



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ENERGETICKÝ ÚSTAV

ENERGY INSTITUTE

ZISK ENERGIE NA KMITAJÍCÍM TĚLESE V PROUDU TEKUTINY

ENERGY HARVESTING FROM OSCILLATING BODY IN A FLUID FLOW

DIPLOMOVÁ PRÁCE

MASTER'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Bc. Kamil Slowiaczek

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.

BRNO 2024

Zadání diplomové práce

Ústav: Energetický ústav
Student: **Bc. Kamil Slowiaczek**
Studijní program: Energetické a termofluidní inženýrství
Studijní obor: Fluidní inženýrství
Vedoucí práce: **doc. Ing. Vladimír Habán, Ph.D.**
Akademický rok: 2023/24

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:

Zisk energie na kmitajícím tělese v proudu tekutiny

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Diplomová práce bude zaměřena na zisk energie z kmitání tělesa v proudu tekutiny s volnou hladinou. Záměrem diplomové práce bude pomocí CFD modelování stanovit přenos energie mezi kmitajícím tělesem a tekutinou. Navrhnout experimentální zařízení umožňující sledování kmitání tělesa buzeného tokem tekutiny, případně vyhodnotit naměřená data.

Cíle diplomové práce:

1. Modelování silového působení tekoucí kapaliny na kmitající těleso.
2. Stanovení přenášeného výkonu mezi tekutinou a kmitajícím tělesem, stabilita kmitání.
3. Návrh a dle možností laboratoře vyhodnocení experimentu.
4. Základní návrh a rozbor kmitání tělesa a možnosti získávání energie z kmitajícího tělesa.

Seznam doporučené literatury:

RAGHAVAN, K.: Energy Extraction from a Steady Flow Using Vortex Induced Vibration. 2007. PhD Thesis.

Derksen, A.: Numerical simulation of a forced and freely-vibrating cylinder at supercritical Reynolds numbers, MS thesis, TU Delft and Siemens, Delft, the Netherlands, 2019

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2023/24

V Brně, dne

L. S.

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

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

ABSTRAKT

V této práci jsou prováděny numerické simulace obtékaného válce, kterému je předepsán harmonický pohyb. K rozpořybování válce je využita dynamická síť a pohyb je definován pomocí UDF (uživatелеm definovaná funkce). Je zkoumán vliv amplitudy výchylky a frekvence pohybu na výkon zařízení. Dále jsou vyhodnocovány přídavné účinky od kapaliny působící na těleso. Nakonec je popsán experiment sloužící k validaci simulací.

Klíčová slova

Hydrokinetická energie, vibrace indukované prouděním, výpočtové modelování proudění, činný a jalový výkon, Kármánova vírová stezka, přídavné účinky

ABSTRACT

In this thesis, numerical simulations of a flow around a cylinder with prescribed harmonic motion are conducted. To set the cylinder in motion, a dynamic mesh is utilized, and the movement is defined using a UDF (User-Defined Function). The influence of the amplitude of displacement and the frequency of motion on the device's performance is examined. Additionally, the additional effects of the fluid acting on the body are evaluated. Finally, an experiment designed to validate the simulations is described.

Key words

Hydrokinetic energy, flow induced vibrations, computational fluid dynamics, active and reactive power, Kármán vortex street, additional effects

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

SLOWIACZEK, Kamil. *Zisk energie na kmitajícím tělese v proudu tekutiny* [online]. Brno, 2024 [cit. 2024-05-05]. Dostupné z: <https://www.vut.cz/studenti/zav-prace/detail/158178>. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Energetický ústav. Vedoucí práce Vladimír Habán.

PROHLÁŠENÍ

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci na téma Zisk energie na kmitajícím tělese v proudu tekutiny vypracoval samostatně s využitím uvedené literatury a podkladů, na základě konzultací a pod vedením vedoucího práce.

Brno 24.5.2024

Kamil Slowiaczek

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji tímto doc. Ing. Vladimíru Habánovi, Ph.D. za cenné připomínky a rady, které mi poskytl při vypracování diplomové práce a také za jeho velkou ochotu a trpělivost. Dále bych chtěl poděkovat rodině a všem přátelům, kteří mě během studia podporovali.

OBSAH

ÚVOD	9
1 Možnosti využití hydrokinetické energie	10
1.1 Systémy s turbínou	10
1.2 Bezturbínové systémy	12
2 Kmitání	15
2.1 Lineární oscilátory	15
2.1.1 Netlumené kmitání	16
2.1.2 Vynucené netlumené kmitání	18
2.1.3 Tlumené kmitání	18
2.1.4 Rezonance	19
2.2 Nelineární oscilátory	20
2.2.1 Duffingův oscilátor	20
2.2.2 Van der Polův oscilátor	21
3 Vibrace indukované víry	23
3.1 Lock-in fenomén	24
3.2 Síla působící na těleso	26
4 CFD simulace	27
4.1 Geometrie	27
4.2 Výpočetní síť	27
4.3 Dynamická síť	29
4.4 Nastavení řešiče	30
4.5 Vyhodnocení výkonu	31
5 Výsledky	35
5.1 Výsledné výkony	36
5.2 Shrnutí výsledků	43
6 Přídavné účinky	46
6.1 Zhodnocení	53
7 Experiment	55
ZÁVĚR	57
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ	59
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	63
SEZNAM PŘÍLOH	66
PŘÍLOHY	67

ÚVOD

V současné době je kladen velký důraz na obnovitelné a uhlíkově neutrální zdroje energie. Jedním z dosud málo využívaných a volně dostupných zdrojů je hydrokinetická energie. Princip spočívá ve využití kinetické energie proudící kapaliny. Konkrétně tato práce se zabývá získkem energie z tělesa, které je rozkmitáno vlivem proudící kapaliny. Obtékání tělesa kapalinou má za následek, že za ním začnou vznikat víry, díky kterým dojde k periodickému působení síly na těleso. Tato síla pak těleso rozkmitává. Tímto způsobem a mnoha dalšími způsoby získávání čisté, dosud ne tolik využívané energie se zabývá *energy harvesting*.

První tři kapitoly budou věnovány rešerši. Konkrétně budou popsány možnosti využití hydrokinetické energie, lineární a nelineární oscilátory, a nakonec význam vibrací, které jsou indukovány víry.

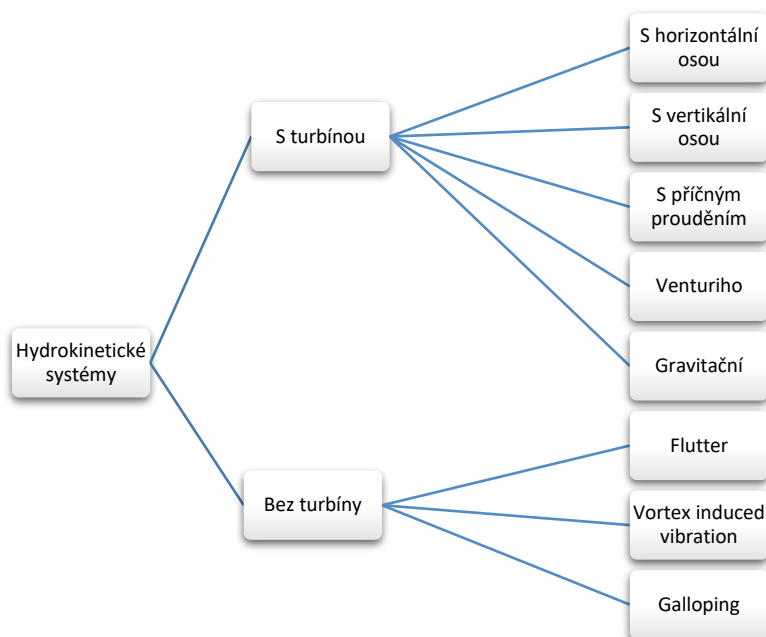
Další kapitoly se budou věnovat praktické části. Hlavním cílem bude provést numerické simulace v softwaru Ansys Fluent za využití dynamické sítě. Cílem bude stanovit silové účinky na obtékané válcové těleso, kterému bude předepsán harmonický pohyb. Měněnými parametry budou amplituda výchylky a frekvence pohybu tělesa. Simulace budou provedeny ve 2D. Pak budou vyhodnoceny činné a jalové výkony systému v závislosti na frekvenci pohybu a amplitudě výchylky. Cílem bude určit takovou amplitudu a frekvenci, při kterých bude činný výkon největší. Poté bude vytvořen bezrozměrný graf shrnující všechny výsledky. Nakonec budou vyhodnoceny přídavné účinky, které by měly sloužit jako podklad k realizaci experimentu. Poslední kapitola bude věnována experimentu. Bude popsána měřící trať a způsob realizace experimentu.

Výsledky této práce by měly ukázat závislost činných a jalových výkonů na frekvenci a amplitudě výchylky kmitajícího tělesa, čímž by měly přispět k větší efektivitě využívání kmitajícího tělesa v kapalině jakožto zdroje energie k výrobě elektřiny. Dále také tato práce může posloužit jako podklad nebo inspirace k dalšímu výzkumu v oblasti *energy harvesting*.

1 MOŽNOSTI VYUŽITÍ HYDROKINETICKÉ ENERGIE

Faktory jako jsou vysoké emise CO₂, vyčerpávání fosilních paliv, globální oteplování, znečištění životního prostředí atd..., motivují k čím dál tím většímu využívání obnovitelných a ekologických zdrojů energie. Mezi obnovitelné zdroje energie se může řadit větrná energie, solární fotovoltaika, vodní energie, geotermální energie a bioenergie. Každý z těchto vyjmenovaných zdrojů má své omezení. U větrné a solární energie je hlavní nevýhodou jejich nepravidelnost. Vodní a geotermální energie zase vyžadují specifické geologické podmínky a také vyšší investiční náklady. Bioenergie zahrnuje složité a pokročilé procesy při přeměně energie. [1]

Hydrokinetické systémy jsou založeny na využití energie například volně tekoucího vodního toku. Tímto způsobem lze získat čistý, bezpečný a udržitelný zdroj energie, který je vhodný zejména v odlehlých oblastech bez přístupu k síti. Hydrokinetický systém je tedy elektromechanické zařízení přeměňující energii proudění vody na elektrickou energii. Množství získané elektrické energie je poměrně malé, ale existují způsoby, jak jej navýšit. Mezi hlavní výhody hydrokinetických systému patří jejich jednoduchost (jsou založeny na volně tekoucí kapalině bez nutnosti nádrže nebo jímky), snadná přeprava a poměrně malé rozměry. I přes tyto výhody je stále zapotřebí výzkum nutný k jejich celkovému zdokonalení. Na obrázku 1 je zobrazeno jedno z možných dělení hydrokinetických systémů. [1]

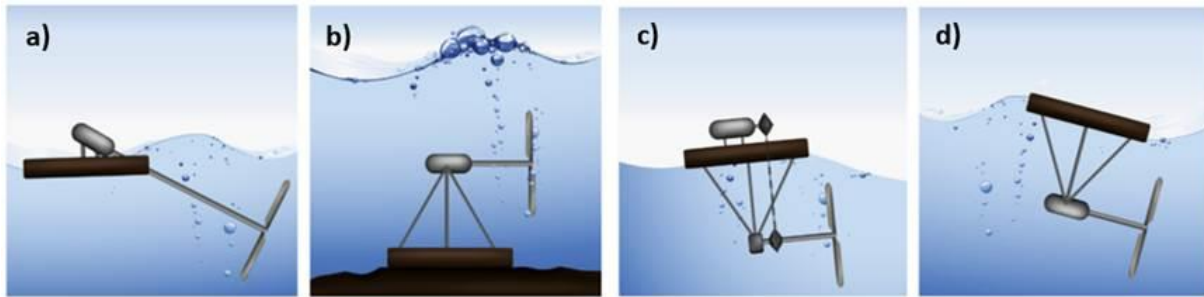


Obrázek 1 Dělení hydrokinetických systémů (upraveno) [1]

1.1 Systémy s turbínou

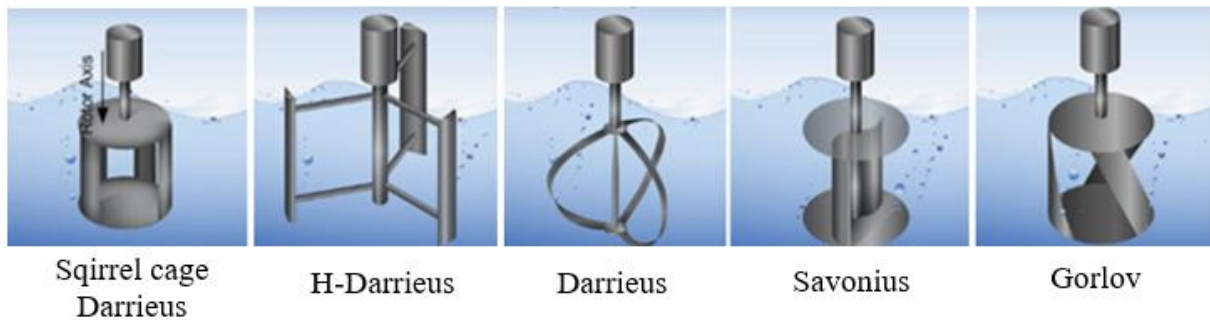
Jak lze vidět na obrázku 1, konfigurace s turbínou se dále dají dělit na turbíny s horizontální a vertikální osou a na turbíny s příčným prouděním. [1]

Turbíny s horizontální osou neboli axiální mají osu rotace rovnoběžnou, nebo nakloněnou vůči hladině proudící tekutiny. Využívají se vrtulová oběžná kola. Jejich výhodou je schopnost samorozběhu v pomalém proudu, ale jejich výrobní náklady bývají vyšší. Obrázek 2 zobrazuje turbíny s horizontální osou při různých natočeních jejich rotoru vůči hladině. Turbína s nakloněným hřídelem (obrázek 2a) se využívá většinou v menších řekách, zatímco ostatní typy se používají hlavně pro získání energie z oceánu. [1] [2]



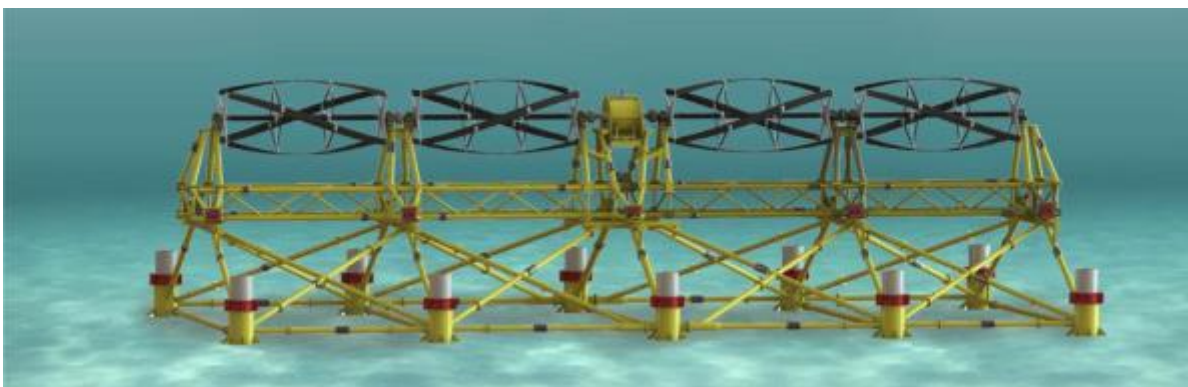
Obrázek 2 Hydrokinetické turbíny s horizontální osou, a) nakloněná osa, b) pevně zakotvená, c) neponořený generátor, d) ponořený generátor (upraveno) [2]

Turbíny s vertikální osou rotace jsou běžně používané k získání energie v řekách. Tyto turbíny mají osu rotace kolmou na hladinu. Bývají tišší a mechanicky jednodušší, protože není nutná ozubená spojka. Princip spočívá v přeměně kinetické energie vody na rotační energii turbíny vlivem proudu protékajícího přes lopatky. Existuje několik typů turbín s vertikální osou, které se liší konstrukcí lopatek. Jedná se o *Squirrel cage Darrieus*, *H-Darrieus*, *Darrieus*, *Savonius*, *Gorlov* a další. Obrázek 3 zobrazuje zmíněné typy turbín s vertikální osou. [1] [2]



Obrázek 3 Typy turbín s vertikální osou (upraveno) [1]

Hydrokinetické turbíny s příčným prouděním mají osu rotoru kolmou na proudění vody a souběžnou s hladinou vody. Jsou vhodnější pro hydrokinetické farmy, protože zabírají méně prostoru a výstupní výkon lze jednoduše zvýšit zvětšením jejich plochy. Provoz probíhá při nižších otáčkách, což má za následek menší náchylnost ke kavitaci a také snížení hluku. Na obrázku 4 je konkrétní případ turbíny s příčným prouděním od společnosti *Ocean renewable power company*. [1]

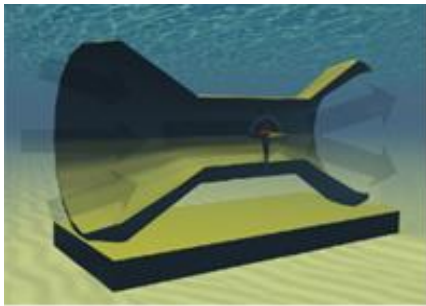


Obrázek 4 Turbína s příčným prouděním [1]

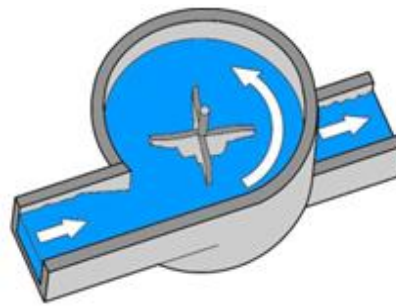
Venturiho turbínu (obrázek 5) je možno použít i při nízké rychlosti proudění a v malých hloubkách. Jedná se o konfuzor, ve kterém se zvýší rychlost proudění a klesne tlak. Do nejužšího bodu je umístěna turbína, za níž následuje difuzor. Vzhledem k poklesu tlaku

a zvýšené rychlosti v zúžení by mohlo docházet ke kavitaci, proto je využití této turbíny vhodné hlavně pro nízké rychlosti proudění. [1]

Při malém spádu může být použita gravitační turbína (obrázek 6). Tato turbína se obvykle skládá ze vstupního kanálu, kruhové nádrže s výtokem na dně (obvykle ve středu dna), turbíny se svislou hřídelí napojenou na generátor elektřiny a výtokového kanálu. Princip spočívá ve využití přirozené energie proudění vody k vytvoření povrchového víru způsobeného Coriolisovou silou. Vířivost se zvyšuje směrem ke dnu nádrže, což také zvyšuje cirkulaci vody a způsobuje pokles tlaku pod atmosférický. Energie víru je přeměňována na mechanickou pomocí turbíny. [3]



Obrázek 5 Venturiho turbína [1]

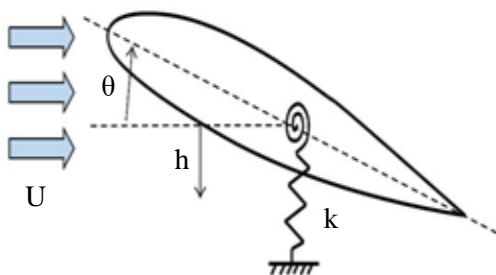


Obrázek 6 Gravitační turbína [1]

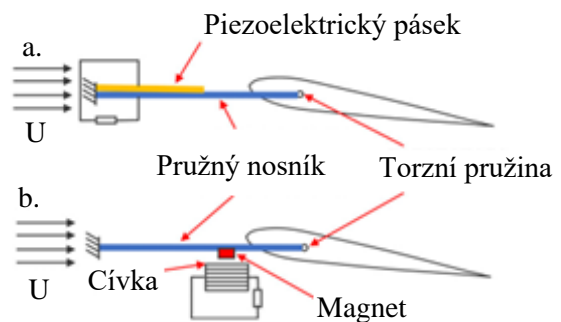
1.2 Bezturbínové systémy

V případě bezturbínových systémů se využívá kmitání obtékaného tělesa způsobeného prouděním tekutiny kolem něj. Jak je vidět na obrázku 1, jedná se o pohyb zvaný *flutter*, víry buzené vibrace (*VIV* – *vortex induced vibration*) a *galloping*. Souhrnně se tyto mechanismy pohybu dají nazvat jako tokem buzené oscilace (*FIO* – *flow induced oscillation*). [4]

