



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

VLIV VÝROBNÍCH NEPŘESNOSTÍ NA VZNIK PŘÍDAVNÝCH MOMENTŮ NA KORMIDLE JACHTY

MANUFACTURING INACCURACIES INFLUENCE ON AN APPEARANCE OF THE ADDITIONAL MOMENT
ON A SAILBOAT RUDDER

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Adam Kazda

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.

BRNO 2016

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Adam Kazda**
Studijní program: Strojní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D.**
Akademický rok: 2015/16

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:

Vliv výrobních nepřesností na vznik přídatných momentů na kormidle jachty

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Toto zadání je inspirované skutečným problémem, který se projevil na jachtě. Při přímé plavbě na motor se na kormidelním kole objevil přídatný moment významné velikosti. Tento jev se neprojevoval pokud jachta plula pouze pod plachtami. Z toho je parné, že problém je ovlivněn proudem kapaliny, který je vyvolaný lodním šroubem.

Cíle diplomové práce:

Cílem této práce je specifikovat všechny vlivy, které mohou vyvolat přídatný moment na kormidle jachty. Dále ověřit jejich význam na základě numerického modelování proudění. Navrhnout případná řešení daného problému.

Seznam literatury:

MUNSON, B., R., YOUNG, D., F., OKIISHI, T., H., Fundamentals of Fluid Mechanics

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2015/16

V Brně, dne

L. S.

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

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
děkan fakulty

Abstrakt

Tato diplomová práce je věnována vzniku přídatných momentů na kormidle, které mohou být způsobeny nepřesnou výrobou. Inspirací je konkrétní problém z roku 2013, který je v práci řešen pomocí výpočtového modelování proudění. Jsou stanoveny 3 různé nepřesnosti, které mohou vést ke vzniku přídatných momentů: odsazení kormidla, natočení lodního šroubu a nesymetrie kormidla. Ty jsou nejprve pozorovány na zjednodušeném 2D modelu. Následně je podrobněji vyšetřena nesymetrie kormidla pro 3D.

Klíčová slova

vztlaková síla, odporová síla, jachta, kormidlo, CFD modelování

Abstract

This Master's thesis is dedicated to a generation of an additional torque, which can occur due to the inaccuracy of the manufacturing. This issue is inspired by a real case from 2013. In this work CFD modeling is used to investigate three different sources of the additional torque: misalignment of the rudder, deviation of the propeller shaft and asymmetry of the rudder. A simplified 2D simulation is done for all three cases. This simulation is more suitable for a jet powered boat. Therefore the asymmetry of the rudder is investigated also in a 3D case, where the rotational component of the flow behind the propeller is included.

Keywords

lift, drag, yacht, rudder, CFD modeling

Bibliografická citace mé práce:

KAZDA, A. *Vliv výrobních nepřesností na vznik přídatných momentů na kormidle jachty*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2016. 50 s. Vedoucí diplomové práce doc. Ing. Jaroslav Štigler, Ph.D..

ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že tato práce je mým původním dílem a zpracoval jsem ji samostatně pod vedením doc. Ing. Jaroslava Štiglera a s použitím literatury uvedené v seznamu.

V Brně dne 27. května 2016

.....

Bc. Adam Kazda

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji vedoucímu této diplomové práce doc. Ing. Jaroslavu Štiglerovi, CSc. za cenné rady a připomínky a za podnětné vedení diplomové práce. Dále bych chtěl poděkovat rodině za podporu během studia.

Obsah

1	Úvod.....	2
2	Teoretická část.....	3
2.1	Historie kormidla.....	3
2.2	Jak funguje kormidlo.....	4
2.3	Síly působící na kormidlo.....	4
2.3.1	Vztlaková síla.....	5
2.3.2	Odporová síla.....	8
2.3.2.1	Třecí odporová síla.....	8
2.3.2.2	Tvarová odporová síla.....	9
2.3.2.3	Indukovaný odpor.....	11
2.3.2.4	Vlnová odporová síla.....	11
3	Praktická část.....	13
3.1	Naměřené hodnoty.....	13
3.2	Výpočtové modelování proudění.....	15
3.2.1	Okrajové podmínky.....	15
3.2.2	2D simulace.....	23
3.2.2.1	Natočení kormidla.....	24
3.2.2.2	Odsazení kormidla od osy šroubu.....	26
3.2.2.3	Nesymetrické kormidlo.....	28
3.2.2.4	Natočení lodního šroubu.....	31
3.2.2.5	Shrnutí.....	33
3.2.3	3D simulace.....	33
3.2.3.1	Nerotující proud.....	35
3.2.3.2	Rotující proud.....	36
4	Závěr.....	41
5	Seznam použité literatury.....	43
6	Seznam použitých zkratk a symbolů.....	45

1 Úvod

Lodě slouží k mnoha účelům. Trajekty umožňují cestujícím překonávat moře, řeky nebo jezera. Nákladní lodě umožňují přepravit větší náklady levněji než jakýkoli jiný typ dopravy. Největší loď, která kdy brázdila moře, umožňovala přepravit 564 650 tun. Výletní lodě a jachty jsou lodě určené zejména k rekreaci a zábavě.

Nezbytnou součástí každé lodě je kormidlo, které posádce umožňuje loď ovládat. Z toho důvodu můžeme najít kormidlové pádlo, součást plnicí funkce kormidla, již na starověkých lodích. Za 5 000 let existence lodí došlo k jejich vývoji, a to včetně kormidla. Nejprve docházelo k vývoji jen na základě zkušeností, později byly odvozeny rovnice pro základní jevy v oblasti proudění tekutin. V posledních letech vývoj výpočetní techniky umožnil numerické řešení těchto rovnic, a tak je výpočetní modelování nejpoužívanějším nástrojem v oblasti návrhu nových lodí.

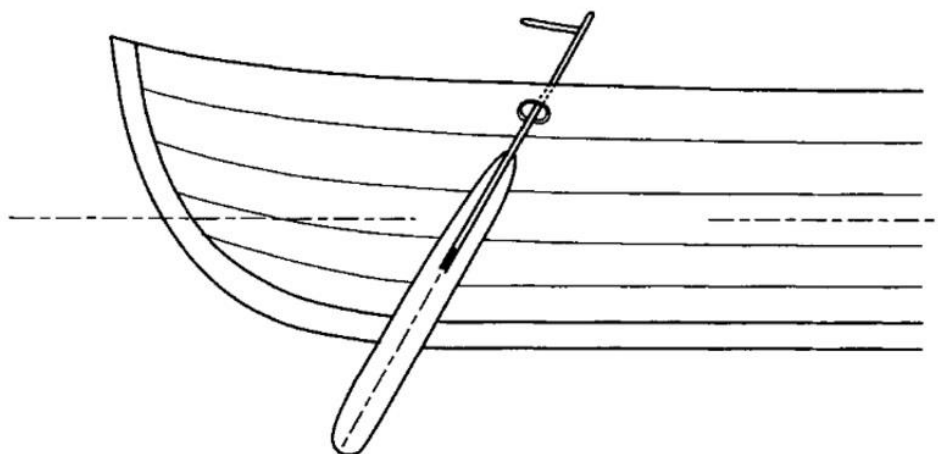
Dnešní kormidla vychází z aerodynamických profilů, jejichž chování je velmi dobře zmapováno pro umístění v paralelním proudu. Nejznámější výzkum byl proveden v americké agentuře pro letecký výzkum, kde byla vytvořena databáze nejběžněji používaných profilů s označením NACAxxxx [1]. Umístění kormidla v paralelním proudu je platné pouze pro kormidla jachet, které jsou poháněny větrem. Většina lodí je ale poháněna lodním šroubem nebo tryskou, což vede ke vzniku komplexního proudění, které vede k rozdílnému chování kormidla. Tento jev je označován jako interakce lodního šroubu s kormidlem [2].

Ačkoliv dnes máme technologie umožňující velmi přesnou výrobu, z ekonomických důvodů se výrobci snaží najít rovnováhu mezi přesností výroby a cenou. Pokud známe vlivy způsobené těmito nepřesnostmi, můžeme určit tolerance výroby daného dílu. V případě kormidla nepřesnosti vedou ke vzniku vztakové síly a momentu vyvolanému touto silou. Jedná se o negativní jev, kterému se snažíme předejít.

2 Teoretická část

2.1 Historie kormidla

Vznik kormidla je spojen se vznikem prvních lodí a nutností tyto lodě ovládat. První lodě pochází již ze starověkého Egypta (3 000 př.n.l.) a později ve starověkém Řecku (1 000 př.n.l.) a Římě (300 př.n.l.) byly nezbytnou součástí armád a obchodních flotil. U nejstarších lodí nebylo kormidlo umístěno na zádi, jak to známe dnes, ale bylo umístěno na boku v zadní části lodi. Tento koncept je nazýván kormidlové pádlo, které svým tvarem připomíná. Kormidlové pádlo se na lodích používalo přibližně 4 000 let a za tu dobu prošlo velkým vývojem. Proto můžeme najít kormidlová pádla různých tvarů, velikostí a způsobů uchycení. U velkých lodí můžeme například najít použití dvou kormidlových pádel. Nejdokonalejší kormidlová pádla byla použita na vikingských lodích, kde byl použit provazový závěs a páka ke snížení momentu nutného k natočení kormidla [3].



Obr. 1: Kormidlové pádlo [3]

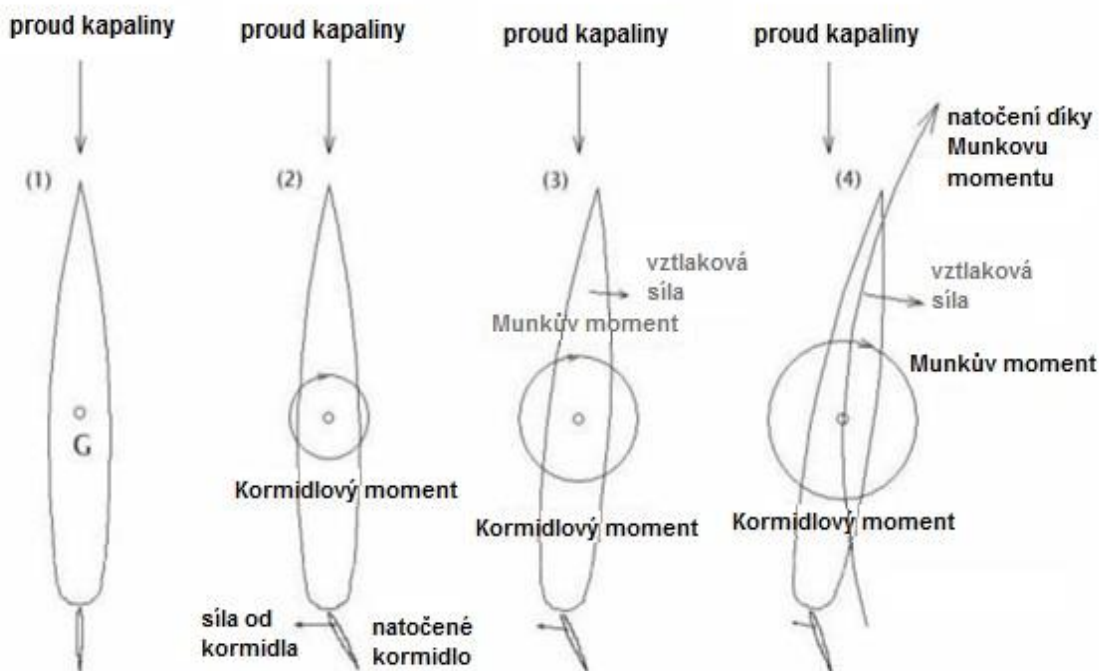
Použití kormidla umístěného na boku lodi bylo dominantní až do 12. století, kdy přišla výrazná změna a kormidlo se začalo umisťovat na záď lodí, kde je můžeme pozorovat dodnes. Příčina této změny není úplně jasná, ale předpokládané příčiny jsou narůstající rozměry lodí a kormidlo na zádi je zároveň méně náchylné k poškození. Předpokládá se, že tento koncept byl přejet z Číny, kde se podobná kormidla používala již v 1. století. Přejít z kormidlového pádla na kormidlo si vynutil změnu tvaru lodi, aby se kormidlo nenacházelo v úplavu. U prvních kormidel docházelo k nevyváženosti díky nesymetričnosti kormidla a nepřesnému umístění osy, což vedlo ke vzniku velkých ovládacích momentů. To bylo řešeno delší pákou, později pákovým mechanismem a v 18. století byl pákový mechanismus nahrazen ozubenými koly [3].

Další velký vývoj kormidla nastal s příchodem motorových lodí s lodním šroubem. Tvar kormidla byl optimalizován pro maximální využití proudu vznikajícího za lodním šroubem. Poté v 50. a 60. letech došlo k rozvoji leteckého průmyslu, vývoji v oblasti

aerodynamických profilů, vysvětlení jevů spojených s obtékáním aerodynamických profilů. Tyto znalosti byly následně aplikovány v lodním průmyslu [3].

2.2 Jak funguje kormidlo

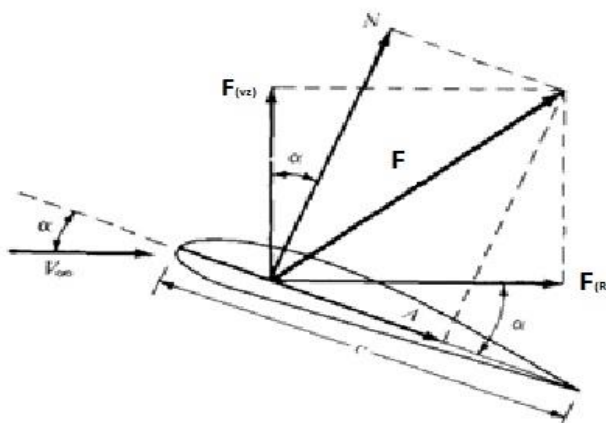
Pokud se loď pohybuje rovně s rovnoměrnými otáčkami lodního šroubu a kormidlo je ve střední poloze, je boční síla působící na kormidlo i loď rovna nule. Natočením kormidla dochází ke vzniku vztlakové síly působící na kormidlo. Tato vztlaková síla vyvolává na rameni mezi kormidlem a těžištěm lodi tzv. kormidlový moment. Ten způsobí natočení lodi o driftový úhel, ale není dostatečně velký k manévrování s lodí. Loď samotná se ale také chová jako obtákaný profil a jejím natočením v paralelním proudu dochází ke vzniku vztlakové síly, která má působiště v přední části lodi a vyvolává tzv. Munkův moment. Loď není optimální aerodynamický profil, proto dosahuje zanedbatelného vztlakového koeficientu oproti kormidlu, ale kvůli velké ploše je tato vztlaková síla výrazně větší než síla vznikající na kormidle a hraje hlavní roli v otáčení lodi [4].



Obr. 2: Funkce kormidla [4]

2.3 Síly působící na kormidlo

Nezávisle na tom, jak komplikované je proudění okolo tělesa v kapalině, je výsledná síla (F) vždy dána rozložením tlaku a smykového napětí. Tato síla působící na těleso se obvykle rozkládá na dvě složky dané orientací vůči paralelnímu proudu. Vztlaková síla ($F_{(vz)}$) je síla kolmá na paralelní proud. Odporová síla ($F_{(R)}$) je síla rovnoběžná s paralelním proudem. Další možnost rozkladu sil pro aerodynamické profily je na sílu normálovou (N), která je kolmá k těživě, a na sílu axiální (A), která je rovnoběžná s těživou [5].



Obr. 3: Síly působící na aerodynamický profil [5]

Vztahy mezi těmito silami lze vyjádřit pomocí úhlu náběhu α dle následujících vzorců:

$$F_{(vz)} = N \cos \alpha - A \sin \alpha \quad (1)$$

$$F_{(R)} = N \sin \alpha + A \cos \alpha \quad (2)$$

2.3.1 Vztlková síla

Je známo mnoho vysvětlení vzniku vztlkové síly, které se liší odvozením vztahu pro vztlkovou sílu. Často používaná teorie je Kutta-Joukowski, která je analogií k Magnusově síle (3). Magnusova síla působí na rotující válec umístěný v paralelním proudu, ke kterému je kolmá. [5]

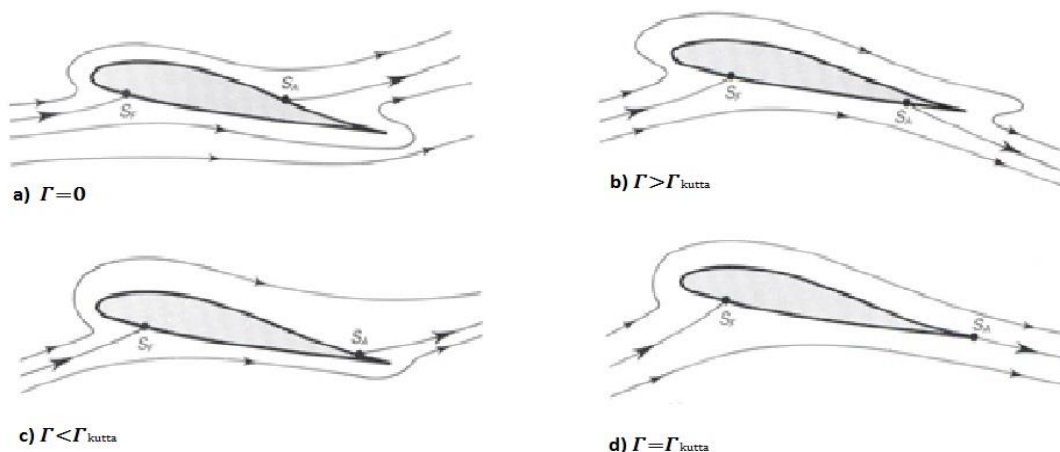
$$F_{(vz)} = \rho v_{\infty} \Gamma \quad (3)$$

, kde ρ je hustota okolního média, v_{∞} je rychlost paralelního proudu a Γ je cirkulace, která je dána vztahem:

$$\Gamma = 2\pi r^2 \omega \quad (4)$$

, kde r je poloměr daného válce a ω je úhlová rychlost otáčení válce.

Při obtékání profilu lze nahradit rychlostní pole kolem profilu také cirkulací, která v kombinaci s paralelním proudem splňuje fyzikální model. Na začátku 20. století stanovil Martin Wilhelm Kutta tzv. Kuttovu podmínku, která vychází z teorie, že stagnující bod se nachází na náběhové a odtokové hraně daného tělesa. Na základě této Kuttovy podmínky byl stanoven Kutta-Joukowski vztah [5].

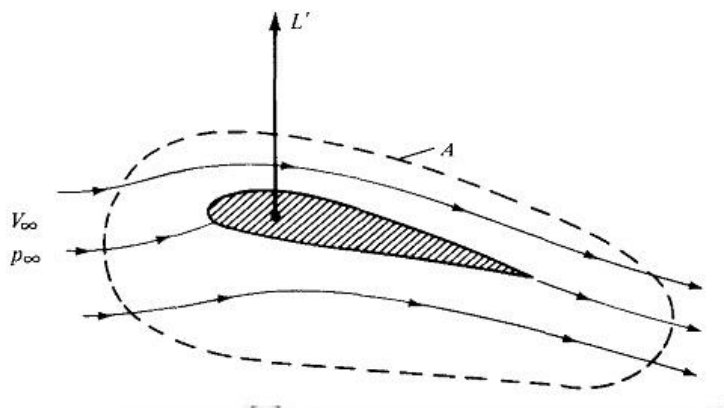


Obr. 4: Kuttova podmínka [6]

Pokud je kolem tělesa vytvořena myšlená hranice (viz obrázek 6), tak lze cirkulaci určit dle Kutta-Joukowski vztahu:

$$\Gamma = \oint_A \vec{v} \cdot d\vec{s} \quad (5)$$

, kde A je křivka znázorněná na obrázku 5, v je rychlost na této hranici a ds je elementární délka této křivky.

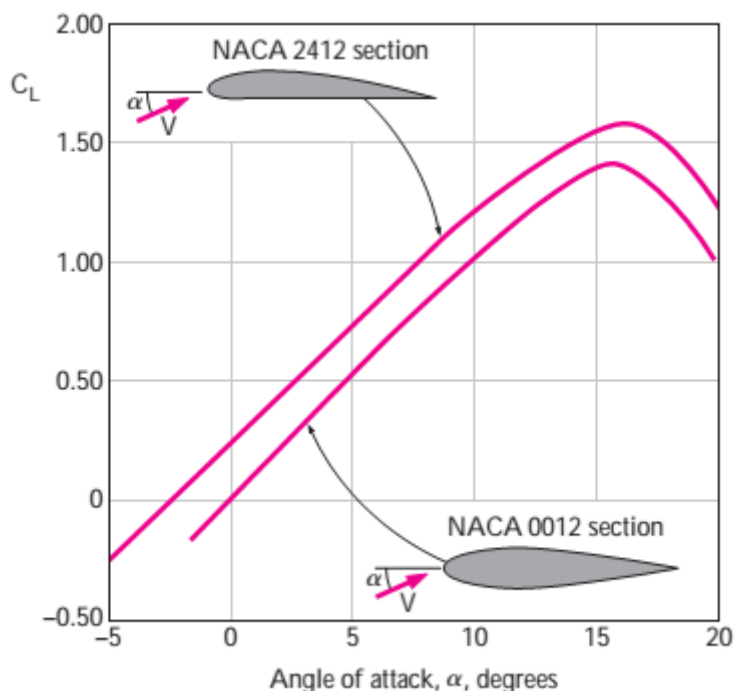


Obr. 5: Výpočet cirkulace kolem profilu[5]

Vztah (3) ukazuje, že vztlak závisí na rychlosti a hustotě proudícího média. Vztah (5) je hůře interpretovatelný, ale zohledňuje závislost vztlaku na tvaru obtékaného tělesa. Pro možnost porovnání různých aerodynamických profilů vyjadřujeme vztlak jako bezrozměrnou veličinu, kterou nazýváme koeficient vztlaku:

$$c_l = \frac{2F_{(vz)}}{\rho A v_\infty^2} \quad (6)$$

, kde $F_{(vz)}$ je vztlaková síla, A je plocha kolmá ke vztlakové síle a v_∞ je rychlost paralelního proud [5].



