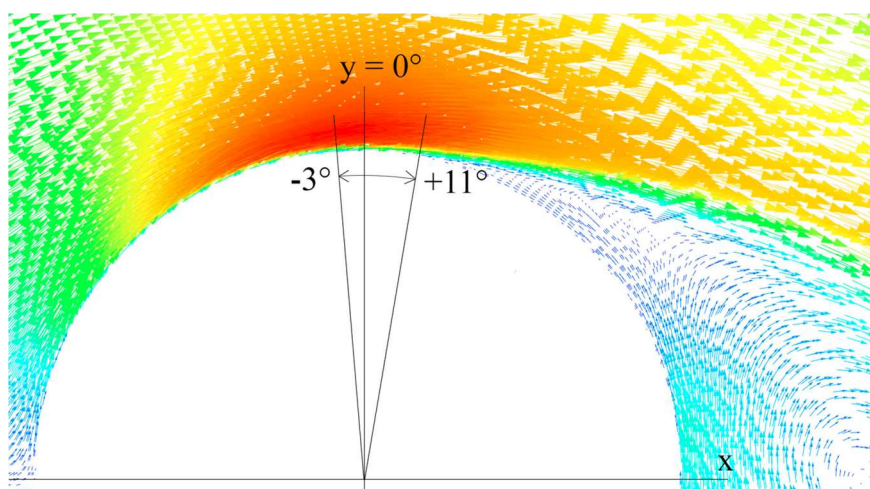
Práce je primárně zaměřená na vstřikování tekutiny, tekutinu je možné ale i odsávat. To lze kombinovat s výše zmíněnými nastavením trysek. Také je možné je kombinovat se vstřikováním. U odsávání nedochází k dodávání energie. Naopak v místě odsávání je tímto snižován tlak a proudění je nucené tímto směřovat do oblasti s nižším tlakem, tedy je nucené víc kopírovat obtékaný tvar.

6.3 Nalezení bodu odtržení

Při proudění tekutiny kolem stěny tělesa vzniká smykové napětí závislé, kromě jiných proměnných, také na gradientu rychlosti. Nižší rychlost vyvolá nižší smykové napětí. Bod odtržení, jak již bylo popsáno, je specifický tím, že se v něm obrací smysl proudění, přesněji v bodě odtržení je rychlost proudění nulová. Smykové napětí je tedy v bodě odtržení nejnižší. Při hledání bodu odtržení je této vlastnosti využito. Po celém obvodu obtékaného válce bylo z AnsysFluent vyhodnoceno smykové napětí (wall shear stress) po dobu jedné periody odtrhávání Kármánových vírů – bod odtržení mění svoji polohu. Pomocí skriptu (Příloha 1) v programu Matlab byla tato data vyhodnocena a nalezena oblast pohybujícího se bodu odtržení, viz obr. 6.11. Bod odtržení se pohybuje v rozmezí -3° až $+11^\circ$ od osy y (obr. 6.12).



obr. 6.11 Průběh smykového napětí na stěně válce, první minimum značí lokální minimální rychlost (inflexní bod – bod odtržení)



obr. 6.12 Vyznačený rozsah pohybu bodu odtržení

7 Numerická simulace s řízením proudění

Otázkou u simulací proudění s aplikovaným řízením bylo, zdali spouštět simulace vždy od začátku a rozpočítat ji s řízením nebo simulaci s řízením spouštět v návaznosti na data ze simulace proudění bez řízení. Po porovnání výsledků rozdílně spuštěných simulací na jednom konkrétním řízení proudění bylo vyhodnoceno, že výsledná simulace se nijak patrně neliší. Porovnání bylo provedeno na případu s konstantním vstřikováním tryskami. Při proměnném vstřikování je zásadní načasování a synchronizace s odtrhávanými Kármánovými víry a zde je již nedává smysl uvažovat dvě různé metody spouštění výpočtu. Dalším faktorem byl výpočetní čas. V případě spouštění výpočtu od počátku, byl výpočet časově náročnější, kvůli času potřebnému na vyvinutí proudění. Oproti tomu spouštění v návaznosti na již vyvinuté proudění bylo o tento čas rychlejší a bylo jen třeba nechat ustálit nové proudění ovlivněné aktivním řízením. Na základě toho byly simulace s řízením proudění spuštěné v návaznosti na data s vyvinutými Kármánovými víry, spouštěny jako nestacionární výpočet a bez inicializace. Metody řešiče byly nastaveny rovnou na fázi 4 (tab. 6.1).

7.1 Pasivní tryska v ose x

První aplikovanou metodou pro potlačení Kármánových vírů byla metoda pasivní trysky. Tato metoda je řazená spíše do pasivních metod, jelikož je řízení proudění zařízeno přes změnu geometrie, připodobnění k jakési trysce taktéž není úplně zcestné, čímž se od pasivních metod lehce odlišuje. Skrz obtékané těleso je ve směru proudění vytvořený otvor, skrze který protéká tekutina z okolí. Tato „tryska“ směřuje natékanou tekutinu za těleso do zavířeného úplavu, kde se odtrhávají Kármánovy víry. Jejich struktura je narušena tryskou přivedenou tekutinou. Šířka trysky je dle vzorové práce [6] definována na 10° symetricky kolem osy x. Tato metoda řízení byla velmi úspěšná, koeficienty vztlaku a tlakového odporu jsou v tab. 7.1. Nahrazuje princip žebra na konci válce ve směru proudění, viz obr. 6.9 a obr. 6.10. Proud tekutiny vycházející z trysky narušuje odtrhávané vírové útvary a posouvá jejich tvoření dál do úplavu, čímž se významně zmírní silové působení na těleso. Tato metoda sice nevyužívá přímé řízení k přimknutí mezní vrstvy, ale je to jednoduchá a funkční metoda. Proto bude zpracována jako účinná alternativa k řízení mezní vrstvy.

tab. 7.1 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
30 Hz	0.068	60 Hz	0.834	0.817	0

7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)

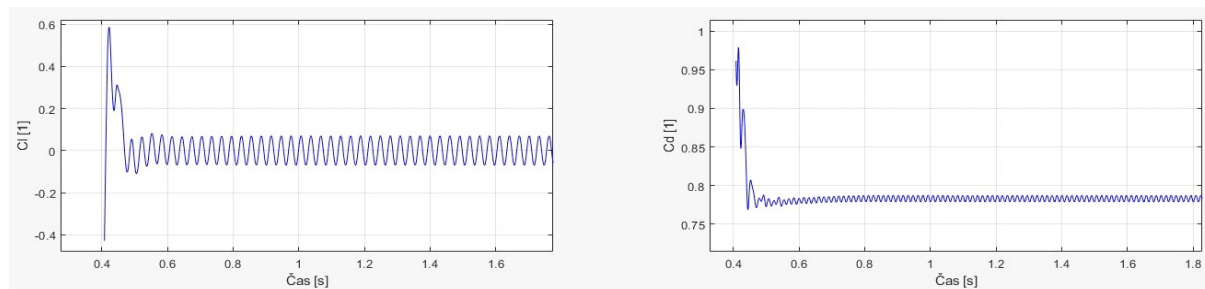
Na základě řízení proudění popsaného v předcházející kapitole Pasivní tryska byla vytvořena metoda řízení, kdy je místo „pasivní“ trysky použita tryska „aktivní“. Aktivní tryska je aplikována skrz použití rychlostní okrajové podmínky (tab. 7.2), kdy je na část kruhu předepsána podmínka specifikující rychlost tekutiny proudící z této oblasti do určitého směru. Opět byla zvolena tryska ležící symetricky okolo osy x, směřující rovnoběžně s osou x. Výstupní rychlost z trysky byla zvolena stejná, jako je rychlost proudění na počátku výpočtové oblasti, tedy 8 m/s. Rychlost vstřikování je konstantní. Výsledek je velmi podobný jako u pasivní trysky – skvělé potlačení odtrhávání vírů v bezprostřední blízkosti za tělesem. To je dokázáno ustálením koeficientů Cl a Cd, viz obr. 7.1. Uklidněné proudění v úplavu je vidět na obr. 7.2 a obr. 7.3. V důsledku potlačení silového působení na těleso je minimalizováno buzení pro vznik samobuzeného kmitání. Kompletní výsledné kontury jsou v Přílohách 7, 8, 9, 10, animace jsou v Příloze 11.

tab. 7.2 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

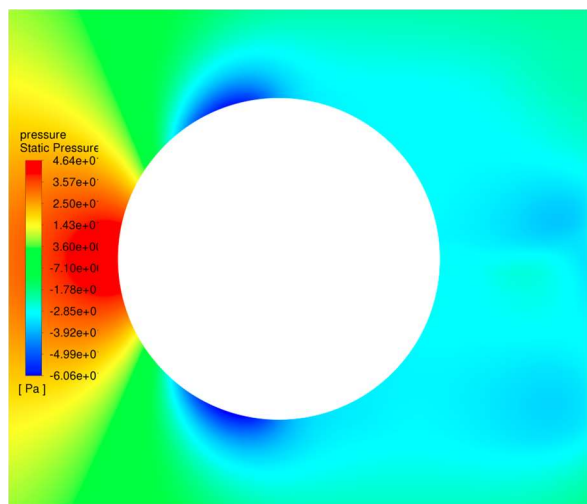
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychlosti x	složka rychlosti y
na ose x	5° pod až 5° nad osu x	8 m/s konstantní	1	0

tab. 7.3 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

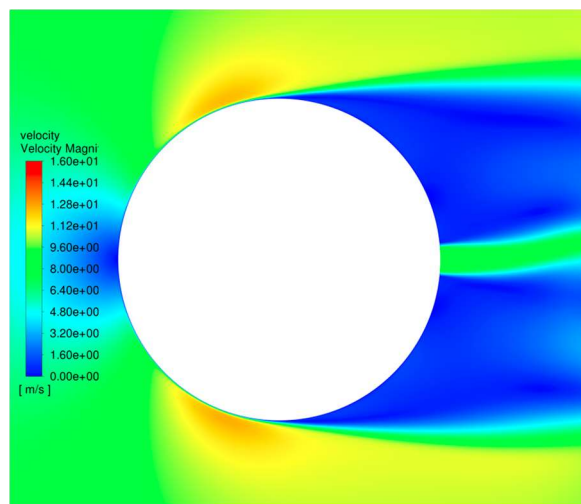
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
33.33 Hz	0.07	66.66 Hz	0.788	0.778	0.085



obr. 7.1 Průběh Cl a Cd v čase



obr. 7.2 Tlakové pole



obr. 7.3 Rychlostní pole

7.3 Dvě trysky (-10° 0°, konstantní vstřikování)

Po vyzkoušení potlačení jednou tryskou na ose x bylo přistoupeno k metodě přilnutí mezní vrstvy – dvěma tryskám v blízkosti bodu odtržení. První pokusy metod řízení byly zaměřené zejména na optimalizaci umístění trysek. Celé nastavení okrajové podmínky je uvedeno v tab. 7.4 Nastavení rychlostní okrajové podmínky. Nejprve byla dvojice trysek umístěna před bod odtržení do polohy -10° až 0° vzhledem k ose y, bod odtržení se nejdále pohybuje do -3° (3° nalevo od osy y). Na křivky vymežující trysku byla předepsána rychlostní okrajová podmínka a rychlost 8 m/s. Směr proudění z trysky byl definován co nejvíce po směru proudění, v nejlepším případě za válec do úplavu. Protože se je ale tryska umístěna v první polovině válce, není možné ji takto nasměrovat. Byl tedy zvolen směr zadaný podle složek $x = 1$ a $y = 0.1$ pro horní trysku a $x = 1$ a $y = -0.1$ pro spodní trysku. Tím je proud vycházející z trysky nasměrován téměř „tečně“ k obtékanému válci a co nejvíce do směru proudění okolní tekutiny. Právě kvůli nevhodné poloze bodu odtržení a nasměrování, které nezasahuje do odtrženého proudění mezní vrstvy, tato metoda řízení neměla žádný pozitivní účinek na přimknutí odtržení. Naopak svým působením proudění z trysky napomohlo k zesílení silového působení Kármánových vírů a na těleso začala působit větší vztlaková síla a zvýšil

se i tlakový odpor (tab. 7.5). Z těchto výsledků bylo umístění trysek před bod odtržení posouzeno jako nevhodné pro tento konkrétní případ. Pokud by bylo proudění rozvinuté do plně turbulentního režimu, bod odtržení by se posunul dál na povrchu válce ve směru proudění, pak by již dávalo smysl umístit trysku před bod odtržení, tryška by mohla mířit v mnohem příznivějším směru pro přimknutí mezní vrstvy k tělesu.

tab. 7.4 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychlosti x	složka rychlosti y
horní	-10° až 0°	8 m/s konstantní	1	0.1
dolní	-10° až 0°	8 m/s konstantní	1	-0.1

tab. 7.5 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
25 Hz	1.341	50 Hz	1.394	1.122	0.17

7.4 Dvě trysky (5° 15°, konstantní vstříkování)

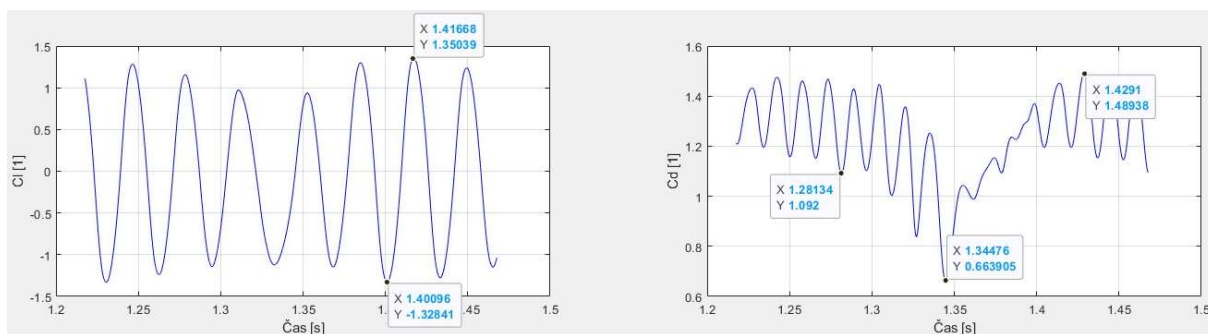
Ze zkušenosti z předchozí kapitoly byly trysky umístěné za bod odtržení. Tím bylo umožněno efektivněji nasměrovat proud z trysek do složek $x = 1$ a $y = -0.1$ pro horní trysku a $x = 1$ a $y = 0.1$ pro spodní trysku. Složky y jsou oproti předešlému nastavení s opačným znaménkem, při současném nastavení je možné proudění nasměrovat do úplavu k ose x (tab. 7.6). Konstantní rychlost vstříkování zůstává 8 m/s. Nastavení trysek napomáhá odtrženému proudění přilnout se víc k obtékanému válci, ale v úplavu těsně za tělesem se stále tvoří Kármánovy víry a zůstává silové působení na těleso, které se řízením opět zesiluje nad hodnoty modelu bez řízení. Úplav je navíc chaoticky zavířený, po určitých úsecích se periodicky opakuje, viz obr. 7.4. Průběh řízení proudění je k nalezení v Příloze 11. Otázkou je, jakou optimalizaci nadále zvolit? Při snaze optimalizovat variantu vstříkování a prozatím vynechat odsávání, se nabízejí tyto možnosti: změna rychlosti vstříkování (zřejmě zvýšení rychlosti), změna signálu vstříkování (z konstantního na tvar sinus), změna velikosti průtočné plochy trysek, změna směru vstříkování nebo změna polohy trysek.

tab. 7.6 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychlosti x	složka rychlosti y
horní	5° až 15°	8 m/s konstantní	1	0.1
dolní	5° až 15°	8 m/s konstantní	1	-0.1

tab. 7.7 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
30 Hz	1.35	65 Hz	1.429	0.664	0.17



obr. 7.4 Průběh Cl a Cd v čase

7.5 Dvě trysky (5° 15°, vstříkování tvar sinus)

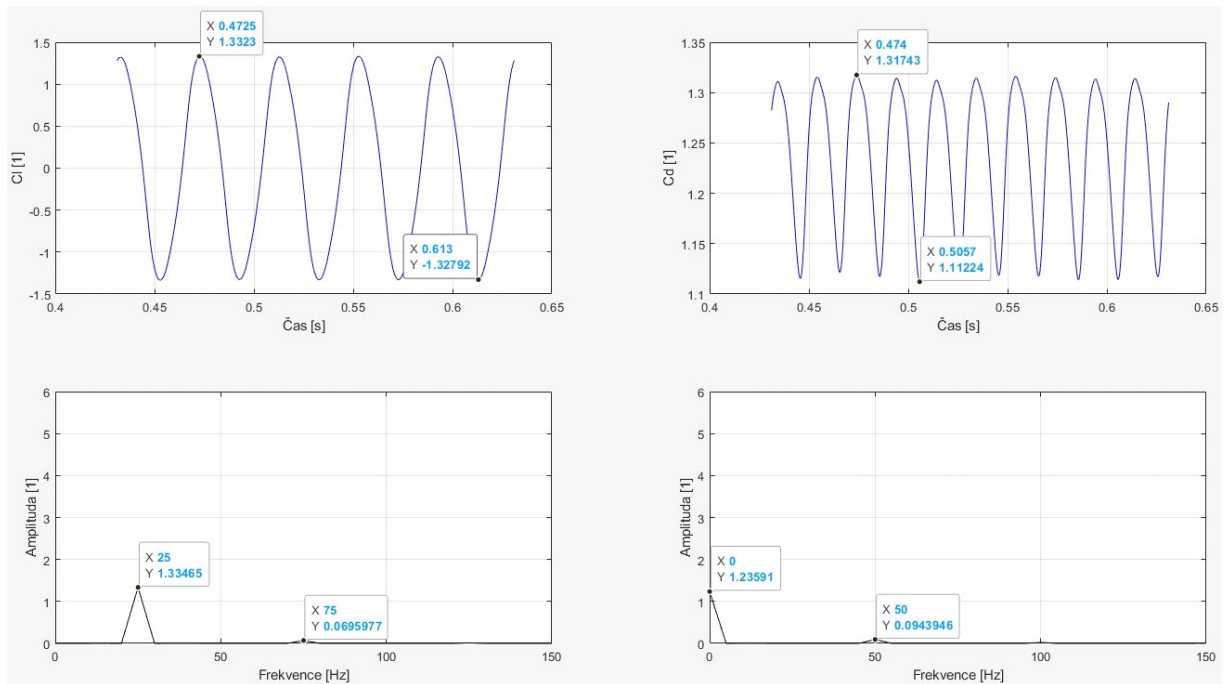
V rámci optimalizace vstříkování dvěma tryskami byla jako první zvolena změna signálu výstupu z trysky. Signál byl zadán pomocí uživatelsky definované funkce viz Příloze 3. V této funkci byl pro každou trysku zvlášť zadán funkční předpis rychlosti (tab. 7.8). Rychlost vstříkování kopíruje sinusoidu s minimem na 0 m/s a maximem 8 m/s. Jelikož se Kármánovy víry odtrhávají střídavě od horní a spodní části válce, myšlenkou řízení je vstříkovat vždy v momentě, kdy se odtrhává vír – není nutné vstříkovat po celou dobu. V tomto smyslu je sinusoida vstříkování horní trysky posunutá o půl periody od sinusoidy vstříkování spodní tryskou. Zároveň je nutné signál vstříkování vhodně synchronizovat s potlačovaným jevem. Jak bylo zmíněno, cílem je vstříkovat v momentě, nebo těsně před odtržením víru. Signál pro horní trysku byl nastaven tak, aby maximální rychlost vstříkování nastala 1/8 periody před maximální amplitudou vztlaku Cl. Perioda sinusoidy je stejná jako perioda střídání odtrhávaných vírů. Díky posunutí sinusoidy signálu spodní trysky o polovinu této periody je zajištěna správná synchronizace i u spodní trysky. Po aplikaci řízení je Kármánova vírová stezka posilována (nárůst Cl) namísto zmírnění nebo potlačení (tab. 7.9). Výsledné proudění je zobrazeno na obr. 7.6 a obr. 7.7. Při ponechání metody vstříkování se signálem sinus je uvažováno o zvýšení rychlosti vstříkování, odtržené proudění by to mohlo silněji přisávat. Po konzultaci s vedoucím práce bylo přistoupeno ke změně velikosti trysky při ponechání rychlosti vstříkování. Důvodem byla možná analogie s řízením vírového copu v savce turbíny, kdy se ve výsledku ukázalo jako efektivnější právě zvětšení plochy trysky vstříkování oproti zvýšení rychlosti.

tab. 7.8 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

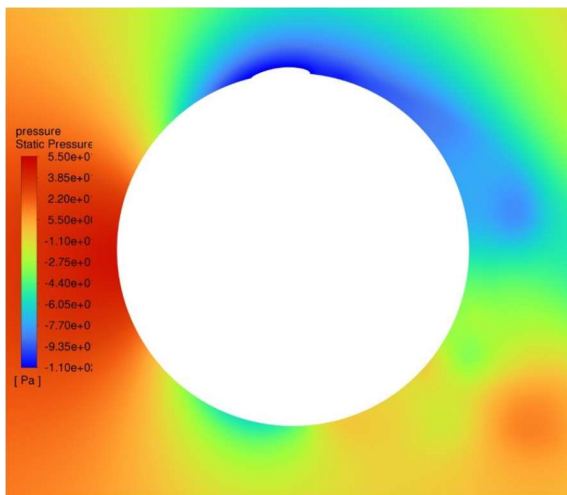
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
horní	5° až 15°	$4.0 - 4.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	-0.1
dolní	5° až 15°	$4.0 + 4.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	0.1

tab. 7.9 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

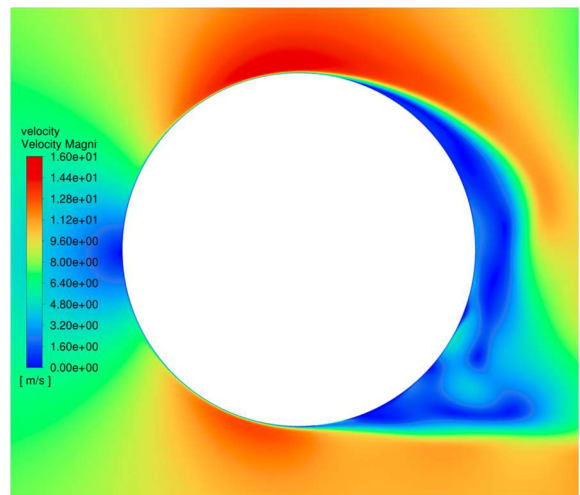
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
25 Hz	1.33	50 Hz	1.32	1.11	0.022



obr. 7.5 Průběh C_l a C_d v čase, frekvenční analýza



obr. 7.6 Tlakové pole



obr. 7.7 Rychlostní pole

7.6 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus)