Flutter je kontinuální, neklesající a samobuzená oscilace s rychle rostoucími amplitudami, ke které dochází při interakci elastické, aerodynamické a setrvačné síly, když se pružné těleso pohybuje v proudu tekutiny. Nejběžnější případ *flutteru* je třepetající se křídlo při letu letadla. Připojením třepetajícího se profilu na buď piezoelektrický materiál, nebo elektromagnetický mechanismus je možné jeho aeroelastickou energii přeměnit na elektrickou. Na obrázku 7 je schematicky zobrazen typický sběrač energie založený na *flutteru* (*FEH* – *flutter-based energy harvester*) ve tvaru křídla. Tento FEH má 2 stupně volnosti vibrací, a to sice výšku h a úhel θ . Na obrázku 8a je křídlo připojené na piezoelektrický materiál a na obrázku 8b na elektromechanický mechanismus. Nejčastěji se FEH používá v proudu vzduchu, ale je možné jej použít i ve vodě. [4] [5] [6]



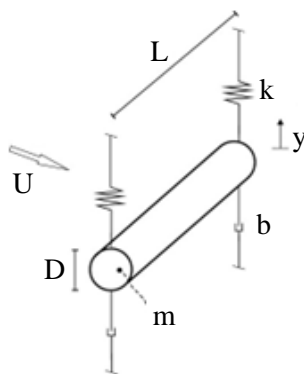
Obrázek 7 Schéma FEH (upraveno) [4]



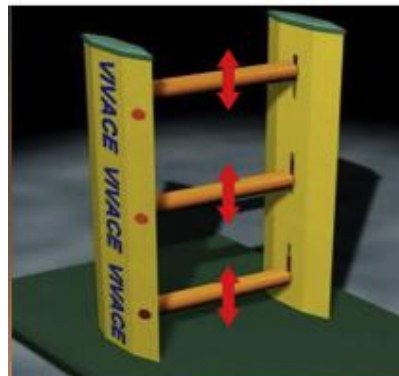
Obrázek 8 Připojení FEH (upraveno) [5]

VIV je jev, který vzniká při interakci tělesa a proudu kapaliny. Nastává, když začne docházet k periodickému odtrhávání vírů v úplavu za tělesem (Kármánova vírová stezka), čímž na toto těleso začne působit periodická síla, která ho rozkmitá. V důsledku VIV dochází k přeměně energie proudící tekutiny na mechanickou energii pružně uloženého tělesa. Vibrace indukované víry budou podrobněji rozebrány v třetí kapitole. Přidáním zařízení, které je schopno mechanickou energii přeměnit na elektrickou lze VIV využít k zisku energie. Nejčastěji se k zisku elektrické energie pomocí VIV využívá piezoelektrických materiálů. [7] [8]

Příklad zařízení, které VIV využívá je systém zvaný VIVACE (*vortex induced vibration aquatic clean energy*). Tento systém vyvinul Michael M. Bernitsas a jeho výzkumný asistent Kamaldev Raghavan na univerzitě v Michiganu [9]. Celý systém je založený na válci uloženém na pružinách, na který proudí kapalina rychlostí U , jak lze vidět na obrázku 9. Výkon systému VIVACE je možno řídit hmotnostním poměrem (bezrozměrné číslo vyjadřující poměr střední hustoty tělesa ku hustotě okolní tekutiny), mechanickým tlumením b , rychlostí proudění U , poměrem L/D a Reynoldsovým číslem. Obrázek 10 zobrazuje konkrétní příklad VIVACE systému s třemi válci nad sebou. [7] [8]

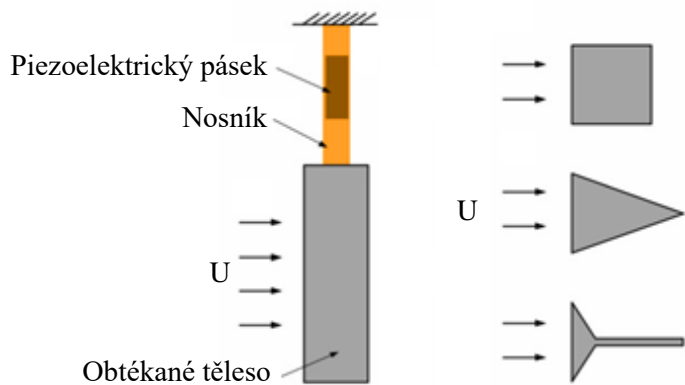


Obrázek 9 Model VIVACE (upraveno) [7]



Obrázek 10 Konkrétní příklad VIVACE [10]

Podobně jako VIV i *galloping* je jev, který vzniká při interakci proudící tekutiny s tělesem. Hlavní rozdíl mezi nimi je, že při VIV se většinou jedná o vibrace s malými amplitudami a vyššími frekvencemi, zatímco *galloping* se vyznačuje nižšími frekvencemi a většími amplitudami. Další rozdíl spočívá v tom, že u VIV se maximální amplituda objevuje jen v určitém rozmezí rychlostí kvůli *lock-in* fenoménu, který bude rozebrán později. V případě *gallopingu* amplituda většinou plynule roste s rychlostí. Pro získávání energie jsou vyšší amplitudy vhodnější. Jak VIV, tak *galloping* vznikají současně a vzájemně se ovlivňují. Ke zkoumání VIV je nejvhodnější těleso kruhového průřezu, zatímco pro *galloping* jsou vhodnější tělesa nekruhového průřezu, jako například čtverec, trojúhelník, obdélník atd.... Na obrázku 11 je zobrazen příklad sběrače energie založeného na *gallopingu* s možnými tvary obtékaného tělesa. [11] [12] [13]



a. Piezoelektrický sběrač energie b. Možné tvary tělesa

Obrázek 11 Schéma sběrače energie založeného na *gallopingu* (upraveno) [11]

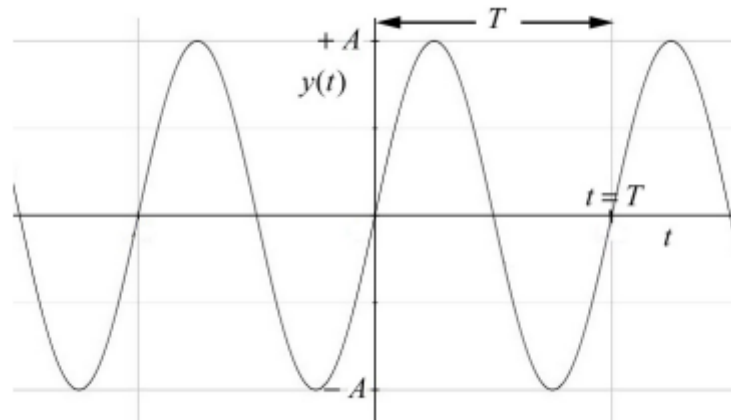
2 KMITÁNÍ

K popisu kmitání se vychází z rovnic pro jednoduchý harmonický pohyb. Jedná se o pohyb, při kterém se jedna z fyzikálních veličin periodicky mění. Je možno předpokládat funkci ve tvaru: [14]

$$y(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) \quad (2.1)$$

kde A je maximální hodnota amplitudy, t je čas a T je perioda pohybu.

Jelikož sinus nabývá hodnot od -1 do +1, funkce proto osciluje mezi hodnotami $-A$ a $+A$. Díky periodicitě sinu hodnota v čase t bude totožná jako hodnota v čase $t' = t + T$. Následující obrázek zobrazuje průběh funkce sinus v čase.



Obrázek 12 Průběh funkce sinus [14]

Dále lze definovat frekvenci pohybu f a vlastní úhlovou rychlost ω_0 jako:

$$f = \frac{1}{T} \quad (2.2)$$

$$\omega_0 = \frac{2\pi}{T} = 2\pi \cdot f \quad (2.3)$$

Zavedením frekvence a úhlové rychlosti je možné získat další matematické formulace harmonického pohybu:

$$y(t) = A \cdot \sin\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) = A \cdot \sin(2\pi \cdot f \cdot t) = A \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (2.4)$$

2.1 Lineární oscilátory

V případě lineárních oscilací se předpokládá, že diferenciální rovnice jsou pouze lineární. Toto platí, pokud jsou amplitudy oscilace malé, takže vratná síla se řídí Hookovým zákonem a má tvar uvedený v rovnici 2.8. Dalším důležitým předpokladem je, že platí princip superpozice, což znamená, že pokud je výchylka hmotného bodu popsána dvěma harmonickými funkcemi, výsledný průběh bude součtem těchto funkcí. Toto se dá matematicky zapsat jako: [15] [16]

$$y_1(t) = A_1 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.5)$$

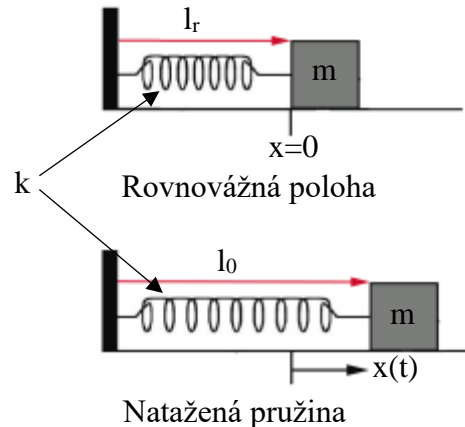
$$y_2(t) = A_2 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.6)$$

Kde y_1 a y_2 jsou funkce popisující výchylku a A_1 a A_2 jsou amplitudy těchto funkcí. Využitím principu superpozice se pak dá výsledný průběh výchylky vyjádřit jako: [16]

$$y(t) = y_1(t) + y_2(t) \quad (2.7)$$

2.1.1 Netlumené kmitání

Nejjednodušší případ netlumeného kmitání je těleso připevněné na pružině, ležící na povrchu bez tření zobrazeno na obrázku 13.



Obrázek 13 Schéma uspořádání (upraveno) [14]

Jak je patrné z obrázku 13, kostka je připevněna k pružině a druhý konec pružiny je upevněn ke stěně. Předpokládá se jednorozměrný pohyb kostky, konstantní tuhost pružiny k a její délka l_r v rovnovážné poloze. Je zvolen kladný směr pohybu vpravo, což znamená, že pokud $x > 0$ pružina se natahuje a jakmile $x < 0$ pružina se stlačuje. Síla působící na pružinu je lineární, vratná a definována jako [14]:

$$F_k = -k \cdot x \quad (2.8)$$

Počáteční podmínky jsou následující: pružina je natažena na délku l_0 a kostce je udělena počáteční rychlost v_0 směrem doprava od rovnovážné polohy. Poté platí že, počáteční poloha je dána rozdílem délek pružiny $x_0 = (l_0 - l_r) > 0$ a počáteční rychlost v ose x je $v_{x,0} = v_0 > 0$. Nyní je možno zapsat druhý Newtonův zákon v ose x : [14]

$$-k \cdot x = m \cdot \frac{d^2 x}{dt^2} \quad (2.9)$$

Rovnice 2.9 se nazývá pohybová rovnice netlumeného kmitání. Jedná se o lineární diferenciální rovnici druhého řádu. Konstanta k představuje tuhost pružiny a m je hmotnost tělesa připevněného k pružině. K řešení této rovnice je možné využít mnoha metod, ovšem nejjednodušší je odhadnout řešení a následně odhad ověřit. Může být uvažováno řešení ve tvaru: [14]

$$x(t) = A \cdot \cos\left(\frac{2\pi \cdot t}{T}\right) = A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (2.10)$$

Nyní lze dosadit $x(t)$ a druhou derivaci $x(t)$ podle času do rovnice 2.9:

$$-\omega_0^2 \cdot A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) = -\frac{k}{m} \cdot A \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (2.11)$$

Tato rovnice platí za předpokladu že: [14]

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (2.12)$$

Perioda oscilace je pak:

$$T = \frac{2\pi}{\omega_0} = 2\pi \cdot \sqrt{\frac{m}{k}} \quad (2.13)$$

Poté má řešení tvar:

$$x(t) = A \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad (2.14)$$

Rychlost lze získat derivací rovnice 2.14 podle času:

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = -\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad (2.15)$$

Rovnice 2.14 však nesplňuje uvedené počáteční podmínky, proto tento odhad nebyl přesný. Jako další odhad by bylo možné místo kosinu uvažovat sinus: [14]

$$x(t) = A \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad (2.16)$$

Ovšem ani tímto odhadem by nebyly splněny počáteční podmínky. Obecné řešení pohybové rovnice pro netlumené kmitání tedy bude lineární kombinací sinu a kosinu. Obecné řešení má pak tvar: [14]

$$x(t) = C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + E \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) \quad (2.17)$$

Konstanty C a E závisí na počátečních podmínkách. Aby je bylo možné učit je třeba znát rychlost tělesa, která se vyjádří jednoduše jako derivace rovnice 2.17 podle času: [14]

$$v_x(t) = \frac{dx(t)}{dt} = -\omega_0 \cdot C \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \omega_0 \cdot E \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) \quad (2.18)$$

Pro vyčíslení konstant C a E je třeba uvažovat počáteční stav, takže dosadit do rovnic 2.17 a 2.18 nulový čas, tedy $t=0$. Tímto se získá počáteční poloha a rychlost: [14]

$$x(t=0) = x_0 = C \quad (2.19)$$

$$v(t=0) = v_{x,0} = -\omega_0 \cdot C \cdot \sin(0) + \omega_0 \cdot E \cdot \cos(0) \quad (2.20)$$

Konstanty C a E se pak rovnají:

$$C = x_0 \quad (2.21)$$

$$E = \frac{v_{x,0}}{\omega_0} \quad (2.22)$$

Dosazením konstant C a E do rovnic 2.17 a 2.18 získáváme finální vztahy pro polohu a rychlost tělesa při netlumeném kmitání:

$$x(t) = x_0 \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) + \frac{v_{x,0}}{\sqrt{\frac{k}{m}}} \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad (2.23)$$

$$v_x(t) = -\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot x_0 \cdot \sin\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) + v_{x,0} \cdot \cos\left(\sqrt{\frac{k}{m}} \cdot t\right) \quad (2.24)$$

2.1.2 Vynucené netlumené kmitání

Odvození netlumeného vynuceného kmitání je velice podobné jako u vlastního netlumeného, které bylo rozebráno v předchozí kapitole. Jediný rozdíl spočívá v tom, že by na těleso začala působit harmonická síla. Budeme předpokládat buzení ve tvaru:

$$F = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.25)$$

Kde F_0 představuje amplitudu budící síly a ω je její úhlová frekvence. Dostáváme poté pohybovou rovnici ve tvaru:

$$m \cdot \frac{d^2x}{dt^2} + k \cdot x = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.26)$$

Obecné řešení je součtem vlastního kmitání systému s úhlovou rychlostí ω_0 a kmitání vlivem budící síly s úhlovou rychlostí ω : [14] [17] [18]

$$x(t) = C \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + E \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{F_0}{m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.27)$$

$$v_x(t) = -\omega_0 \cdot C \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \omega_0 \cdot E \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \frac{F_0}{m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.28)$$

Pro dopočítání konstant C a E je třeba opět využít počátečních podmínek, tedy: $x(t=0)=0$ a $v_x(t=0)=0$. Dosazením těchto počátečních podmínek do rovnic 2.27 a 2.28 dostaneme: [14]

$$C = 0 \quad (2.29)$$

$$E = \frac{F_0}{\omega_0 \cdot m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \omega \quad (2.30)$$

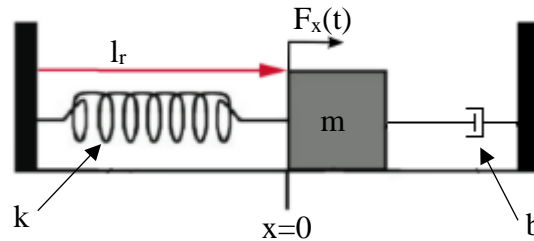
Dostaneme tedy konečné vztahy pro polohu a rychlost tělesa při netlumeném vynuceném kmitání:

$$x(t) = \frac{F_0}{\omega_0 \cdot m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \omega \cdot \sin(\omega_0 \cdot t) + \frac{F_0}{m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.31)$$

$$v_x(t) = \omega_0 \cdot \frac{F_0}{\omega_0 \cdot m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \omega \cdot \cos(\omega_0 \cdot t) + \frac{F_0}{m \cdot (\omega_0^2 + \omega^2)} \cdot \omega \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (2.32)$$

2.1.3 Tlumené kmitání

Jelikož se tato práce zabývá získkem energie z oscilujícího tělesa, a to je realizováno skrze přidavné tlumení, je potřeba zavést tlumení i do pohybové rovnice kmitání. Budeme uvažovat těleso připevněné k pružině o konstantní tuhosti k , a navíc do soustavy ještě přibude tlumič s tlumením b , které se odvíjí od vlastností tlumiče. Schéma uvažované soustavy je zobrazeno na obrázku 14. [14]



Obrázek 14 Schéma soustavy s tlumičem (upraveno) [14]

Tlumič brání pohybu tělesa díky viskózním silám, které vznikají, když se předmět pohybuje v kapalině. Rychlost pohybu předmětu je dostatečně malá, tudíž nevzniká turbulence. Tlumící síla působí proti pohybu tělesa a je úměrná jeho rychlosti a tlumení: [14]

$$F_b = -b \cdot v = -b \cdot \frac{dx}{dt} \quad (2.33)$$

Nyní můžeme zapsat druhý Newtonův zákon v ose x :

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = 0 \quad (2.34)$$

Podle velikosti tlumení b lze tlumené kmitání rozdělit na: [19]

- Podkritické: $b^2 < 4km$
- Kritické: $b^2 = 4km$
- Nadkritické: $b^2 > 4km$

V případě kritického a nadkritického tlumení vůbec nedojde ke kmitání a dojde pouze k aperiodickému pohybu. Pro zjištění vlastní úhlové rychlosti tlumeného kmitání je třeba zavést koeficient útlumu: [14]

$$\alpha_u = \frac{b}{2m} \quad (2.35)$$

Vlastní frekvence tlumených kmitů se pak počítá podle vzorce: [14]

$$\omega' = \sqrt{(\omega_0^2 - \alpha_u^2)} \quad (2.36)$$

Rovnice 2.34 je pohybová rovnice tlumeného vlastního kmitání. Pokud bychom uvažovali vynucené tlumené kmitání je třeba do rovnice zavést buzení, které je možno uvažovat ve tvaru:

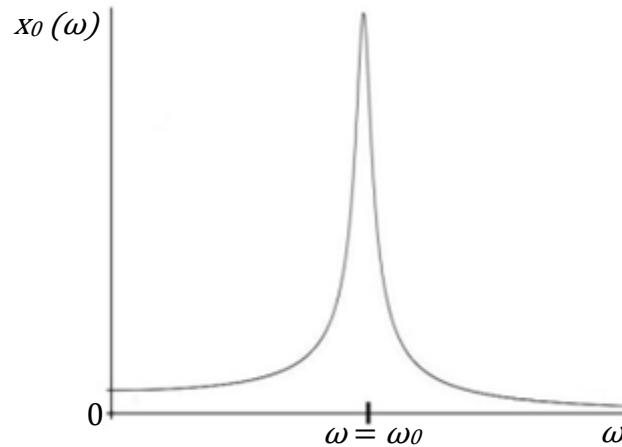
$$F = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.37)$$

Pak by rovnice pro vynucené tlumené kmitání vypadala následovně:

$$m \frac{d^2x}{dt^2} + b \frac{dx}{dt} + kx = F_0 \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.38)$$

2.1.4 Rezonance

Jedná se o jev, kdy se vlastní frekvence systému ω_0 a frekvence budící síly ω rovnají, nebo jsou velmi podobné. Jak je vidět na obrázku 15, při přibližování frekvencí prudce roste amplituda kmitání, a to až do doby, kdy se frekvence rovnají. Poté amplituda zase prudce klesá. [20]



Obrázek 15 Závislost amplitudy na poměru vlastní a budící frekvence (upraveno) [20]

Maximální amplitudu lze zjistit tak, že se položí derivace polohy podle času rovna nule: [14]

$$\frac{dx_0(\omega)}{d\omega} = 0 \quad (2.39)$$

Poté dostaneme vztah pro amplitudu při rezonanci: [14]

$$x_R(\omega = \omega_0) = \frac{F_0}{b \cdot \omega_0} \quad (2.40)$$

Vztah 2.40 však platí pouze pro lehce tlumené oscilátory, pro které platí že $b/m \ll 2 \omega_0$. [14]