Obr. 6: Závislost koeficientu vztlaku na úhlu náběhu pro profil NACA2412 a NACA0012[7]

U aerodynamických profilů docílíme vztlaku pomocí dvou mechanismů. Prvním je asymetrický profil, kdy prohnutím tělivy vzniká vztlak. Tento efekt lze pozorovat v obrázku 6, kde je zodpovědný za posunutí křivky ve směru osy y pro profil NACA2412. Symetrický profil NACA0012 má pro nulový úhel náběhu nulový vztlak, proto hodnota koeficientu vztlaku pro nulový úhel náběhu u profilu NACA2412 udává vztlak způsobený prohnutím tělivy. Z důvodu nutnosti nulového vztlaku pro nulový úhel náběhu se pro kormidla používají pouze symetrické profily. Druhým mechanismem je natočení profilu, změna úhlu náběhu. Koeficient vztlaku je lineárně závislý na úhlu náběhu až do hodnoty c_{lmax} , kde dochází k odtržení od profilu a výraznému poklesu vztlaku. Tato hodnota je pro kormidla limitní polohou [5,7].

Další charakteristické hodnoty pro aerodynamický profil jsou dva body. Jeden je působíště vztlakové síly, což je poloha na tělivě, kde je nulový moment vyvolaný pomocí vztlakové síly. Působíště vztlakové síly se mění s úhlem náběhu. Druhý charakteristický bod je aerodynamický střed profilu. Aerodynamický střed je poloha na tělivě, kde dochází k nulové změně momentu při změně úhlu náběhu (7). Teoreticky je odvozeno, že pro symetrické profily jsou tyto dva body shodné a vyskytují se v první čtvrtině tělivy. Z toho plyne, že ideální osa otáčení kormidla je v tomto bodě [5].

$$\frac{\partial M_{AC}}{\partial \alpha_{AC}} = 0 \quad (7)$$

2.3.2 Odporová síla

Odporová síla je síla, která působí proti pohybu lodí. Lze ji odvodit pouze pro viskózní proudění a ovlivňuje ji rychlost, ponor a tvar trupu. Pro jednofázové proudění máme dva mechanismy vzniku odporové síly.

2.3.2.1 Třecí odporová síla

Prvním mechanismem vzniku odporové síly je tření. Mezi kapalinou a stěnou dochází ke tření. To znamená, že tření je ovlivňováno jak parametry povrchu tělesa, tak kapaliny. U tělesa záleží zejména na drsnosti povrchu a u kapaliny na viskozitě a intenzitě turbulentního proudění. Viskozita vyvolává smykové napětí a vede ke vzniku mezní vrstvy. Následující vzorec popisuje smykové napětí:

$$\tau = \mu \left(\frac{\partial u}{\partial y} \right)_{y=0} \quad (8)$$

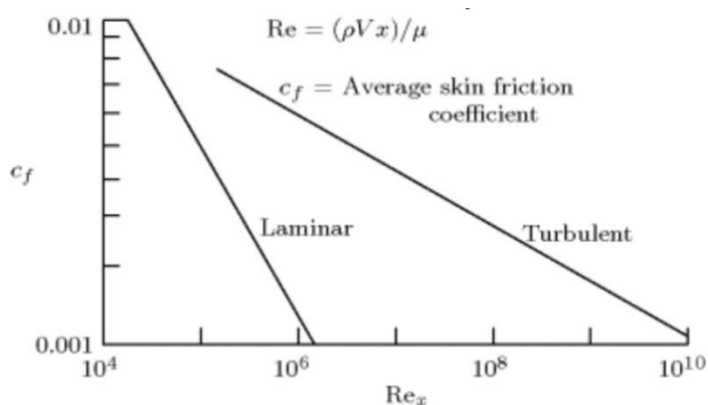
, kde μ je dynamická viskozita a závorka vyjadřuje gradient rychlosti ve směru kolmém na stěnu [7].

Odporovou sílu způsobenou třením obvykle vyjadřujeme jako součin dynamického tlaku, smáčeného povrchu S a koeficientu tření C_f .

$$F_{(Rt)} = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 S C_f \quad (9)$$

Tento koeficient zohledňuje vlivy všech působících mechanismů a lze ho vyjádřit v závislosti na smykovém napětí dle následujícího vzorce:

$$C_f = \frac{\tau}{\frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2} \quad (10)$$



Obr. 7: Závislost koeficientu tření na Reynoldsově čísle [8]

Protože přesné rozložení smykového napětí na povrchu tělesa běžně neznáme, bylo vytvořeno mnoho empirických vztahů pro odvození těchto třecích koeficientů. Jelikož tento koeficient je závislý na intenzitě turbulence proudění, používá se rozdílný empirický vztah pro turbulentní (12) a laminární (11) proudění. Tyto závislosti jsou znázorněny v obrázku 7.

$$C_f = \frac{1,328}{\sqrt{Re}} \quad (11)$$

$$C_f = \frac{0,0743}{Re^{0,2}} \quad (12)$$

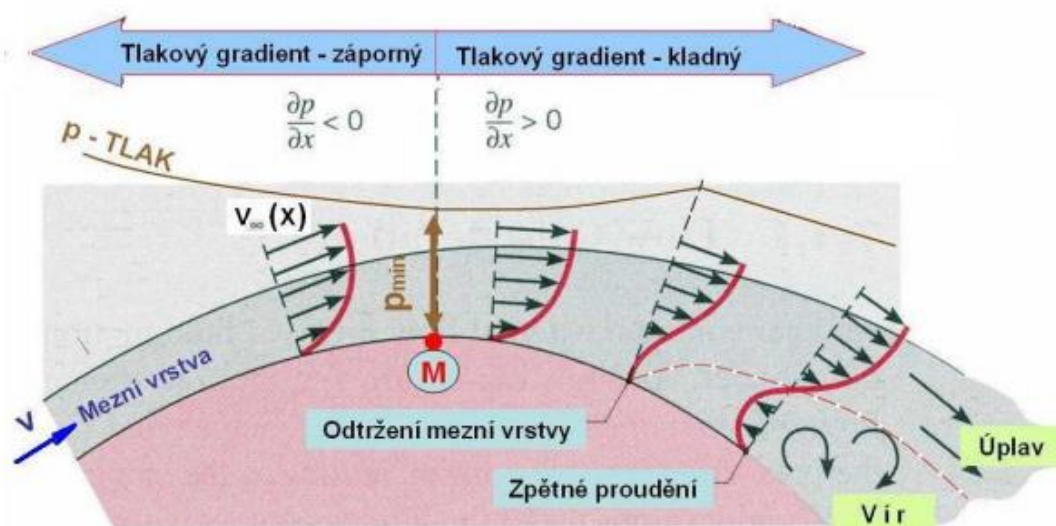
, kde Re je Reynoldsovo číslo, které se určuje dle vzorce:

$$Re = \frac{v_\infty \cdot d}{\nu} \quad (13)$$

, kde v_∞ je rychlost paralelního proudu, d je charakteristický rozměr a ν je kinematická viskozita [8].

2.3.2.2 Tvarová odporová síla

Druhým mechanismem vzniku odporové síly je rozdíl tlaků na přední a zadní straně obtékaného tělesa. Tento rozdíl tlaků vytváří odporovou sílu. K rozdílu tlaků podél obtékaného tělesa dochází díky odtržení od profilu, viz obrázek 8. Smykové napětí působí proti pohybu proudu a způsobuje zastavení proudění u stěny. Při snížení rychlosti kolem obtékaného tělesa dochází ke vzniku kladného tlakového gradientu, který spolu s vnitřním třením kapaliny brzdí proud v blízkosti stěny. Tím dochází k deformaci rychlostního profilu, který je v bodě odtržení mezní vrstvy kolmý ke stěně. Dalším působením kladného tlakového gradientu dochází ke vzniku zpětného proudění a víření. Toto víření vede k disipaci energie a výraznému poklesu tlaku [7,9].



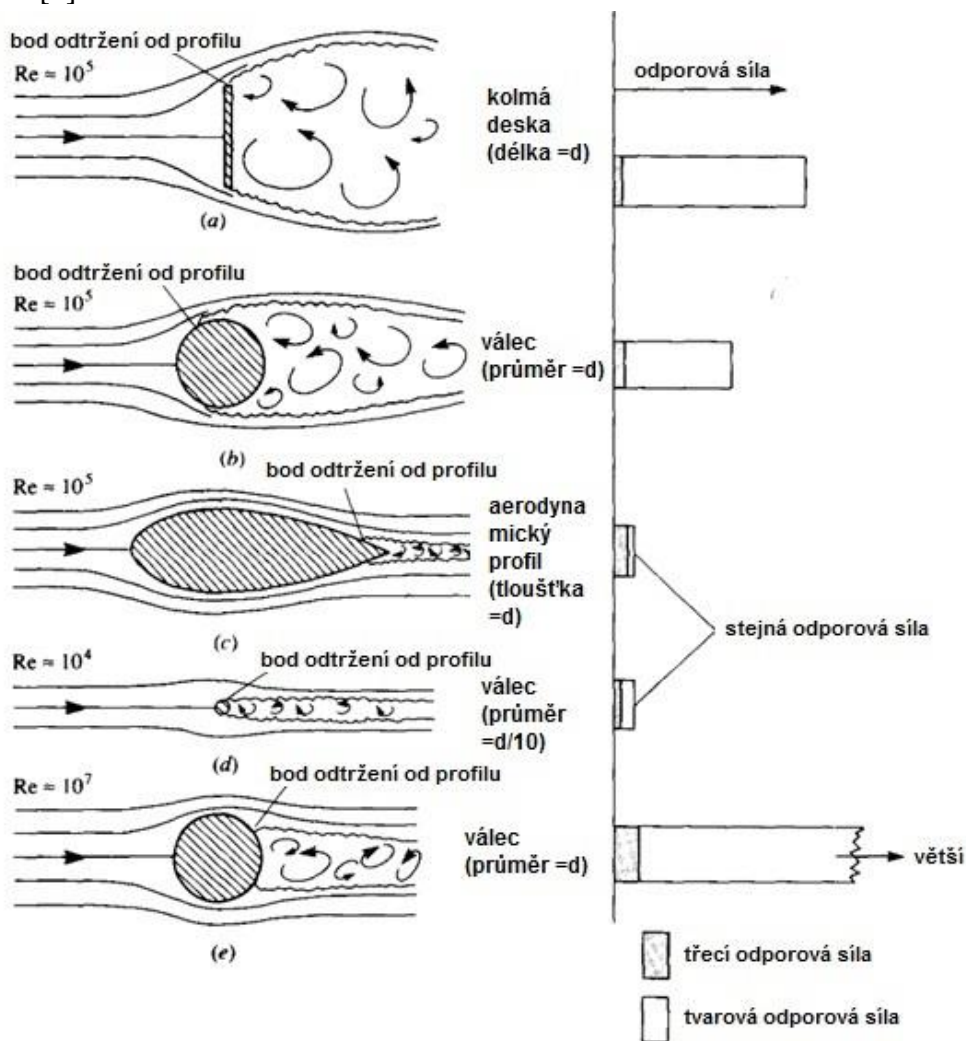
Obr. 8: Odrážení mezní vrstvy na zakřiveném povrchu [9]

Tvarový odpor (14) je dán podobným vztahem jako třecí odpor (9). Tvarový odpor nezávisí na velikosti smáčené plochy, ale na velikosti průřezu A ve směru kolmém na paralelní proud, protože velikost tvarového odporu závisí na velikosti úplavu a ten je funkcí průřezu. Pokud u

obtákaného tělesa dochází k výraznému odtržení od profilu a vzniku úplavu, je tvarový odpor dominantní složkou. Proto může být ve vzorci koeficient tvarového odporu nahrazen koeficientem celkového odporu C_d [8].

$$F_{(Rp)} = \frac{1}{2} \rho v_{\infty}^2 A C_d \quad (14)$$

Na následujícím obrázku (Obr. 9) je znázorněno obtékání různých těles a podíl viskózní a tvarové odporové síly na celkovou odporovou sílu. Při obtékání desky postavené kolmo na paralelní proud, je odporová síla největší a dominantním mechanismem je tvarový odpor, přičemž třecí odpor je zanedbatelný. Mechanismy a velikost odporové síly při obtékání válce jsou velmi podobné obtékání desky. Při obtékání aerodynamického profilu je dominantní třecí odpor a tvarový odpor je zanedbatelný. V obrázku je zároveň znázorněno srovnání dvou těles s různými převládajícími mechanismy odporové síly (aerodynamický profil x válec). Pro docílení stejného odporu je válec výrazně menší než aerodynamický profil [5].



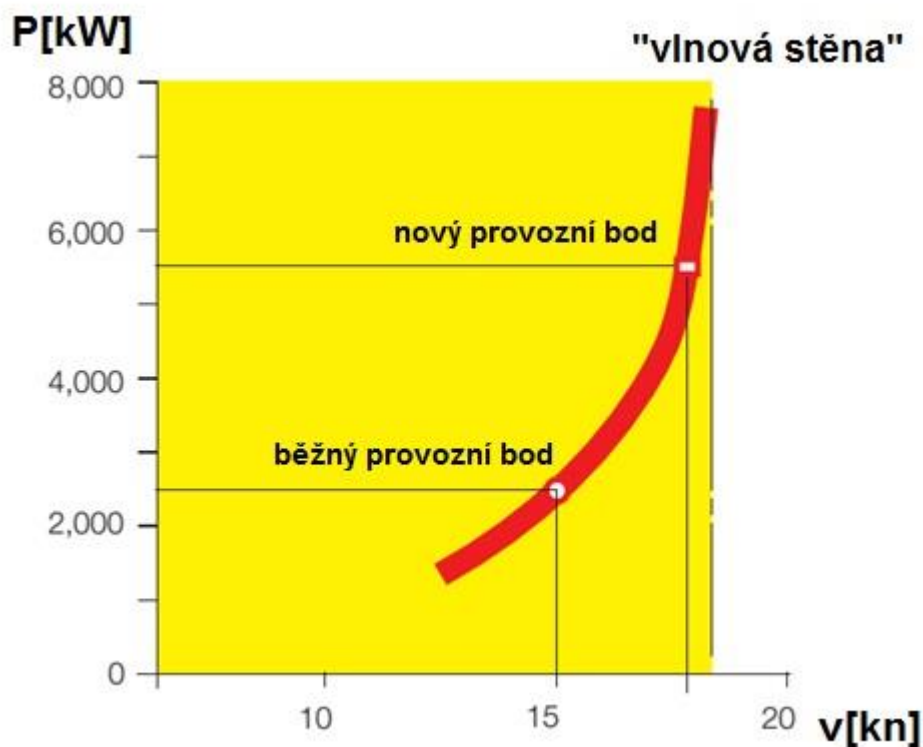
Obr. 9: Rozložení třecí a tvarové odporové síly [5]

Odporovou sílu se snažíme minimalizovat u všech pohyblivých součástí, zejména pak u dopravních prostředků, u kterých odporová síla vede k nutnosti použití výkonnějších motorů a větší spotřebě. Na základě znalosti mechanismů vzniku odporové síly je snaha minimalizovat nebo úplně odstranit úplav za dopravními prostředky. Proto je u většiny dopravních prostředků dominantní třecí odpor (letadla, lodě), avšak u běžných automobilů nelze úplav kvůli rozměrovým omezením odstranit.

2.3.2.3 Indukovaný odpor

Dalším zdrojem odporové síly je tzv. indukovaný odpor, jehož vznik je spojen se vznikem vztlakové síly. První část indukovaného odporu je složka normálové síly působící ve směru odporové síly. Druhá část indukovaného odporu vzniká v důsledku rozdílných tlaků na tlakové a sací straně profilu. To vede k přetékání tekutiny z tlakové strany na sací na konci kormidla. Přetékání kapaliny vytváří vír, který zvyšuje hydrodynamický odpor. Tento efekt má vliv na konstrukci kormidla. Pro minimalizaci vzniku víru na konci kormidla je tento konec uzpůsoben tak, aby produkoval pouze malý vztlak a z něj plynoucí indukovaný odpor [7].

2.3.2.4 Vlnová odporová síla

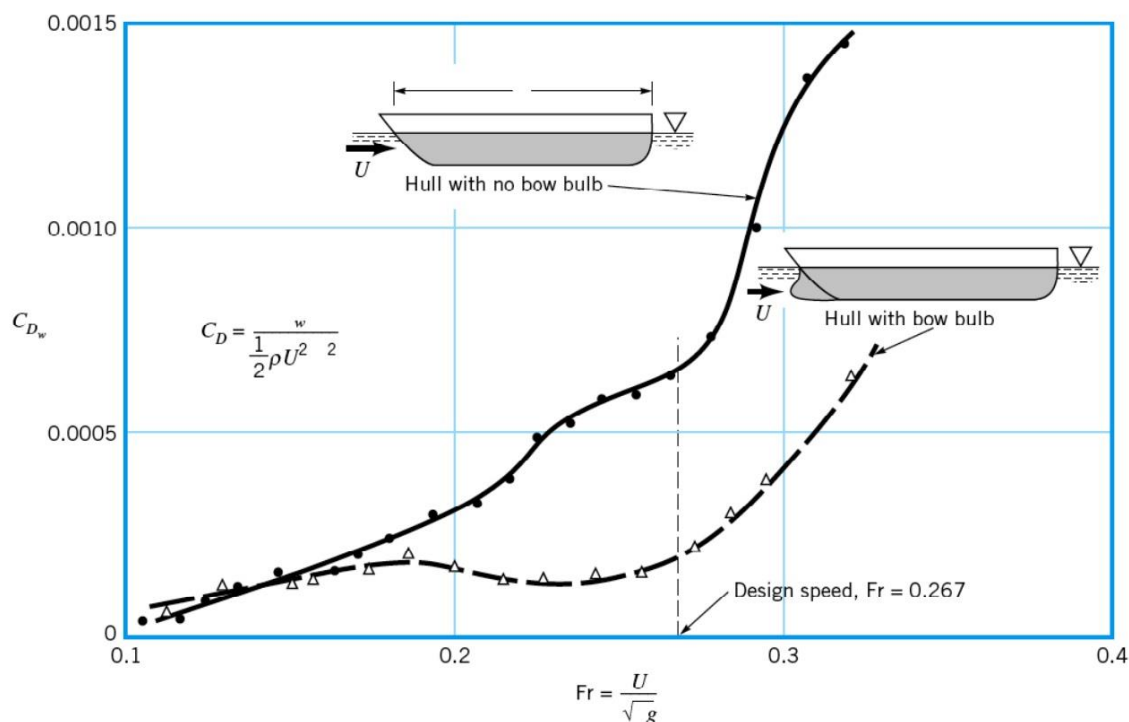


Obr. 10: Vlnová stěna pro kontejnerovou loď 600TEU [10]

U námořních plavidel lze pozorovat i další zdroj odporové síly tzv. vlnový odpor. Jde o specifický odpor vyskytující se pouze na rozhraní dvou fází. Při pohybu v jedné fázi je nárůst tlaku na přídi kompenzován poklesem tlaku na zádi. Při pohybu na vodní hladině je

nárůst tlaku na přídi kompenzován vznikem vlny. K vytváření těchto vln je nutná energie, a proto tento jev působí proti pohybu lodi. Vyjádřit tento jev analyticky je velmi komplikované, ale na základě experimentálních pokusů bylo zjištěno, že vlnový odpor roste se šestou mocninou rychlosti lodi. Protože ostatní odpory závisí na druhé mocnině, od určité rychlosti začíná převládat vlnový odpor. Tuto rychlost nazýváme vlnová stěna. Při zvyšování výkonu se se nám rychlost obvykle zastaví na této hodnotě, viz obrázek 10 [10,11].

Tento vlnový odpor lze ovlivnit tvarem lodi. Jeho minimalizace je nezbytná zejména pro rychlá plavidla, ale prvek pro jeho redukcí lze pozorovat hlavně u velkých lodí. Tento prvek je nazýván cibulový výběžek. Cibulový výběžek nebrání vzniku vln, ale zmenšuje jejich velikost a tím i energii potřebnou k jejich tvorbě [11].



Obr. 11 : Cibulový výběžek [11]

3 Praktická část

V roce 2013 byla na Odboru fluidního inženýrství Victora Kaplana řešena zakázka týkající se vzniku přídavného momentu na kormidle jachty. Tento moment se projevoval pouze při jízdě na motor. Když byla loď poháněna lodním šroubem, měla tendenci zatačet doprava. Pro udržení jachty v přímém směru bylo třeba na kormidelním kole vyvinout kroučící moment nezanedbatelné velikosti. Pokud byla loď poháněna plachtami, provozovatel nepozoroval vznik přídavných momentů. Jachta je zobrazena na následujícím obrázku [12].



Obr. 12: Pohled na jachtu z boku

Zmíněný problém byl v roce 2013 vyřešen. Jednalo se o nesymetrický profil s nesymetrií velikosti 5 mm a po odstranění této nesymetrie už nebyl přídavný moment na kormidlo pozorován. V této práci je daná problematika řešena pomocí výpočtového modelování proudění. Jsou definovány případy, které mohou vzniknout při výrobě jachty a mohou způsobit vliv přídavných účinků na kormidlo. Na základě výsledků výpočtového modelování proudění je následně určen vliv a charakteristika daného případu. Geometrie, rozměry a naměřené hodnoty jsou převzaty z případu z roku 2013.