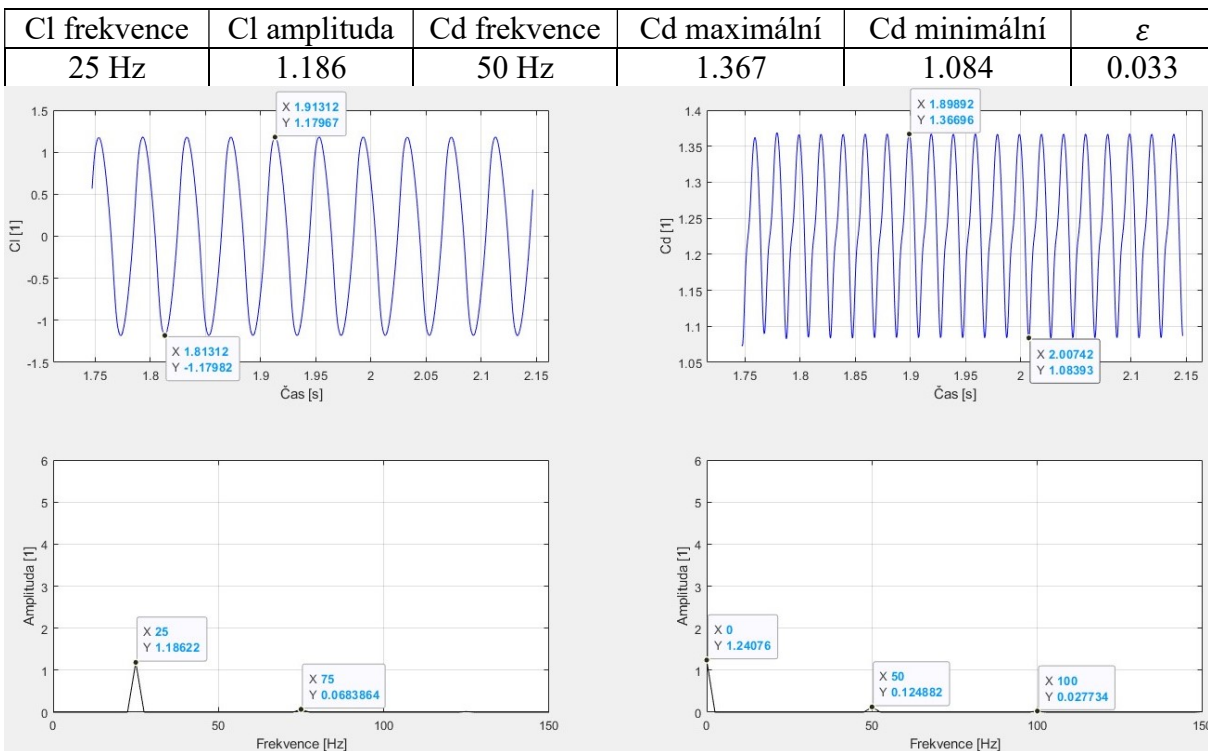
Tryska s větší plochou vstřikování a se zachovanými vlastnostmi jako u předchozí trysky (kapitola 7.5) se jeví jako dobrý směr optimalizace. Porovnáním amplitud koeficientů vztlaku je zřejmé, že širší tryška má pozitivní vliv na potlačení kmitání od Kármánových vírů. Je nutné podotknout, že při rozšíření trysky dochází ke zkreslení při výpočtu sil působících na těleso, neboť AnsysFluent vyhodnocuje silové působení pouze na části, na které nejsou zadány rychlostní okrajové podmínky, tedy na trysky. Vztlakový koeficient je ale podstatně nižší než u předchozího případu a jeho změna je považována za pozitivní vliv změny trysek. Při dalších nastaveních trysek zůstala velikost trysky nezměněná, problém se správností výpočtu koeficientů C_l a C_d se tudíž mezi následujícími nastaveními neobjevuje a výsledky jsou mezi sebou porovnatelné bez rozdílů. Pozorované zlepšení oproti minulým nastavením je dobré, ve výsledku je ale stále nedostačující, neboť teprve tímto nastavením bylo docíleno stejné hodnoty C_l jako při nepotlačovaných Kármánových vírech. Koeficient tlakového odporu

je vyšší než u proudění bez řízení, zde je také pořád prostor pro zlepšení. Největším problémem se zdá být správné načasování vstřikování. Zpočátku je načasování pro prvních pár odtržení správné a amplitudy koeficientů C_l a C_d jsou nižší. Vypadá to, že se ale tímto narušením odtrhávání lehce změní fáze tvorby vírů a ty se začnou tvořit za pomoci vstřikování, synchronizují se s ním a řízení přestává být funkční (v jiných případech může řízení odtrhávání navíc posilovat).

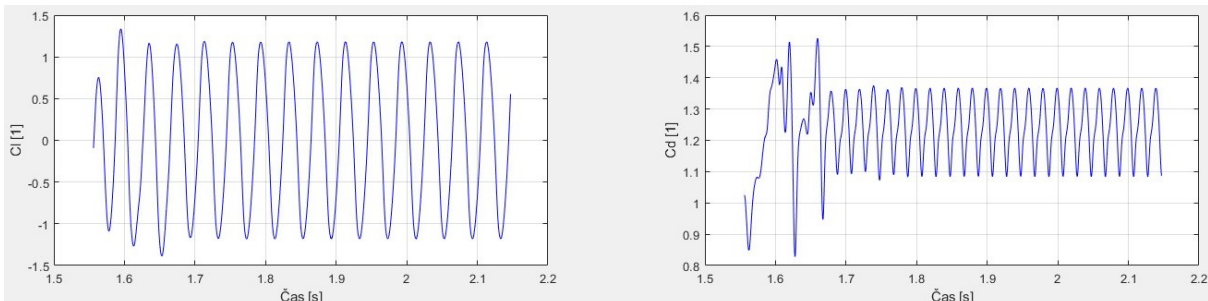
tab. 7.10 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
horní	5° až 20°	$4.0 - 4.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	-0.1
dolní	5° až 20°	$4.0 + 4.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	0.1

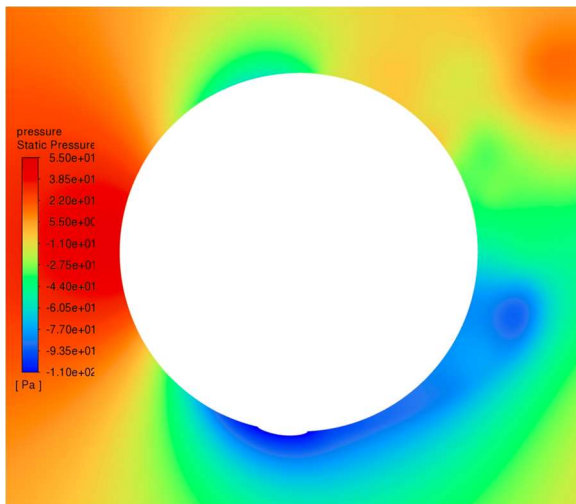
tab. 7.11 Vyhodnocení vlivu řízení proudění



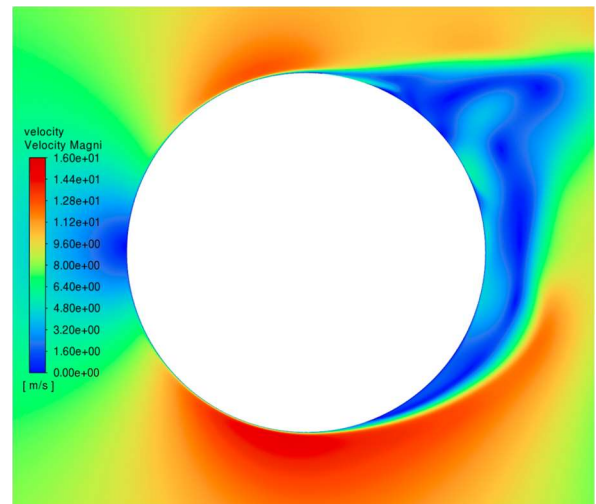
obr. 7.8 Průběh C_l a C_d v čase, frekvenční analýza



obr. 7.9 Celý průběh C_l a C_d , na počátku je vidět pozitivní vliv řízení na snížení C_l a C_d . Pak se ale posune fáze odtrhávání, synchronizuje se se vstřikováním a řízení přestává být funkční.



obr. 7.10 Tlakové pole



obr. 7.11 Rychlostní pole

7.7 Dvě trysky (5° 20°, konstantní vstřikování)

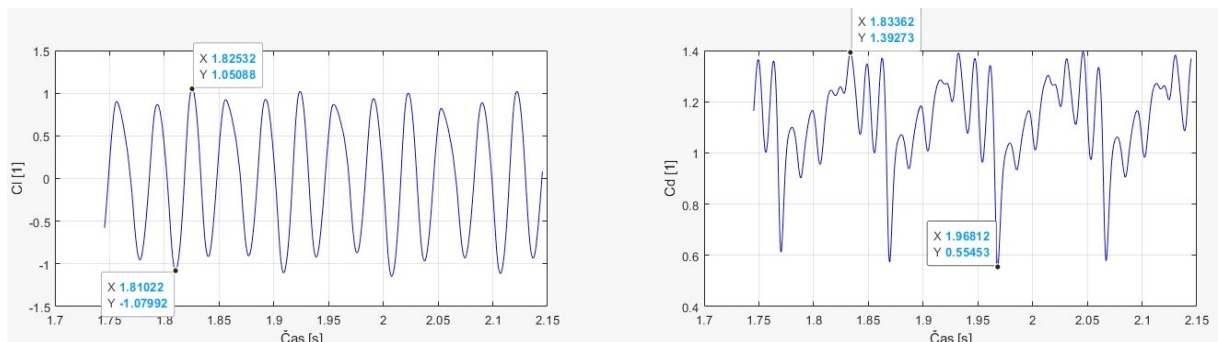
Pro komplikace se synchronizací střídavého vstřikování byla vyzkoušena možnost vstřikovat konstantně i pro nastavení trysky 5° - 20° (celé nastavení viz tab. 7.12). Výsledky jsou překvapivé, oproti tryskám 5° - 15° došlo k výraznějšímu potlačení silových působení na válec (tab. 7.13). Amplituda vztlakového koeficientu klesla na 1.07. Proudění v úplavu je stejně jako u Dvě trysky (5° 15°, konstantní vstřikování) chaotické (obr. 7.12) a tlakový koeficient se pohybuje od 0.555 do 1.393, viz tab. 7.13. Chaotický úplav není úplně žádoucí, zároveň není potlačení kmitání dostatečné a musí být hledána lepší metoda řízení.

tab. 7.12 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

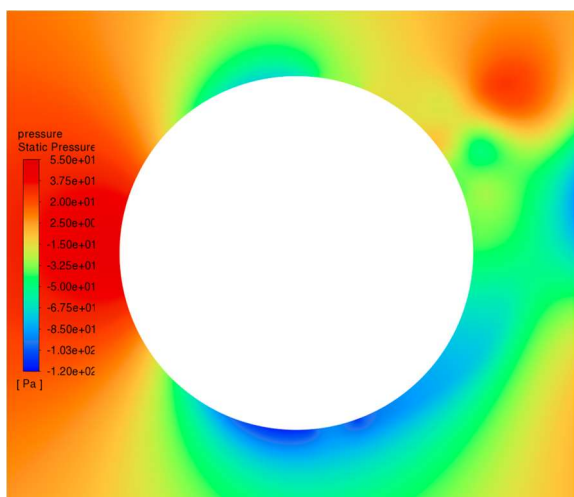
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychlosti x	složka rychlosti y
horní	5° až 20°	8 m/s konstantní	1	-0.1
dolní	5° až 20°	8 m/s konstantní	1	0.1

tab. 7.13 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

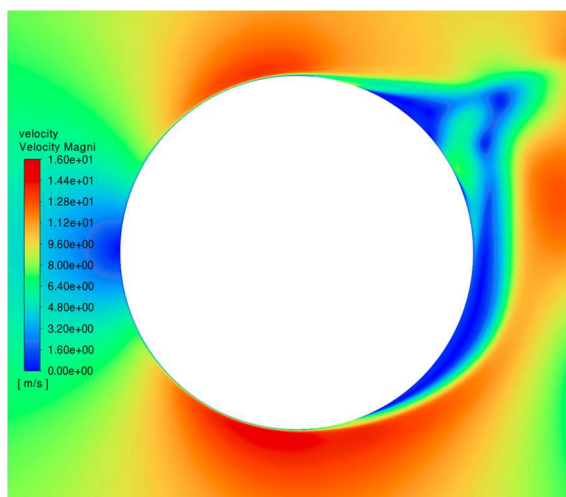
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
30 Hz	1.07	60 Hz	1.393	0.555	0.26



obr. 7.12 Průběh Cl a Cd



obr. 7.13 Tlakové pole



obr. 7.14 Rychlostní pole

7.8 Dvě trysky (5° 20°, vstřikování tvar sinus s konstantní složkou)

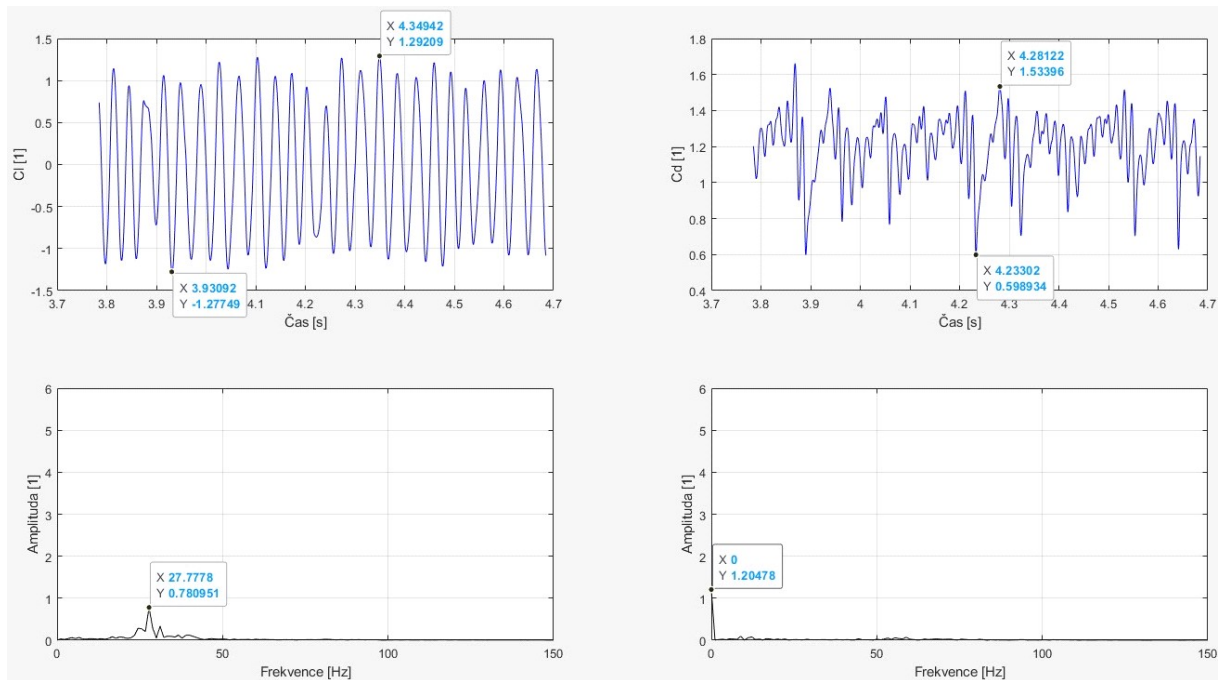
Tohle nastavení kombinuje konstantní vstřikování a vstřikování s tvarem sinusoidy. Cílem bylo využít výhod obou nastavení, šlo spíš jen o pokus. Při nastavení viz tab. 7.14 byl výsledkem absolutní neúspěch. Proudění v úplavu bylo nejvíc chaotické ze všech vyzkoušených metod řízení (obr. 7.15) a působení vztlaku na těleso bylo posíleno, viz tab. 7.15. Podrobnější zkoumání by možná přineslo úspěšnější výsledky.

tab. 7.14 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

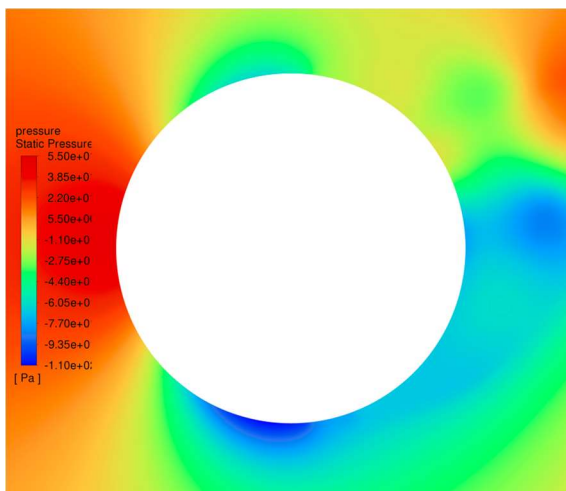
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
horní	5° až 20°	$5.5 - 2.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	-0.1
dolní	5° až 20°	$5.5 + 2.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	1	0.1

tab. 7.15 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

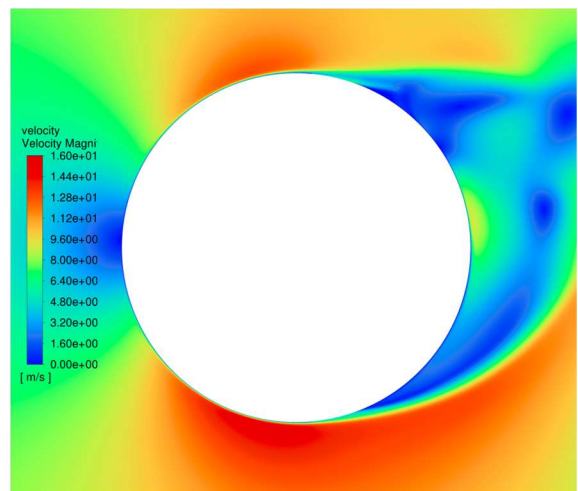
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
28 Hz	1.272	- Hz	1.511	0.592	0.12



obr. 7.15 Průběh C_l a C_d , frekvenční analýza



obr. 7.16 Tlakové pole



obr. 7.17 Rychlostní pole

7.9 Dvě trysky ($5^\circ 20'$, odsávání/vstřikování tvar sinus)

Doposud opomíjenou možností nastavení je odsávání. Kombinace střídavého odsávání a vstřikování dle předpisu v tab. 7.16 se ukázala jako dobrá metoda. Stejně jako u řízení v kapitole 7.6 se u vztlakového koeficientu dostává na hodnoty přibližné jako u neřízeného proudění, zde je ale patrné výrazné snížení tlakového odporu (tab. 7.17). Za tohle snížení může okamžik, kdy je tryskou odsávána pracovní tekutina. V oblasti proudění v těsné blízkosti u tělesa se před tryskou v důsledku toho sníží tlak. Protože je tato oblast u první poloviny tělesa, těleso je tímto „vztahováno“ dopředu do místa s nižším tlakem. Po integraci tlaku na povrchu tělesa je díky tomu menší rozdíl tlaků okolo náběhové části válce a úplavové části válce, což zapříčiní nižší tlakový odpor. Za zmínku stojí vykreslení C_l a C_d po celý čas výpočtu (obr. 7.18). Ihned po aktivaci řízení je vidět, že koeficienty se snížily a s postupem času se zvyšují. Vysvětlení je zřejmě rozladění synchronizace vstřikování a odtrhávání vírů. Frekvence

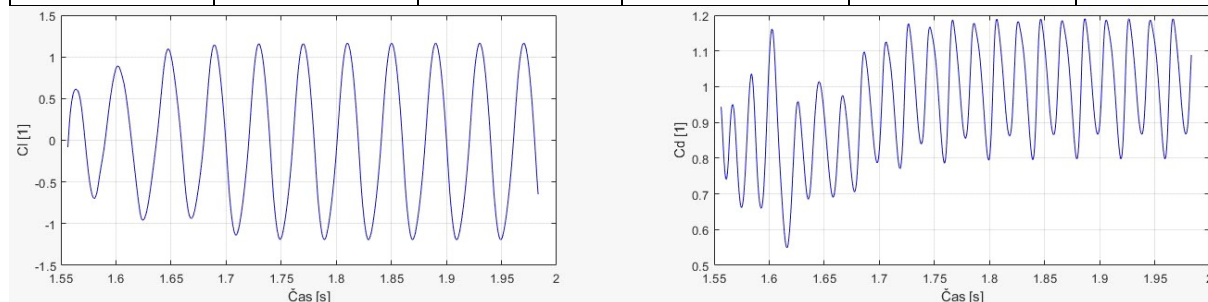
odtrhávaných vírů se s jejich potlačováním mění (snižuje), zatímco frekvence vstřikování zůstává stejná a řízení tímto přestává být funkční.

tab. 7.16 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

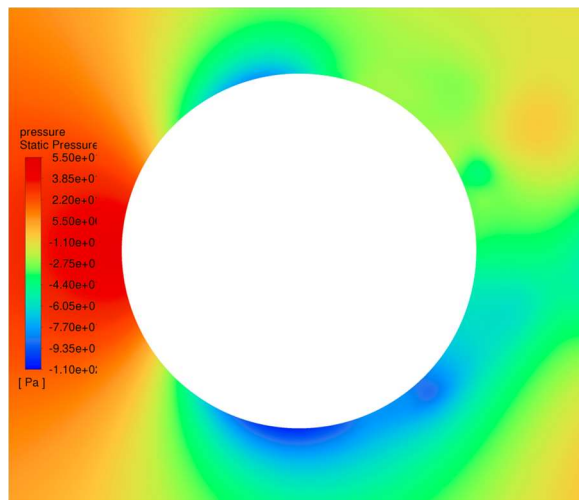
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
horní	5° až 20°	$8.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.553))$	1	-0.1
dolní	5° až 20°	$-8.0 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.553))$	1	0.1

tab. 7.17 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

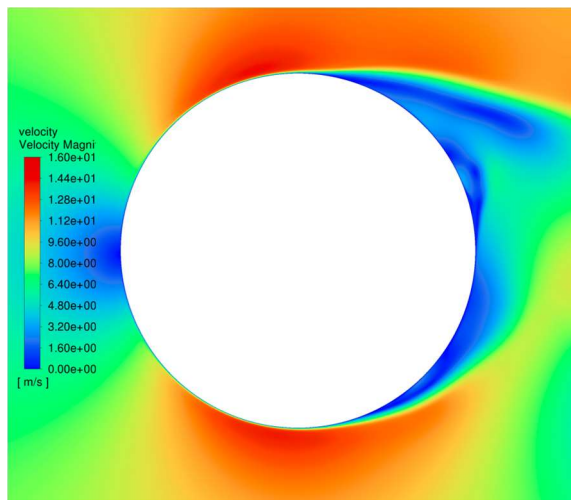
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
25 Hz	1.19	50 Hz	1.18	0.79	0.066



obr. 7.18 Průběh Cl a Cd



obr. 7.19 Tlakové pole



obr. 7.20 Rychlostní pole

8 Řízení bez zpětné vazby – posilované učení

Hledání optimálního řešení manuálně je časově velmi náročné. Variantou automatizování hledání optimálního nastavení by bylo použití parametru v AnsysFluent. Tímto by bylo možné optimalizovat řízení bez zpětné vazby. Vyhodnocení nejlepší varianty by probíhalo manuálně z porovnání průběhů koeficientů Cl a Cd , případně z analýzy proudění. V této práci byl použit software (skript v jazyku Python) od Ing. Ondřeje Urbana, který využívá pro hledání optima strojové učení. Tato metoda byla zvolena pro jednodušší hledání optimálního nastavení z hlediska automatizovaného vyhodnocování a opětovného hledání přesnějšího nastavení.

Posilované učení je jedna z kategorií strojového učení. Agent se snaží ovlivnit prostředí pomocí akce. Na základě úspěšného nebo neúspěšného výsledku akce dostane agent příslušnou odměnu danou rovnicí, jenž se skládá z proměnných, skrze které je sledována funkčnost aplikované akce. Cílem je vytrénovat agenta tak, aby spolehlivě získával co nejvyšší odměny. Předpokládá se proces, který má Markovovu vlastnost – následující stav je funkcí pouze aktuálního stavu a akce, kterou agent rozhodne provést, a je nezávislý na předchozím ději. Pro rozhodování může agent využít dané výstupy z pozorování systému.