2.2 Nelineární oscilátory

U složitějších mechanických systémů se už nedá předpokládat, že diferenciální rovnice budou pouze lineární. Nelineární systémy sice přesněji popisují realitu, ale bohužel právě díky nelinearitě diferenciálních rovnic jsou analyticky neřešitelné. U lineárních systémů bylo možno předpokládat: [21] [22]

$$U_p(x) = \frac{1}{2}k \cdot x^2 \quad (2.41)$$

$$F_k(x) = -k \cdot x \quad (2.42)$$

Kde U_p je potenciální energie, k je tuhost pružiny a x je její stlačení. Tyto rovnice je nutno v případě nelineárních systému rozšířit o další členy: [21] [22]

$$U_p(x) = \frac{1}{2}k \cdot x^2 + \frac{1}{3}u_2 \cdot x^3 + \frac{1}{4}u_3 \cdot x^4 + \frac{1}{5}u_4 \cdot x^5 + \dots \quad (2.43)$$

$$F_k(x) = -k \cdot x - u_2 \cdot x^2 - u_3 \cdot x^3 - u_4 \cdot x^4 - u_5 \cdot x^5 - \dots \quad (2.44)$$

Mezi nejznámější příklady nelineárních oscilátorů patří Duffingův a Van der Polův oscilátor. [22]

2.2.1 Duffingův oscilátor

Duffingův oscilátor je příklad periodicky buzeného oscilátoru s nelineární elasticitou. Je pojmenován po německém výzkumníkovi Georgu Duffingovi. Duffingova rovnice popisuje chování dynamického systému, který vykazuje chaotické chování. Tato rovnice má tvar: [23] [24]

$$\ddot{x} + \delta\dot{x} + \beta x + \alpha x^3 = \gamma \cos(\omega t) \quad (2.45)$$

Kde δ je koeficient tlumení, β souvisí s tuhostí pružiny, α je nelineární tuhost pružiny, x je poloha a γ popisuje amplitudu budící síly. Pokud je $\beta > 0$ je možné Duffingův oscilátor uvažovat jako buzený oscilátor jehož vratná síla je dána: [23] [24]

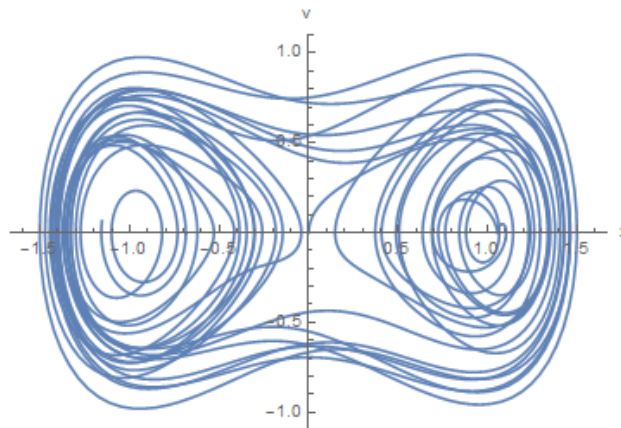
$$F = -\beta x - \alpha x^3 \quad (2.46)$$

Pokud $\beta < 0$ může Duffingův oscilátor například popisovat chování ocelového nosníku, který je periodicky vychylován mezi dvěma magnety. Je známo, že pro $\beta < 0$ dochází k chaotickým výchylkám. [23] [24]

Dále pokud $\alpha > 0$ pružina tvrdne a pokud $\alpha < 0$ pružina měkne, toto ale platí pouze pro malé výchylky x . [23] [24]

V dnešní době se termín Duffingova rovnice běžně používá pro jakoukoli rovnici popisující oscilátor, která obsahuje kubický člen tuhosti bez ohledu na typ tlumení nebo buzení. [23] [24]

Následující obrázek zobrazuje závislost rychlosti v na výchylce x . Je možno vidět, že na rozdíl od lineárních oscilací průběh není harmonický, ale chaotický. [24]



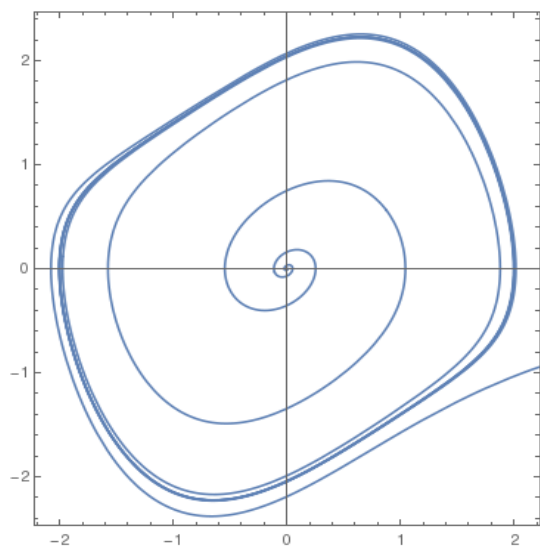
Obrázek 16 Chaotické chování Duffingova oscilátoru [24]

2.2.2 Van der Polův oscilátor

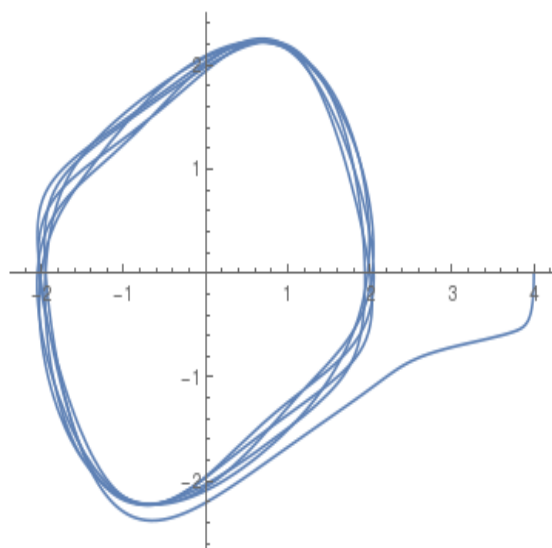
Van der Polův oscilátor je oscilátor s nelineárním tlumením. Jeho model byl sestaven holandským elektrotechnikem Balthasarem van der Polem. Je popsán diferenciální rovnicí druhého řádu: [25] [26]

$$\ddot{x} - \varepsilon(1 - x^2)\dot{x} + x = 0 \quad (2.47)$$

Kde x je poloha souřadnice, která je funkcí času a ε je parametr vyjadřující nelinearitu a míru tlumení. Jedná se o homogenní diferenciální rovnici. Pokud by se ovšem na její pravou stranu přidalo buzení, může dojít k nepředvídatelnému chování oscilátoru. Pro srovnání následující dva obrázky zobrazují řešení homogenní a nehomogenní rovnice Van der Polova oscilátoru. [25] [26]



Obrázek 17 Homogenní řešení [26]



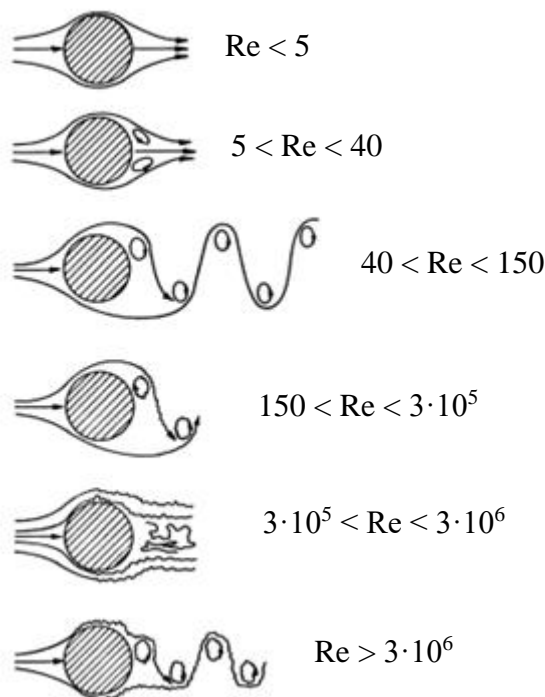
Obrázek 18 Nehomogenní řešení [26]

3 VIBRACE INDUKOVANÉ VÍRY

Při obtékání tělesa kapalinou mohou začít vznikat v úplavu za ním víry. Nejčastěji zkoumaným tělesem je válec díky jeho jednoduché axisymetrické geometrii bez ostrých hran. V této práci byl rovněž jako zkoumané těleso zvolen válec. Největší vliv na vznik vírů, jejich rozvinutí a odtrhávání má Reynoldsovo číslo: [27] [28]

$$Re = \frac{U \cdot D}{\nu} \quad (3.1)$$

Kde U je rychlost proudění kapaliny, která obtéká těleso, D je charakteristický rozměr obtékaného tělesa (u válce je to průměr) a ν je kinematická viskozita kapaliny. Vliv Reynoldsova čísla na odtrhávání vírů je zobrazen na obrázku 19.



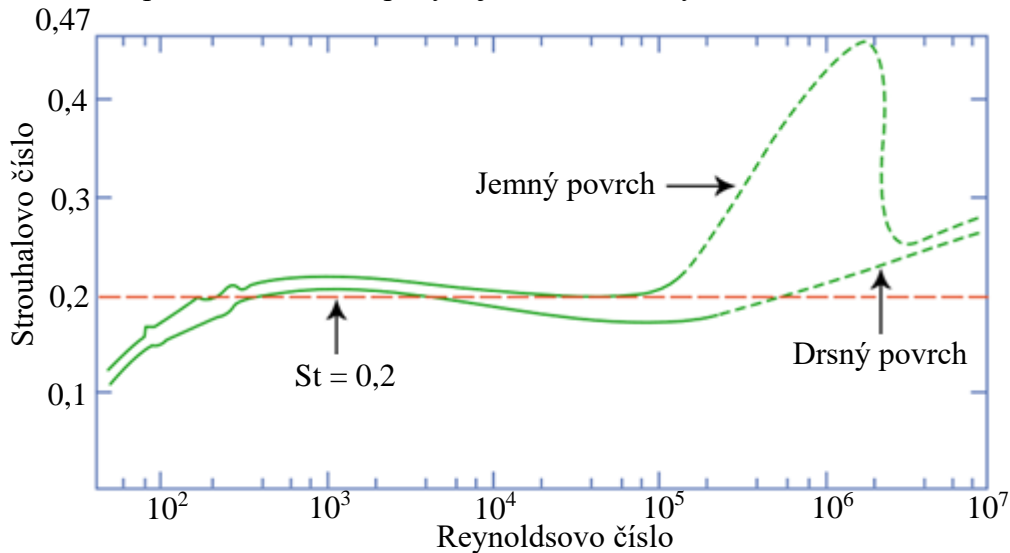
Obrázek 19 Vliv Reynoldsova čísla na odtrhávání vírů (upraveno) [29]

Jak je patrné z obrázku 19 při Reynoldsových číslech $Re < 5$ nedochází k žádné tvorbě ani odtrhávání vírů. Při mírném zvýšení Reynoldsova čísla na hodnoty $5 < Re < 40$ začne docházet ke tvorbě dvou vírů v úplavu, ale stále ne k jejich odtrhávání. Od hodnoty $Re = 40$ začíná docházet k periodickému odtrhávání vírů a za tělesem vzniká tzv. Kármánova vírová stezka. Při hodnotách $150 < Re < 3 \cdot 10^5$ dochází k přechodu od laminární k turbulentní vírové stezce. V intervalu $3 \cdot 10^5 < Re < 3 \cdot 10^6$ přechází mezní vrstva od laminární k turbulentní. Úplav je výrazně užší, nestabilní a dochází k zániku vírové stezky. Jakmile hodnota Reynoldsova čísla přesáhne $3 \cdot 10^6$ dochází k obnovení Kármánovy vírové stezky s turbulentní mezní vrstvou a užším úplavem než při nižších Reynoldsových číslech. Do hodnoty $Re = 3 \cdot 10^5$ lze hovořit o podkritickém režimu, mezi hodnotami $Re = 3 \cdot 10^5$ až $3 \cdot 10^6$ se jedná o přechodový režim a pokud $Re > 3 \cdot 10^6$ jedná se o nadkritický režim. Tyto konkrétní hodnoty Re se týkají pouze válcového tělesa. Pro jiné tvary mohou být hodnoty odlišné. [29]

Kármánova vírová stezka je nestabilita způsobena odtržením mezní vrstvy. Projevuje se periodickým odtrháváním vírů s opačnou rotací v úplavu za tělesem. Frekvence odtrhávání víru je charakterizována Strouhalovým číslem: [28]

$$St = \frac{f \cdot D}{U} \quad (3.2)$$

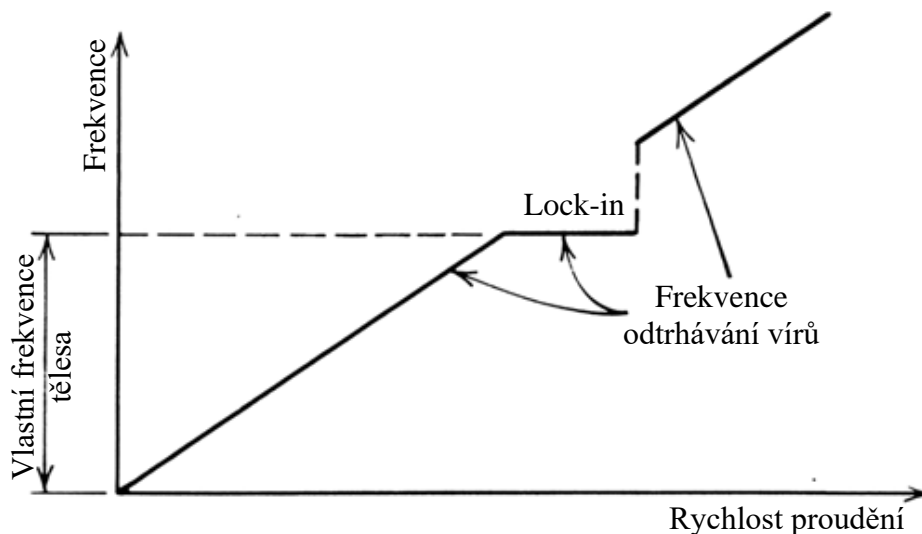
Kde f je frekvence odtrhávání víru, D je charakteristický rozměr obtékaného tělesa (u válce průměr) a U je rychlost proudění kapaliny. Experimentálně byla zjištěna závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově, která je zobrazena na obrázku 20. Ve většině případů se hodnota Strouhalova čísla pro válcové těleso pohybuje okolo hodnoty 0,2. [30]



Obrázek 20 Závislost Strouhalova čísla na Reynoldsově (upraveno) [30]

3.1 Lock-in fenomén

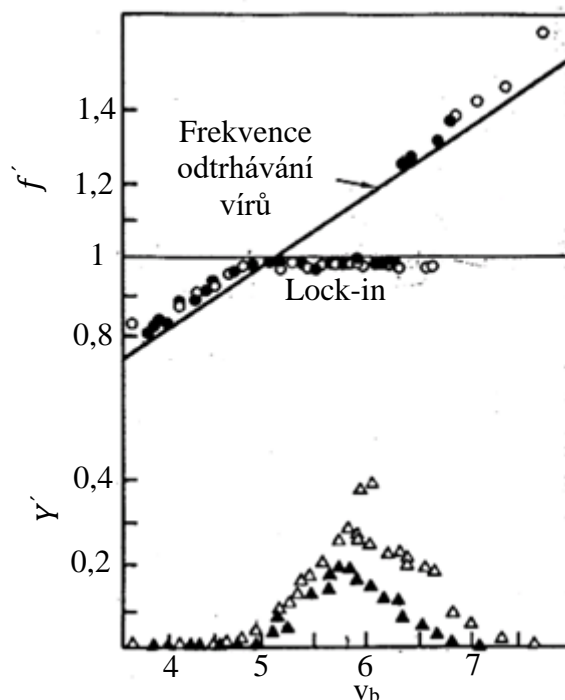
V případě, že se frekvence odtrhávání víru shoduje s vlastní frekvencí tělesa nastává tzv. *lock-in phenomenon*. Víry se tedy odtrhávají s frekvencí totožnou, nebo velmi blízkou vlastní frekvenci tělesa. Toto má za následek nárůst amplitud. Graf na obrázku 21 zobrazuje závislost frekvence odtrhávání vírů na rychlosti proudění. Jak lze vidět, postupným zvyšováním rychlosti roste i frekvence odtrhávání až do určité hodnoty, kdy nastane *lock-in* a frekvence odtrhávání už není závislá na rychlosti, ale pouze na vlastní frekvenci tělesa. Při dalším zvyšování rychlosti *lock-in* vymizí a frekvence odtrhávání bude zase závislá na rychlosti proudění. [31] [32]



Obrázek 21 *Lock-in* fenomén (upraveno) [32]

V této práci byl obtékanému tělesu pohyb předepsán. Jeho vlastní frekvence tedy byla přímo určena. Při simulacích pak bylo zkoumáno, kdy se Kármánové víry budou trhat právě na této předepsané frekvenci. Pokud se frekvence Kármánových víru shodovala s frekvencí předepsanou tělesu byl tento stav považován za *lock-in*. *Lock-in* tedy nebyl dosažen zvyšováním rychlosti proudění, jak je popsáno výše, ale měněním vlastní frekvence obtékaného tělesa. V této práci tedy pojmem *lock-in* bude označován stav, kdy došlo k tomu, že se Kármánové víry trhaly na frekvenci předepsané obtékanému tělesu.

Obrázek 21 zobrazuje teoretický průběh *lock-in* fenoménu, naopak na obrázku 22 jsou změřená konkrétní data.



Obrázek 22 Měření *lock-in* fenoménu (upraveno) [33]

Na ose x je vynesena bezrozměrná rychlost, tedy obrácená hodnota Strouhalova čísla ve tvaru:

$$v_b = \frac{U}{f \cdot D}$$

Kde U je rychlost proudící kapaliny kolem tělesa, f je vlastní frekvence tělesa a D je průměr obtékaného tělesa. Na ose y je bezrozměrná amplituda výchylky definovaná jako:

$$Y' = \frac{Y}{D}$$

Kde Y je změřená maximální amplituda výchylky a D je průměr tělesa. Dále je na osu y ještě vynesena bezrozměrná frekvence vyjádřena jako:

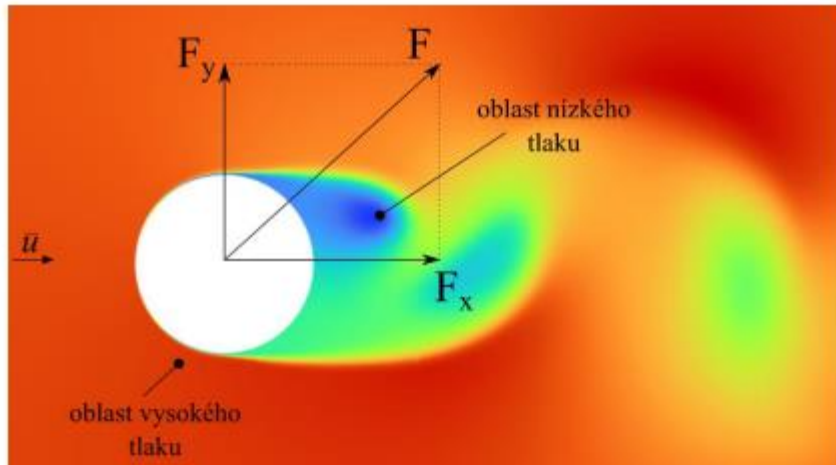
$$f' = \frac{f_s}{f}$$

Kde f_s je frekvence odtrhávání Kármánových víru a f je vlastní frekvence tělesa.

Jak lze na grafu na obrázku 22 vidět, jakmile dojde k *lock-in* fenoménu dojde také k prudkému nárůstu amplitud výchylky. Mimo *lock-in* jsou amplitudy výchylky výrazně nižší.

3.2 Síla působící na těleso

Periodické odtrhávání vírů v úplavu za obtékaným tělesem má za následek periodické působení síly na toto těleso. Síla se vypočítá integrací tlaku na povrchu tělesa. Výsledná síla se pak dá rozložit na dvě na sebe kolmé složky, a to sice na složku působící kolmo na směr proudění (F_y) a na složku rovnoběžnou s prouděním (F_x). Složka síly kolmá na proudění (F_y) vytváří vztlak na těleso a nazývá se tedy vztlaková síla. Složka síly (F_x) má za následek působení odporu, proto se tato síla nazývá odporová. Rozložení sil je zobrazeno na obrázku 23.