3.1 Naměřené hodnoty

Vzhledem k charakteru problému, kdy byl přídavný moment na kormidlo zjištěn až za provozu, bylo měření provedeno za provozu bez speciálního experimentálního vybavení. Byla měřena pouze síla nutná k natočení kormidlového kola do polohy, při které loď jela v přímém směru. Měření byla provedena siloměrem, jehož přesnost není známa. Měření byla provedena ve dvou různých dnech pro různá nastavení listů lodního šroubu. V době konání zkoušky se taktéž lišila rychlost větru. Při první zkoušce 12/2012 se rychlost větru pohybovala v rozmezí 3 až 5 kn. Při druhé zkoušce 2/2013 se rychlost větru pohybovala v rozmezí 5 až 7 kn.

Otáčky (min^{-1})	Rychlost (kn)		Naměřená síla (kg)	
	12/2012	2/2013	12/2012	2/2013
Měřeno				
750	2,1	-	0	-
1000	3,5	2,6	1	0,2
1400	4,9	4,1	1,3	1
1800	5,9	5	2	1,8
2200	6,8	6	3	2,3
2600	7,7	6,9	4	3
3100	-	7,7	-	5

Tab. 1: Naměřené hodnoty

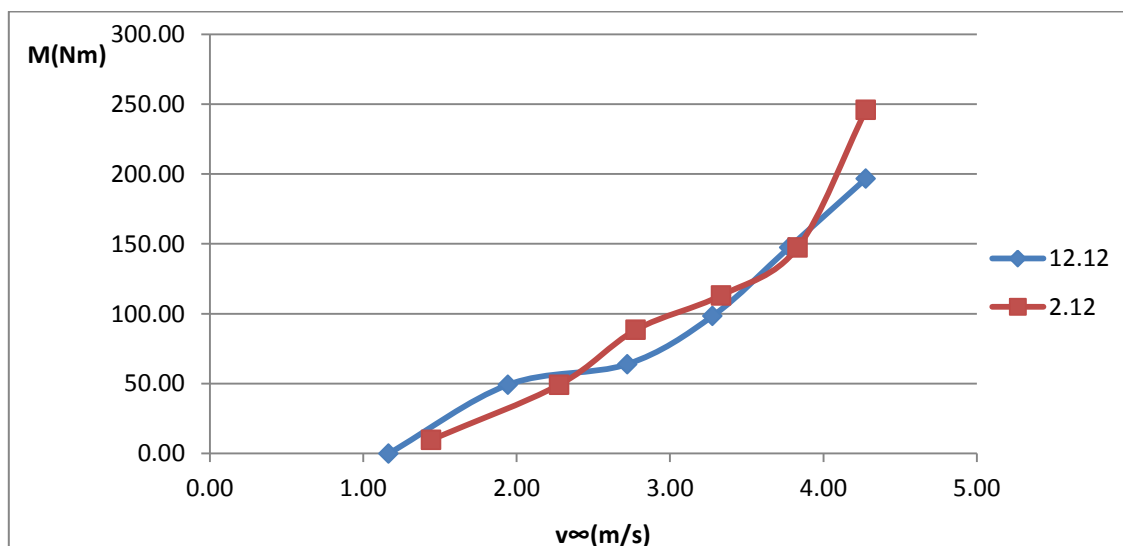
Při měřeních byla rychlost měřena v uzlech, jelikož se jedná o běžně používanou jednotku v lodní dopravě. Pro výpočty je nutné převést uzly na metry za sekundu. Jako převodní poměr bylo použito $1 \text{ kn} = 0.56 \text{ m/s}$. Z naměřené síly byl spočten moment M_k dle vzorce:

$$M_k = F_{kk} \cdot \frac{D_{kk}}{2} \cdot \frac{\alpha_{kk}}{\alpha_k} \quad (15)$$

, kde F_{kk} je síla naměřená na kormidelním kole, D_{kk} je průměr kormidelního kola a $\frac{\alpha_{kk}}{\alpha_k}$ udává poměr mezi natočením kormidelního kola a natočením kormidla. Průměr kormidelního kola v daném případě je 1,3 m a při natočení kormidelního kola o 270° se kormidlo vychýlí o 35° .

n [min^{-1}]	v_∞ [kn]	v_∞ [m/s]	F_{kk} [N]	M_k [Nm]
750	2.1	1.17	0	0.00
1000	3.5	1.94	9.81	49.19
1400	4.9	2.72	12.75	63.95
1800	5.9	3.28	19.62	98.38
2200	6.8	3.78	29.43	147.57
2600	7.7	4.28	39.24	196.76
1000	2.6	1.44	1.96	9.84
1400	4.1	2.28	9.81	49.19
1800	5	2.78	17.65	88.54
2200	6	3.33	22.56	113.14
2600	6.9	3.83	29.43	147.57
3100	7.7	4.28	49.05	245.95

Tab. 2: Skutečný moment na kormidlo



Graf 1: Skutečný moment na kormidlo

3.2 Výpočtové modelování proudění

Výpočet byl prováděn pouze pro stacionární proudění. Pro 2D i 3D modelování bylo použito stejné nastavení výpočtáře. Pro výpočet byl zvolen k- ϵ model turbulence, který je nejběžněji používaným modelem pro průmyslové aplikace kvůli své robustnosti a dobré konvergenci. Velmi dobře se uplatňuje na vnější proudění, dokonce i v případě složitých geometrií. k- ϵ model nesimuluje proudění mezní vrstvy, a proto rozložení veličin v této oblasti je počítáno stěnovou funkcí. V tomto případě byla zvolena standardní stěnová funkce, která je nejběžněji používanou stěnovou funkcí [13].

Během výpočtu byla sledována hodnota vztlaku a moment kolem osy otáčení kormidla. Vztlak způsobuje natáčení lodi a její následné zatáčení, což je vysvětleno v první kapitole. Protože těžiště lodi není známé, nelze určit velikost kormidlového momentu. Protože změna vzdálenosti mezi těžištěm a působištem vztlakové síly na kormidlo je zanedbatelná, udává poměr vztlakové síly a zároveň i poměr kormidlových momentů. Moment na kormidlo, což je moment kolem osy otáčení kormidla, je přenášen pomocí převodů na kormidlové kolo a tento výsledný moment pociťuje kormidelník lodi.

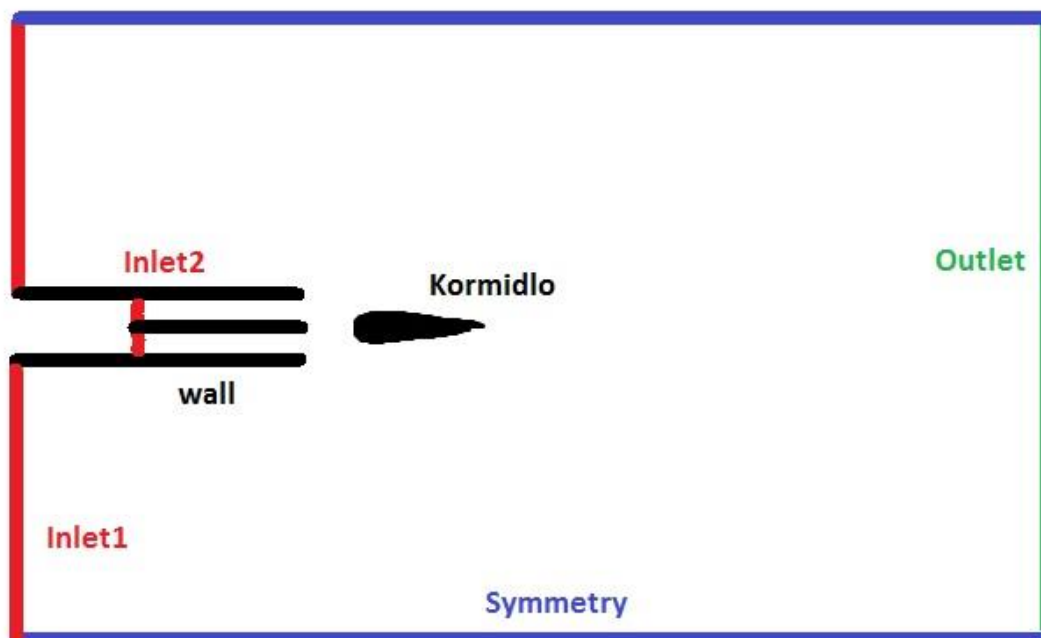
3.2.1 Okrajové podmínky

Na následujícím obrázku jsou znázorněny okrajové podmínky použité při výpočtovém modelování proudění. Jedná se o zjednodušení, kdy je pohyb lodi nahrazen pohybem kapaliny. Loď, příp. kormidlo, je umístěna v kanálu, jehož strany jsou tvořeny podmínkou *symmetry*. Voda do kanálu vtéká ze dvou povrchů (*inlet1*, *inlet2*) a vytéká zadní stěnou kanálu (*outlet*). Okrajová podmínka *inlet1* vytváří paralelní proud, který je dán rychlostí pohybu lodě. Okrajová podmínka *inlet2* určuje proud vznikající za lodním šroubem. Pro všechny výpočty jsou použity hodnoty rychlostí, které odpovídají skutečné jachtě.

Protože výkon a jiné parametry motoru a lodního šroubu nejsou známé, je nutné určit rychlost proudu vyvolanou lodním šroubem na základě odporové síly lodi, která se skládá z třecí odporové síly $F_{(Rt)}$, tvarové odporové síly $F_{(Rp)}$, vlnového odporu $F_{(Rv)}$ a odporové síly

vzduchu $F_{(Ra)}$. Odporovou sílu vzduchu lze také rozdělit na tvarovou a třecí část, ale předpokládáme, že pro loď bude tvarová část dominantní. Odvození rychlosti proudu za lodním šroubem je provedeno dle výzkumné zprávy VUT [12].

$$F_{(R)} = F_{(Rt)} + F_{(Rp)} + F_{(Rv)} + F_{(Ra)} \quad (16)$$



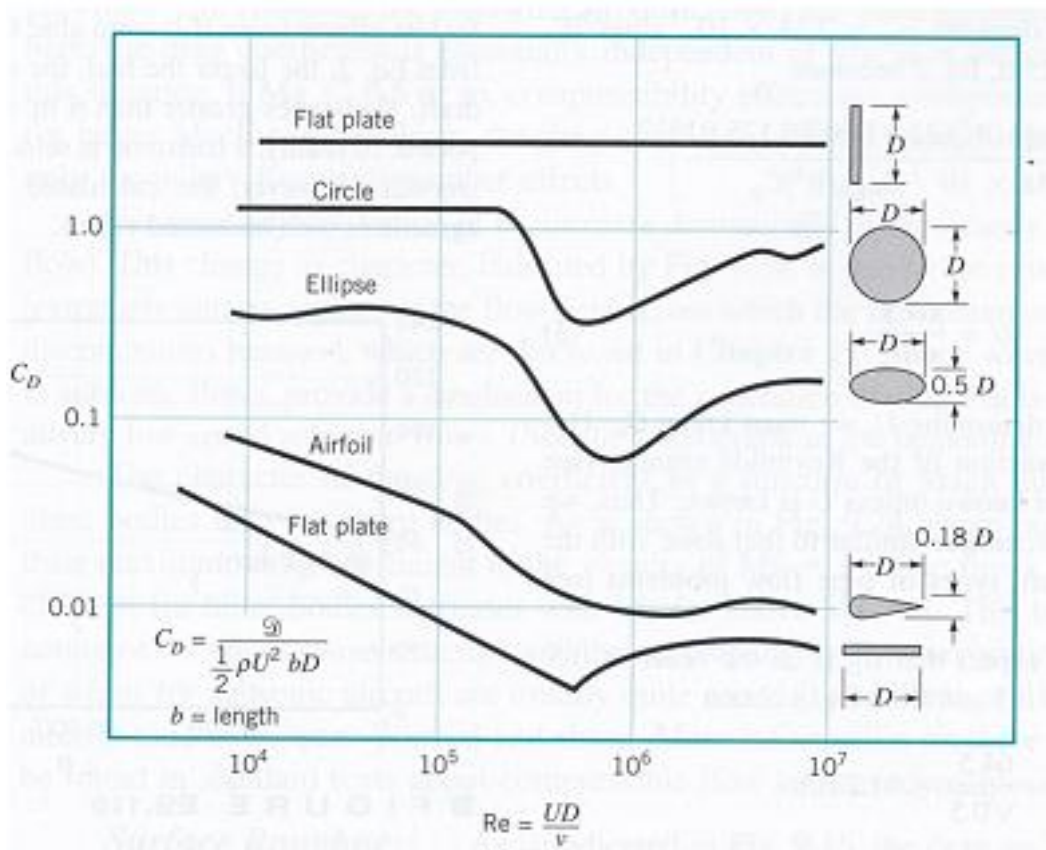
Obr. 13: Okrajové podmínky

Třecí odporovou sílu můžeme určit na základě znalosti Reynoldsova čísla, které je pro danou jachtu $18 \cdot 10^6$ až $60 \cdot 10^6$. Protože je Reynoldsovo číslo vysoké, tudíž se jedná o turbulentní proudění, lze určit koeficient tření na základě rovnice (12) a následně odporovou sílu dle rovnice (9). Smáčená plocha $S = 47 \text{ m}^2$ byla získána z počítačového 3D modelu.

V [m/s]	Re	Cf	$F_{(Rt)}$ [N]	$F_{(Rp)}$ [N]	$F_{(Rt)} + F_{(Rp)}$ [N]
1.17	1.75E+07	2.63E-03	239	89	328
1.94	2.92E+07	2.38E-03	598	248	846
2.72	4.08E+07	2.22E-03	1097	485	1582
3.28	4.92E+07	2.14E-03	1532	704	2236
3.78	5.67E+07	2.08E-03	1978	935	2913
4.28	6.42E+07	2.03E-03	2474	1198	3672
1.44	2.17E+07	2.52E-03	351	137	487
2.28	3.42E+07	2.30E-03	796	340	1135
2.78	4.17E+07	2.21E-03	1137	505	1643
3.33	5.00E+07	2.14E-03	1579	728	2307
3.83	5.75E+07	2.08E-03	2031	962	2993
4.28	6.42E+07	2.03E-03	2474	1198	3672

Tab. 3: Odporová síla a součinitelé odporu

Tvarový odpor lze odhadnout na základě známé čelní plochy lodí a součinitele tvarového odporu. Při návrhu jachty se usiluje o minimální třecí odpor, a proto loď a její odporový součinitel budou blízké aerodynamickému profilu. Na obrázku 14 je vidět závislost odporového součinitele na Reynoldsově čísle, kdy pro vysoké Reynoldsovo číslo je tento součinitel konstantní a má hodnotu přibližně 0,01. Za daných předpokladů lze určit tvarovou odporovou sílu ze vzorce (14), kde čelní plocha kýlu je $A_{kyl} = 2,02\text{m}^2$, čelní plocha závaží je $A_{závaží} = 0,96\text{m}^2$ a čelní plocha trupu je $A_{trup} = 9,81\text{m}^2$.



Obr. 14: Tvarové odporové součinitele [14]

Odporový součinitel vzduchu lze určit z předpokladu, že lodní šroub dodává kapalině stejný výkon při konstantních otáčkách.

$$P_{(n=konst.)} = konst \quad (17)$$

Výkon potřebný k pohybu lodí danou rychlostí za daného protivětru lze vyjádřit na základě odporové síly lodí proti pohybu. Díky znalosti naměřených hodnot pro dvě různé rychlosti protivětru může být výkon lodí vyjádřen následující rovnicí (18)

$$P_i = F_{(Rw)i} \cdot w_{(w)i} + F_{(Ra)i} \cdot (w_{(w)i} + w_{(a)i}) \quad (18)$$

, kde index i lze nahradit 1 značící první případ s protivětre 3-5 kn. Pro výpočet je brána střední hodnota, tudíž $w_{(a)1} = 4\text{ kn}$. Pro druhý případ s protivětre 5-7 kn nahradí i index 2. Je opět uvažována střední hodnota a $w_{(a)2} = 6\text{ kn}$.

Odporovou sílu větru lze vyjádřit jako tvarový odpor (14), kde je za rychlost dosazen součet rychlosti lodi a rychlosti větru.

$$F_{(Ra)i} = C_D \cdot \rho_{(a)} \cdot \frac{(w_{(w)i} + w_{(a)i})^2}{2} \cdot A_{(a)} \quad (19)$$

V této rovnici jsou neznámé C_D a $A_{(a)}$, ale předpokládá se, že plocha i koeficient odporu jsou konstantní při změně rychlosti. Dosazením rovnice (19) do rovnice (18) získáme:

$$P_{(i)} = F_{(Rw)i} \cdot w_{(w)i} + C_D \cdot \rho_{(a)} \cdot \frac{(w_{(w)i} + w_{(a)i})^3}{2} \cdot A_{(a)} \quad (20)$$

Na základě rovnice (17) a rovnice (20) pro různé indexy, tedy různé rychlosti protivětru, byla získána rovnice (21):

$$C_D \cdot A_{(a)} = \frac{2 \cdot (F_{(ow)2} \cdot w_{(w)2} - F_{(ow)1} \cdot w_{(w)1})}{\rho_{air} \left[(w_{(w)1} + w_{(a)1})^3 - (w_{(w)2} + w_{(a)2})^3 \right]} \quad (21)$$

Hodnota $C_D \cdot A_{(a)}$ byla určena pro otáčky 1 000, 1 400, 1 800, 2 200 a 2 600 min^{-1} . Pro určení odporové síly vzduchu dle rovnice (19) byla použita střední hodnota $C_D \cdot A_{(a)} = 608$.

V [m/s]	$F_{(Rt)} + F_{(Rp)}$ [N]	$F_{(vzd)}$ [N]	$F_{(R)}$ [N]
1.17	328	3684	4012
1.94	846	5569	6416
2.72	1582	7843	9425
3.28	2236	9704	11940
3.78	2913	11549	14462
4.28	3672	13554	17226
1.44	487	7323	7810
2.28	1135	10100	11236
2.78	1643	11981	13623
3.33	2307	14258	16565
3.83	2993	16477	19470
4.28	3672	18584	22256

Tab. 4: Odporová síla lodi

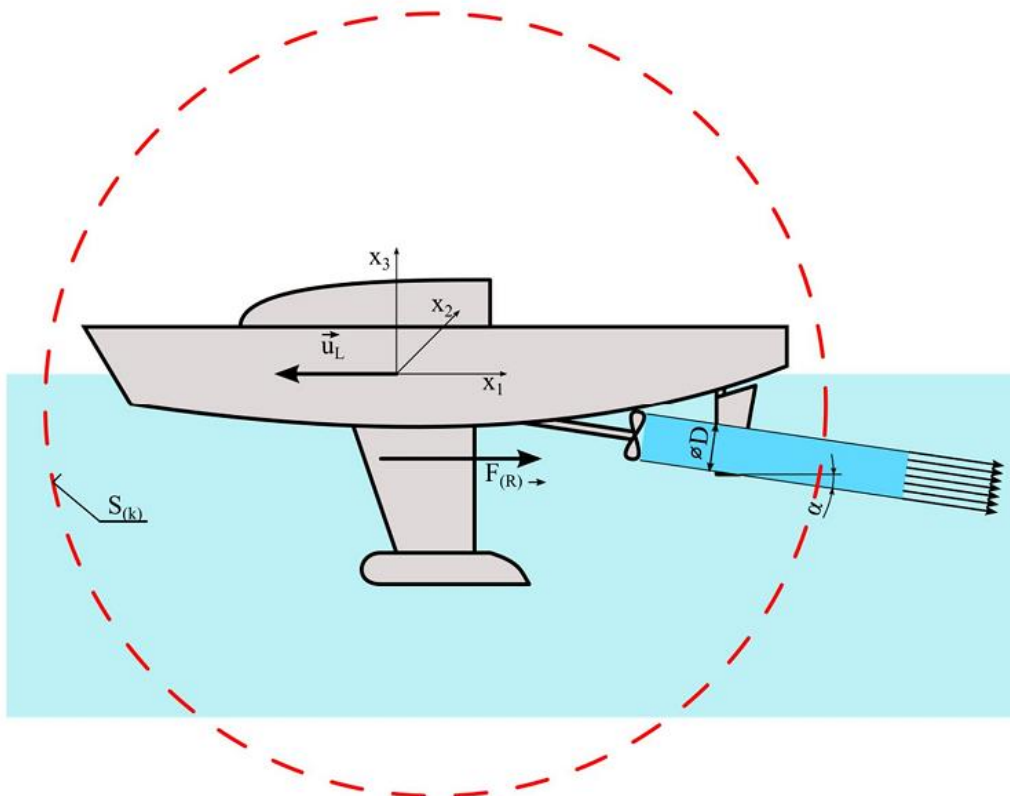
Pro známý odpor lodi proti pohybu lze vyjádřit rychlost a velikost proudu, který je nutný k vytvoření síly o stejné velikosti v opačném směru. Pokud je docíleno této síly, loď pluje rovnoměrným přímočarým pohybem. Odporová síla musí být rovna časové změně hybnosti kapaliny v kontrolním objemu kapaliny pevně spojeným s lodí. Tento kontrolní objem bude mít kulový tvar. Pro určení hybnosti je použit Reynoldsův teorém (22), který vyjadřuje výslednou sílu působící na loď jako časovou změnu hybnosti.

$$F_{(v)i} = \left(\frac{DH_{(k)i}}{Dt} \right)_{sys} = \frac{\partial}{\partial t} \int_{V_k} \rho_{(k)} \cdot w_i dV + \int_{S_k} \rho_{(k)} \cdot w_i (w_j \cdot n_j) dS \quad (22)$$

