



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

CFD SIMULACE HYDROKINETICKÉHO MĚNIČE ENERGIE VYUŽÍVAJÍCÍHO VIBRACE INDUKOVANÉ PROUDĚNÍM

CFD SIMULATION OF THE HYDROKINETIC ENERGY CONVERTER USING FLOW-INDUCED VIBRATIONS

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Jakub Vaverka

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. Roman Klas, Ph.D.

BRNO 2023

Zadání diplomové práce

Ústav:	Energetický ústav
Student:	Bc. Jakub Vaverka
Studijní program:	Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor:	Fluidní inženýrství
Vedoucí práce:	Ing. Roman Klas, Ph.D.
Akademický rok:	2022/23

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:

CFD simulace hydrokinetického měniče energie využívajícího vibrace indukované prouděním

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V odpovídajícím režimu proudění vznikají v tekutině za obtékaným tělesem nestacionární vírové útvary známé jako Kármánova vírová stezka. Frekvence těchto vírů závisí na vlastnostech proudového pole a obtékaného tělesa. Nestacionární povaha vírové stezky a frekvence odtrhávání vírových útvarů má za následek proměnné silové působení na těleso. Velikost těchto sil, nejčastěji ve směru kolmém na proudění, a následný pohyb tělesa případně jeho deformaci, lze využít prostřednictvím hydrokinetických měničů energie. Pohyb tělesa nemusí být vzhledem k měnícím se vlastnostem proudového pole a jeho ohraničení zcela periodický.

Moderní CFD simulace stále častěji zahrnují dynamickou výpočetní síť a umožňují realizovat pohyb tělesa v kapalině s jedním či více stupni volnosti. Vzhledem k výpočetním nárokům těchto úloh bude v diplomové práci volen pouze dvourozměrný model měniče. Obtékané těleso bude umístěno do ohraničeného proudového pole a simulován jeho pohyb v důsledku nestacionárního proudového pole.

Cíle diplomové práce:

Student v diplomové práci vytvoří rešerši dosud známých způsobů využití hydrokinetické energie prostřednictvím vibrací indukovaných proudění. Popíše hlavní znaky lineárních a především nelineárních oscilátorů. Provede dvourozměrnou CFD simulaci s jedním, případně dvěma, stupni volnosti tělesa ponořeného do ohraničeného proudu kapaliny. Kmity tělesa s průřezem ve tvaru kruhu, trojúhelníku a čtverce budou buzeny proudící kapalinou. Pro jeden z případů bude testován vliv hmotnosti tělesa, tuhosti uložení a případně tlumení na charakter kmitů. Student vyhodnotí velikosti sil působících na těleso, dráhy tělesa a výkon zařízení.

Seznam doporučené literatury:

AXISA, François a José ANTUNES. Modelling of mechanical systems: Fluid structure interaction. Boston: Butterworth-Heinemann, c2007. ISBN 07-506-6847-4.

SIGRIST, Jean-François. Fluid-Structure Interaction: An Introduction to Finite Element Coupling. Chichester, West Sussex, UK: John Wiley, 2015. ISBN 9781119952275.

LV, Yanfang, Liping SUN, Michael M. BERNITSAS a Hai SUN. A comprehensive review of nonlinear oscillators in hydrokinetic energy harnessing using flow-induced vibrations. Renewable and Sustainable Energy Reviews. 2021, 150, 1-45. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:10.1016/j.rser.2021.111388

DING, Lin, Li ZHANG, Chunmei WU, Xinru MAO a Deyi JIANG. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections. Energy Conversion and Management. 2015, 91, 416-426. ISSN 01968904. Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.12.039

BIBO, Amin, Ali H. ALHADIDI a Mohammed F. DAQAQ. Exploiting a nonlinear restoring force to improve the performance of flow energy harvesters. Journal of Applied Physics. 2015, 117(4). ISSN 0021-8979. Dostupné z: doi:10.1063/1.4906463

GU, Mengfan, Baowei SONG, Baoshou ZHANG, Zhaoyong MAO a Wenlong TIAN. The effects of submergence depth on Vortex-Induced Vibration (VIV) and energy harvesting of a circular cylinder. Renewable Energy. 2020, 151, 931-945. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2019.11.086

ŠOB, František. Hydromechanika. Brno: CERM, 2002. Učební texty vysokých škol. ISBN 80-214-2037-5

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2022/23

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

Vibrace indukované prouděním na tělesech o různých tvarech jsou zkoumány pomocí CFD simulací. Zjišťován je vliv hmotnosti tělesa, tuhosti pružiny a hodnoty přidaného tlumení na dynamické chování soustavy. K rozpohybování tělesa v proudu kapaliny je využita funkce 6DOF v kombinaci s dynamickou výpočetní sítí. Výstupem je vyhodnocení působících sil na těleso, dráha pohybu a případný výkon, který by těleso svým pohybem mohlo vygenerovat.

Klíčová slova

Vibrace indukované prouděním, hydrokinetický sběrač energie, Kármánova vírová stezka, výpočtové modelování proudění, dynamická výpočetní síť, funkce 6DOF

ABSTRACT

Flow-induced vibrations on bodies of different shapes are investigated by CFD simulations. The influence of the mass of the body, the spring stiffness and the value of the added damping on the dynamic behaviour of the system is evaluated. A combination of the 6DOF function and a dynamic computational mesh is used to move the body around the y-axis solely by fluid flow. The output is an evaluation of the forces acting on the body, the trajectory of the body and the possible power that the body could generate by its motion.

Key words

Flow-induced vibrations, hydrokinetic energy harvester, Kármán vortex path, computational fluid dynamics, dynamic computational mesh, 6DOF function

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

VAVERKA, Jakub. *CFD simulace hydrokinetického měniče energie využívajícího vibrace indukované prouděním* [online]. Brno, 2023 [cit. 2023-03-30]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/145887>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Roman Klas.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma **CFD simulace hydrokinetického měniče energie využívajícího vibrace indukované prouděním** vypracoval samostatně s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který tvoří přílohu této práce.

V Brně dne 26.5.2023

Jakub Vaverka

PODĚKOVÁNÍ

Tímto děkuji Ing. Romanu Klasovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování závěrečné práce a také za jeho obrovskou trpělivost. Také bych chtěl poděkovat spolužákům z oboru Fluidního inženýrství, kteří mě motivovali k lepším výsledkům během studia. Dále patří velké díky mým nejbližším přátelům, konkrétně Pavlu Karnovi, Pavlu Mračkovi a Štěpánu Novákovi, se kterými jsem se seznámil na VUT v Brně a věřím, že naše přátelství přetrvá ještě dlouho po odevzdání této práce. A to největší a nejupřímnější poděkování patří mé rodině, bez kterých by nebylo možné tuto práci vůbec vypracovat a mé partnerce, Adéle Široké, která mi byla vždy obrovskou oporou a motivací.

OBSAH

ÚVOD	11
1 Motivace k využívání hydrokinetické energie	12
1.1 Vodní energie	12
2 Hydrokinetické systémy	14
2.1 Mořské HK systémy	14
2.1.1 Oscilující vodní sloupec	14
2.1.2 Přepadové zařízení	16
2.1.3 Vlnami buzená tělesa	17
2.2 Proudové HK systémy	18
2.2.1 Proudové HK systémy s turbínou	18
2.2.2 Proudové HK bez turbíny	20
3 Oscilátory	21
3.1 Lineární oscilátory	21
3.1.1 Nucené netlumené kmitání	24
3.1.2 Tlumené nucené kmitání	25
3.1.3 Rezonance	26
3.2 Nelineární oscilátory	27
3.2.1 Duffingův oscilátor	27
4 Význam vibrací indukovaných víry	28
4.1 Obtékání stacionárního válcového tělesa	29
4.1.1 Vírové struktury za oscilujícím tělesem	32
5 CFD simulace vibrací indukovaných víry	34
5.1 Geometrie	34
5.2 Výpočetní síť	35
5.3 Nastavení řešiče Fluent	38
5.3.1 Okrajové podmínky	38
5.3.2 Metoda 6DOF a použití UDF	38
5.3.3 Spuštění simulace	39
6 Výsledky	41
6.1 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s kruhovým průřezem	41
6.1.1 Vliv hmotnosti	43
6.1.2 Vliv tuhosti pružiny	45
6.1.3 Vliv tlumení	46
6.1.4 Vliv změny rychlosti proudění	47
6.2 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s trojúhelníkovým průřezem ..	51
6.2.1 Vliv hmotnosti	53
6.2.2 Vliv tuhosti pružiny	56
6.2.3 Vliv tlumení	57
6.3 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s čtvercovým průřezem	59
6.3.1 Vliv hmotnosti	61

6.3.2	Vliv tuhosti pružiny	63
6.3.3	Vliv tlumení.....	64
6.4	Výkon zařízení	66
	ZÁVĚR.....	70
	SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	72
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	76
	SEZNAM PŘÍLOH	78
	PŘÍLOHY	79

ÚVOD

V posledních letech se klade stále větší důraz na hledání nových a zejména uhlíkově neutrálních způsobů získávání energie. Jedním z inovativních principů je využití hydrokinetické energie prostřednictvím vibrací indukovaných prouděním. Vírové struktury vznikající za obtékáním tělesem působí periodicky měnící se silou na těleso a tím ho mohou rozpohybovat. Ve většině případů se jedná o nechtěný jev, ale s pomocí vhodného zařízení je možné tuto energii využít a přeměnit ji na potřebnou elektrickou energii. Systémy využívající tento přístup se nazývají hydrokinetické měniče a ukazují se jako efektivní zařízení k přeměně kinetické energie říčních či podmořských proudů na energii mechanickou.

Cílem této diplomové práce je provést komplexní CFD simulaci hydrokinetického měniče energie využívající princip vibrací indukovaných prouděním. Hlavní zaměření práce spočívá ve zkoumání dynamického chování tělesa ponořeného do ohraničeného proudu vody a jak se toto chování bude měnit v závislosti na parametrech, jako je hmotnost tělesa, tuhost pružiny a případně přidané tlumení. Numerické simulace budou provedeny pro tělesa s jedním stupněm volnosti a s průřezem ve tvaru kruhu, čtverce a trojúhelníku. Vyhodnoceny budou velikosti sil působící na těleso, dráha tělesa a výkon zařízení.

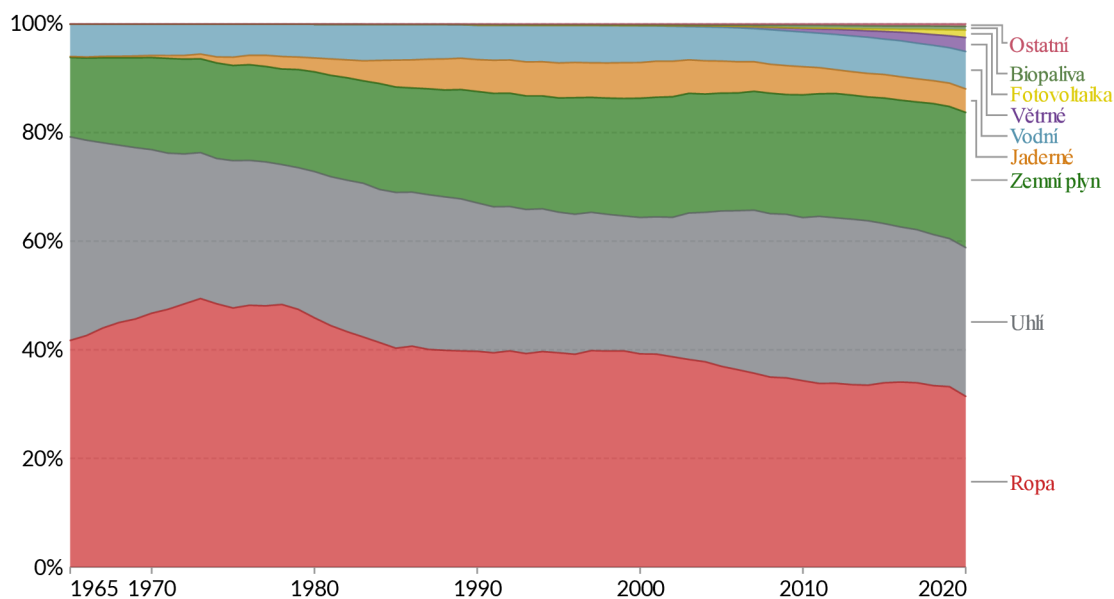
Úvodní kapitoly práce zahrnují rešerši známých způsobů využití hydrokinetické energie. Také zde lze nalézt jak systémy, které již byly nebo jsou v současnosti nasazeny v provozu, tak i ty, které jsou zatím pouze součástí budoucích projektů. Další část rešerše se věnuje lineárním a nelineárním oscilátorům a popisu jejich základních pohybových rovnic, které mají velký význam v pochopení dané problematiky. Následuje popis samotného fenoménu vibrací indukovaných prouděním.

Praktická část práce se primárně zaměřuje na popis numerických simulací oscilujícího tělesa v proudu kapaliny provedenými v softwaru Ansys Fluent. Ke korektní simulaci pohybujícího tělesa v proudu kapaliny je zapotřebí využít prvků dynamické výpočetní sítě a pohyb tělesa realizovat za pomoci uživatelsky definovaných funkcí anebo zabudovaných funkcí programu Ansys Fluent. Dále jsou vyhodnoceny výsledky simulací a je popsáno jaký vliv mají zkoumané parametry na charakter kmitání pro jednotlivé tvary průřezu. Cílem je identifikovat ideální nastavení parametrů pro dosažení maximálního výkonu a porovnat tyto hodnoty mezi různými tvary průřezu tělesa.

Výsledky práce mohou přispět k lepšímu pochopení dynamického chování hydrokinetického měniče energie na bázi vibrací indukovaných prouděním a jeho možného potenciálu jako udržitelného zdroje energie.

1 Motivace k využívání hydrokinetické energie

Mnoho aktuálních vědeckých studií poukazuje na důsledky globálního oteplování a klimatických změn způsobených skleníkovými plyny, a s tím roste potřeba po ekologicky šetrných a levných technologiích obnovitelných zdrojů energie. Na obrázku 1.1 můžeme vidět, že v roce 2019 bylo vyrobeno přibližně 84 % světové energie z fosilních paliv (uhlí, ropa a plyn), 11,4 % je z obnovitelných zdrojů a 4,3 % pochází z jaderné energie. Touto energií je myšlen součet energie elektrické, energie na vytápění/chlazení a energie na transport. Ve výrobě elektrické energie hrají obnovitelné zdroje o něco větší roli, ale stále převažující část zastávají fosilní paliva (63,3 %). [1]



Pozn.: 'Ostatní' zahrnuje geotermální energii, biomasu a energii z odpadu.

Obrázek 1.1: Procentuální rozložení spotřeby primární energie podle paliva nebo zdroje (převzato z [1])

Z důvodu omezeného množství fosilních paliv a negativních účinků jejich využívání na životní prostředí, urgentně roste potřeba objevit alternativní zdroj energie, který bude mít malé náklady na svůj životní cyklus a bude produkovat velmi nízké nebo nejlépe žádné emise. Je zřejmé, že nahrazení uhlí, plynu a ropy čistějšími alternativami přispívá k poklesu emisí skleníkových plynů, a proto je nutné pokračovat v transformaci energetického systému založeného převážně na neobnovitelných zdrojích energie na systém využívající obnovitelné a čisté zdroje energie. [2] [3]

Mezi aktuálně známé a využívané obnovitelné zdroje energie patří hlavně vodní, větrná a sluneční energie. Dalšími méně využívanými obnovitelnými zdroji energie je geotermální energie, biomasa a také energie z odpadu, ale tyto druhy zastávají pouze jednotky procent z celkové spotřeby. Jaderná energetika se sice považuje za čistou a uhlíkově neutrální metodu získávání energie, avšak zásoby uranové rudy jsou na Zemi omezeny a stále neexistuje bezpečné řešení, jak ukládat vyhořelé jaderné palivo, tudíž je dle použitých zdrojů zařazena mezi neobnovitelné zdroje energie. [2] [3]

1.1 Vodní energie

Vodní energie je snadno dostupná a je jí dostatek, a proto je vhodnou volbou pro výrobu čisté energie. Vzhledem k tomu, že téměř dvě třetiny zemského povrchu pokrývá voda a většina

světové populace žije v blízkosti vodních toků či u mořského pobřeží, představuje využití vodní energie významný zdroj obnovitelné energie pro budoucnost. V roce 2020 vodní energie vygenerovala globálně necelých 4297 TWh energie, což činí asi 60 % spotřeby ze všech obnovitelných zdrojů [1]. V celosvětovém měřítku je vodní energie zdaleka největším moderním obnovitelným zdrojem, ale solární a větrná energie se také velmi rychle rozvíjí. [2] [3]

Historicky se vodní energie používala již od starověku, nejprve k splavování vorů, lodí nebo samotných dřev po proudu řek, poté k pohonu jednoduchých strojů na mletí zrna pomocí vodního kola. Největší rozmach vodních mlýnů byl kolem 12. století n.l. zásluhou mnišských řádů v Evropě (především benediktinů a cisterciáků), kteří využívali vodní kolo k pohonu kovářských strojů, pil, na drcení oliv, a hlavně k mletí obilovin. Bylo využíváno jak původních vertikálních vodních kol, tak i horizontálních. Postupně byly dřevěné lopatky kol nahrazovány lopatkami z pevnějších a odolnějších materiálů. Během průmyslové revoluce na přelomu 18. a 19. století byla poprvé využita vodní energie k výrobě elektrické energie. [4]

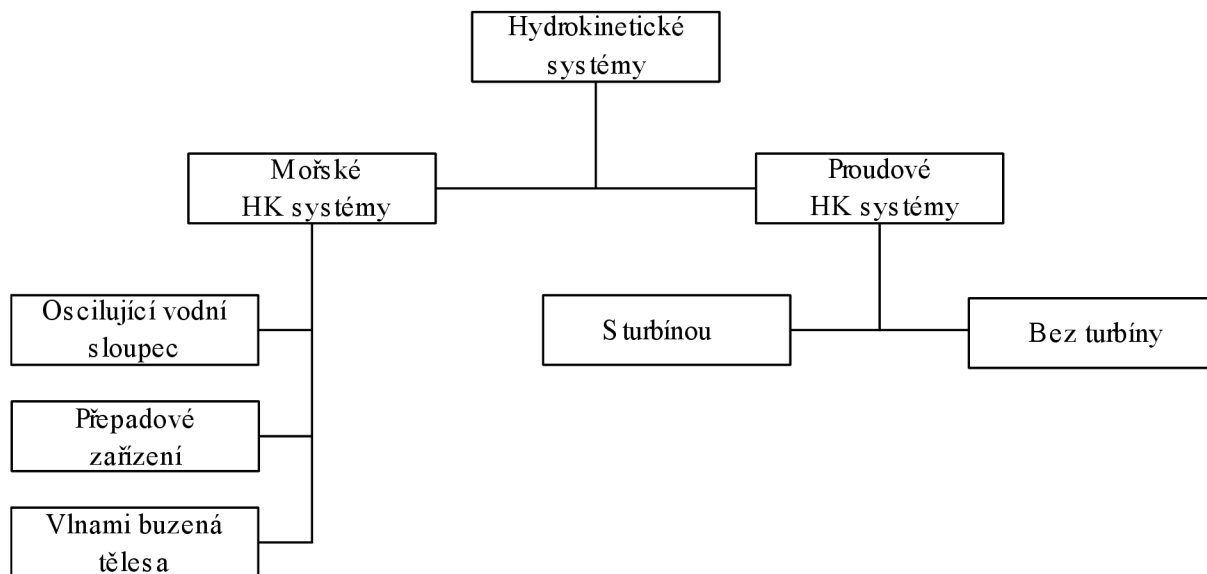
Obvykle se k získání elektrické energie z vody využívají rotující lopatkové stroje, jinak také nazývané turbíny, na které natéká nebo padá voda z určité výšky o určitém průtoku. Tyto turbíny dokážou převést část energie vody na energii elektrickou. V současné době je tento způsob získávání energie z vody hlavním obnovitelným zdrojem elektřiny, ale není to jediný způsob. [2] [3]

Výroba elektřiny za pomoci tradičních vodních elektráren sebou nese řadu výhod, ale i určitých nevýhod, kvůli kterým se hledají alternativní způsoby využití energie vody. Hlavní výhodou je, že energie získaná z velkých vodních děl je levná a neznečišťuje životní prostředí, ale jako všechny ostatní elektrárny mají i vodní elektrárny svá omezení. Výstavba velkých vodních nádrží může významně ovlivnit život ekologického systému, který se v dané oblasti vyvíjí a mnohdy je nutné relokovat velké množství obyvatel, žijící v potencionálně zatopené oblasti. Kvůli výstavbě největší vodní elektrárny na světě, Tří soutěsek v Číně, bylo potřeba vystěhovat přibližně 1,2 milionu obyvatel z dané oblasti [5]. Ačkoli je následná vodní energie považována jako environmentálně šetrná, musí se brát v potaz nutná výstavba obrovských přehrad/nádrží a rozvodných sítí, které mají značný dopad na životní prostředí. Navíc ve vyspělých zemích byly vhodné lokality pro velká vodní díla již většinou využity. Kromě toho může být v některých říčních údolích výstavba přehrad technicky nebo ekonomicky neproveditelná z důvodu topografie, geologie lokality, nestability podloží, nedostupnosti stavebních materiálů v dané oblasti atd. Vzhledem k těmto problémům, kterým čelí získávání energie z přehrad a nádrží, se nyní v určité míře pozornost vědeckých institucí přesouvá k hydrokinetickým systémům, které využívají k výrobě energie buď vlny na hladině, nebo proudy v tekoucích vodních zdrojích. [2] [3] [6]

Oproti tradičním vodním elektrárnám hydrokinetické systémy nepotřebují ke svému provozu rozdíl hladin, velkou nádrž či přehradu a přijatelná rychlost proudění začíná na pouhých 0,3 m/s [7]. Podle Güneye a Kaygusuze [8] jsou hydrokinetické systémy šetrné k životnímu prostředí a k flóře a fauně ve vodě. Několik odborných článků pojednává o vlivu hydrokinetických systémů na život ryb. Romero-Gomez a C. Richmond [9] uvádějí, že míra přežití ryby po zásahu lopatkou je vyšší než 96 %. Dále je zmiňováno, že zvukové emise systémů neovlivňují chování ryb a ostatních živočichů. I když kapacita pro výrobu energie hydrokinetických systémů je ve srovnání s konvenčními vodními elektrárnami malá, pomocí soustavy systémů nebo tzv. hydrokinetických farem lze kapacitu navýšit až na 100 MW [7]. Nejedná se o nahrazení stávajících vodních elektráren, ale pouze o alternativu k naplnění stále se zvyšující poptávky po levné a dostupné elektrické energii, zejména v odlehlých oblastech, které nemají přístup ke globální elektrické síti.

2 Hydrokinetické systémy

Energie získaná z kinetické energie proudící vody se nazývá hydrokinetická energie a zařízení používané k jejímu získání se nazývá hydrokinetický systém. Jedná se o důležitou formu obnovitelné energie, která je v přírodě hojně dostupná. Hydrokinetické systémy mohou být rozděleny dle principu na mořské a proudové. Mořské hydrokinetické systémy využívají energii pohybu vln na hladině k přeměně na mechanickou energii, proudové hydrokinetické systémy využívají kinetickou energii vody při volném proudění. [2] [6]



Obrázek 2.1: Rozdělení hydrokinetických systémů (schéma převzaté z [7])

2.1 Mořské HK systémy

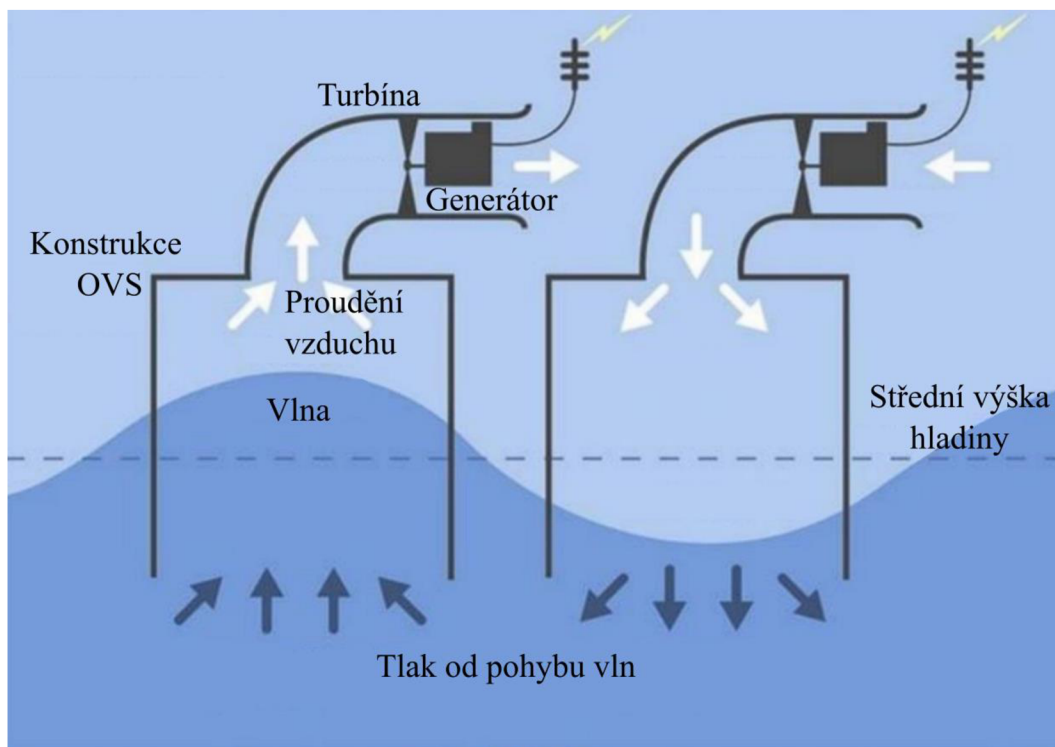
Mořské hydrokinetické systémy využívají pohyb vln na mořské hladině. Byly vyvinuty různé hydraulické a pneumatické systémy za účelem přeměny náhodného pohybu vln na mechanickou energii. Zařízení mají vratné lineární nebo rotující součásti, které využívají hydrodynamickou vzlakovou sílu vln vytvářenou prouděním přes lopatku nebo přes vzlakovou konstrukci. Systémy se liší velikostí, orientací a vzdáleností od břehu. Mohou se dále dělit na ty, co využívají turbínu k přeměně energie, a systémy bez turbíny. Mořské HK systémy mohou být ukotveny na dně, plavat na hladině nebo být připevněny u břehu. Výpočet generovaného výkonu z vln není zatím dostatečně vysvětlen z důvodu složitosti náhodného průběhu pohybu vln. Na základě rozdílných principů byly navrženy různé mořské hydrokinetické systémy. [2] [6]

2.1.1 Oscilující vodní sloupec

Jedná se o částečně ponořenou konstrukci s kolektorem pod hladinou moře, uvnitř kolektoru je sloupec vody a vzduchu. Jakmile vstoupí vlna do kolektoru, vodní sloupec se pohybuje směrem nahoru a poté dolů a tím dochází ke střídající se kompresi a dekompresi přítomného vzduchu. Natlakovaný vzduch je hnán na turbínu, která je připojena ke generátoru k získání elektrické energie. Ukázka konkrétní aplikace oscilujícího vodního sloupce a schéma popisující princip činnosti jsou níže na obrázku 2.2, respektive 2.3. Použitá je Wellsova turbína, která se otáčí vždy stejným směrem nehlédě na směr proudění. [6] [10]



Obrázek 2.2: Fotografie z testování HK systému na bázi oscilujícího vodního sloupce v 1/4 měřítku od firmy Ocean Energy [10]



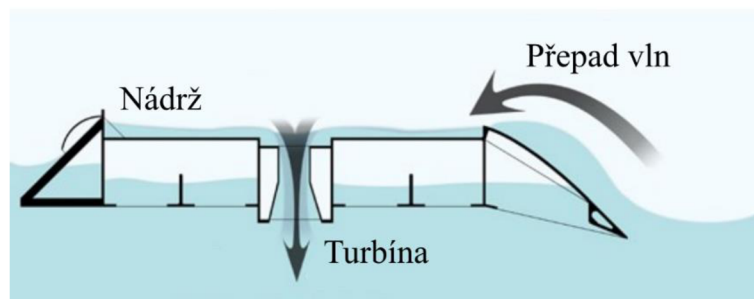
Obrázek 2.3: Schéma principu HK systému oscilujícího vodního sloupce (upraveno) [11]

2.1.2 Přepadové zařízení

Přepadová zařízení mají částečně ponořenou plovoucí nádrž, ve které se utváří nová vodní hladina, když se vlny přelíjí přes stěny nádrže. Vodní hladina v nádrži je nad mořskou hladinou. Rozdíl hladin je dostatečný k provozu turbíny, přes kterou protéká voda zpátky do moře. Konkrétní instalovaný prototyp od dánské firmy Wave Dragon lze vidět na obrázku 2.4 níže. Na obrázku 2.5 je zjednodušené schéma fungování přepadového systému. [6] [12]



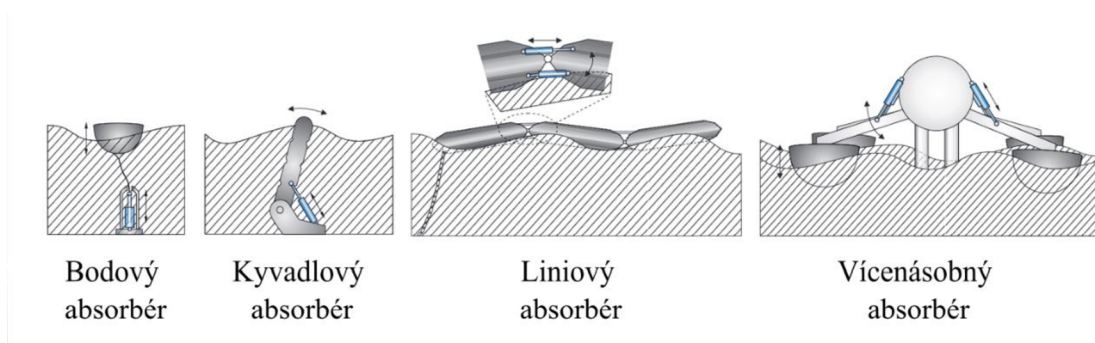
Obrázek 2.4: Konkrétní aplikace přepadového zařízení od firmy Wave Dragon [12]



Obrázek 2.5: Jednoduché schéma principu přepadového zařízení [12]

2.1.3 Vlnami buzená tělesa

Princip fungování vlnami buzených těles je založen na oscilačním pohybu vln a přeměny této kinetické energie na elektřinu za pomoci patřičných zařízení. Na základě vzájemného pohybu těles je lze rozdělit do dvou kategorií, na základní translaci (bodový absorbér) a základní rotaci (spojení klouby). Celé systémy mohou být instalovány na mořském dně nebo plout na hladině s ukotvením. Na obrázku 2.6 níže můžeme vidět jednoduché schéma některých vlnami buzených těles. [6]



Obrázek 2.6: Zjednodušené schéma vlnami buzených systémů s naznačeným směrem základního pohybu (upraveno) [13]

- **Pelamis**

Systém Pelamis je poloponorná technologie konvertoru energie z vln, která využívá jejich pohybu na hladině. Skládá se ze čtyř nebo pěti válcových těles, která jsou spojena třemi (popř. čtyřmi) energetickými moduly. Vlny způsobují relativní pohyb mezi modulem a válcovým tělesem. Uvnitř energetických modulů jsou hydraulické písty, které jsou stlačovány pohybem válcových těles. Hydraulické motory jsou napojeny na elektrické generátory uvnitř systému a pomocí dalekonosných podmořských kabelů se elektřina dostane do sítě. Obrázek 2.7 ukazuje reálnou podobu systému Pelamis P2, jedná se o 120 m dlouhý prototyp s průměrem modulů 3,5 m o výkonu 0,75 MW spuštěný u pobřeží Skotska. V roce 2004 byl systém od firmy Pelamis prvním komerčním konvertorem energie z vln, který dodával elektřinu do sítě. [14]