Obrázek 23 Síly působící na obtékaný válec [34]

Vlivem periodického odtrhávání se periodicky mění i tyto síly. Bylo dokázáno a také ze simulací vyplývalo, že frekvence síly F_y byla totožná s frekvencí odtrhávání víru, zatímco frekvence síly F_x byla oproti frekvenci odtrhávání dvojnásobná. [35]

K porovnávání vztlakové a odporové síly pro tělesa různých rozměrů je možno zavést vztlakový a odporový bezrozměrný koeficient: [28]

$$C_L = \frac{F_y}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL} \quad (3.3)$$

$$C_D = \frac{F_x}{\frac{1}{2}\rho U^2 DL} \quad (3.4)$$

Kde C_L je vztlakový koeficient, C_D je odporový koeficient, D je průměr tělesa, L je délka tělesa (v této práci byl uvažován 1 m), U je rychlost proudění kapaliny a ρ je hustota kapaliny.

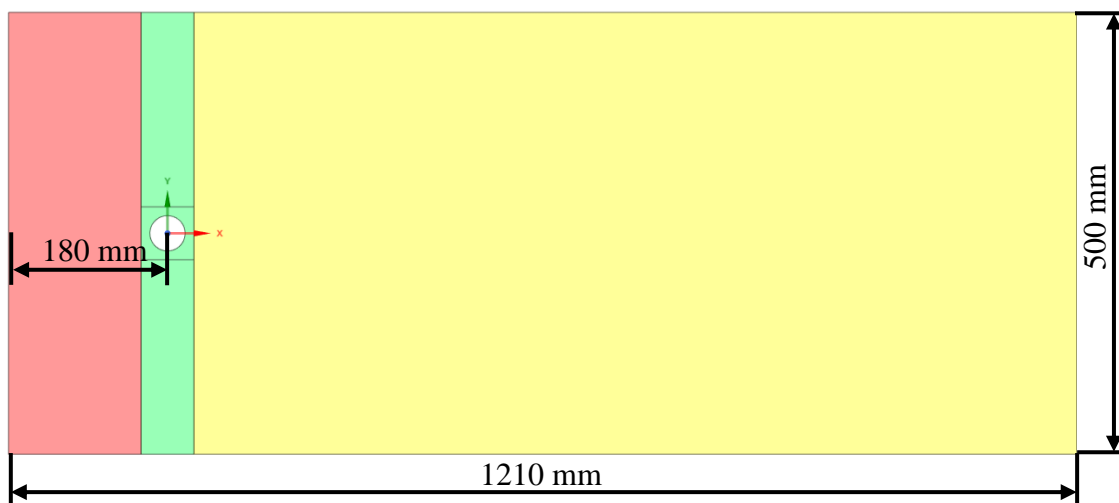
4 CFD SIMULACE

V praktické části byly provedeny numerické simulace proudění kolem obtékaného tělesa. K simulacím byl využit software Ansys Fluent 2022 a Ansys Fluent 2023. Bylo uvažováno těleso kruhového průřezu s průměrem 40 mm, jemuž byl předepsán harmonický pohyb ve směru kolmém na směr proudění kapaliny (v ose y). Proměnnými parametry byla amplituda výchylky a frekvence. Pohyb byl předepsán pomocí uživatelem definované funkce (UDF) uvedené v příloze. Válec byl umístěn do proudící kapaliny tak, že jeho průřez byl kolmý na gravitační zrychlení, díky čemuž není nutno uvažovat gravitaci. Byla vyhodnocována vztlaková síla (F_y) působící na těleso, a nakonec také činný a jalový výkon zařízení.

4.1 Geometrie

Jak už je uvedeno výše, jako zkoumané těleso byl zvolen válec s průměrem 40 mm. Byla uvažována dvourozměrná geometrie obtékaného tělesa. Veškerá geometrie byla tvořena v softwaru Ansys SpaceClaim. Výpočetní doména je zobrazena na obrázku 24, jak lze vidět má tvar obdélníku s rozměry 1210 mm na délku a 500 mm na výšku. Vlevo je vstup do domény a vpravo výstup. Těleso je umístěno 180 mm od vstupu do domény.

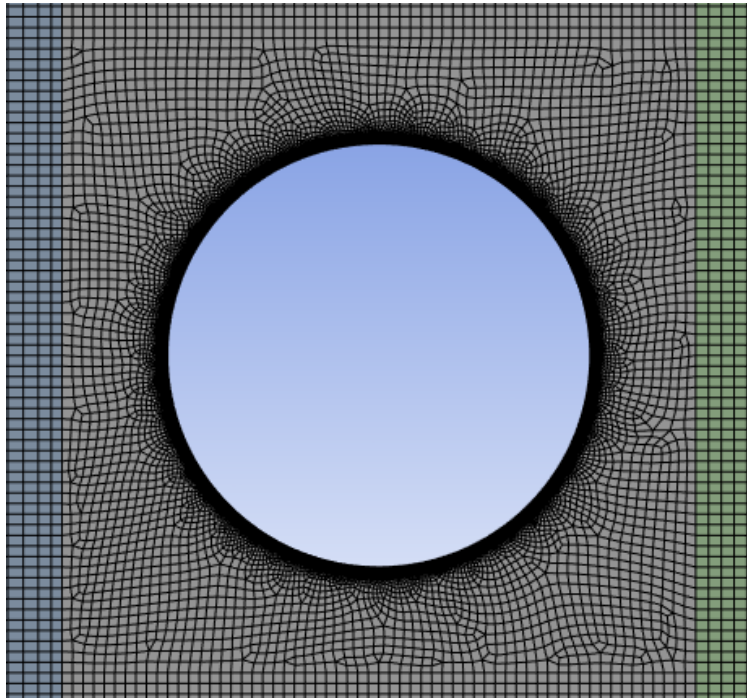
Jelikož k výpočtu byla využita dynamická síť bylo třeba tomu uzpůsobit i geometrii. Kolem tělesa byl vytvořen čtverec s délkou strany 60 mm, který se bude pohybovat společně s ním. Dále bylo třeba definovat oblast ve které se těleso bude pohybovat, tato oblast je zobrazena na obrázku 24 zelenou barvou. Kvůli metodám dynamické sítě bohužel nebylo možné vytvořit kolem tělesa korektní dekompozici, díky které by v celé doméně byly pouze čtyřúhelníkové buňky.



Obrázek 24 Schéma výpočetní domény

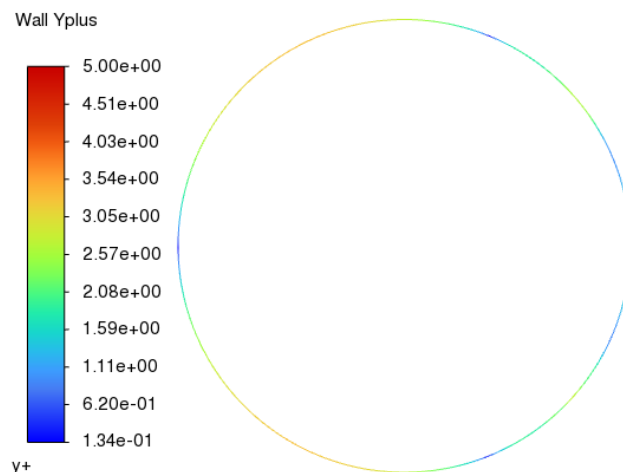
4.2 Výpočetní síť

K vytvoření sítě bylo využito softwaru Ansys Meshing. Síť je z velké většiny tvořena čtyřúhelníkovými buňkami, ovšem jak už bylo popsáno výše, čtyřúhelníkových prvků nebylo možné dosáhnout všude, proto se v oblasti kolem kmitajícího tělesa nachází i několik trojúhelníkových buněk. Pro všechny uvažované amplitudy i frekvence výchylky byla použita totožná síť a měněn byl pouze předepsaný pohyb tělesa. Velikost sítě byla necelých 400 000 elementů i uzlů. Na obrázku 25 je zobrazena síť v blízkosti tělesa. Výška buňky v první vrstvě byla nastavena na 0,05 mm.



Obrázek 25 Síť v blízkosti tělesa

K posuzování kvality sítě byly využity dva parametry, a to sice zkosení buněk a jejich poměr stran. Maximální zkosení dosahovalo hodnoty 0,797 a průměrná hodnota byla $7,711 \cdot 10^{-3}$. Maximální hodnota poměru stran buněk byla 3,594 a průměr byl 1,619, což je pro kvalitní síť dostačující. Dále bylo třeba brát ohled na hodnotu y^+ . Protože byl použit model turbulence SST k-omega bylo třeba, aby hodnota na stěně tělesa byla menší než 5 a ideálně menší než 1 [36]. Tohoto bylo dosaženo (obrázek 26). Hodnota y^+ na horní a dolní stěně domény nebyla vyhodnocena, protože to pro simulaci nemělo význam.

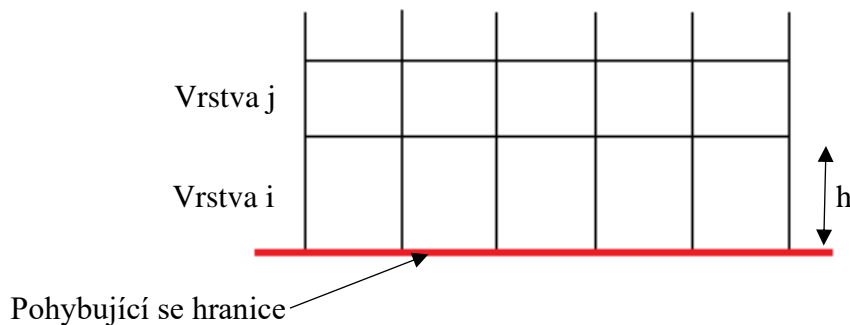
Obrázek 26 Y^+ na povrchu tělesa

Výpočetní síť bylo třeba přizpůsobit tomu, že byla využita dynamická síť, konkrétně metoda *layering*, která bude popsána níže. Bylo třeba zajistit, aby v oblasti nad a pod kmitajícím tělesem byla síť obsahující pouze čtyřúhelníkové buňky.

4.3 Dynamická síť

Jak je zmíněno výše k výpočtu byla zvolena metoda dynamické sítě *layering*. Kromě metody *layering* jsou k dispozici ještě metody *smoothing* a *remeshing*, ty ale k simulacím využity nebyly. Metoda *layering* umožňuje buď přidávání, nebo slučování vrstev buněk sousedících s pohybující se hranicí. Tato metoda může být použita pouze pokud vrstvy buněk, která se mají přidávat nebo slučovat jsou tvořeny šestihrany, nebo klíny ve 3D a čtyřúhelníky ve 2D. [37]

Nastavení dynamické sítě probíhalo přímo v softwaru Ansys Fluent. K dispozici jsou 2 metody založené buď na výšce buněk (*height based*), nebo na poměru buněk (*ratio based*). V této práci byla využita metoda založená na výšce buněk, přičemž bylo třeba volit ideální výšku buněk h_{ideal} , která byla zvolena jako 1 mm. Na obrázku 27 je zobrazeno schéma dynamického vrstvení. [37]



Obrázek 27 Vrstvení buněk (upraveno) [37]

Pokud dochází ke zvětšování výšky vrstvy *i* (pohyblivá hranice se pohybuje dolů), buňky mohou zvětšovat svou výšku h až do té doby než: [37]

$$h_{max} > (1 + \alpha_s) \cdot h_{ideal} \quad (4.1)$$

Kde h_{max} představuje maximální výšku buněk ve vrstvě *i*, h_{ideal} je ideální výška buněk, která byla zvolena 1 mm a α_s je *split factor*. [37]

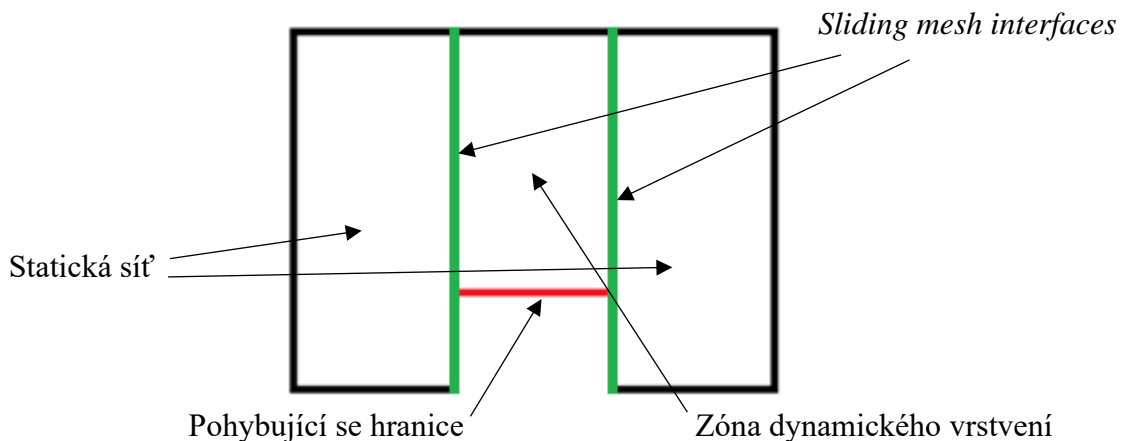
Při zmenšování výšky buněk ve vrstvě *i* (pohyblivá hranice se pohybuje nahoru), dojde ke sloučení s vrstvou *j* když: [37]

$$h_{min} < \alpha_c \cdot h_{ideal} \quad (4.2)$$

Kde h_{min} je minimální výška buňky ve vrstvě *i* a α_c je *collapse factor*.

Split i *collapse factor* nebyly měněny a byly ponechány na původních hodnotách softwaru Ansys Fluent a to sice $\alpha_s = 0,4$ a $\alpha_c = 0,2$.

Jak již bylo zmíněno, spolu s tělesem se bude pohybovat i čtvercová oblast kolem něj, bylo proto třeba na horní a dolní stranu této oblasti správně nastavit podmínky pro přidávání a slučování vrstev. Jelikož se celá oblast pohybuje nahoru a dolů vzniká tak nekonformní rozhraní mezi statickou a dynamickou sítí. Toto bylo vyřešeno definováním hranic mezi nimi jako *sliding mesh interfaces* díky čemuž dokáže Fluent lépe přepočítávat veličiny právě mezi statickou a dynamickou sítí. Následující obrázek zobrazuje tyto *sliding mesh interfaces*.



Obrázek 28 Rozhraní mezi statickou a dynamickou sítí (upraveno) [37]

4.4 Nastavení řešiče

Veškeré simulace byly uvažovány jako transientní (proměnné v čase). Bylo využito modelu turbulence SST k-omega. Jedná se o dvourovnicový model založený na RANS (*Reynolds – averaged Navier Stokes*), který kombinuje modely k-epsilon a k-omega. Model k-epsilon vykazuje dobré výsledky v oblasti volného proudu, ale není vhodný pro modelování turbulence v blízkosti stěny, naopak model k-omega je přesný v blízkosti stěny, ale ne ve volném proudu. Model SST k-omega spojuje výhody modelů k-epsilon a k-omega a přepíná mezi nimi v závislosti na Reynoldsově čísle. [38]

Jako proudící médium byla uvažována voda s hustotou $\rho = 998,2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}$ a dynamickou viskozitou $\eta = 0,001003 \text{ Pa}\cdot\text{s}$.

Co se týče okrajových podmínek byla na vstupu zadávána konstantní rychlost $u = 1 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$, intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,076 m. Na výstupu byla zadána tlaková okrajová podmínka, a to sice nulový přetlak, dále pak intenzita turbulence 5 % a hydraulický průměr 0,076 m. Na horní a dolní stěnu domény byla aplikována okrajová podmínka *no slip wall*, což znamená, že bylo uvažováno ulpívání na stěně.

Pro rychlejší konvergenci a také větší přesnost simulace bylo třeba vhodně zvolit interpolační schémata. Jako numerické schéma řešiče bylo vybráno SIMPLE. Jako gradientní metoda byla ponechána defaultní metoda nejmenších čtverců. Interpolační schémata pro tlak, hybnost, turbulentní kinetickou energii, specifickou míru disipace a nestacionární člen byly během výpočtu měněny, a to sice od nejrobustnějších schémat po ty, které zlepšují konvergenci a zvyšují přesnost samotné simulace. Měnění těchto schémat probíhalo po několika stovkách časových kroků. Použité schémata jsou vypsána v tabulce 1.

Tabulka 1 Interpolační schémata

Veličina	Spouštění simulace	Konečné nastavení
Tlak	<i>Standart</i>	<i>Second order</i>
Hybnost	<i>Upwind prvního řádu</i>	<i>QUICK</i>
Turbulentní kin. 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>

Velikost časového kroku byla nejdříve volena podle doporučení pro dynamickou síť, které říká, že za jeden časový krok nesmí dojít k přeskočení více než jedné vrstvy buněk v deformující se oblasti dynamické sítě. Toto se dá zapsat rovnicí: [37]

$$\Delta t = \frac{s}{v} \quad (4.3)$$

kde Δt je velikost časového kroku, s je výška nejmenší buňky, která se deformuje (byla volena jako 1 mm) a v je rychlost pohybujícího se tělesa (předepsaná v UDF). Pro nejvyšší frekvence kmitání tělesa vycházel časový krok podle tohoto doporučení přibližně $2 \cdot 10^{-3}$ s. Ovšem při volbě tohoto časového kroku nedocházelo k očekávaným výsledkům, proto byla jeho velikost zmenšena. Nejprve bylo uvažováno $\Delta t = 1 \cdot 10^{-4}$ s, a to bylo postupně zvětšováno kvůli úspoře času při simulacích. Nakonec se jako optimální časový krok ukázalo $\Delta t = 5 \cdot 10^{-4}$ s. Všechny simulace pak byly prováděny s tímto časovým krokem.

4.5 Vyhodnocení výkonu

Výkon zařízení je jeden z nejdůležitějších posuzovaných parametrů. V této práci byl určován výkon jak činný, tak jalový, a to lze provést několika způsoby. V případě této práce byly uvažovány dva z nich. Při prvním způsobu určování výkonu bylo využito Fourierových transformací. Druhý způsob spočívá ve vykreslení průběhu činného i jalového výkonu a poté určení jejich střední hodnoty. Oba způsoby vychází ze základní rovnice pro výkon: [39]

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T F_y \cdot v_y dt \quad (4.4)$$

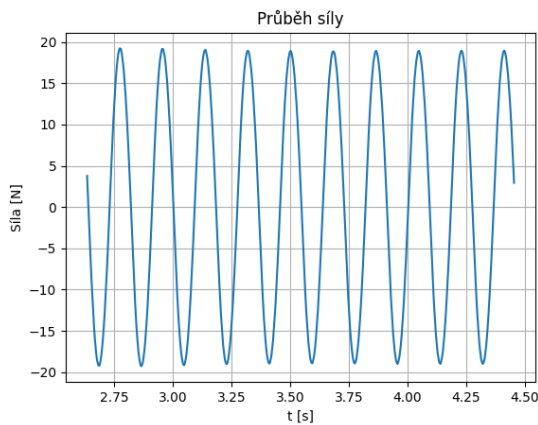
P v rovnici představuje výkon zařízení, F_y je síla působící na těleso kolmo na směr proudu (vztlaková) a v_y je rychlost tělesa ve směru kolmém na směr proudu. Rychlost tělesa byla zadána v UDF a síla působící na těleso byla dopočítána v softwaru Ansys Fluent.

Jak již bylo zmíněno při prvním způsobu vyhodnocování výkonu byla využita Fourierova transformace (FFT), která převádí signál z časového do frekvenčního spektra. Pro zajištění potřebné přesnosti transformace bylo potřeba splnit podmínku koherence. FFT byla prováděna vždy přes konečný počet period (nejčastěji 10). Díky známe předepsané frekvenci kmitání tělesa byla známa i jeho perioda, tudíž bylo možné přesně určit počet časových kroků n :

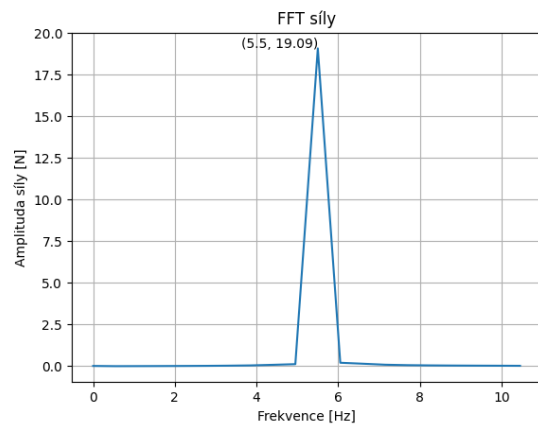
$$n = \frac{\text{počet period}}{f_{zadaná} \cdot \Delta t} \quad (4.5)$$

Kde v čitateli je počet period, přes které se provádí FFT, $f_{zadaná}$ je frekvence, kterou je těleso rozkmitáváno (zadaná v UDF) a Δt je velikost časového kroku. Znalost počtu časových kroků n je důležitá, aby bylo možno z datového souboru napočítaného z Ansys Fluent, přesně vybrat data a splnit tak podmínku koherence.