Vztah (22) lze zjednodušit pro stacionární proudění, což je případ jachty při konstantních otáčkách motoru. Pro stacionární proudění je člen s objemovým integrálem roven nule. Výslednou sílu lze nahradit jednotlivými silami působícími na jachtu, takže dostaneme rovnici (23):

$$F_{(R)i} + F_{(g)i} + F_{(vz)i} = \int_{S_k} \rho_{(k)} \cdot w_i (w_j \cdot n_j) dS \quad (23)$$

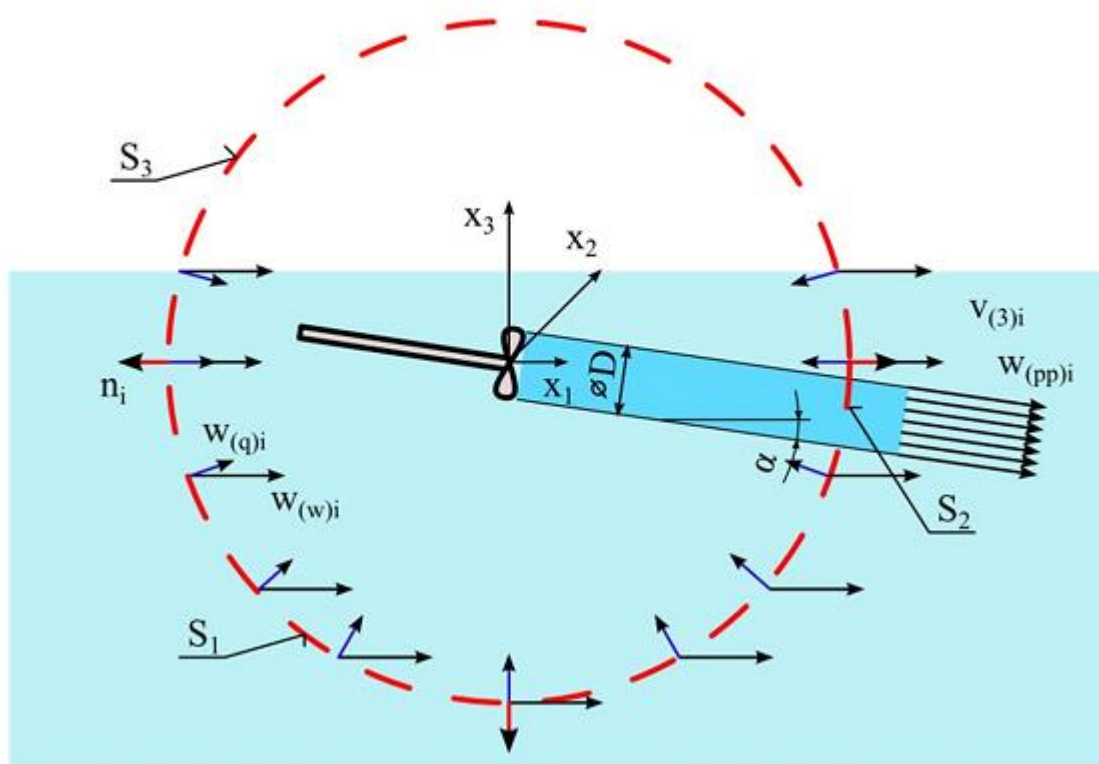
, kde $F_{(R)i}$ je odporová síla, $F_{(g)i}$ je tíhová síla, $F_{(vz)i}$ je vztlaková síla, $\rho_{(k)}$ je hustota kapaliny, w_i je relativní rychlost kapaliny na hranici kontrolního objemu a n_i je jednotkový normálový vektor k hranici kontrolního objemu.



Obr. 15: Kontrolní objem kolem plující jachty [12]

Z vektorové rovnice (23) je pro určení rychlosti proudu za lodním šroubem platná pouze rovnice v ose x a tím se nám rovnice zredukuje na tvar (24).

$$F_{(R)1} = \int_{S_k} \rho_{(k)} \cdot w_1 (w_j \cdot n_j) dS \quad (24)$$



Obr. 16: Rozložení rychlostí na hranici kontrolního objemu [12]

Na obrázku 16 je znázorněno zjednodušení, že střed kulové plochy je umístěn do středu lodního šroubu, protože změna hybnosti probíhá právě v tomto místě, a loď je nahrazena pouze působením odporové síly. Kulová plocha kontrolního objemu je rozložena na tři oddělené plochy, které se liší rozložením rychlostí na jednotlivých plochách, což je zobrazeno na obrázku 16.

$$S_{(k)} = S_{(1)} + S_{(2)} + S_{(3)} \quad (25)$$

$S_{(1)}$ je část kulové plochy ponořená pod hladinou, ze které je vyjmuta plocha $S_{(2)}$. Relativní rychlost na ploše $S_{(1)}$ se skládá ze dvou rychlostí, viz rovnice (26).

$$w_i = w_{(q)i} + w_{(w)i} \quad (26)$$

, kde $w_{(w)i}$ je rychlost kapaliny proudící kolem jachty. Ve skutečnosti se nepohybuje voda, ale jachta, tudíž tato rychlost odpovídá rychlosti jachty. Lodní šroub se na nátokové straně chová jako propad, to znamená, že nasává kapalinu. Další zjednodušující předpoklad je, že k nasávání dochází rovnoměrně po celém kontrolním objemu. Toto nasávání je vyjádřeno pomocí rychlosti $w_{(q)i}$, která je kolmá ke kulové ploše v každém bodě a má opačný směr než vnější normálový vektor této plochy, což vyjadřuje rovnice (27).

$$w_{(q)i} = -w_{(q)} \cdot n_i \quad (27)$$

Po dosazení (27) do (26) je získána následující rovnice:

$$w_i = -w_{(q)} \cdot n_i + w_{(w)i} \quad (28)$$

$S_{(2)}$ je plocha, kterou prochází proud kapaliny vyvolaný lodním šroubem a kterou proud z kontrolního objemu vytéká. Zjednodušující předpoklady jsou konstantní rychlost na této ploše a konstantní průřez proudu za lodním šroubem. Proto $S_{(2)}$ odpovídá velikosti plochy lodního šroubu. Na ploše $S_{(2)}$ jsou stejné rychlosti jako na ploše $S_{(1)}$, ale navíc zde vytéká zmíněná rychlost od lodního šroubu $w_{(pp)i}$, která je rovnoběžná s osou šroubu.

$$w_i = -w_{(q)} \cdot n_i + w_{(w)i} + w_{(pp)i} \quad (29)$$

$S_{(3)}$ je plocha, která se nachází nad hladinou. Dalším zjednodušením je, že tato plocha je nulová a celý kontrolní objem se nachází pod hladinou. Dále se předpokládá, že plocha $S_{(2)}$ je výrazně menší než plocha $S_{(1)}$.

Na základě uvedených předpokladů je po dosazení (29) a (28) do (24) a následných úpravách získána rovnice (30).

$$F_{(R)1} = -\frac{3}{4} w_{(w)1} \cdot w_{(q)} \cdot S_{(k)} + \rho_{(k)} \cdot w_{(pp)} \cdot (\cos \alpha \cdot w_{(pp)} - 2 \cdot \cos \alpha \cdot w_{(q)} + w_{(w)} + w_{(w)} \cdot \cos^2 \alpha) S_{(2)} \quad (30)$$

V této rovnici se vyskytují 2 neznámé $w_{(pp)}$ a $w_{(q)}$. Vztah mezi těmito dvěma rychlostmi lze získat z rovnice kontinuity pro nestlačitelnou kapalinu:

$$\int_{S_k} w_i \cdot n_i \cdot dS = 0 \quad (31)$$

Po dosazení rychlostí (29) a (28) a vyřešení integrálu je získána rovnice (32).

$$w_{(pp)i} \cdot S_{(2)} - w_{(q)} \cdot S_{(k)} = 0 \quad (32)$$

Z této rovnice lze vyjádřit $w_{(q)}$ jako funkci $w_{(pp)}$:

$$w_{(q)} = w_{(pp)} \cdot \frac{S_{(2)}}{S_{(k)}} \quad (33)$$

Kombinací rovnic (30) a (33) a z předpokladu, že plocha $S_{(2)}$ je výrazně menší než plocha $S_{(k)}$, je získána následující kvadratická rovnice pro určení rychlosti $w_{(pp)}$.

$$w_{(pp)}^2 \cdot \cos \alpha \cdot S_{(2)} + w_{(pp)} \cdot w_{(w)} \cdot S_{(2)} \cdot \left(\cos^2 \alpha - \frac{1}{3} \right) - \frac{F_{(R)1}}{\rho_{(k)}} = 0 \quad (34)$$

Řešení této kvadratické rovnice je vyjádřeno vztahem (35).

$$w_{(pp1,2)} = \frac{-w_{(w)} \cdot S_{(2)} \cdot \left(\cos^2 \alpha - \frac{1}{3}\right) \pm \sqrt{\left[w_{(w)} \cdot S_{(2)} \cdot \left(\cos^2 \alpha - \frac{1}{3}\right)\right]^2 + 4 \cdot \cos \alpha \cdot S_{(2)} \cdot \frac{F_{(R)1}}{\rho_{(k)}}}}{2 \cdot \cos \alpha \cdot S_{(2)}} \quad (35)$$

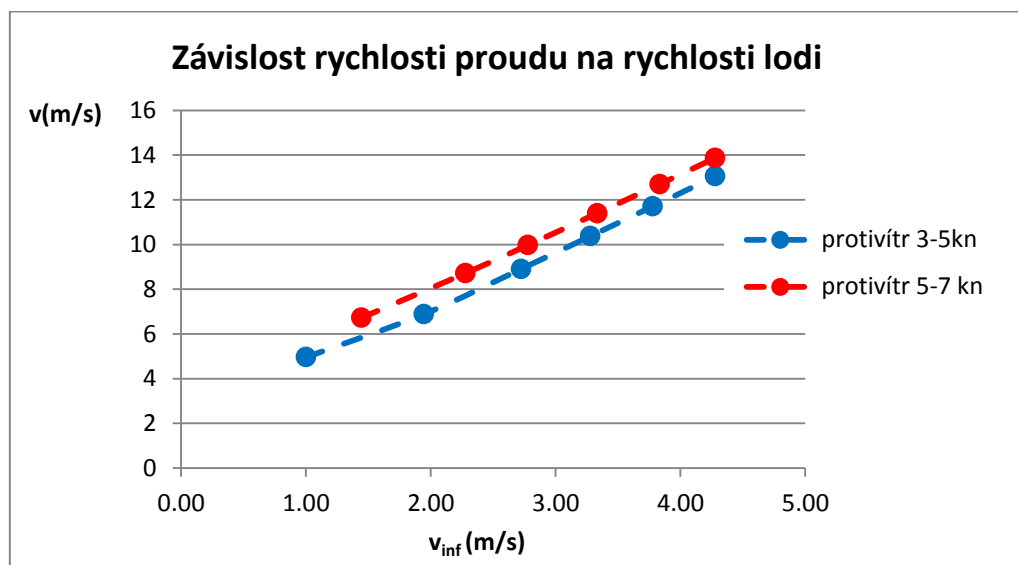
Aby měla rovnice (35) fyzikální význam musí být $w_{(pp)}$ kladné číslo. Proto ve výsledném vztahu (36) pouze přičítáme diskriminant. Bereme tedy pouze řešení s kladným znaménkem.

$$w_{(pp1)} = \frac{-w_{(w)} \cdot S_{(2)} \cdot \left(\cos^2 \alpha - \frac{1}{3}\right) + \sqrt{\left[w_{(w)} \cdot S_{(2)} \cdot \left(\cos^2 \alpha - \frac{1}{3}\right)\right]^2 + 4 \cdot \cos \alpha \cdot S_{(2)} \cdot \frac{F_{(R)1}}{\rho_{(k)}}}}{2 \cdot \cos \alpha \cdot S_{(2)}} \quad (36)$$

n [min ⁻¹]	v _∞ [m/s]	v _{pp} [m/s]	v _∞ [m/s]	v _{pp} [m/s]
750	1.166667	4.958124	-	-
1000	1.944444	6.884491	1.444444	6.727548
1400	2.722222	8.904208	2.277778	8.717599
1800	3.277778	10.37332	2.777778	9.97288
2200	3.777778	11.70646	3.333333	11.39851
2600	4.277778	13.04661	3.833333	12.70041
3100	-	-	4.277778	13.86832

Tab. 5: Rychlost proudu za lodním šroubem

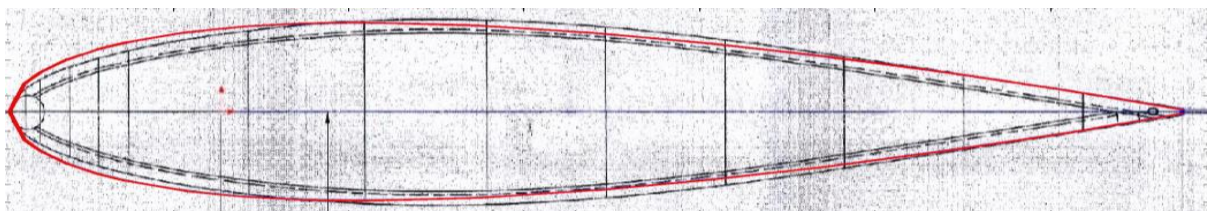
Výsledné hodnoty okrajových podmínek rychlosti jsou uvedeny v tabulce 5. Jejich závislost je znázorněna v grafu 2, kde křivka pro větší protivítr leží nad křivkou pro menší protivítr, což znamená, že pro větší protivítr je potřeba vyvinout větší výkon motoru. Při prezentování výsledků je použita hodnota rychlosti proudu za lodním šroubem jako referenční a všechny závislosti zkoumaných veličin jsou vztahovány k této rychlosti.



Graf 2: Závislost rychlosti proudu za lodním šroubem na rychlosti lodi

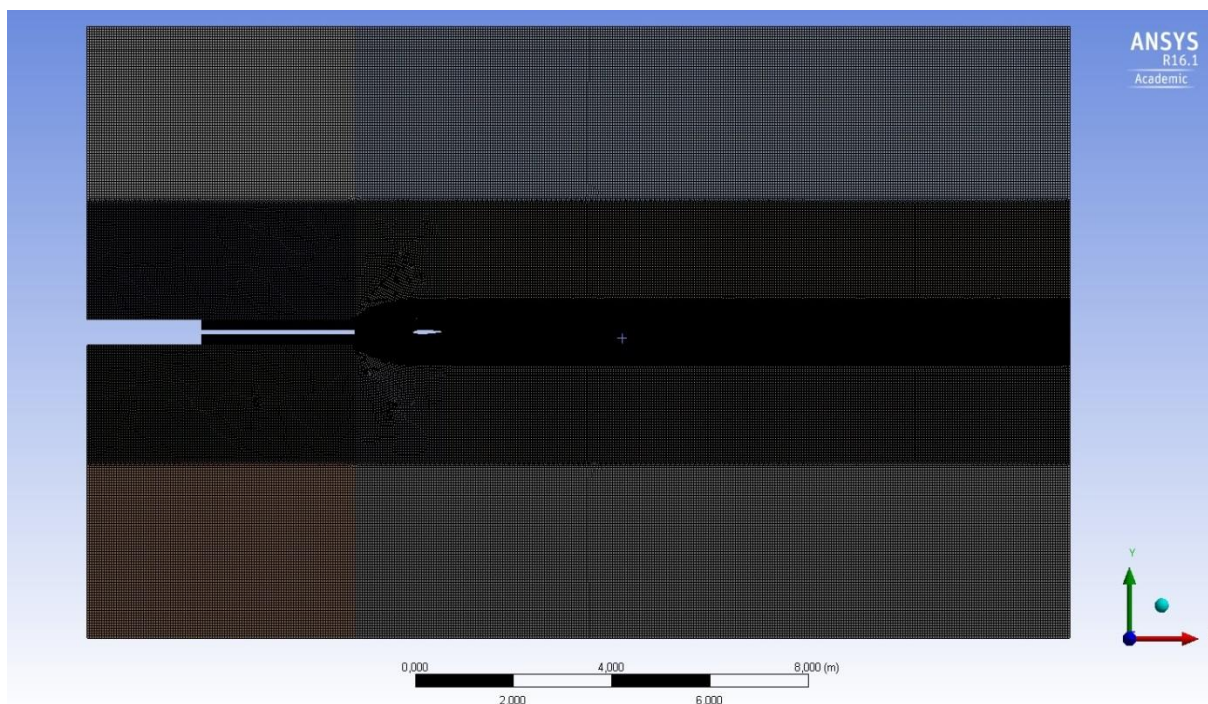
3.2.2 2D simulace

Uvedený problém byl zjednodušen na 2D problém, kdy je uvažován řez v rovině XY, který prochází středem lodního šroubu. Proud lodního šroubu musí být v tomto případě zjednodušen, protože nelze zahrnout rotaci proudu. Protože charakteristiky lodního šroubu nejsou známy, je zároveň proud za lodním šroubem nahrazen pístovým profilem. Další zjednodušení zanedbává vliv proudění kolem lodi na výsledný proud za lodním šroubem. Proudění kolem lodi je komplexní 3D proudění, kdy dochází k obtékání lodi ve dvou rovinách. Pokud je proveden řez lodi v rovině XY, nebude proudění za tímto tělesem odpovídat realitě, kdy je tekutina doplňována také ve směru osy z.



Obr. 17: Srovnání NACA0015 a originálního profilu kormidla

Výsledným modelem je tedy profil kormidla umístěný v paprsku proudu, který je obklopen paralelním proudem. Vodní paprsek má průměr lodního šroubu 0,508 m. Jako profil kormidla byl uvažován profil NACA0015, který je velmi podobný kormidlu uvedenému ve výkresové dokumentaci, viz obrázek 17. Profil NACA0015 je symetrický profil s maximální tloušťkou 15% délky tělvy. Kormidlo má po celé své délce proměnnou délku tělvy. Pro 2D simulaci byl proveden řez rovinou procházející středem lodního šroubu. Délka tělvy v této rovině je 681,77 mm. Osa otáčení kormidla je umístěna dle výkresové dokumentace 122 mm od náběžné hrany, což je v 17% délky tělvy.

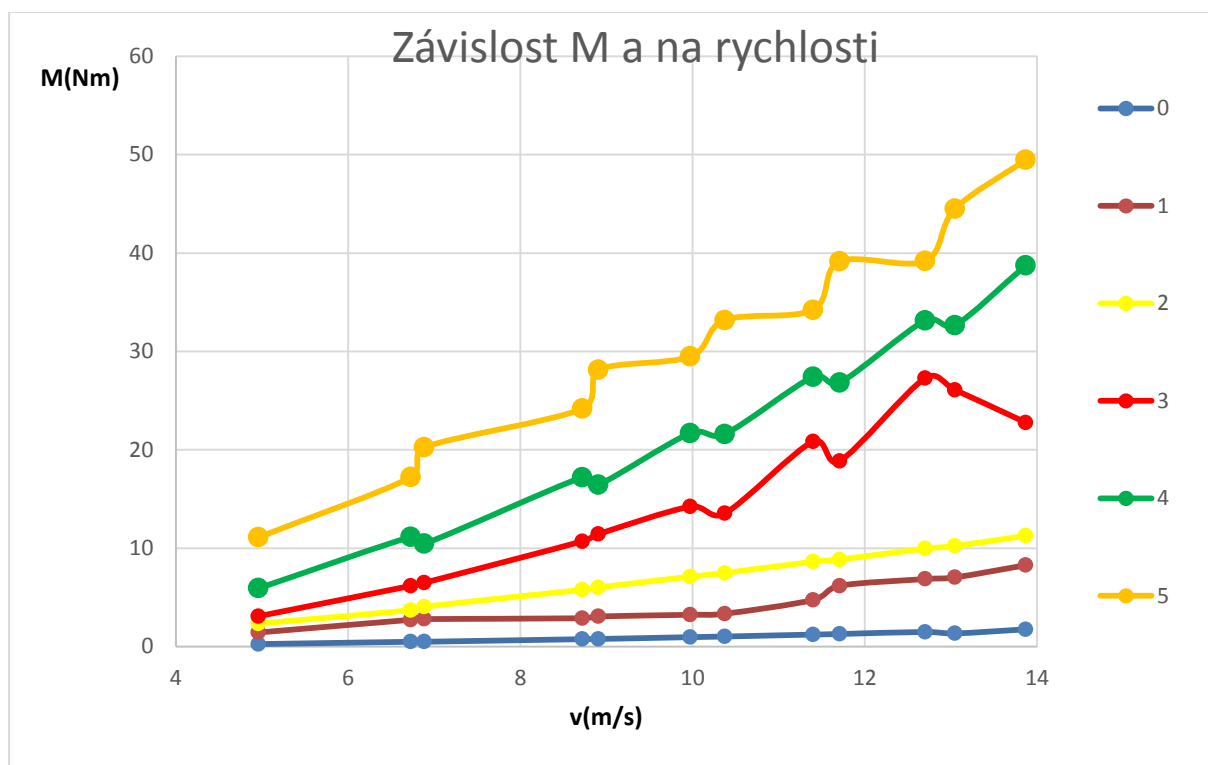


Obr. 18: Výpočetní síť

Byla snaha vytvořit podobnou výpočetní síť pro všechny případy. Výpočetní síť byla zjemněna v okolí profilu kormidla a měla ve všech případech přibližně 300 000 buněk a je znázorněna na obrázku 18. Kvalita sítě je hodnocena na základě faktoru koeficientu šikmosti. Maximální hodnota koeficientu šikmosti je 0,71. Okrajové podmínky byly získány v předchozí kapitole.