Pro nalezení konstantní akce (bez zpětné vazby) byla použita metoda Actor-Critic. Nejsou uvažovány série v čase, každá akce je vyhodnocována zpětně pouze k poslednímu stavu. V první fázi prozkoumávání byly vybrány výchozí hodnoty manuálně tak, aby pokryly požadovaný prostor. Pro tyto hodnoty byly získány odměny, podle kterých pak v druhé fázi dokončování hledané optimum.

8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)

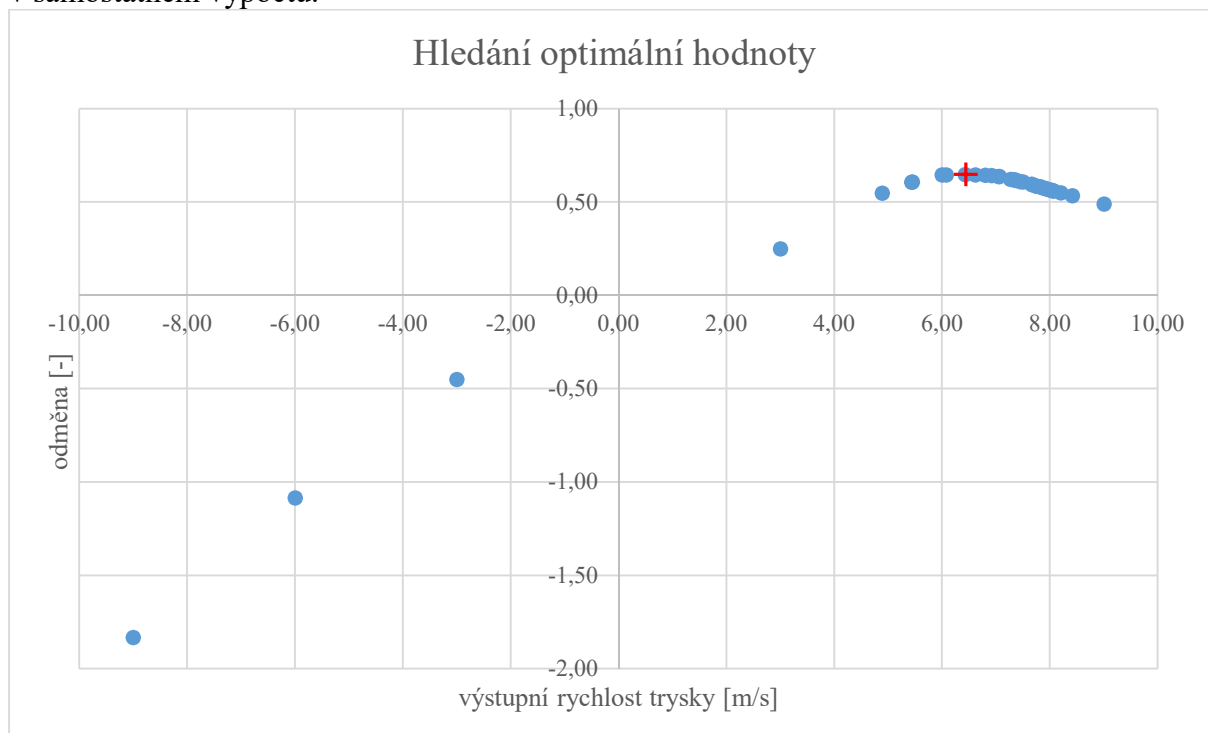
První posilované učení bylo aplikováno na jednu trysku v ose x. Cílem bylo optimalizovat její nastavení oproti hrubě nalezenému nastavení z kapitoly Jedna tryska v ose x (8 m/s). Optimalizace by měla vést k ušetření energie do řízení vkládané při zachování co největšího efektu potlačení působení od Kármánových vírů. Jak bylo popsáno v předchozí kapitole, v první fázi byly vybrány vhodné výchozí hodnoty rychlostí přes celou prozkoumávanou zájmovou oblast: $v = \{-9, -6, -3, 3, 6, 9\}$. Zájmová oblast byla zvolena od -10 m/s do 10 m/s s ohledem na energetickou náročnost a stabilitu výpočtu (y^+). Pro tyto hodnoty rychlostí konstantního vstřikování tryskou byly napočítány simulace proudění a vyhodnoceny průběhy koeficientů vztaku. Z nich pak byly získány hodnoty odměn dle stanovených účelových funkcí, viz rovnice účelové funkce 8.1:

$$r = \left(1 - \frac{A(Cl)}{A(Cl_{poč})} - 0.256 \cdot \frac{v^3}{v_{\infty}^3} \right) [-] \quad (8.1)$$

kde r je odměna při ověřované rychlosti v , $A(Cl)$ je průměrná dvojamplituda koeficientu vztaku za posledních 100 kroků (zhruba 1 perioda potlačovaného jevu), $A(Cl_{poč})$ je průměrná dvojamplituda koeficientu vztaku za posledních 100 kroků před spuštěním řízení (zhruba 1 perioda potlačovaného jevu), v_{∞} je rychlost na vstupu do výpočetní domény.

Účelová funkce je sestavena z členů, které jsou hodnotícími parametry úspěšnosti metody. Poměr dvojamplitud sleduje zmenšení amplitudy Cl – menší amplituda znamená menší působení sil na těleso, a tedy úspěšnější řízení. Nižší hodnoty poměru amplitud zvyšují hodnotu odměny. Dodaný výkon je zde zastoupen poměrem třetích mocnin rychlosti na trysce a vztažné hodnoty rychlosti na vstupu do výpočetní domény. Konstanta 0.256 způsobuje, že při zvolení maximální hodnoty rychlosti na trysce (10 m/s), což by mohl být teoreticky nejúspěšnější stav potlačení kmitání, bude ohodnocen maximální odměnou 0.5 z maximální dosažitelné hodnoty odměny 1, tedy bude možné najít řešení s vyšší odměnou a nižší energetickou náročností.

Po provedení prozkoumávací fáze byla zahájena druhá fáze dokončování. Ta se zaměřila na oblast s nejvyššími hodnotami odměn, to jsou kladné rychlosti kolem hodnot 6 m/s a 9 m/s (tedy vstřikování tryskou do domény). Dokončováním byla získána nejvyšší hodnota odměny pro rychlost přibližně 6.5 m/s. Dokončováním jedné testované hodnoty probíhalo 100 časových kroků a pak byla nastavena další testovaná hodnota. Výsledek testování všech nastavení je na obr. 8.1. Optimální hodnota rychlosti byla následně ověřena v samostatném výpočtu.



obr. 8.1 Graf vyhodnocení hledání optimálního řešení, červený křížek značí výstupní rychlost (6.5) s nejvyšší odměnou (0.647)

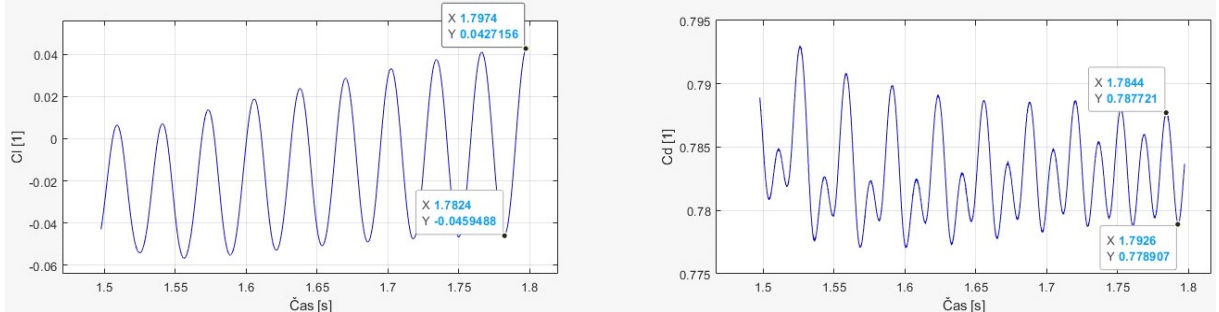
Simulace jedné trysky s konstantní rychlostí vstřikování 6.5 m/s (tab. 8.1) velmi dobře potlačí vliv Kármánových vírů, stejně jak bylo popsáno v kapitole 7.2. Na obr. 8.4 a obr. 8.5 je vidět dokonale uklidněné proudění. Díky nižší rychlosti je pro provoz řízení spotřebována nižší energie, což má pozitivní dopad na provozní náklady. Při prvním spuštění řízení se ale proudění z trysky ustálilo do pozice, kdy bylo okolním prouděním směřováno stále na jednu stranu. Oproti tomu proud ze vstřikování tryskou s 8 m/s periodicky kmital z jedné strany na druhou. Směřování paprsku jen na jednu stranu způsobuje nevyvážené silové působení na těleso (nerovnoměrné rozložení tlaků) a v důsledku toho oscilaci koeficientu vztlaku kolem nenulové (v tomto případě záporné) hodnoty viz obr. 8.3. Tato anomálie byla napravena vypnutím řízení na malou chvíli a opětovným zapnutím. Paprsek proudění z trysky začal kmitat periodicky na obě strany a koeficient již osciluje kolem nulové hodnoty (tab. 8.2). U této metody řízení by bylo možné dále zkoumat i nestacionární vstřikování tryskou, to ale není dále prozkoumáváno. Oblastí zájmu je v této práci zásah do mezní vrstvy – řízení pomocí dvou trysek poblíž bodu odtržení.

tab. 8.1 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

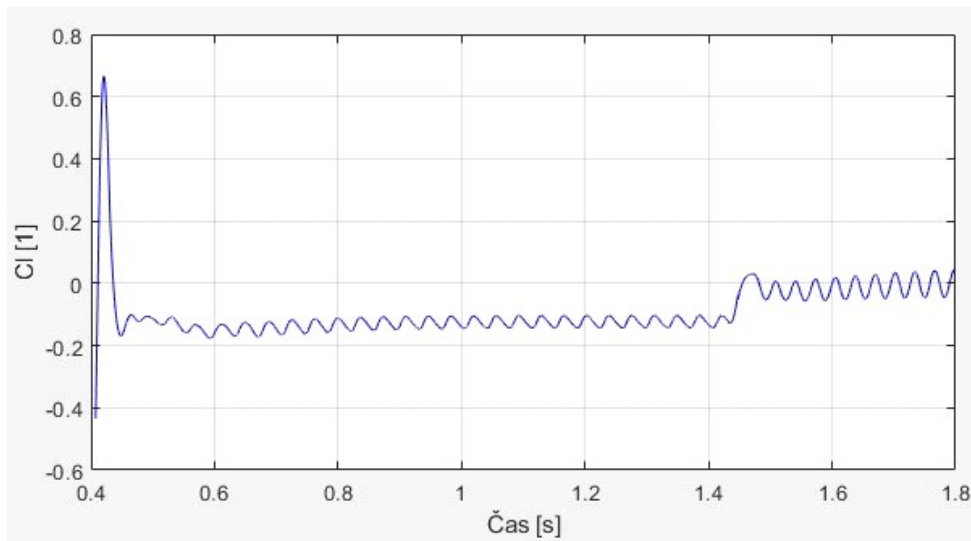
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
na ose x	5° pod až 5° nad osu x	6.5 m/s	1	0

tab. 8.2 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

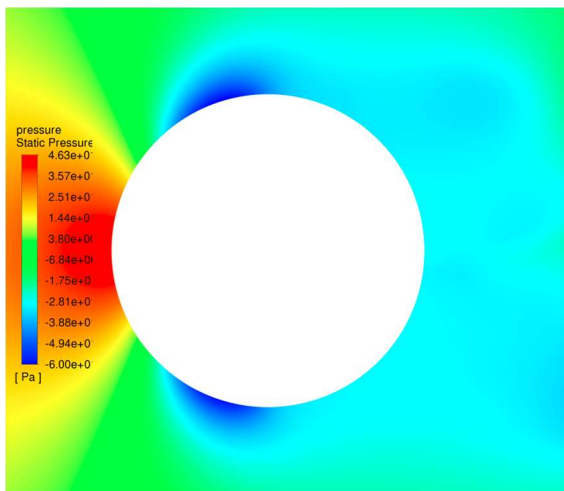
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
30 Hz	0.045	63.33 Hz	0.788	0.778	0.046



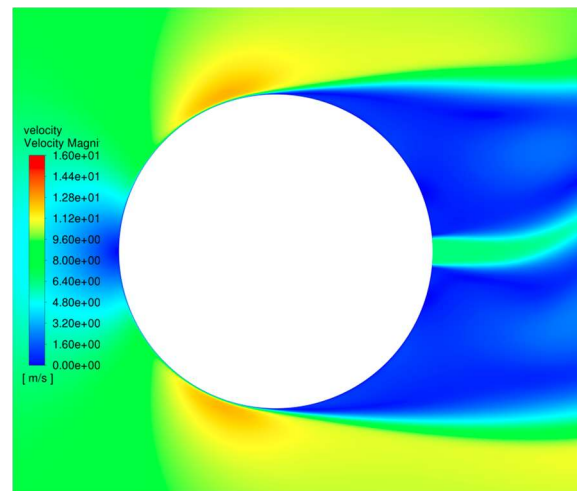
obr. 8.2 Průběh Cl a Cd



obr. 8.3 Průběh Cl při přimknutí paprsku k jedné straně, skok za časem 1.4 s je způsoben přerušením řízení, po opětovném spuštění řízení se paprsek stabilizuje správně, Cl začíná oscilovat kolem hodnoty 0 (obr. 8.2)



obr. 8.4 Tlakové pole



obr. 8.5 Rychlostní pole

8.2 Dvě trysky (5° 20°, konstantní odsávání)

Tohle nastavení řízení bylo nalezeno chybným nastavením řízení se zpětnou vazbou, viz kapitola 9. Chyba byla ve výběru místa pro odběr tlaku z výpočetní domény, ze kterého je následně vyhodnocována rychlost vstřikování tryskou. Konkrétně se jednalo o nekonzistentnost značení ploch v AnsysFluent, a tedy pochybení na straně čtení dat ze špatných ploch.

Výsledkem tohoto omylu bylo ale kupodivu funkční řízení proudění. Rychlost proudění na trysce se v průběhu času měnila a po stabilizaci proudění a potlačení Kármánových vírů se velikost rychlosti ustálila na konstantních 2 m/s a smysl vstřikování byl pouze v ose y, a to ve směru do tělesa. Technicky se nejedná o vstřikování, ale o odsávání. To je velmi zajímavý výsledek, jelikož v dosavadní práci bylo uvažováno hlavně vstřikování. Správně nastavené řízení se zpětnou vazbou je popsáno v další kapitole. Z nepovedeného řízení se zpětnou vazbou nebyly zpracovány žádné grafy ani animace proudění, jelikož šlo o první pokus a následně již nebylo opakováno, právě pro zjištěnou chybu v nastavení.

Pro zajímavost bylo ale získané nastavení (tab. 8.3) ověřeno na samostatném výpočtu. Bylo uvažováno konstantní odsávání tryskou ve směru do tělesa v ose y. Konstantní rychlost byla zvolena vyšší, než byla finální ustálená rychlost u výchozího řízení, jelikož v začátku řízení byly rychlosti vyšší a proměnlivé. Zvolená rychlost odsávání 5 m/s byla předpokládána jako dostatečná pro ovlivnění odtržené mezní vrstvy, a ne příliš vysoká pro dostatečnou efektivitu.

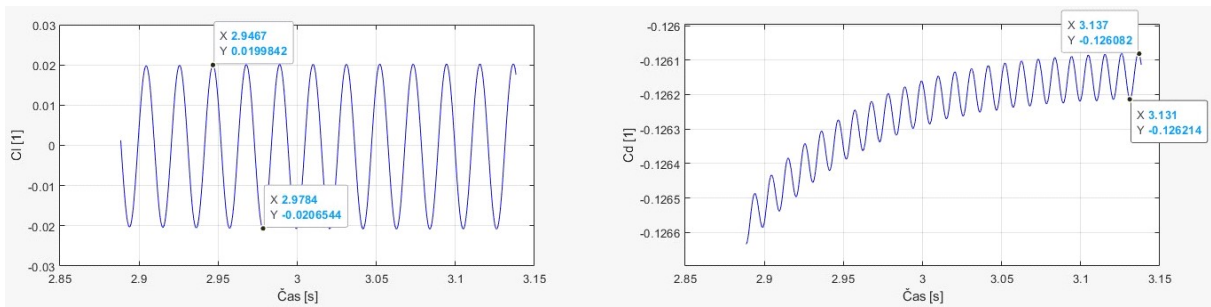
Výsledkem je dokonalé potlačení oscilace hodnoty Cl (obr. 8.7). Dle zjištění z analýzy rozložení tlaku a z časového průběhu Cd, na těleso působí záporný koeficient Cd (tab. 8.4). To znamená, že síla od tlakového odporu nepůsobí na těleso ve směru proudění, jako to obvykle bývá, ale naopak působí na těleso proti směru proudění. To není obvyklé a bylo proto důkladněji prozkoumáno tlakové pole (obr. 8.8). Z kontur tlaku je patrné, že se před tryskou vytvořila oblast s lokálním tlakovým minimem. Tato oblast se vyskytuje primárně nad první polovinou obtékaného tělesa (obr. 8.8 zelená kontura), což po integraci tlaku po hranici tělesa způsobí silové působení na těleso proti směru proudění. Přirozeně je tlak v této oblasti vyšší a koeficient tlakového odporu Cd je kladný, snížení tlaku a záporné Cd je nepřirozený stav způsobený dodanou energií. Dá se říct, že dodáváním energie do řízení, tedy odsávání, tlačím těleso proti proudu. Cílem je snížení energetické náročnosti na minimum, a proto je tento stav nežádoucí a mělo by být nalezené řešení s nižší dodanou energií a nulovým nebo minimálním kladným Cd. V ideálním případě by poté na těleso nepůsobily žádné síly ve směru ani proti směru proudění.

tab. 8.3 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

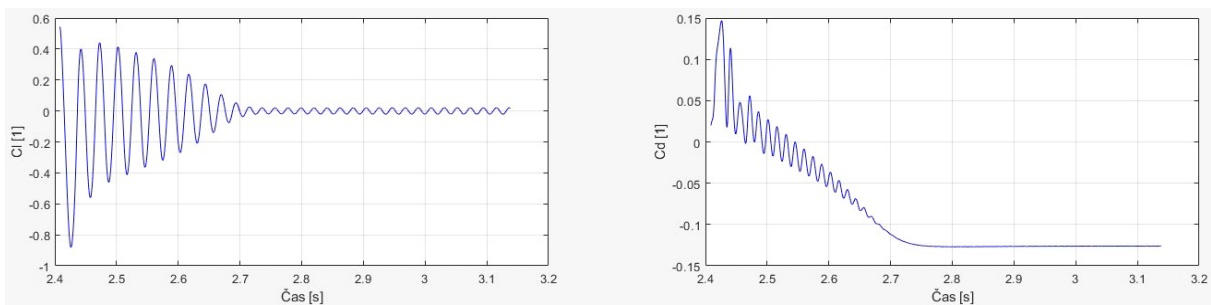
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychlosti x	složka rychlosti y
horní	5° až 20°	5 m/s	0	-1
dolní	5° až 20°	5 m/s	0	1

tab. 8.4 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

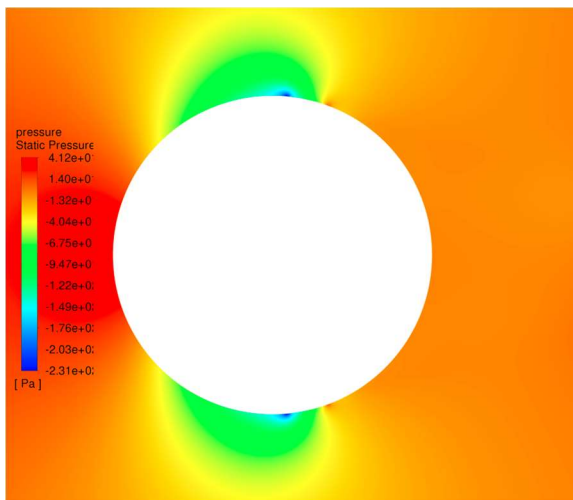
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ε
48 Hz	0.02	104.17 Hz	-0.126	-0.126	0.062



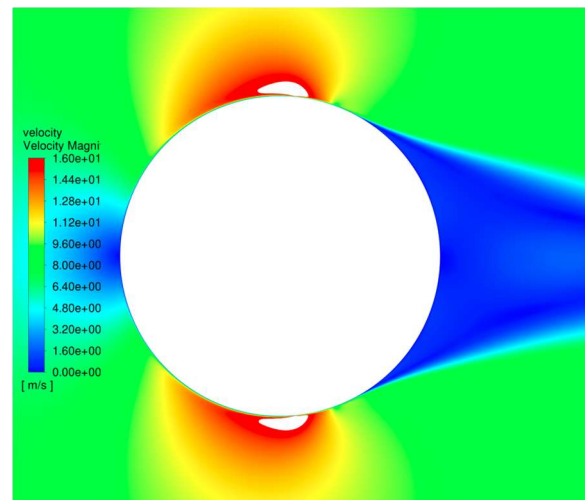
obr. 8.6 Průběh C_l a C_d



obr. 8.7 Průběh C_l a C_d při celé simulaci, lze pozorovat výborná účinnost na ztlumení kmitání C_l a minimalizaci C_d



obr. 8.8 Tlakové pole



obr. 8.9 Rychlostní pole

8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)

Při zkoumání předchozích metod řízení dvěma tryskami bylo použito vždy konstantní a střídavé vstřikování. Odsávání nebylo doposud zkoumáno, a protože se ukázalo jako velmi účinné, bude provedena simulace řízení s proměnlivým odsáváním. Směr odsávání bude stejný jako v předchozí kapitole. Tvar signálu rychlosti bude popsán rovnicemi pro horní trysku a prospodní trysku viz tab. 8.5. Vstřikování s proměnlivou rychlostí se doposud ukázalo jako ne zcela funkční, hlavní příčina by mohla být ve změně frekvence odtrhávání vírů po aplikaci řízení. Řízení bez zpětné vazby není schopné reagovat na tuto změnu a po několika poměrně úspěšných periodách řízení se fáze řízení a fáze potlačovaného jevu rozladí. Odtrhávané Kármánovy víry se pak navážou na trysku vstřikovanou tekutinu a jsou tímto nadále posilovány, viz obr. 8.11. Výsledkem je vyšší (horší) C_l než při proudění bez aplikovaného

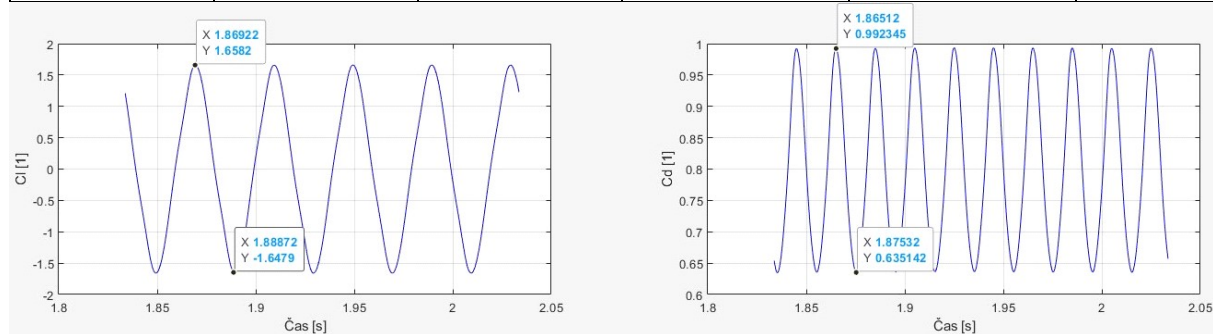
řízení. Tento stejný problém se projevil i při nastavení proměnlivého vstřikování. Tento problém je řešitelný použitím řízení se zpětnou vazbou.