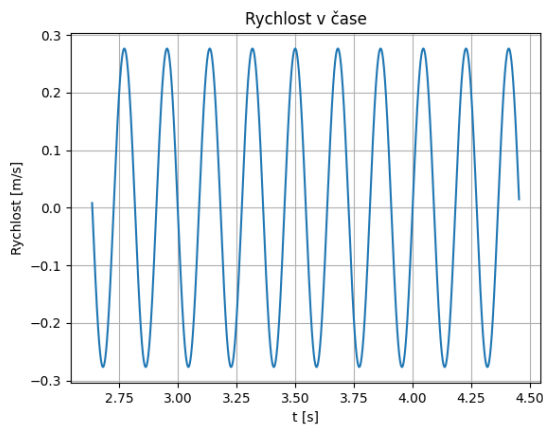
K určení výkonu pak tedy bylo třeba z vybraných dat provést Fourierovy transformace jak rychlosti v_y , tak síly F_y (obrázky 29 až 32). Ty byly provedeny v softwaru Spyder.



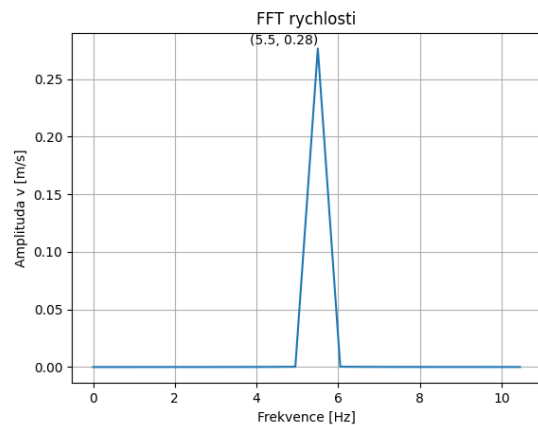
Obrázek 29 Průběh síly (8 mm, 5,5 Hz)



Obrázek 30 FFT síly (8 mm, 5,5 Hz)



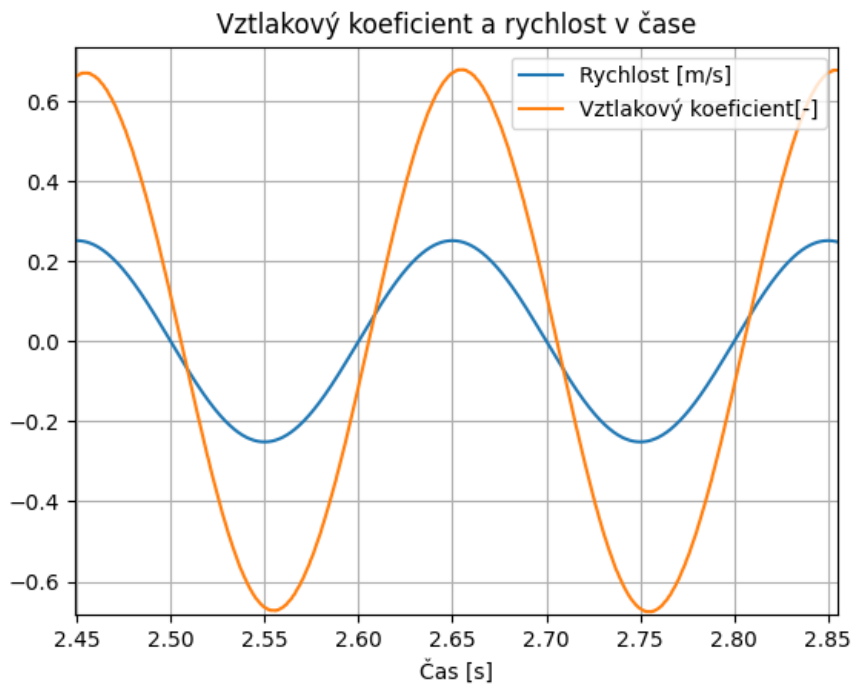
Obrázek 31 Průběh rychlosti (8 mm, 5,5 Hz)



Obrázek 32 FFT rychlosti (8 mm, 5,5 Hz)

Dále bylo potřeba definovat fázový posuv ϕ mezi rychlostí tělesa v_y a silou F_y . K jeho určení bylo využito analogie s elektřinou, a to tak že, síla byla uvažována jako napětí a rychlost jako proud. V elektřině je fázový posuv definován jako úhel napětí mínus úhel proudu. To znamená, že pokud je fázový posuv kladný pak napětí předbíhá proud a pokud záporný pak proud předbíhá napětí. Tedy analogicky k mechanice, pokud rychlost předbíhala sílu byl jejich fázový posuv záporný a pokud síla předbíhala rychlost byl kladný. Znaménko fázového posuvu je důležité, protože určuje, jestli bude jalový výkon záporný, nebo kladný. Na činný výkon znaménko fázového posuvu vliv nemá. [40] [41]

Pro různé frekvence a amplitudy byly fázové posuvy rovněž různé. Jak vyplývá z rovnic 4.6 a 4.7, pokud by byl fázový posuv nulový, jalový výkon by byl taky nulový ($\sin(0) = 0$) a veškerý výkon by byl pouze činný. Jak je ale patrné z obrázku 33, zobrazující průběh vztlakového koeficientu a rychlosti pro amplitudu 8 mm a frekvenci 5 Hz, rychlost a síla jsou vůči sobě fázově posunuté. Pro přehlednost je na obrázku 33 místo síly F_y vykreslen vztlakový koeficient (amplitudy síly jsou mnohem větší než amplitudy rychlosti, tudíž by byl graf nepřehledný). Průběh vztlakového koeficientu a síly F_y jsou totožné, až na velikost jejich amplitud. Fázový posuv byl určen pomocí příkazu *angle* ve Spyderu.



Obrázek 33 Průběh vztlakového koeficientu a rychlosti (8 mm, 5 Hz)

Při známých průbězích síly, rychlosti a jejich fázovém posuvu, pak bylo možné určit činný a jalový výkon pro všechny uvažované frekvence a amplitudy jako: [39]

$$P_{\text{činný}} = \frac{|F_y| \cdot |v_y| \cdot \cos \varphi}{2} \quad (4.6)$$

$$P_{\text{jalový}} = \frac{|F_y| \cdot |v_y| \cdot \sin \varphi}{2} \quad (4.7)$$

Kde $|F_y|$ a $|v_y|$ jsou velikosti amplitud po provedení FFT. Tyto amplitudy bylo třeba vybrat přesně na frekvenci, která byla tělesu zadána v UDF.

V případě druhého způsobu určování výkonu je možné využít rovnic: [39]

$$P_{\text{činný}} = F_y(t) \cdot v_y(t) \quad (4.8)$$

$$P_{\text{jalový}} = \frac{F_y(t) \cdot a_y(t)}{\omega} \quad (4.9)$$

kde a_y je průběh zrychlení v ose y a ω je úhlová rychlost.

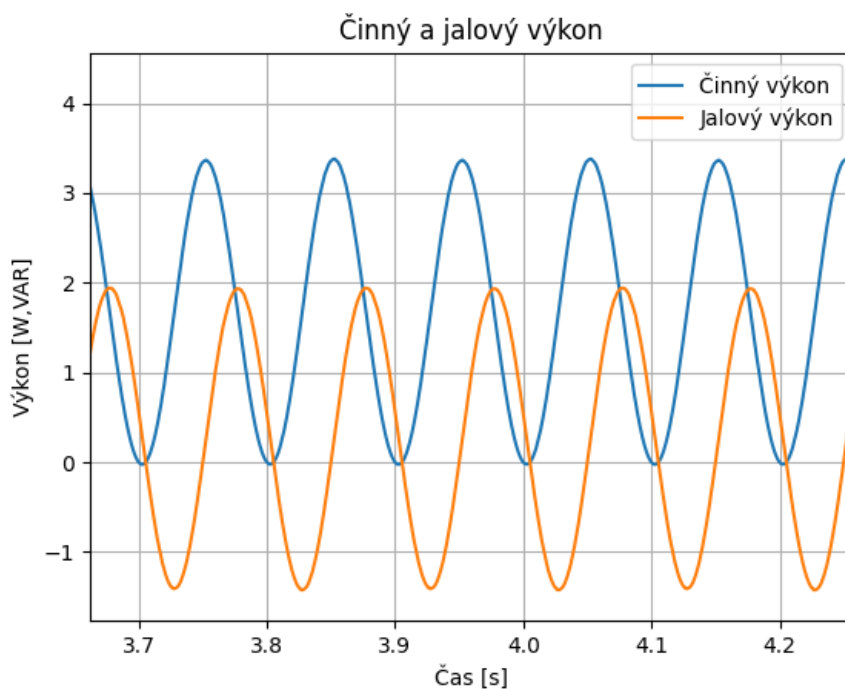
Stejně jako v předchozím případě síla F_y je napočítaná ze softwaru Fluent a rychlost v_y je zadaná v UDF. Neznáme jsou pouze průběh zrychlení $a_y(t)$ a úhlová rychlost ω . To lze ovšem určit velmi jednoduše. Jelikož je rychlost známá, zrychlení se pak určí jako derivace rychlosti podle času:

$$a_y(t) = \frac{dv(t)}{dt} = \frac{d(\omega \cdot Y_0 \cdot \sin(\omega \cdot t))}{dt} = Y_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (4.10)$$

Kde Y_0 je maximální amplituda výchylky (zadaná v UDF) a úhlovou rychlost ω lze určit pomocí zadávané frekvence:

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f_{zadaná} \quad (4.11)$$

Poté už bylo možné vykreslit průběhy činného a jalového výkonu v čase (obrázek 34) podle rovnic 4.8 a 4.9. Dále bylo třeba určit střední hodnoty výkonů. To bylo provedeno z posledních 10 period. S využitím rovnice 4.5 bylo opět možno určit počet časových kroků na konečný počet period, díky čemuž bylo možno vykreslit 10 celých period rychlosti v_y a síly F_y , a tím i přesně určit střední hodnoty. Z výsledků vyplývalo, že výkony mají frekvenci dvojnásobnou oproti síle F_y a rychlosti v_y .



Obrázek 34 Průběh činného a jalového výkonu (8 mm, 5 Hz)

Oba zmíněné způsoby vyhodnocování výkonů vykazovaly téměř stejné výsledky lišící se pouze o nepatrnou numerickou chybu, proto byl v této práci výkon vyhodnocován většinou jen pomocí FFT.

Jak je patrné z obrázku 34, stejně jako v elektřině, tak i mechanice jsou vůči sobě činný a jalový výkon posunuty o 90° , tedy o $\pi/2$ v radiánech. Jejich fázový posuv o $\pi/2$ je také patrný z rovnic 4.6 a 4.7, kdy činný výkon je násoben kosinem a jalový sinem a fázový posuv sinu a kosinu je právě $\pi/2$. To stejné se dá říct i o rovnicích 4.8 a 4.9. Jelikož rychlost byla v UDF zadávána se sinem, tudíž zrychlení, jakožto derivace rychlosti, muselo mít průběh kosinový.

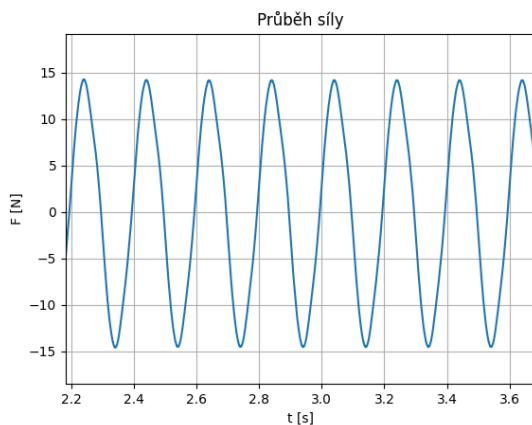
Činný výkon představuje využitelný výkon, který je možno ze zařízení získat a vyrábět pomocí něj elektřinu. Jeho získávání je realizováno přidáním tlumení do systému. Hodnoty přidavného tlumení budou vyhodnoceny později. Zatímco činný výkon lze využívat, jalový ne. Jalovina představuje výkon, který je potřeba k rozkmitání válce o hmotnosti m a zároveň také ke stlačování pružin o tuhosti k na kterých je válec připevněn. Je to tedy výkon, který je v zařízení přítomen, ale nelze jej nijak využít.

5 VÝSLEDKY

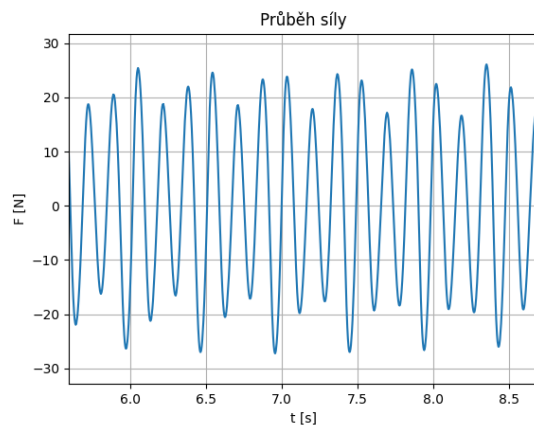
V této kapitole budou vyhodnocena a porovnána získaná data z numerických simulací provedených v softwaru Ansys Fluent. Pro všechny simulace bylo totožné nastavení řešiče, geometrie tělesa, výpočetní síť, doména i okrajové podmínky, které jsou popsány v předchozí kapitole. Měněnými parametry byla předepsaná frekvence, kterou bylo těleso uváděno do pohybu a jeho amplituda výchylky v ose y . Cílem práce bylo vyhodnotit silové účinky působící na těleso a také stanovit přenášený výkon mezi kapalinou a tělesem.

Byly uvažovány amplitudy výchylky 4 mm, 6 mm, 8 mm, 10 mm, 12 mm, 14 mm a 16 mm. Volba amplitud vycházela z grafu na obrázku 22 (změřený průběh *lock-in* fenoménu). Frekvence pohybu byla většinou měněna od 3 do 7 Hz. Pro každou amplitudu byly voleny různé frekvence v závislosti na výkonu. Cílem bylo určit takové frekvence, při kterých bude činný výkon kladný a dále také frekvenci, kdy bude činný výkon maximální.

Při simulacích byla snaha, aby se frekvence odtrhávání Kármánových víru sjednotila s frekvencí pohybu předepsanou tělesu (*lock-in* fenomén). V případě, že tohoto bylo dosaženo, síla působící na těleso měla ustálený, periodický průběh (obrázek 35). Zejména při nižších frekvencích pohybu tělesa se nedařilo dosáhnout *lock-in* fenoménu a síla proto měla neustálený průběh (obrázek 36). Z napočítaných simulací byly exportovány textové soubory s daty rychlosti tělesa a působící síly na těleso v ose y . Tyto data byly dále zpracovávány v softwaru Spyder, který využívá programovací jazyk python.



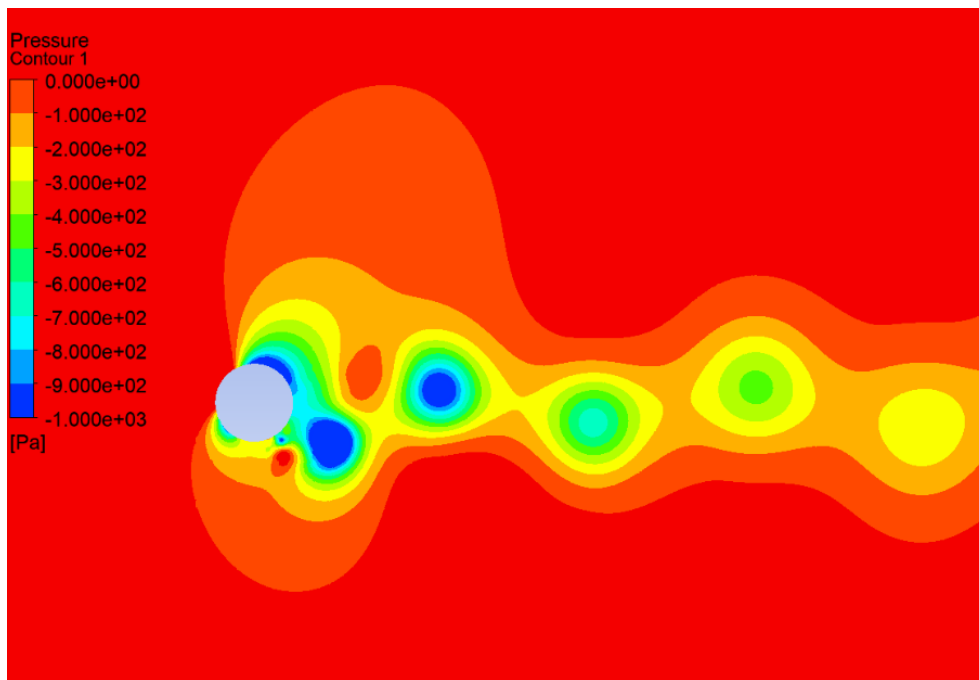
Obrázek 35 Průběh síly (16 mm, 5 Hz)



Obrázek 36 Průběh síly (8 mm, 4 Hz)

V případě ustálených průběhu sil (obrázek 35) bylo určení výkonu jednoduché. Vždy byla provedena Fourierova transformace jak síly, tak rychlosti přes konečný počet period (většinou 10) a následně vyhodnocen výkon. Jakmile ale síla neměla ustálený průběh (nedošlo k *lock-in* fenoménu), nebylo možné provést FFT přes konečný počet stejných period, protože průběh síly nevykazoval periodicitu. Často se stávalo, že v amplitudo-frekvenční charakteristice po provedení FFT z nestabilního průběhu, nevyšla jedna amplituda na jedné frekvenci, ale většinou byly dvě, jedna na frekvenci tělesa zadané a druhá na frekvenci odtrhávání Kármánových vírů. Navíc také rychlost v_y a síla F_y neměly stejnou frekvenci. Pokud tedy nedošlo k *lock-in* fenoménu, nebylo možné přesně určit výkon. V těchto případech byl tedy výkon určován s určitou chybou a to tak, že se napočítalo přibližně 100 period rychlosti v_y a výkon byl určen přes posledních 10. Zpřesnění určení výkonů při frekvencích, kdy nedošlo k *lock-in* fenoménu nebylo v této práci dále řešeno, protože činné výkony u těchto frekvencí byly v porovnání s ostatními velmi malé, až zanedbatelné.

Následující obrázek zobrazuje kontury tlaku při frekvenci 5,4 Hz u amplitudy 16 mm. Je možné si všimnout rozvinuté Kármánové vírové stezky, které má za následek periodické působení síly na těleso.

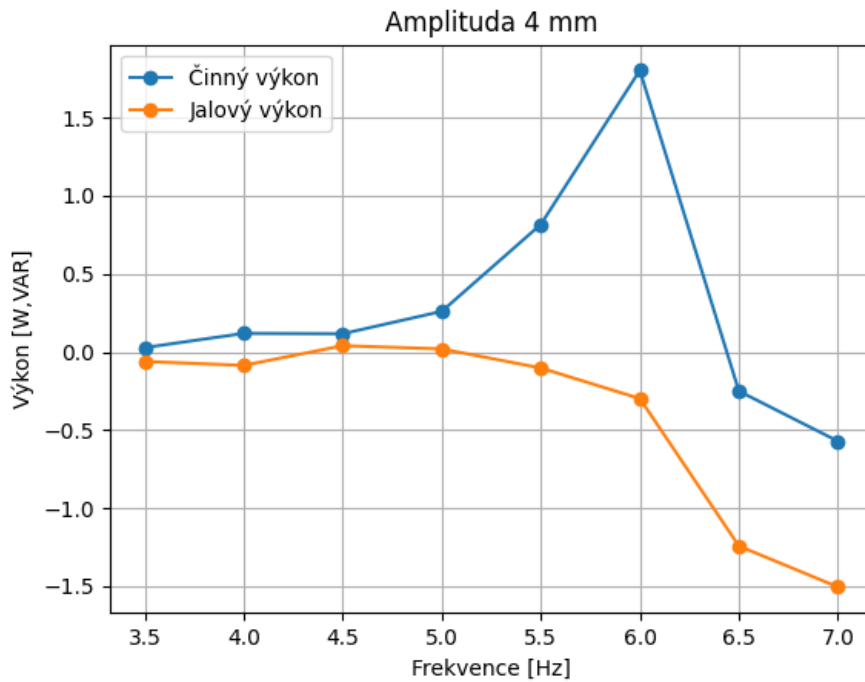


Obrázek 37 Kontury tlaku (16 mm, 5,4 Hz)

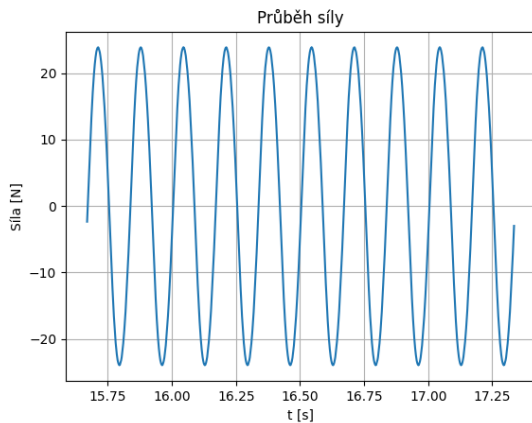
5.1 Výsledné výkony

V této podkapitole budou vyhodnoceny a graficky interpretovány výkony, pro každou uvažovanou amplitudu výchylky. Vyhodnocování výkonu bylo popsáno v předchozí kapitole, a jak už bylo uvedeno probíhalo v softwaru Spyder.