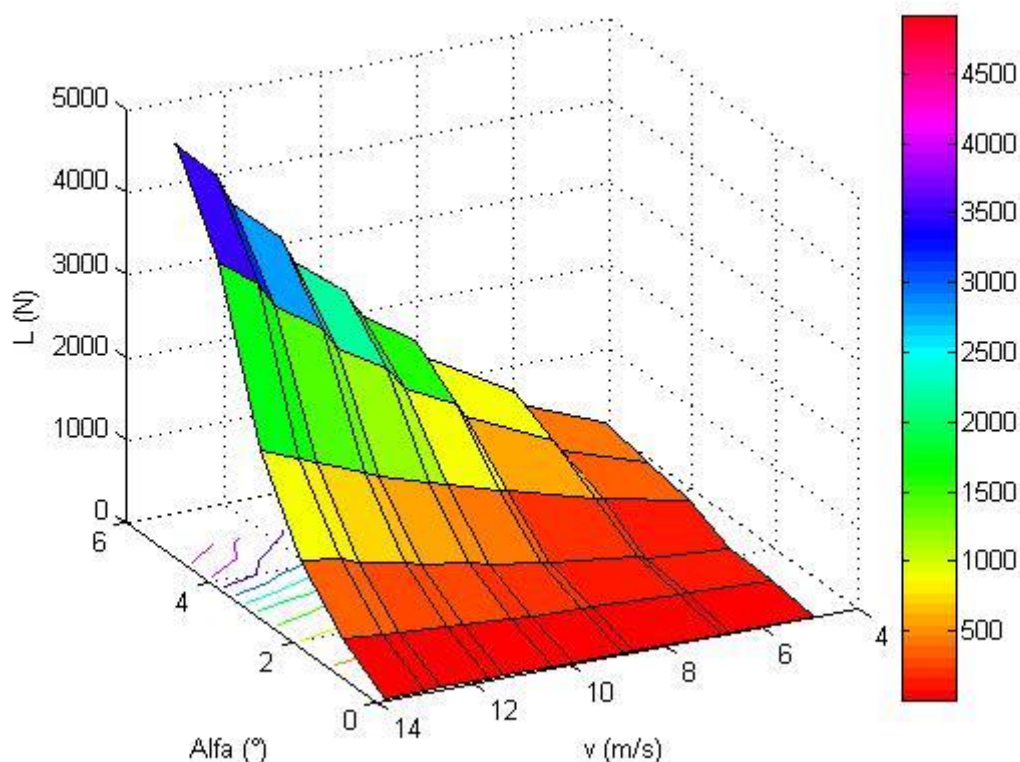
3.2.2.1 Natočení kormidla

Jako první je sledován vliv natočení kormidla, respektive změna náběžného úhlu. To odpovídá běžnému provozu kormidla, kdy je natočením kormidla docíleno vzniku kormidlového momentu a následného zatáčení lodí.



Graf 3: Vliv natočení kormidla na moment na kormidlo

Na grafu 3 je znázorněn moment kolem osy kormidla. Pro maximální natočení 5° a maximální rychlost 13,86 m/s dosahuje tento moment maximální hodnoty 49,5 Nm. Tento moment vyvodí pomocí převodů moment o velikosti 6,4 Nm na kormidelní kolo. Pro vyvolání tohoto momentu je potřeba vyvinout na obvodu kola sílu odpovídající 0,9 kg. V grafu je zároveň vidět, že hodnoty přídavných momentů jsou velmi nízké do natočení kormidla 2°, kdy při této hodnotě je třeba na kormidelním kole kompenzovat moment o velikosti 1,3 Nm.



Graf 4: Vliv natočení kormidla a rychlosti proudu za lodním šroubem na vztlakovou sílu

Na grafu 4 je znázorněno, jak se mění vztlaková síla v závislosti na natočení kormidla, a zároveň s rychlostí proudu za lodním šroubem. Z grafu plyne, že maximální hodnoty je dosaženo pro maximální natočení v kombinaci s maximální rychlostí. Graf není dostatečně přehledný, a proto je v následných případech použit 2D graf, kde je vztlaková síla závislá pouze na jedné veličině. Při zobrazení závislosti vztlakové síly na rychlosti je zřejmá kvadratická závislost. Vztlaková síla je funkcí koeficientu vztlakové síly, plochy kolmé ke vztlakové síle a dynamického tlaku., viz rovnice (6), proto lze kvadratickou závislost očekávat.

Tato kvadratická závislost je vyjádřena pomocí rovnice (37), kde C je regresní koeficient a jeho hodnota je určena pomocí metody nejmenších čtverců. Ze srovnání rovnice (6) a (37) plyne, že koeficient C je substitucí $0,5 \cdot A \cdot C_l$.

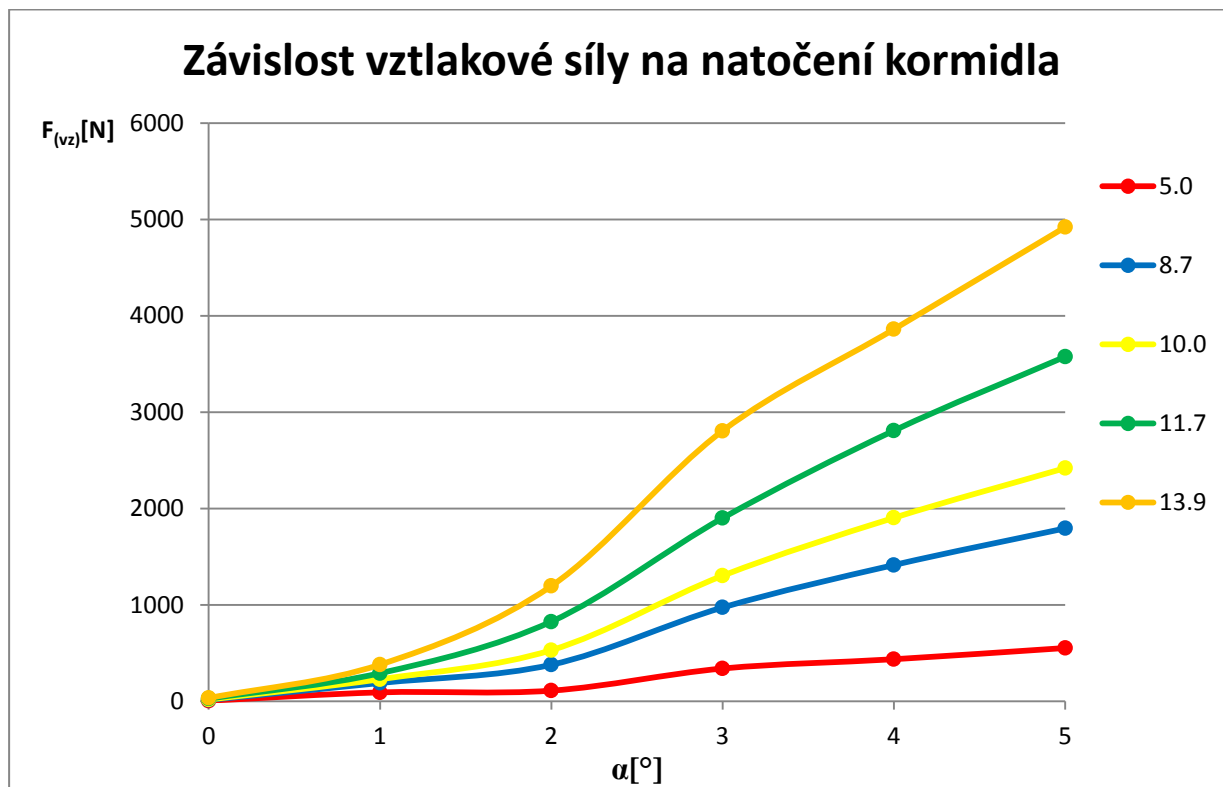
$$F_l = C \cdot v^2 \quad (37)$$

Protože S je konstantní pro všechny pozorované případy, je koeficient C přímo úměrný koeficientu vztlakové síly C_l .

Úhel	0	1	2	3	4	5
C	0.02	1.93	5.92	13.96	20.20	25.46

Tab. 6: Regresní koeficienty vztlakové síly pro změnu natočení kormidla

V tabulce 6 jsou uvedeny hodnoty regresních koeficientů pro různé natočení kormidla. Z teorie plyne, že pro paralelní proud je změna koeficientu vztlakové síly lineární se změnou náběžného úhlu. Podobné chování lze očekávat pro kormidlo za lodním šroubem. Z regresních koeficientů v tabulce 6 a grafu 5, kde je znázorněna závislost vztlakové síly na natočení kormidla, lze prohlásit, že se jedná o lineární závislost i pro tento případ. Avšak pro malé úhly natočení kormidla je odezva vztlaku na natočení nižší.

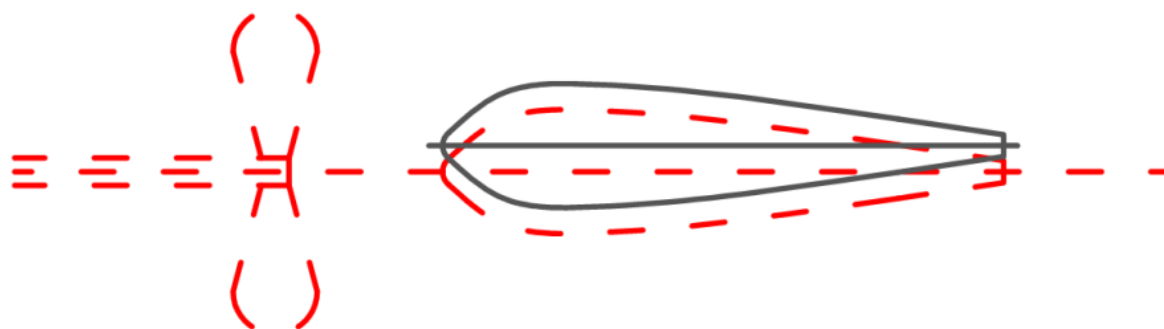


Graf 5: Závislost vztlakové síly na natočení kormidla pro různé rychlosti

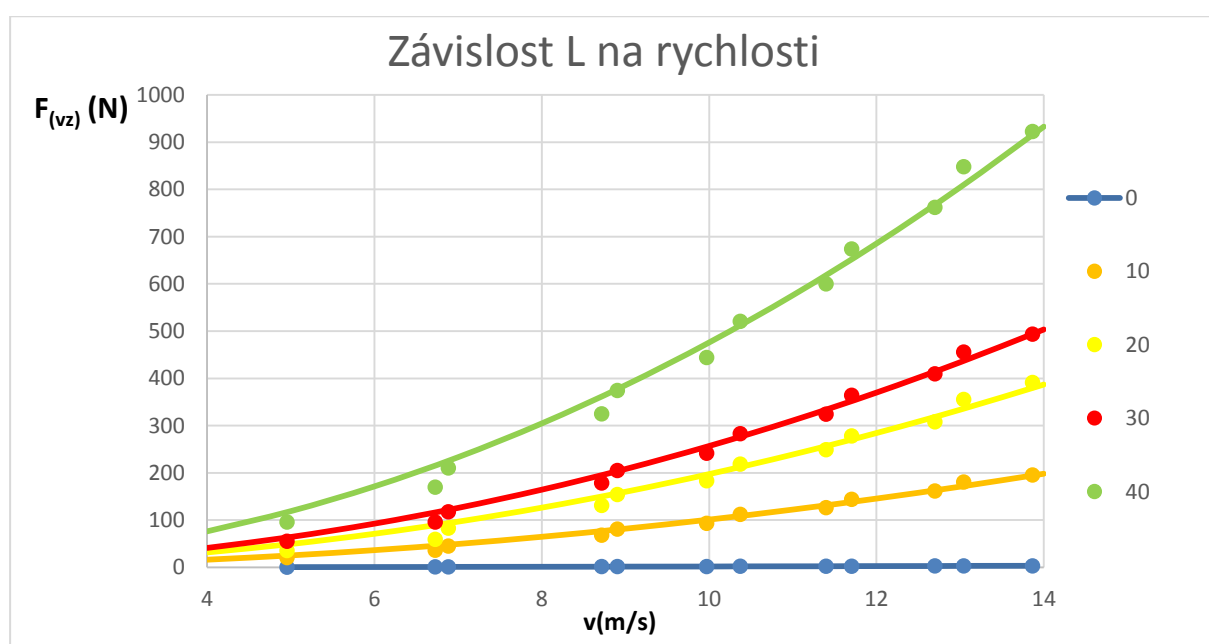
Protože neznáme vzdálenost působíště vztlakové síly od působíště síly kormidla, bude charakteristika závislosti vztlakové síly na natočení kormidla použita jako měřítko vlivu vztlakové síly. V dodané dokumentaci je uvedeno maximální natočení kormidla 35°. V literatuře [15] je uveden úhel náběhu 16°, při němž dochází k odtržení od profilu pro Reynoldsovo číslo 68 490. Úhel náběhu, při němž dochází k odtržení od profilu, je funkcí Reynoldsova čísla. Čím větší Reynoldsovo číslo, tím větší úhel náběhu. Tyto změny ale nejsou výrazné. Proto pro sledovaný případ, kdy je Reynoldsovo číslo $4 \cdot 10^7$, bude hodnota maximálního úhlu náběhu blízká 16°.

3.2.2.2 Odsazení kormidla od osy šroubu

V této kapitole bude sledován vliv odsazení kormidla od osy šroubu. V paralelním proudu nezáleží na poloze kormidla, ale pouze na jeho natočení. Avšak pokud do paralelního proudu umístíme paprsek vody o jiné rychlosti, může docházet ke vzniku vztlaku a momentu na kormidlo pouze při změně polohy kormidla. Odsazení je zobrazeno na obrázku 19 a velikost odsazení je dána vzdáleností osy šroubu od osy kormidla. Výpočty jsou provedeny pro odsazení 10 mm, 20 mm, 30 mm a 40 mm.



Obr. 19: Odsazení kormidla od osy šroubu



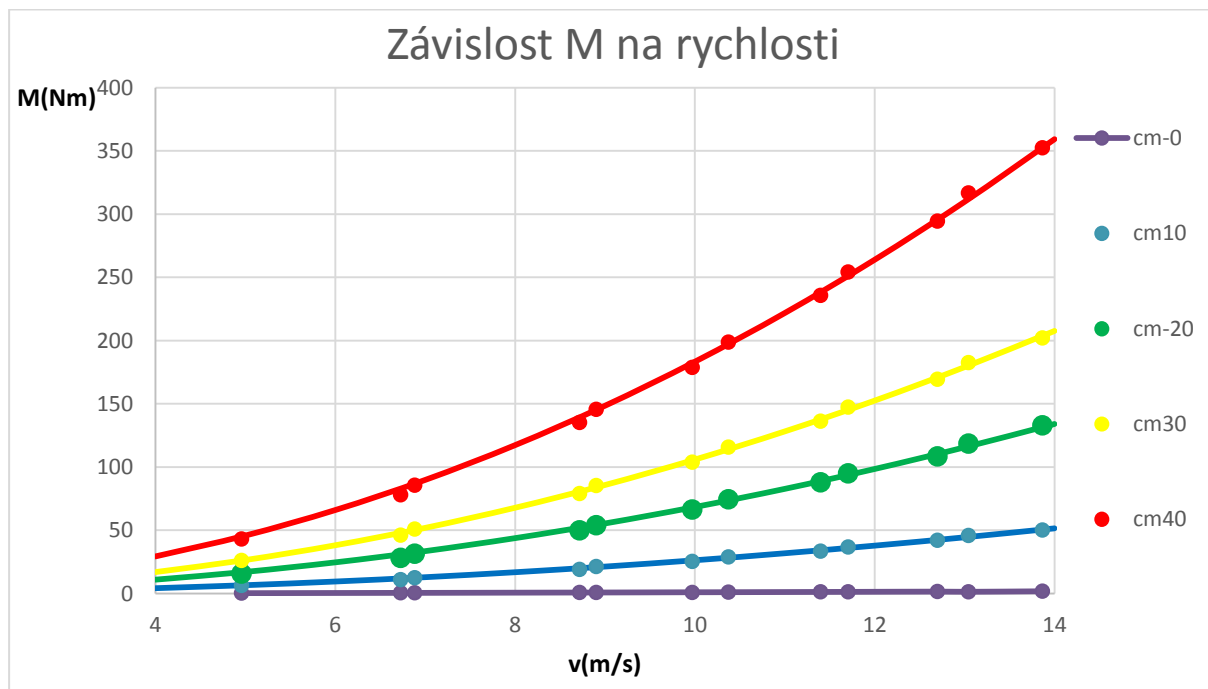
Graf 6: Vliv odsazení kormidla od osy šroubu na vztlakovou sílu

V grafu 6 je znázorněna závislost vztlakové síly na rychlosti proudu za lodním šroubem. Maximální hodnota vztlakové síly je dosažena pro odsazení 40mm a má hodnotu 922 N, což odpovídá natočení kormidla o cca 1,6°, takže se nejedná o zanedbatelnou hodnotu. Pro odsazení 20 mm koresponduje velikost vztlakové síly s natočením kormidla 1°, které odpovídá natočení kormidelního kola o 7,7°. Z toho plyne, že působení vztlakové síly pro odsazení 10 mm bude obtížně pozorovatelné.

odsazení	0	10	20	30	40
C	0.02	1.02	2.03	2.63	4.82

Tab. 7: Regresní koeficienty vztlakové síly

Získané hodnoty vztlakové síly byly proloženy křivkami určenými rovnicí (37). Získané regresní koeficienty jsou uvedeny v tabulce 7 a nelze z nich určit žádnou závislost.



Graf 7: Vliv odsazení kormidla od osy šroubu na moment na kormidlo

Maximální hodnota momentu kolem osy kormidla je 353 Nm pro odsazení 40 mm. Tento moment se na kormidelním kole projeví momentem 45,8 Nm, což odpovídá síle 65 N na obvodu kola.

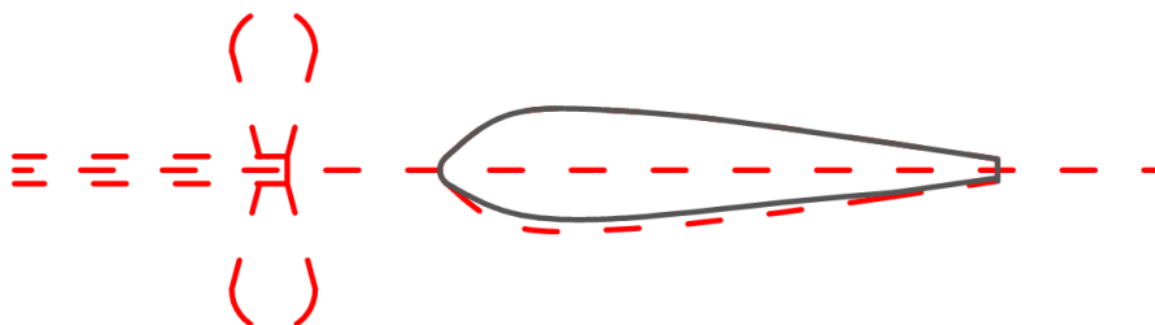
odsazení	0	10	20	30	40
C	0.01	0.27	0.68	1.04	1.82

Tab. 8: Regresní koeficient momentu kormidla

Protože v grafickém znázornění průběhu momentu na rychlosti lze pozorovat kvadratickou závislost, bylo provedeno proložení hodnot křivkami dle rovnice (37). Závislost koeficientu C na odsazení také připomíná kvadratickou závislost. Obdobně byl získán regresní koeficient proložení naměřených hodnot z reálného případu a jeho hodnota je 0,93. Pokud tuto hodnotu porovnáme s koeficienty pro odsazení kormidla, leží mezi hodnotami pro odsazení 20 a 30 mm blíže ke 30 mm. Z toho plyne, že problém v případě dané jachty by mohl být způsoben odsazením kormidla od osy šroubu o cca 25 mm.

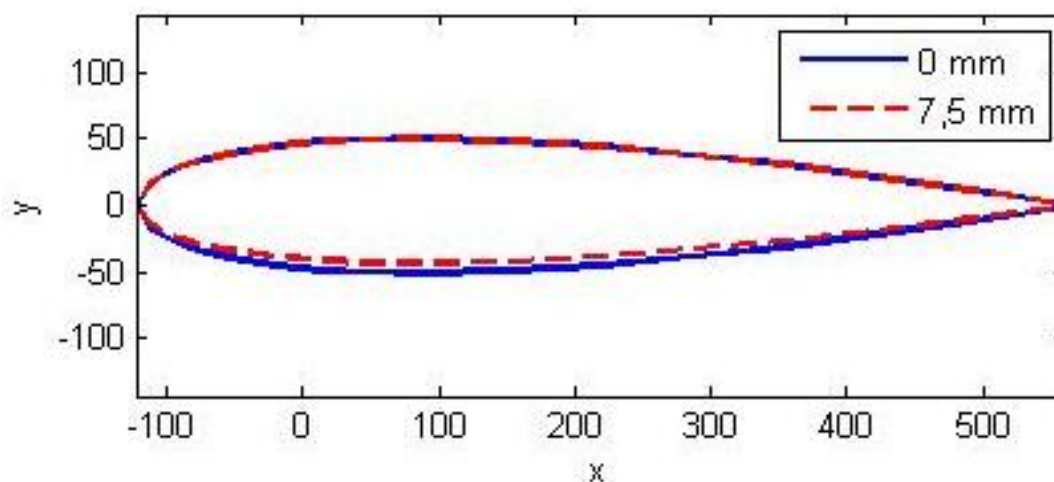
3.2.2.3 Nesymetrické kormidlo

V této kapitole je rozebrán vliv nesymetrie kormidla na výsledný vztlak a moment na kormidlo. Hodnota nesymetrie je udávána jako rozdíl nejvzdálenějších bodů od osy kormidla na každé straně profilu. Poměrně byl ubrán materiál po celé délce kormidla. Počítány byly hodnoty pro 2,5 mm, 5 mm a 7,5 mm, což odpovídá přibližně ubrání materiálu o 5%, 10% a 15%.