tab. 8.5 Nastavení rychlostní okrajové podmínky

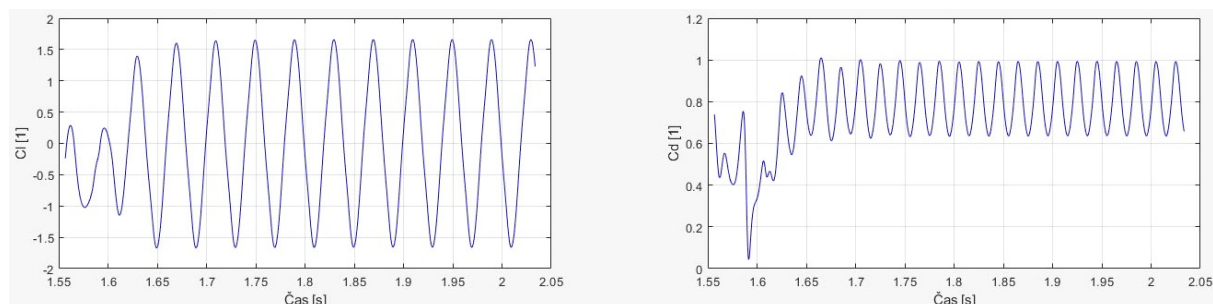
tryska	poloha	velikost rychlosti	složka rychl. x	složka rychl. y
horní	5° až 20°	$2.5 - 2.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	0	-1
dolní	5° až 20°	$2.5 + 2.5 \cdot \cos(2 \cdot \pi \cdot 25 \cdot (t - 1.52))$	0	1

tab. 8.6 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

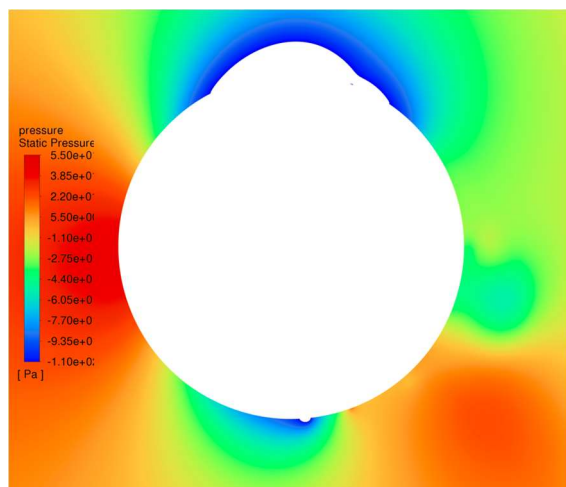
Cl frekvence	Cl amplituda	Cd frekvence	Cd maximální	Cd minimální	ϵ
25 Hz	1.65	50 Hz	0.99	0.63	0.017



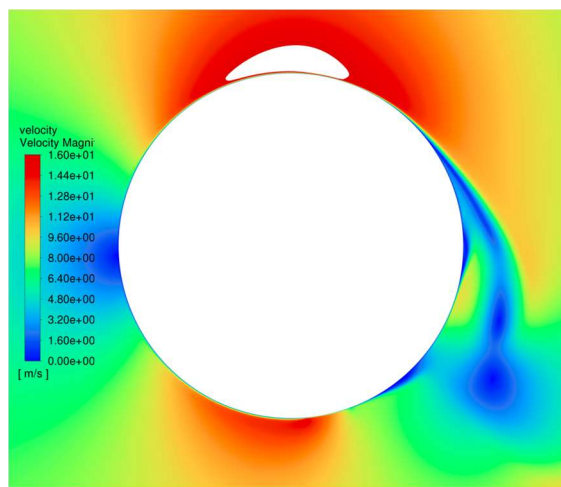
obr. 8.10 Průběh Cl a Cd



obr. 8.11 Průběh Cl a Cd od začátku simulace – pro první periodu a půl řízení docela úspěšně ovlivňovalo odtrhávání virů, pak opět došlo k navázání odtrhávání virů na řízení



obr. 8.12 Tlakové pole



obr. 8.13 Rychlostní pole

9 Řízení se zpětnou vazbou – posilované učení

Řízení se zpětnou vazbou je nejsložitější možností řízení proudění, zároveň také ale nejsložitější na provedení. K řízení se zpětnou vazbou bylo přistoupeno kvůli problémům s aplikací řízení se vstřikováním tvaru signálu sinus. Hlavní podezření nefunkčnosti tohoto řízení je rozladění fáze vstřikování/odsávání tryskou a fáze odtrhávání vírů. K úspěšnému potlačení je potřeba správná synchronizace těchto dvou faktorů. Frekvence odtrhávání se mění v průběhu potlačování odtrhávání, signál s neměnnou frekvencí střídavého signálu není schopný se na tuhle změnu adaptovat.

Na základě dat získaných z proudového pole v posledním časovém úseku jsou určeny hodnoty pro řízení proudění v nastávajícím časovém úseku. V řešené úloze je vyhodnocován tlak na části povrchu tělesa (-5° až 0°), tj. před bodem odtržení mezní vrstvy na horní i spodní straně válce. Střední hodnota tlaku na části válce a změna této střední hodnoty v čase (derivace tlaku) z předešlých časových úseků jsou použity pro určení rychlosti proudění na trysce pro následující časový úsek. V první fázi prozkoumávání jsou, jako v kapitole 8, stanoveny a ověřeny hodnoty rovnoměrně pokrývající prohledávaný prostor (hledány jsou konstanty C_1 , C_2 a úhel α). V okolí testovaných hodnot s nejvyššími odměnami by následně byla následně zahájena druhá fáze – dokonvergování. K této fázi se ale v závěru již nepřistoupilo, jelikož už nejlepší testované hodnoty z první fáze dokázaly velmi úspěšně potlačit kmitání odtržení mezní vrstvy a tvorbu Kármánových vírů. Výchozí hodnoty konstant a úhlu pokrývající prozkoumávanou oblast jsou uvedeny v tabulce tab. 9.1. Prohledávaný rozsah je zvolený tak, aby maximální rychlosti na tryskách nepřesáhly 10 m/s kvůli rozumné energetické náročnosti a stabilitě výpočtu.

tab. 9.1 Konstanty pokrývající prohledávaný prostor, testovány budou všechny kombinace

C_1	-0.1	-0.0333	0.0333	0.1
C_2	-0.001	-0.000333	0.000333	0.001
α	0	$\pi/6$	$\pi/3$	$\pi/2$

9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování)

Původním záměrem bylo nalézt pro zpětnou vazbu nastavení, kdy bude tryskami tekutina pouze odsávána, a napojit tak na neúspěšné řízení z kapitoly 8.3. Chybným nastavením rovnic 9.6 a 9.7 ale bylo provedeno řízení se střídavým vstřikováním a odsáváním. Chybělo omezení na pouze záporné velikosti rychlosti, směr rychlosti se tedy mohl měnit kvůli změně znaménka u velikosti rychlosti, a tak bylo tryskou ve výsledku i vstřikováno. Do rovnic 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.6 a 9.7 byly dosazeny všechny kombinace hodnot konstant a úhlů z tab. 9.1 a pomocí účelové funkce byly vyhodnoceny odměny (dle rovnice 9.1) pro jednotlivé kombinace (Příloha 4). V rovnicích zpětné vazby byly následně použity konstanty s nejvyšší odměnou ($C_1=0.0333$, $C_2=-0.001$, $\alpha=\pi/6$). Ve skutečnosti se jedná o druhý nejlepší výsledek, řešení simulace prvního nejlepšího výsledku začalo v průběhu výpočtu divergovat a bylo přistoupeno k druhému nejlepšímu nastavení. V účelové funkci byla tentokrát posuzována pouze úspěšnost zmenšení amplitudy koeficientu vztlaku Cl oproti původní amplitudě.

Účelová funkce vyhodnocení odměny:

$$r = \left(1 - \frac{A(Cl)}{A(Cl_{poč})} \right) [-] \quad (9.1)$$

Rovnice popisující jednotlivé složky rychlostí na tryskách jsou:

složka rychlosti horní trysky ve směru x

$$v_{ux} = v_u \cdot \cos(\alpha) \quad [m/s] \quad (9.2)$$

složka rychlosti horní trysky ve směru y

$$v_{uy} = v_u \cdot \sin(\alpha) \quad [m/s] \quad (9.3)$$

složka rychlosti spodní trysky ve směru x

$$v_{dx} = v_d \cdot \cos(\alpha) \quad [m/s] \quad (9.4)$$

složka rychlosti spodní trysky ve směru y

$$v_{dy} = -v_d \cdot \sin(\alpha) \quad [m/s] \quad (9.5)$$

kde α je úhel určující směr vektoru rychlosti (úhel natočení trysky), v_u je velikost vektoru rychlosti horní trysky popsaná v rovnici 9.6 a v_d je velikost vektoru rychlosti spodní trysky popsaná v rovnici 9.7

velikost vektoru rychlosti v_u horní trysky

$$v_u = C_1(p_u - p_o) + C_2 \frac{dp_u}{dt} \quad [m/s] \quad (9.6)$$

velikost vektoru rychlosti v_d spodní trysky

$$v_d = C_1(p_d - p_o) + C_2 \frac{dp_d}{dt} \quad [m/s] \quad (9.7)$$

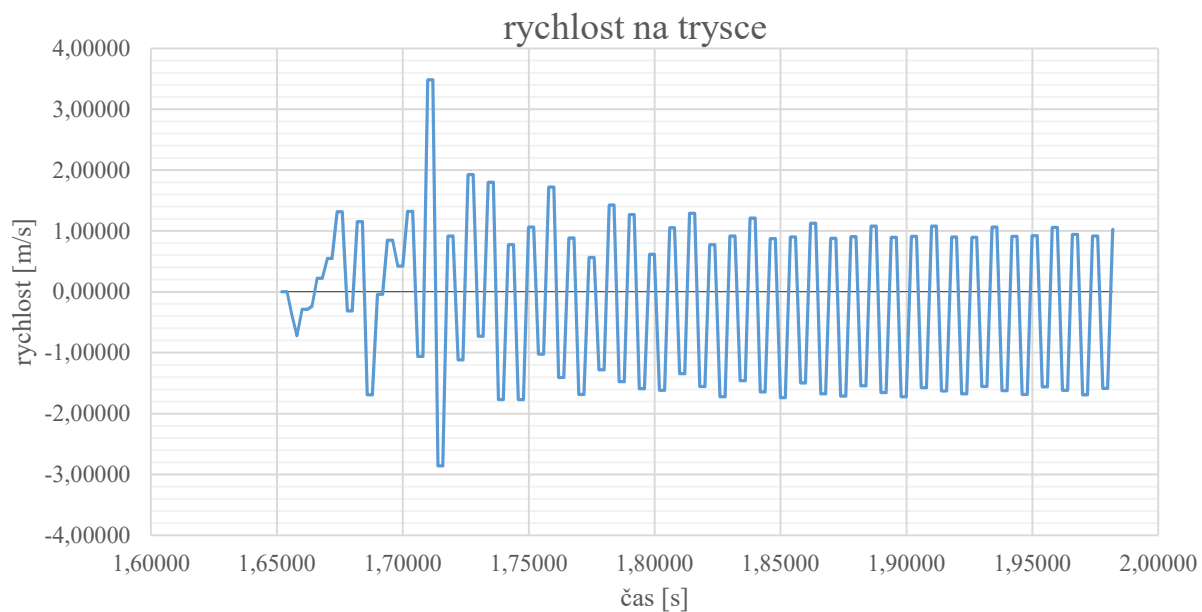
kde C_1 a C_2 jsou konstanty, p_u je tlak na sledované části povrchu před horní tryskou, p_d je tlak na sledované části povrchu před spodní tryskou a p_o je hodnota dle rovnice 9.8 průměrovaná pro posledních 100 časových kroků.

$$p_o = \frac{p_u + p_d}{2} \quad [Pa] \quad (9.8)$$

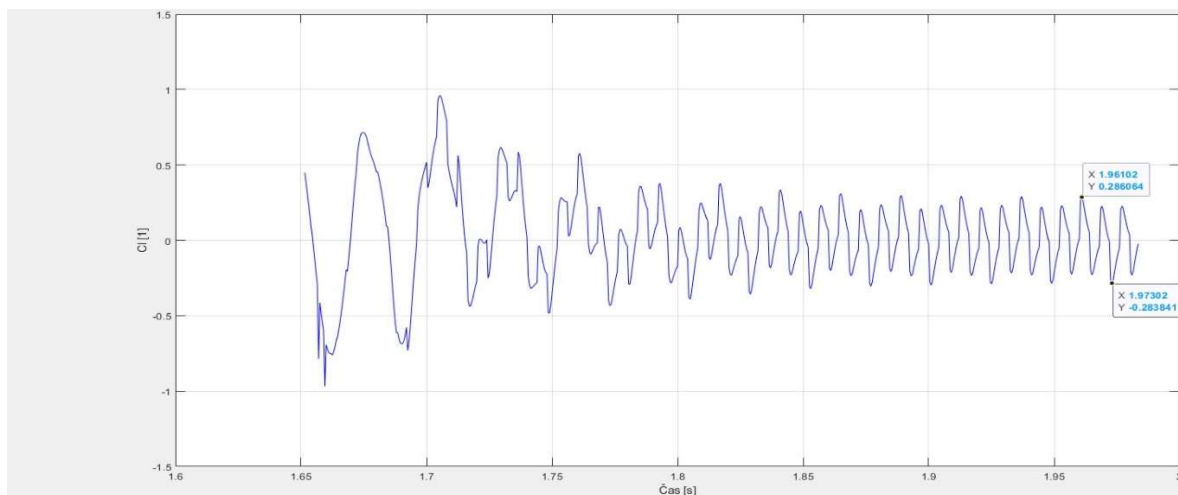
Řízení se zpětnou vazbou s tímto nastavením je velmi účinné (obr. 9.4, obr. 9.5). Úspěšně potlačilo periodické odtrhávání vírů a střídavé silové působení na těleso (obr. 9.2, obr. 9.3). Maximální amplituda koeficientu vztlaku C_l je po uklidnění úplavu přibližně 0.28 (původně 1.18) (tab. 9.2). Koeficient tlakového odporu C_d klesl na průměrných 0.3 (původně osciloval kolem 1.044 až 1.212), což je také výrazné zlepšení. U řízení s konstantním odsáváním byla výsledná amplituda C_l nižší. Na druhou stranu je zde vyšší energetická náročnost, jelikož musím dodat tekutinu s vyšší rychlostí, a to po celou dobu (viz Příloha 6). Zpětná vazba je oproti konstantnímu vstřikování efektivnější, přičemž záleží na požadované míře zmírnění kmitání. Pravděpodobně bude hledán kompromis mezi náklady na řízení (energetickou náročností a cenou instalace) a přijatelným výsledkem utlumeného silového působení pro danou aplikaci.

tab. 9.2 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

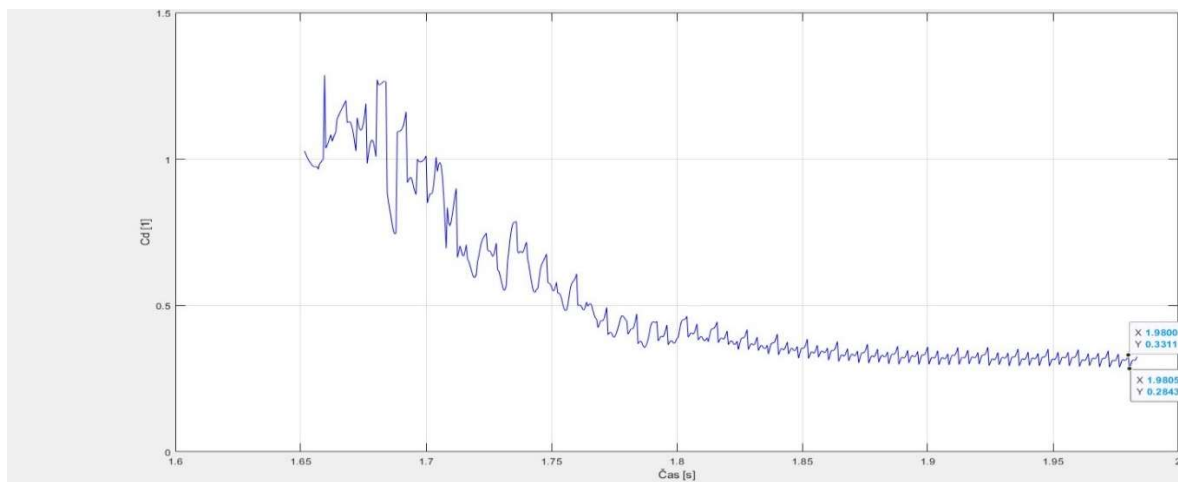
C_l maximální	C_l minimální	C_d maximální	C_d minimální	ε
0.28	-0.28	0.33	0.28	0.0013



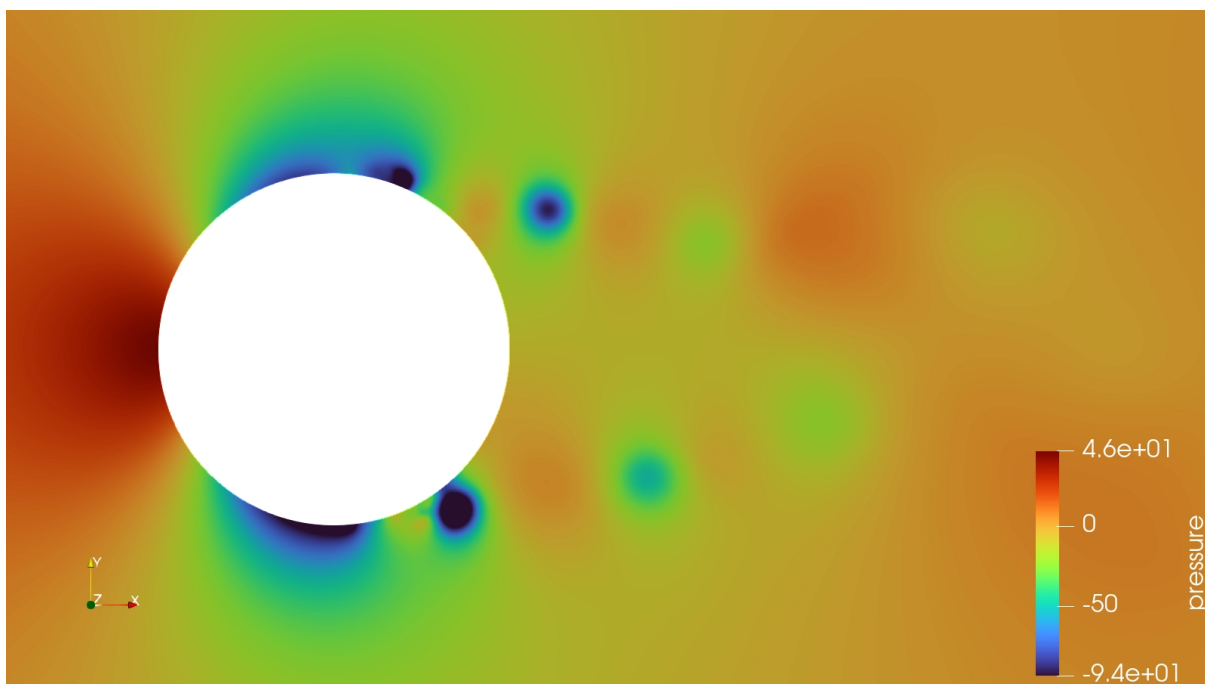
obr. 9.1 Graf rychlosti na horní trysce



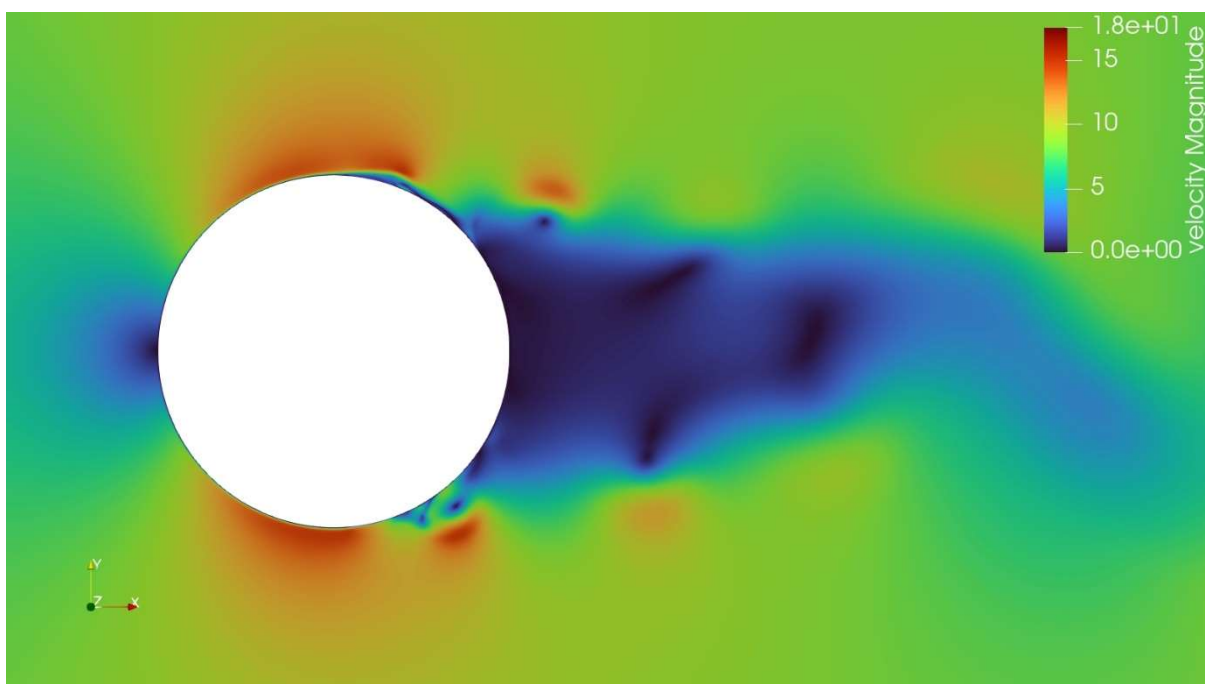
obr. 9.2 Průběžný útlum C_l při řízení se zpětnou vazbou



obr. 9.3 Průběžné snížení C_d při řízení se zpětnou vazbou



obr. 9.4 Tlakové pole



obr. 9.5 Rychlostní pole

9.2 Dvě trysky (5° 20° , odsávání)

Úplně stejným postupem jako v předešlé kapitole Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování) bylo provedeno hledání optimálního nastavení i pro variantu pouze s odsáváním. Jediný rozdíl je v rovnici pro hledání velikosti rychlosti odsávání. Zde je funkce doplněna o omezení na maximální hodnotu 0. Rovnice 9.6 je nahrazena rovnicí 9.9, rovnice 9.7 je nahrazena rovnicí 9.10. Další postup je totožný jako v předcházející kapitole.

opravené rovnice: rychlosti jsou definovány dle rovnic zpětné vazby:
pro horní trysku

$$v_u = \min\left(C_1(p_u - p_o) + C_2 \frac{dp_u}{dt}, 0\right) \text{ [m/s]} \quad (9.9)$$

pro spodní trysku

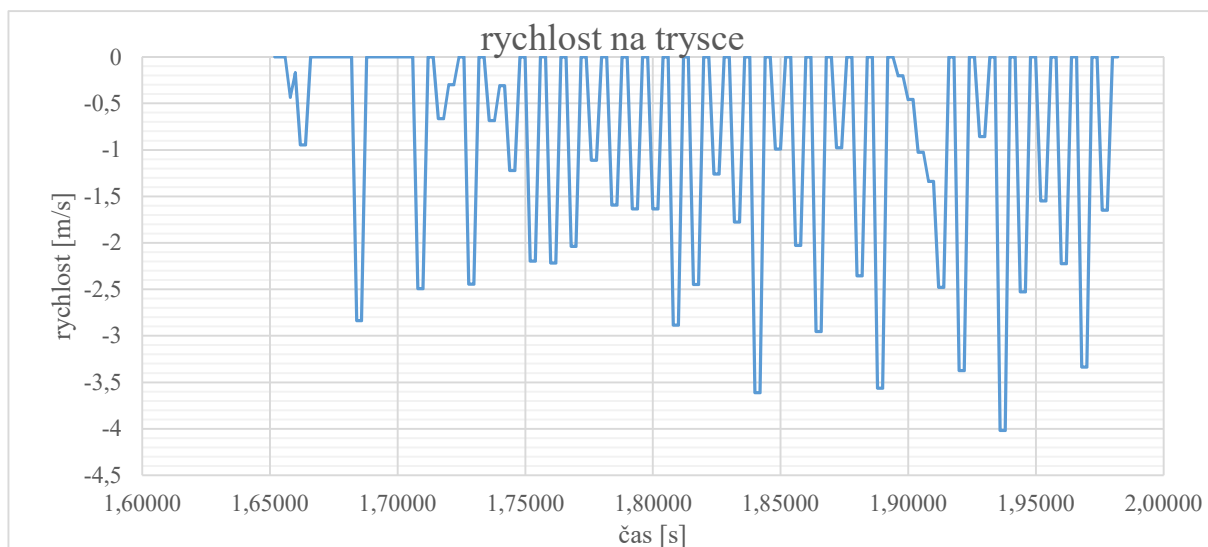
$$v_d = \min\left(C_1(p_d - p_o) + C_2 \frac{dp_d}{dt}, 0\right) \text{ [m/s]} \quad (9.10)$$

Do rovnic 9.2, 9.3, 9.4, 9.5, 9.9 a 9.10 byly dosazeny všechny kombinace hodnot koeficientů z tab. 9.1 a pomocí účelové funkce byly vyhodnoceny odměny (dle rovnice 9.1) pro jednotlivé kombinace (Příloha 5). V rovnicích zpětné vazby byly následně použity koeficienty s třetí nejvyšší odměnou ($C_1 = -0.1$, $C_2 = -0.001$, $\alpha = \pi/2$), nastavení s prvními dvěma nejvyššími odměnami divergovaly. V účelové funkci byla tentokrát posuzována pouze úspěšnost zmenšení amplitudy koeficientu vztlaku C_l oproti původní amplitudě.