Obrázek 2.7: Aplikace systému Pelamis P2 o výkonu 0,75 MW u pobřeží Skotska [15]

- **Power Buoy**

Power Buoy je konvertor energie z mořských vln navržený americkou společností Ocean Power Technologies. Jedná se o konvertor energie z vln, který je složený z plovoucí části a konstrukce, která je ponořena více než jeden metr pod vodní hladinou. Stoupání a klesání vln způsobuje, že se plovoucí bóje volně pohybuje nahoru a dolů. V konstrukci, která je pod vodou, je zařízení podobné obyčejnému pístu, které se pohybuje lineárně spolu s pohybem bóje. Tento

pohyb pohání generátor, který vyrábí elektřinu, jež pak může být spojena podvodními kabely s elektrickou sítí na břehu. Na obrázku 2.8 můžeme vidět konkrétní aplikaci Power Buoy. [2]

Aktuální vývojový směr Power Buoy není napojení na elektrickou síť na břehu, ale spíš fungování jako nezávislý zdroj nepřerušovaného napájení z energie vln. Na bóji nebo na mořské dno pod ní je možné instalovat komunikační, vědecká nebo vojenská zařízení, která bude systém Power Buoy napájet. Samotná bóje také slouží jako navigační bod, který může přijímat a odesílat data v reálném čase a nepotřebuje žádné externí napájení. [16]



Obrázek 2.8: Aplikace systému Power Buoy od firmy OPT [16]

2.2 Proudové HK systémy

Proudové hydrokinetické systémy jsou zařízení, které využívají kinetickou energii proudící vody k výrobě energie. Obdobně jako u mořských HK systémy, i proudové HK systémy se mohou dělit na turbínové a bezturbínové. Příkladem turbínových systémů jsou různé rotační lopátkové stroje využívající proudění vody vyvolané buď podmořskými/říčními proudy nebo přílivem a odlivem. Na druhou stranu jsou také bezturbínové systémy, které využívají nestabilního chování kapaliny za obtékáním tělesem k jeho rozpořívování. [2]

2.2.1 Proudové HK systémy s turbínou

Proudové hydrokinetické systémy s turbínou využívají nejčastěji energii přílivu a odlivu k pohonu. Tato energie má velký potenciál na výrobu obnovitelné energie do budoucna z důvodu větší předvídatelnosti, než má solární nebo větrná energie. Zařízení využívající energii přílivu a odlivu mohou mít podobu přehrad, která přehradí vhodnou oblast (nejčastěji ústí řek do moře) a vytvoří se rezervoár, kde periodicky dochází k proudění vody. Další možnou podobou je umístění samotných turbín přímo do míst s prouděním s dostatečnými rychlostmi k výrobě energie. Tyto turbínové stroje mohou samozřejmě využívat podmořské proudy nebo říční proudění. Řešení bez nutné stavby přehrady je environmentálně šetrnější, jelikož nedochází k zástavbě vodních ploch. [2]

- **SeaGen**

SeaGen systém byl průkopníkem v turbínových strojích využívající příliv a odliv k výrobě energie bez použití přehrad. Tento systém se velmi podobá větrným elektrárnám, ale pod vodou. Vývojem a realizací se zabývala firma Marine Current Turbines (MCT) a první prototyp byl postaven u pobřeží Severního Irsku (viz obrázek 2.9 níže). Jedná se o dvě dvoulopatkové axiální turbíny s nastavitelným úhlem náklonu lopatky, což je také velmi časté u větrných elektráren. Turbíny o průměru 43 m disponovaly výkonem 600 kW každá. V provozu byl tento systém přibližně 10 let a vyrobil 11,6 GWh elektrické energie, než byl v roce

2019 úspěšně demontován. Zkušenosti získané z tohoto projektu podpořily současný i budoucí vývoj přílivových turbín a dali za vznik dalším takovým projektům. [17]



Obrázek 2.9: Systém SeaGen [18]

- **RivGen**

Systém RivGen vyrábí bezemisní elektřinu z říčních proudů a může být napojen do globální elektrické sítě nebo i na lokální síť v odlehlých oblastech, kde bude spolupracovat nebo úplně nahrazovat dieselové agregáty. K instalaci není zapotřebí velkých lodí, systém disponuje funkcí samočinného nasazení, tudíž je vhodný do odlehlých říčních či pobřežních lokalit. Systém je v provozu ukotven na dně a za pomoci speciální spirálové turbíny může generovat elektřinu. Výkon systému RivGen závisí na rychlosti proudění, ale už při rychlosti 2 m/s je udáván výkon 25 kW. Systém vyvinula a provozuje firma ORPC a je komerčně využíván v několika odločených oblastech na Aljašce, kam nezasahuje globální elektrická síť. Vizualizaci systému RivGen můžeme vidět na obrázku 2.10 níže. [19]



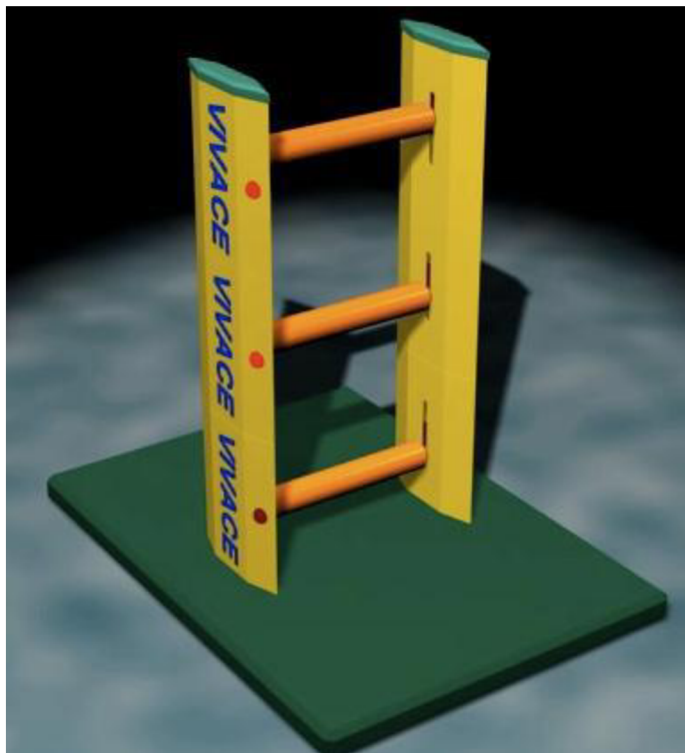
Obrázek 2.10: Vizualizace systému RivGen v říčním prostředí [19]

2.2.2 Proudové HK bez turbíny

Mezi základní princip proudových hydrokinetických systémů bez turbíny patří pohyb obtékaného tělesa indukovaný prouděním. Tyto systémy využívají interakci tělesa s kapalinou ke svému užítku a při správném nastavení i k výrobě energie. Konkrétně se jedná o děje jako oscilace indukované prouděním (FIO – *flow induced oscillations*), vibrace indukované víry (VIV – *vortex induced vibrations*), chvění, *galloping* nebo jejich kombinace. [7]

- **VIVACE**

Systém VIVACE, což je zkratkou pro anglický název Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy, anebo také italské slovo pro živé, čilé, plné energie, je lineární konvertor vodní energie založený na konceptu využití odtrhávání vírů za povrchem obtékaného tělesa. Za obtékaným tělesem se střídavě odtrhávají víry a tím vzniká tlaková nerovnováha, která vede ke vztlačkové síle na těleso. Zařízení se snaží odtrhávání vírů maximalizovat a využít vibrací indukovaných víry ke generování energie. Vibrace v rezonanci se mohou vyskytovat v širokém spektru Reynoldsova čísla, tím pádem lze získávat energii i při poměrně nízkých rychlostech proudění (od 0,25 m/s). Více o těchto jevech bude popsáno v dalších kapitolách. Tento konvertor vírové energie byl vynalezen a patentován profesorem Michael M. Bernitsasem a jeho výzkumným asistentem Kamaldev Raghavanem na Michiganské univerzitě v USA [20]. Původní návrhy se skládaly jen z válcovitého tělesa, obyčejné pružiny, tlumiče a elektrického generátoru. Nejnovější systém VIVACE je již složitější. Může mít jedno nebo víc válcových těles v horizontálním nebo vertikálním uspořádání, pásový řemen s převody, regulátor tlumících sil, ovládání tuhosti pružiny a samozřejmě elektrický generátor. Obrázek 2.11 níže ukazuje model systému VIVACE. Výhodami použití konvertoru vírové energie je jeho vysoká energetická hustota, neobstruktivní konstrukční řešení, nízké nároky na údržbu, robustnost, modulárnost a životní cyklus přibližně 10–20 let. [7]



Obrázek 2.11: Návrh systému VIVACE se třemi pohyblivými válcovými tělesy [21]

3 Oscilátory

Některé z výše popsaných systému vycházejí ze základního principu oscilátoru. Oscilátor je velmi jednoduchý dynamický systém, který ale navzdory své jednoduchosti slouží k popisu velmi důležitých fyzikálních jevů. Rozsah případů, kdy je použit model oscilátoru v některé ze svých podob, je velmi široký. Mezi základní a také nejjednodušší příklad periodického pohybu patří prostý harmonický pohyb, ve kterém se periodicky mění libovolná fyzikální veličina. Předpokládejme časovou funkci ve tvaru sinu

$$y(t) = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right), \quad (3.1)$$

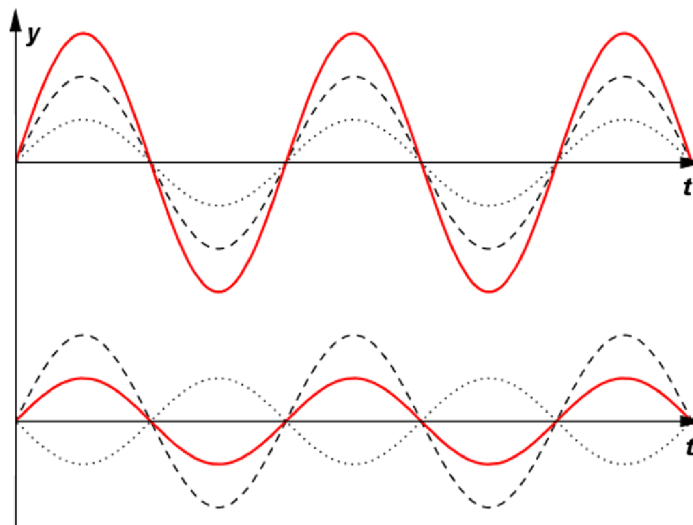
kde A je *amplituda*, funkce $y(t)$ osciluje mezi A a $-A$, jelikož funkce sinus osciluje mezi 1 a -1. Funkce $y(t)$ je periodická v čase, což znamená, že hodnota v čase t bude shodná jako hodnota v čase $t' = t + T$, kde T se nazývá *perioda*. *Frekvence* f je definována jako $f = 1/T$. Úhlová frekvence kmitání je vyjádřena jako $\omega_0 = 2\pi/T = 2\pi f$. Tímto získáváme několik matematických předpisů pro průběh jednoduchého periodického pohybu

$$y(t) = A \sin\left(2\pi \frac{t}{T}\right) = A \sin(2\pi f t) = A \sin(\omega_0 t). \quad (3.2)$$

Oscilátory či obecně kmitavý pohyb lze dělit mnoha způsoby, jedno ze základních rozdělení je na systémy lineární a na soustavy obsahující nelineární prvky. [22]

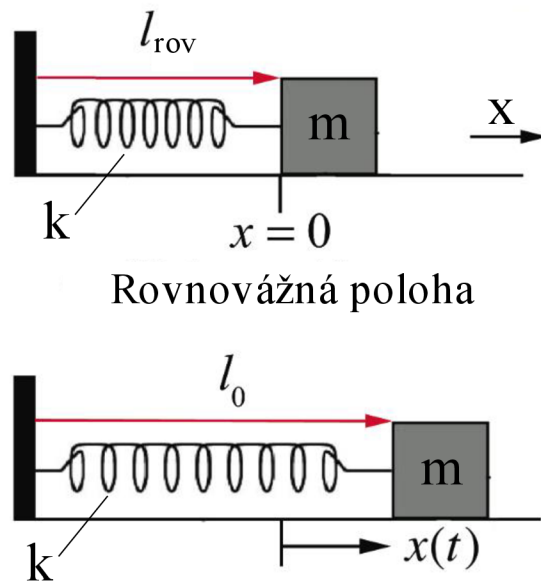
3.1 Lineární oscilátory

Jako základní definicí lineárního systému je možnost uplatnění principu superpozice, což znamená, že výsledné řešení systému je dáno superpozicí dílčích řešení. Jednoduchý příklad je níže (viz obrázek 3.1), jedná se o graficky vykreslený průběh výchylky dvou mechanických oscilátorů a jelikož se jedná o lineární oscilátory je možné je pomocí superpozice sečíst dohromady. Červeně je poté vykreslen výsledný průběh složeného pohybu oscilátoru. Obecně pro výslednou okamžitou výchylku platí: „Koná-li hmotný bod současně dva nebo více harmonických pohybů v jedné přímce s okamžitými výchylkami y_1, y_2, \dots , je okamžitá výchylka výsledného kmitání dána jejich součtem $y = y_1 + y_2 + \dots$.“ [23]



Obrázek 3.1: Ukázka skládání kmitání pomocí superpozice [23]

Jako ukázkový příklad demonstrace jednoduchého harmonického pohybu a k definování základní pohybové rovnice je použita kostka na pružině pohybující se po povrchu bez tření (viz obr. 3.2).



Obrázek 3.2: Schéma ukázkového příkladu (kostka na pružině) [22]

Předpokládejme, že pružina má tuhost k a délku l_{rov} , při které je kostka v klidu. Při posunutí kostky v pozitivním směru osy x , dojde k vychýlení z rovnovážné polohy a kostka se nachází v bodě $x(t)$ vzhledem k rovnovážné poloze (jak můžeme vidět na obrázku 3.2). Síla od pružiny působící na kostku je lineární vratná síla a je definována jako $F_k = -kx$. Počáteční podmínky jsou v tomto případě následující. Poloha kostky při natažení vůči rovnovážné poloze je dána rozdílem délek pružin $x_0 = l_0 - l_{rov} > 0$ a počáteční rychlost v v ose x je rovna $v_{x,0} = v_0 > 0$. Druhý Newtonův zákon ve směru osy x poté můžeme přepsat jako

$$-kx = m \frac{d^2x}{dt^2}. \quad (3.3)$$

Rovnice 3.3 se nazývá pohybová rovnice netlumeného kmitavého pohybu, jedná se o lineární diferenciální rovnici druhého řádu, kde k (tuhost pružiny) a m (hmotnost tělesa) jsou konstanty. K nalezení řešení této pohybové rovnice odhadneme možné řešení a poté si ověříme, zda tento odhad splňuje veškeré náležitosti. Jako vhodný kandidát se zdá funkce kosinus v následující podobě

$$x(t) = A \cos(\omega_0 t). \quad (3.4)$$

Pokud dosadíme tuto funkci a její druhou derivaci do mírně upravené pohybové rovnice získáme

$$-\omega_0^2 A \cos(\omega_0 t) = -\frac{k}{m} \cos(\omega_0 t). \quad (3.5)$$

Z čehož vyplývá, že je tato rovnice platná pokud

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}}. \quad (3.6)$$

Díky tomuto vztahu je možné přepsat periodu oscilace na

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \sqrt{\frac{m}{k}}, \quad (3.7)$$

což nám jako možné řešení pohybové rovnice dává

$$x(t) = A \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right). \quad (3.8)$$

Toto řešení ale bohužel nespĺňuje již zmíněné počáteční podmínky, jako další možné řešení by se mohla zdát funkce sinus, ale bohužel ani ta sama o sobě počáteční podmínky nespĺňuje. Obecné řešení pohybové rovnice je tedy dáno lineární kombinací funkcí sinu a kosinu,

$$x(t) = C \cos(\omega_0 t) + D \sin(\omega_0 t), \quad (3.9)$$

kde C a D jsou konstanty, které závisí na počátečních podmínkách. Rychlost tělesa v čase t ve směru osy x získáme derivací rovnice polohy (rov. 3.4)

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = -\omega_0 C \sin(\omega_0 t) + \omega_0 D \cos(\omega_0 t). \quad (3.10)$$

K zjištění konstant C a D substituujeme do rovnice (3.9) $t = 0$ a zjistíme, že počáteční poloha v čase $t = 0$ je

$$x_0 \equiv x(t = 0) = C. \quad (3.11)$$

Dále vyřešíme rovnici rychlosti ve směru osy x (rov. 3.10) pro čas $t = 0$ a zjistíme, že

$$v_{x,0} \equiv v_x(t = 0) = -\omega_0 C \sin(0) + \omega_0 D \cos(0) = \omega_0 D. \quad (3.12)$$

Dostáváme konstanty C a D a tím i obecné řešení pohybové rovnice netlumeného kmitání. Poloha tělesa je dána

$$x(t) = x_0 \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + \frac{v_{x,0}}{\sqrt{k/m}} \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) \quad (3.13)$$

a rychlost ve směru osy x získaná derivací předchozí rovnice anebo dosazením konstant C a D do rovnice 3.10 je rovna

$$v_x(t) = -\sqrt{\frac{k}{m}} x_0 \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right) + v_{x,0} \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} t\right). \quad (3.14)$$

3.1.1 Nucené netlumené kmitání

Pokud bychom na soustavu tělesa na pružině z předchozí kapitoly nepřetržitě působili harmonicky proměnnou silou ve tvaru

$$F_x(t) = F_0 \sin(\omega t), \quad (3.15)$$

kde ω je frekvence působící síly, tak by v oscilátoru bylo vynucováno harmonické kmitání. Tento jev je nazýván nucené netlumené kmitání oscilátoru. Pohybová rovnice má poté tvar

$$m \frac{d^2 x}{dt^2} + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (3.16)$$

Obecné řešení opět vychází z lineární kombinace dílčích řešení a výsledná rovnice obecného řešení pro polohu tělesa vypadá následovně

$$x(t) = C \cos(\omega_0 t) + D \sin(\omega_0 t) + \frac{F_0 \sin(\omega t)}{-m\omega^2 + k}, \quad (3.17)$$

kde C a D jsou opět integrační konstanty, pro jejichž zjištění je nutné vhodné zvolení počátečních podmínek. Při vypuštění kostky z klidu bude počáteční poloha x v čase $t = 0$ rovna

$$x(t = 0) = 0 \quad (3.18)$$

a počáteční rychlost v čase $t = 0$ bude také

$$\dot{x}(t = 0) = 0. \quad (3.19)$$

Při dosazení těchto podmínek do rovnice 3.17 a její první derivace, dostaneme konstanty C a D

$$C = 0, \quad (3.20)$$

$$D = \frac{-F_0 \omega}{\omega_0(-m\omega^2 + k)}. \quad (3.21)$$

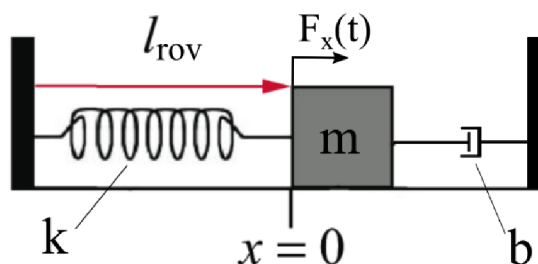
Po dosazení těchto konstant zpět do rovnice 3.17 získáváme konečný tvar polohy tělesa při nuceném netlumeném harmonickém pohybu, který vypadá následovně

$$x(t) = -\frac{F_0 \omega \sin(\omega_0 t)}{\omega_0(-m\omega^2 + k)} + \frac{F_0 \sin(\omega t)}{-m\omega^2 + k} \quad (3.22)$$

Derivací rovnice 3.22 bychom získali konečný tvar rychlosti tělesa ve směru x pro nucené netlumené kmitání. [22]

3.1.2 Tlumené nucené kmitání

Pro co nejbližší přiblížení k reálnému hydrokinetickému sběrači energie je nutné do našeho ukázkového příkladu zavést tlumení. Je zřejmé, že ve veškerém odvozování v předchozích kapitolách je myšleno kmitání ve vzduchu. Aby tyto rovnice platili i vodě, což je případ v této práci zkoumaného hydrokinetického sběrače energie, bylo by nutné korektně zavést sílu od kapaliny na tělesa a zohlednit pohyb tělesa v kapalině. Avšak tlumené nucené kmitání tělesa na vzduchu je hydrokinetickému sběrači ze všech zde odvozovaných přístupů nejbližší. Na schématickém náčrtu níže můžeme vidět přidání tlumiče do soustavy, tento tlumič brání pohybu tělesa díky odporovým silám.



Obrázek 3.3: Schéma nuceného tlumeného kmitání

Odporová síla od tlumiče působí proti pohybu tělesa a je úměrná rychlosti v tělesa, tudíž pro její velikost platí

$$F_b = -bv = b \frac{dx}{dt}. \quad (3.23)$$

Konstanta b se odvíjí od vlastností tlumiče. Odporová síla tlumiče působí proti pohybu oscilátoru, výsledná pohybová rovnice pro nucené tlumené kmitání pak vypadá takto

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \sin(\omega t). \quad (3.24)$$

Tři možné případy tlumeného kmitání jsou podkritické, kritické a nadkritické tlumení. V tabulce 3.1 níže můžeme vidět, jak tyto případy odlišit.

Nadkritické	$b^2 - 4mk > 0$
Kritické	$b^2 - 4mk = 0$
Podkritické	$b^2 - 4mk < 0$

Tabulka 3.1: Rozdělení tlumené kmitání

Při řešení rovnice 3.24 se zavádí substituce, ze které vyplývá δ [s^{-1}] koeficient útlumu (viz rovnice 3.25)

$$\delta = \frac{b}{2m}. \quad (3.25)$$

Pomocí něj je pak možné zjistit vlastní frekvenci tlumených kmitů

$$\omega' = \sqrt{\omega_0^2 - \delta^2} = \sqrt{\frac{k}{m} - \frac{b^2}{4m^2}}. \quad (3.26)$$

Samotné řešení pohybové rovnice pro nucené tlumené kmitání již není triviální, jelikož se jedná o nehomogenní diferenciální rovnici. Obecné řešení takové diferenciální rovnice má dvě části, první je obecné řešení příslušné homogenní diferenciální rovnice a druhá část je

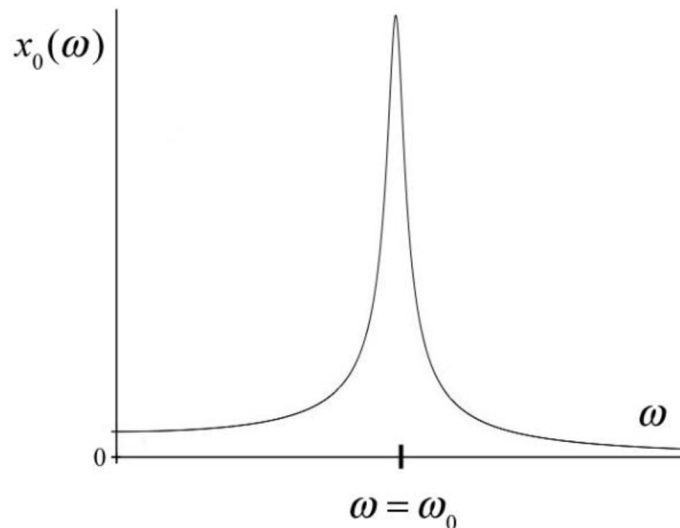
partikulární řešení nehomogenní rovnice. Obecné řešení pohybové rovnice může tedy vypadat následovně

$$x(t) = A_0 \cdot e^{-\delta t} \sin(\omega' t) + A \cdot \sin(\omega t). \quad (3.27)$$

Dva členy v obecném řešení jsou způsobeny dvěma různými vlivy na pohyb tělesa. První je působení třecí a pružné síly (první člen – tlumené kmity), druhý je vlivem budící síly, jde o periodický pohyb na frekvenci budící síly. Po uplynutí tzv. přechodového stavu prakticky vymizí vliv prvního členu a tím prakticky i počátečních podmínek a těleso osciluje pouze podle druhého členu rovnice 3.27. Což znamená, že nezáleží na počátečních podmínkách jako je počáteční poloha nebo rychlost a po určité době začne těleso vždy kmitat podle budící síly. [24] [25]

3.1.3 Rezonance

Pokud se frekvence působící periodické síly na těleso (ω) rovná vlastní frekvenci tělesa (ω_0) dochází k tzv. rezonanci. Jedná se o jev, kdy prudce narůstá amplituda kmitání tělesa. Na grafu (obrázek 3.4 níže) můžeme vidět, že pokud se frekvence budící síly přibližuje k frekvenci systému, amplituda postupně narůstá až do momentu rovnosti, kde je hodnota amplitudy maximální, při dalším zvyšování frekvence působící síly amplituda opět klesá.



Obrázek 3.4: Graf závislosti amplitudy x_0 na budící frekvenci ω [22]

Rezonance je všeobecně nežádoucí jev, který může mít fatální následky. Jsou ovšem i případy, kdy je snaha o dosažení rezonance. Například v hudebnictví hraje rezonance klíčovou roli, kdy se využívá k zesílení zvuků ve většině hudebních nástrojů. Dalším možným využitím rezonance jsou hydrokinetické sběrače energie na bázi vibrací indukovaných víry (VIV). Fundamentální charakteristikou odezvy tělesa při VIV je, že frekvence, s jakou se víry od tělesa odtrhávají opustí Strouhalovu frekvenci a místo toho se velmi blízce synchronizuje s vlastní frekvencí systému, tedy jinými slovy, těleso se dostává do rezonance. V důsledku tohoto jevu výrazně roste amplituda oscilací v závislosti na strukturálních parametrech. Mimo tento rezonanční region amplituda výrazně klesá. Velikost amplitudy přímo ovlivňuje generovaný výkon případného sběrače hydrokinetické energie na bázi VIV [20].

V rezonančním regionu je dynamika tělesa periodická a pro určité vírové struktury téměř sinusová. Tím pádem mohou být vibrace indukované víry na tělese modelovány použitím modelu lineárního oscilátoru. Mimo rezonanční region je zapotřebí použít nelineární model.

3.2 Nelineární oscilátory

Jak již bylo zmíněno, lineární systémy představují nejjednodušší, idealizované modely reálných procesů, kde výsledná řešení stojí na řadě zjednodušení či omezení, aby je bylo možné řešit soustavou lineárních diferenciálních rovnic. Ale ne vždy je možné reálné problémy takto zjednodušit, soustava LDR takové problémy nedokáže popsat v plném rozsahu a výsledek by nemusel být fyzikálně korektní či by mohl být nestabilní. Proto je nutné, k dosažení korektních výsledků, lineární rovnice obohatit o nelineární členy. Další důležitou definicí nelineárních oscilátorů je neplatnost superpozice, tedy není možné jednoduše sečíst dva dílčí průběhy harmonického pohybu a získat výsledný průběh. “V nelineárním systému platí princip superpozice pouze pro malou množinu izolovaných bodů, kterým říkáme fixní body [26].”

Mezi příklady nelineárních oscilátorů se řadí Duffingův nebo Van der Polův oscilátor a první zmíněný bude níže rozebrán detailněji.

3.2.1 Duffingův oscilátor

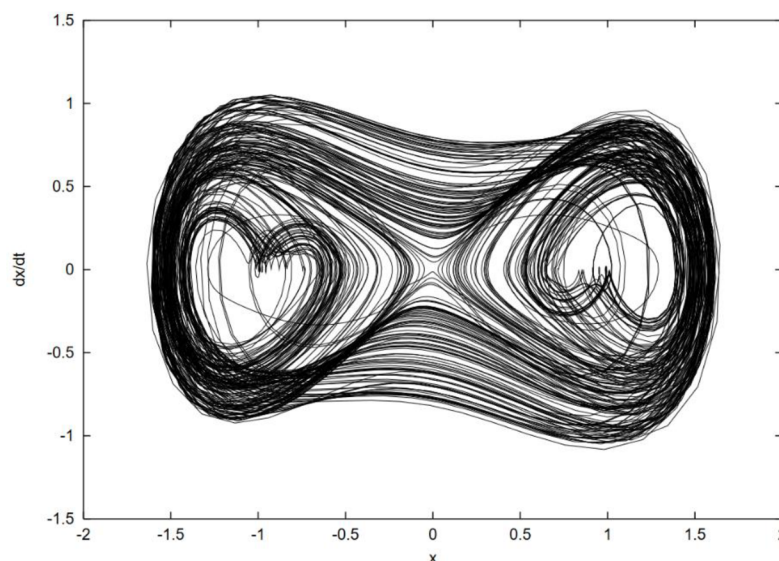
Duffingův oscilátor nebo spíše Duffingova rovnice dostala své jméno po německém inženýru Georgi Duffingovi, který ve své knize o nelineárních oscilátorech z roku 1918 [27] poprvé popsal pohybové rovnice s nelinearitou kvadratického a kubického stupně. V dnešní době se jako Duffingova rovnice označuje téměř každá pohybová rovnice s kubickým členem tuhosti nehledě na druh tlumení nebo buzení.

Duffingova rovnice vznikla za účelem korekce funkce potenciální energie standardní lineární pohybové rovnice a její tvar vypadá následovně

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \alpha x + \beta x^3 = \gamma \cos(\omega t), \quad (3.28)$$

kde $\alpha, \beta, \gamma, \delta$ jsou konstanty, α odpovídá tuhosti pružiny, β je nelineární tuhost pružiny a popisuje její „tvrdnutí“ ($\beta > 0$) anebo „měknutí“ ($\beta < 0$), γ charakterizuje amplitudu budící síly, δ je koeficient tlumení a úhlová frekvence ω .

Pomocí Duffingovy rovnice je možné modelovat různé složitější systémy, kde se tuhost nechová dle Hookova zákona. Systém chovající se podle Duffingovy rovnice je značně citlivý na počáteční podmínky. Stačí velmi malé změny v parametrech a soustava skokově mění rovnovážnou polohu kolem, které kmitá. Duffingův oscilátor je udáván jako ukázka chaoticky se chovajícího systému. Ukázkou chaotického chování Duffingova oscilátoru můžeme vidět na jeho fázovém portrétu níže.



Obrázek 3.5: Ukázka chaotického chování Duffingova oscilátoru [28]

4 Význam vibrací indukovaných víry

Fenomén odtrhávání vírů za obtékaným tělesem pozoroval už v 16. století Leonardo da Vinci, který si všiml víření za sloupky v tekoucí řece. Jeho slavné ilustrace, kde zakresluje chování kapaliny za tělesem, můžeme vidět na obrázku 4.1. Snažil se porozumět vlivu chování kapaliny na obtékané těleso.



Obrázek 4.1: Ilustrace víření za obtékaným tělesem od Leonarda da Vinciho [29]

K lepšímu pochopení tohoto jevu přispělo bohužel až několik katastrof, které se staly důsledkem vibrací indukovaných víry za obtékaným tělesem. Nejznámější z nich se odehrála v roce 1940 v USA. Most přes úžinu Tacoma byl v provozu pouze několik měsíců, když se kvůli silnému větru zřítíl. Samotný vítr ale zničení mostu nezavinil, jednalo se o kombinaci několika jevů způsobených vibracemi indukovanými prouděním kolem tělesa a také špatnou konstrukcí mostu, kdy rozhodujícím jevem bylo tzv. chvění (*flutter*), které zavinilo kolaps celého mostu. Na obrázku 3.2 níže můžeme vidět již deformovanou konstrukci mostu. Další důležitou událostí, která přispěla k lepšímu pochopení interakce tekutin se strukturami, bylo zřícení chladících věží v elektrárně Ferrybridge ve Velké Británii v roce 1965. Osm chladících věží, ve dvou řadách, bylo postaveno poměrně blízko u sebe a při zvýšené rychlosti větru se za první řadou tvořily vírové struktury, které silně namáhaly druhou řadu věží. Frekvence odtrhávání vírů byla přibližně v rezonanci s vlastní frekvencí věží a tři ze čtyř věží v druhé řadě se zřítily. [30]



Obrázek 4.2: Deformovaný most přes úžinu Tacoma těsně před kolapsem [31]

Nyní už je velmi dobře známo, že při proudění kapaliny kolem tělesa, například ve tvaru válce, dochází vlivem viskózních jevů k odtrhávání kapaliny od povrchu tělesa. Toto oddělení kapaliny od tělesa se může vyvinout až na periodické odtrhávání vírů v oblasti za tělesem. Odtržené víry způsobují vznik střídavých sil na povrch tělesa, což může vést, pokud jsou síly dostatečně velké, k rozkmitání tělesa a případně k jeho deformaci. V důsledku toho se pochopení základní povahy vibrací indukovaných prouděním stalo velmi důležitým tématem, aby se předešlo dalším technickým selháním [2]. Mnoho vědců [32] se proto snažilo tuto interakci těles s kapalinou co nejvíce eliminovat. V této práci bude ale popsána možnost využití této ničivé síly vibrací v náš prospěch tím, že tyto oscilace přeměníme na užitečnou energii.