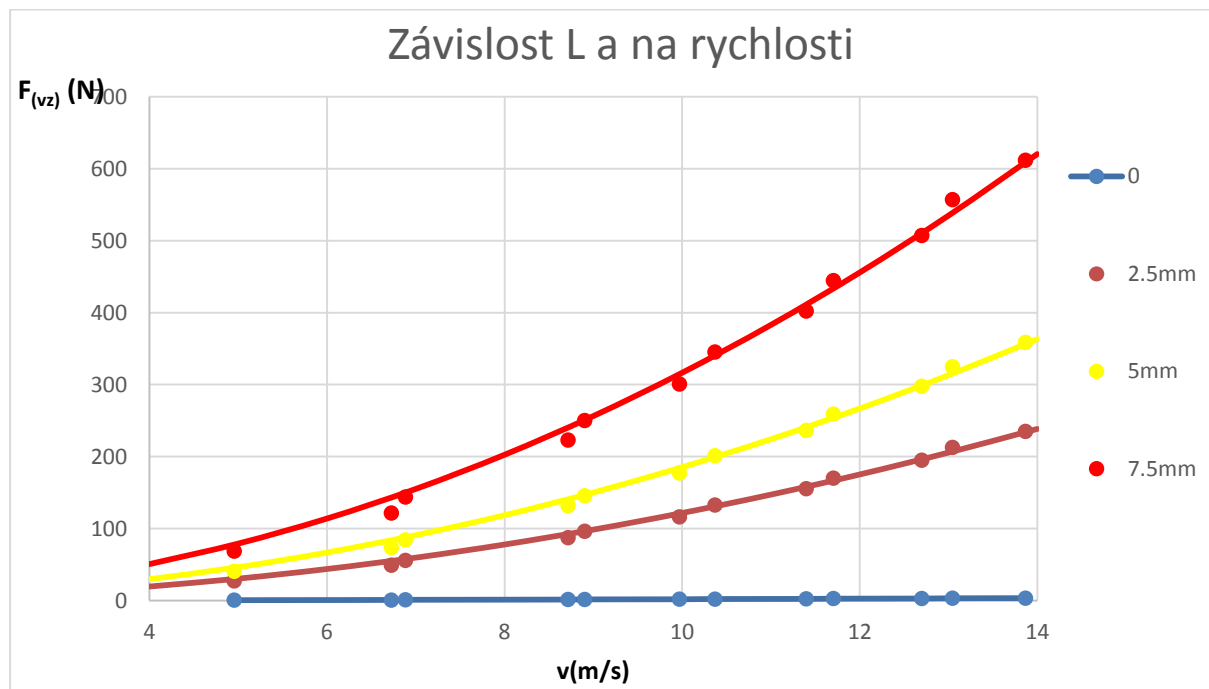
Obr. 20: Nesymetrické kormidlo

Nesymetrie kormidla je běžně používaný způsob získání vztlakové síly. Prohnutí středové čáry profilu vytváří vztlak při nulovém úhlu náběhu. Tento mechanismus je používán zejména v případech, kdy potřebujeme vyvolat vztlakovou sílu pouze jedním směrem. Proto lze tento typ profilu najít u lopatkových strojů, letadel, nebo přitlačných prvků automobilů. Díky širokým možnostem aplikace je tento jev hojně zkoumán, zejména ale pro paralelní proud.



Obr. 21: Nesymetrické kormidlo v měřítku

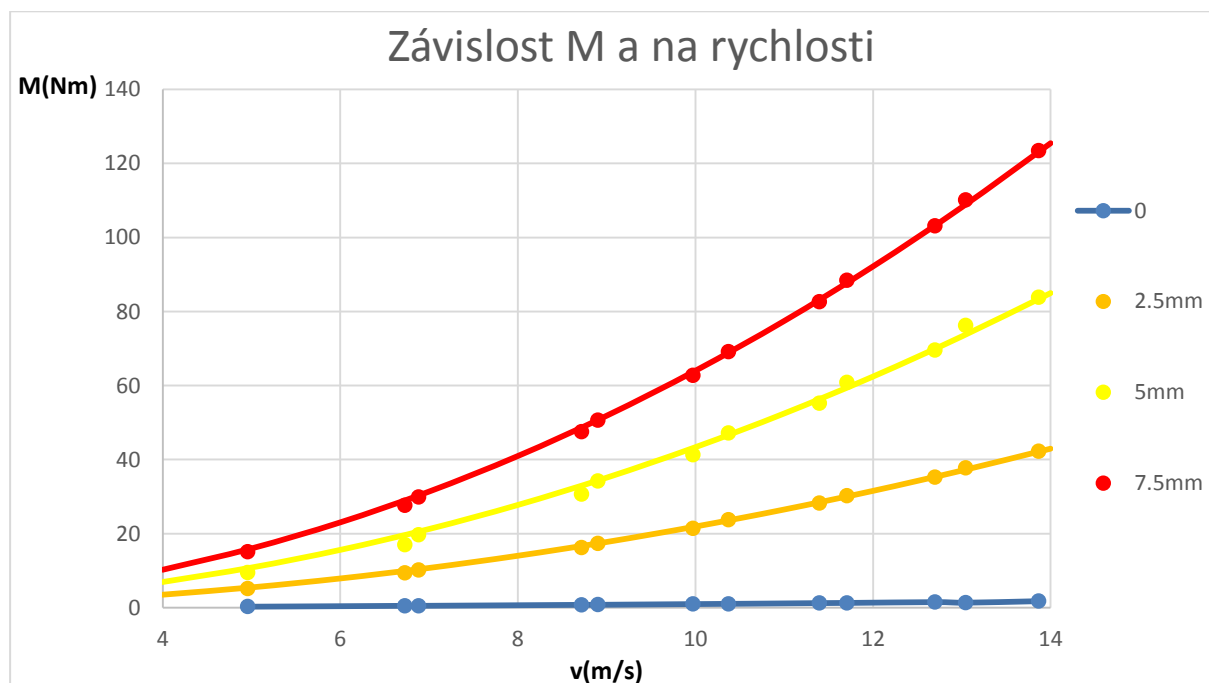
V grafu 8 je znázorněn průběh vztlakové síly na rychlosti proudu za lodním šroubem. Opět je vidět kvadratická závislost, a proto je provedena regresní analýza. Maximální hodnota vztlaku je dosažena při maximální rychlosti a nesymetrii o velikosti 7,5mm. Její hodnota je 600 N, což odpovídá natočení kormidla o cca 1,3°. Zároveň pokud porovnáme regresní koeficienty (tabulka 9) s koeficienty (tabulka 6) pro natočení kormidla, odpovídá nesymetrie 7,5 mm natočení o 1,3° a 5 mm 1°.



Graf 8: Vliv nesymetrie kormidla na vztakovou sílu

nesymetrie	0	2,5 mm	5 mm	7,5 mm
C	0.02	1.22	1.85	3.20

Tab. 9: Regresní koeficient vztakové síly



Graf 9: Vliv nesymetrie kormidla na moment na kormidlo

Graf 9 znázorňuje průběh momentu na kormidlo v závislosti na rychlosti proudu za lodním šroubem. Z grafu opět vyplývá kvadratická závislost, a tak lze hodnoty proložit křivkami dle rovnice (37). Maximální moment je dosažen pro nesymetrii 7,5 mm při

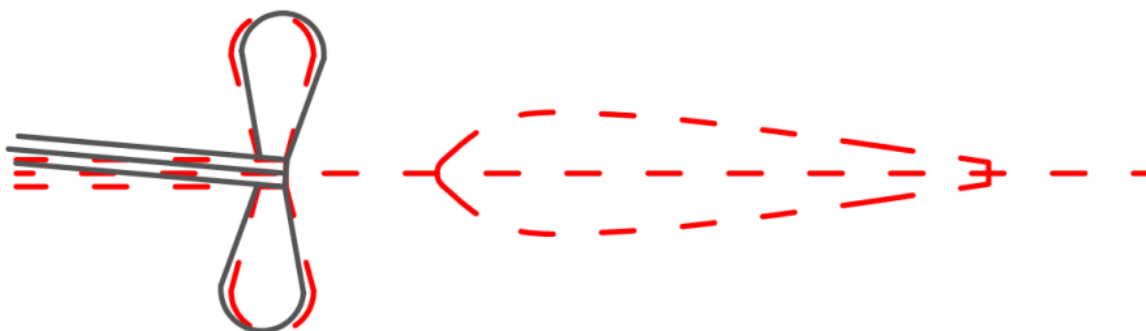
maximální rychlosti. Jeho hodnota je 120 Nm, což je poloviční hodnota ve srovnání s naměřenými hodnotami. Avšak moment na kormidlo závisí na vzdálenosti osy kormidla od působíště vztlakové síly. Z aerodynamiky je známo, že působíště vztlakové síly závisí na tvaru profilu. V počítaném případě byla nesymetrie zjednodušeně rozložena rovnoměrně na jedné straně profilu. Pokud by byla tato nesymetrie rozložena jiným způsobem po délce kormidla, změnilo by se proudění kolem profilu včetně působíště vztlakové síly. Proto je téměř nemožné tento případ zobecnit. V tabulce 10 jsou uvedeny regresní koeficienty, které jsou lineárně závislé. Z této závislosti lze odhadnout, že k získání momentu naměřeného v reálném případě by byla nutná nesymetrie přibližně 11 mm.

nesymetrie	0	2,5 mm	5 mm	7,5 mm
C	0.01	0.23	0.44	0.64

Tab. 10: Regresní koeficienty momentu na kormidlo

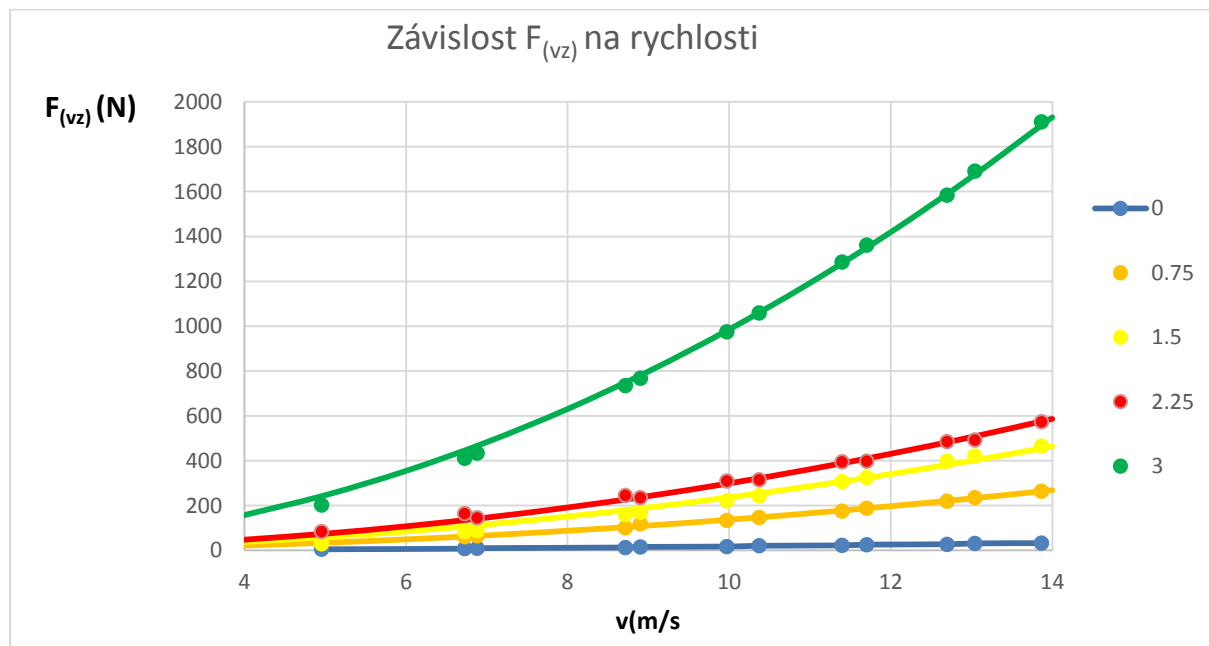
3.2.2.4 Natočení lodního šroubu

Další pozorovaná nepřesnost je natočení lodního šroubu, což je znázorněno na obrázku 22. V tomto případě dochází ke změně náběžného úhlu, a proto by měl být blízký natočení kormidla (3.2.2.1). Srovnání těchto dvou případů bude provedeno v této kapitole. Výpočet byl proveden pro natočení $0,75^\circ$, $1,5^\circ$, $2,25^\circ$ a 3° .



Obr. 22: Natočení lodního šroubu

Průběh vztlakové síly v závislosti na rychlosti proudu za lodním šroubem je dle očekávání kvadratický. Jeho maximální hodnota je dosažena pro natočení šroubu o 3° a při rychlosti proudu 13,8 m/s dosahuje hodnota vztlakové síly 1 911 N, což odpovídá přibližně $2/3$ vztlakové síly pro natočení kormidla o 3° při stejné rychlosti. Podobný poměr je i pro regresní koeficienty při natočení o 3° .

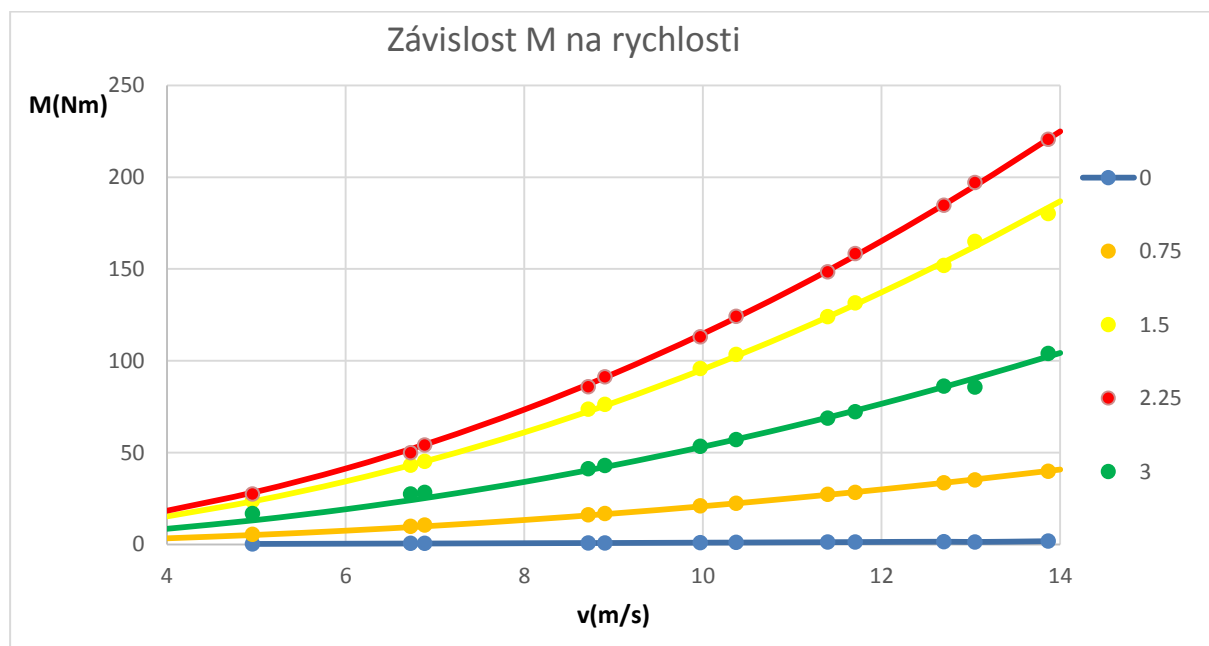


Graf 10: Vliv natočení lodního šroubu na vztlakovou sílu

úhel	0	0.75	1.5	2.25	3
C	0.02	1.40	2.49	2.93	10.56

Tab. 11: Regresní koeficienty vztlakové síly

V regresních koeficientech lze pozorovat velký skok pro natočení 3° . Pro menší natočení je vztlaková síla výrazně menší. Pokud ji ale porovnáme s hodnotami získanými pro případ nesymetrického kormidla, nebo odsazení kormidla, zjistíme, že hodnoty jsou podobné právě pro natočení menší než 3° .



Graf 11: Vliv natočení lodního šroubu na moment na kormidlo

V závislosti momentu na rychlosti lze opět pozorovat kvadratickou závislost. Zajímavé je, že maximálního momentu není dosaženo pro maximální natočení, ale pro natočení $2,25^\circ$. Maximální moment pro rychlost 13,8 m/s a natočení $2,25^\circ$ je 220 Nm a pro natočení 3° je moment poloviční. Vliv natočení lodního šroubu je zobrazen v tabulce 12.

úhel	0	0.75	1.5	2.25	3
C	0.01	0.21	0.86	1.19	0.52

Tab. 12: Regresní koeficienty momentu na kormidlo

3.2.2.5 Shrnutí

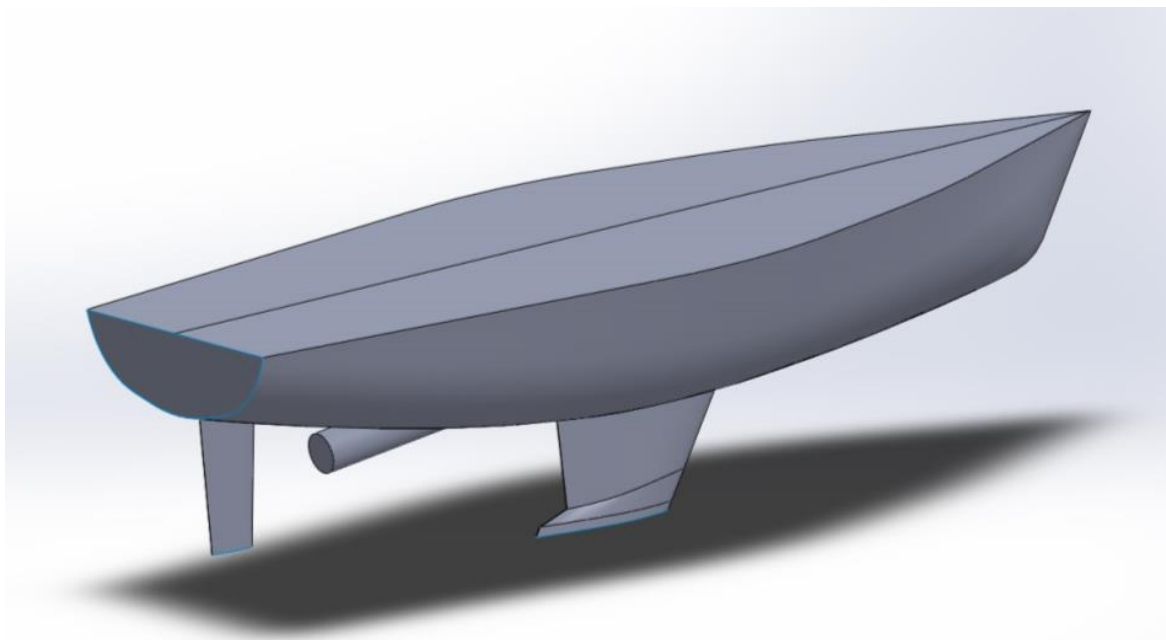
Při srovnání vzniku vztlakové síly a z ní plynoucích momentů lze pozorovat výrazný rozdíl v poměru vzniku vztlakové síly a momentu na kormidlo. Při běžném provozu přesně vyrobeného kormidla dochází ke vzniku velké vztlakové síly, která je ale doprovázena pouze malými hodnotami momentu na kormidlo. To je způsobeno tím, že kormidlo je optimalizováno pro tento případ a působíště vztlakové síly leží velmi blízko osy kormidla. Pokud kormidlo obsahuje výrobní nepřesnost, dochází ke vzniku výrazně větších momentů na kormidlo při stejné změně vztlakové síly. Momentu, který byl naměřen během provozu jachty, odpovídají přibližně hodnoty vypočtené pro odsazení 30 mm a natočení šroubu $2,25^\circ$. Pro nesymetrické kormidlo byl získán pouze poloviční moment pro hodnotu nesymetrie 7,5 mm. Tyto momenty vznikají zejména díky působení vztlakové síly, která způsobuje zatáčení lodi. Pro momenty odpovídající naměřeným hodnotám se vztlaková síla pohybuje v hodnotách korespondujících s natočením kormidla o $1-2^\circ$. Toto natočení bude nutné k eliminaci kormidlového momentu a následného zatáčení lodi.

3.2.3 3D simulace

Pro větší přiblížení počítaných výsledků realitě je provedeno také výpočetní modelování proudění kapaliny kolem kormidla ve trojrozměrném prostoru. V tomto případě jde o zohlednění vlivu proudění kolem jachty.