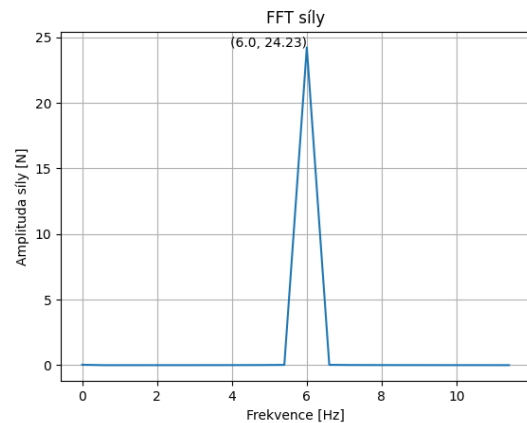
Nejnižší uvažovanou amplitudou výchylky byly 4 milimetry. Průběh činného a jalového výkonu pro tuto amplitudu je možno vidět na obrázku 38. Tato amplituda nevykazovala dobré výsledky, protože u většiny předepsaných frekvencí pohybu tělesa nedošlo k ustálení průběhu síly F_y , a ta tak měla ve většině případů neperiodický průběh. Pouze u frekvencí 5,5 a 6 Hz došlo k *lock-in* fenoménu, tedy i k periodickému průběhu síly F_y . Zároveň frekvence 6 Hz vykazovala největší činný výkon a to konkrétně 1,8 W. Na obrázcích 39 a 40 je zobrazen průběh síly F_y , a také její FFT pro frekvenci 6 Hz kde vyšel nejvyšší činný výkon.



Obrázek 38 Činný a jalový výkon (amplituda 4 mm)

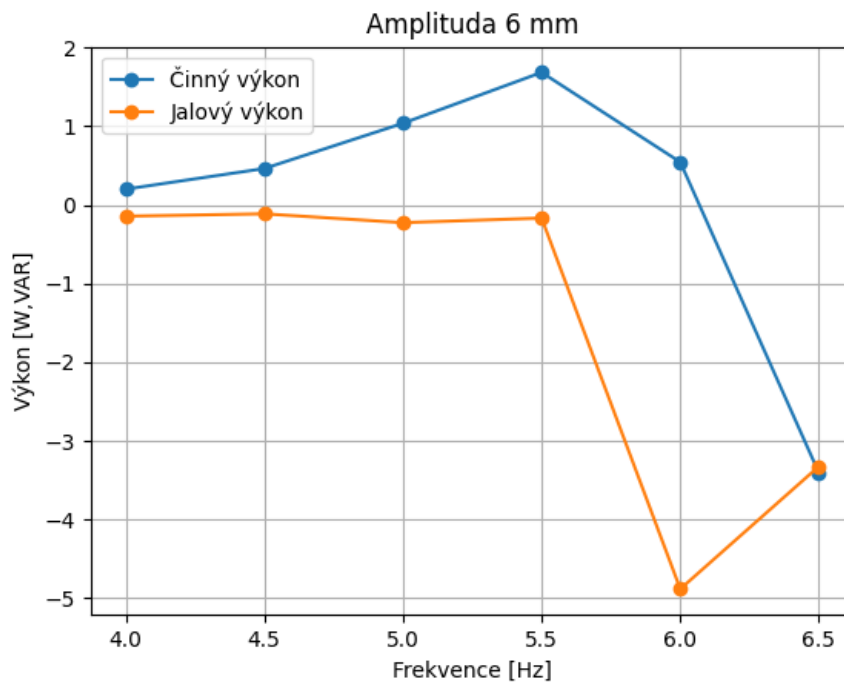


Obrázek 39 Průběh síly (4 mm, 6 Hz)

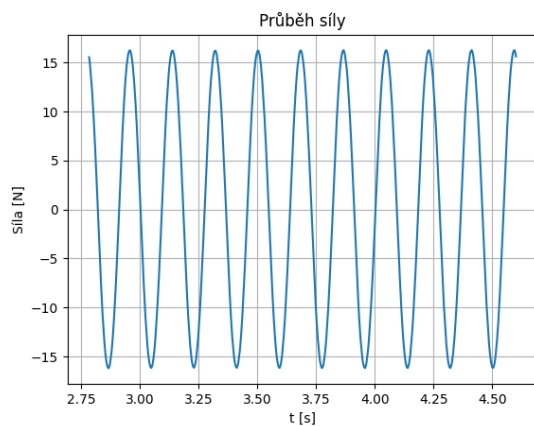


Obrázek 40 FFT síly (4 mm, 6 Hz)

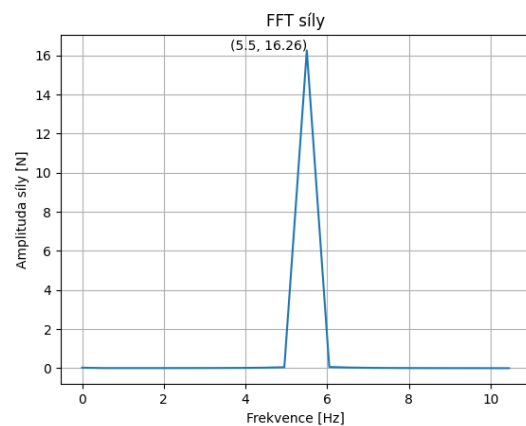
Další uvažovanou amplitudou výchylky bylo 6 mm. Průběhy výkonů pro tuto amplitudu jsou na následujícím obrázku. V případě této amplitudy už docházelo k lepším výsledkům. Ve většině případů bylo dosaženo toho, že se Kármánovy víry trhaly na frekvenci předepsané tělesu. Pouze u frekvencí 4 a 4,5 Hz se to nepovedlo, takže síla F_y neměla ustálený, periodický průběh. Nejvyšší získaný činný výkon byl 1,69 W u frekvence 5,5 Hz. Průběh síly a provedené FFT pro frekvenci 5,5 Hz jsou na obrázcích 42 a 43.



Obrázek 41 Činný a jalový výkon (amplituda 6 mm)

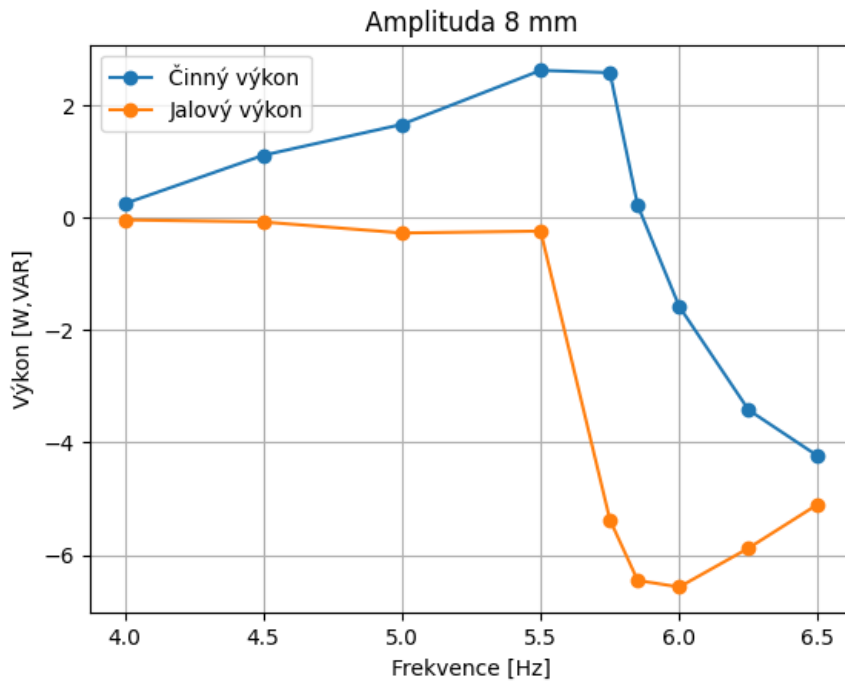


Obrázek 42 Průběh síly (6 mm, 5,5 Hz)

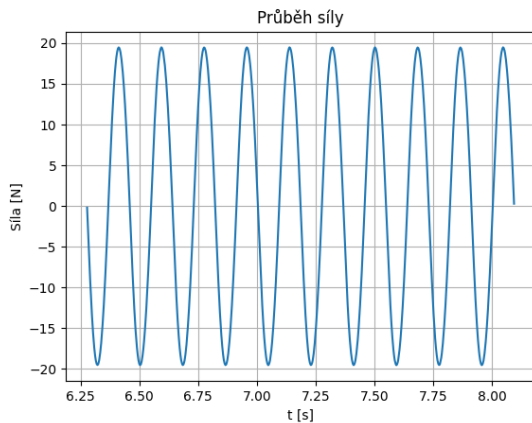


Obrázek 43 FFT síly (6 mm, 5,5 Hz)

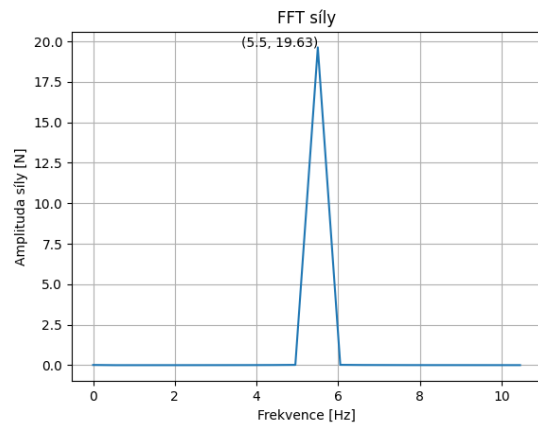
Dále byla počítána amplituda výchylky 8 mm. Obrázek 44 zobrazuje průběhy výkonu pro tuto amplitudu. Je patrné, že nejvyšší činný výkon vyšel při frekvenci 5,5 Hz a to konkrétně 2,63 W. Pouze u nejnižší počítané frekvence, tedy 4 Hz, se nepovedlo dosáhnout *lock-in* fenoménu. Obrázky 45 a 46 zobrazují průběh síly F_y a provedenou Fourierovu transformaci pro frekvenci, která vykazovala nejvyšší činný výkon.



Obrázek 44 Činný a jalový výkon (amplituda 8 mm)

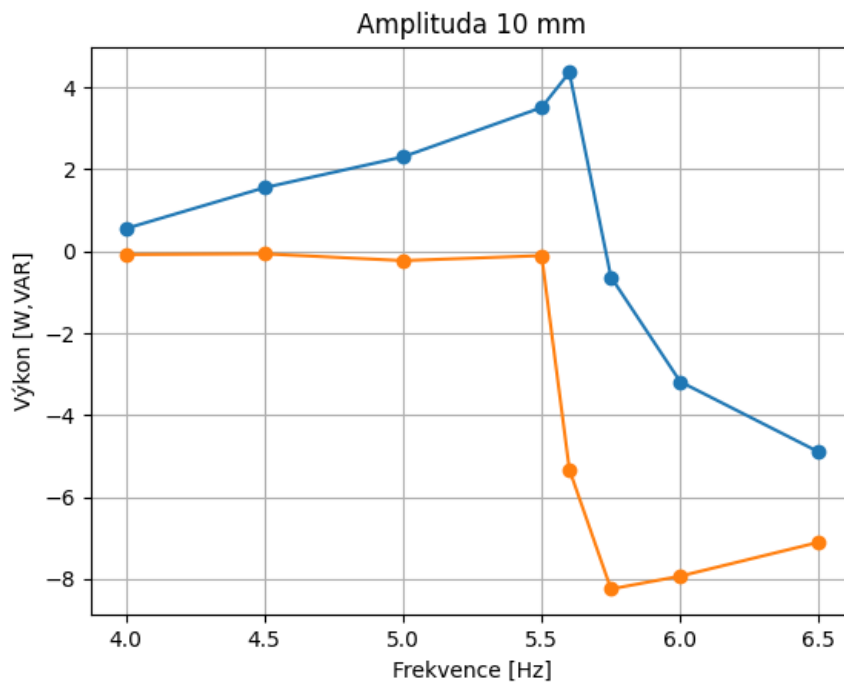


Obrázek 45 Průběh síly (8 mm, 5,5 Hz)

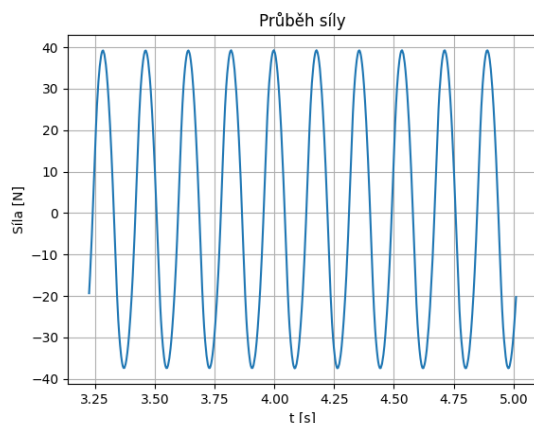


Obrázek 46 FFT síly (8 mm, 5,5 Hz)

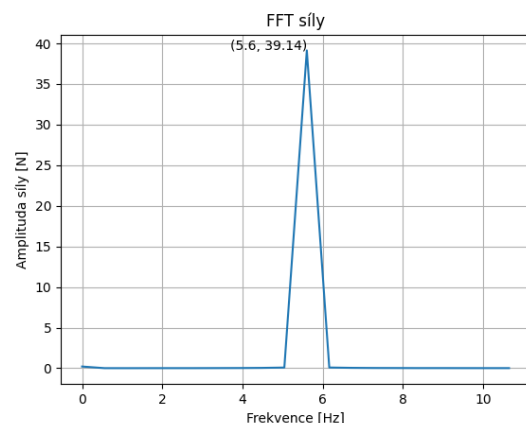
Jako další amplituda výchylky bylo uvažováno 10 mm. Na následujícím obrázku jsou vykresleny činné a jalové výkonu pro tuto amplitudu. V případě této amplitudy neměla síla F_y periodický průběh pouze při frekvenci 4 Hz. Při všech ostatních uvažovaných frekvencích tedy došlo k *lock-in* fenoménu. Nejvyšší činný výkon 4,37 W vykazovala frekvence 5,6 Hz. Průběh síly u frekvence 5,6 Hz a její FFT je zobrazen na obrázcích 48 a 49.



Obrázek 47 Činný a jalový výkon (amplituda 10 mm)

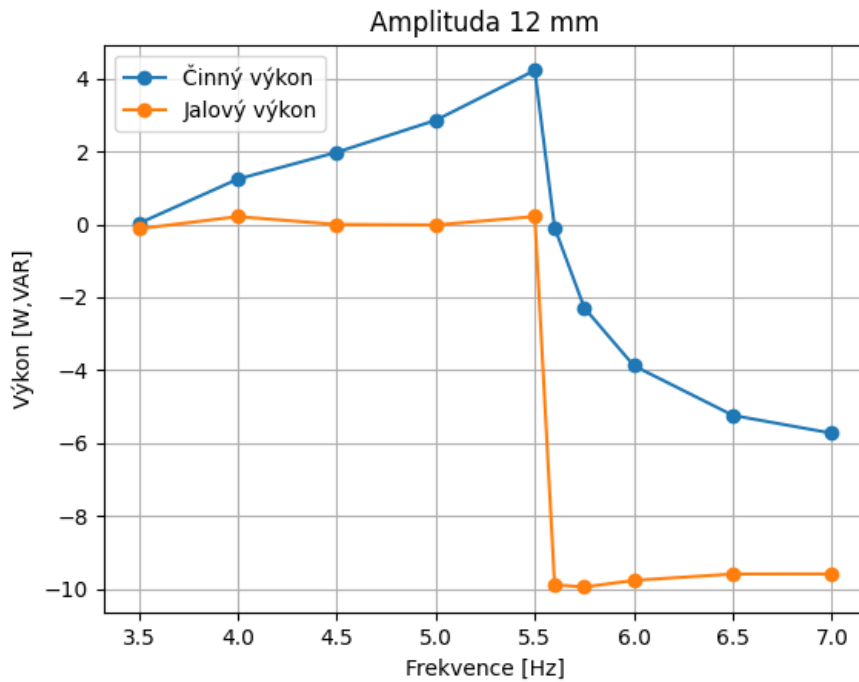


Obrázek 48 Průběh síly (10 mm, 5,6 Hz)

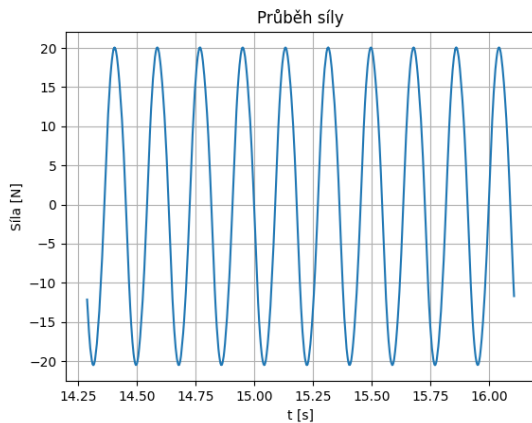


Obrázek 49 FFT síly (10 mm, 5,6 Hz)

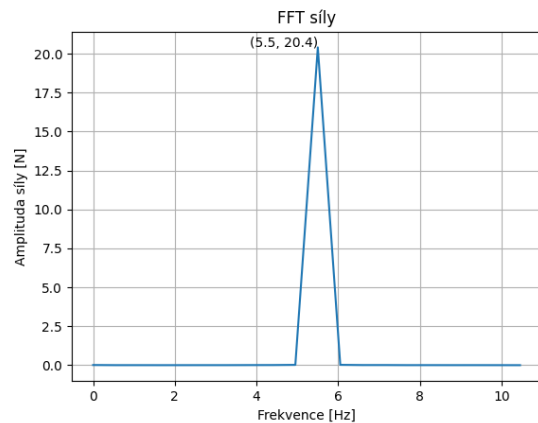
Dála byla počítána amplituda výchylky 12 mm. Výsledné výkony pro tuto amplitudu jsou zobrazeny na obrázku 50. Stejně jako u předchozí amplitudy i v tomto případě měla síla F_y neustálý průběh pouze v případě jedné frekvence a to 3,5 Hz. U všech ostatních síla vykazovala periodický průběh. Nejvyšší činný výkon vyšel 4,23 W u frekvence 5,5 Hz. Obrázky 51 a 52 zobrazují průběh a FFT síly u frekvence 5,5 Hz.