Výše zmíněný jev se obecně nazývá jako vibrace indukované prouděním (FIV = *flow-induced vibrations*), jeho možné dělení je na již zmiňované vibrace indukované víry, *galloping*, vibrace indukované buzením (WIV = *wake-induced vibrations*) a chvění (*flutter*), dělení je založeno na počtu nebo geometrii obtékaných těles. [3]

VIV a *galloping* jsou dva nejběžnější druhy vibrací indukovaných prouděním. VIV je termín používaný k označení samobuzeného oscilování válcového tělesa, které je způsobeno periodickými silami od odtrhávajících vírů. [3]

Naopak *galloping* není způsoben odtrháváním vírů, ale spíše pohybem mezních vrstev na povrchu nekruhového tělesa a tím vzniklých smykových a tlakových sil. Vlastnosti *gallopingu* jsou vysoká amplituda a nízká frekvence. Studie zmíněné v [33] ukazují, že *galloping* může vznikat vlivem geometrie tělesa nebo ovlivnění proudění dalšími tělesy v blízkém okolí.

WIV je poměrně specifický případ interakce dvou a více těles. Kdy pozorované těleso je v úplavu za jiným tělesem a dynamicky reaguje na nestability způsobené odtrháváním mezní vrstvy za prvním tělesem. [3]

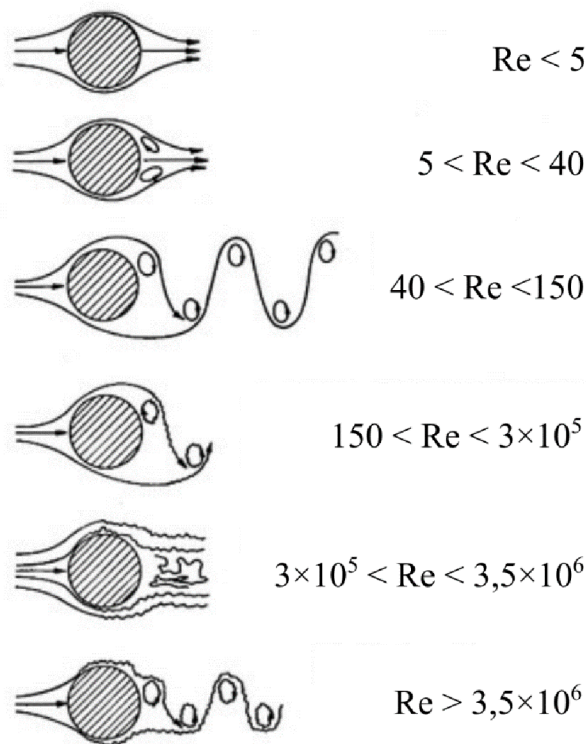
Flutter je dynamická nestabilita způsobená zpětnou vazbou mezi deformací tělesa a silami vyvolanými obtékaným proudem (síly jsou závislé na vychylce tělesa). [3]

4.1 Obtékání stacionárního válcového tělesa

Nejběžněji zkoumaným modelem konkrétního tvaru je válcové těleso, které má širokou škálu aplikací díky jeho jednoduché axisymetrické geometrii bez ostrých hran. Zároveň při proudění kolem válcového tělesa dochází k separaci mezní vrstvy kapaliny od povrchu, což má za následek tvorbu nestabilních vírů v oblasti úplavu. Existuje několik důležitých parametrů, které ovlivňují odtrhávání vírů. Mezi základní bezrozměrný parametr patří Reynoldsovo číslo, které je poměrem mezi setrvačnými a viskózními silami a popisuje přechod mezi laminárním a turbulentním prouděním. Má vliv na tvorbu vírových struktur za obtékaným tělesem. Reynoldsovo číslo je definováno jako

$$Re = \frac{u \cdot D}{\nu}, \quad (4.1)$$

kde u je rychlost volného proudění kapaliny, D je průměr obtékaného tělesa a ν je kinematická viskozita kapaliny. Obrázek 4.3 níže udává závislost odtrhávání vírů na Reynoldsově čísle.



Obrázek 4.3: Odtrhávání vírových struktur v závislosti na Reynoldsově čísle [34]

Z obrázku 4.3 výše můžeme vyčíst, že pro $Re < 5$ nedochází k žádné separaci mezních vrstev, kapalina proudí podél povrchu tělesa. Při mírném zvýšení Reynoldsova čísla ($5 < Re < 40$) se začnou za tělesem tvořit dva stabilní víry v blízkosti tělesa, nicméně proudění v úplavu je stále laminární. Od hodnoty $Re = 40$ se proudění v úplavu stává nestabilním a dochází k separaci mezní vrstvy a periodickému odtrhávání vírů po proudě. Reynoldsovo číslo v intervalu přibližně $150-3 \times 10^5$ je subkritické a dochází k transformaci z laminárního na turbulentní proudění a od vyšších hodnot v tomto intervalu je vírová stezka plně turbulentní. V intervalu $3 \times 10^5-3,5 \times 10^6$ je proudění silně nestabilní, dochází k zániku vírové stezky a úplav za tělesem je mnohem užší. Pokud hodnota Re dosáhne hodnotu $3,5 \times 10^6$ a výše, dojde k postupnému obnovení vírové stezky s turbulentní mezní vrstvou a užším úplavem než v předchozích případech. [34]

Problém odtrhávání vírů za obtékaným tělesem se netýká pouze těles s kruhovým průřezem, ale může existovat i pro tělesa s jinými průřezy, např. čtvercový, trojúhelníkový, oválný atd. Pro různá tělesa a pro různé poměry charakteristických rozměrů tělesa se mohou konkrétní hodnoty Reynoldsova čísla těchto přeměn lišit. [35]

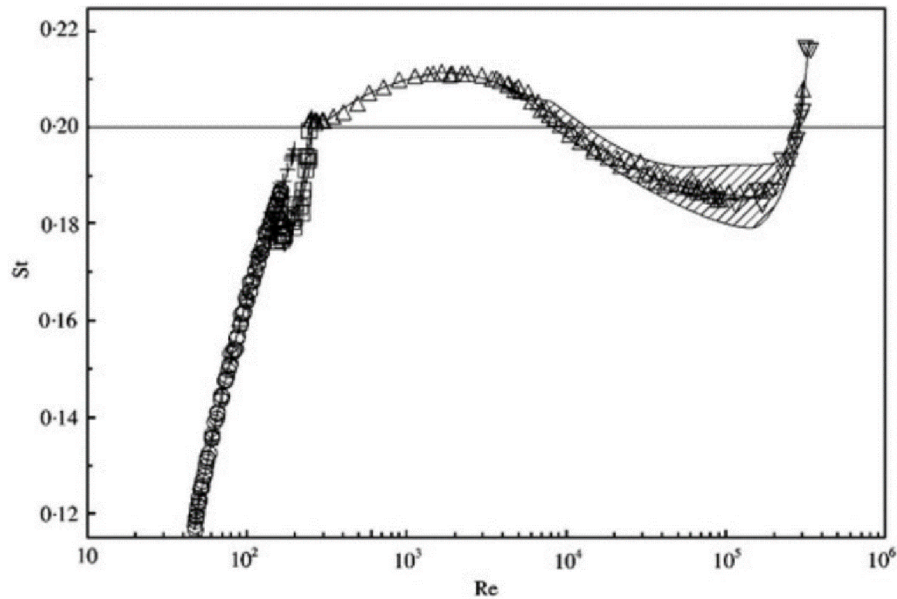
Podoba periodicky se odtrhávajících vírů za stacionárním tělesem ve volném proudění se nazývá Kármánova vírová stezka podle amerického vědce maďarského původu Theodora von Kármána.

Vírová stezka je charakteristická střídavým odtrháváním vírů vždy s opačnou rotací. Bezrozměrná frekvence, na které se víry odtrhávají do úplavu za tělesem, je známá jako Strouhalovo číslo (St)

$$St = f_{St} \cdot \frac{D}{u} \quad (4.2)$$

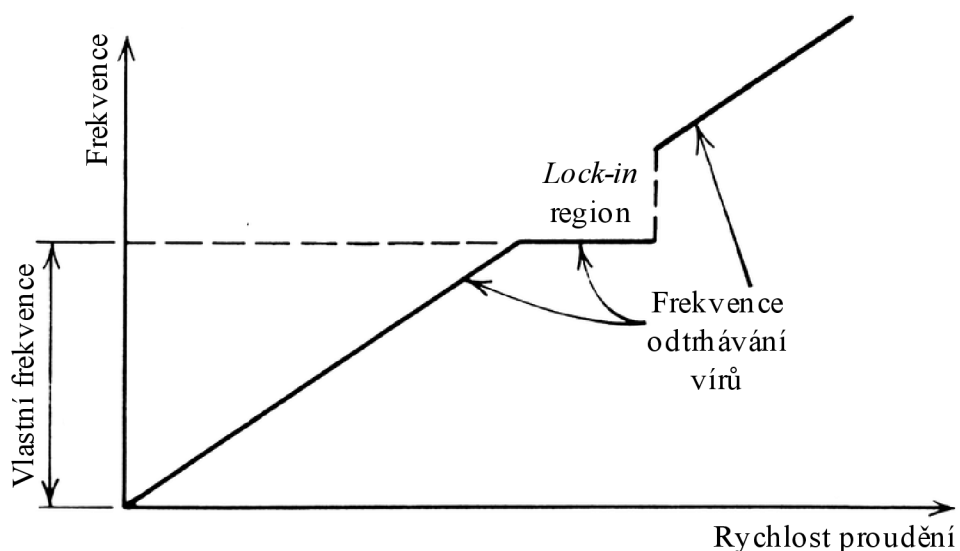
a je získáno vynásobením pozorované frekvence odtrhávání vírů f_{St} poměrem charakteristického rozměru tělesa D a rychlosti volného proudění kapaliny u . Kombinací několika experimentálních studií byla zjištěna závislost Strouhalova čísla na Reynoldsovu a je

ukázána na obrázku 4.4 níže. Pro velkou část subkritických Reynoldsových čísel se Strouhalovo číslo přibližně pohybuje kolem hodnoty 0,2 pro těleso s kruhovým průřezem. [36]



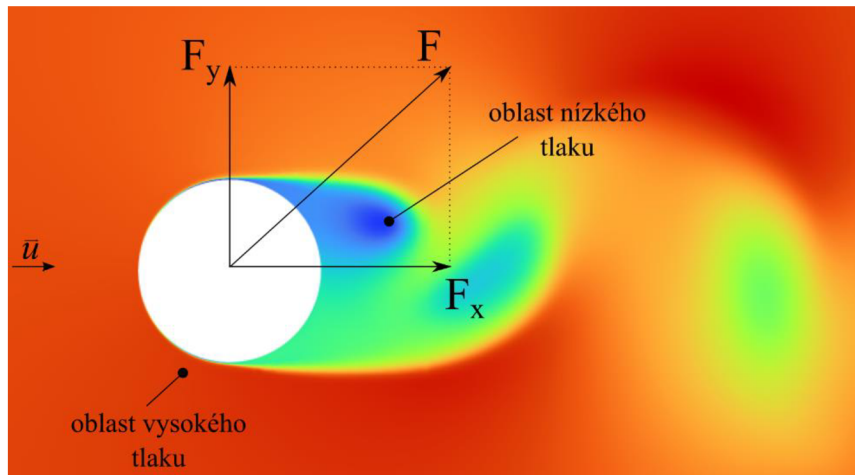
Obrázek 4.4: Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově čísle [36]

Strouhalovo číslo je konstantní pro danou geometrii, tedy, že s rostoucí rychlostí proudění se zvyšuje frekvence odtrhávání vírů, aby zůstalo Strouhalovo číslo neměnné. Ale může nastat výjimka pro malý rozsah rychlostí proudění, když se přiblíží vlastní frekvence obtékaného tělesa k frekvenci odtrhávání vírů. V ten moment dochází k uzamčení frekvence (tzv. *lock-in phenomenon*) a i s rostoucí rychlostí proudění, je stále frekvence stejná, což vede k nižšímu Strouhalovu číslu. Frekvence odtrhávání vírů je tedy v tom okamžiku závislá na vlastní frekvenci tělesa, a ne na rychlosti proudění, doprovázeno je to vysokou amplitudou oscilací (rezonance). Při dalším zvyšování rychlosti proudění tento jev vymizí a amplituda kmitů opět klesá a Strouhalovo číslo se vrací do normálu. Graficky je to znázorněno na obrázku 4.5. [37]



Obrázek 4.5: Grafické znázornění lock-in fenoménu (převzato z [37])

Kvůli periodickému odtrhávání vírů za obtékaným tělesem se tlakové rozložení kolem tělesa také periodicky mění. Integrací tlaku působící na povrch obtékaného tělesa dostaneme výslednou působící sílu. Tato síla může být rozložena na dvě na sebe kolmé složky, do směru rovnoběžného s prouděním na odporovou sílu a do směru kolmého na proudění na vztlakovou sílu, viz obrázek 4.6.



Obrázek 4.6: Rozložení sil působících na válcové těleso

Během periodického odtrhávání vírů se tyto síly mění v závislosti na frekvenci f_{St} . Bylo dokázáno, že pro upevněné jednoduché válcové těleso v proudu kapaliny má složka síly v normálovém směru F_y stejnou frekvenci jako odtrhávání vírů, ale frekvence síly rovnoběžné se střední proudnicí F_x je dvojnásobná [38].

Dalším důležitým parametrem je bezrozměrný vztlakový koeficient. Vychází ze vztlakové síly a je definovaný jako

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2} \rho a u^2}, \quad (4.3)$$

kde F_y je vztlaková síla, ρ je hustota kapaliny, a je charakteristická plocha tělesa a u je rychlost volného proudění kapaliny. Je to obecná definice pro jakýkoliv tvar tělesa a tento koeficient se používá i pro tělesa s více stupni volnosti. [39] Stejným způsobem můžeme definovat i bezrozměrný koeficient odporové síly

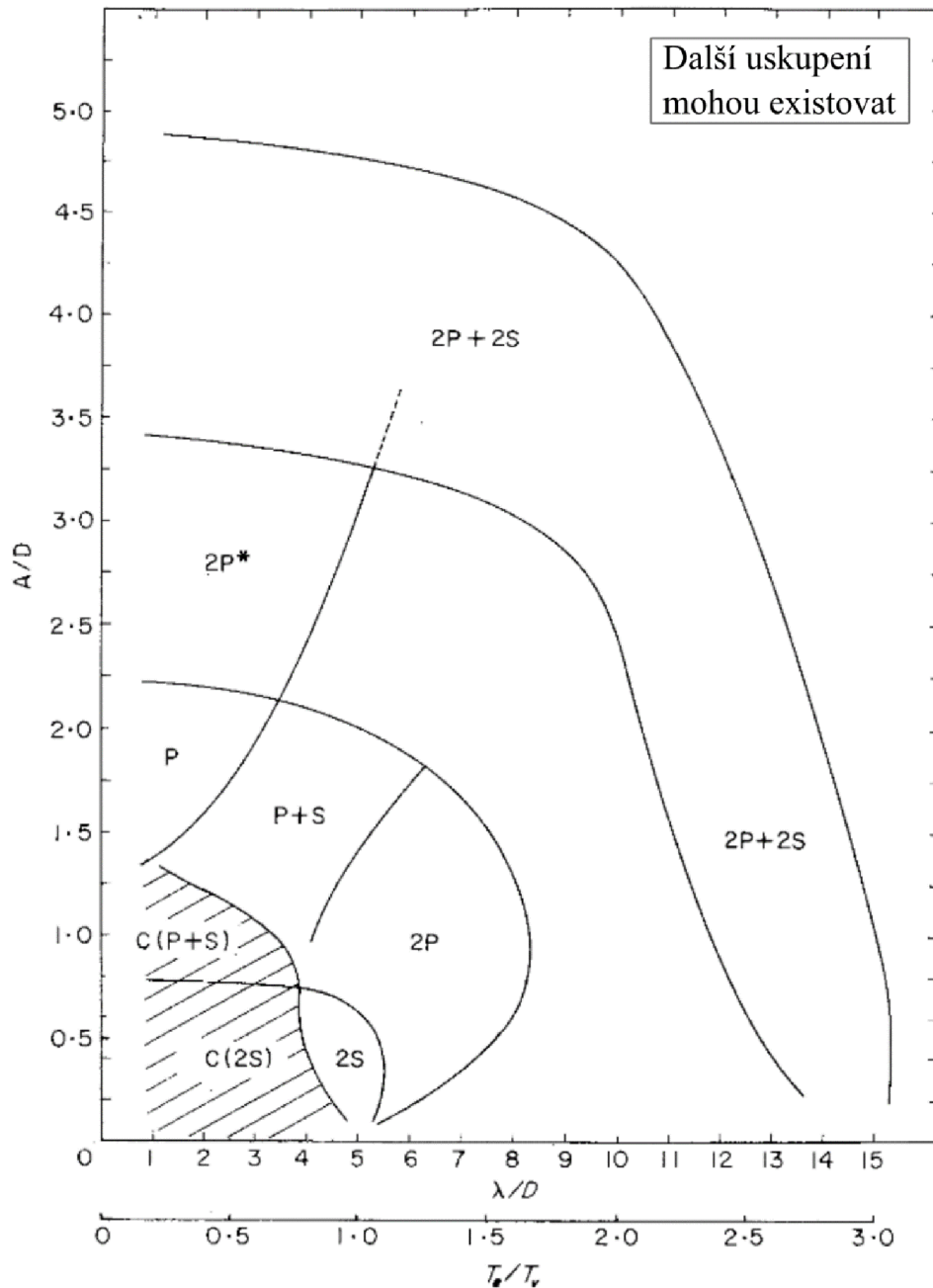
$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2} \rho a u^2}, \quad (4.4)$$

kde F_x je odporová síla.

4.1.1 Vírové struktury za oscilujícím tělesem

Pro stacionární těleso, při $Re > 40$, vírové struktury v úplavu za tělesem mají jednu obecnou strukturu, také známou jako Kármánova vírová stezka. Jedná se o alternující odtrhávání víru z jedné a druhé strany tělesa do úplavu. Tyto víry jsou pak dále unášeny proudem a eventuálně se rozptýlí. Nicméně pokud je tělesu dovoleno vykonávat pohyb (oscilovat) ve směru kolmém na proudění, má tedy jeden stupeň volnosti, v úplavu mohou začít vznikat různé vírové struktury odlišné od tradiční Kármánovy vírové stezky. Různé uskupení vírových struktur bylo experimentálně testováno a popsáno Williamsonem a Roshkem [40]. Výsledkem jejich práce bylo vykreslení různých vírových struktur pro vynucené kmity do grafické roviny v závislosti amplitudy na frekvenci, konkrétně na ose x je vynesena poměr

vlnové délky a průměru obtékaného tělesa a na ose y amplitudový poměr. Vlnová délka je definována jako $\lambda = U \cdot T_e$, kde U je rychlost proudění a T_e je perioda oscilací tělesa. Vírové struktury jsou označeny podle počtu odtržených vírů za jeden cyklus, např. 2S znamená dva samostatné víry v jednom cyklu, 2P jsou dva páry (celkem tedy 4 víry za jeden cyklus). Dále se tam mohou vyskytovat různé kombinace samostatných vírů a párů, jako např. P+S nebo 2P+2S. Grafické zobrazení, se kterým Williamson a Roshko přišli, dostalo obecný název jako Williamson-Roshko rovina (obrázek 4.7), kdy nejvýznamnějšími oblastmi pro výzkum vibrací způsobených prouděním kolem tělesa jsou oblasti 2S a 2P.



Obrázek 4.7: Úplná Williamson-Roshko rovina znázorňující možné vírové struktury v úplavu za vynuceně kmitajícím válcovým tělesem [40]

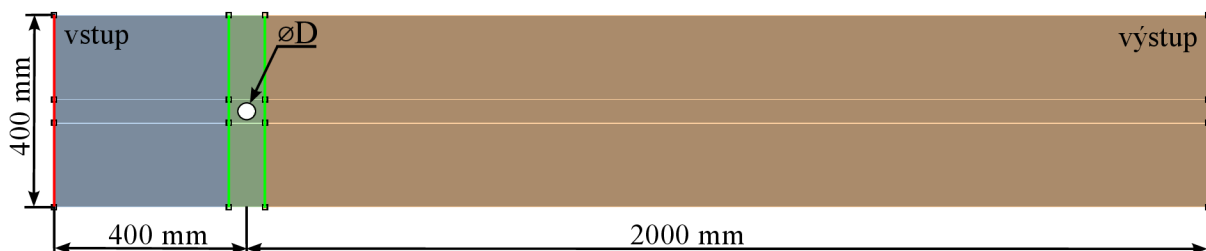
5 CFD simulace vibrací indukovaných víry

V praktické části této práce bude provedena numerická simulace v programu Ansys Fluent. Jedná se o dvojrozměrnou simulaci tělesa s jedním stupněm volnosti ponořeného do ohraničeného proudu kapaliny. Těleso bude mít průřez ve tvaru kruhu, čtverce a trojúhelníku a jeho kmity ve směru kolmém na směr proudění budou buzeny pouze proudící kapalinou. Proměnnými parametry v zadání bude hmotnost tělesa, tuhost uložení a tlumení. Zkoumán bude vliv těchto parametrů na charakter kmitání. Vyhodnocovány budou působící síly na těleso, rychlost tělesa, poloha tělesa, a také možný výkon zařízení.

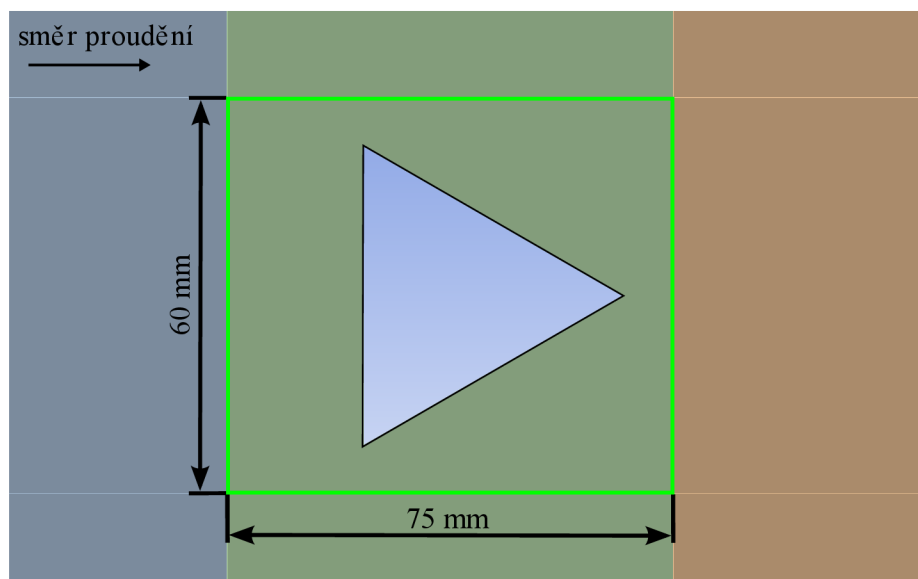
Nejprve bude popsána geometrie obtékaných těles a celého ohraničeného proudového pole. Poté bude přiblížena tvorba dynamické výpočetní sítě a nastavení výpočetního řešiče. Dále bude objasněn samotný princip vyhodnocování výsledků a také i samotné výsledky.

5.1 Geometrie

Geometrie zvoleného sběrače hydrokinetické energie byla zjednodušená na dvojrozměrné těleso různého tvaru oscilujícího v dané výpočetní doméně. Veškerá geometrie byla vytvořena v softwaru Ansys DesignModeler. Výpočetní doména, kterou můžeme vidět na obrázku 5.1, je tvořena z obdélníku, ve kterém proudí kapalina. Vlevo je vstup do domény a vpravo výstup. Rozměry domény jsou 2400 mm na délku a 400 mm na výšku, obtékané těleso má charakteristický rozměr 35 mm. Pro kruh je to jeho průměr, pro čtverec délka strany a pro rovnostranný trojúhelník se jedná také o délku strany. Umístění zkoumaného tělesa v doméně je viditelné na obrázku 5.1. Žádné další doplňkové domény k eliminaci vlivu okrajových podmínek nejsou uvažovány, a to z důvodu snížení výpočetních nároků. Zkoumanými tvary byly tedy kruh, trojúhelník a čtverec, výpočetní doména byla pro všechny tělesa totožná a měnil se pouze tvar tělesa. Jelikož k simulaci oscilací tělesa bylo nutné využít dynamickou výpočetní síť, bylo zapotřebí tomu uzpůsobit dekompozici domény. Proto byla definována oblast, pouze ve které se bude moci obtékané těleso pohybovat a také oblast v blízkosti tělesa, kde se výpočetní síť nebude deformovat, aby byla zachována velmi jemná síť v mezní vrstvě tělesa, tuto oblast můžeme vidět zeleně označenou na obrázku 5.2, kde je detail oblasti, která se bude pohybovat spolu s tělesem vlivem působících sil na něj. Rozměry této oblasti jsou shodné pro všechny tělesa, kromě kruhového, kde bylo možné tuto oblast zmenšit na 50 mm na výšku. Předpoklad byl, že čím těsněji bude tato oblast kolem tělesa, tím přesnější výsledky by to mělo přinést. Na druhou stranu zde musel být prostor na dostatečně jemnou síť. Bohužel v této oblasti nebylo možné vytvořit korektní dekompozici, která by dovolovala čtyřúhelníkovou síť na celé ploše domény, z důvodu nekompatibility s metodami dynamické sítě.



Obrázek 5.1: Schéma výpočetní domény



Obrázek 5.2: Detail oblasti blízkého okolí tělesa

5.2 Výpočetní síť

Na vytvoření výpočetní sítě byl použit program AnsysMeshing. Z velké části se jedná o strukturovanou síť tvořenou pouze čtyřúhelníkovými prvky, pouze v již zmiňované oblasti, která se bude pohybovat spolu s kmitajícím tělesem, se vyskytuje několik trojúhelníkových prvků. Počet prvků pro všechny tři různé tvary zkoumaných těles se pohybuje kolem 300 tisíc. Konkrétní hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1 níže.

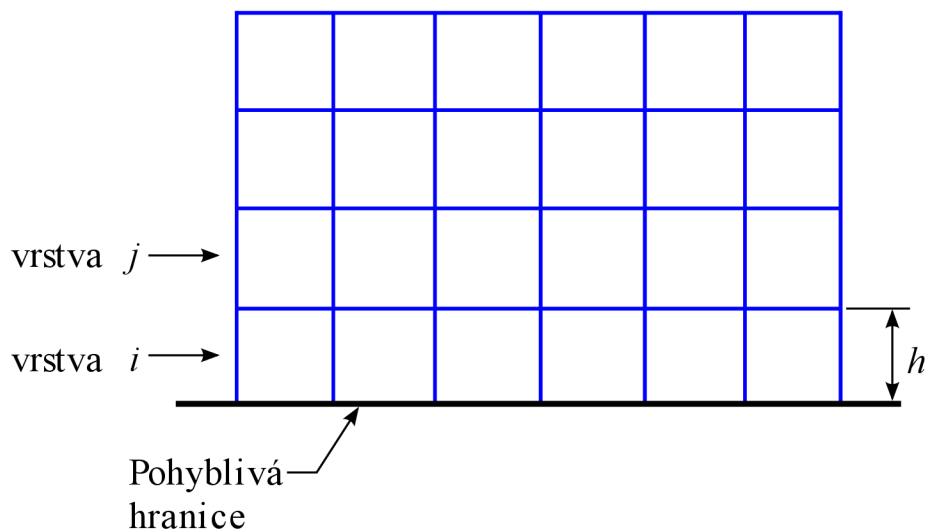
	počet uzlů	počet buněk	poměr stran		zkosení		y^+
			max	průměr	max	průměr	
kruh	302878	300829	7,34	1,84	0,63	1,70E-03	< 5
trojúhelník	302342	300122	9,94	1,79	0,92	1,16E-02	< 5
čtverec	300884	298671	5,34	1,8	0,68	8,42E-03	< 5

Tabulka 5.1: Parametry výpočetních sítí pro tři zkoumané tvary

Ke zhodnocení kvality sítě byly vybrány dva konkrétní parametry, poměr stran a zkosení buněk. Pro jednoduchou geometrii, která byla použita ve výpočtech, nebylo obtížné dosáhnout kvalitní sítě. Kdy maximální hodnoty poměru stran nepřesáhly 10 pro žádný z tvarů a maximální hodnoty zkosení se pohybovaly mezi 0,6 a 0,9. Přesné hodnoty jsou uvedeny v tabulce 5.1. Hodnota y^+ na stěně tělesa pro všechny tři tvary byla menší než 5, což bylo dostačující pro turbulentní model SST k-omega, který byl využit. V ideálním případě by mělo být měla být hodnota $y^+ < 1$. Horní a dolní stěny domény nebyly bodem zájmu této práce, tudíž na nich nebyla hodnota y^+ vyhodnocována.

K umožnění pohybu tělesa bylo zapotřebí tomu vhodně uzpůsobit výpočetní síť. V podkapitole 5.1 jsou zmíněny důležité prvky dekompozice geometrie, které jsou klíčové pro využití dynamické výpočtové sítě, která umožňuje její deformaci a s ní i pohyb samotného tělesa. V případě této práce byla zvolena metoda dynamické sítě zvaná *layering*. Metoda *layering* umožňuje postupné přidání nebo odebrání jednotlivých vrstev buněk přímo sousedících s pohybující se hranicí tělesa nebo celou oblastí. Teď je již zřejmé, proč bylo kolem tělesa nutné vytvořit obdélníkovou obálku, která se bude pohybovat spolu s tělesem. Jakmile se tato obálka dá do pohybu, na její hranici se, při splnění daných podmínek, přidávají nebo

odebírají jednotlivé vrstvy buněk. Na obrázku 5.1 je zeleně označená oblast dynamické sítě, kde se tento děj odehrává. Tuto metodu je možné využít pouze pro čtyřúhelníkové prvky u 2D sítí a šestihranné nebo klínové prvky v případě 3D sítí a nejvíce se hodí pro lineární pohyb tělesa [41]. Nastavení modelu dynamické sítě probíhá přímo v možnostech programu Ansys Fluent. Je možné zvolit metodu založenou na ideální výšce buňky (*height-based*) nebo poměrovou metodu (*ratio-based*). V této práci byla zvolena metoda řídicí se výškou buněk, kdy byla důležitá volba ideální výšky buňky h_{ideal} , podle které se řídí vznik a zánik nových vrstev buněk. Podle podpůrných materiálů softwaru Ansys Fluent by měla hodnota h_{ideal} přibližně odpovídat výšce buňky původní sítě, tudíž byla zvolena hodnota $h_{ideal} = 1\text{ mm}$. Označení vrstev spolu s pohyblivou hranicí je zobrazeno na obrázku 5.3.