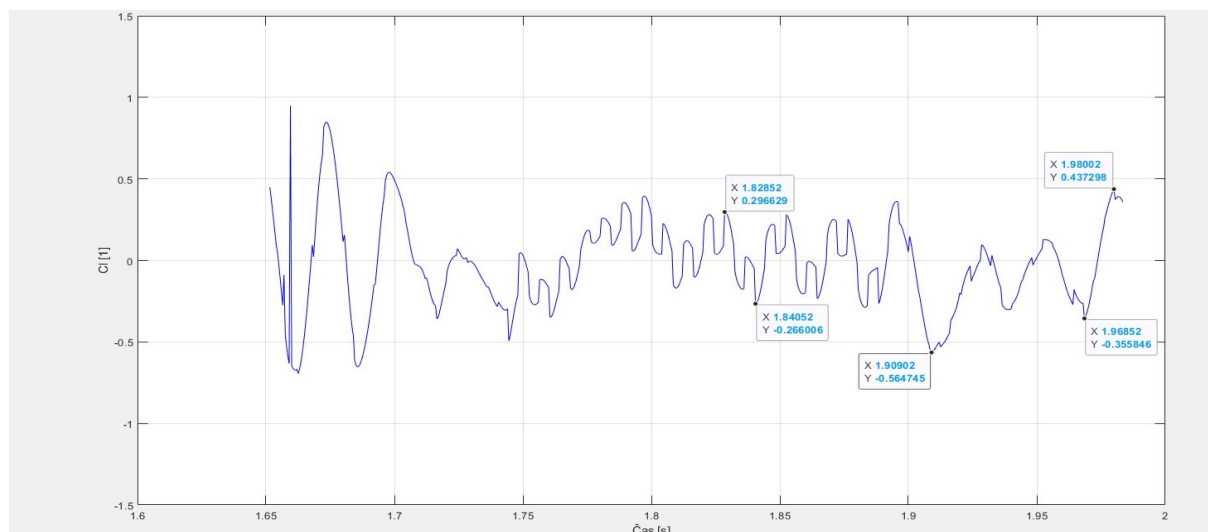
Odsávání se provádí opět jen ve směru y , stejně jako u konstantního odsávání. Řízení snížilo působení vztlaku a tlakový odpor. Řízení ale není tak úspěšné jako v předchozím případě, za stejný časový úsek nebylo schopné proudění kolem tělesa a v úplavu za ním stabilizovat (porovnání obr. 9.2 a obr. 9.7). V důsledku toho amplituda koeficientu vztlaku C_l neosciluje pravidelně kolem nuly, pohybuje se v rozmezí maximální amplitudy C_l 0.56 (obr. 9.7), což je oproti výchozímu stavu (1.18) i tak úspěch a metoda řízení může být označena za funkční. Došlo i k snížení tlakového odporu C_d na hodnotu pohybující se mezi hodnotami 0.1 až 0.5 (kvůli neustálenému úplavu se neblíží přesnější hodnotě). Výsledek řízení proudění je horší oproti řízení se zpětnou vazbou z předešlé kapitoly, ale opět je podstatné, jaké jsou požadavky pro aplikaci.

tab. 9.3 Vyhodnocení vlivu řízení proudění

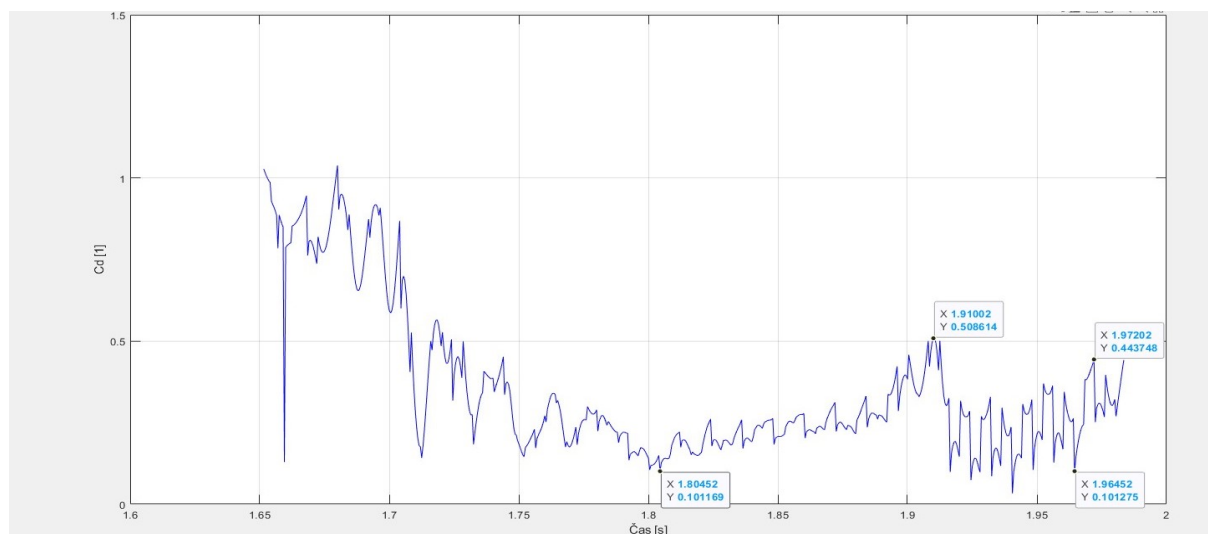
C_l maximální	C_l minimální	C_d maximální	C_d minimální	ε
0.44	-0.56	0.5	0.1	0.001



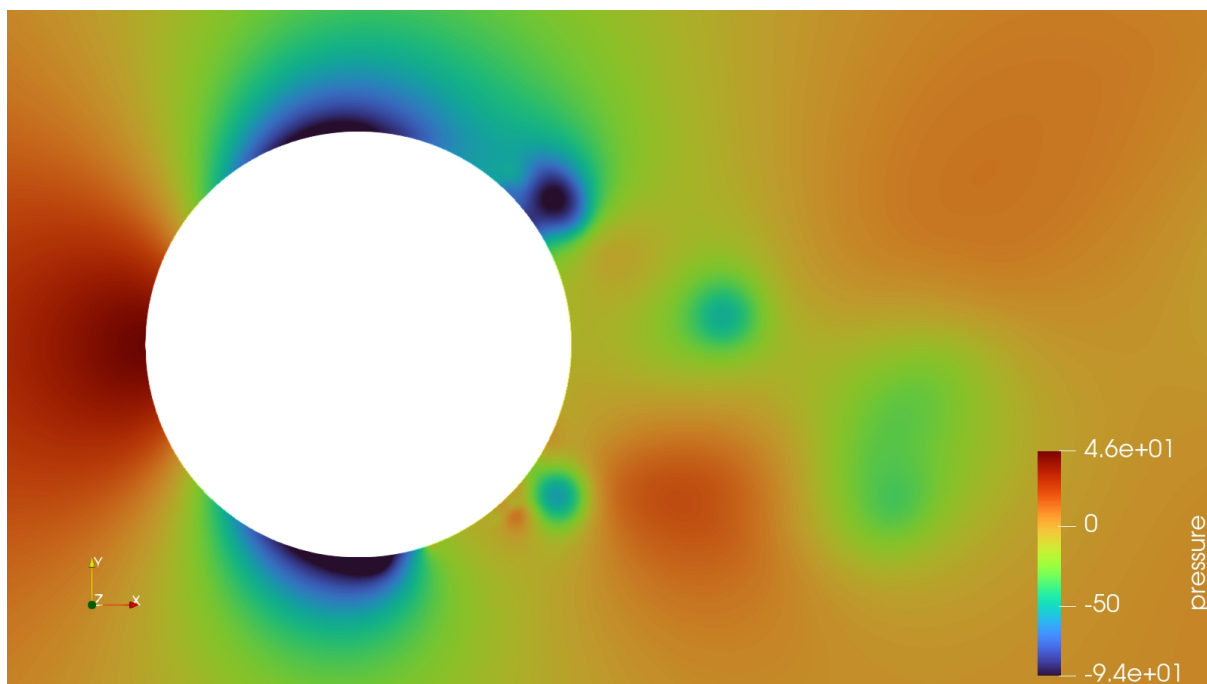
obr. 9.6 Graf rychlosti na horní trysce



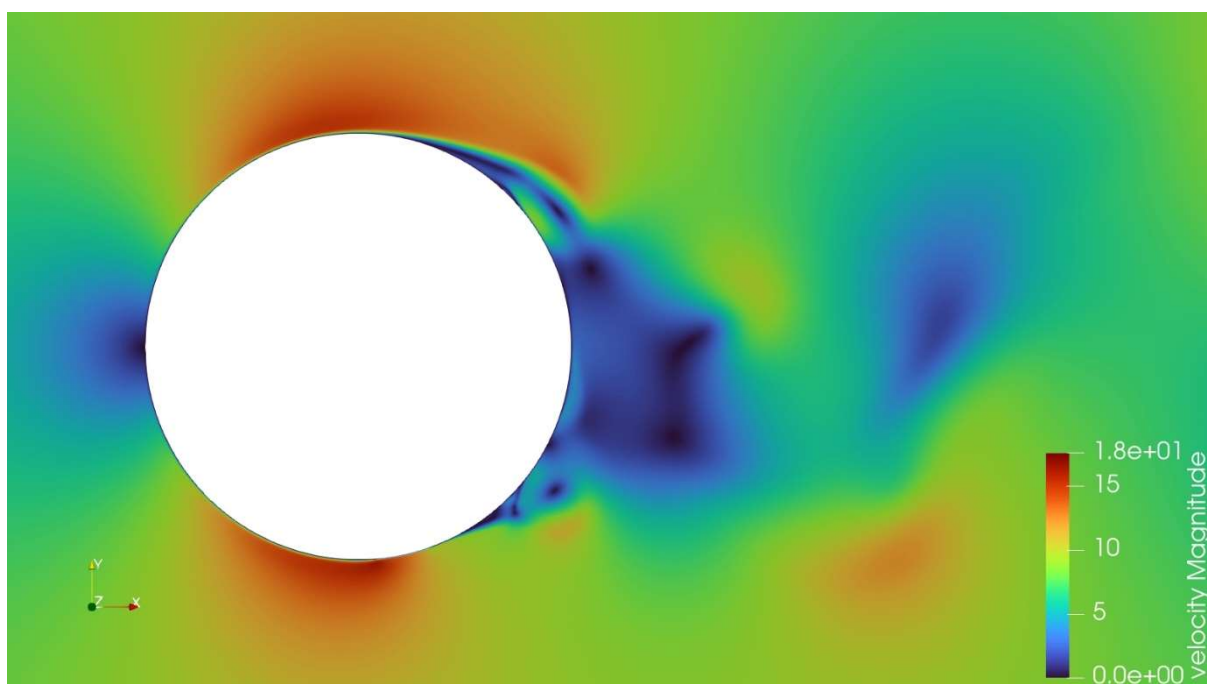
obr. 9.7 Průběžný útlum C_l při řízení se zpětnou vazbou



obr. 9.8 Průběžné snížení C_d při řízení se zpětnou vazbou



obr. 9.9 Tlakové pole



obr. 9.10 Rychlostní pole

DISKUSE

Metody řízení proudění byly zpočátku testovány a obměňovány pouze manuálně bez využití automatizačních možností softwaru Ansys. V tom důsledku bylo zkoumání metod zpočátku pomalé a hledání optimálního řízení nebylo zcela efektivní a progresivní. Zcela jistě by bylo namístě již od začátku alespoň částečně automatizovat testování, například funkci parametr v AnsysWorkbench. Tato funkce umožňuje automatickou změnu zvoleného parametru (např. rychlosti na trysce, jejího směru atd.), což by bylo dobře využitelné při hledání vhodného nastavení řízení bez zpětné vazby.

Na rychlost výpočtu měla významný vliv také velikost sítě. Všechny výpočty byly prováděny na jemné síti, viz kapitola Síť. Pokud by byla pro prvotní hledání použita hrubější síť a pro ověření nalezeného řešení použita síť jemnější, vedlo by to k výrazné časové úspoře. Určitou úsporu výpočetního času by mohlo zajistit i zmenšení výpočetní domény v oblasti úplavu. Zde už ale není stoprocentní jistota bezproblémové náhrady, změna by mohla mít vliv na fyzikální správnost řešení.

Velkým krokem vpřed bylo zkrácení výpočetního kroku. Zpočátku byl odhadnutý dle Courantova čísla, což vedlo na použití kroku $2 \cdot 10^{-5}$. Po konzultaci s vedoucím práce byl krok změněn na $1 \cdot 10^{-4}$, tedy byl dvacetkrát zvýšen. Úspora výpočetního času je zde jednoznačná.

Pokud by byly aplikovány zmíněné zlepšení, bylo by možné prozkoumat více různých metod řízení a jejich konkrétního nastavení. I přes to je ale v práci dosaženo zajímavých závěrů a podnětů k dalšímu zkoumání.

ZÁVĚR

Nejprve byla provedena simulace proudění bez aplikovaného řízení. Bez řízení se z odtržené mezní vrstvy vytvoří Kármánovy víry, které způsobují silové působení na obtékané těleso. To je namáháno periodicky a při frekvenci odtrhávání přibližující se vlastní frekvenci tělesa se vybudí samobuzené kmitání. V případech, kdy jsou vyvinuté Kármánovy víry nechtěné, bývá aplikována nějaká metoda řízení proudění. Proudění bez řízení je výchozím stavem pro aplikace různých metod řízení. S časovým průběhem vztlaku a tlakového odporu simulace bez řízení jsou pak porovnávány průběhy vztlaku a tlakového odporu simulací s aplikovanými metodami. Na základě toho je pak vyhodnocována úspěšnost metod řízení proudění. Druhým ukazatelem úspěšné metody řízení je energetická náročnost. Energetická náročnost je vyhodnocována přes poměr energie vstupující do výpočetní domény a energie vstupující skrz trysky. Shrnutí těchto vyhodnocených ukazatelů je v grafu na konci závěru.

První zkoumanou metodou řízení proudění je jedna tryska ležící na ose x v úplavové části válce. Tato metoda je velmi účinná. Kármánovy víry se netvoří přímo u tělesa ale v úplavu dál za tělesem. Ovlivněné tlakové pole Kármánovými víry tak již nemá vliv na těleso, víry se ale stále tvoří. Pro zvolenou rychlost proudění z trysky 8 m/s bylo řízení velmi účinné. Dalším cílem bylo optimalizovat nastavení, tak aby bylo zároveň dosaženo co největší efektivity. Pomocí softwaru Ing. Ondřeje Urbana bylo zautomatizováno testování různých nastavení. Výsledkem s nejlepší kombinací potlačení tvoření Kármánových vírů a zároveň dobrou energetickou efektivitou byla rychlost na trysce 6.5 m/s. Při testování nejlepšího nastavení se při prvním spuštění řízení paprsek proudění z trysky přimknul k jedné straně odtrženého proudění. Výsledkem bylo nerovnoměrné silové působení na těleso, a tedy nerovnoměrně působící vztlak. Po vypnutí a zapnutí řízení se tato nerovnoměrnost již neprojevila a vztlak působící na těleso osciloval kolem nulové hodnoty.

Základem pro další sérii zkoumaných metod bylo použití dvou trysek v blízkosti bodu odtržení mezní vrstvy. Zde již bylo složitější nalézt optimální řízení, hledaných neznámých je víc: rychlost vstřikování, směr vstřikování, tvar signálu vstřikování, velikost trysky (a s tím spojený hmotnostní průtok), poloha trysky a načasování vstřikování při nekonstantním vstřikování. Nejlepším dosaženým výsledkem bylo konstantní vstřikování rychlostí 8 m/s tryskou širokou 15° (od 5° do 20°) (kapitola 7.7). Zde došlo k nejvýraznějšímu snížení vztlaku. Nejvýraznějšího snížení tlakového odporu bylo dosaženo periodickým vstřikováním a odsáváním tryskami (kapitola 7.9).

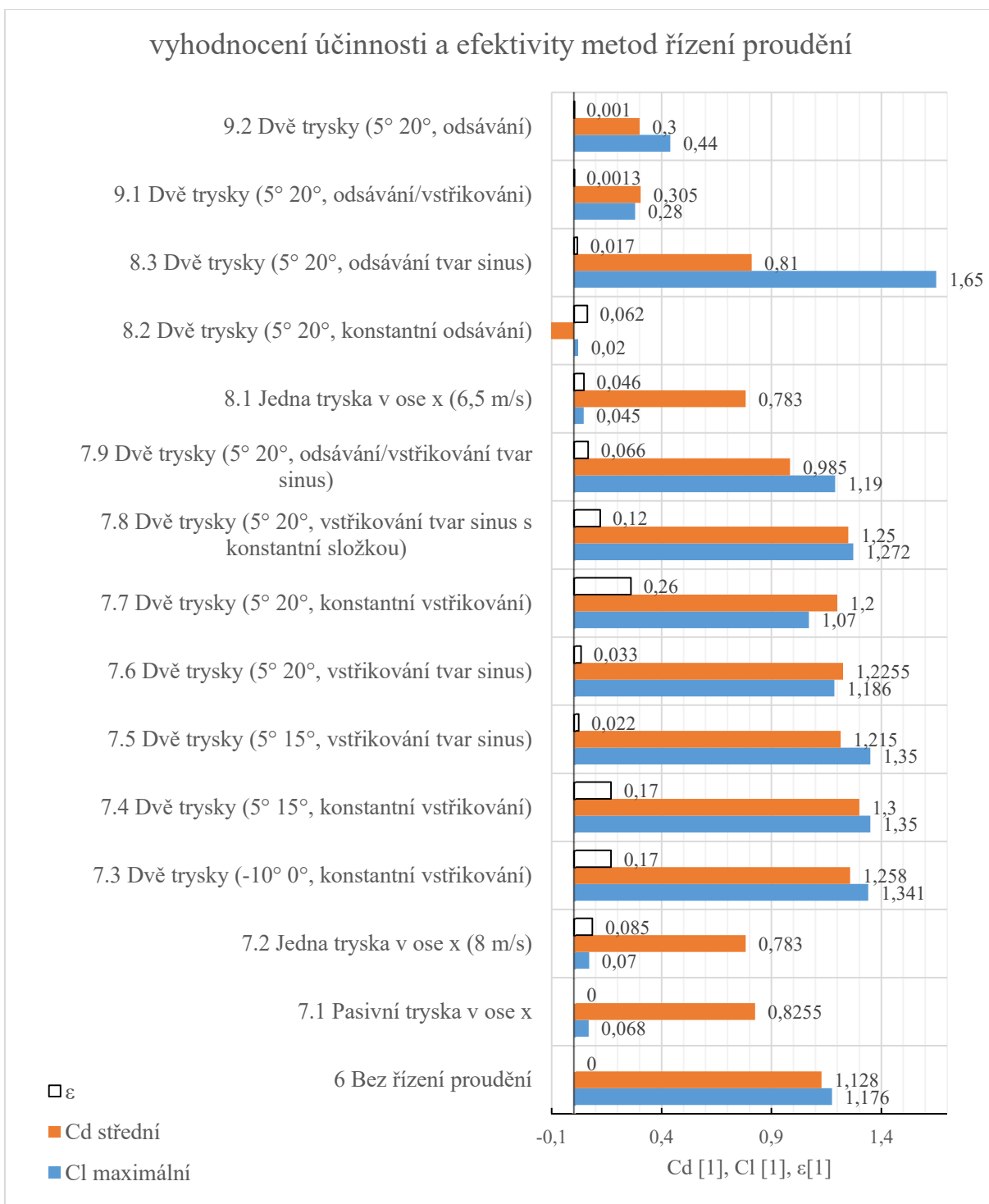
Při použití dvou trysek a tvaru signálu sinus se nepodařilo, v případě řízení bez zpětné vazby, dosáhnout uspokojivého výsledku řízení proudění. Problém při řízení s proměnlivou rychlostí je zřejmě v synchronizaci vstřikování s odtrháváním vírů. Po prvních pár úspěšných periodách děje se kvůli ovlivňování proudění změny frekvence odtrhávání vírů nebo se jen rozladí vstřikování a odtrhávání. Následuje vždy navázání odtrhávání vírů na signál vstřikování. Víry jsou nadále zesilovány vstřikováním a C_l a C_d jsou ve výsledku vyšší (tedy horší) než ve výchozím případě. V důsledku toho bylo přistoupeno k testování metody řízení proudění se zpětnou vazbou.