Obrázek 50 Činný a jalový výkon (amplituda 12 mm)

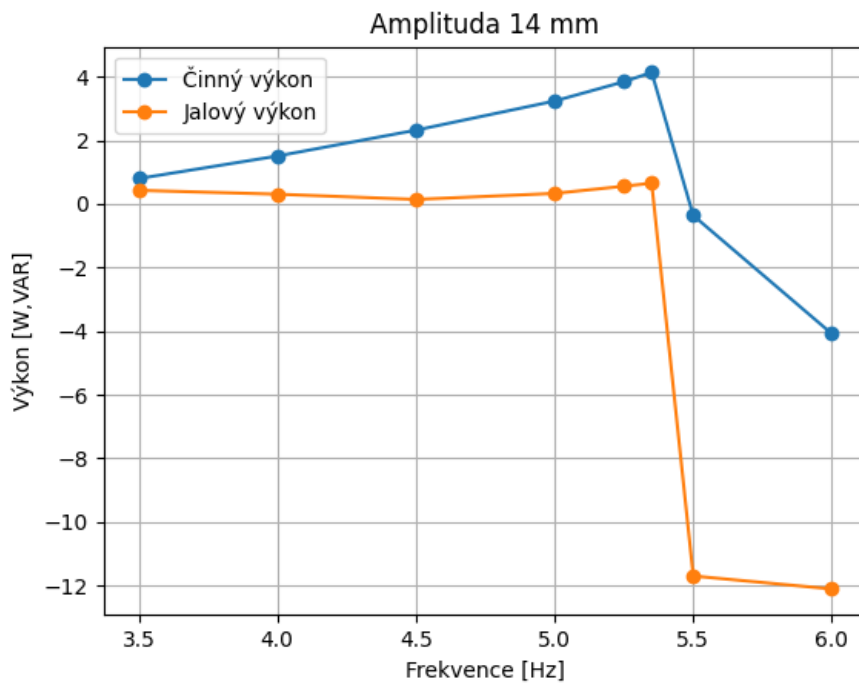


Obrázek 51 Průběh síly (12 mm, 5,5 Hz)

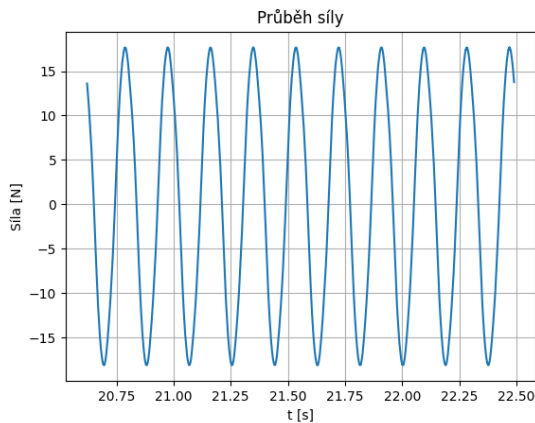


Obrázek 52 FFT síly (12 mm, 5,5 Hz)

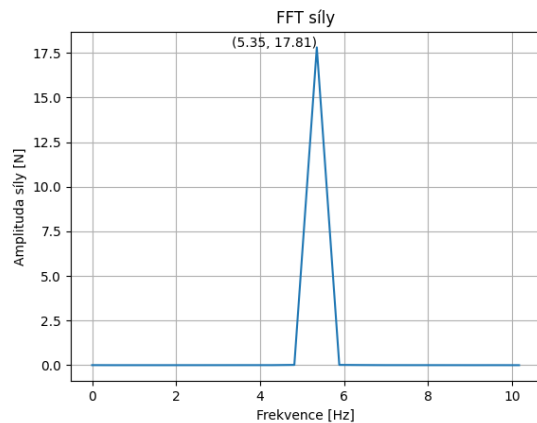
Další uvažovanou amplitudou výchylky bylo 14 mm. Obrázek 53 zobrazuje výkony pro tuto amplitudu. V tomto případě měla síla F_y neustálý průběh jen u frekvence 3,5 Hz. U frekvence 4 Hz k ustálení průběhu síly došlo, ovšem nedocházelo k oscilacím kolem nuly, nýbrž síla kmitala kolem nenulové hodnoty. Nejvyšší činný výkon byl 4,14 W u frekvence 5,35 Hz. Na obrázcích 54 a 55 je vyobrazen průběh síly a její FFT pro frekvenci 5,35 Hz.



Obrázek 53 Činný a jalový výkon (amplituda 14 mm)

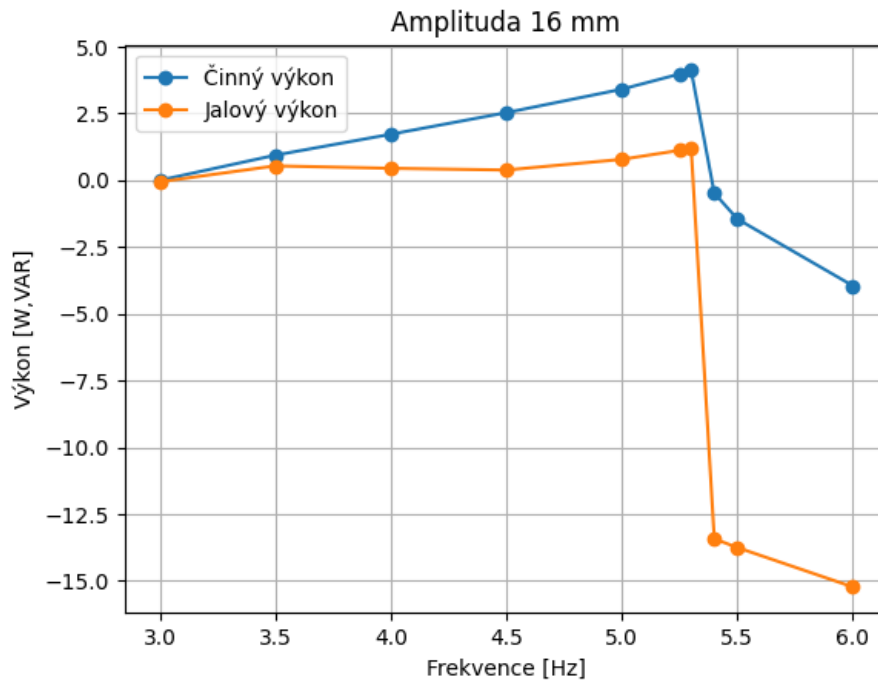


Obrázek 54 Průběh síly (14 mm, 5,35 Hz)

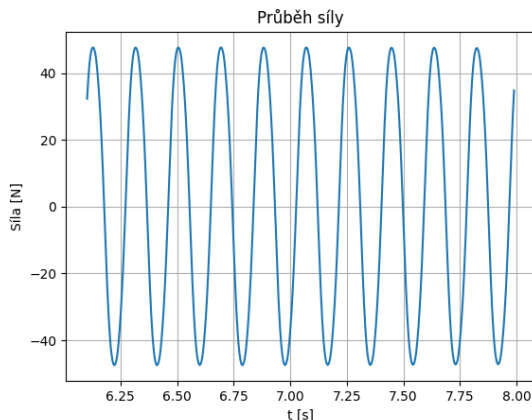


Obrázek 55 FFT síly (14 mm, 5,35 Hz)

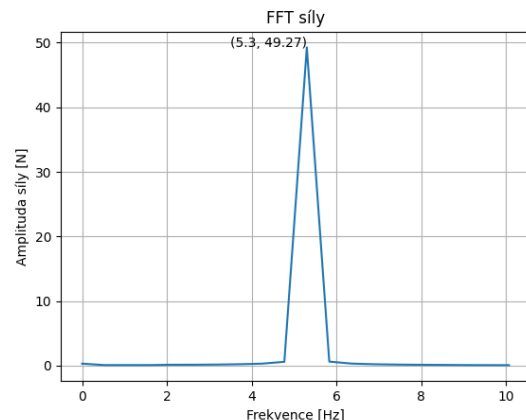
Poslední a největší uvažovanou amplitudou výchylky bylo 16 mm. Následující obrázek zobrazuje průběh výkonů pro tuto největší amplitudu. Pouze u frekvence 3 Hz nedošlo k ustálení průběhu síly F_y . U frekvencí 3,5 a 4 Hz opět došlo k tomu, že síla F_y ustálený průběh sice měla, ale nekmitala kolem nuly. U frekvence 5,3 Hz bylo možno získat činný výkon 4,12 W, což bylo u této amplitudy nejvíc. Obrázky 57 a 58 pak zobrazují průběh síly a její FFT pro frekvenci 5,3 Hz.



Obrázek 56 Činný a jalový výkon (amplituda 16 mm)



Obrázek 57 Průběh síly (16 mm, 5,3 Hz)



Obrázek 58 FFT síly (16 mm, 5,3 Hz)

5.2 Shrnutí výsledků

Z předchozích grafů zobrazující průběhy činných a jalových výkonů je patrné, že u všech počítaných amplitud je průběh výkonů velmi podobný. Činný výkon vždy s frekvencí pomalu roste a poté kolem přibližně 5,5 Hz prudce padá do záporných hodnot. Jalový výkon vykazuje podobný trend jako činný. Do určité frekvence je buď nulový, nebo má velmi malou velikost a poté prudce padá do záporných hodnot.

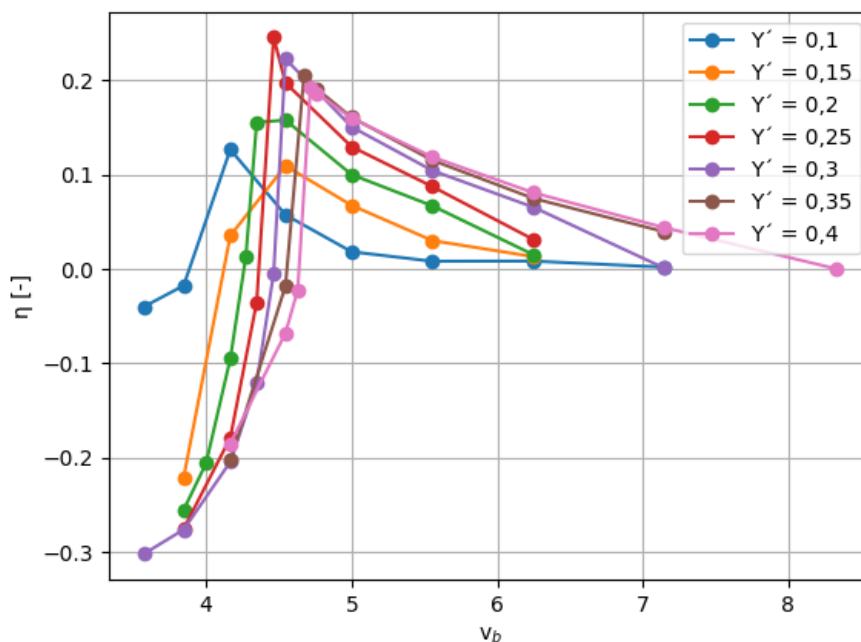
Při vyšších frekvencích, kde jalový výkon vykazoval záporné hodnoty v rádech tisíců a činný výkon byl buď velmi malý, nebo záporný, došlo k tomu, že amplitudy působící vztlakové síly byly až několikrát větší než u nižších frekvencí. Může se zdát, že větší síla je pro získání energie vhodnější, ale bylo tomu přesně naopak. Bylo to způsobeno tím, že síla a rychlost tělesa byly natolik fázově posunuté, že činný výkon vycházel buď velmi malý nebo záporný. Výjimkami byly amplitudy výchylky 10 a 16 mm. Amplituda síly sice narostla, ale fázový posuv zůstal

takový, že činný výkon vyšel kladný, dokonce u dané amplitudy maximální. Toto může být způsobeno buď nepřesností numerické simulace, protože při použití dynamické sítě vzniká malá numerická chyba ve fázovém posuvu síly, nebo je možné, že u každé amplitudy výchylky existuje malý rozsah frekvencí, pro které platí, že amplitudy síly sice prudce narostou, ale zároveň se zachová takový fázový posuv, při kterém bude činný výkon kladný. Bylo by proto vhodné, již zmiňované amplitudy 10 a 16 mm ověřit experimentem, aby bylo možné případně vyloučit chybu ve fázovém posuvu síly.

U všech počítaných amplitud byly podobné průběhy sil F_y . Při nižších frekvencích (přibližně do 4 Hz) nedocházelo k *lock-in* fenoménu, tudíž síla neměla periodický průběh. U ostatních frekvencí, kdy měla síla harmonický, ustálený průběh tedy došlo k tomu, že se Kármánovy víry trhaly na frekvenci předepsané tělesu o což byla v této práci snaha.

Při nejnižších frekvencích u amplitud 14 a 16 mm došlo k tomu, že síla kmitala sice ustáleně, ale kolem nenulové hodnoty k čemuž by nemělo docházet. Možné vysvětlení je, že mohlo dojít k interakci se stěnou domény, což mohlo mít za následek právě toto vychýlení průběhu síly F_y .

Všechny uvedené výsledky v podkapitole výše byly počítány pro válec o průměru 40 mm. Uvažované frekvence pohybu a amplitudy výchylky byly rovněž voleny podle průměru válce (frekvence podle Strouhalova čísla a amplitudy podle grafu na obrázku 22). Je tedy zřejmé, že všechny výsledky uvedené v této práci platí pouze pro válec o průměru 40 mm. Aby bylo možné výsledky aplikovat i na jiné průměry válců byla snaha vytvořit bezrozměrný graf, který je zobrazen na následujícím obrázku.



Obrázek 59 Závislost účinnosti na bezrozměrné rychlosti

Na osu x byla vynesena bezrozměrná rychlost, která má tvar modifikované hodnoty Strouhalova čísla, tedy:

$$v_b = \frac{U}{f \cdot D} \quad (5.1)$$

Kde U představuje rychlost, kterou kapalina natéká na těleso, f je frekvence, s kterou je těleso rozkmitáváno a D je průměr válce. Na osu y pak byla vynesena účinnost systému, která byla definována jako:

$$\eta = \frac{P_{\text{činný}}}{P_{\text{max}}} \quad (5.2)$$

Kde $P_{\text{činný}}$ je spočítaný činný výkon zařízení a P_{max} je maximální výkon, který je možno ze zařízení získat. Tento maximální výkon je definován jako: [39]

$$P_{\text{max}} = \left(\frac{1}{2} \rho \cdot U^3 \cdot (D + 2Y_0) \cdot L \right) \cdot \text{Betzův limit} \quad (5.3)$$

Kde ρ je hustota kapaliny, U je rychlost kapaliny, která těleso obtéká, D je průměr válce, Y_0 je hodnota maximální amplitudy výchylky a L je délka válce do třetího rozměru (v této práci je uvažován 1 m). Betzův limit je hodnota maximální možné účinnosti větrných turbín. I když se v této práci o větrnou turbínu nejedná, lze zde i přesto k výpočtu maximálního výkonu Betzovu konstantu použít. Její hodnota je 0,593. Dále pak každá křivka v grafu reprezentuje jednu konkrétní amplitudu, která je definovaná jako: [39]

$$Y' = \frac{Y_0}{D} \quad (5.4)$$

Kde Y_0 je maximální hodnota amplitudy výchylky a D je průměr válce.

Z grafu na obrázku 59 je patrné, že účinnosti mají pro všechny amplitudy podobný průběh. Všechny kolem hodnoty $St^{-1} = 4$ až 4,5 prudce vyskočí ze záporných hodnot a poté se zvyšující se bezrozměrnou rychlostí postupně klesají až k nule. Jako nejlepší se jeví bezrozměrná amplituda $Y' = 0,25$, kde vyšla nejvyšší účinnost a to konkrétně 25 %. V případě této práce bezrozměrné amplitudě $Y' = 0,25$ odpovídala amplituda $Y_0 = 10$ mm.

6 PŘÍDAVNÉ ÚČINKY

Při stanovení přídatných účinků lze vyjít z rovnice popisující harmonické kmitání:

$$m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + k \cdot y = F(t) \quad (6.1)$$

Kde \ddot{y} je zrychlení tělesa v ose y , \dot{y} je rychlost tělesa v ose y a y je jeho výchylka v ose y , m je hmotnost tělesa, b je tlumení a k je tuhost. $F(t)$ je vztlaková síla působící na těleso vypočítaná v softwaru Ansys Fluent. Rychlost je známá, jelikož byla tělesu předepisována pomocí UDF. Při znalosti rychlosti lze pak jednoduše určit i zrychlení a výchylku:

$$\ddot{y} = \frac{d\dot{y}}{dt} = \frac{d(Y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t))}{dt} = Y_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (6.2)$$

$$\dot{y} = Y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.3)$$

$$y = \int \dot{y} dt = \int Y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t) dt = -Y_0 \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (6.4)$$

Kde Y_0 je hodnota amplitudy výchylky. Nyní lze vytvořit model s uvažováním přídatných účinků:

$$(m + m_p) \cdot \ddot{y} + (b + b_p) \cdot \dot{y} + (k + k_p) \cdot y = 0 \quad (6.5)$$

Kde m_p je přídatná hmotnost, b_p je přídatné tlumení a k_p je přídatná tuhost. Roznásobením závorek a následnou úpravou rovnice 6.5 získáme rovnost:

$$m_p \cdot \ddot{y} + b_p \cdot \dot{y} + k_p \cdot y = -(m \cdot \ddot{y} + b \cdot \dot{y} + k \cdot y) \quad (6.6)$$

Nyní lze za pravou stranu v rovnici 6.6 dosadit $F(t)$, jak vyplývá z rovnice 6.1. Získáme tedy vztah, který dává do souvislosti přídatné účinky s působící silou na těleso:

$$m_p \cdot \ddot{y} + b_p \cdot \dot{y} + k_p \cdot y = -F(t) \quad (6.7)$$

Dosazením rovnic 6.2, 6.3 a 6.4 do rovnice 6.7 dostaneme:

$$m_p \cdot (Y_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) + b_p \cdot (Y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)) + k_p \cdot (-Y_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)) = -F(t) \quad (6.8)$$

Působící sílu $F(t)$ lze rozložit na součet sinu a kosinu jako:

$$F(t) = F_c \cdot \cos(\omega \cdot t) - F_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.9)$$

Kde konstanty F_c a F_s získáme provedením FFT. Konkrétně F_c je reálná složka amplitudy po provedení FFT a F_s je složka imaginární. Toto vyplývá z definice FFT: [42]

$$FFT F(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \cdot e^{-i \cdot \omega \cdot t} dt = \int_{-\infty}^{\infty} F(t) \cdot (\cos(\omega \cdot t) - i \cdot \sin(\omega \cdot t)) dt \quad (6.10)$$

Je tedy patrné, že reálná část odpovídá průběhu kosinu a imaginární sinu. Rozloženou sílu (rovnice 6.9) můžeme dosadit do rovnice 6.8 a dostaneme:

$$m_p \cdot (Y_0 \cdot \omega^2 \cdot \cos(\omega \cdot t)) + b_p \cdot (Y_0 \cdot \omega \cdot \sin(\omega \cdot t)) + k_p \cdot (-Y_0 \cdot \cos(\omega \cdot t)) \\ = -(F_c \cdot \cos(\omega \cdot t) - F_s \cdot \sin(\omega \cdot t)) \quad (6.11)$$

Další úpravou dostaneme tvar:

$$(m_p \cdot Y_0 \cdot \omega^2 - Y_0 \cdot k_p) \cdot \cos(\omega \cdot t) + (b_p \cdot Y_0 \cdot \omega) \cdot \sin(\omega \cdot t) \\ = -(F_c \cdot \cos(\omega \cdot t) - F_s \cdot \sin(\omega \cdot t)) \quad (6.12)$$

Nyní lze psát:

$$(m_p \cdot Y_0 \cdot \omega^2 - Y_0 \cdot k_p) \cdot \cos(\omega \cdot t) = -F_c \cdot \cos(\omega \cdot t) \quad (6.13)$$

$$(b_p \cdot Y_0 \cdot \omega) \cdot \sin(\omega \cdot t) = F_s \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (6.14)$$

Úpravou rovnice 6.14 lze vyjádřit hodnotu přídavného tlumení:

$$b_p = \frac{F_s}{Y_0 \cdot \omega} \quad (6.15)$$

Rovnice 6.13 obsahuje 2 neznámé, a to sice přídavnou hmotnost a tuhost. Nelze tedy přesně určit obě tyto veličiny, proto byla přídavná hmotnost zvolena a podle toho dopočítávána přídavná tuhost. Přídavná hmotnost byla zvolena právě tak, aby těleso v kapalině plavalo. Musí tedy platit, že vztlaková síla působící na těleso musí mít stejnou velikost jako gravitační síla. Můžeme tedy psát:

$$F_{vz} = F_g \quad (6.16)$$

Z Archimédova zákona je vztlaková síla rovna hmotnosti vytlačené kapaliny. Gravitační síla je hmotnost tělesa vynásobena gravitačním zrychlením. Rovnici 6.16 lze tedy rozepsat:

$$\rho_k \cdot V_T = m_p \cdot g \quad (6.17)$$

Kde ρ_k je hustota kapaliny ve které je těleso ponořeno (v této práci to byla voda, tedy $\rho_k=998,2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$), V_T je objem ponořeného tělesa, m_p je přídavná hmotnost a g je gravitační zrychlení. Bylo uvažováno, že délka ponořeného válce do třetího rozměru je $L = 1 \text{ m}$, potom je jeho objem roven:

$$V_T = \frac{\pi \cdot D^2}{4} \cdot L \quad (6.18)$$

Kde D je průměr válce. Z rovnice 6.17 lze tedy určit přídavnou hmotnost:

$$m_p = \frac{\rho_k \cdot V_T}{g} = 0,128 \text{ kg} \quad (6.19)$$

Nyní pokud známe přídavnou hmotnost lze vyjádřit přídavnou tuhost z rovnice 6.13 jako:

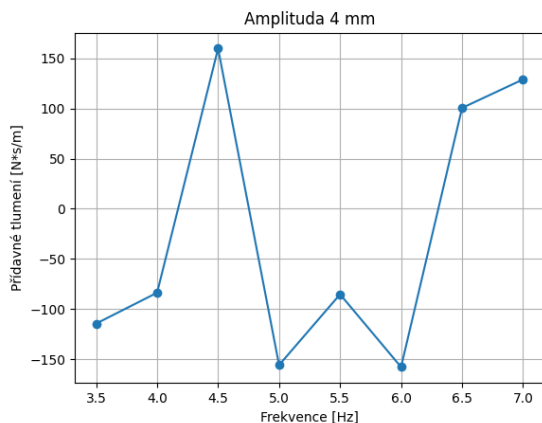
$$k_p = \frac{F_c}{Y_0} + m_p \cdot \omega^2 \quad (6.20)$$

Následující grafy a tabulky zobrazují výsledné vyhodnocené hodnoty přídavných tlumení a tuhostí pro každou počítanou amplitudu výchylky zvlášť.