Obrázek 5.3: Schéma principu dynamické sítě metodou layering

Pokud se pohyblivá hranice posunuje směrem dolů a buňky ve vrstvě i se roztahují, výška buněk má dovoleno narůstat dokud

$$h_{min} > (1 + \alpha_s)h_{ideal} \quad (5.1)$$

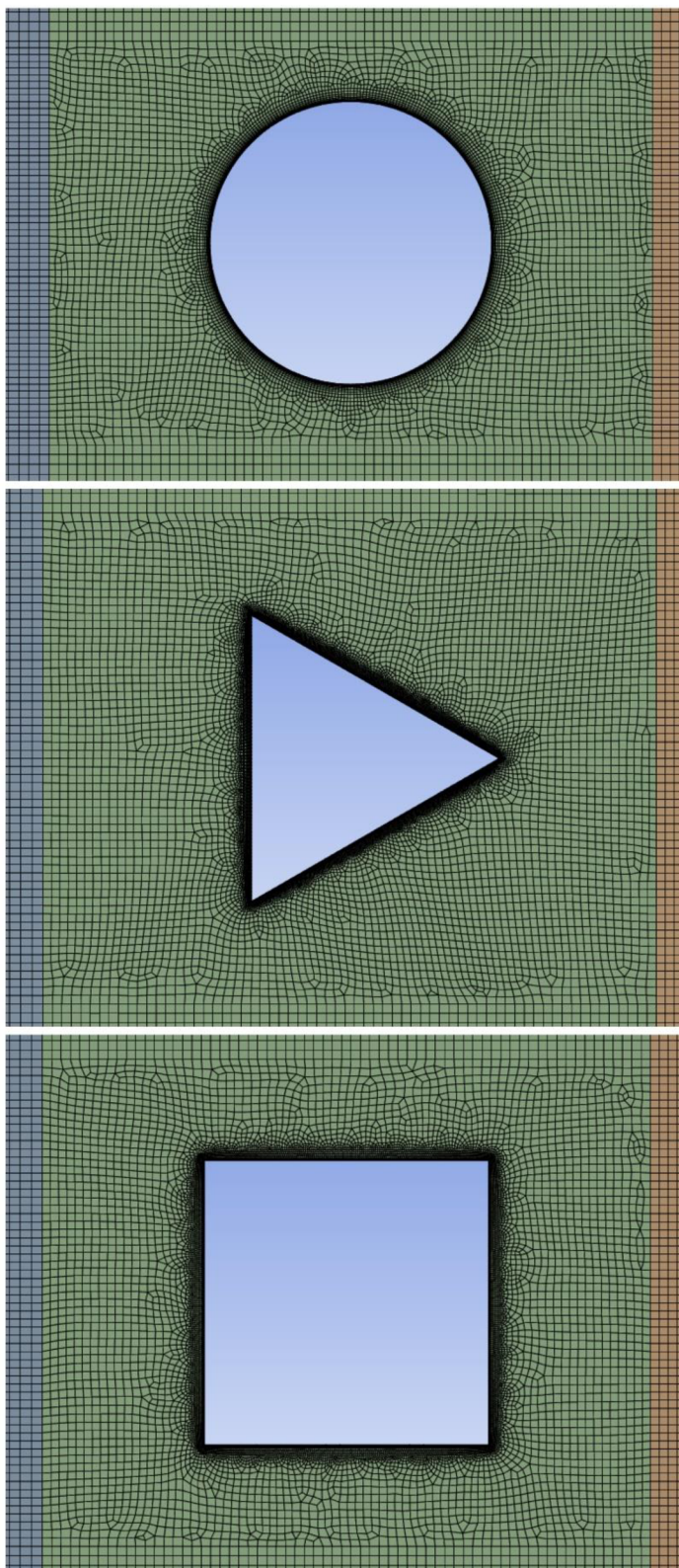
Jakmile hodnota h_{min} , výška nejmenší buňky ve vrstvě, je větší než pravá strana podmínky (rovnice 5.1) dochází k rozdělení této vrstvy. Faktor α_s je rozdělovací faktor (*split factor*). Pokud se hranice pohybuje směrem nahoru a vrstva i se stlačuje, platí podmínka

$$h_{min} < \alpha_c h_{ideal} \quad (5.2)$$

kde α_c je faktor kolapsu vrstvy (*collapse factor*). Pokud tato podmínka přestane platit, dochází ke sloučení vrstvy i s vrstvou j . Hodnoty faktorů α_s a α_c byly ponechány na výchozích hodnotách softwaru Fluent ($\alpha_s = 0,4$; $\alpha_c = 0,2$).

Jak již bylo zmíněno, spolu s tělesem se pohybuje celý obdélník, který toto tělese ohraničuje (viz obrázek 5.2). Na horní a dolní straně této obálky jsou definovány hranice pohybující se domény, na kterých dochází k přidání nebo odebrání řady buněk. Zleva a zprava celé dynamické domény dochází ke kontaktu se statickou sítí. Jelikož se doména dynamické sítě pohybem tělesa deformuje, vzniká nekonformní spojení mezi statickou a dynamickou oblastí sítě. Proto jsou rozhraní mezi těmito oblastmi definovány jako *sliding mesh interfaces*, díky kterým Ansys Fluent dokáže přepočítávat veličiny při přechodu mezi dynamickou a

statickou sítí. Na obrázku 5.4 jsou vidět jednotlivé výpočetní sítě v blízkém okolí zkoumaného tělesa. Výška nejmenší buňky přímo u tělesa je 0,05 mm.



Obrázek 5.4: Ukázka výpočetní sítě kolem jednotlivých těles

5.3 Nastavení řešiče Fluent

K modelování proudění byla využita studentská licence Ansys Fluent 2022 R2. Veškeré prováděné simulace jsou proměnné v čase (nestacionární). Jako model turbulence byl zvolen SST k- ω , jedná se o dvourovnicový model, který spojuje výhody modelů k- ω a k- ϵ . Model k- ω vyniká v modelování mezní vrstvy, a naopak model k- ϵ je lepší ve středu proudu. V zájmové oblasti se mezi modely automaticky přepíná na ten vhodnější v závislosti na Re.

Jako médium byla použita voda s defaultními parametry z programu Fluent ($\rho = 998,2 \text{ kg/m}^3$; $\eta = 0,001003 \text{ kg/m} \cdot \text{s}$). Další důležité nastavení řešiče Fluent bude popsáno v několika málo podkapitolách níže.

5.3.1 Okrajové podmínky

Okrajové podmínky můžeme vidět na obrázku 5.1 na straně 34, kdy vlevo je umístěn vstup se zadanou konstantní rychlostí proudění 1,5 m/s. Při reálné aplikaci by se rychlost v čase měnila, ale z výpočetního hlediska je zvolena konstantní hodnota. Konkrétní rychlost byla vybrána podle dat od firmy Vortex Hydro Energy, která pracuje na hydrokinetickém měniči VIVACE. Udávají, že jejich hydrokinetický měnič dokáže nejlépe využívat rychlost proudění vody mezi 1–2 m/s. Většina řek a mořských proudů v USA jsou pomalejší než 1,5 m/s, a to konvekční vodní elektrárny nedokážou efektivně využít [21]. V práci budou prozkoumány i další hodnoty vstupní rychlosti proudění. Dále byla na vstupu nastavena intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,4 m. Na výstupu byla nastavena tlaková okrajová podmínka s velikostí relativního tlaku 0 Pa, intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,4 m. Horní a dolní stěny domény byly označena za *no slip wall*, což znamená, že byla zavedena podmínka ulpívání na těchto stěnách.

Gravitace byla zanedbána, jelikož byl při simulacích brán v potaz horizontální hydrokinetický sběrač, u kterého nemá gravitační zrychlení významný vliv na pozorované veličiny. Zanedbání gravitace neznamená, že by pohybující se těleso mělo nulovou hmotnost.

Z rychlosti proudění 1,5 m/s a charakteristického rozměru těles 35 mm vyplývá Reynoldsovo číslo o hodnotě 52 250. Jedná se tedy o turbulentní proudění. Z pohledu Strouhalova čísla bychom měli dle teorie dosahovat hodnoty přibližně 0,2 (viz obrázek 4.4), díky této hodnotě je možné ze vzorce pro Strouhalovo číslo vypočítat předpokládanou frekvenci odtrhávání vírů

$$f_{St} = St \frac{u}{D} = 0,2 \frac{1,5}{0,035} \doteq 8,6 \text{ Hz} \quad (5.3)$$

5.3.2 Metoda 6DOF a použití UDF

K rozpočívání tělesa v prostředí Fluentu je možné definovat předem známý pohyb, který bude těleso během simulace vykonávat, například pokud jsou tělesa mechanicky poháněna. Nicméně v některých případech je těleso uváděno do pohybu pouze silami od kapaliny, tedy pohyb tělesa není dopředu známý a je závislý na řešení proudění. K tomuto se ve Fluentu využívá funkce 6DOF (*6 degree of freedom* – šest stupňů volnosti), kdy je možné těleso uvolnit v prostoru. Funkce 6DOF byla využita i v této diplomové práci. Řešič 6DOF vypočítává hydrodynamické síly a momenty, a také novou polohu těžiště a natočení tělesa každý časový krok. Translační zrychlení je vypočteno z celkové bilance sil a úhlové zrychlení zase z momentové rovnováhy. [41]

Ve verzi softwaru Ansys Fluent 2022 R2 je možné funkci 6DOF aktivovat dvěma způsoby. První možností je zapnutí v panelu dynamické sítě v nabídce programu Fluent. Kde je možné nastavit translaci anebo rotaci s jedním stupněm volnosti. Přímou v uživatelském

rozhraní lze přidat tělesu základní vlastnosti, jako jeho hmotnost nebo tuhost uložení, ale žádné složitější nastavení provádět nelze.

Druhou možností je využití uživatelsky definovaných funkcí (UDF – *user defined function*). Jedná se o vytvořenou funkci či makro, které rozšiřuje běžné možnosti řešiče Fluent. UDF jsou psány v programovacím jazyce C a jejich cílem je definovat specifický problém nebo nastavení, které přesahuje rámec funkcí v základním uživatelském rozhraní Fluentu.

Výhodou přímého využití funkce 6DOF v rozhraní programu Fluent je její jednoduchost, k rozpočítání tělesa stačí zatrhnout správné políčko v nastavení. Bohužel ne vždy je nabízené nastavení dostačující. V tom případě je nutné sáhnout po uživatelsky definovaných funkcích, které nabízí nepřeberné množství možností. Na druhou stranu je nutná alespoň základní znalost programování a jak již samotný název napovídá, tak se velmi často jedná o uživatelsky tvořené funkce, které jsou v oficiálních návodech softwaru Ansys popsány velmi stručně anebo dokonce vůbec. Ukázku konkrétní funkce použité při simulacích je možné vidět v příloze na straně číslo 79.

V této diplomové práci byla využita kombinace přímého nastavení v řešiči pro jednodušší úlohy a uživatelsky definované funkce pro ty složitější. Konkrétně se jednalo o simulace soustavy tělesa na pružině a s použitím lineárního tlumiče. Právě tlumení není možné nastavit přímo ve Fluentu a je nutné ho nadefinovat v UDF. Úlohy bez tlumení byly spouštěny přímo z uživatelského rozhraní řešiče. Důležitou schopností funkce 6DOF je možnost nastavení hranic pohybu pro uvolněná tělesa. V této práci byly použity hranice na ± 100 mm, tedy v polovině výpočetní domény. Důvodem tohoto omezení je případné ovlivnění chování proudění, kdyby úplav za tělesem narážel do samotných hranic výpočetní domény.

5.3.3 Spuštění simulace

Jak již bylo zmíněno model turbulence byl zvolen SST $k-\omega$, další nastavení, které je nutné vhodně zvolit před samotným spuštěním simulace, bude popsáno v několika dalších odstavcích.

Za numerické schéma řešiče bylo vybráno schéma SIMPLE. Metoda nejmenších čtverců byla zvolena jako gradientní metoda, jedná se o defaultní nastavení. Při spuštění simulace byly řády diskretizačních schémat postupně zvyšovány z těch robustnějších na ty přesnější po dostatečné konvergenci výpočtu. Změna řádu probíhala vždy po několika stech časových krocích. Úvodní a finální řády schémat řešiče pro tlak, hybnost, turbulentní kinetickou energii a specifickou míru disipace jsou vypsány v tabulce níže.

	Prvotní nastavení	Finální nastavení
Tlak	<i>Standard</i>	<i>Druhý řád</i>
Hybnost	<i>Upwind prvního řádu</i>	<i>QUICK</i>
Turbulentní kinetická energie	<i>Upwind prvního řádu</i>	<i>Upwind druhého řádu</i>
Specifická míra disipace	<i>Upwind prvního řádu</i>	<i>Upwind druhého řádu</i>
Nestacionární člen	<i>Eulerova implicitní metoda prvního řádu</i>	<i>Eulerova implicitní metoda druhého řádu</i>

Tabulka 5.2: Nastavení diskretizačních schémat

Časový krok nebyl volen na základě Courantova čísla, ale dle podmínky z podpůrných souborů softwaru Fluent [41] pro dynamické sítě, která říká, že těleso nesmí projít více než jednou buňkou výpočetní sítě za jeden časový krok. Tuto podmínku lze také zapsat rovnicí:

$$\Delta t = \frac{\Delta s}{u} \quad (5.4)$$

Kde Δt je velikost časového kroku, Δs je délka nejmenší buňky dynamické sítě a u je rychlost pohybujícího tělesa. Při špatné volbě časového kroku docházelo k selhání simulace, pokud byl časový krok příliš velký anebo k prodlužování výpočetního času, pokud by časový krok malý. Pro prvotní simulace byl časový krok odhadnut na $1e^{-5}$ s, jelikož nebyla známá rychlost pohybujícího tělesa. Nejmenší délka buňky, která se deformuje v oblasti dynamické sítě byla pro všechny úlohy, pro všechny různá tělesa, rovna $\Delta s = 1 \text{ mm}$. Po několika pokusných simulacích bylo zjištěno, že rychlost tělesa je ve většině případů menší než 5 m/s, tudíž byl jako výchozí časový krok zvolen $\Delta t = 2e^{-4}$ s. Pro některé případy, s vyšší hodnotou tuhosti pružiny anebo tlumení, byl časový krok ještě zvýšen až na $\Delta t = 5e^{-4}$ s. Neočekávala se totiž vysoká rychlost pohybu tělesa a významně to snížilo výpočetní čas. Pro počáteční úlohy byla zvolena hybridní inicializace.

Ke zkrácení výpočetních časů pro další úlohy byly nejprve napočítány případy bez uvolněného tělesa. Tento proces byl použit pro všechny tři tvary těles. Simulace byla ukončena v momentě dostatečně rozvinuté Kármánovy vírové stezky a vznikly tři sady napočítaných dat obtékání statického tělesa (pro všechny tři tvary), ze kterých poté vycházely veškeré budoucí simulace o různých dynamických parametrech.

Konvergence řešení je dána velikostí reziduí, tedy odchylek od řídicích rovnic řešiče. Pro většinu simulovaných úloh v této práci se velikost největších reziduí pohybovala kolem hodnoty $1e^{-4}$ a to konkrétně pro rovnici kontinuity. Ideálně by měly být odchylky nulové, ale v praxi jsou vyhovující hodnoty alespoň blížíci se nule.

6 Výsledky

Účelem této kapitole bude vyhodnocení získaných dat z numerických simulací a jejich následné porovnání. Pro všechny simulace bylo totožné nastavení řešiče včetně okrajových podmínek, stejná geometrie výpočetní domény, velmi podobné velikosti sítí a jediným kardinálním rozdílem byl tvar obtékaného tělesa. Za hlavní cíle dle zadání práce je považováno vyhodnotit síly působící na těleso, dráhy těles a možný výkon zařízení. Dále byla vyhodnocena rychlost tělesa a také vliv hmotnosti tělesa, tuhosti uložení a tlumení na dynamické chování zařízení.

Kvůli možnosti porovnání mezi jednotlivými tvary byly napočítány vždy stejné hodnoty hmotnosti, tuhosti pružiny a tlumení. Pro zjištění vlivu hmotnosti na charakter kmitání byly napočítány hodnoty $m = 2; 4; 5; 6; 8$ kg při konstantní hodnotě tuhosti pružiny $k = 300$ N/m. Pro vyhodnocení vlivu tuhosti pružiny byly zvoleny hodnoty $k = 100; 300; 500; 600$ N/m při konstantní hodnotě hmotnosti $m = 3$ kg. Zkoumané hodnoty tlumení při konstantní hodnotě hmotnosti i tuhosti pružiny ($m = 3$ kg; $k = 300$ N/m) jsou $b = 5; 20; 40; 80$ kg/s.

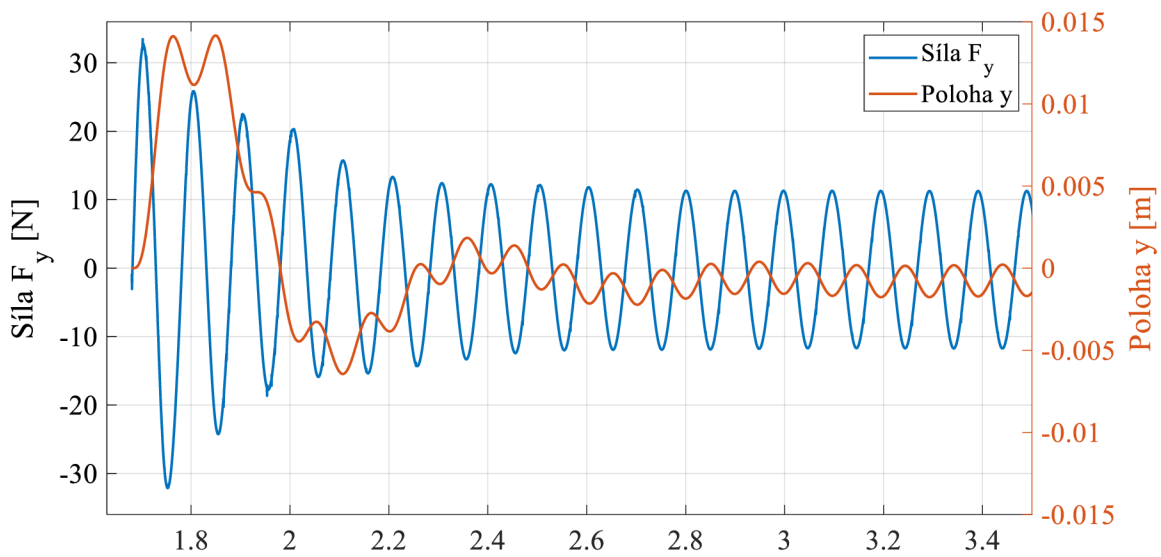
Z dostatečně konvergovaných simulací byly exportovány textové soubory s daty konkrétní veličiny. Tyto soubory byly poté dále zpracovány. Ve většině případů probíhalo vyhodnocení v programu MATLAB anebo také v programu Microsoft Excel.

Je důležité zmínit, že kvůli zjednodušení úlohy na 2D je nutné brát výsledky s určitým nadhledem a nepovažovat je automaticky za směrodatné. V dnešní době numerické simulace napomáhají zrychlovat vývoj a jejich uplatnění je velmi široké, ale vždy pokud to lze, je vhodné výsledky podložit experimentem. Je možné ovšem brát výsledky této práce jako jakýsi odrazový můstek pro další akademické publikace na toto téma, ať už experimentální anebo výpočtové.

6.1 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s kruhovým průřezem

Výsledná data z proudění kolem kruhové tělesa s cílem vyvolání vibrací bude popsáno v několika podkapitolách níže. Kruhový průřez byl první a také nejdéle zkoumaný tvar v této práci z důvodu nedostatečných výchylek kmitů. Důvod nízkých amplitud výchylek u tělesa o kruhovém průřezu bude vysvětlen níže, konkrétně v kapitole 6.1.4.

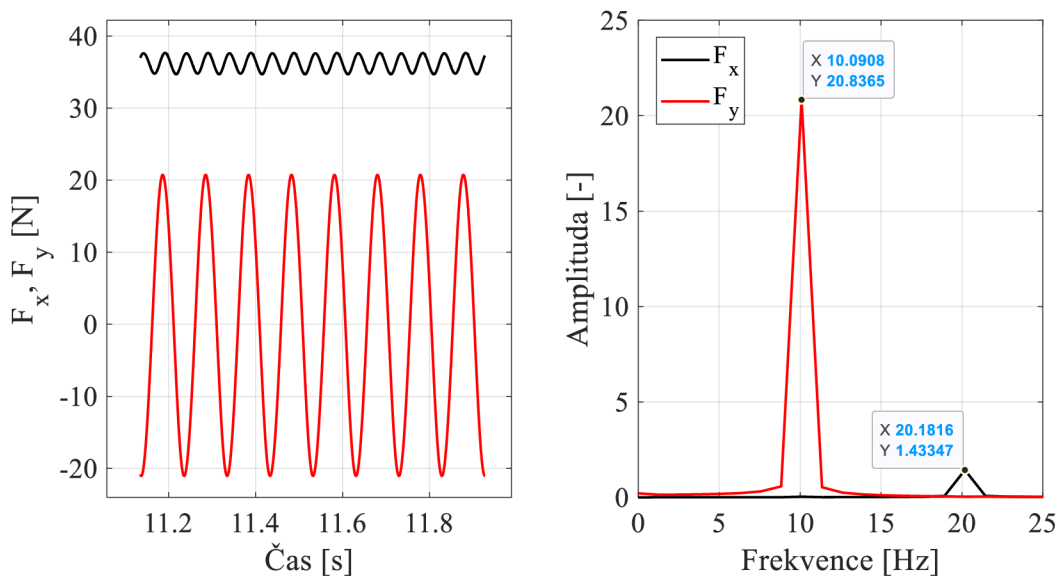
Nejprve byly zkoušeny případy uložení tělesa bez jakékoliv pružiny či tlumení, pouze s tělesem o určité hmotnosti. To nepřineslo žádné valné výsledky, jelikož se těleso ihned po uvolnění vychýlilo z počáteční polohy a nikdy se již nestabilizovalo. Proto bylo nutné do sestavy přidat pružinu o dané tuhosti, která umožnila stabilizaci oscilačního pohybu kolem jednoho bodu. Při osazení soustavy pružinou již bylo možné efektivně zkoumat vliv hmotnosti tělesa na harmonický pohyb. Poté byl zkoumán i vliv tuhosti pružiny, a nakonec při nalezení vhodné kombinace hmotnosti a tuhosti bylo přidáno do soustavy lineární tlumení a byl pozorován jeho vliv na dynamické chování zařízení. Pro všechny případy byla zkoumána vlastní frekvence tělesa a její porovnání s frekvencí pohybu nebo frekvencí působících sil. Prostředkem k přeladění systému, tedy změny vlastní frekvence, je právě především hmotnost tělesa anebo tuhost pružiny v soustavě.



Obrázek 6.1: Grafické znázornění vztlakové síly v porovnání s dráhou tělesa
(kruh – $m = 3 \text{ kg}$, $k = 300 \text{ N/m}$, $b = 0 \text{ kg/s}$)

Na obrázku 6.1 vidíme průběh síly ve směru kolmém na proudění v souvislosti s průběhem dráhy tělesa. Při „vypuštění“ tělesa (zapnutí dynamické sítě v úloze s rozvinutou Kármánovou vírovou stezkou) dochází k prvotnímu výkmitu, ale postupně dochází ke stabilizaci síly i výchylky a poté jsou hodnoty periodického charakteru. Toto chování vykazovaly všechny zkoumané případy o různých hmotnostech, tuhostech i tlumení. Dráha je vůči působící síle posunutá o polovinu jedné periody, což je v tomto konkrétním případě přibližně 0,05 s. Pro další vyhodnocování byla brána v potaz již pouze uklidněná harmonická část pohybu, pokud to bylo možné.

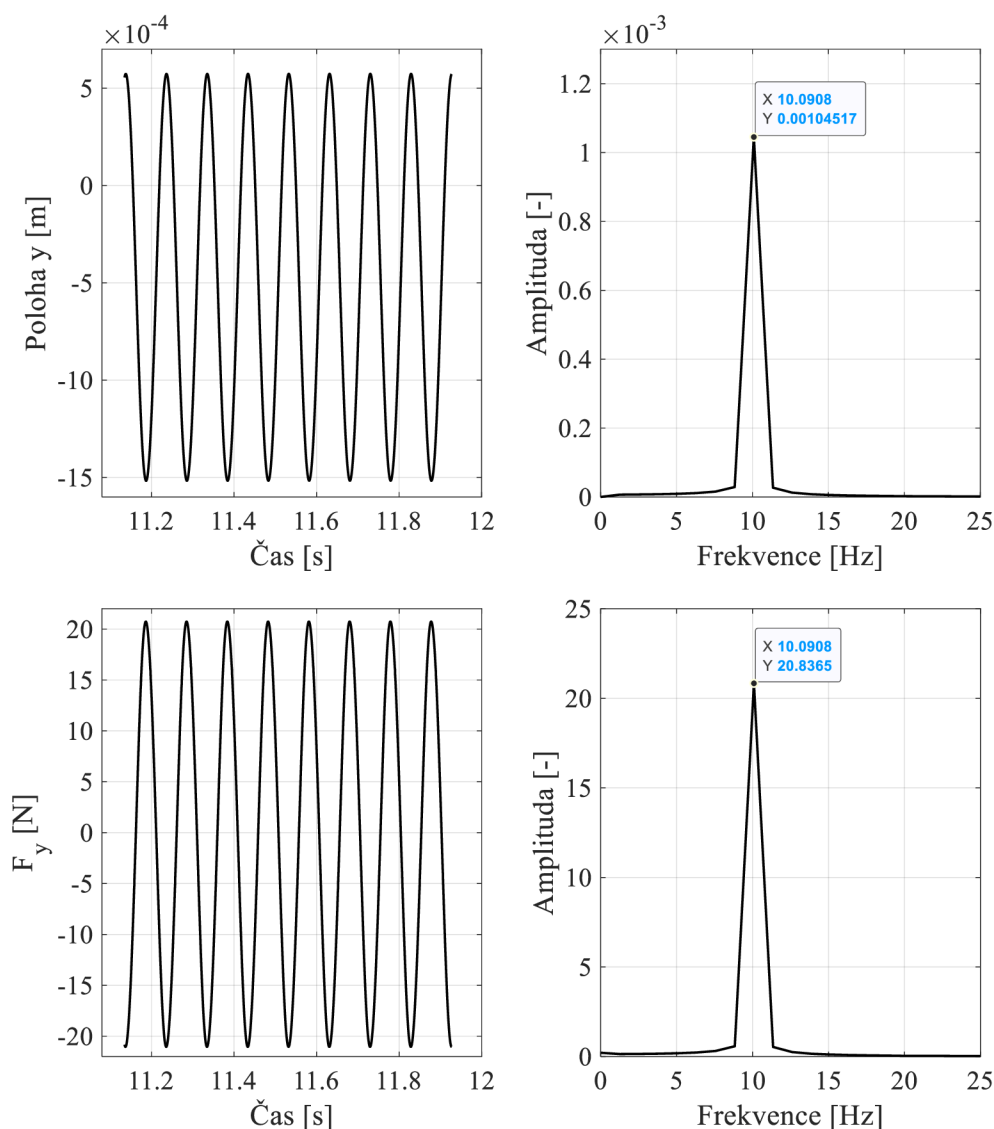
V kapitole 4.1 bylo řečeno, že pro upevněné válcové těleso v proudu má síla F_x dvojnásobnou frekvenci než síla F_y . Na grafu na obrázku 6.2 je vidět, že to platí i pro uvolněné těleso ve směru kolmém na proudění. Jedná se o případ bez tlumení a o hmotnosti 5 kg a tuhosti pružiny 300 N/m.



Obrázek 6.2: Porovnání frekvencí sil F_x a F_y pro uvolněné kruhové těleso

6.1.1 Vliv hmotnosti

Vliv hmotnosti na dynamické chování obtékaného tělesa s kruhovým průřezem byl zkoumán při konstantní hodnotě tuhosti pružiny $k = 300 \text{ N/m}$. Tato hodnota byla zvolena na základě předešlého testování s ohledem na porovnatelnost s ostatními tvary. Zkoumané hodnoty hmotnosti jsou $m = 2; 4; 5; 6; 8 \text{ kg}$. Vyhodnocované veličiny jsou síly působící na těleso v kolmém směru na proudění a v rovnoběžném směru vůči proudění, tedy síly F_y a F_x . Dále dráha tělesa a případně i jeho rychlost. Pomocí rychlé Fourierovy transformace (FFT) byly vyhodnoceny frekvence síly F_y a dráhy tělesa.