V důsledku chyby v nastavení zpětné vazby, způsobené nekonzistentním značením ploch v programu AnsysFluent, byla testována nezamýšlená, ale ve výsledku velmi dobře fungující varianta nastavení trysek. Tohle nastavení bylo ověřeno v novém samostatném výpočtu a jeho funkčnost byla potvrzena. Jedná se o konstantní odsávání tekutiny dvěma tryskami ve směru y . Tato metoda absolutně potlačila střídavé působení od vztlakových sil a také eliminovala tlakový odpor. Tekutina je odsávána konstantně po celou dobu řízení a v zájmu energetické úspory bylo dále hledáno řešení s menší energetickou náročností.

Bylo provedeno řízení proudění, tentokrát již s funkční zpětnou vazbou. Zamýšleno bylo pouze odsávání, ale pro opomenutí podmínky pro omezení záporných hodnot se do řízení dostalo nakonec i vstřikování. Řízení s kombinovaným vstřikováním a odsáváním bylo velmi úspěšné, a navíc energeticky velmi úsporné. Řízení s pouhým odsáváním následně také úspěšně snížilo silové působení na válec, ale ne už tak dobře, jako varianta se vstřikováním a odsáváním.

Výchozím kritériem pro výběr metody řízení bude většinou kompromis mezi náklady a účinností. Pro aplikace s požadavkem na nízké pořizovací a provozní náklady bude většinou nejvhodnější některá z pasivních metod, u nich jsou pouze náklady na zařízení, samotná funkce řízení nepotřebuje žádnou energii. V případě využití aktivních metod bude část nákladů tvořena náklady na zařízení, druhou složkou budou náklady na provoz – náklady na dodanou energii. Tuto část nákladů je možné minimalizovat vhodným nastavením řízení. Na druhou stranu velkou výhodou pro aktivní metody je jejich adaptabilita pro více pracovních vztahů, zatímco pasivní metody fungují dobře jen pro jeden pracovní bod.

Dle výsledků této práce budou nejméně energeticky náročné metody se zpětnou vazbou. Jejich účinnosti jsou velmi dobré a jedinou nevýhodou je nejkomplikovanější mechanismus řízení ze všech testovaných metod. Energeticky náročnější, avšak také velmi úspěšná je metoda bez zpětné vazby – konstantní odsávání dvěma tryskami. Ostatní metody bez zpětné vazby nebyly dostatečně vyladěné a jejich účinnost byla výrazně menší než u výše zmíněných.



obr. Graf vyhodnocení testovaných metod řízení

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] KUKRLE, Daniel. Metody pro potlačení Kármánových vírů. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/125077>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce doc. Ing. Pavel Rudolf, Ph.D.
- [2] DORETI, Lalith Kumar a L DINESHKUMAR. Control techniques in flow past a cylinder- A Review. IOP Conference Series: Materials Science and Engineering [online]. 2018, 377 [cit. 2022-05-18]. ISSN 1757-8981. Dostupné z: doi:10.1088/1757-899X/377/1/012144
- [3] KOTEK, Milan. Vliv teploty na stabilitu mezní vrstvy [online]. Liberec, 2008 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://dspace.tul.cz/bitstream/handle/15240/2614/mgr_15550.pdf?sequence=1. Diplomová práce. Technická universita v Liberci. Vedoucí práce Ing. Tomáš Vít, Ph.D.
- [4] KOŘÍNEK, Jan. Návrh a analýza syntetické trysky [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://stc.fs.cvut.cz/history/2014/sbornik/papers/pdf/4521.pdf>
- [5] GAO, Donglai, Guanbin CHEN, Wenli CHEN, Yewei HUANG a Hui LI. Active control of circular cylinder flow with windward suction and leeward blowing. Experiments in Fluids [online]. 2019, 60(2) [cit. 2022-05-18]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-018-2676-z
- [6] CHEN, Wen-Li, Dong-Lai GAO, Wen-Yong YUAN, Hui LI a Hui HU. Passive jet control of flow around a circular cylinder. Experiments in Fluids [online]. 2015, 56(11) [cit. 2022-05-18]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-015-2077-5
- [7] SCHULMEISTER, James C., J. M. DAHL, G. D. WEYMOUTH a M. S. TRIANTAFYLLOU. Flow Control with Rotating Cylinders [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://eprints.soton.ac.uk/411422/1/Schulmeister_jfm_2017_preprint.pdf
- [8] LOITSIANSKII, L. G. Schematic of the formation of a separated flow during subsonic flow past a body with curvilinear generatrices. In: Encyclopedia2.thefreedictionary.com [online]. Moscow: The Great Soviet Encyclopedia, 1970 [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://encyclopedia2.thefreedictionary.com/Separation+of+Flow>
- [9] MUDIMELI, Dakalo Happy. Laminar Boundary Layer. In: : Researchgate [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/332963726_Boundary_Layer_Separation_from_a_Circular_Cylinder/figures?lo=1
- [10] JEZOV, Jaas. Schematic of a Kármán vortex street. In: Researchgate [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/283776953_Pressure_Sensitive_Lateral_Line_for_Underwater_Robot/figures?lo=1&utm_source=google&utm_medium=organic
- [11] STRUCTURE & GEOMETRY. In: Vortexbladeless [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: <https://vortexbladeless.com/technology-design/>
- [12] SABINO, D., D. FABRE, J. S. LEONTINI and D. Lo JACONO, 2020. Vortex-induced vibration prediction via an impedance criterion. Journal of Fluid Mechanics [online]. B.m.: Cambridge University Press, vol. 890, p. A4. Retrieved z: doi:10.1017/jfm.2020.104
- [13] KADLEC, Karel. Vírové průtokoměry – princip, vlastnosti a použití [online]. 2014, (10) [cit. 2020-06-25]. Dostupné z: https://automa.cz/Aton/FileRepository/pdf_articles/53030.pdf

- [14] CC BY 3.0. Synthetic jet: a) instantaneous b) time-averaged [online]. In: . [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/310437397_Properties_of_velocity_field_in_the_vicinity_of_synthetic_jet_generator/figures?lo=1
- [15] IVANCO, Thomas Glen. Relation of Strouhal Number and Reynolds Number. In: Researchgate [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/265496181_Development_and_Validation_of_an_Aeroelastic_Ground_Wind_Loads_Analysis_Tool_for_Launch_Vehicles/figures?lo=1
- [16] CC BY 4.0. Streamlines for flow in positive x direction around a cylinder of radius a. In: Researchgate [online]. [cit. 2022-05-18]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/338500143_Sound_from_rotors_in_non-uniform_flow/figures?lo=1
- [17] JANALÍK, J. Obtékání a odpor těles [online]. 2008 [cit. 2020-06-25]. Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava.
- [18] HYUN, K. T. a C. H. CHUN. The wake flow control behind a circular cylinder using ion wind. Experiments in Fluids [online]. 2003, 35(6), 541-552 [cit. 2022-05-19]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-003-0668-z
- [19] ZHANG, Xin, Kwing-So CHOI, Yong HUANG a Hua-xing LI. Flow control over a circular cylinder using virtual moving surface boundary layer control. Experiments in Fluids [online]. 2019, 60(6) [cit. 2022-05-19]. ISSN 0723-4864. Dostupné z: doi:10.1007/s00348-019-2745-y

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
$A(Cl)$	Amplituda Cl	–
$A(Cl_{poč})$	Amplituda Cl na počátku	–
C_1	Konstanta	–
C_2	Konstanta	–
Cl	Koeficient vztlaku	–
Cd	Koeficient tlakového odporu	–
D	Průměr válce	m
$\frac{d}{dt}$	První derivace podle času	–
$E_{k t}$	Kinetická energie tekutiny proudící tryskou	J/kg
$E_{k \infty}$	Kinetická energie tekutiny proudící do domény	J/kg
f	Frekvence	Hz
m_t	Hmotnost tekutiny proudící tryskou	kg
m_{∞}	Hmotnost tekutiny proudící vstupem do domény	kg
p_d	Tlak na spodní kontrolní ploše	Pa
p_o	Průměrný tlak za posledních 100 časových kroků	Pa
p_u	Tlak na horní kontrolní ploše	Pa
Q_t	Průtok tryskou	m^3/s
Q_{∞}	Průtok vstupem do domény	m^3/s
r	Odměna (reward)	–
Re	Reynoldsovo číslo	m^2
S_t	Plocha trysky	m^2
S_{∞}	Plocha vstupu do domény	–
St	Strouhalovo číslo	–
t	Čas	s
v_d	Velikost rychlosti na spodní trysce	m/s
v_u	Velikost rychlosti na horní trysce	m/s
$v_{d x}$	Složka rychlosti na spodní trysce do osy x	m/s
$v_{d y}$	Složka rychlosti na spodní trysce do osy y	m/s
$v_{u x}$	Složka rychlosti na horní trysce do osy x	m/s
$v_{u y}$	Složka rychlosti na horní trysce do osy y	m/s
v_t, v	Rychlost proudění na trysce	m/s
v_{∞}	Rychlost proudění na vstupu do domény	m/s
V_t	Objem tekutiny dodaný tryskou	m^3
V_{∞}	Objem tekutiny dodaný vstupem do domény	m^3
α	Úhel	rad
ε	Poměr kinetických energií	1
ρ	Hustota tekutiny	kg/m^3

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha 1 – Matlab kód – určení bodu odtržení bod odtržení
- Příloha 2 – Matlab kód – zpracování dat Cl a Cd, frekvenční analýza
- Příloha 3 – Kód uživatelsky definované funkce
- Příloha 4 – Dvě trysky (odsávání/vstřikování) – kombinace testovaných koeficientů a pro ně získané odměny
- Příloha 5 – Dvě trysky (odsávání) – kombinace testovaných koeficientů a pro ně získané odměny
- Příloha 6 – Souhrnná tabulka s výsledky Cl, Cd, ε
- Příloha 7 – Kontury velikosti rychlosti
- Příloha 8 – Kontury vířivosti
- Příloha 9 – Vektory rychlosti
- Příloha 10 – Kontury statického tlaku
- Příloha 11 – Animace testovaných metod řízení

PŘÍLOHY

Příloha 1 – Matlab kód – určení bodu odtržení bod odtržení

```
%% 0 FFT bod odtržení mezní vrstvy
clear all; close all; clc;
%% 1 nacteni dat
prvni_soubor=97000;      %upravit ručně
posledni_soubor=130000; %upravit ručně
pocet_souboru=1+(posledni_soubor-prvni_soubor)/100;
ozn=linspace(prvni_soubor,posledni_soubor,pocet_souboru);
%% 2 ručně nalézt první bod odtržení na obou stranách válečku
A=readtable(['wss-182200 - kopie - kopie']);
B=readtable(['wss-182200 - kopie - kopie (2)']);
A=A{:,:};
B=B{:,:};

x1=A(:,1);
y1=A(:,2);
x2=B(:,1);
y2=B(:,2);

plot(x1,y1)
hold on
plot(x2,y2)
grid on
title('smykové napětí na stěně');
xlabel('souřadnice na ose x [m]');
ylabel('smykové napětí na stěně [*10?? Pa]');
legend('horní plocha válce','dolní plocha válce');
%% 3 ručně zadat první bod odtržení na obou stranách válečku
BOhorni=115;      %ručně zadat
BOfolni=263;     %ručně zadat
%% 4 horní část válce
bod_odtrzeni_horni=zeros(pocet_souboru,2) %(pozice X,hodnota wss)
for i=1:pocet_souboru
A=readtable(['wss-' num2str(ozn(i)) '.']);
A=A{1:189,:};
B=transpose(A);

u=(BOhorni-10)
v=(BOhorni+10)
C=B(:,u:v)

[M,I]=min(C,[],2,'linear')

index=I(2)/2

BOhorni=u+index-1
bod_odtrzeni_horni(i,:)=transpose(C(:,index))
end
%% 5 dolní část válce
bod_odtrzeni_dolni=zeros(pocet_souboru,2) %(pozice X,hodnota wss)
BOfolni=BOfolni-189
for i=1:pocet_souboru
A=readtable(['wss-' num2str(ozn(i)) '.']);
A=A{190:362,:};
B=transpose(A);
```

```
u=(BOdolni-10)
v=(BOdolni+10)
C=B(:,u:v)

[M,I]=min(C,[],2,'linear')

index=I(2)/2

BOdolni=u+index-1
bod_odtrzeni_dolni(i,:)=transpose(C(:,index))
end
%% přepočet na úhel
min_uhel_horni=asin(min(bod_odtrzeni_horni(:,1))/0.039)*180/pi()
max_uhel_horni=asin(max(bod_odtrzeni_horni(:,1))/0.039)*180/pi()
min_uhel_dolni=asin(min(bod_odtrzeni_dolni(:,1))/0.039)*180/pi()
max_uhel_dolni=asin(max(bod_odtrzeni_dolni(:,1))/0.039)*180/pi()
```

Příloha 2 – Matlab kód – zpracování dat C_l a C_d , frekvenční analýza

```
clear all; clc;
%FFT lift
c=importdata('lift_coef_prepared-rfile_2_77777_FLU-0-2.txt',' ',4);
A1=c.data(:,2);
A2=c.data(:,3);
%%
%FFT drag
c=importdata('drag_coef_prepared-rfile_2_77777_FLU-0-2.txt',' ',4);
B1=c.data(:,2);
B2=c.data(:,3);
%%
u=4000; %výběr vyhodnocených dat

lift=zeros(u,2);
t=zeros(u,2);
v=zeros(2,1);

v(1,1)=length(A1);
v(2,1)=length(B1);

lift(:,1)=A1(v(1)-u+1:v(1));
lift(:,2)=B1(v(2)-u+1:v(2));

t(:,1)=A2(v(1)-u+1:v(1));
t(:,2)=B2(v(2)-u+1:v(2));

for j=1:2
    lift1=lift(:,j);
    t1=t(:,j);

    delta_t=t(2)-t(1);
    pocet_vzorku=length(t1);

    fs=1/delta_t;
    T_zaznamu=length(t1)*delta_t;

    fft_p1=(2/pocet_vzorku)*fft(lift1);
    fft_p1(1)=fft_p1(1)/2;

    pocet_frekvenci=round(pocet_vzorku/2-0.1)+1;

    for i=1:pocet_frekvenci
        Frekvence(i)=(i-1)/T_zaznamu;
    end

    Amplituda=abs(fft_p1(1:pocet_frekvenci));
    Faze=angle(fft_p1(1:pocet_frekvenci));

    subplot(2,2,1); plot(t(:,1),lift(:,1),'b');
    hold on
    %plot(t1,lift1,'r');
    xlabel('Čas [s]');
    ylabel('Cl [1]');
    %axis([0 1.5 -0.5 0.6]);
    grid on
```

```
subplot(2,2,2); plot(t(:,2),lift(:,2),'b');
hold on
%plot(t1,lift1,'r');
xlabel('Čas [s]');
ylabel('Cd [1]');
%axis([0 1.5 0.7 1]);
grid on
subplot(2,2,j+2); plot(Frekvence,Amplituda,'k');
hold on
xlabel('Frekvence [Hz]');
ylabel('Amplituda [1]');
axis([0 150 0 6]);
grid on
j
maximalni_amplituda=max(lift1)
[M,I]=max(Amplituda);
frekvence_kmitani=Frekvence(I)
end
```

Příloha 3 – Kód uživatelsky definované funkce

```
*****
UDF_unsteady_velocity.c
UDF for specifying a transient velocity profile boundary condition
vstriknutí 1/8 periody pred odtrzenim
*****/

#include "udf.h"

DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity_up_sin, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = 4.0-4.0*cos(2*M_PI*25*(t-1.52));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}

DEFINE_PROFILE(unsteady_velocity_down_cos, thread, position)
{
    face_t f;
    real t = CURRENT_TIME;

    begin_f_loop(f, thread)
    {
        F_PROFILE(f, thread, position) = 4.0+4.0*cos(2*M_PI*25*(t-1.52));
    }
    end_f_loop(f, thread)
}
```

Příloha 4 – Dvě trysky (odsávání/vstříkávání)

Kombinace testovaných koeficientů a pro ně získané odměny (zvýrazněné hodnoty použité pro výsledné řízení se zpětnou vazbou)

C_1	C_2	α	odměna	C_1	C_2	α	odměna
-0,0333	-0,0003	1,0472	0,8046	0,1000	0,0010	0,0000	-0,0803
0,0333	-0,0010	0,5236	0,6703	0,1000	-0,0010	1,5708	-0,0988
-0,0333	-0,0003	1,5708	0,6471	0,1000	0,0010	1,5708	-0,1017
-0,1000	-0,0003	0,5236	0,6456	-0,1000	0,0010	1,5708	-0,1339
-0,0333	-0,0010	0,5236	0,6454	-0,0333	0,0010	0,5236	-0,1350
-0,1000	-0,0010	0,5236	0,5444	-0,1000	-0,0003	1,0472	-0,1446
0,0333	-0,0010	1,0472	0,5024	0,0333	0,0003	0,0000	-0,1482
0,1000	-0,0010	0,0000	0,4442	-0,0333	-0,0003	0,0000	-0,1665
0,1000	-0,0003	0,0000	0,3631	-0,1000	0,0010	0,5236	-0,1765
0,0333	-0,0010	1,5708	0,3524	-0,1000	-0,0003	0,0000	-0,1868
0,1000	0,0003	1,0472	0,3392	0,1000	-0,0003	1,5708	-0,1976
0,1000	0,0003	0,5236	0,3382	0,0333	0,0003	0,5236	-0,2618
0,1000	0,0010	1,0472	0,3299	-0,0333	0,0003	1,0472	-0,3182
-0,1000	-0,0010	0,0000	0,3257	-0,0333	-0,0010	1,5708	-0,3284
0,0333	-0,0003	1,5708	0,3221	-0,1000	0,0003	1,0472	-0,3796
0,0333	-0,0010	0,0000	0,3121	-0,1000	-0,0010	1,5708	-0,3808
0,1000	-0,0010	0,5236	0,3043	0,0333	0,0010	0,0000	-0,4357
-0,0333	-0,0010	0,0000	0,2993	-0,0333	0,0010	0,0000	-0,4389
0,1000	-0,0003	0,5236	0,2879	-0,0333	0,0003	0,0000	-0,4437
0,1000	-0,0010	1,0472	0,2338	-0,1000	0,0003	0,5236	-0,4442
0,0333	-0,0003	0,5236	0,2243	-0,0333	0,0003	0,5236	-0,4485
-0,0333	-0,0003	0,5236	0,1921	-0,1000	0,0010	0,0000	-0,5166
0,0333	-0,0003	1,0472	0,1844	-0,1000	0,0003	0,0000	-0,5739
0,1000	0,0003	0,0000	0,1587	-0,0333	0,0003	1,5708	-0,8285
-0,1000	0,0003	1,5708	0,1577	0,0333	0,0003	1,0472	-0,9182
0,0333	-0,0003	0,0000	0,1509	-0,1000	-0,0003	1,5708	-0,9286
-0,1000	-0,0010	1,0472	0,0660	-0,1000	0,0010	1,0472	-1,3092
0,0333	0,0003	1,5708	0,0644	0,0333	0,0010	0,5236	-1,5661
0,1000	0,0010	0,5236	0,0596	-0,0333	0,0010	1,0472	-1,8211
0,1000	-0,0003	1,0472	0,0503	-0,0333	0,0010	1,5708	-2,1533
-0,0333	-0,0010	1,0472	0,0418	0,0333	0,0010	1,0472	-2,3955
0,1000	0,0003	1,5708	-0,0607	0,0333	0,0010	1,5708	-2,8478

Příloha 5 – Dvě trysky (odsávání)

Kombinace testovaných koeficientů a pro ně získané odměny (zvýrazněné hodnoty použité pro výsledné řízení se zpětnou vazbou)

C_1	C_2	α	odměna
0,1000	0,0003	1,0472	0,8138
0,1000	0,0003	1,5708	0,7527
-0,1000	-0,0010	1,5708	0,7120
0,1000	-0,0003	1,0472	0,6976
0,1000	-0,0003	0,5236	0,6864
0,1000	0,0010	1,0472	0,6827
0,0333	-0,0010	1,5708	0,6601
0,0333	-0,0010	1,0472	0,6327
-0,1000	-0,0010	1,0472	0,6234
0,1000	0,0003	0,5236	0,6055
0,1000	-0,0003	1,5708	0,5816
0,1000	-0,0010	1,0472	0,5753
0,0333	-0,0010	0,5236	0,4994
-0,0333	-0,0010	1,5708	0,4913
-0,0333	-0,0010	1,0472	0,4285
0,1000	-0,0010	1,5708	0,4264
0,1000	0,0010	0,5236	0,3778
0,0333	-0,0003	1,5708	0,3763
-0,0333	-0,0010	0,5236	0,3712
-0,1000	-0,0010	0,5236	0,3595
0,1000	-0,0010	0,5236	0,3529
-0,0333	-0,0003	1,5708	0,3466
0,1000	-0,0003	0,0000	0,3324
0,0333	-0,0003	1,0472	0,3226
0,0333	-0,0003	0,5236	0,3070
0,1000	0,0003	0,0000	0,3055
0,1000	-0,0010	0,0000	0,2973
0,1000	0,0010	0,0000	0,2905
-0,0333	-0,0010	0,0000	0,2852
0,0333	0,0003	1,5708	0,2759
-0,0333	-0,0003	1,0472	0,2698
-0,1000	-0,0003	1,0472	0,2644

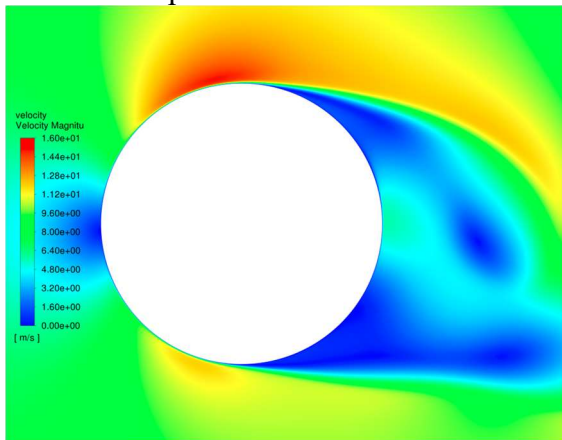
C_1	C_2	α	odměna
0,0333	-0,0010	0,0000	0,2523
0,0333	0,0003	1,0472	0,2252
-0,0333	-0,0003	0,5236	0,2223
0,0333	-0,0003	0,0000	0,1927
-0,1000	-0,0003	1,5708	0,1596
-0,1000	-0,0010	0,0000	0,0959
0,0333	0,0003	0,0000	0,0501
-0,0333	-0,0003	0,0000	0,0496
0,1000	0,0010	1,5708	0,0490
-0,1000	-0,0003	0,5236	0,0121
-0,1000	-0,0003	0,0000	-0,0244
-0,0333	0,0003	0,0000	-0,0982
-0,0333	0,0003	1,0472	-0,2960
0,0333	0,0003	0,5236	-0,3026
-0,0333	0,0003	1,5708	-0,3306
-0,1000	0,0003	0,0000	-0,4290
0,0333	0,0010	0,0000	-0,4421
-0,0333	0,0003	0,5236	-0,4641
-0,1000	0,0010	0,0000	-0,5307
-0,1000	0,0010	0,5236	-0,5504
-0,1000	0,0010	1,5708	-0,5598
-0,1000	0,0003	1,5708	-0,6113
-0,1000	0,0003	0,5236	-0,6380
-0,1000	0,0003	1,0472	-0,6393
-0,1000	0,0010	1,0472	-0,6835
-0,0333	0,0010	1,5708	-0,7495
-0,0333	0,0010	0,0000	-0,7602
-0,0333	0,0010	1,0472	-0,7889
-0,0333	0,0010	0,5236	-0,8588
0,0333	0,0010	0,5236	-0,9554
0,0333	0,0010	1,5708	-1,0930
0,0333	0,0010	1,0472	-1,1718