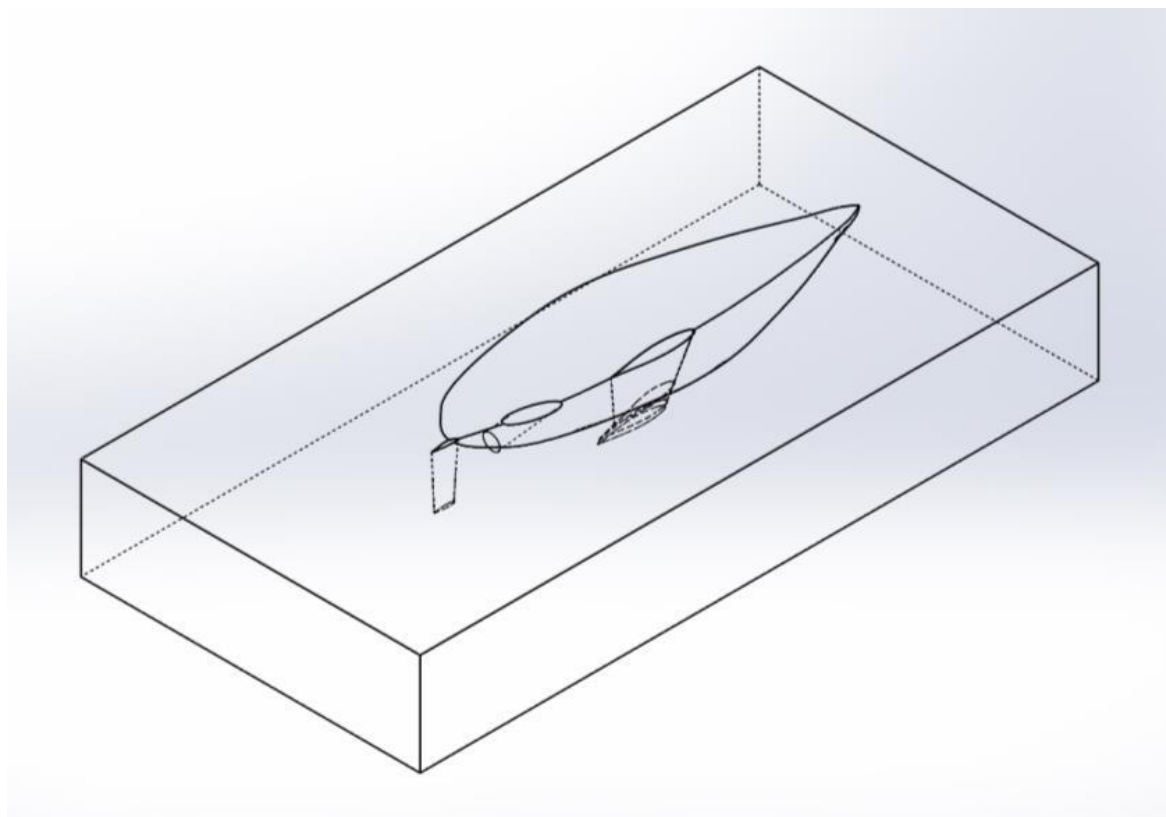
Byl vytvořen 3D model jachty dle dodané dokumentace. Délka jachty je 13,75 m, šířka 5 m, výška trupu je 2,1 m a výška kýlu 1,5 m. Čára ponoru, která běžně udává ponořenou část lodi, je 0,75 m od dna jachty. Lodní šroub včetně hřídele byl nahrazen válcem, ze kterého vychází proud kapaliny. Tento válec je stejně jako hřídel lodního šroubu sklopen o $7,125^\circ$. Kormidlo taktéž odpovídá výkresové dokumentaci, má proměnnou délku tětiny, která nabývá hodnoty od 600 do 800 mm. Osa kormidla je nakloněna pod úhlem $3,5^\circ$ a je umístěna v 17 % délky tětiny po celé délce kormidla.

V trojrozměrném případě je zkoumána pouze nesymetrie kormidla. Je vybrána, protože ve skutečném případě se jednalo právě o tento problém. Nesymetrie je tentokrát označena v procentech, která znázorňují rovnoměrný úběr materiálu na jedné straně kormidla. Jsou pozorovány tři případy: 5 %, 10 % a 15 %, což koresponduje s 2,5 mm, 5 mm a 7,5 mm ve 2D simulaci.



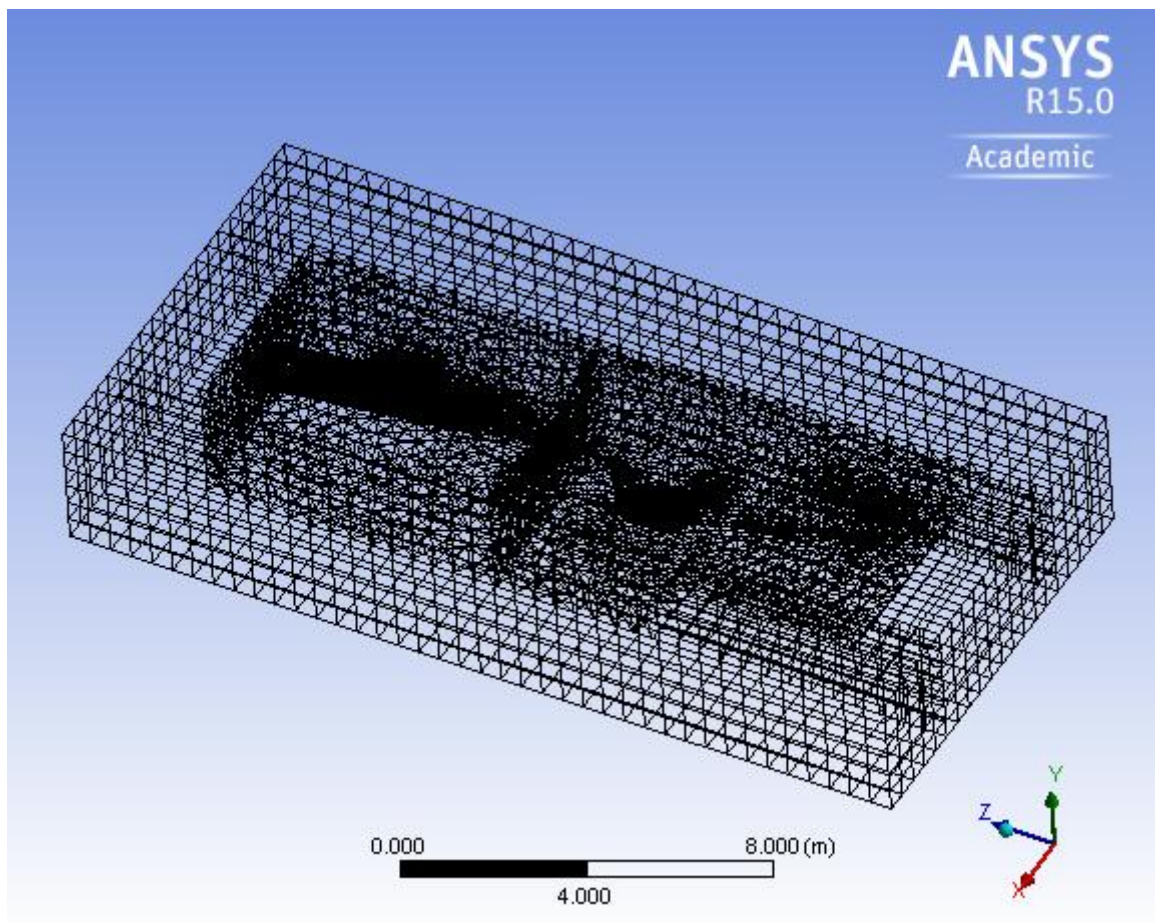
Obr. 23: Zjednodušený model jachty

Takto vytvořený model zobrazený na obrázku 23 byl umístěn do virtuálního kanálu o rozměrech 20x10x3 m. Kanál je široký, aby byl minimalizován vliv stěn kanálu na výsledek. Protože při výpočtu je zanedbán vliv proudění vzduchu a povrchové vlny, je z kanálu vyjmut pouze průnik ponořené části modelu lodi a kanálu. Takovýmto postupem získáme výpočetní doménu zobrazenou na obrázku 24.



Obr. 24: Výpočetní doména pro 3D výpočet

Výpočetní síť byla limitovaná počtem buněk 512 000 pro školní licenci programu FLUENT. Z toho plyne velmi hrubá výpočetní síť. Kvalita sítě je hodnocena na základě faktoru koeficientu šikmosti. Maximální hodnota koeficientu šikmosti je 0,91. Náhled výpočetní sítě je zobrazen na obrázku 25.



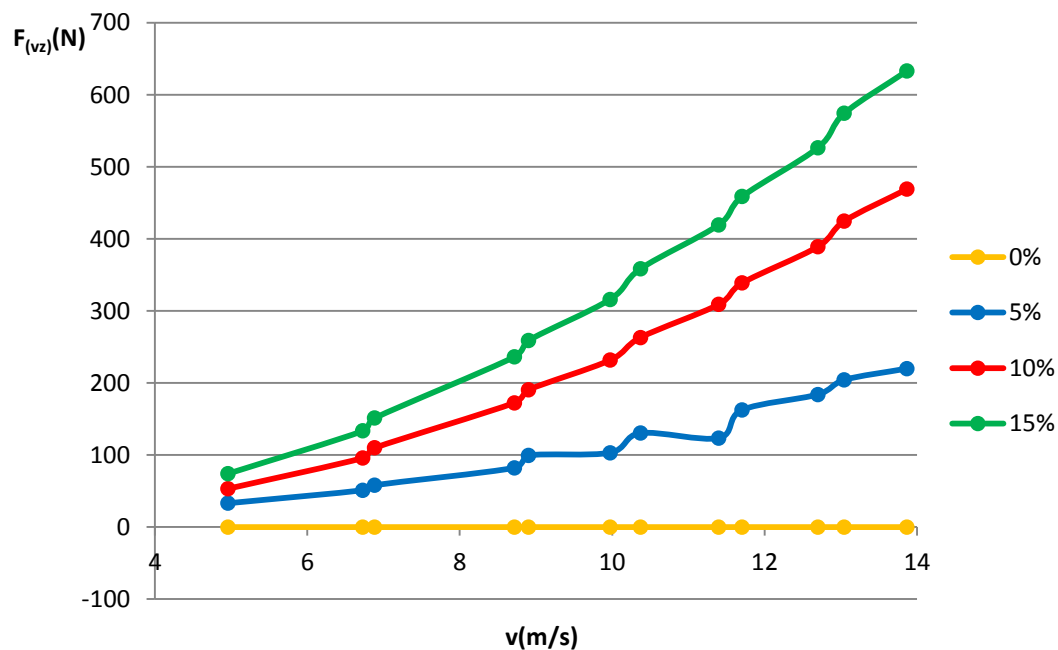
Obr. 25: Výpočetní síť pro 3D výpočet

3.2.3.1 Nerotující proud

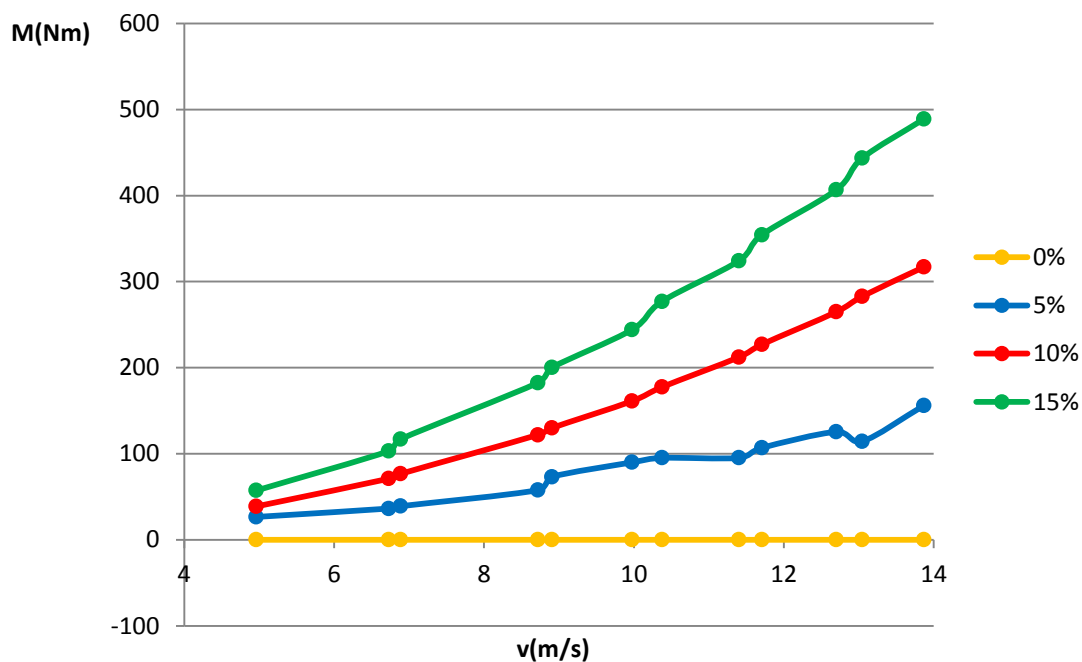
V prvním případě je proud vycházející z lodního šroubu nahrazen paprskem vody bez obvodové složky. Jedná se o zjednodušení, které je ale blízké 2D simulaci, ve které nebylo možné aplikovat rotační složku. Tento případ můžeme pozorovat i u reálných lodí, pokud je u nich pro pohon použita tryska místo lodního šroubu.

Získané výsledky opět korespondují s očekávaným kvadratickým průběhem. Největší vztlkové síly je dosaženo při největší sledované nesymetrii a rychlosti 13,8 m/s. Její hodnota je 633 N. Pro tento případ nejsou spočteny hodnoty vztlkové síly pro natočení kormidla, a tak je nemožné určit efekt této síly na výsledné zatažení lodi.

Maximální moment na kormidlo působí při stejných podmínkách jako maximální vztlková síla. Jeho hodnota je 489 N. Pro případ nesymetrie 10 %, který odpovídá skutečnému případu, je hodnota momentu 317 Nm pro maximální rychlost. Ve skutečném případě je tato hodnota 240 Nm.



Graf 12: Vliv nesymetrie kormidla na vztlakovou sílu



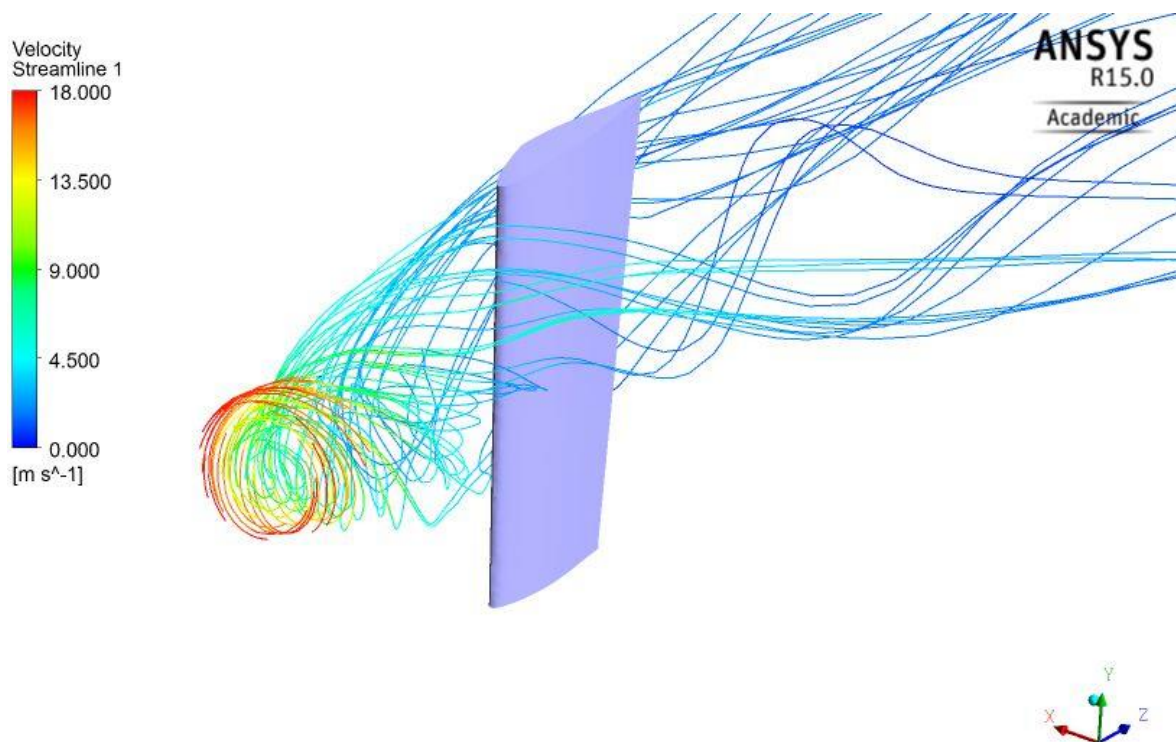
Graf 13: Vliv nesymetrie kormidla na moment na kormidlo

3.2.3.2 Rotující proud

V případě skutečné jachty, která je při pohonu na motor poháněna lodním šroubem, je nutné uvažovat rotační složku proudu. Charakteristiky lodního šroubu dané jachty nejsou známy. Zároveň nejsou k dispozici charakteristiky jiného šroubu, a tak je nejprve uvažován proud rotující jako pevné těleso, kdy je obvodová rychlost proudu určena rovnicí (38).

$$v_t = r \cdot n \cdot 2 \cdot \pi \quad (38)$$

, kde r je poloměr výskytu rychlosti a n jsou otáčky. Při dosažení otáček uvedených při měření je tangenciální rychlost tak velká, že okamžitě za lodním šroubem dochází k rozpadu proudu, viz obrázek 26.



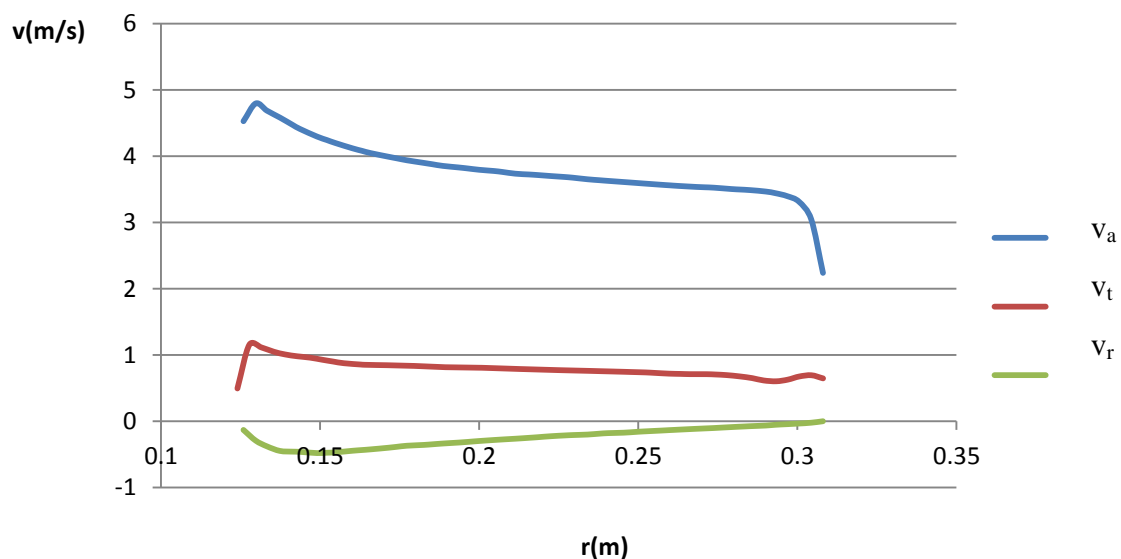
Obr. 26: Znáornění proudění rotujícího proudu kolem kormidla

Tento druh proudění neodpovídá realitě, a tak je pro výpočet použita odlišná úvaha. Do lodního šroubu vtéká voda bez rotační složky, kterou získává až průtokem lodním šroubem. Stejným způsobem se chová také vírová turbína. Vzhledově je možné vírovou turbínu zaměnit za lodní šroub, viz obrázek 27.



Obr. 27: Srovnání lodního šroubu (vpravo) a vírové turbíny (vlevo) [12,17]

Charakteristiky proudění za oběžným kolem vírové turbíny jsou k dispozici na Odboru fluidního inženýrství. Charakteristika uvedená v grafu 14 byla použita pro nahrazení lodního šroubu.