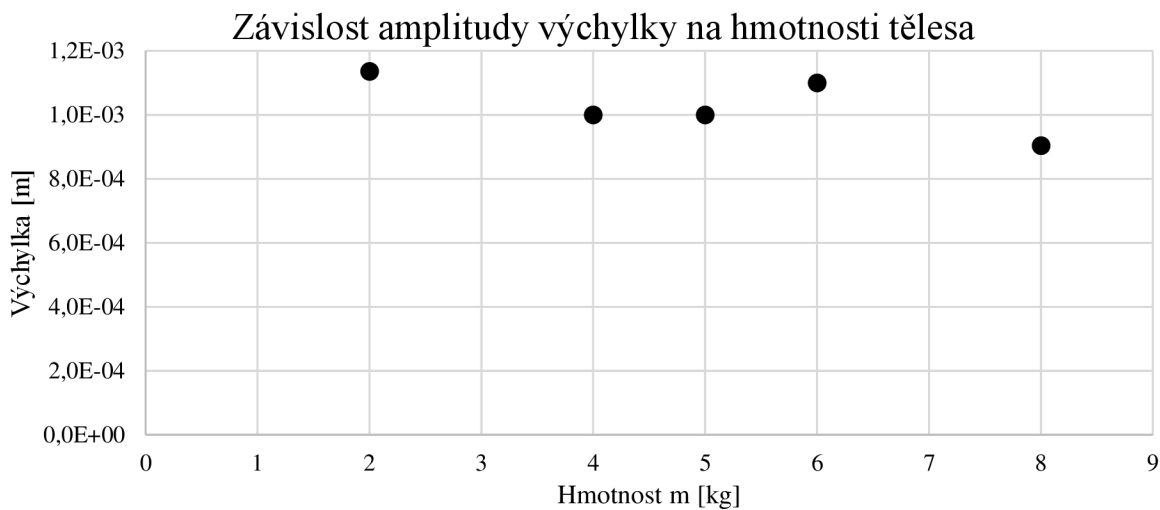
Obrázek 6.3: Ukázka grafického vyhodnocení průběhu dráhy a vztahové síly pro případ kruhového tělesa při hmotnosti 5 kg a tuhosti pružiny 300 N/m (bez tlumení)

Na obrázku 6.3 je zobrazena ukázka vyhodnocení jednoho z případů pro testování vlivu hmotnosti. Na levé polovině obrázku vidíme průběh dané veličiny v čase a vpravo je vyhodnocena frekvence tohoto průběhu pomocí Fourierovy rychlé transformace. Tímto způsobem byly zpracovány všechny výstupní data z numerických simulací. Pro tento konkrétní příklad je velikost amplitudy výchylky 0,00105 m (tedy přibližně 1 mm) a amplituda vztahové síly je cca 20,84 N. Obě veličiny mají frekvenci 10,09 Hz, akorát jsou od sebe fázově posunuty o půl periody. Všechny výsledné hodnoty jsou zapsány v tabulce 6.1 níže

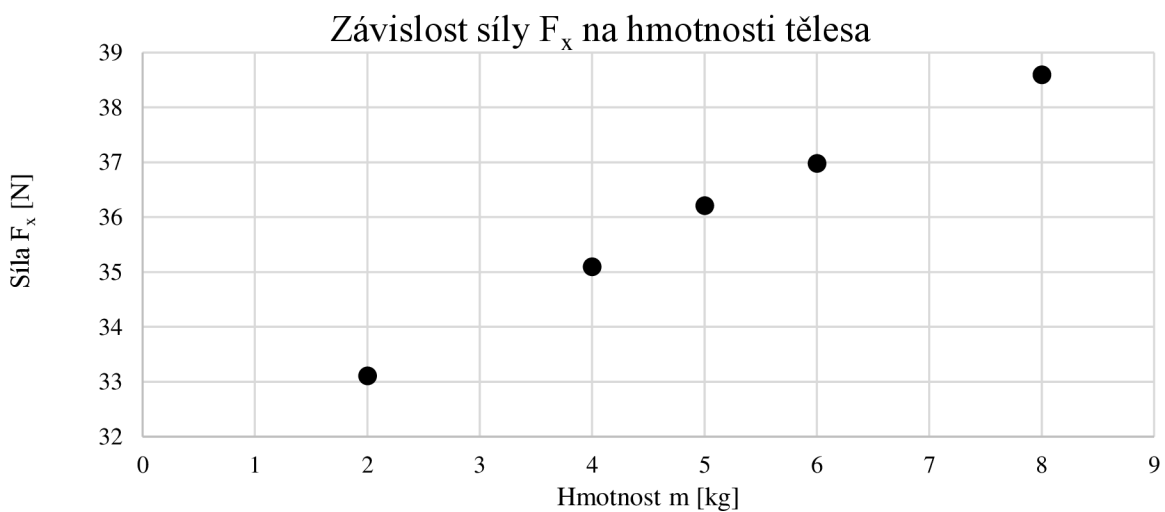
hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
2	300	0	1,14E-03	33,11	7,61
4	300	0	1,00E-03	35,10	16,25
5	300	0	1,04E-03	36,21	20,84
6	300	0	1,10E-03	36,98	23,79
8	300	0	9,03E-04	38,60	29,55

Tabulka 6.1: Tabulka hodnot výchylky, síly F_y a síly F_x pro všechny zkoumané hmotnosti

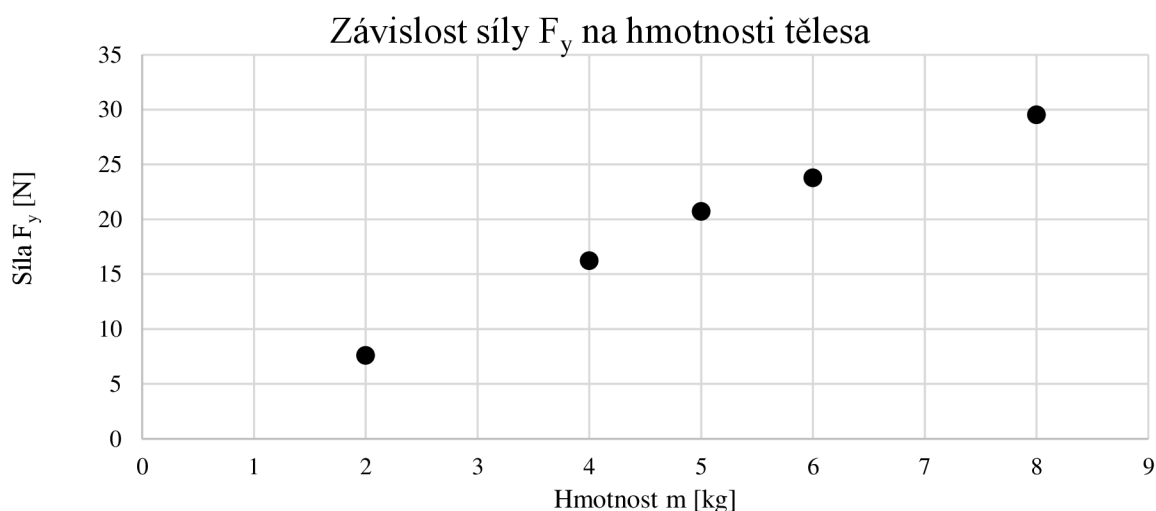
Z tabulky 6.1 výše můžeme vyčíst, že hmotnost nemá značný vliv na amplitudu výchylky a ta se pohybuje vždy kolem 1 mm. Pro sílu F_x není brána v potaz její amplituda, jelikož ve většině případech osciluje s amplitudou přibližně 1–2 N, ale v tabulce je uvedena její průměrná hodnota, aby bylo možné posoudit její absolutní velikost. Graficky znázorněný vliv hmotnosti na pozorované veličiny můžeme vidět na grafech 6.4, 6.5 a 6.6 níže.



Obrázek 6.4: Závislost výchylky na hmotnosti tělesa



Obrázek 6.5: Závislost síly F_x na hmotnosti tělesa

Obrázek 6.6: Závislost síly F_y na hmotnosti tělesa

Pozorujeme, že s rostoucí hmotností roste vztlková síla působící na těleso, ale na amplitudu výchylky to pro zkoumané hodnoty hmotnosti jednoznačně vliv nemá. I když na těleso působí větší síla ve směru y , těleso je po prvotním vychýlení stále udržováno na svém místě proudem kapaliny. Oscilace poté nabývají velmi malé amplitudy a hodnota výchylky pro tento konkrétní interval hmotnosti zůstává téměř neměnná. Vliv protékajícího proudu a odporu prostředí bude silnější než působení vírů, tudíž se těleso udrží ve své nové stabilní poloze a kmitá zde s pouze velmi malou amplitudou.

Frekvence pohybu tělesa je totožná s frekvencí vztlkové síly a je rovna 10 Hz, frekvence síly ve směru proudění, síly F_x , je rovna dvojnásobku a tedy 20 Hz. Tyto hodnoty jsou shodné pro všechny různé zkoumané hmotnosti.

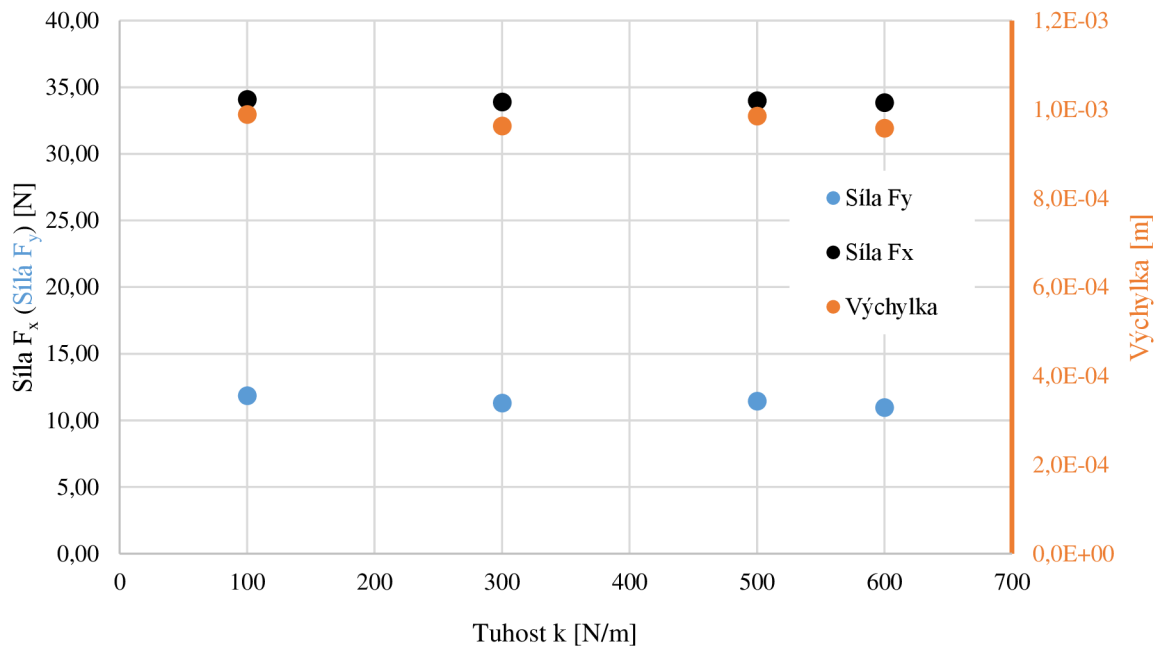
6.1.2 Vliv tuhosti pružiny

Pro zjištění vlivu tuhosti pružiny byla zvolena konstantní hmotnost tělesa $m = 3$ kg. Zkoumané hodnoty tuhosti pružiny, která působí na těleso silou zpět do svého počátku, jsou $k = 100; 300; 500; 600$ N/m. Tyto hodnoty byly opět zvoleny na základě předešlých simulací. Tabulka výsledků z numerických simulací pro zjištění vlivu tuhosti pružiny je níže.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	100	0	9,89E-04	34,08	11,85
3	300	0	9,63E-04	33,90	11,29
3	500	0	9,85E-04	33,98	11,44
3	600	0	9,58E-04	33,83	10,96

Tabulka 6.2: Hodnoty výchylky a sil pro zjištění vlivu tuhosti pružiny

Srovnání těchto hodnot v grafické podobě můžeme vidět na grafu závislostí na obrázku 6.7 níže. Ale již z tabulky 6.2 je patrné, že tuhost pružiny nemá zásadní vliv na výsledné parametry pro zkoumaný interval tuhostí.



Obrázek 6.7: Grafické znázornění závislosti zkoumaných veličin na tuhosti pružiny

Jak již bylo avizováno, zkoumané parametry neukazují na žádný trend se změnou tuhosti pružiny. Hodnoty síly F_x dosahují velmi podobných hodnot pro všechny případy a na rozdíl od předešlé kapitoly (vliv hmotnosti tělesa) je zde poměrně konstantní i vztlaková síla F_y . Odůvodnění vychází z pohybové rovnice pro nucené netlumené kmitání na straně 24 (rovnice 3.16). Pro sílu od pružiny platí, že $F_k = k \cdot y$, tedy pokud jsou výchylky (y) velmi malé, bude i vliv tuhosti pružiny v pohybové rovnici malý.

Frekvence zkoumaných veličin vykazují dle předpokladu naprosto shodné dynamické chování jako u zkoumání vlivu hmotnosti tělesa a dosahují hodnot 10 Hz pro výchylku a vztlakovou sílu a frekvenci 20 Hz pro sílu F_x .

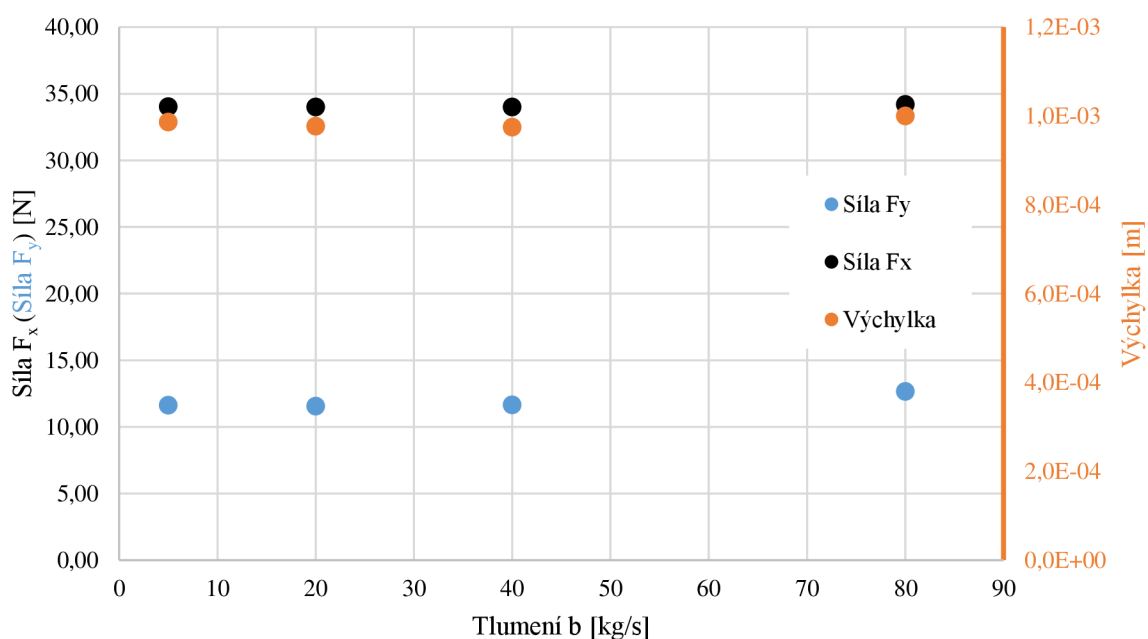
6.1.3 Vliv tlumení

Jako poslední zkoumaná veličina bylo tlumení. Přidat do soustavy tlumič, který bude úměrně závislý na rychlosti pohybu tělesa bylo možné pouze přes UDF. Zda se výsledky korektně shodují s výsledky bez UDF bylo testováno. Po několika pokusech formulací kódu funkce bylo dosaženo shody mezi úlohou bez tlumení přes UDF a přes přímé nastavení skrze software Fluent. Poté bylo pouze přidáno do uživatelsky definované funkce tlumení o daných hodnotách. Za konstantní hodnoty byly zvoleny hodnoty hmotnosti a tuhosti z předchozích kapitol a tedy $m = 3 \text{ kg}$; $k = 300 \text{ N/m}$. Řešené hodnoty tlumení jsou následující: $b = 5; 20; 40; 80 \text{ kg/s}$. Jelikož je tlumení přímo závislé na rychlosti tělesa, tak bychom ji měli znát. Maximální hodnoty rychlosti se pro všechny zkoumané případy kruhového tělesa pohybovaly velmi blízce kolem $0,06 \text{ m/s}$. Právě přidané tlumení umožňuje případné energetické využití hydrokinetického sběrače. Například prostřednictvím lineárního generátoru.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	300	5	9,86E-04	34,03	11,64
3	300	20	9,77E-04	34,00	11,55
3	300	40	9,75E-04	34,00	11,65
3	300	80	1,00E-03	34,21	12,66

Tabulka 6.3: Výsledné hodnoty zkoumání vlivu tlumení

Tabulka 6.3 výše ukazuje výsledné hodnoty z numerických simulací.



Obrázek 6.8: Grafické znázornění výsledků vlivu tlumení

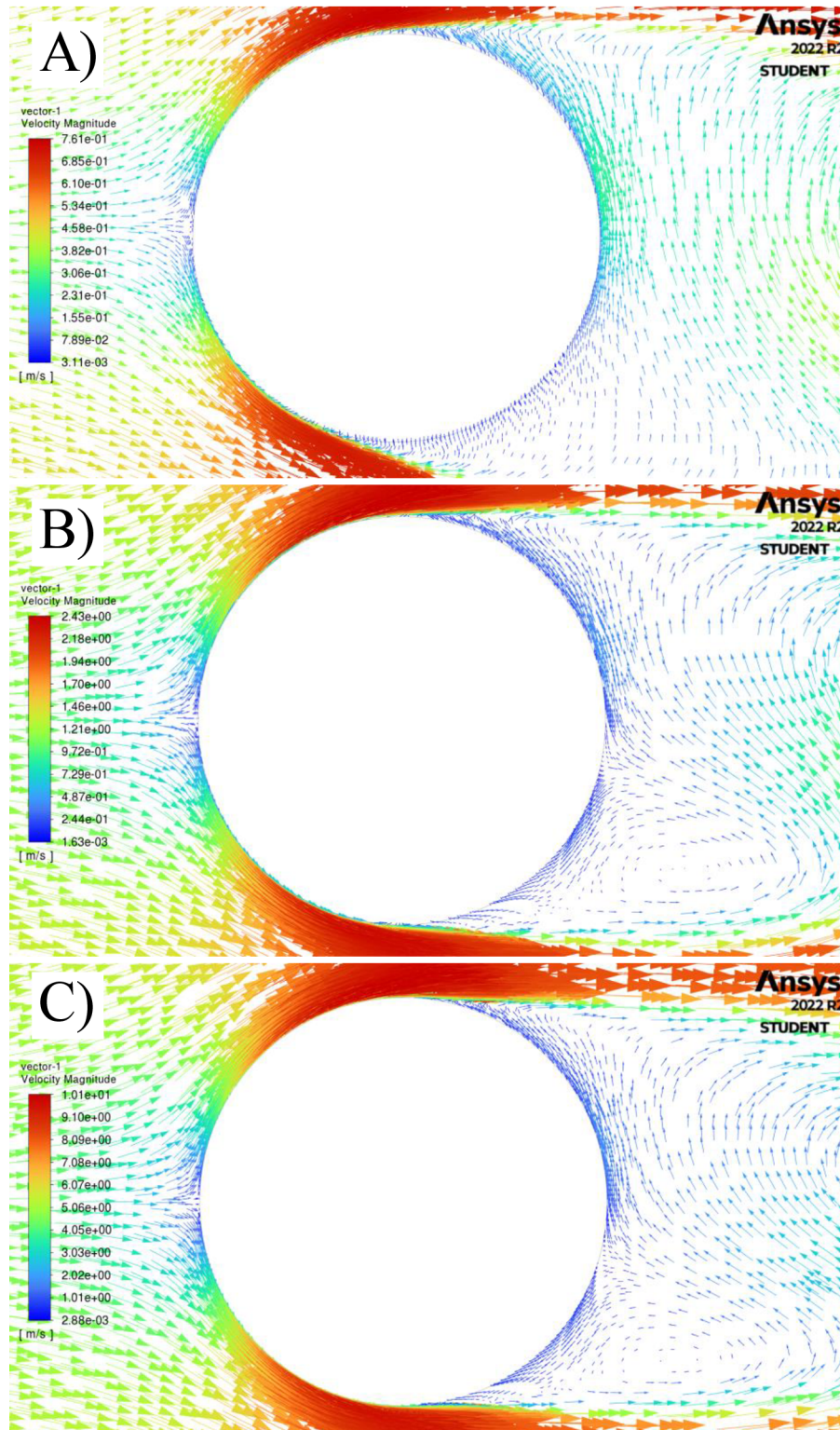
Graf na obrázku 6.8 výše potvrzuje, to, co je již patrné z tabulky 6.3 a to, že zkoumané veličiny jsou téměř neměnné pro zvolené hodnoty tlumení. Z pohybové rovnice pro tlumené nucené kmitání (rovnice 3.24) vyplývá, že vliv tlumení je vázán na rychlost pohybu tělesa. Při nižších rychlostech bude vliv tlumení menší. Rychlost tělesa je velmi důležitá i pro případný výkon zařízení, jelikož okamžitá hodnota výkonu od tlumení je rovna $P_{tl} = F_b \cdot v = b \cdot v \cdot v$.

6.1.4 Vliv změny rychlosti proudění

Amplitudy výchylky nejsou takové, jaké byly předpokládány, a proto byla vyvíjena snaha o upravení počátečních podmínek k získání lepších dynamických vlastností.

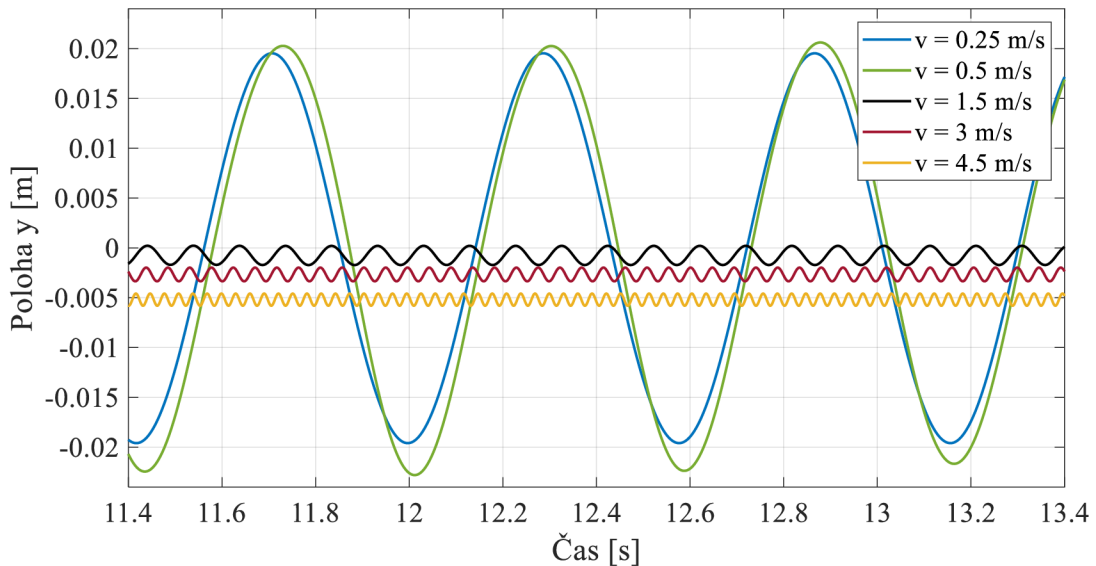
Jako možnost řešení se naskytla změna Reynoldsova čísla s cílem změny dynamického chování a případného zvýšení amplitudy kmitání. Z definice Reynoldsova čísla vyplývá, že jeho snížení nebo zvýšení je možné provést změnou média, velikosti tělesa anebo rychlosti proudění kolem tělesa. Voda jako médium byla zachována, při změně velikosti tělesa by bylo potřeba zasahovat do geometrie a výpočetní sítě, a proto se jako ideální jevila změna vstupní rychlosti proudění. Testování vlivu změny rychlosti bylo prováděno na případě s hmotností tělesa $m = 3$ kg, tuhostí pružiny $k = 300$ N/m a nulovém tlumení. Nejprve byly zkoumány vyšší rychlosti než předtím využívaných 1,5 m/s, konkrétně 3 m/s a 4,5 m/s a okrajově i 6 m/s. To sice vedlo k vyšším vztakovým silám na těleso, ale samotnou amplitudu to nezvýšilo. Na obrázku 6.9 dále jsou vyobrazeny rychlostní pole proudění v blízkosti

obtákaných kruhových těles, tyto kontury ze statické simulace mohou napovědět jaká bude dynamická odezva pro různé vstupní rychlosti proudění. I když je pro každý případ proudění vyvinuté mírně odlišně, je možné vizuálně určit, že pro vyšší rychlosti je úplav více uzavřený a bod odtržení je dále po směru proudění než u nižších rychlostí. Ovšem musí být bráno v potaz, že rychlostní a tlakové pole bude vypadat odlišně pro pohybující se těleso.



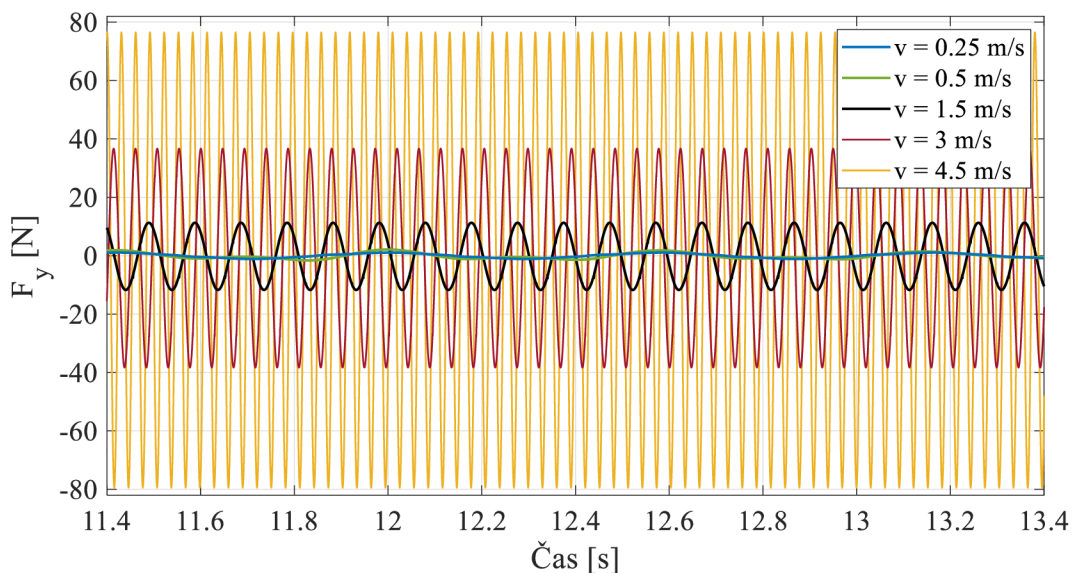
Obrázek 6.9: Rychlostní pole proudění kolem tělesa při vstupních rychlostech proudění
A) 0,5 m/s B) 1,5 m/s C) 6 m/s

Další zkoumané rychlosti byly tedy 0,5 m/s a 0,25 m/s, což odpovídá $Re = 17\,416$, resp. $Re = 8\,708$. Grafické kontury statických úloh nejsou dostatečné k utváření závěrů, je nutné zhodnotit nasbíraná data z dynamických simulací. V grafu na obrázku 6.10 je znázorněn průběh dráhy pro všechny zkoumané vstupní rychlosti, je patrné, že s klesající rychlostí roste amplituda.



Obrázek 6.10: Grafický průběh dráhy kruhového tělesa pro různé vstupní rychlosti proudění

Zavádějící ale mohou být hodnoty vztlakové síly (viz obrázek 6.11), která dosahuje nejvyšší hodnoty pro případy s vyššími rychlostmi proudění. Znamená to, že výchylka není závislá jen na velikosti síly, ale i na dalších faktorech, což je i patrné z rovnice 3.22.



Obrázek 6.11: Grafický průběh vztlakové síly F_y na kruhové těleso pro různé rychlosti proudění

Co konkrétně má vliv na velikosti amplitudy lze odhadnout z rovnice 3.27. Odpor média, ve kterém se těleso pohybuje, má za důsledek určité tlumení, které může amplitudu při vyšších rychlostech významně snižovat. Frekvence, se kterou síla působí na těleso se může přibližovat

vlastní frekvenci systému a tím se dostávat do rezonančního pásma, což by vysvětlovalo vysoký nárůst amplitudy. Ověřit, zda se systém nachází v rezonanci je možné pomocí porovnání vlastní frekvence systému s frekvencí působící síly. Vlastní frekvenci systému bez tlumení je možné zjistit na základě hmotnosti tělesa a tuhosti uložení, rovnice 6.1 níže představuje vlastní frekvenci systému ve vzduchu, v kapalině by hmotnost představovala hmotnost tělesa spolu s přídavnou hmotností od kapaliny. Lze předpokládat, že vlastní frekvence tělesa kmitajícího v kapalině (vodě) by byla nižší než ta, co vychází z rovnice 6.1.

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{k}{m}} = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{300}{3}} = 1,59 \text{ Hz.} \quad (6.1)$$

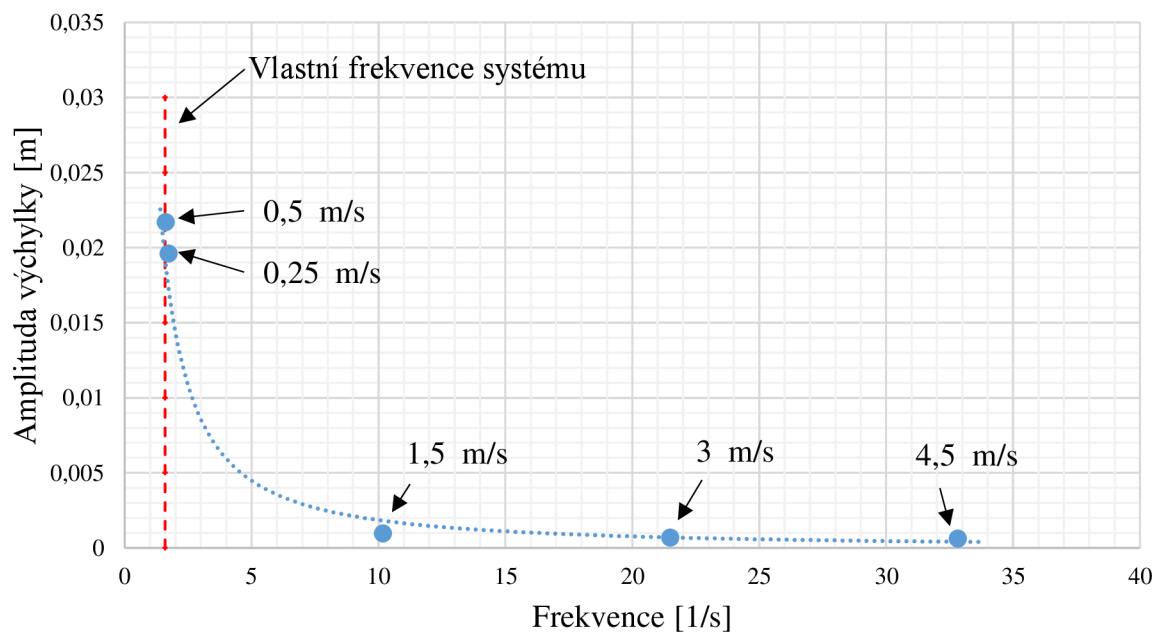
Naměřené frekvence a amplitudy pro jednotlivé vstupní rychlosti jsou v tabulce 6.4 níže.

Rychlost proudění [m/s]	Frekvence [Hz]	Amplituda výchylky [m]
0,25	1,72	0,0196
0,5	1,60	0,0217
1,5	10,2	9,62E-04
3	21,5	6,88E-04
4,5	32,8	6,11E-04

Tabulka 6.4: Tabulka frekvencí a amplitud výchylky pro jednotlivé rychlosti

Alespoň částečnou amplitudovou charakteristiku se zakreslenou vlastní frekvencí systému (viz rovnice 6.1) je možné vidět na obrázku 6.12 níže.

Amplitudová frekvenční charakteristika



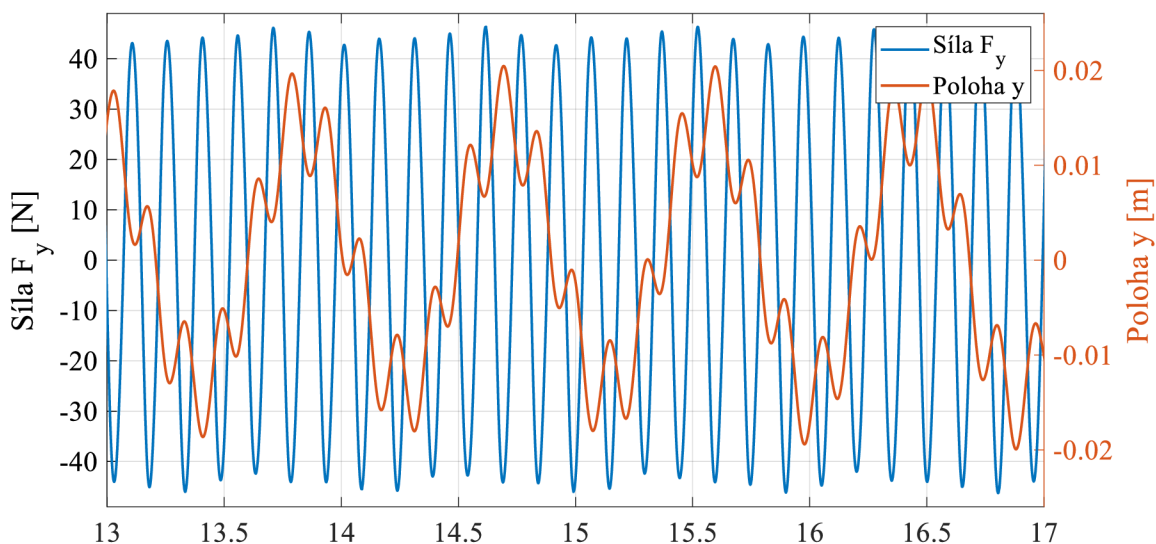
Obrázek 6.12: Amplitudová frekvenční charakteristika vycházející z tabulky 6.4

Je patrné, že chybí levá část charakteristiky, k tomu by bylo nutné napočítat větší množství rychlostí. Ale i takto, z částečné amplitudové charakteristiky, je možné říct, že případy s vstupní rychlostí proudění 0,25 m/s a 0,5 m/s jsou velmi blízko rezonančního pásma.

Důvodem vyšších amplitud u nižších rychlostí může být právě rezonance a zároveň významnější vliv tlumení tekoucího média na těleso při rychlostech vyšších.