Příloha 6 – Souhrnná tabulka s výsledky C_l , C_d , ε

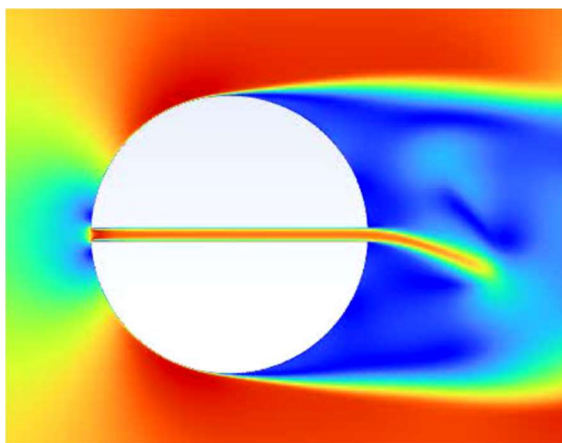
metoda	C_l maximální	C_l minimální	C_d maximální	C_d minimální	ε
6 Bez řízení proudění	1.176	-1.176	1.212	1.044	0
7.1 Pasivní tryska v ose x	0.068	-0.068	0.834	0.817	0
7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)	0.07	-0.07	0.788	0.778	0.085
7.3 Dvě trysky (-10° 0° , konstantní vstříkování)	1.341	-1.341	1.394	1.122	0.17
7.4 Dvě trysky (5° 15° , konstantní vstříkování)	1.35	-1.35	1.429	0.664	0.17
7.5 Dvě trysky (5° 15° , vstříkování tvar sinus)	1.33	-1.33	1.32	1.11	0.022
7.6 Dvě trysky (5° 20° , vstříkování tvar sinus)	1.186	-1.186	1.367	1.084	0.033
7.7 Dvě trysky (5° 20° , konstantní vstříkování)	1.07	-1.07	1.393	0.555	0.26
7.8 Dvě trysky (5° 20° , vstříkování tvar sinus s konstantní složkou)	1.272	-1.272	1.511	0.592	0.12
7.9 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstříkování tvar sinus)	1.19	-1.19	1.18	0.79	0.066
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)	0.045	-0.045	0.788	0.778	0.046
8.2 Dvě trysky (5° 20° , konstantní odsávání)	0.02	-0.02	-0.126	-0.126	0.062
8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)	1.65	-1.65	0.99	0.63	0.017
9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstříkování)	0.28	-0.28	0.33	0.28	0.0013
9.2 Dvě trysky (5° 20° , odsávání)	0.44	-0.56	0.5	0.1	0.001

Příloha 7 – Kontury velikosti rychlosti

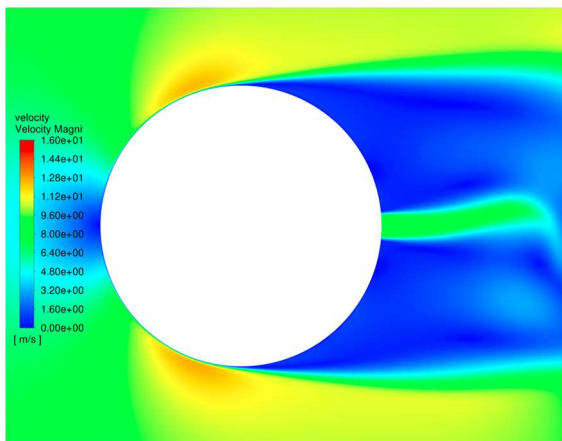
6 Bez řízení proudění



7.1 Pasivní tryska v ose x

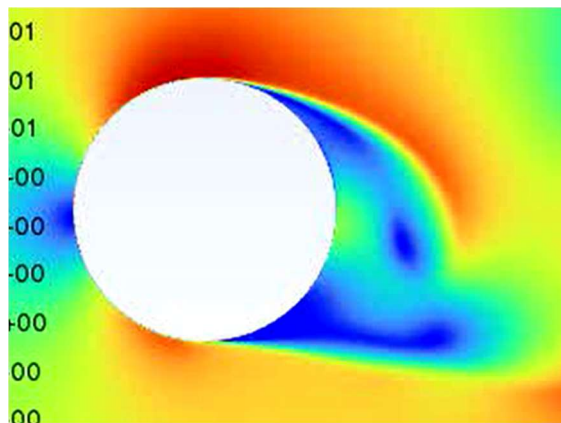


7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)

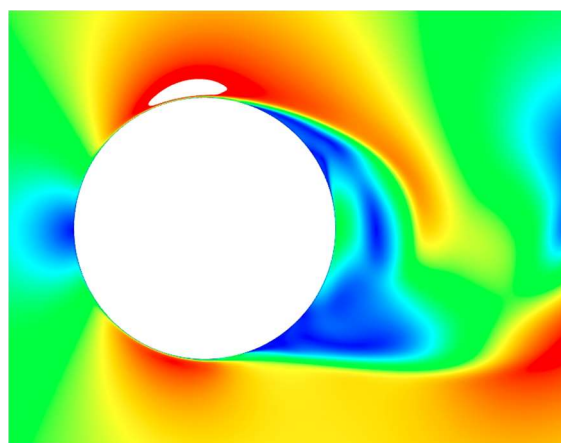


7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)

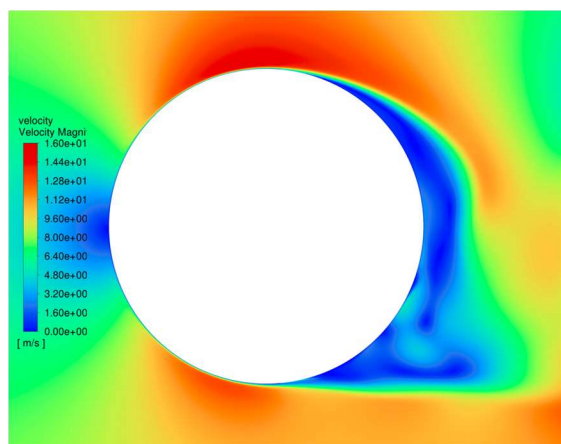
7.3 Dvě trysky (-10° 0°, konstantní vstřikování)



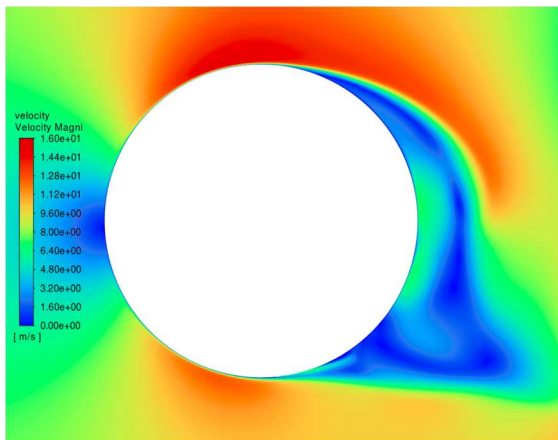
7.4 Dvě trysky (5° 15°, konstantní vstřikování)



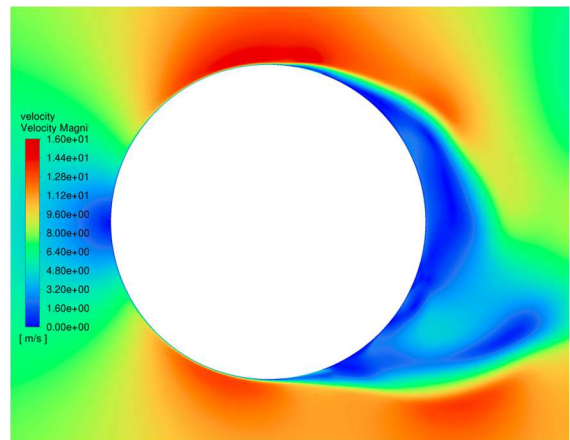
7.5 Dvě trysky (5° 15°, vstřikování tvar sinus)



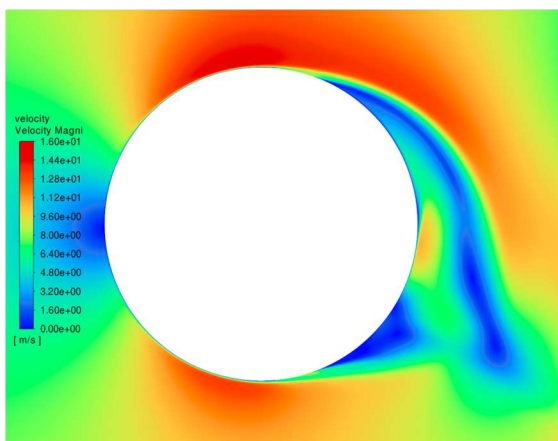
7.6 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus)



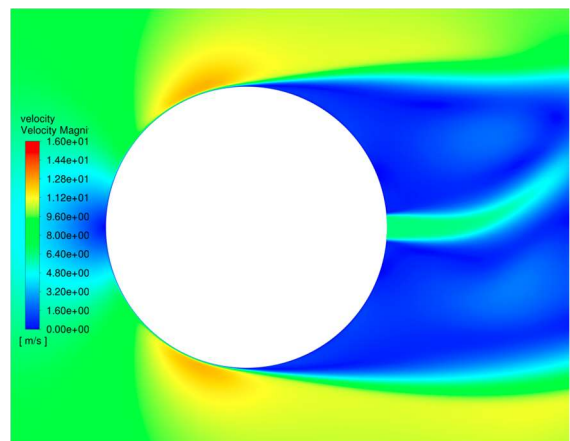
7.9 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování tvar sinus)



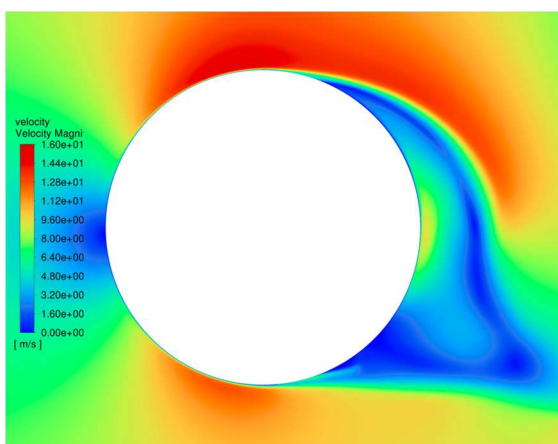
7.7 Dvě trysky (5° 20° , konstantní vstřikování)



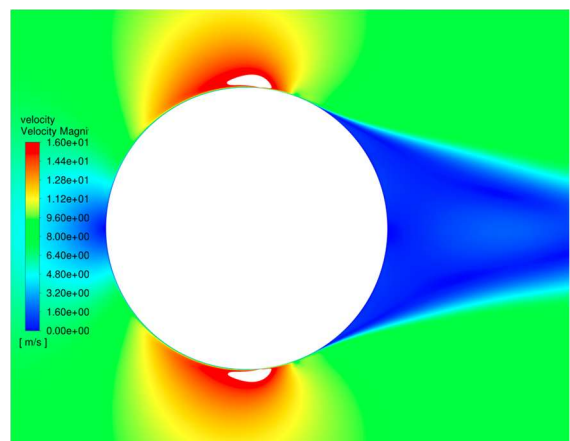
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)



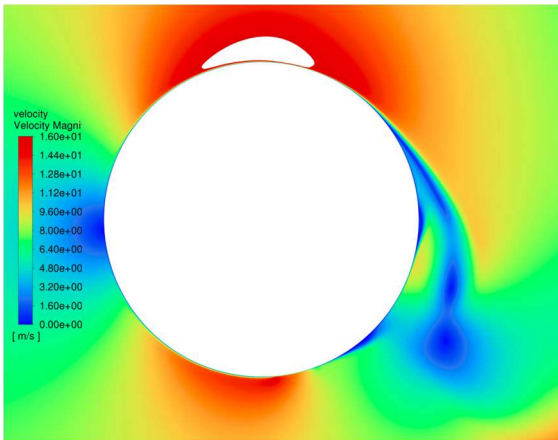
7.8 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus s konstantní složkou)



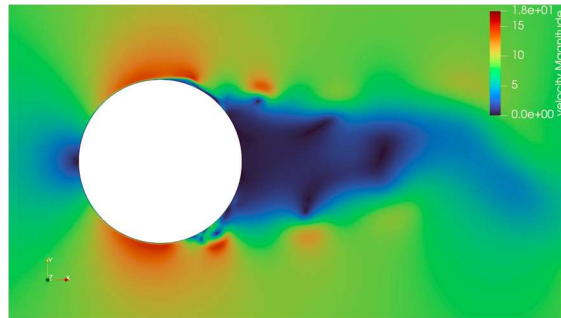
8.2 Dvě trysky (5° 20° , konstantní odsávání)



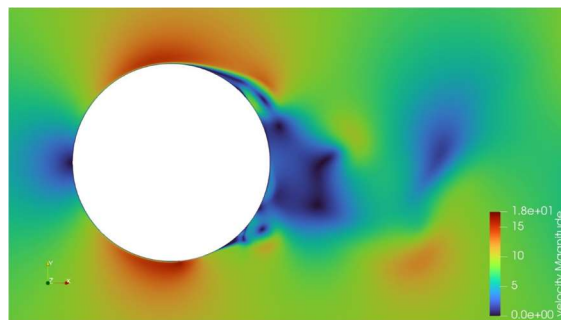
8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)



9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování)

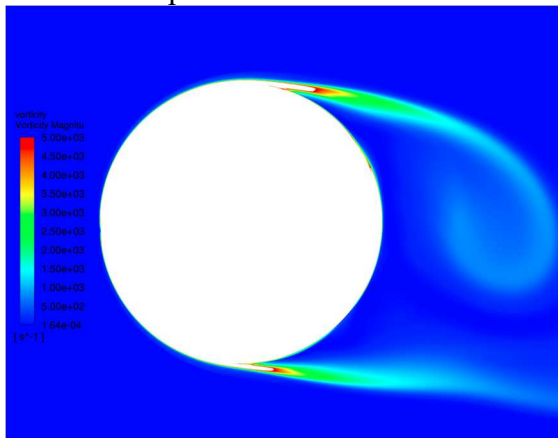


9.2 Dvě trysky (5° 20° , odsávání)

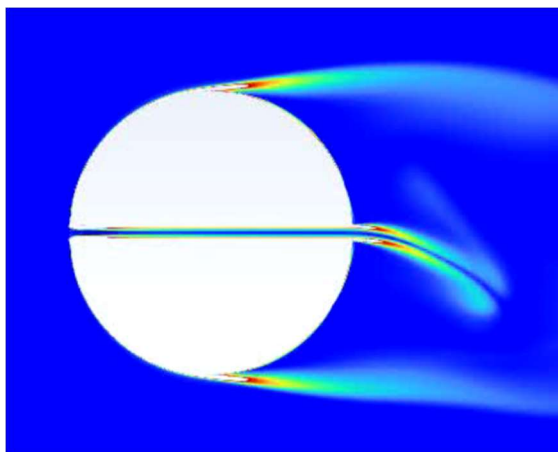


Příloha 8 – Kontury vířivosti

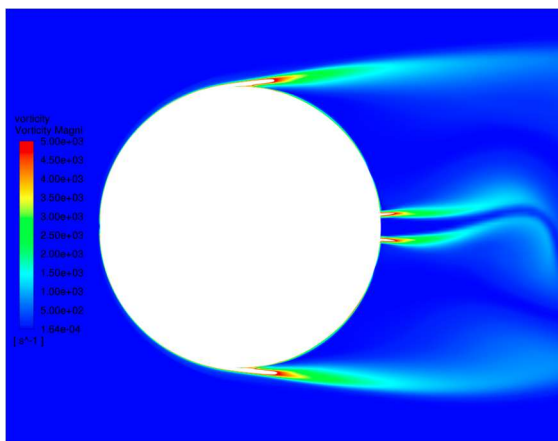
6 Bez řízení proudění



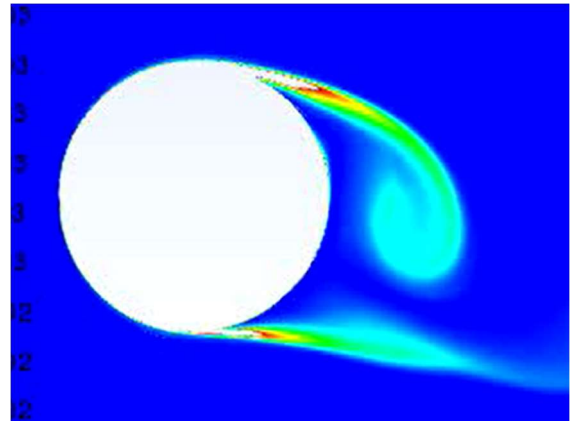
7.1 Pasivní tryska v ose x



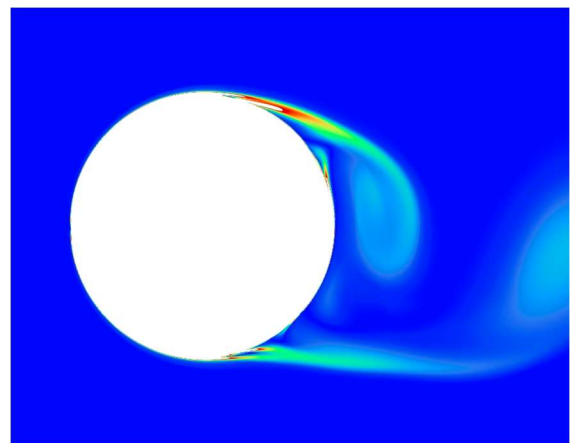
7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)



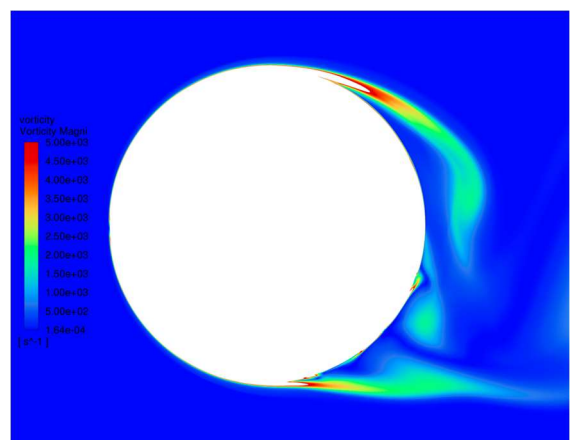
7.3 Dvě trysky (-10° 0° , konstantní vstřikování)



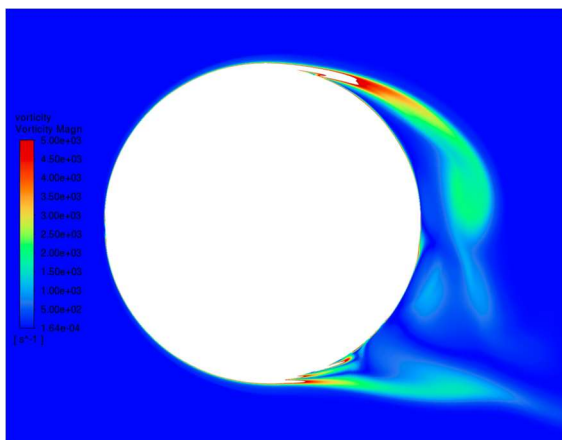
7.4 Dvě trysky (5° 15° , konstantní vstřikování)



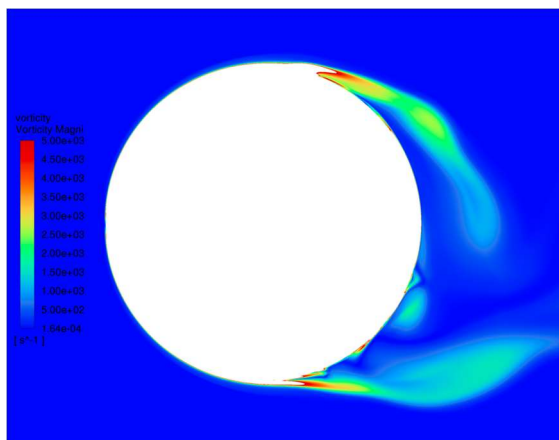
7.5 Dvě trysky (5° 15° , vstřikování tvar sinus)



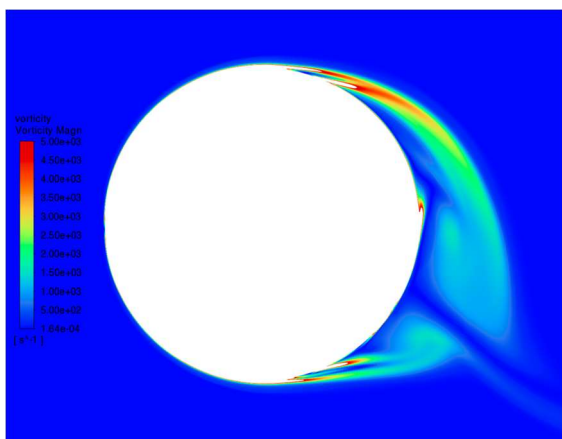
7.6 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus)



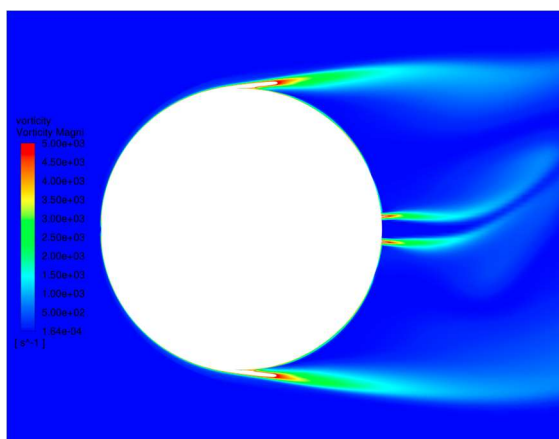
7.9 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování tvar sinus)



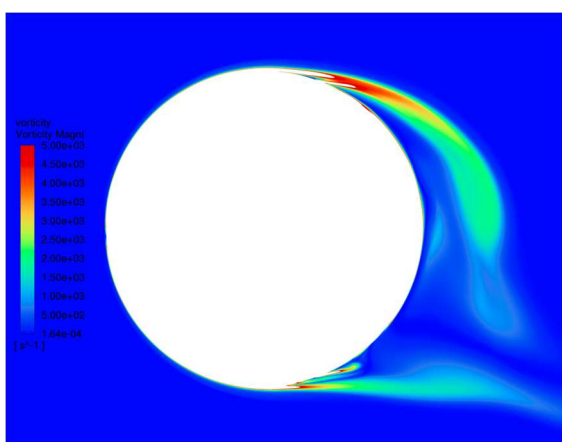
7.7 Dvě trysky (5° 20° , konstantní vstřikování)