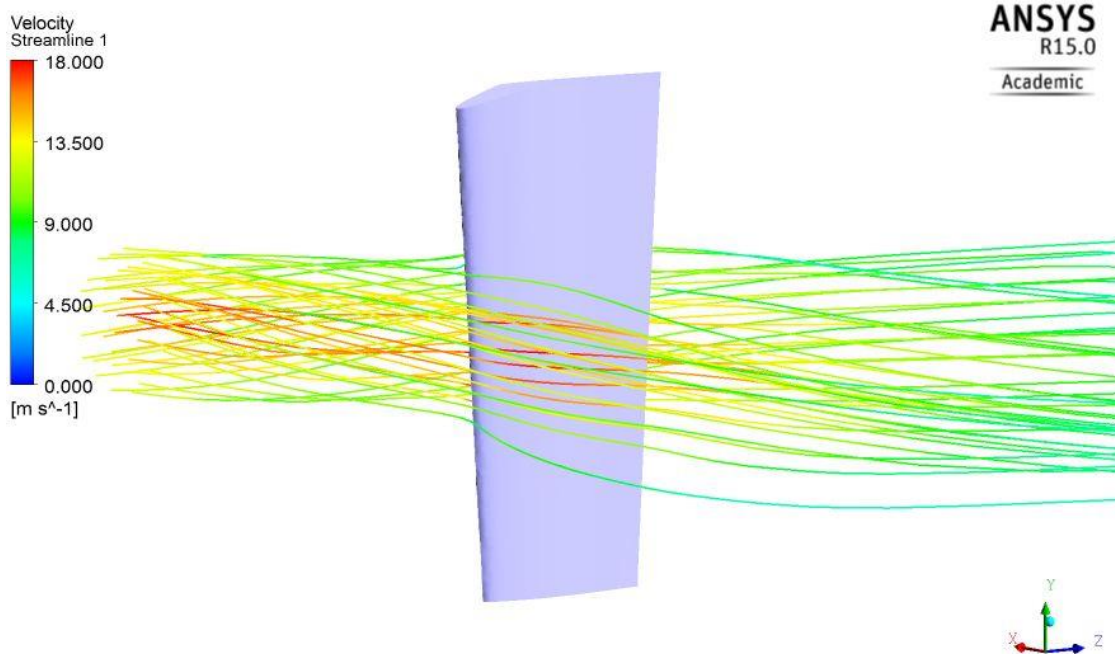


Graf 14: Průběh axiální (v_a), radiální (v_r) a tangenciální (v_t) složky rychlosti v závislosti na poloměru vírové turbíny

Získané hodnoty byly změněny v měřítku, aby průtok lodním šroubem odpovídal průtoku, který byl vypočten jako okrajová podmínka. To lze vyjádřit pomocí rovnice (39).

$$\int_S v_a = w_{pp} \cdot S \quad (39)$$

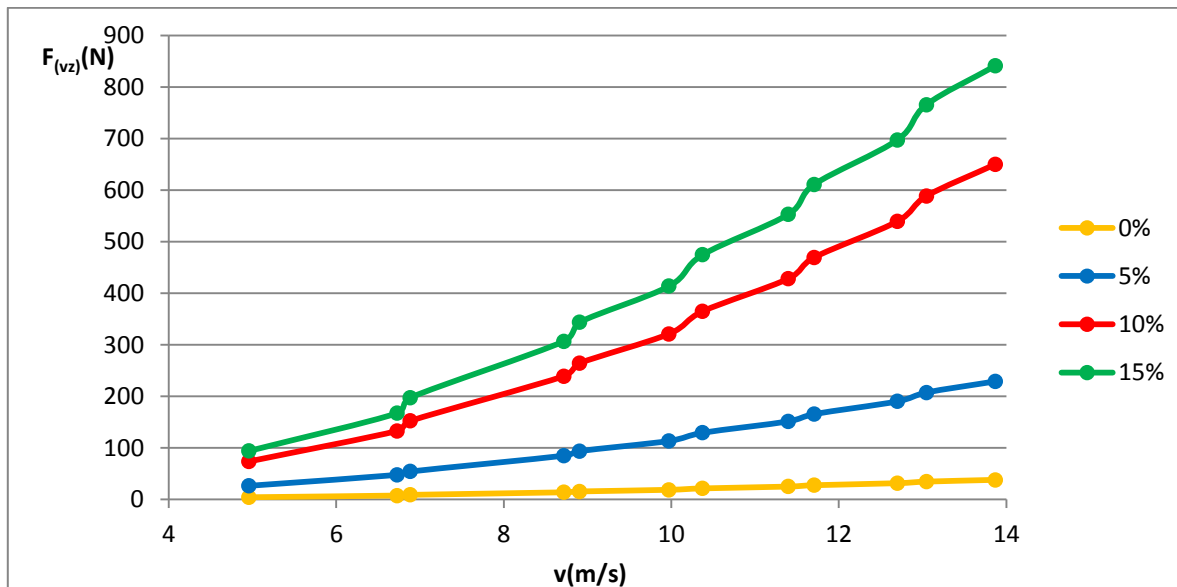
, kde v_a je axiální rychlost za vírovou turbínou, w_{pp} je rychlost paprsku za lodním šroubem a S je plocha lodního šroubu (turbíny).



Obr. 28: Znázornění proudění rotujícího proudu kolem kormidla

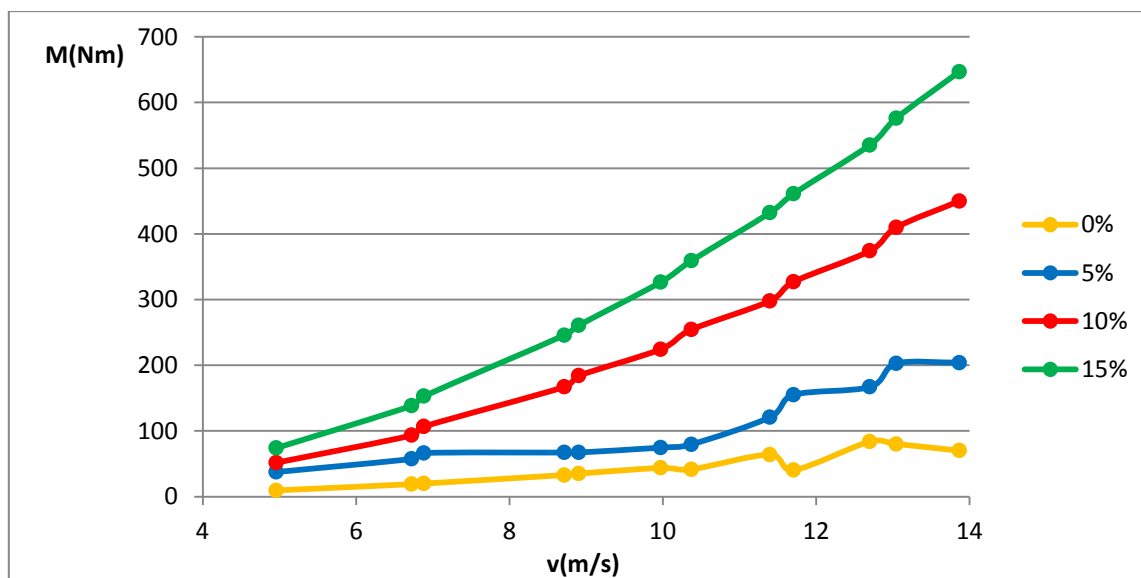
V případě rotujícího proudu obtékajícího kormidlo dochází ke vzniku malé, avšak nezanedbatelné vztahové síly. To je způsobeno nerovnoměrným rozložením proudu vlivem

rotace, což je jev zkoumaný jako interakce lodního šroubu s kormidlem [2]. Proto je výpočet proveden pro pravotočivý (graf 15 a 16) i levotočivý šroub (graf 17 a 18). Pravotočivý a levotočivý šroub mají stejně složky radiální a axiální rychlosti, pouze tangenciální složka je opačná.



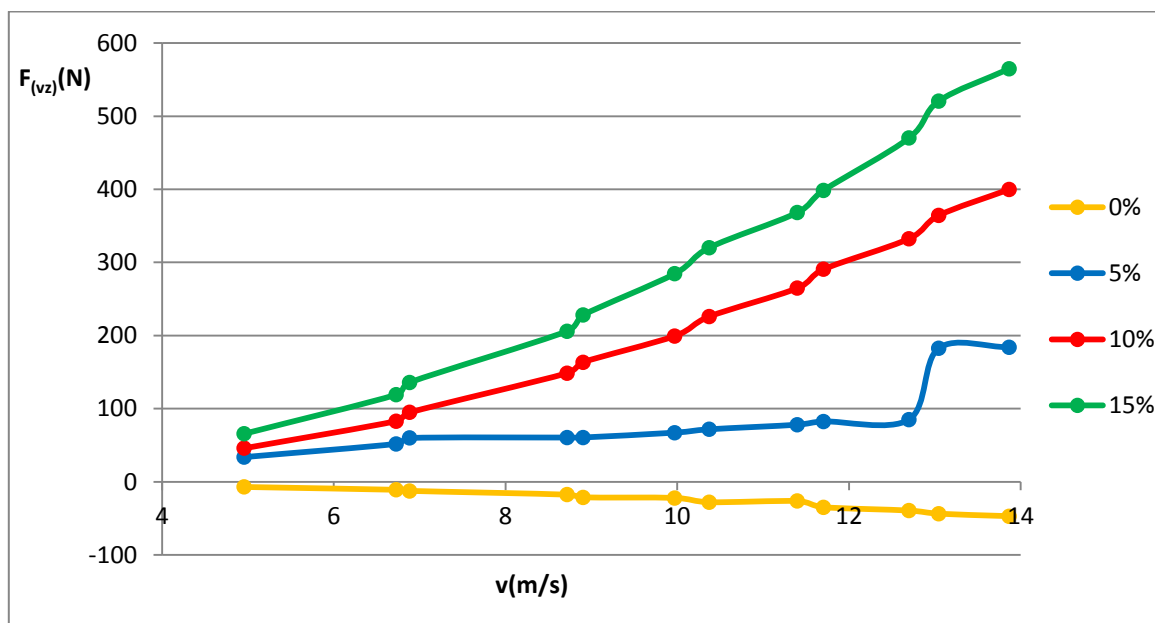
Graf 15: Vliv nesymetrie kormidla na vztlakovou sílu pro pravotočivý šroub

Nesymetrie se vyskytuje v záporné části osy x, takže vztlakové síla působí v záporném směru osy x. Vztlaková síla vyvolaná rotujícím proudem od pravotočivého šroubu působí na symetrické kormidlo také v záporném směru osy x. Tyto dvě síly se sčítají, a tak jsou výsledné hodnoty vyšší než pro nerotující proud. Maximální hodnota vztlakové síly je 841 N.



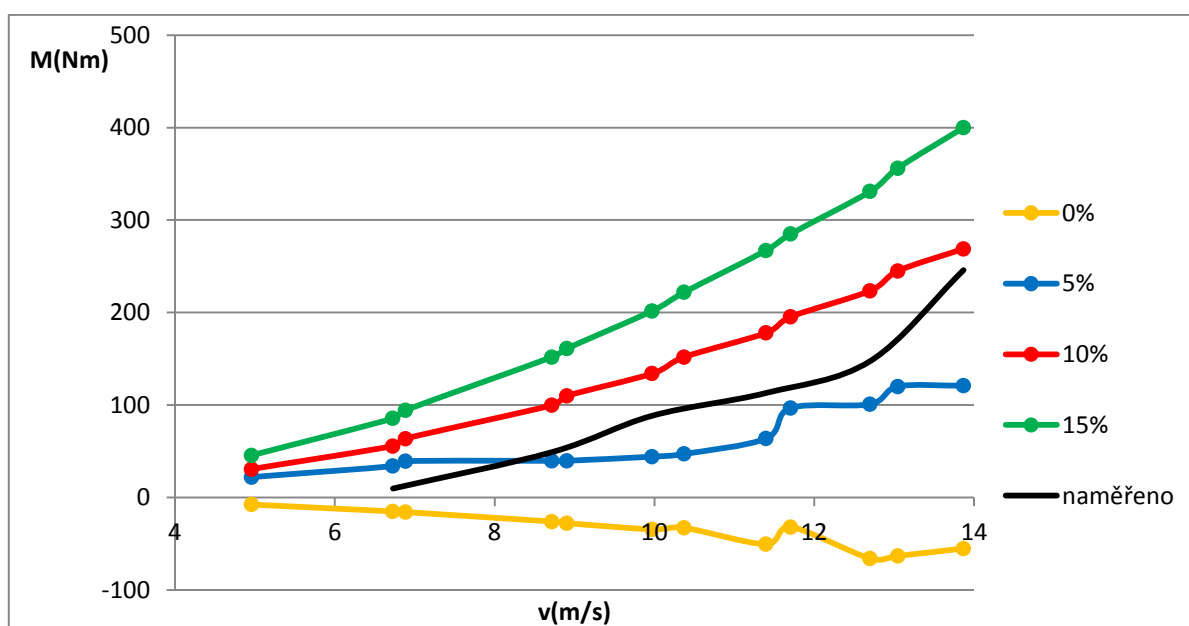
Graf 16: Vliv nesymetrie kormidla na moment na kormidlo pro pravotočivý šroub

Působením větších vztlakových sil dochází taktéž k působení většího momentu na kormidlo. Největší hodnota pro nesymetrii 10 % je 450 Nm, což je výrazně víc než v případě naměřených hodnot ze skutečného případu.



Graf 17: Vliv nesymetrie kormidla na vztlakovou sílu pro levotočivý šroub

V případě levotočivého lodního šroubu dochází k opačné situaci než u pravotočivého. Vztlaková síla vyvozená rotací proudu má opačný směr než síla vyvozená nesymetrií. Výsledkem je menší vztlaková síla než v případě nerotujícího proudu. V grafu pro vztlakovou sílu lze pozorovat nevysvětlitelný skok na 13 m/s, kdy se jedná zřejmě o výpočetní chybu.



Graf 18: Vliv nesymetrie kormidla na moment na kormidlo pro levotočivý šroub

Menší vztlakové síly vedou k menším momentům na kormidlo. Největší hodnota pro nesymetrii 10 % je 269 Nm, což je hodnota blízká naměřené hodnotě 240 Nm ze skutečného případu. Průběh momentu ale neodpovídá naměřeným hodnotám, kde byl již pro rychlosti proudu okolo 6,5 m/s naměřen téměř nulový moment. To však mohlo být způsobeno citlivostí měřící techniky.

4 Závěr

V první části práce jsou popsány síly působící na kormidlo a mechanismy vzniku těchto sil. Zároveň je vysvětleno, jak tyto síly působí na chování lodí. Poznatky z oblasti odporové síly jsou využity pro odhadnutí odporové síly lodí a následné určení okrajové podmínky pro rychlost proudu za lodním šroubem. Vztlaková síla a s ní související moment jsou hlavní sledované parametry v průběhu výpočtového modelování proudění.

Pro 2D simulaci byly stanoveny tři druhy výrobních nepřesností, které mohou způsobit vznik vztlakové síly. Jedná se o natočení lodního šroubu vzhledem k ose trupu lodí, odsazení kormidla od osy trupu a nesymetrické kormidlo. Pro 2D simulaci bylo použito mnoho zjednodušení, takže se nakonec jednalo o obecný problém profilu umístěného v paprsku vody, který je umístěn v paralelním proudu. Jako obtékaný profil byl použit profil NACA0015, ke kterému lze dohledat mnoho dat pro obtékání paralelním proudem. Pro určení významu vztlakové síly na výsledné chování lodí byla určena charakteristika vztlakové síly pro různé rychlosti při natočení kormidla, což odpovídá běžnému pracovnímu cyklu kormidla. Moment kolem osy kormidla byl srovnáván s hodnotami naměřenými na skutečné jachtě. Toto srovnání ale není úplně korektní, protože nebyla provedena validace výpočtového modelu. Jedná se proto spíše o kvalitativní, než kvantitativní analýzu. To znamená, že lze porovnávat poměry a průběhy vypočtených hodnot, ale absolutní hodnoty se mohou lišit od skutečnosti.

Vztlaková síla odpovídající natočení kormidla o 1° odpovídá 5 mm nesymetrii, natočení lodního šroubu o 1° a odsazení kormidla o 20 mm. Charakteristika průběhu vztlakové síly pro natočení kormidla a natočení lodního šroubu je velmi podobná. K rozdílům dochází u momentu na kormidlo, který je pro natočení kormidla velmi malý, přibližně 10x menší než v případě natočení lodního šroubu. Při působení podobných vztlakových sil, odpovídajících natočení kormidla o 1° , dochází ke vzniku největšího momentu pro odsazení kormidla od osy trupu. Nejmenší moment vzniká pro nesymetrické kormidlo. Vznik vztlakové síly pro odsazení kormidla od osy trupu je jev, který vzniká právě v případě paprsku v paralelním proudu. Nelze ho pozorovat pro běžné experimenty umístění profilu v paralelním proudu.

Pro větší přiblížení reálnému problému byla provedena 3D simulace, kdy byl zahrnut vliv lodí na výsledné proudění. Jako kormidlo již nebyl použit profil NACA0015, ale kormidlo dle výkresové dokumentace. Počítán byl pouze případ nesymetrického kormidla, což koresponduje se skutečným případem, pro který byly naměřeny hodnoty. Výpočty byly provedeny pro rotující i nerotující proud. Nerotující proud je velmi podobný 2D simulaci. Vztlakové síly získané pro oba případy jsou podobné, ale při 3D simulaci působí výrazně větší momenty. Rotující proud způsobuje vznik vztlakové síly a momentu kolem osy kormidla bez výrobních nepřesností, ale hodnoty těchto veličin jsou velmi malé ve srovnání s výrobními nepřesnostmi. Pokud působí rotující proud na kormidlo s výrobními nepřesnostmi, síly a momenty vznikající oběma mechanismy se sčítají, a tak v tomto případě závisí na umístění výrobní nepřesnosti vzhledem k ose trupu lodí. Z toho plyne, že u lodí poháněných lodním šroubem záleží na umístění nepřesnosti na rozdíl od lodí poháněných tryskou.

Pro lepší interpretaci výsledků by bylo vhodné provést experiment, který by umožnil validaci výpočtového modelu. Zároveň pro lepší pochopení obtékání profilu paprskem v paralelním proudu by bylo vhodné pozorovat vliv šířky paprsku a rozdílu rychlostí paprsku a paralelního proudu na změnu vztlakové síly a momentu.

5 Seznam použité literatury

- [1] JAKOBS, E., N., WARD, K., E., The characteristics of 78 related airfoil sections from tests in the variable-density wind tunnel: Report No.460. National Advisory Committee for Aeronautics. 1933, 61.
- [2] LI, D.-Q., A non-linear method for propeller-rudder interaction with the slipstream deformation taken into account. Computer methods in applied mechanics and engineering. 1996(130), 16.
- [3] MOLLAND, A., F., S. R. TURNOCK. Marine rudders and control surfaces principles, data, design and applications. Amsterdam: Elsevier/Butterworth-Heinemann, 2007. ISBN 978-008-0549-248.
- [4] FUWA, T., KASHIWADANI T., Theory, analysis, and design methodology for ship maneuverability. Ship and offshore structures. 2005,2005(5), 47.
- [5] ANDERSON, J., D., Fundamentals of aerodynamics. 2nd ed. New York: McGraw-Hill, c1991. ISBN 00-700-1679-8.
- [6] Kutta condition [online]. [cit. 2016-05-06]. Dostupné z: http://blogfiles.naver.net/data43/2008/12/13/131/kutta_condition_stephen14.jpg
- [7] ÇENGEL, Y., A., CIMBALA, J., M., Fluid mechanics: fundamentals and applications. Boston: McGraw-Hill Higher Education, c2006. ISBN 00-724-7236-7.
- [8] RATHAKRISHNAN, E., Theoretical Aerodynamics. New York: Wiley, 2013. ISBN 978-111-8479-377.
- [9] JANALÍK, J., Hydrodynamika a hydrodynamické stroje. skripta, Ostrava: VŠB- TU, FS, 2008, 189 s. Dostupné z WWW: <http://www.338.vsb.cz/PDF/Janalik-HYDRODYNAMIKAAHYDRODYNAMICKESTROJE.pdf>
- [10] MAN DIESEL & TURBO. Basic principles of ship propulsion [online]. In: . s. 44 [cit. 2016-05-26]. Dostupné z: <http://marine.man.eu/docs/librariesprovider6/technical-papers/basic-principles-of-ship-propulsion.pdf?sfvrsn=22>
- [11] HAVELOCK, T. H. The Wave-Making Resistance of Ships: A Theoretical and Practical Analysis. Proceedings of the Royal Society A: Mathematical, Physical and Engineering Sciences [online]. 1909,82(554), 276-300 [cit. 2016-05-05]. DOI: 10.1098/rspa.1909.0033. ISSN 1364-5021. Dostupné z: <http://rspa.royalsocietypublishing.org/cgi/doi/10.1098/rspa.1909.0033>
- [12] ŠTIGLER, J., SOUKUP, L., Hledání možných příčin přídavného momentu na kormidle jachty a jejich odstranění, číslo technické zprávy: VUT-EU13303-QR-13-13
- [13] TANNEHILL, J., C., ANDERSON, A., PLETCHER, R., H., Computational fluid mechanics and heat transfer. 2nd ed. Washington, DC: Taylor, 1997. ISBN 15-603-2046-X.

- [14]MUNSON, B., R., YOUNG, D., F., OKIISHI, T., H., Fundamentals of Fluid Mechanics
- [15]SAHIN, İ., ACIR, A., Numerical and Experimental Investigations of Lift and Drag Performances of NACA 0015 Wind Turbine Airfoil. International Journal of Materials, Mechanics and Manufacturing. 2015, 3(1), 22-25. DOI: 10.7763/IJMMM.2015.V3.159. ISSN 17938198. Dostupné také z: <http://www.ijmmm.org/index.php?m=content>
- [16]Lodní šroub [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.pelikandaniel.com/products/2299@39/b_0.jpg
- [17]Vírová turbína [online]. [cit. 2016-05-22]. Dostupné z: http://www.inovace.cz/files/200002293-9321e941ba/virova_turbina_20.JPG

6 Seznam použitých zkratk a symbolů

Symbol	Jednotky	Význam
$F_{(Rt)}$	[N]	Třecí odporová síla
$F_{(Rp)}$	[N]	Tvarová odporová síla
N	[N]	Normálová síla
A	[N]	Axiální síla
α	[°]	Úhel náběhu
ρ	[kg·m ⁻³]	Hustota
v	[m·s ⁻¹]	Rychlost proudu za lodním šroubem
v_{∞}	[m·s ⁻¹]	Rychlost paralelního proudu
Γ	[m ² ·s ⁻¹]	Cirkulace
r	[m]	Poloměr válce
ω	[rad·s ⁻¹]	Úhlová rychlost
A	[m ²]	Čelní průmětová plocha
C_l	[-]	Koeficient vztlaku
τ	[Pa]	Smykové napětí
μ	[Pa·s]	Dynamická viskozita
C_f	[-]	Koeficient tření
S	[m ²]	Smáčený povrch
M_k	[N·m]	Moment na kormidlo
Re	[-]	Reynoldsovo číslo
ν	[m ² ·s ⁻¹]	Kinematická viskozita
C_d	[-]	Odporový koeficient
D_{kk}	[m]	Průměr kormidelního kola
$\frac{\alpha_{kk}}{\alpha_k}$	[-]	Poměr natočení kormidelního kola ku natočení kormidla
F_{kk}	[N]	Síla na kormidelní kolo
$F_{(Rv)}$	[N]	Vlnový odpor
$F_{(Ra)}$	[N]	Odporová síla vzduchu
w	[m·s ⁻¹]	Relativní rychlost
α	[°]	Natočení hřídele lodního šroubu
$S_{(k)}$	[m ²]	Povrch kontrolního objemu
C	[-]	Regresní koeficient

$F_{(vz)}$	[N]	Vztlaková síla
v_a	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Axiální rychlost
v_r	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Radiální rychlost
v_t	$[m^2 \cdot s^{-1}]$	Tangenciální rychlost