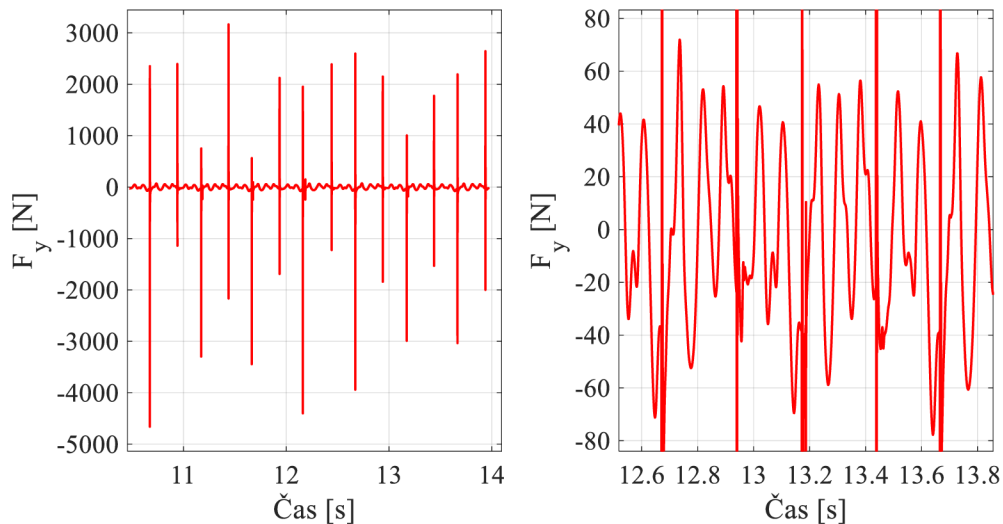
6.2 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s trojúhelníkovým průřezem

Po zkušenostech u kruhového tělesa, byla od samého začátku zkoumána pouze sestava tělesa uloženého na pružině o dané tuhosti, případně bylo přidáno do soustavy i tlumení. Dynamické chování tělesa s trojúhelníkovým průřezem je poměrně odlišné od kruhového tvaru. Jak můžeme vidět na grafu níže (obrázek 6.13) těleso nekmitá jen na jedné frekvenci. Důvodem může být odtržení vírů na přední hraně trojúhelníku a jejich následný vliv na boční strany tělesa.



Obrázek 6.13: Porovnání vztlakové síly a výchylky (trojúhelník – $m = 5$ kg, $k = 300$ N/m, bez tlumení)

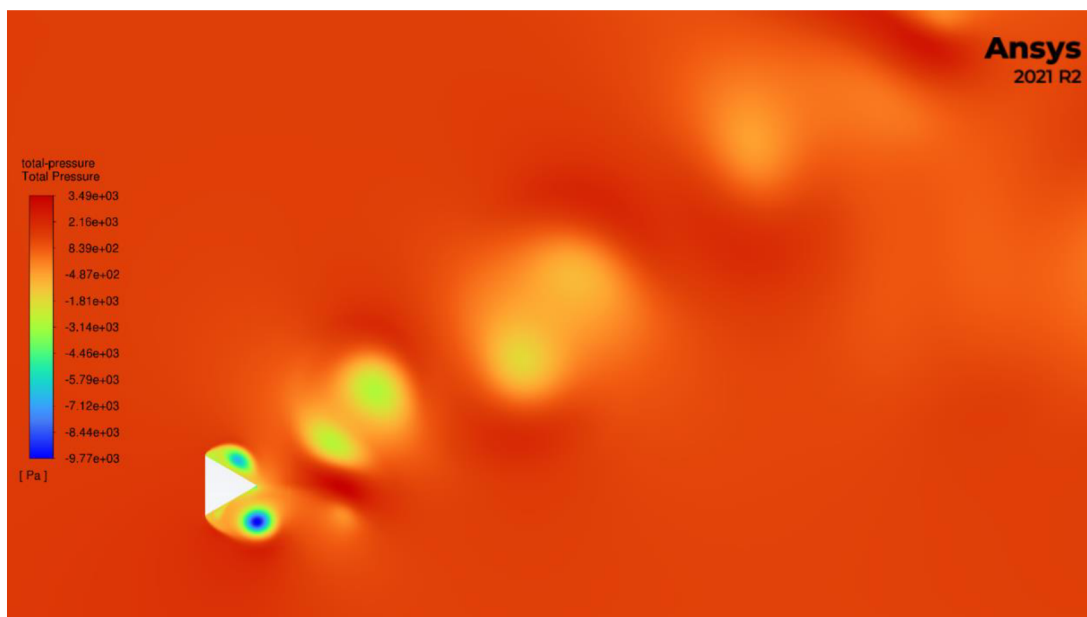
Bohužel u některých konkrétních konfiguracích, nejvíce u těch s nižší hmotností nebo tuhostí pružiny, docházelo k nárazům do vytvořené hranice pohybu (na ± 100 mm). Při nárazu dochází ke skokovému nárůstu vztlakové síly, což se negativně projevuje na grafickém znázornění průběhu síly. Těleso čeká na hranici pohybu tak dlouho, dokud není vztlaková síla opačného směru dostatečně velká, aby se těleso začalo pohybovat druhým směrem (viz obrázek 6.15). Hodnoty síly při nárazu nebyly brány při vyhodnocování v potaz. Ale výrazně to ovlivnilo samotný proces vyhodnocení. Níže na obrázku 6.14 můžeme vidět ukázkou průběhu vztlakové síly pro jeden z takových případů. Pravděpodobně tím musí být ovlivněny i samotné hodnoty vztlakové síly těsně před a po nárazu do hranice pohybu.



Obrázek 6.14: Ukázka průběhu vztlakové síly F_y pro těleso s hmotností $m = 3$ kg a tuhostí $k = 300$ N/m (bez tlumení), nalevo je kompletní časový úsek a výkyvy F_y , napravo je to přibližné na krátký časový úsek a bez výkyvů síly F_y

Svislé čáry vzhůru (viditelné na levém i pravém grafu – viz obrázek 6.14) reprezentují jednotlivé nárazy do hranice pohybu a s tím spojené výkyvy v hodnotě vztlakové síly. Napravo je ukázka přibližného průběhu vztlakové síly ve standardních mezích na ose y , je patrné, že nárazy tělesa mají závažný vliv na chování vztlakové síly a zůstává otázkou, jak by průběh vztlakové síly vypadal, kdyby k nárazům nedocházelo. Vyhodnocení vztlakové síly u takovýchto případů probíhalo manuální selekcí hodnot maximálních amplitud, které byly dále použity.

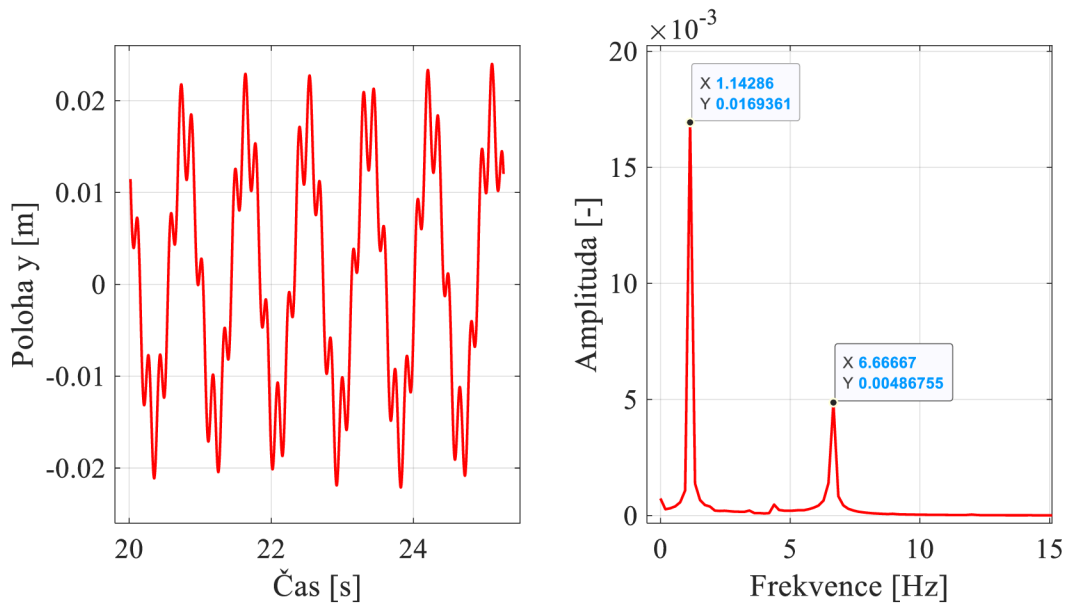
Pro těleso s průřezem ve tvaru trojúhelníku byl řešen vliv hmotnosti, tuhosti a tlumení. Vliv rychlosti proudění zkoumán nebyl. Předpokladem je, že by s nižším Re pravděpodobně došlo také ke zvýšení amplitudy, stejně jako u kruhového průřezu. Ale ke zkoumání tohoto vlivu by bylo nutné upravit okrajové podmínky, aby nedocházelo k nárazům do nastavených hranic pohybu, případně zvětšit výpočetní doménu.



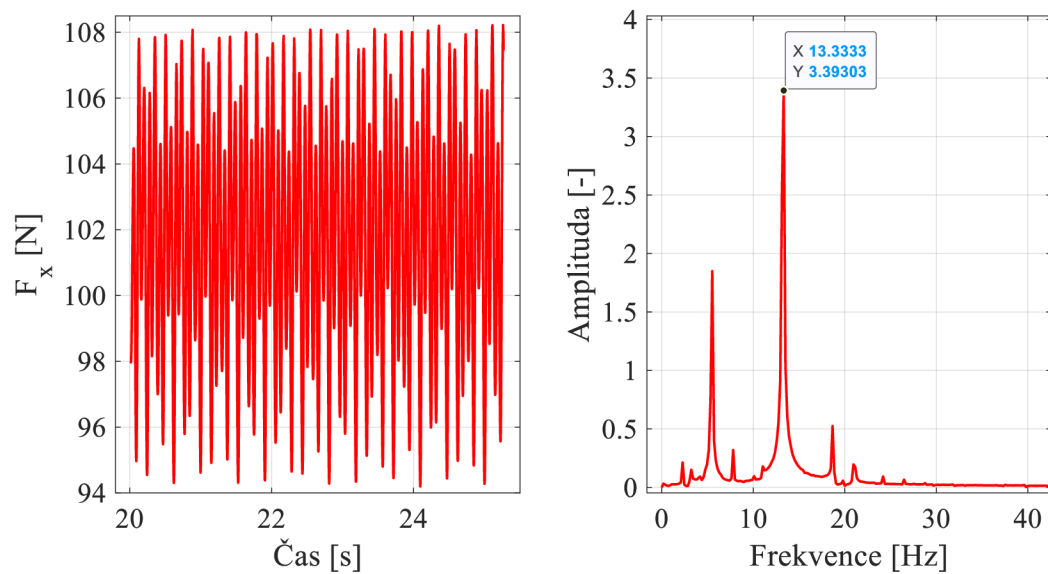
Obrázek 6.15: Kontura tlakového pole tělesa na spodní hranici pohybu (těsně před pohybem vzhůru)

6.2.1 Vliv hmotnosti

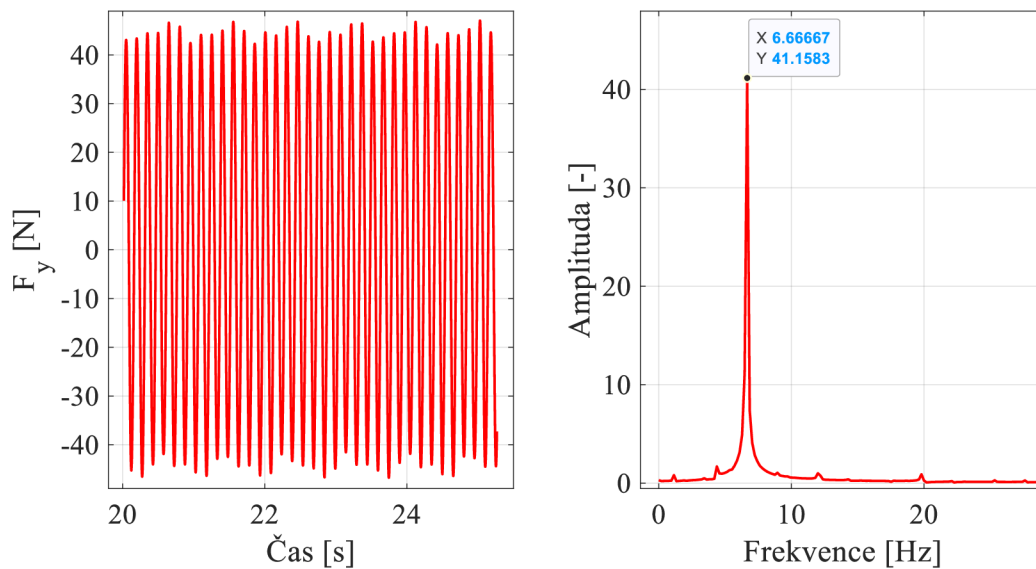
Stejně jako u tělesa s kruhovým průřezem byl zkoumán vliv hmotnosti pro trojúhelníkový průřez s konstantní hodnotou tuhosti pružiny $k = 300 \text{ N/m}$. Zkoumané hodnoty hmotnosti jsou také totožné s předešlou úlohou, konkrétně tedy $m = 2; 4; 5; 6; 8 \text{ kg}$. Mezi zkoumané veličiny primárně patří síly působící na těleso a jeho poloha, dále také frekvence těchto parametrů a případně i rychlost tělesa.



Obrázek 6.16: Graf průběhu polohy (trojúhelník – $m = 5 \text{ kg}$, $k = 300 \text{ N/m}$, bez tlumení)



Obrázek 6.17: Graf průběhu odporové síly F_x (trojúhelník – $m = 5 \text{ kg}$, $k = 300 \text{ N/m}$, bez tlumení)



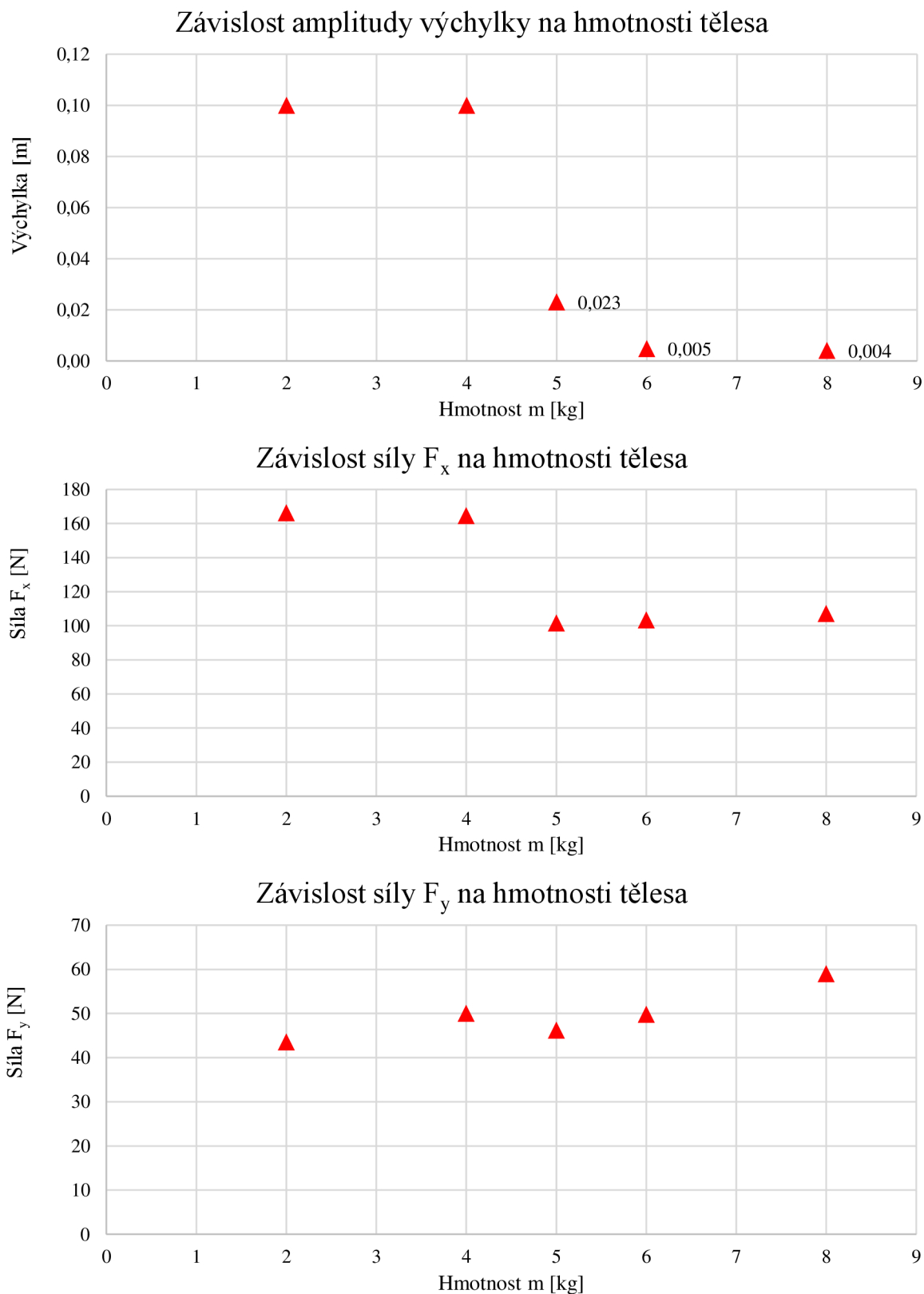
Obrázek 6.18: Graficky znázorněný průběh síly F_y (trojúhelník – $m = 5$ kg, $k = 300$ N/m, bez tlumení)

Na grafech na obrázcích výše můžeme vidět vyhodnocení frekvencí jednotlivých parametrů pomocí Fourierovy transformace. U průběhu dráhy je patrné, že osciluje na dvou frekvencích. Primární frekvence, na které se těleso pohybuje je rovna 1,14 Hz, druhá frekvence, která je shodná s frekvencí vztlakové síly, má hodnotu 6,67 Hz. Dále se opět potvrdilo, že frekvence síly F_x je dvakrát větší než frekvence vztlakové síly F_y .

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
2	300	0	0,1	166,36	43,54
4	300	0	0,1	164,71	50,02
5	300	0	0,0231	101,72	46,22
6	300	0	0,0048	103,57	49,81
8	300	0	0,0041	107,31	59,01

Tabulka 6.5: Hodnoty zkoumaných parametrů pro jednotlivé hmotnosti (trojúhelník)

Výše je tabulka hodnot ukazující vliv hmotnosti na zkoumané parametry. Vyhodnocení jednotlivých parametrů probíhalo obdobně jako u kruhového tvaru. Pro výchylku a vztlakovou sílu F_y jsou brány v potaz jejich maximální amplitudy a pro hodnotu síly F_x je použita průměrná hodnota, aby byla zachována porovnatelnost mezi jednotlivými tvary. U trojúhelníku už má síla F_x vyšší amplitudu, než tomu bylo u tělesa s kruhovým průřezem. Ukázku průběhu síly F_x můžeme vidět na grafu v obrázku 6.17. Grafické vyhodnocení závislosti těchto parametrů na hmotnosti tělesa je vyobrazeno na grafech níže.



Obrázek 6.19: Grafy závislosti polohy, F_x a F_y na hmotnosti tělesa

Z grafů je patrné, že na zkoumaném intervalu hmotnosti se projevuje určitý vliv na dynamické chování trojúhelníkového tělesa. Pro nižší hodnoty hmotnosti dosahuje výchylka maxima (0,1 m) určeného hranicí pohybu. Jakmile hmotnost naroste na 5 kg, amplituda

výchylky razantně klesne a v tomto trendu pokračuje dále se zvyšující se hmotností. Při hodnotách hmotnosti 2 a 4 kg se těleso pravděpodobně nachází v blízkosti teoretického rezonančního pásma, čemuž napovídají i hodnoty frekvence pohybu a jejich podobnost s vlastní frekvencí systému (viz tabulka 6.6 níže). Vlastní frekvence je počítána, stejně jako u kruhového tělesa, pouze pro případ pohybu na vzduchu.

Hmotnost [kg]	Frekvence pohybu [Hz]	Vlastní frekvence [Hz]
2	2	1,95
4	2,08	1,38
5	1,14 a 6,67	1,23
6	6,67	1,13
8	6,7	0,97

Tabulka 6.6: Tabulka frekvencí pohybu tělesa s trojúhelníkovým průřezem v porovnání s vlastní frekvencí systému ($m = 3 \text{ kg}$; $k = 300 \text{ N/m}$) pro různé hmotnosti

Pokud bychom brali hodnotu vlastní frekvence systému dle rovnice 6.1, tak její hodnota s rostoucí hmotností klesá, ale frekvence pohybu roste, což odpovídá klesající výchylce s rostoucí hmotností, jelikož se těleso vzdaluje od rezonančního pásma. Při hmotnosti 2 kg, je frekvence pohybu velmi blízko vlastní frekvenci systému, ale bohužel kvůli omezení pohybu je amplituda výchylky pouze 0,1 m a je shodná s amplitudou výchylky 4kg tělesa. Předpokladem je, že by mělo mít 2kg těleso amplitudu výchylky vyšší. Těleso o hmotnosti 5 kg je také poměrně blízko rezonančního pásma, ale zde už bude hrát roli vyšší hmotnost. Ale i přes to, je výchylka u tělesa s hmotností 5 kg přibližně pětkrát vyšší než u hmotnosti 6 a 8 kg.

Při pohledu na graf závislosti síly F_x na hmotnosti tělesa je zřejmé, že její průběh je velmi podobný průběhu závislosti výchylky na hmotnosti, kdy první dva body (2 a 4 kg) jsou ovlivněny blízkostí rezonančního pásma a zbytek nabývá skokově nižších hodnot. Vztlková síla F_y vykazuje velmi mírný trend růstu se zvyšující se hmotností tělesa.

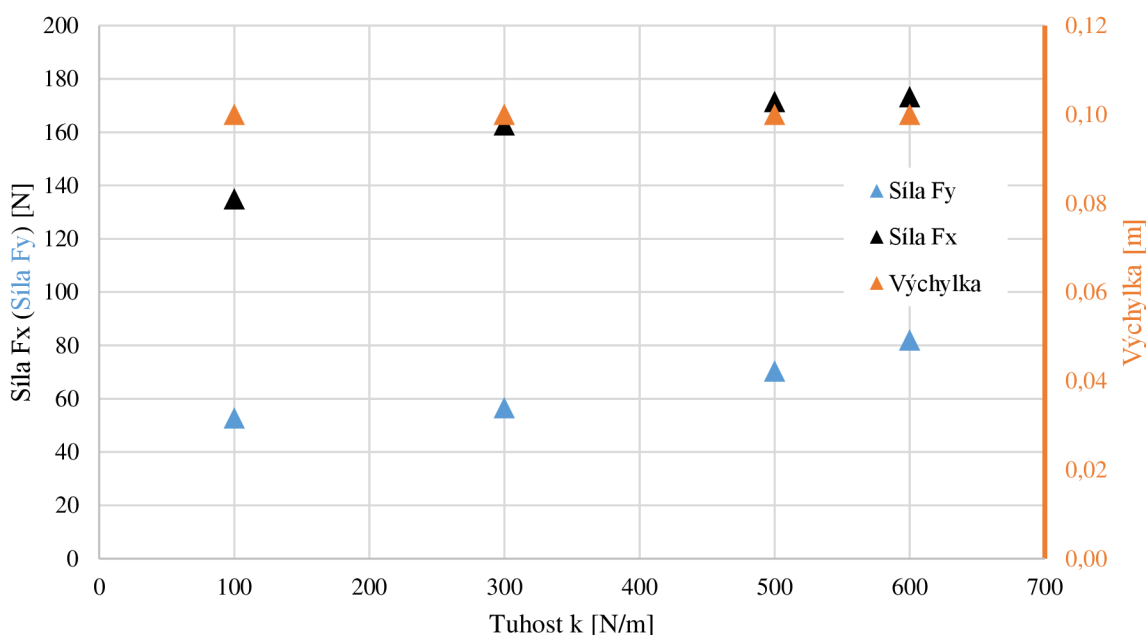
6.2.2 Vliv tuhosti pružiny

Vliv tuhosti pružiny pro těleso s průřezem ve tvaru trojúhelníku byl zkoumán při konstantní hodnotě hmotnosti $m = 3 \text{ kg}$ a hodnoty tuhosti jsou $k = 100; 300; 500; 600 \text{ N/m}$. Výsledné hodnoty z numerických simulací jednotlivých úloh jsou uvedeny v tabulce níže. U všech případů docházelo ke kmitání od hranice pohybu ke hranici pohybu, tudíž, i když se měnily vstupní hodnoty tuhosti pružiny, amplituda výchylka zůstala stále 0,1 m.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	100	0	0,1	134,99	52,79
3	300	0	0,1	162,69	56,64
3	500	0	0,1	171,47	70,43
3	600	0	0,1	173,24	82,04

Tabulka 6.7: Tabulka výsledných hodnot úloh s různými tuhostmi pružiny

Hodnoty z tabulky jsou vyneseny do grafu, který můžeme vidět na obrázku 6.20 níže.



Obrázek 6.20: Grafické znázornění vlivu tuhosti pružiny na těleso

Na grafu nebo z tabulky můžeme vyčíst, že jaký má tuhost pružiny vliv na dynamické vlastnosti tělesa s průřezem ve tvaru trojúhelníku. Síly dosahují mnohem vyšších hodnot než u kruhového tělesa a je zde vidět i mírný trend růstu u obou sil pro zkoumané hodnoty tuhosti pružiny. Člen síly od pružiny v pohybové rovnici představuje v tomto případě poměrně významný člen, jelikož hodnoty výchylky nejsou tak zanedbatelné jako u kruhového tělesa. Z frekvenční analýzy vyplývá, že se všechny čtyři případy zkoumané tuhosti pohybují velmi blízko rezonančního pásma (viz tabulka 6.8 níže).

Tuhost [N/m]	Frekvence pohybu [Hz]	Vlastní frekvence [Hz]
100	1,67	0,92
300	2,00	1,59
500	2,10	2,05
600	2,08	2,25

Tabulka 6.8: Tabulka frekvencí pohybu tělesa s trojúhelníkovým průřezem v porovnání s vlastní frekvencí systému pro různé tuhosti pružiny

Nejblíže rezonančnímu pásmu by pravděpodobně byl případ s tuhostí $k = 600$ N/m nebo 500 N/m, není jisté který, jelikož zde vypočtená vlastní frekvence platí pro vzduch, a ne pro kmitání ve vodě. Ale dá se předpokládat, že nebýt hranic pohybu, měl by největší amplitudu výchylky právě jeden z těchto dvou případů.

6.2.3 Vliv tlumení

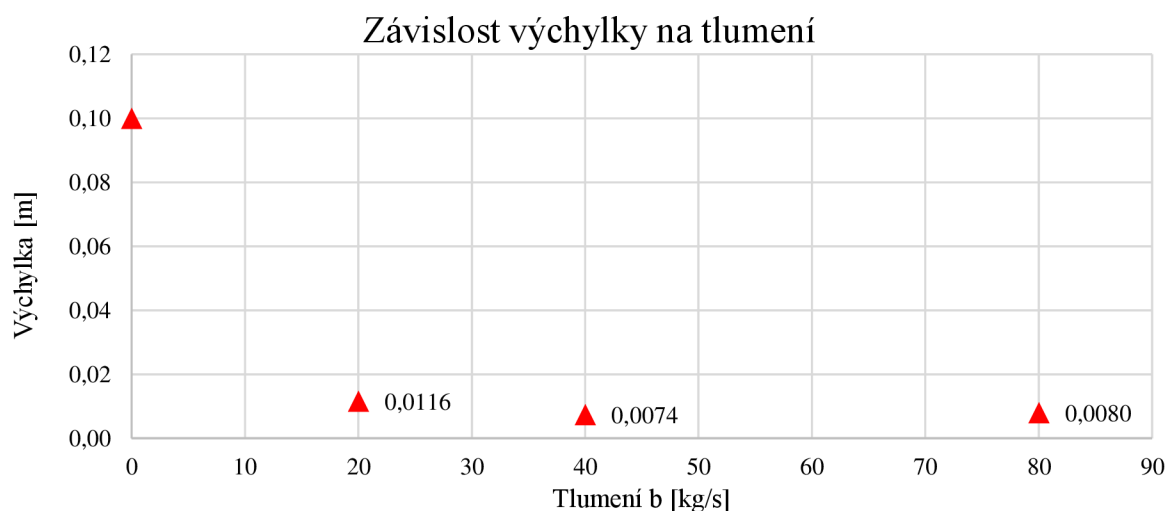
Do soustavy byl přidán tlumič obdobně jako u kruhového tělesa, a to za pomoci uživatelsky definované funkce (UDF). Až díky tlumení je právě možné využít hydrokinetický sběrač k transformaci energie vody na elektrický výkon. Vliv tlumení byl zkoumán pro hodnoty $b = 5; 20; 40; 80$ kg/s při konstantní hmotnosti a tuhosti pružiny $m = 3$ kg, resp. $k = 300$ N/m. Samotná maximální rychlost tělesa, na které je tlumení přímo úměrné, se u trojúhelníkového tělesa pohybovala v rozmezí $0,2$ m/s pro ta nejtěžší tělesa až po $1,5$ m/s pro ta nejlehčí. Případ s hmotností 3 kg a tuhostí pružiny 300 N/m, na kterém je testován vliv

tlumení se bez přidaného tlumiče pohyboval maximálně rychlostí 1,2 m/s. Ovšem po přidání tlumiče se rychlost pohybu tělesa výrazně snížila. Tabulka s výslednými hodnotami je níže.

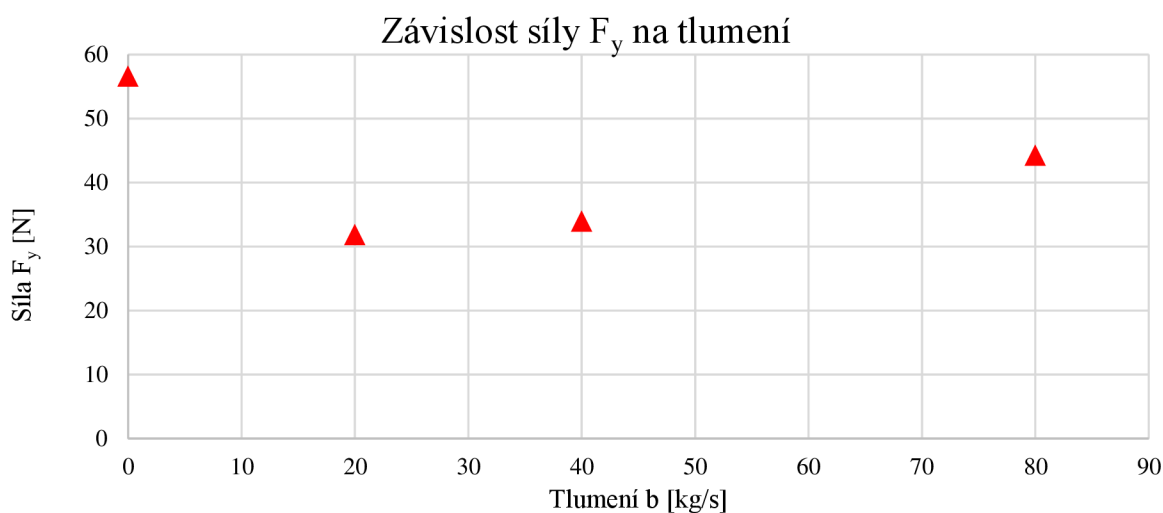
hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	300	0	0,1	162,69	56,64
3	300	5	-	-	-
3	300	20	0,0116	95,83	31,92
3	300	40	0,0074	97,69	34,00
3	300	80	0,0080	104,23	44,32

Tabulka 6.9: Hodnoty zkoumaných parametrů

V tabulce chybí hodnoty pro případ s tlumením $b = 5$ kg/s, jelikož nebylo možné korektně provést numerickou simulaci s touto vstupní hodnotou tlumení. Do tabulky 6.9 byl přidán i případ o stejné hmotnosti a tuhosti pružiny, ale s nulovým tlumením. Při porovnání je jasné vidět, jaký má tlumení vliv na dynamické chování trojúhelníkového tělesa. Tyto hodnoty byly vyneseny do grafů, které můžeme vidět na obrázcích 6.21, 6.22 a 6.23 níže.