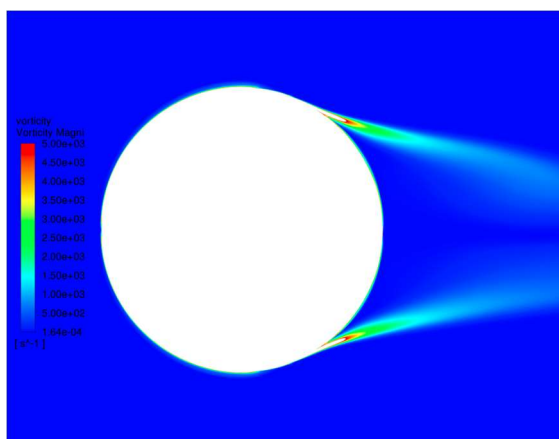
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)



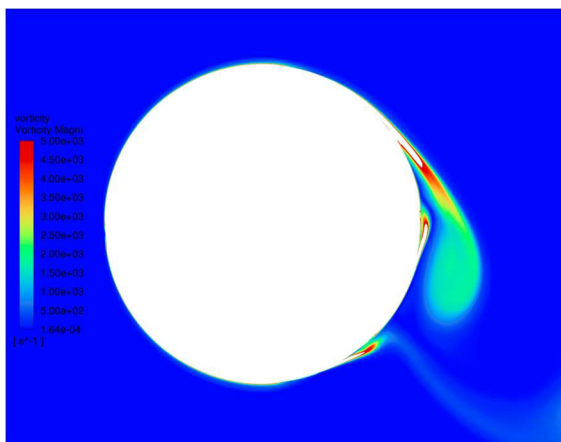
7.8 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus s konstantní složkou)



8.2 Dvě trysky (5° 20° , konstantní odsávání)



8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)

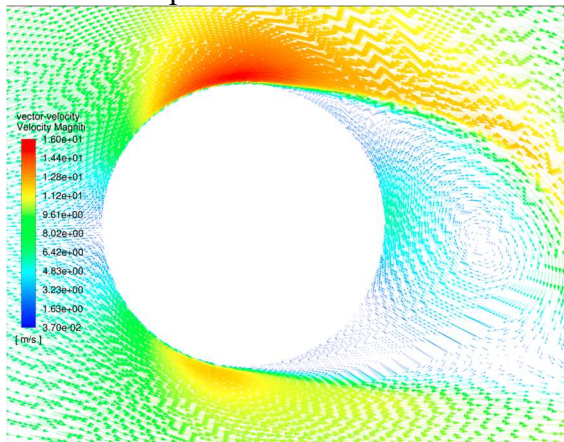


9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování)

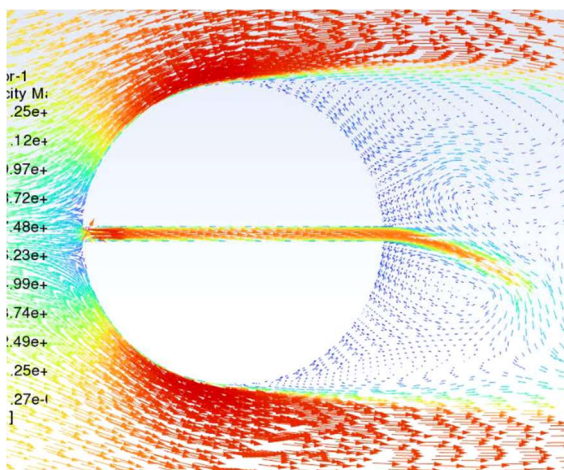
9.2 Dvě trysky (5° 20° , odsávání)

Příloha 9 – Vektory rychlosti

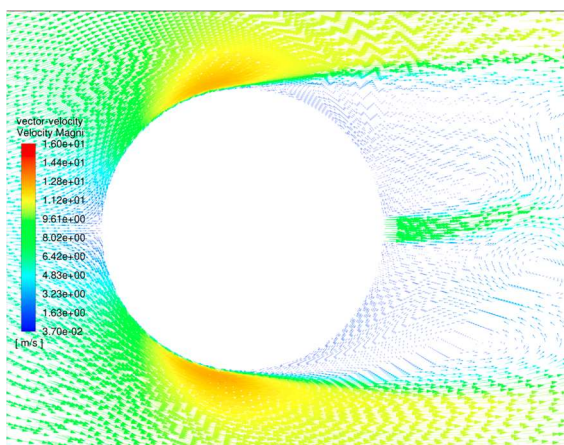
6 Bez řízení proudění



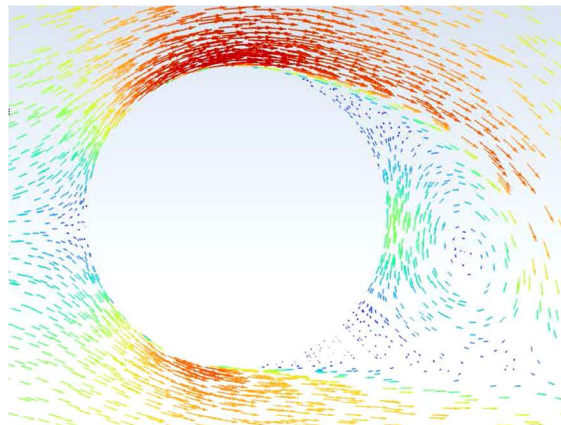
7.1 Pasivní tryska v ose x



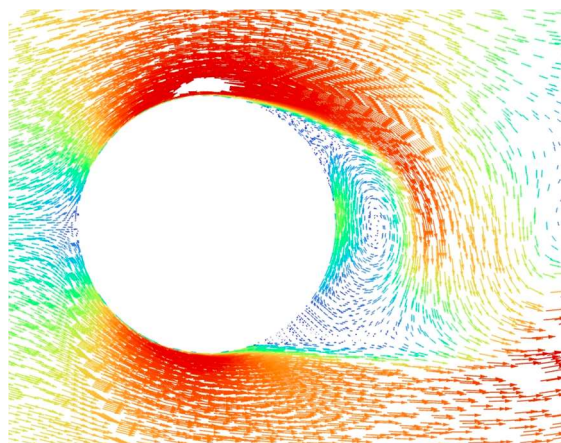
7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)



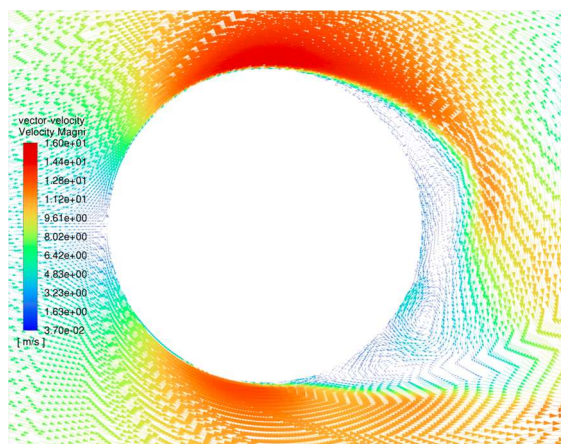
7.3 Dvě trysky (-10° 0° , konstantní vstřikování)



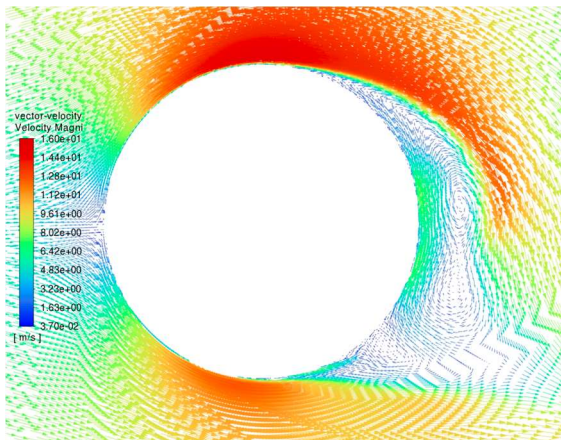
7.4 Dvě trysky (5° 15° , konstantní vstřikování)



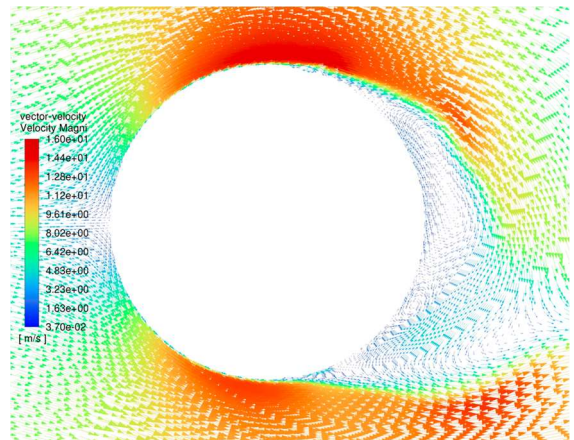
7.5 Dvě trysky (5° 15° , vstřikování tvar sinus)



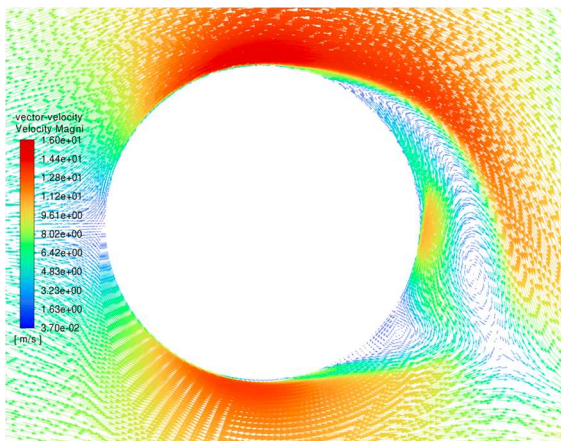
7.6 Dvě trysky (5° 20° , vstříkování tvar sinus)



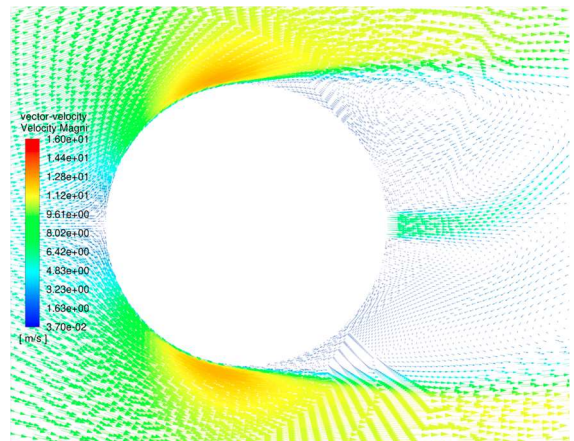
7.9 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstříkování tvar sinus)



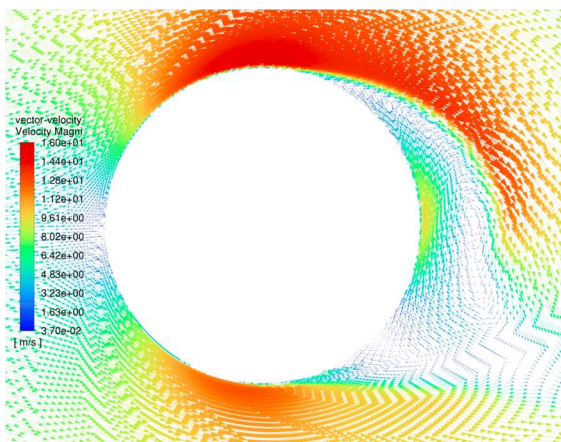
7.7 Dvě trysky (5° 20° , konstantní vstříkování)



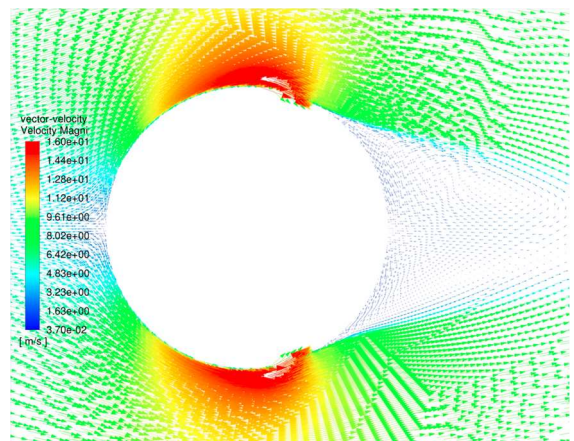
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)



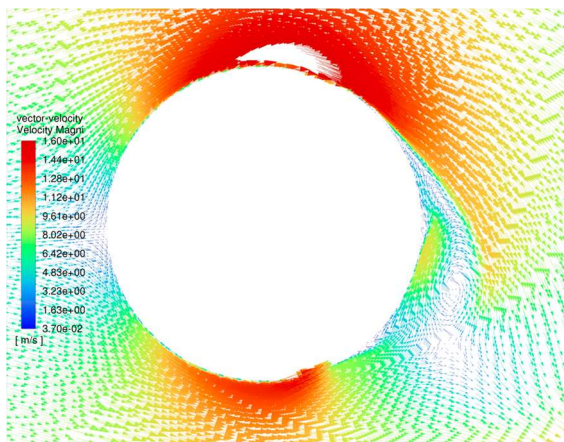
7.8 Dvě trysky (5° 20° , vstříkování tvar sinus s konstantní složkou)



8.2 Dvě trysky (5° 20° , konstantní odsávání)



8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)

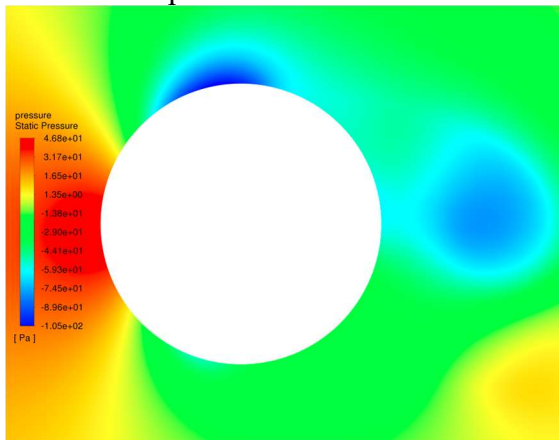


9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování)

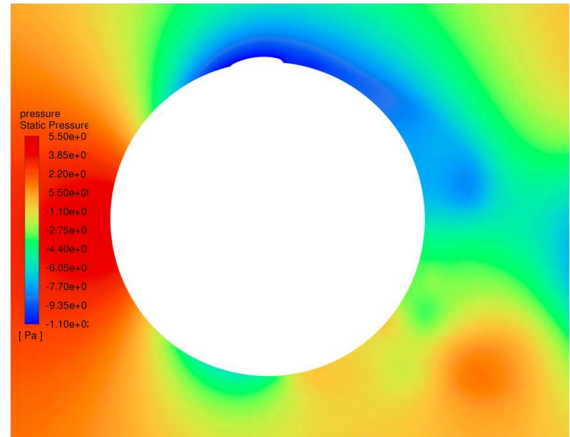
9.2 Dvě trysky (5° 20° , odsávání)

Příloha 10 – Kontury statického tlaku

6 Bez řízení proudění

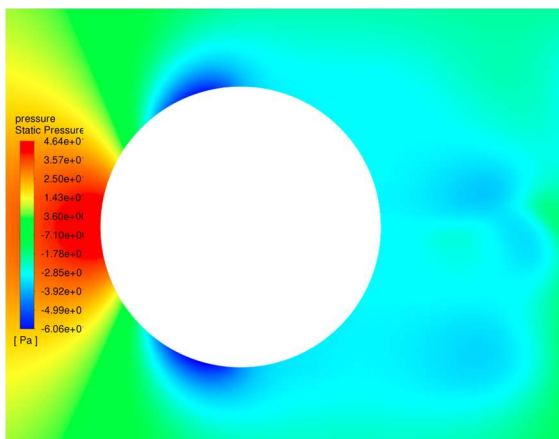


7.5 Dvě trysky (5° 15°, vstřikování tvar sinus)

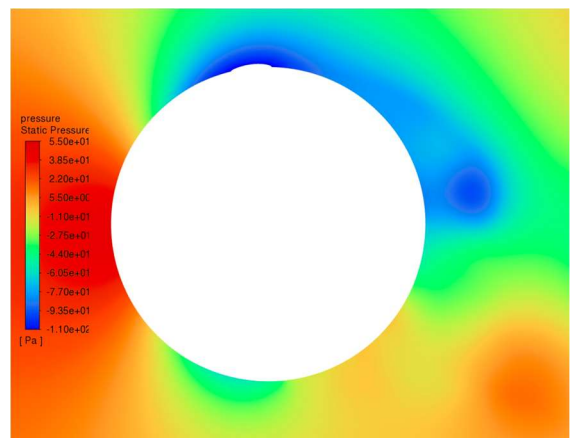


7.1 Pasivní tryska v ose x

7.2 Jedna tryska v ose x (8 m/s)



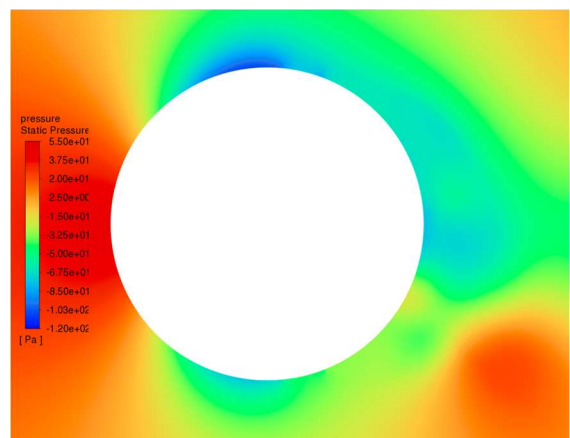
7.6 Dvě trysky (5° 20°, vstřikování tvar sinus)



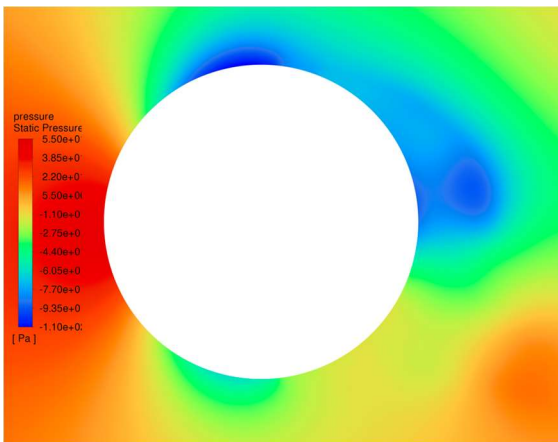
7.3 Dvě trysky (-10° 0°, konstantní vstřikování)

7.4 Dvě trysky (5° 15°, konstantní vstřikování)

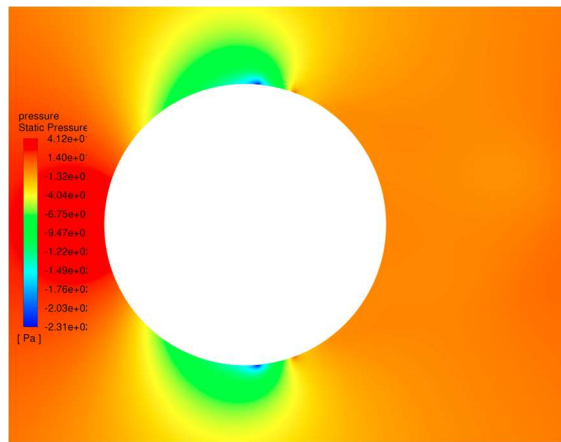
7.7 Dvě trysky (5° 20°, konstantní vstřikování)



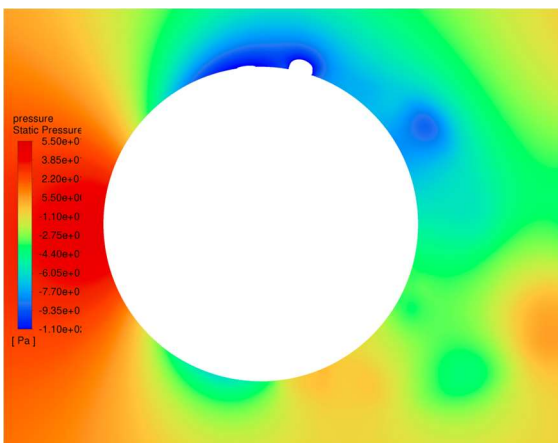
7.8 Dvě trysky (5° 20° , vstřikování tvar sinus s konstantní složkou)



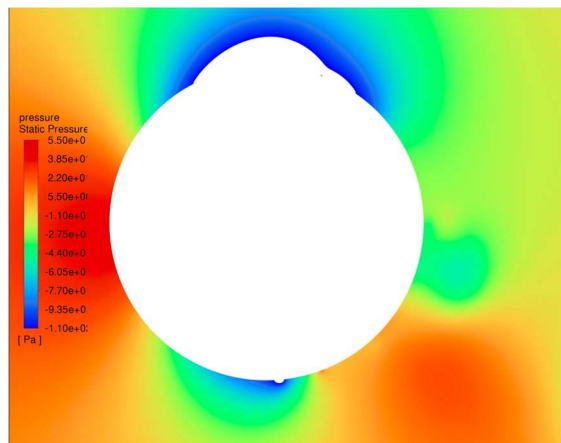
8.2 Dvě trysky (5° 20° , konstantní odsávání)



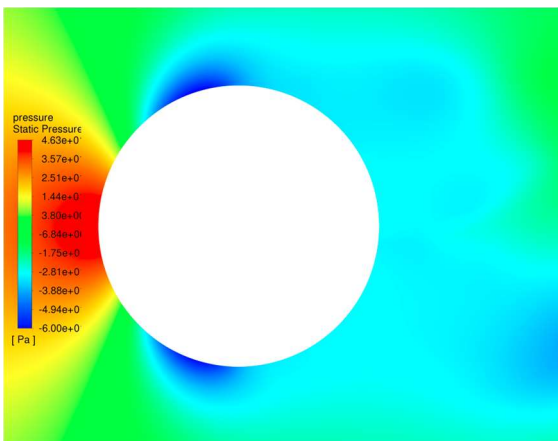
7.9 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování tvar sinus)



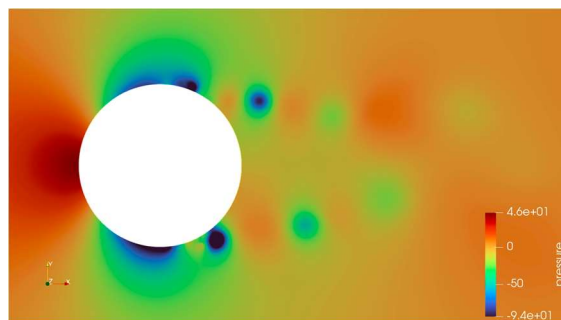
8.3 Dvě trysky (5° 20° , odsávání tvar sinus)



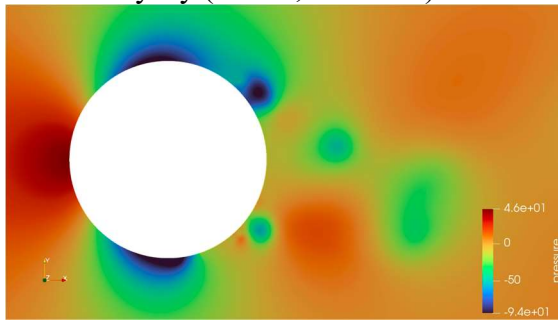
8.1 Jedna tryska v ose x (6.5 m/s)



9.1 Dvě trysky (5° 20° , odsávání/vstřikování)



9.2 Dvě trysky (5° 20°, odsávání)



Příloha 11 – Animace testovaných metod řízení

2022_DP_Kukrle_Daniel_200273.rar – soubor přiložený na DVD disku
soubor takéž dostupný na odkazu:

<https://drive.google.com/drive/folders/1IJYKmzuPedlVjeBKJsoAsXoMWTwJL7-1?usp=sharing>