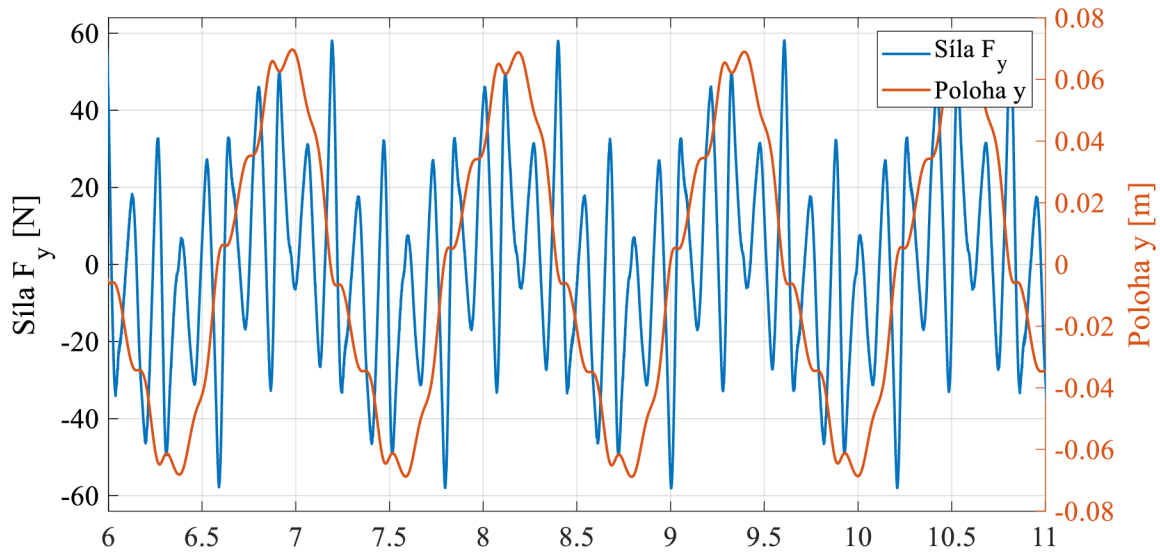
Obrázek 6.21: Graf závislosti výchylky na tlumení (trojúhelník)

Obrázek 6.22: Graf závislosti síly F_x na tlumení (trojúhelník)Obrázek 6.23: Graf závislosti síly F_y na tlumení (trojúhelník)

Jak již napověděla tabulka 6.9, vliv tlumení je velmi patrný. Zásadní vliv má na amplitudu výchylky, která klesne přibližně o jeden řád oproti případu bez tlumení. Podobný trend můžeme vidět i u obou zkoumaných sil na těleso. Přidání tlumiče do soustavy změnilo charakter dynamické odezvy tělesa, ale poté už samotná hodnota přídavného tlumení takový vliv na zkoumané parametry nemá.

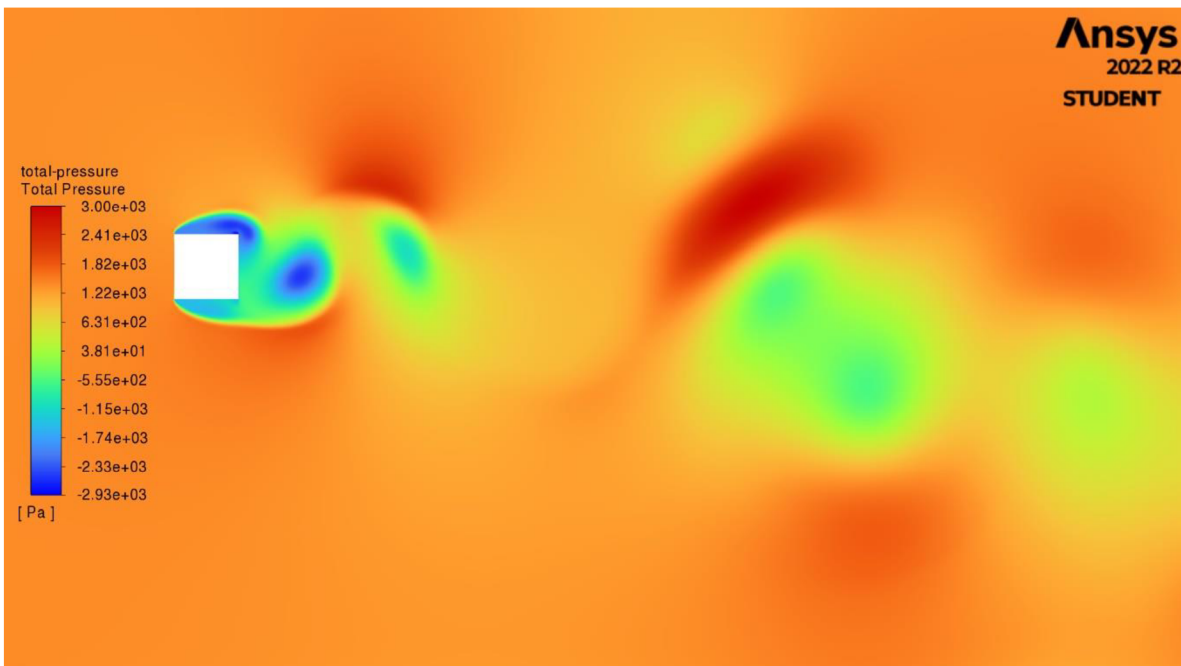
6.3 Vibrace indukované prouděním kolem tělesa s čtvercovým průřezem

Poslední tvar průřezu, na kterém byly zkoumány vibrace indukované prouděním je čtverec. Podobně jako u trojúhelníkového tělesa byla již zkoumaná pouze sestava tělesa na pružině, případně s přidaným tlumením. Byl pozorován vliv změny hmotnosti, tuhosti pružiny a také vliv přidaného tlumení. A vliv těchto změn na frekvenci pohybu. Na grafu na obrázku 6.24 níže můžeme vidět v souvislosti průběh polohy tělesa a vztlakovou sílu působící na těleso.



Obrázek 6.24: Ukázka dráhy a vztahové síly na těleso (čtverec – $m = 3 \text{ kg}$, $k = 300 \text{ N/m}$, bez tlumení)

Je zřejmé, že síla F_y , ale i výchylka oscilují na více frekvencích. Pravděpodobně je to způsobeno, podobně jako u trojúhelníkového tělesa, odtržením vírových struktur na čelní hraně obtékaného tělesa a následným vlivem těchto vírů na boční hrany. Ukázku tlakového pole kolem obtékaného čtvercového tělesa můžeme vidět na obrázku 6.25 níže. Je vidět, jak vírová struktura odtržená na čelní hraně působí na těleso podél celé boční strany.



Obrázek 6.25: Kontura celkového tlaku u čtvercového tělesa ($m = 3 \text{ kg}$, $k = 300 \text{ N/m}$)

Opět bohužel docházelo k nárazům do hranice pohybu, která byla nastavena stejně jako pro oba předchozí případy a to na $\pm 100 \text{ mm}$ od počátku. Stejně jako u tělesa s průřezem ve tvaru trojúhelníku to způsobovalo komplikace ve vyhodnocování a úlohy, kde k nárazům docházelo, byly řešeny totožně, a to manuální selekcí hodnot, které byly uznány za vhodné pro další vyhodnocení.

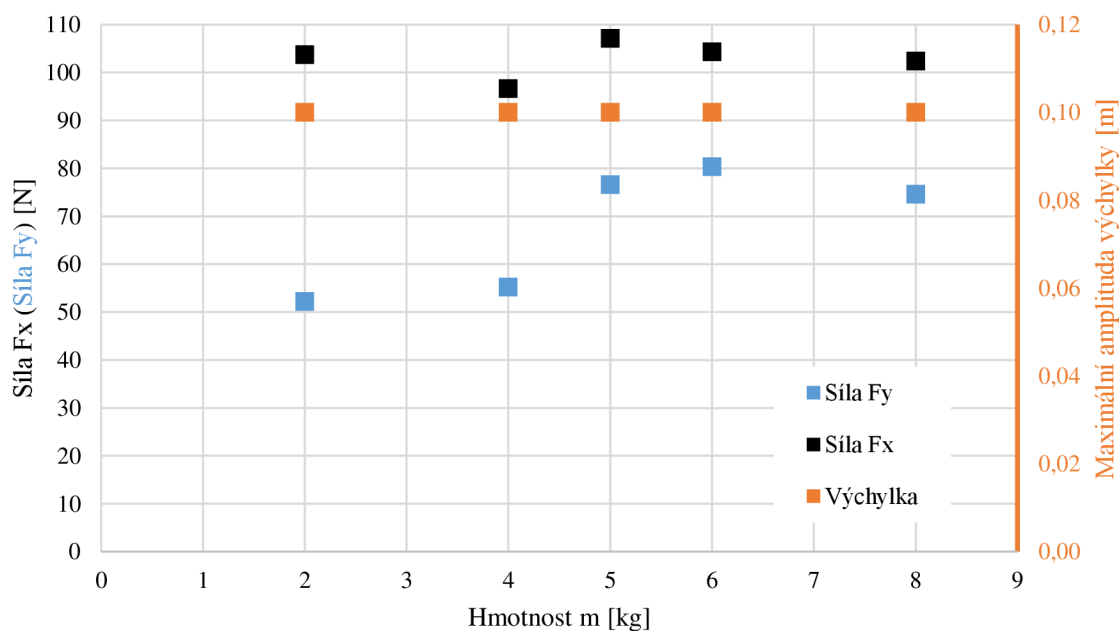
6.3.1 Vliv hmotnosti

Pro zjištění vlivu hmotnosti u tělesa s průřezem ve tvaru čtverce bylo napočítáno pět různých hodnot hmotnosti tělesa při konstantní tuhosti pružiny. Zkoumán byl vliv na amplitudu výchylky tělesa a na síly působící na těleso. V tabulce 6.10 níže jsou vidět výsledné hodnoty z jednotlivých numerických simulací.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
2	300	0	0,1	103,72	52,24
4	300	0	0,1	96,60	55,20
5	300	0	0,1	107,10	76,58
6	300	0	0,1	104,31	80,35
8	300	0	0,1	102,34	74,59

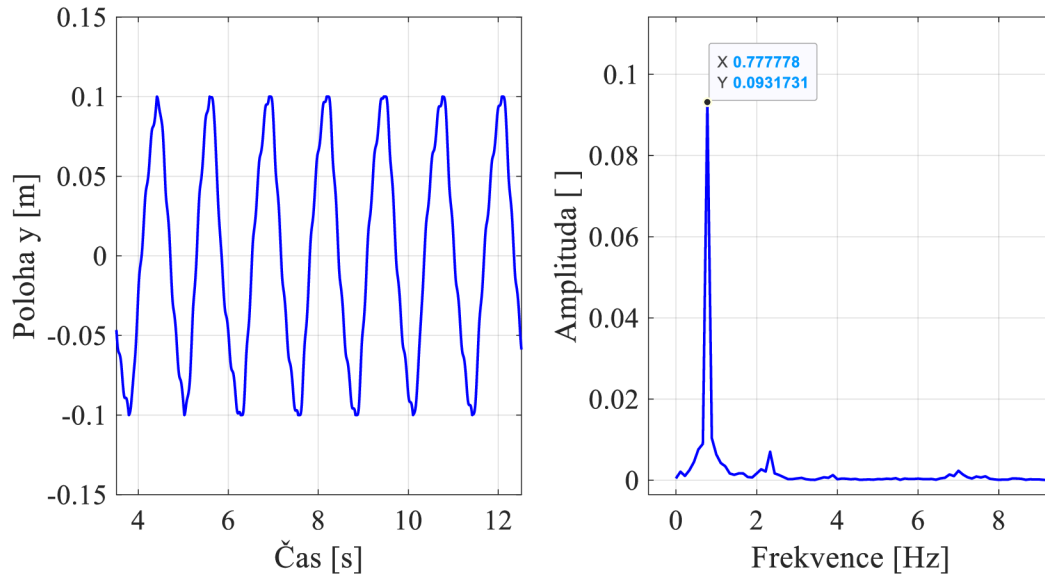
Tabulka 6.10: Výsledné hodnoty zkoumaných parametrů vlivu hmotnosti u čtvercového tělesa

Již z tabulky je patrné, že amplituda výchylky je neměnná a dosahuje pokaždé hodnoty 0,1 m. To značí, že neohledně na hmotnost tělesa, se těleso vždy pohybovalo až k určené hranici pohybu. Působící síly na těleso jsou ale různé, z toho lze říct, že nebyť hranice pohybu, výchylka tělesa by se pravděpodobně také lišila pro jednotlivé hmotnosti.

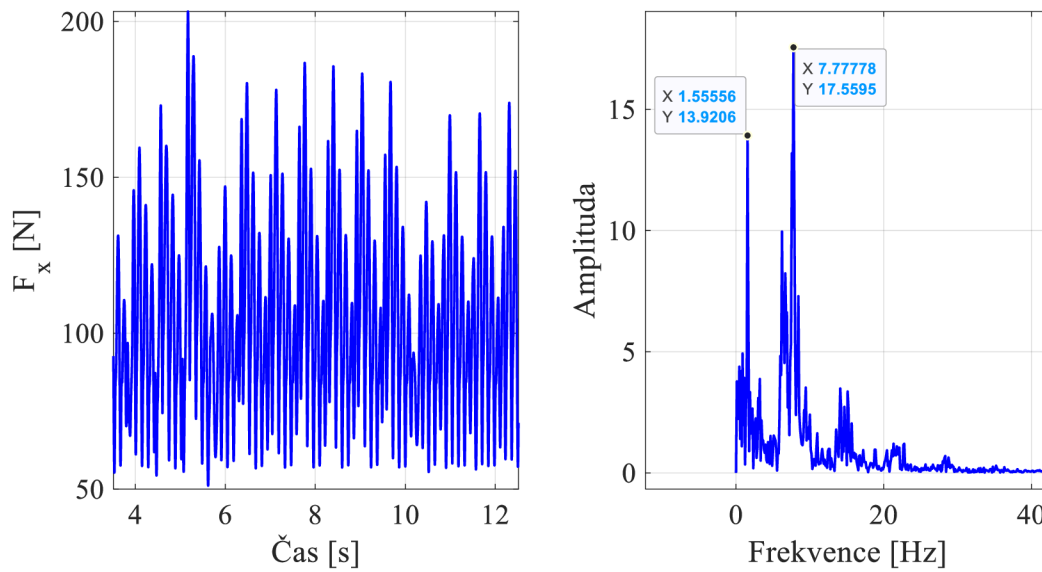


Obrázek 6.26: Grafické znázornění výsledků pro zkoumání vlivu hmotnosti u čtvercového tělesa

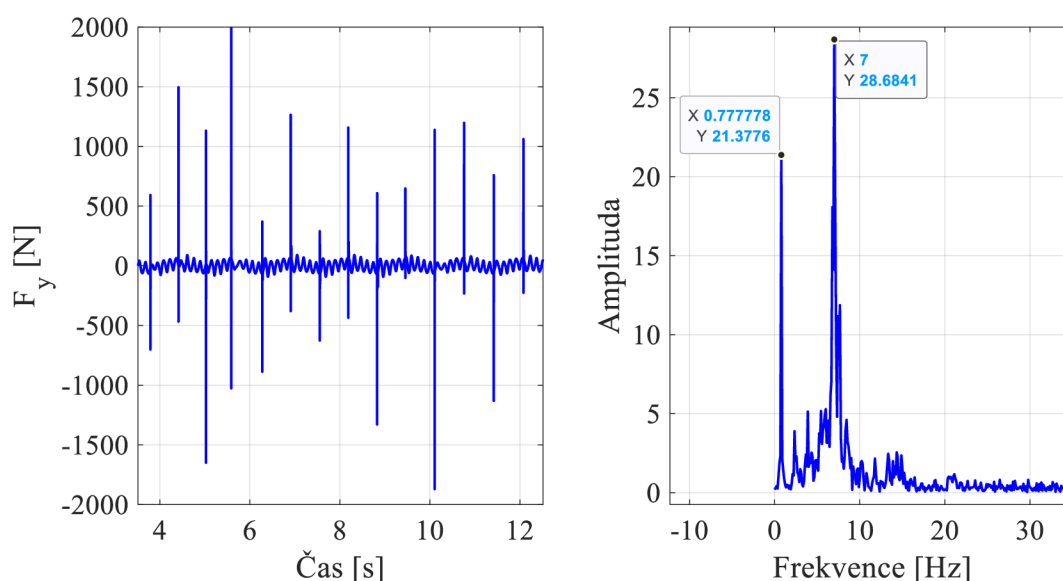
Na grafu na obrázku 6.26 můžeme vidět vynesena data z tabulky 6.10 v grafické podobě. Graf pouze potvrzuje již zmíněné poznatky, ukazuje, že amplituda výchylky je neměnná pro všechny případy. Vztlková síla F_y má s hmotností mírně rostoucí trend, což bylo pozorováno i u předešlých tvarů. Ukázky průběhu jednotlivých parametrů pro jeden výpočetní případ můžeme vidět níže na grafech v obrázcích 6.27, 6.28 a 6.29, v pravé části je vždy rychlá Fourierova transformace k zjištění frekvence periodického průběhu.



Obrázek 6.27: Ukázka průběhu výchylky a její frekvence (čtverec – $m = 6$ kg, $k = 300$ N/m, bez tlumení)



Obrázek 6.28: Ukázka průběhu síly F_x a její frekvence (čtverec – $m = 6$ kg, $k = 300$ N/m, bez tlumení)



Obrázek 6.29: Ukázka průběhu síly F_y a její frekvence (čtverec – $m = 6$ kg, $k = 300$ N/m, bez tlumení)

Průběh polohy tělesa na prvním grafu (viz obrázek 6.27) potvrzuje, že se pohybovalo od hranice pohybu k hranici. Frekvence pohybu je 0,78 Hz. Při průběhu vztlakové síly F_y jsou nárazy do hranice také patrné, projevují se nefyzikálním výkyvem hodnoty síly. Po Fourierově transformaci průběhu vztlakové síly vyšly dvě frekvence. Jedna odpovídá frekvenci pohybu tělesa, tedy samotným nárazům (0,78 Hz) a druhá frekvence (7 Hz) představuje periodický průběh vztlakové síly mezi nárazy. Frekvence síly F_x se stále rovná dvojnásobku frekvence síly F_y , ale až na sekundárních frekvencích u obou veličin. Pro ostatní hodnoty hmotností byly průběhy jednotlivých veličin velmi podobné a frekvence se téměř nelišily.

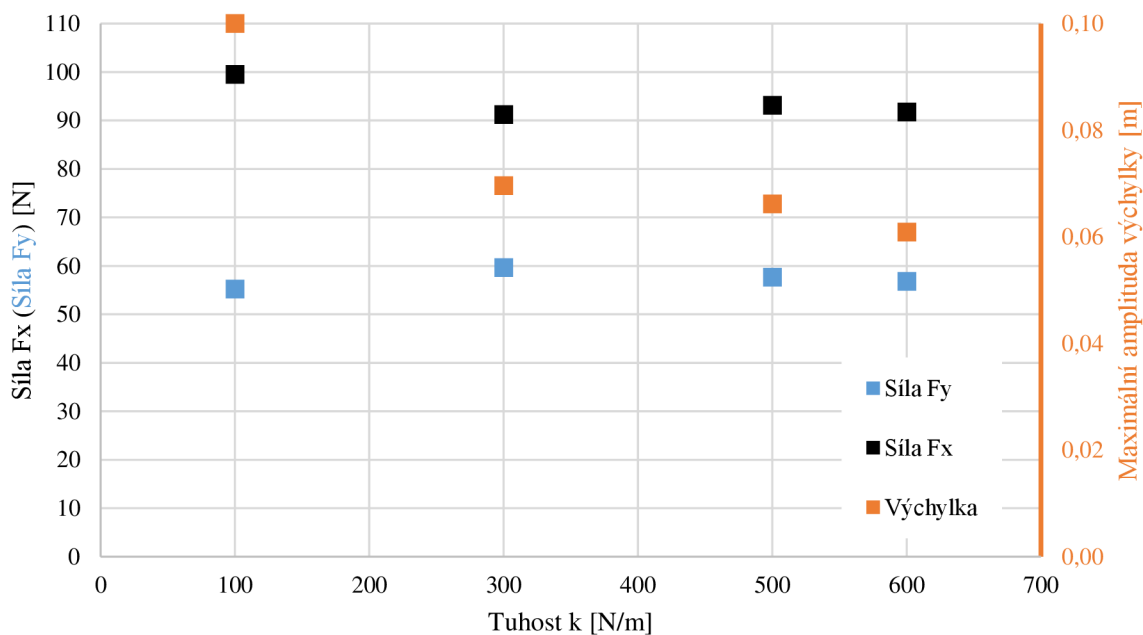
6.3.2 Vliv tuhosti pružiny

Dalším parametrem, který byl zkoumán i u tělesa s průřezem ve tvaru čtverce je tuhost pružiny. Napočítány byly čtyři různé hodnoty tuhosti při konstantní hmotnosti. Konkrétní hodnoty jsou stále stejné pro všechny tvary průřezů, aby byla zachována porovnatelnost mezi nimi. Následuje tabulka s výslednými hodnotami z numerických simulací

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výhybky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	100	0	0,1	99,51	55,25
3	300	0	0,0696	91,18	59,68
3	500	0	0,0662	93,10	57,66
3	600	0	0,0609	91,76	56,83

Tabulka 6.11: Vyhodnocené zkoumané parametry

Níže můžeme vidět graficky zpracovaná vyhodnocená data z numerických simulací převzatá z tabulky 6.11.



Obrázek 6.30: Graf výsledných hodnot z numerických simulací pro zjištění vlivu tuhosti pružiny u čtvercového průřezu

Z grafu na obrázku 6.30 vyplývá, že pro zkoumaný interval tuhostí nepozorujeme výrazné změny v hodnotách sil, které působí na těleso. Jejich hodnoty nevykazují žádný trend s měnící se tuhostí. Nicméně u nejnižší hodnoty tuhosti (100 N/m) docházelo stále k narázům do hranice pohybu, jelikož síla od pružiny nebyla dostatečná, aby těleso udržela v určených mezích. Při vyšších hodnotách tuhosti už k tomu nedocházelo a amplituda výchylky mírně klesala s rostoucí tuhostí pružiny.

Tuhost [N/m]	Frekvence pohybu [Hz]	Frekvence F_y [Hz]	Vlastní frekvence [Hz]
100	0,81	0,81 a 6,45	0,92
300	0,82	0,82 a 7,52	1,59
500	0,99	0,97 a 6,81	2,05
600	1,13	1,13 a 7,2	2,25

Tabulka 6.12: Frekvence dvou zkoumaných parametrů v porovnání s vlastní frekvencí

V tabulce 6.12 výše jsou vypsány jednotlivé frekvence pro průběh pohybu tělesa a vztlakové síly v porovnání s vlastní frekvencí systému tělesa na pružině vypočtené ze vztahu pro kmitání na vzduchu. S rostoucí tuhostí roste frekvence pohybu, ale nejbližší rezonančnímu pásmu by pravděpodobně byl případ s tuhostí o hodnotě 100 N/m, čemuž odpovídá i nejvyšší dosažená výchylka. Vztlaková síla kmitá, stejně jako v předešlé kapitole (viz obrázek 6.29), na více než jedné frekvenci, kdy vždy až sekundární frekvence vztlakové síly odpovídá frekvenci pohybu.

6.3.3 Vliv tlumení

Posledním zkoumaným parametrem u čtvercového tělesa je přidání tlumení. Počáteční úlohou pro zjištění vlivu tlumení bylo těleso s průřezem ve tvaru čtverce o hmotnosti 3 kg a tuhosti 300 N/m, do této sestavy bylo za pomoci UDF přidán lineární tlumič s koeficientem tlumení o čtyřech zvolených hodnotách. Výsledná tlumící síla je přímo úměrně závislá na

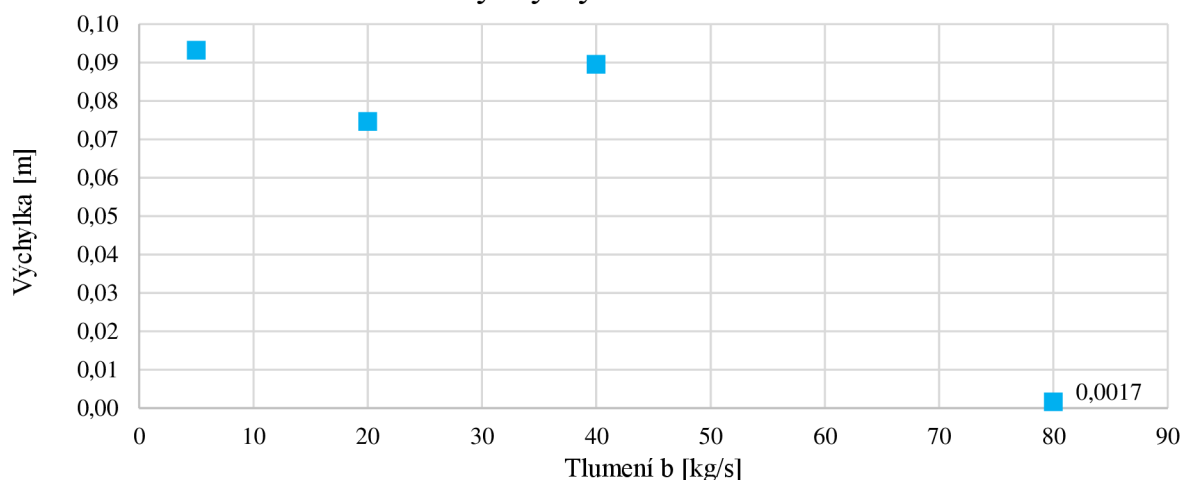
rychlosti pohybu tělesa a zvoleném koeficientu tlumení. Maximální dosažená rychlost tělesa bez přidaného tlumiče je rovna přibližně 0,7 m/s, s přidaným tlumením bude rychlost pohybu tělesa klesat.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	maximální amplituda výchylky [m]	průměrná hodnota F_x [N]	maximální amplituda F_y [N]
3	300	5	0,0932	93,10	56,43
3	300	20	0,0747	89,94	48,99
3	300	40	0,0896	90,36	47,91
3	300	80	0,0017	73,57	8,02

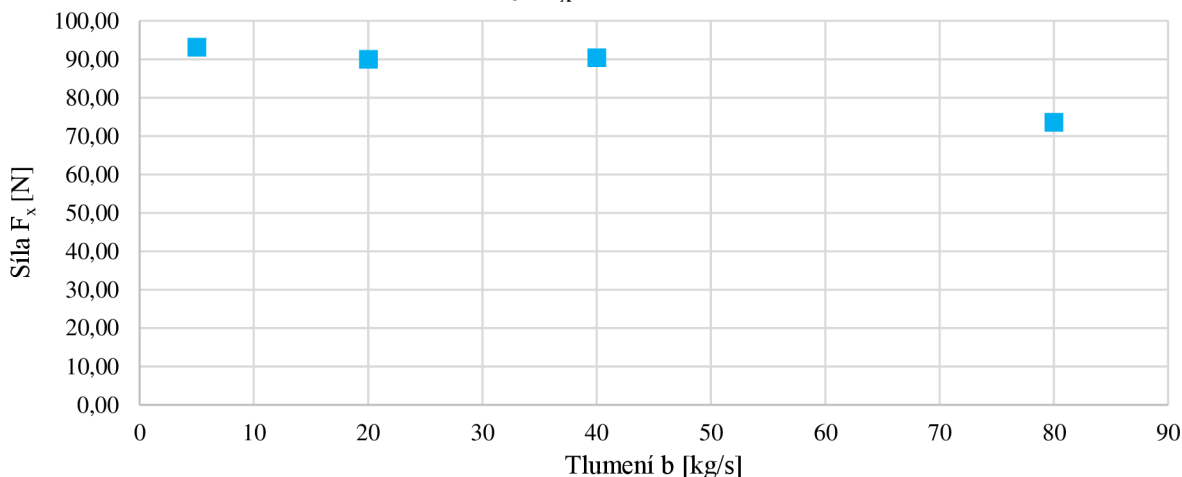
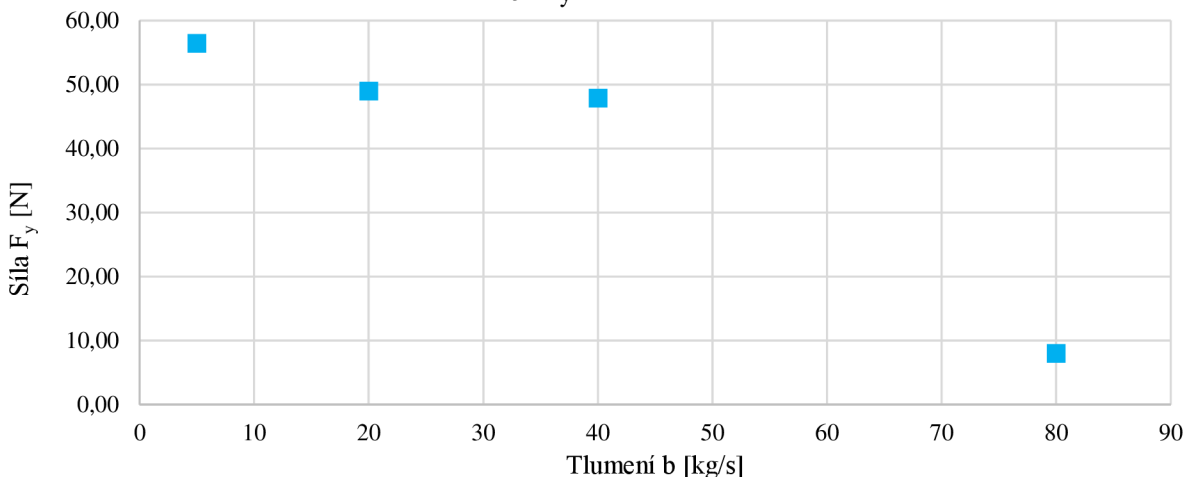
Tabulka 6.13: Výsledky zkoumání vlivu tlumení u tělesa s průřezem ve tvaru čtverce

Vyhodnocené síly působící na těleso a amplituda výchylky jsou v tabulce 6.13. Grafické znázornění těchto výsledků je na grafech níže. Rychlost tělesa s přidaným tlumením postupně klesala s rostoucí hodnotou tlumení, kdy pro hodnoty $b = 5; 20; 40$ kg/s byly hodnoty maximální rychlosti v intervalu 0,7 – 0,6 m/s. Pro nejvyšší hodnotu tlumení (80 kg/s) rychlost dosahovala maximální hodnoty pouhých 0,06 m/s, tento skok v rychlosti tělesa je doprovázen výraznými změnami i u dalších zkoumaných parametrů.

Závislost výchylky na tlumení uložení



Obrázek 6.31: Grafické znázornění maximální výchylky pro různé tuhosti (čtverec)

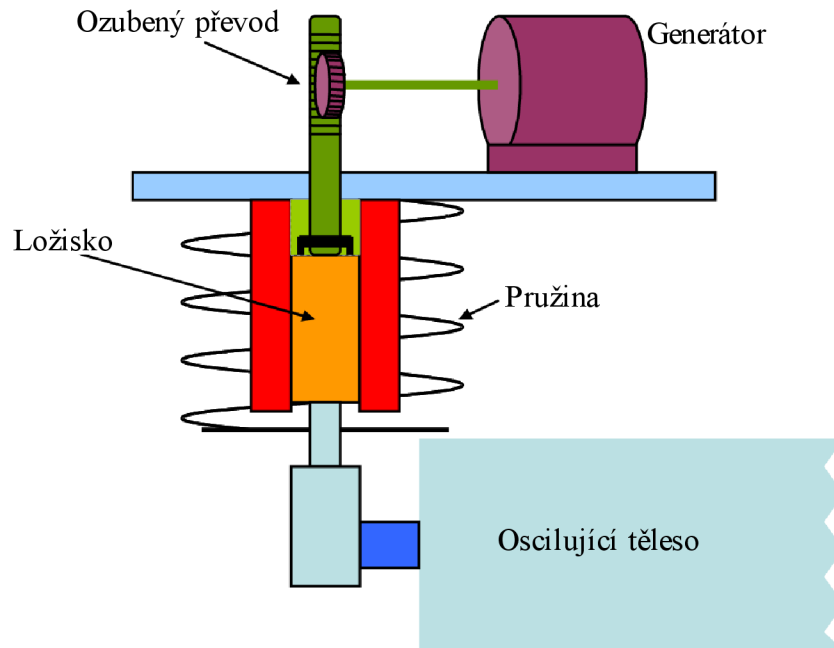
Závislost síly F_x na tlumení uloženíObrázek 6.32: Grafické znázornění průměru síly F_x pro různé tuhosti (čtverec)Závislost síly F_y na tlumení uloženíObrázek 6.33: Graf maximálních hodnot síly F_y pro různé tuhosti (čtverec)

Z tabulky 6.13 anebo o něco lépe z grafů na obrázcích 6.30, 6.31 a 6.32 je patrné, že nejvyšší hodnota tlumení (80 kg/s) vykazuje odlišné chování než předchozí hodnoty. Tabulka 3.1 v kapitole tlumené nucené kmitání obsahuje rozdělení tlumeného kmitání a vztah pro zjištění do jaké kategorie kmitání spadá. Tento vztah je opět pouze pro kmitání na vzduchu, ale je možné ho použít k nalezení možného vysvětlení několikanásobného poklesu velikosti vztahové síly a amplitudy výchylky oproti nižším hodnotám tlumení při kmitání ve vodě. Pro hodnoty tlumení $b = 5; 20; 40$ kg/s se jedná o tlumení podkritické, ovšem pro hodnotu $b = 80$ kg/s je hodnota $b^2 - 4mk > 0$ a to znamená, že se jedná o nadkritické tlumení. Projevem nadkritického tlumení je právě útlum oscilací a návrat do rovnovážné polohy.

6.4 Výkon zařízení

Posledním zkoumaným parametrem je možný výkon zařízení. Jak již bylo zmíněno v úvodních kapitolách této práce, účelem zkoumání hydrokinetických sběračů je získání obnovitelné energie ze zdrojů, které ještě nebyly ve velké míře zužitkovány. Jedním z principů, který je možné takto využít je pohyb tělesa díky proudění kapaliny kolem něj. Pohyb tělesa naznačuje, že část hydrokinetické energie je přeměněna na mechanickou energii. Tuto mechanickou energii je možné dále transformovat na jiné využitelné formy energie, nejčastěji

na energii elektrickou. Jeden z možných způsobů přeměny hydrokinetické energie je ukázán na schématu níže (viz obrázek 6.34), kde můžeme vidět jednoduchý systém skládající se z oscilujícího tělesa, pružiny, ozubeného převodu, který mění lineární pohyb na rotační a běžného generátoru na výrobu elektrické energie. Je možné přidat do systému další ozubené kolo ke zvýšení vstupních otáček do generátoru nebo lze využít lineární generátor anebo například hydraulický systém. [20]



Obrázek 6.34: Schématická ukázka principu získání el. energie využívajícího vibrace indukované prouděním (převzato z [20])

Klíčovým prvkem k zužitkování hydrokinetické energie ve sběračích tohoto typu je přidané tlumení, většinou ve formě elektrického zařízení (generátoru). Bez přidaného tlumení by nebylo možné potenciální výkon zařízení zužitkovat. Volba konkrétní hodnoty odporu zařízení je velmi důležitá, pokud je hodnota tlumení příliš vysoká, dochází k útlumu oscilací tělesa a může dojít k úplnému potlačení VIV. Naopak pokud bude tlumení nízké, využitelný výkon bude zanedbatelný. [20]

Existují dvě metody, jak na výkon hydrokinetických sběračů na bázi VIV nahlížet, první bere v potaz obecně hydrodynamické síly působící na těleso a druhá řeší využitelný výkon samotného zařízení. Tyto metody se liší v dalším možném využití výsledného výkonu, výkon od hydrodynamických sil představuje jakýsi potenciál výkonu, který je proud vody tekoucí kolem konkrétního tělesa schopný vygenerovat. Za to výkon pouze od tlumící síly, tedy ta druhá zmiňovaná metoda, je z praktického hlediska vhodnější k dalšímu vyhodnocení, jelikož poukazuje přímo na výkon, který je možné využít v konkrétním elektrickém zařízení typu generátor. Definice obou metod následuje, rovnice jsou převzaty z [42].

Celkový výkon od hydrodynamických sil P_{HD} za jednu periodu oscilace T je dán jako

$$P_{HD} = \frac{1}{T} \int_0^T F_y \dot{y} dt, \quad (6.2)$$

kde F_y představuje celkovou sílu ve směru y působící na oscilující těleso a \dot{y} je rychlost pohybu oscilujícího tělesa. Rovnice (6.2) se dá dále rozepsat na jednotlivé členy působící síly

$$P_{HD} = \frac{1}{T} \int_0^T (m\ddot{y} + b\dot{y} + ky)y dt, \quad (6.3)$$

jednotlivé parametry jsou již popsány v předchozích kapitolách. Pokud by platilo, že pohyb tělesa je sinusový, pak jediný energeticky nenulový člen je $b\dot{y}$. Tudíž vztah pro prakticky využitelný výkon je

$$P_{tl} = \frac{1}{T} \int_0^T b\dot{y}y dt. \quad (6.4)$$

Oba výkony byly vyhodnoceny ze získaných výsledků numerických simulací. Vyhodnocení probíhalo následovně. Nejprve byla zvolena alespoň jedna (ve většině případech více než jedna) perioda průběhu výchylky tělesa, výběr byl prováděn až z ustáleného pohybu. Následně byla importována potřebná data do tabulkového procesoru Excel, jednalo se o hodnoty působící síly F_y a rychlosti pohybu tělesa v_y . Bylo nutné manuálně vybrat úsek dat podle časových údajů zvolené periody nebo více period pohybu tělesa. Pokud během zvoleného časového úseku došlo k nárazům pohybujícího se tělesa do hranic pohybu, což by zkreslovalo výsledky, muselo se manuálně očistit danou sadu dat o fyzikálně nekorektní hodnoty, takovým způsobem, aby na sebe průběh dané veličiny navazoval. Poté byla provedena integrace dle rovnice 6.2, respektive 6.4, přes zvolené periody. Pro využitelný výkon P_{tl} , který byl počítán pouze pro případy s přidáním tlumením b , byla použita efektivní hodnota (RMS – root mean square, česky také kvadratický průměr) k zjištění velikosti periodicky se opakující veličiny. Efektivní hodnota výkonu P_{tl_RMS} byla vypočtena podle vztahu

$$P_{tl_RMS} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T (b\dot{y}y)^2 dt}. \quad (6.5)$$

Poté platí, že

$$P_{tl_RMS} \cong U \cdot I, \quad (6.6)$$

kde U je napětí, a I je proud. Výsledné hodnoty výkonu pro vybrané případy jsou uvedeny v tabulce níže.

hmotnost m [kg]	tuhost k [N/m]	tlumení b [kg/s]	kruh		čtverec		trojúhelník	
			P_{HD} [W]	P_{tl_RMS} [W]	P_{HD} [W]	P_{tl_RMS} [W]	P_{HD} [W]	P_{tl_RMS} [W]
8	300	0	-0,028	-	0,139	-	-0,114	-
3	100	0	-0,010	-	0,519	-	7,495	-
3	500	0	-0,009	-	-0,090	-	4,520	-
3	300	40	0,065	0,094	3,768	5,270	1,563	2,018
3	300	80	0,113	0,173	0,148	0,186	3,997	4,990

Tabulka 6.14: Tabulka vypočtených výkonů

Konkrétní případy byly zvoleny na základě velikosti působící síly F_y a rychlosti tělesa v_y . Výkon od hydrodynamických sil P_{HD} by měl, pro dokonale symetrickou úlohu z hlediska proudění, okrajových podmínek a ostatních vlivů, vycházet nulový. Musí být brán ohled také na tlumení od kapaliny, pokud by bylo pouze kladné, konstantní a lineární, pak by výkon P_{HD} měl vycházet jako malá nenulová hodnota. V tabulce 6.14 je ale možné pozorovat záporné

hodnoty výkonu P_{HD} (označeny červeně). V tomto případě se pravděpodobně jedná o chybu způsobenou nepřesností simulace nebo vyhodnocení, možná způsobenou interakcí vírů se stěnou domény nebo vlivem velikosti časového kroku. Obecně mírnou nesymetrií během jedné periody, ať už numerického nebo fyzikálního původu. U úloh s přidáním tlumením byl vypočten jak výkon od hydrodynamických sil, tak i využitelný výkon přímo od tlumící síly. Hodnoty P_{tl_RMS} představují výkon, který je možný přeměnit na elektrický výkon (viz rovnice 6.6).

Nejvyšší výkon od hydrodynamických sil vyšel u tělesa s trojúhelníkovým tvarem průřezu a to přibližně 7,5 wattu. Jedná se o případ s hmotností 3 kg a tuhostí pružiny 100 N/m. Hodnota výkonu spíše poukazuje na možný potenciál konkrétního nastavení měnitelných parametrů, než aby představovala prakticky využitelný výkon stroje. Z časových důvodů nebylo možné testovat více rychlostí, tudíž nebyla zkoumána rychlost, při které by byl poměr využitelného výkonu k hydroenergetickému potenciálu nejlepší. Byla tedy posuzována pouze jedna rychlost proudění. Je ovšem téměř jisté, že kdyby do úlohy s nejvyšším P_{HD} byl přidán např. generátor (tedy určitá hodnota tlumení), tak by hodnoty využitelného výkonu byly velmi odlišné. Využitelný výkon od tlumící síly vyšel nejvyšší u tělesa s čtvercovým průřezem, a to konkrétně s hmotností 3 kg, tuhostí pružiny 300 N/m a přidáním tlumením 40 kg/s. Hodnota vypočteného výkonu je přibližně 5,3 wattu.

Využitelné výkony u kruhového tělesa, pro zkoumaný režim proudění, nedosahují takových hodnot jako u trojúhelníku nebo čtverce. Což se dalo předpokládat, jelikož velikosti působících sil na kruhové těleso jsou nižší než u dalších tvarů. To samé platí i u rychlosti pohybu tělesa. Tvar kruhu by mohl dopadnout výrazně lépe pro odlišný režim proudění.

ZÁVĚR

Hlavním cílem práce bylo zjistit vliv hmotnosti tělesa, tuhosti pružiny a tlumení na charakter oscilací tělesa v proudu kapaliny za pomoci dvourozměrné CFD simulace s jedním stupněm volnosti. Numerické simulace byly provedeny pro tři různé tvary průřezu tělesa, a to kruhu, čtverce a trojúhelníku. Vyhodnoceny byly působící síly na těleso, dráha tělesa a výkon zařízení. Dalším cílem práce bylo vytvořit rešerši o možnostech využití hydrokinetické energie a popsat konkrétní systémy využívající různé formy hydrokinetické energie s důrazem na fenomén vibrací indukovaných prouděním. Součástí rešerše je také souhrnný popis lineárních a nelineárních oscilátorů.

Ke splnění cílů práce bylo nutné simulovat velké množství úloh pro různé kombinace zkoumaných parametrů. Jako první byly prováděny simulace proudění kolem tělesa s průřezem ve tvaru kruhu. Pro zkoumané rozsahy hmotnosti, tuhosti pružiny, a i přidaného tlumení docházelo pouze k velmi malým oscilacím výchyly o velikosti amplitudy přibližně 1 mm. Maximální rychlost tělesa dosahovala pouhých 0,06 m/s pro veškeré simulace tělesa s kruhovým průřezem. Kvůli tomu nebylo možné dobře pozorovat vliv tuhosti pružiny a ani přidaného tlumení, jelikož právě tuhost pružiny je v pohybové rovnici pro tlumené nucené kmity (viz rovnice 3.24) spjata s výchyly tělesa a tlumení s rychlostí tělesa. I při takto nepatrném chvění byla frekvence pohybu shodná s frekvencí působící síly na těleso ve směru y , to značí stále přítomný vliv Kármánovy vírové stezky. Jediný pozorovatelný trend u kruhového průřezu pro zvolené okrajové podmínky byla rostoucí vztlaková síla při zvyšování hmotnosti tělesa. Což může poukazovat na nezanedbatelné hodnoty zrychlení tělesa, které je v již zmíněné pohybové rovnici právě v součinu s hmotností tělesa. Bohužel zrychlení tělesa nebylo v numerických simulacích zaznamenáváno. Vzhledem k neuspokojivým výsledkům byly provedeny změny v okrajových podmínkách s cílem dosáhnout vyšších amplitud výchyly. Konkrétně byla upravena vstupní rychlost proudění kapaliny, která vystupuje v Reynoldsovu číslu. Bylo zjištěno, že s vyšší vstupní rychlostí proudění sice dochází k růstu působící vztlakové síly, ale zároveň roste i frekvence oscilací tělesa. Důsledkem toho se frekvence těchto případů vzdalují od vlastní frekvence systému, což může mít vliv na snižující amplitudu výchyly. Naproti tomu úlohy s nižší rychlostí proudění mají frekvenci pohybu velmi blízko vlastní frekvenci systému a pohybují se u rezonančního pásma, což vede k řádově vyšším výchyly. Pro porovnání, při rychlosti proudění 0,5 m/s byla maximální amplituda ustáleného pohybu necelých 22 mm a při rychlosti proudění 4,5 m/s přibližně 0,6 mm. Jednalo se o simulace se shodným nastavením všech parametrů, kromě vstupní rychlosti proudění.

U dalších dvou tvarů bylo dynamické chování tělesa odlišné od kruhu a hlavním problémem při vyhodnocení byly nefyzikální hodnoty vztlakové síly při nárazech do hranice pohybu. Důvodem zavedení hranice pohybu byla snaha o omezení interakce vírových struktur se stěnou domény. Průběhy vztlakových sil musely být manuálně očištěny od zmiňovaných výkyvů, aby bylo možné další zpracování těchto dat. Maximální ustálená amplituda velkého množství případů pro průřezy ve tvaru čtverce nebo trojúhelníku vyšla právě 100 mm, což je hodnota zadané hranice pohybu. Proto je také obtížné vyvozovat bližší závěry, když přibližně 50 % úloh dosahuje maximální možné amplitudy výchyly. Ale je možné pozorovat, kdy dochází ke zlomu v dynamické odezvě, například u trojúhelníkového tvaru pro těleso o hmotnosti 4 kg a tuhosti pružiny 300 N/m je výchyly stále maximálních 100 mm, ale při hmotnosti 5 kg amplituda výchyly skokově klesá na 23 mm a s rostoucí hmotností výchyly dále klesá. To samé můžeme vidět u čtvercového tvaru, při tělese o hmotnosti 3 kg nemá vratná síla od pružiny o tuhosti 100 N/m dostatečnou velikost a těleso opět naráží do hranice pohybu. Ale při tuhosti 300 N/m a stejné hmotnosti amplituda výchyly klesá na necelých 70 mm a dále se snižuje s rostoucí tuhostí. Tyto trendy jsou pouze interpretací výsledků z numerických simulací na malém vzorku zkoumaných parametrů, a proto je důležité vždy tyto výsledky

srovnávat s matematickými modely daných fyzikálních jevů nebo nejlépe s vhodným experiment. K bližšímu pochopení celé problematiky by bylo zapotřebí stanovit kompletní charakteristiku systému.

Poslední zkoumaná veličina je možný výkon zařízení a je to také ta nejdůležitější pro další praktické využití. Při případném určení energetického potenciálu dané úlohy je možné říci, zda je hydrokinetický měnič energie na bázi VIV lukrativním alternativním zdroj elektrické energie pro zvolenou lokalitu. Výkon byl definován dvěma způsoby, zaprvé výkon hydrodynamických sil a zadruhé využitelný výkon tlumící síly. Stroj, který by měl hodnotu přidaného tlumení rovnou nule ($b = 0$), nemá z hlediska praktického energetického využití valný význam. Bez přidaného tlumení není totiž možné zužitkovat eventuální výkon zařízení. Výsledky těchto případů zachycují jakýsi potenciál hydrodynamických sil v dané konfiguraci. Využitelný výkon pak bere v potaz přímo hodnotu přidaného tlumení v souvislosti s rychlostí pohybu tělesa. Stále ale nebere v potaz účinnost el. zařízení, tudíž výsledný elektrický výkon by byl ještě nižší.

Dalších možností rozšíření výzkumu za pomoci numerických simulací v této oblasti je nepřeborné množství. Mezi ty důležitější rozhodně patří zkoumání vlivu Reynoldsova čísla na charakter kmitání pro všechny tvary a také simulace širšího intervalu hmotnosti tělesa, tuhosti pružiny a hlavně tlumení, které má přímý dopad na možný výkon zařízení. Jako další možnost se naskýtá uvolnění těles k rotaci kolem své osy. Ale za klíčové je vždy považováno podpoření numerických simulací experimentem, který může potvrdit nebo vyvrátit zjištěné skutečnosti.

Jelikož problematika energetického využití kmitavého pohybu těles vyvolaného prouděním kapaliny je poměrně aktuální téma, mohla by tato práce sloužit jako odrazový můstek pro další bádání a hlubší proniknutí do problémů, které zde zůstaly nezodpovězeny.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] RITCHIE, Hannah a Max ROSER. Energy. In: *OurWorldInData.org* [online]. Oxford, 2020 [cit. 2022-02-19]. Dostupné z: <https://ourworldindata.org/energy>
- [2] LOBO, Varun Michael. *Design of a vortex induced vibration based marine hydro-kinetic energy systemenergy system*. Rolla, USA, 2012. Diplomová práce. Missouri University of Science and Technology.
- [3] DERAKHSHANDEH, Javad Farrokhi. *Harnessing Hydrokinetic Energy from Vortex-Induced Vibration (VIV)*. Adelaide, Austrálie, 2015. Disertace. The University of Adelaide, School of Mechanical Engineering.
- [4] BREEZE, Paul. *Hydropower*. 2nd edition. London: Academic Press, 2018. ISBN 978-0-12-812906-7.
- [5] HEMING, Li a Philip REES. Population displacement in the Three Gorges Reservoir area of the Yangtze River, Central China: relocation policies and migrant views. *International Journal of Population Geography*. 2000, (6), 439-462. Dostupné z: [doi:10.1002/1099-1220\(200011/12\)6:6<439::AID-IJPG198>3.0.CO;2-L](https://doi.org/10.1002/1099-1220(200011/12)6:6<439::AID-IJPG198>3.0.CO;2-L)
- [6] YUCE, M. a Abdullah MURATOGLU. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2015, **43**, 72-82. ISSN 13640321. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2014.10.037](https://doi.org/10.1016/j.rser.2014.10.037)
- [7] IBRAHIM, W.I., M.R. MOHAMED, R.M.T.R. ISMAIL, P.K. LEUNG, W.W. XING a A.A. SHAH. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports*. 2021, **7**, 2021-2042. ISSN 23524847. Dostupné z: [doi:10.1016/j.egyr.2021.04.003](https://doi.org/10.1016/j.egyr.2021.04.003)
- [8] GÜNEY, M.S. a K. KAYGUSUZ. Hydrokinetic energy conversion systems: A technology status review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. 2010, **14**(9), 2996-3004. ISSN 13640321. Dostupné z: [doi:10.1016/j.rser.2010.06.016](https://doi.org/10.1016/j.rser.2010.06.016)
- [9] ROMERO-GOMEZ, Pedro a Marshall C. RICHMOND. Simulating blade-strike on fish passing through marine hydrokinetic turbines. *Renewable Energy*. 2014, **71**, 401-413. ISSN 09601481. Dostupné z: [doi:10.1016/j.renene.2014.05.051](https://doi.org/10.1016/j.renene.2014.05.051)
- [10] OE12. In: *OceanEnergy* [online]. USA, 2020 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://oceanenergy.ie/oe12/>
- [11] KUSHWAH, Sagarsingh. An Oscillating Water Column (OWC): The Wave Energy Converter. *Journal of The Institution of Engineers (India): Series C*. 2021, **102**(5), 1311-1317. ISSN 2250-0545. Dostupné z: [doi:10.1007/s40032-021-00730-7](https://doi.org/10.1007/s40032-021-00730-7)
- [12] Wave Dragon Overtopper. In: *Wave Dragon* [online]. Copenhagen, Denmark, 2018 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://www.wavedragon.net/>
- [13] HANSEN, Rico, Morten KRAMER a Enrique VIDAL. Discrete Displacement Hydraulic Power Take-Off System for the Wavestar Wave Energy Converter. *Energies*. 2013, **6**(8), 4001-4044. ISSN 1996-1073. Dostupné z: [doi:10.3390/en6084001](https://doi.org/10.3390/en6084001)
- [14] Pelamis Wave. In: *Pelamis Wave* [online]. Edinburgh, 2012 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <http://web.archive.org/web/20120823005907/http://www.pelamiswave.com/>

- [15] Pelamis Wave Power. In: *The European Marine Energy Centre Ltd* [online]. Orkney, GB: EMEC [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.emec.org.uk/about-us/wave-clients/pelamis-wave-power/>
- [16] Ocean Power Technologies. In: <https://oceanpowertechnologies.com/> [online]. New Jersey, USA [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://oceanpowertechnologies.com/>
- [17] SeaGen decommission. In: *SIMEC Atlantis Energy* [online]. Velká Británie, 2019 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://simecatlantis.com/2019/07/26/meygen-operational-update-3-2/>
- [18] SeaGen. In: *Power Technologies* [online]. Northern Ireland, UK, 2020 [cit. 2022-03-19]. Dostupné z: <https://www.power-technology.com/projects/strangford-lough/>
- [19] RivGen Power System. In: *Ocean Renewable Power Company* [online]. Portland, USA, 2015 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://www.orpc.co/our-solutions/scalable-grid-integrated-systems/rivgen-power-system>
- [20] BERNITSAS, Michael M., Kamaldev RAGHAVAN, Y. BEN-SIMON a E. M. H. GARCIA. VIVACE (Vortex Induced Vibration Aquatic Clean Energy): A New Concept in Generation of Clean and Renewable Energy From Fluid Flow. *Journal of Offshore Mechanics and Arctic Engineering*. 2008, **130**(4). ISSN 0892-7219. Dostupné z: doi:10.1115/1.2957913
- [21] Vortex Hydro Energy, Inc. In: *Vortex Hydro Energy* [online]. Ann Arbor (Michigan): Vortex Hydro Energy, Inc., 2013 [cit. 2022-02-07]. Dostupné z: <https://www.vortexhydroenergy.com/>
- [22] ANCHORDOQUI, Luis. Simple Harmonic Motion. In: *Luis Anchordoqui's WebPage* [online]. New York: Lehman College, 2021 [cit. 2023-02-25]. Dostupné z: <https://www.lehman.edu/faculty/anchordoqui/chapter23.pdf>
- [23] KRÁLOVÁ, Magda. Složené kmitání. In: *Eduportál Techmanie Science Center* [online]. Plzeň: Techmania Science Center o.p.s., 2007 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/kmitani/slozene-kmitani>
- [24] NAVE, Rod. Driven Oscillator. In: *HyperPhysics* [online]. Atlanta, USA: Georgia State University [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>
- [25] FOWLER, Michael. Oscillations III: Damped Driven Oscillator. In: *Michael Fowler's Lecture Notes Online* [online]. Charlottesville, USA: University of Virginia [cit. 2023-04-08]. Dostupné z: <https://galileo.phys.virginia.edu/classes/152.mfl1.spring02/Oscillations4.htm>
- [26] TIŠNOVSKÝ, Pavel. Nelineární dynamické systémy. In: *Pavel Tišnovský web* [online]. Brno: VUT FIT, 2000 [cit. 2023-02-26]. Dostupné z: http://www.fit.vutbr.cz/~tisnovpa/fract/clanky/2.htm#tth_chAp1
- [27] DUFFING, George a Ivana KOVACIC, ed., *Michael BRENNAN*. The Duffing equation: nonlinear oscillators and their behaviour. Chichester: John Wiley and sons, 2011. ISBN 978-0-470-71549-9.
- [28] IDOWU, B. A., U. E. VINCENT a A. N. NJAH. Generalized *Adaptive Backstepping Synchronization* for Non-Identical **Parametrically** Excited Systems.

- Nonlinear Analysis: Modelling and Control. 2009, 14(2), 165-176. ISSN 2335-8963. Dostupné z: doi:10.15388/NA.2009.14.2.14519
- [29] Old man water. In: *Drawings of Leonardo da Vinci* [online]. 2014 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <http://www.drawingsofleonardo.org/images/oldmanwater.jpg>
- [30] MELCER, Jozef a K. KOTRASOVA. Important moments in the history of structural aerodynamics. MATEC Web of Conferences. 2017, 107. ISSN 2261-236X. Dostupné z: doi:10.1051/mateconf/201710700074
- [31] Tacoma Narrows Bridge. In: University of Michigan [online]. Michigan, USA, 1999 [cit. 2022-03-20]. Dostupné z: <https://sites.lsa.umich.edu/ksmoore/research/tacoma-narrows-bridge/>
- [32] RASHIDI, Saman, Masoud HAYATDAVOODI a Javad Abolfazli ESFAHANI. *Vortex shedding suppression and wake control: A review. Ocean Engineering.* 2016, 126, 57-80. ISSN 00298018. Dostupné z: doi:10.1016/j.oceaneng.2016.08.031
- [33] DING, Lin, Qunfeng ZOU, Li ZHANG a Haibo WANG. Research on Flow-Induced Vibration and Energy Harvesting of Three Circular Cylinders with Roughness Strips in Tandem. *Energies.* 2018, 11(11). ISSN 1996-1073. Dostupné z: doi:10.3390/en11112977
- [34] LIENHARD, J.H. Synopsis of Lift, Drag, and Vortex Frequency Data for Rigid Circular Cylinders: Bulletin (Washington State University. College of Engineering. Research Division). Technical Extension Service, Washington State University, 1966. Dostupné také z: <https://books.google.cz/books?id=qSIQGgAACAAJ>
- [35] NORBERG, C. An experimental investigation of the flow around a circular cylinder: influence of aspect ratio. *Journal of Fluid Mechanics.* 1994, 258, 287-316. ISSN 0022-1120. Dostupné z: doi:10.1017/S0022112094003332
- [36] NORBERG, C. FLOW AROUND A CIRCULAR CYLINDER: ASPECTS OF FLUCTUATING LIFT. *Journal of Fluids and Structures.* 2001, 15(3-4), 459-469. ISSN 08899746. Dostupné z: doi:10.1006/jfls.2000.0367
- [37] CAI, C., Wei ZHANG a Serge MONTENS. Wind Effects on Long Span Bridges. In: . 2014, s. 535-556. ISBN 978-1-4398-5207-1.
- [38] The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid. *Proceedings of the Royal Society of London. Series A. Mathematical and Physical Sciences.* 1964, 277(1368), 51-75. ISSN 0080-4630. Dostupné z: doi:10.1098/rspa.1964.0005
- [39] KLAMO, Joseph Thomas. Effects of Damping and Reynolds Number on Vortex-Induced Vibrations. Pasadena, California, 2007. Disertace. California Institute of Technology.
- [40] WILLIAMSON, C.H.K. a A. ROSHKO. Vortex formation in the wake of an oscillating cylinder. *Journal of Fluids and Structures.* 1988, 2(4), 355-381. ISSN 08899746. Dostupné z: doi:10.1016/S0889-9746(88)90058-8
- [41] ANSYS FLUENT 12.0/12.1 Documentation. In: *ENEA Neptunius* [online]. ANSYS, Inc., 2009 [cit. 2023-04-01]. Dostupné z: <https://www.afs.enea.it/project/neptunius/docs/fluent/index.htm>
- [42] DING, Lin, Li ZHANG, Chunmei WU, Xinru MAO a Deyi JIANG. Flow induced motion and energy harvesting of bluff bodies with different cross sections.

Energy Conversion and Management. 2015, 91, 416-426. ISSN 01968904.
Dostupné z: doi:10.1016/j.enconman.2014.12.039

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
<i>FIO</i>	Flow induced oscillations	-
<i>VIV</i>	Vortex induced vibrations	-
<i>VIVACE</i>	Vortex Induced Vibrations Aquatic Clean Energy	-
<i>FIV</i>	Flow induced vibrations	-
<i>WIV</i>	Wake induced vibrations	-
<i>6DOF</i>	6 degree of freedom	-
<i>UDF</i>	User defined function	-
<i>RMS</i>	Root mean square	-
<i>A</i>	Amplituda výchylky	m
<i>T</i>	Perioda	s
<i>t</i>	Čas	s
<i>f</i>	Frekvence	Hz
ω_0	Úhlová frekvence	Hz
<i>y</i>	Výchylka ve směru y	m
\dot{y}	Rychlost ve směru y	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
\ddot{y}	Zrychlení ve směru y	$\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$
<i>k</i>	Tuhost pružiny	N/m
l_{rov}	Délka pružiny v klidu	m
F_k	Vratná síla od pružiny	N
x_0	Poloha kostky při natažení ve směru x	m
<i>x</i>	Poloha ve směru x	m
$v_{x,0}$	Počáteční rychlost ve směru x	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
v_x	Rychlost ve směru x	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>m</i>	Hmotnost tělesa	kg
<i>C</i>	Konstanta	-
<i>D</i>	Konstanta	-
ω	Frekvence působící síly	Hz
F_b	Tlumící síla	N
<i>b</i>	Tlumení	$\text{kg} \cdot \text{s}^{-1}$
δ	Koeficient útlumu	s^{-1}
ω'	Vlastní frekvence tlumených kmitů	Hz
Re	Reynoldsovo číslo	-
<i>u</i>	Rychlost volného proudění kapaliny	$\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$
<i>D</i>	Průměr obtékaného tělesa	m
ν	Kinematická viskozita	$\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$
St	Strouhalovo číslo	-
f_{St}	Strouhalova frekvence odtrhávání vírů	Hz

F_x	Odporová síla	N
F_y	Vztlaková síla	N
C_D	Odporový koeficient	-
C_L	Vztlakový koeficient	-
λ	Vlnová délka	m
h_{ideal}	Ideální výška buňky	m
h_{min}	Minimální výška buňky	m
α_s	Rozdělovací faktor	-
α_c	Faktor kolapsu vrstvy	-
ρ	Hustota	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-3}$
η	Dynamická viskozita	$\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$
Δt	Velikost časového kroku	s
Δs	Délka nejmenší buňky	m
P_{HD}	Výkon hydrodynamických sil	W
P_{tl}	Využitelný výkon	W

SEZNAM PŘÍLOH

- 1 C kód – UDF pro pohyb tělesa

PŘÍLOHY

1 C kód – UDF pro pohyb tělesa

Ukázka kódu pro uživatelsky definovanou funkci, pro další úlohy byla přepisována hodnota *real spring_constant* a *real damping_constant*.

```
#include "udf.h"
#include "stdio.h"
#include "stdlib.h"
#include "math.h"
#include "dynamesh_tools.h"
#include "storage.h"
DEFINE_SDOF_PROPERTIES(DOF, prop, dt, time, dtime)
{
    real F_total;
    real NV_VEC(yy);
    real NV_VEC(vy);
    real A[ND_ND];
    real pin_movement_y;
    real original_pin_cg_y = 0.0;
    real spring_constant = 300.0;
    real damping_constant = 40.0;
    yy[1] = DT_CG(dt)[1];
    vy[1] = DT_VEL_CG(dt)[1];
    float DEPTH = 1;
    float MASS = 3;
    prop[SDOF_MASS] = MASS;
        prop[SDOF_ZERO_TRANS_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Y] = FALSE;
    prop[SDOF_ZERO_TRANS_Z] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_X] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_Y] = TRUE;
    prop[SDOF_ZERO_ROT_Z] = TRUE;
    pin_movement_y = DT_CG(dt)[1] - original_pin_cg_y;
    F_total = - spring_constant * pin_movement_y - damping_constant * vy[1];
    prop[SDOF_LOAD_F_Y] = F_total;
}
```