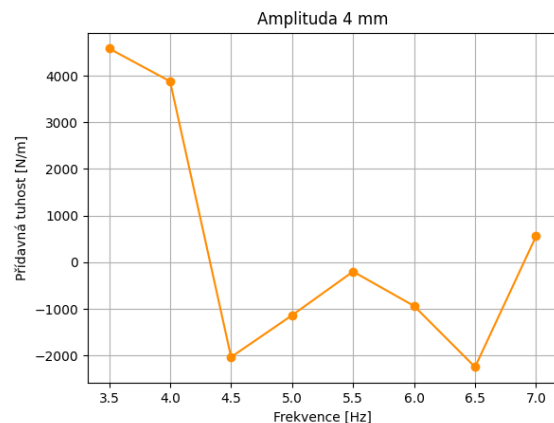
Stejně jako u vyhodnocení výkonů i vyhodnocení přídavných účinků pro amplitudu výchylky 4 mm je do jisté míry nepřesné. Je to způsobeno neperiodickým průběhem síly F_y u většiny počítaných frekvencí. V tabulce 2 jsou uvedeny výsledné hodnoty přídavných tlumení a tuhostí. Grafy na obrázcích 60 a 61 zobrazují průběh těchto přídavných účinků v závislosti na frekvenci. Je možné si všimnout poměrně chaotických průběhů. To je způsobeno právě tím, že síla F_y neměla ustálený průběh tudíž je vyhodnocení přídavných účinků nepřesné.

Tabulka 2 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 4 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$]	k_p [$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$]
3,5	-114,58	4581,59
4	-83,79	3877,56
4,5	159,93	-2033,78
5	-155,93	-1137,12
5,5	-85,34	-195,76
6	-157,89	-938,05
6,5	100,59	-2247,12
7	129,03	556,46



Obrázek 60 Přídavné tlumení (4 mm)

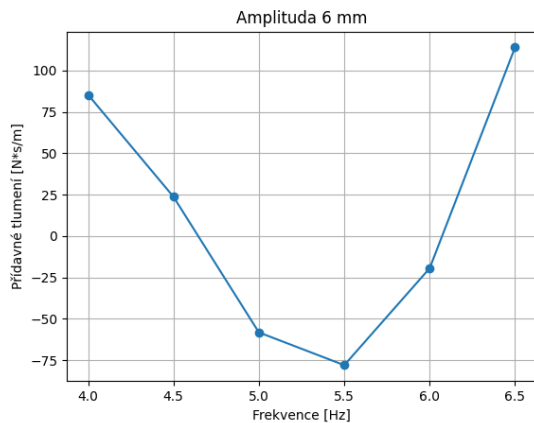


Obrázek 61 Přídavná tuhost (4 mm)

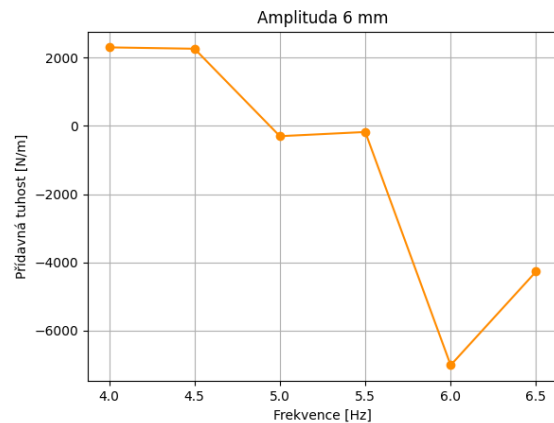
Přídavné účinky pro amplitudu výchylky 6 mm jsou v tabulce 3. Obrázky 62 a 63 zobrazují průběh přídavného tlumení a tuhostí. Pro frekvence 4 a 4,5 Hz mohou být hodnoty do jisté míry nepřesné, neboť síla F_y neměla ustálený průběh. Je možné si všimnout, že od frekvence 5 do 6 Hz vyšlo přídavné tlumení záporné. Znamená to tedy, že v rozsahu těchto frekvencí kapalina těleso netlumí, ale rozkmitává. Je to tedy oblast, ve které jsou činné výkony kladné. Hodnoty přídavné tuhosti vyšly ve většině případů záporné. U frekvencí 5 a 5,5 Hz to může být způsobeno tím, že zvolená přídavná hmotnost je příliš malá. Ovšem u frekvencí 6 a 6,5 Hz jsou hodnoty přídavné tuhosti natolik záporné, že zvolená přídavná hmotnost už nemusí hrát takovou roli a nejspíš se jedná o nestabilní kmitání.

Tabulka 3 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 6 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	k_p [$N \cdot m^{-1}$]
4	85,31	2305,69
4,5	23,66	2265,32
5	-58,24	-300,74
5,5	-78,04	-177,58
6	-19,51	-7021,12
6,5	113,93	-4274,21



Obrázek 62 Přídavné tlumení (6 mm)

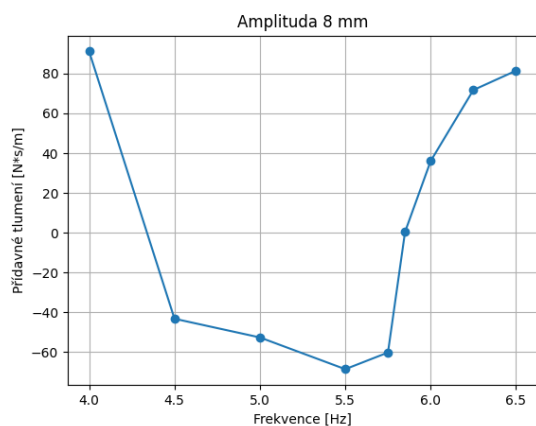


Obrázek 63 Přídavná tuhost (6 mm)

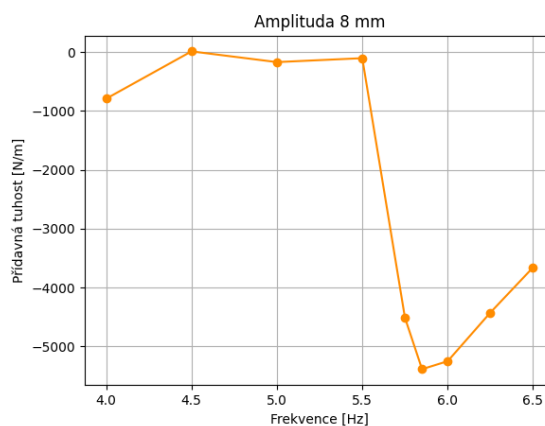
V tabulce 4 jsou vypsány přídavné účinky pro amplitudu výchylky 8 mm. Graficky jsou průběhy přídavného tlumení a tuhostí zobrazeny na obrázcích 64 a 65. Průběh přídavného tlumení odpovídá průběhu činného výkonu. Pouze u nejnižší počítané frekvence, tedy 4 Hz došlo k odchýlení. Důvod této odchylky je to, že síla F_y není periodická, takže vyhodnocení je nepřesné. Záporné přídavné tlumení vyšlo mezi frekvencemi 4,5 až 5,75 Hz. Hodnoty přídavné tuhosti přesně odpovídají jalovým výkonům. Jedinou výjimkou je opět frekvence 4 Hz, kde je síla nestabilní. Záporné hodnoty přídavné tuhosti u frekvencí 5 a 5,5 Hz jsou zase zřejmě způsobeny malou zvolenou přídavnou hmotností. U ostatních frekvencí, kde jsou záporné přídavné tuhosti se pravděpodobně jedná o nestabilní kmitání.

Tabulka 4 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 8 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	k_p [$N \cdot m^{-1}$]
4	91,18	-792,67
4,5	-43,18	11,47
5	-52,57	-170,72
5,5	-68,52	-103,94
5,75	-60,15	-4512,71
5,85	0,45	-5385,03
6	36,06	-5249,75
6,25	71,75	-4424,21
6,5	81,48	-3657,43



Obrázek 64 Přídavné tlumení (8 mm)

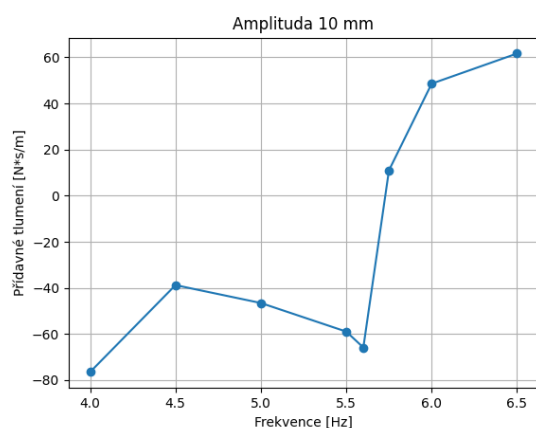


Obrázek 65 Přídavná tuhost (8 mm)

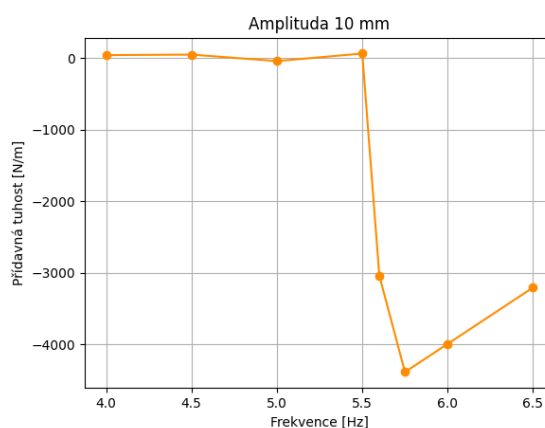
V tabulce 5 jsou vypsány hodnoty přídavných tlumení a tuhostí pro amplitudu výchylky 10 mm. Jediná frekvence, kdy hodnoty mohou být nepřesné je 4 Hz, kde síla F_y neměla ustálený průběh. Mezi frekvencemi 4,5 a 5,6 Hz jsou hodnoty přídavného tlumení záporné. Důvod záporné přídavné tuhosti u frekvence 5 Hz je zřejmě opět malá zvolená přídavná hmotnost. Od frekvence 5,6 Hz je už kmitání nestabilní. Obrázky 66 a 67 zobrazují průběh přídavného tlumení a tuhosti v závislosti na frekvenci.

Tabulka 5 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 10 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [N·s·m ⁻¹]	k_p [N·m ⁻¹]
4	-76,49	45,10
4,5	-38,79	52,31
5	-46,55	-38,44
5,5	-58,95	67,36
5,6	-65,84	-3042,69
5,75	10,99	-4389,75
6	48,59	-3996,01
6,5	61,66	-3207,22



Obrázek 66 Přídavné tlumení (10 mm)

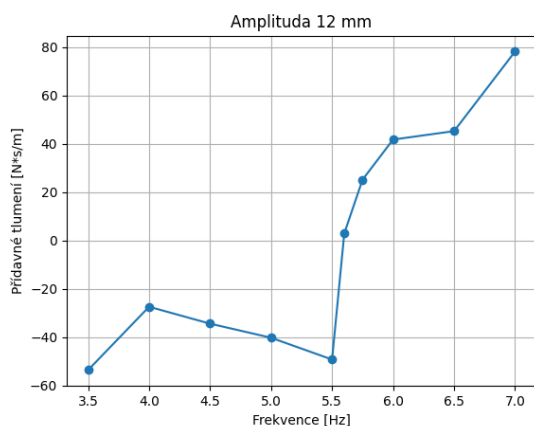


Obrázek 67 Přídavná tuhost (10 mm)

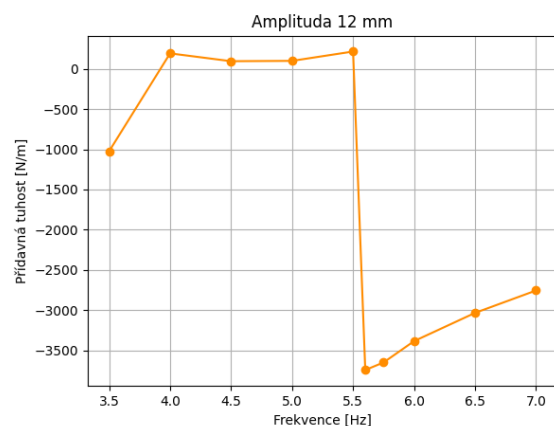
V následující tabulce jsou vypsány hodnoty přídavného tlumení a tuhostí pro amplitudu výchylky 12 mm a obrázky 68 a 69 zobrazují jejich průběhy v závislosti na frekvenci. Průběh síly F_y u frekvence 3,5 Hz je nestabilní, což má za následek nepřenosnost ve vyhodnocení přídavných účinků. Záporné přídavné tlumení je v rozmezí frekvencí 4 až 5,5 Hz. Záporné přídavné tuhosti vyšly jen u frekvencí nad 5,6 Hz, kde se už zřejmě jedná o nestabilní kmitání.

Tabulka 6 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 12 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	k_p [$N \cdot m^{-1}$]
3,5	-53,53	-1024,81
4	-27,37	192,37
4,5	-34,36	95,17
5	-40,18	99,33
5,5	-49,19	215,46
5,6	2,96	-3744,28
5,75	25,21	-3649,92
6	41,78	-3385,02
6,5	45,27	-3033,89
7	78,19	-2755,43



Obrázek 68 Přídavné tlumení (12 mm)

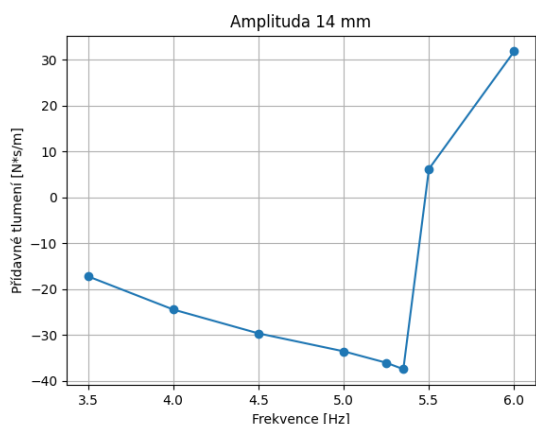


Obrázek 69 Přídavná tuhost (12 mm)

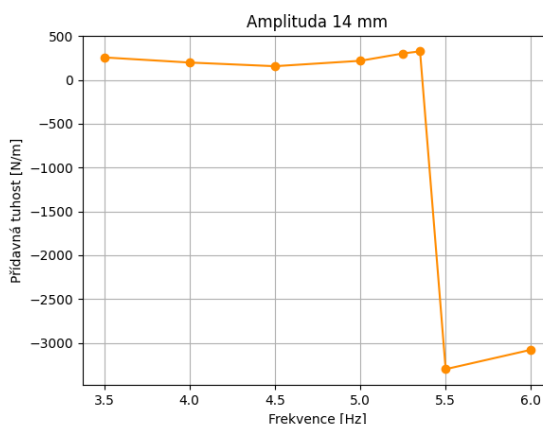
V tabulce 7 jsou výsledné hodnoty přídavných účinků pro amplitudu 14 mm. Obrázky 70 a 71 zobrazují průběh těchto přídavných účinků. Nestabilní průběh síly vykazovala pouze frekvence 3,5 Hz. Ovšem u frekvence 4 Hz síla oscilovala kolem nenulové hodnoty. Vyhodnocení přídavných účinků pro tyto dvě frekvence může být tedy do jisté míry nepřesné. Záporné přídavné tlumení vyšlo mezi frekvencemi 4 až 5,35 Hz. Záporné hodnoty přídavných tuhostí jsou pouze u frekvencí 5,5 a 6 Hz, kde už je tedy kmitání nestabilní.

Tabulka 7 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 14 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [$N \cdot s \cdot m^{-1}$]	k_p [$N \cdot m^{-1}$]
3,5	-17,22	256,29
4	-24,45	197,99
4,5	-29,65	156,31
5	-33,56	217,81
5,25	-36,05	301,59
5,35	-37,45	325,27
5,5	6,17	-3299,91
6	31,78	-3078,43



Obrázek 70 Přídavné tlumení (14 mm)

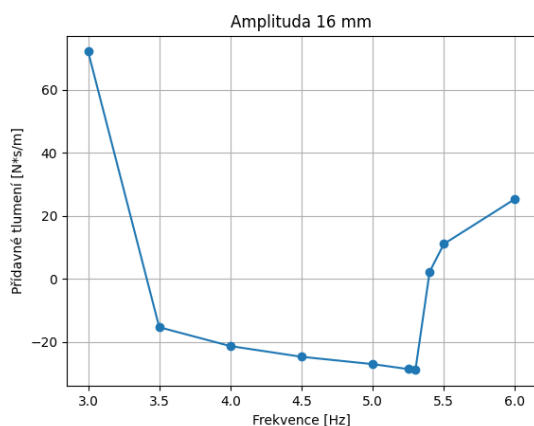


Obrázek 71 Přídavná tuhost (14 mm)

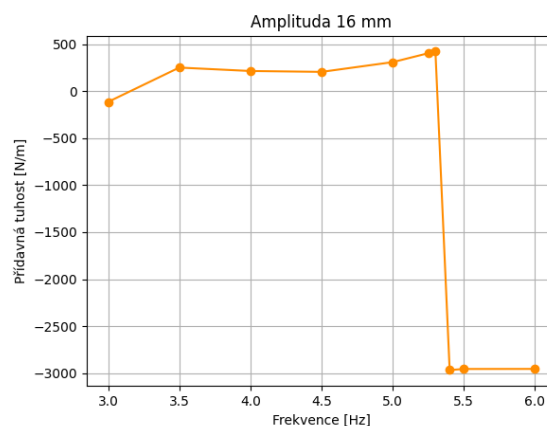
Přídavné účinky pro poslední, největší počítanou amplitudu výchylky, tedy 16 mm jsou vypsány v tabulce 8. Jejich průběh v závislosti na frekvenci je pak na obrázcích 72 a 73. Nestabilní průběh síly je pouze u frekvence 3 Hz, ovšem u frekvencí 3,5 a 4 Hz opět došlo k tomu, že síla nekmitá kolem nuly, ale kolem nenulové hodnoty, proto můžou být hodnoty přídavných účinků pro tyto frekvence nepřesné. Mezi frekvencemi 3,5 a 5,3 Hz jsou přídavné tlumení záporné. Záporné přídavné tuhosti pak vyšly od frekvence 5,4 Hz výše, kde už je kmitání zřejmě nestabilní.

Tabulka 8 Přídavné tlumení a přídavná tuhost (amplituda 16 mm)

Frekvence [Hz]	b_p [N·s·m ⁻¹]	k_p [N·m ⁻¹]
3	72,19	-115,05
3,5	-15,40	249,93
4	-21,39	213,60
4,5	-24,79	204,31
5	-27,12	307,95
5,25	-28,70	402,05
5,3	-28,99	420,64
5,4	2,25	-2966,32
5,5	11,06	-2955,23
6	25,36	-2954,58



Obrázek 72 Přídavné tlumení (16 mm)



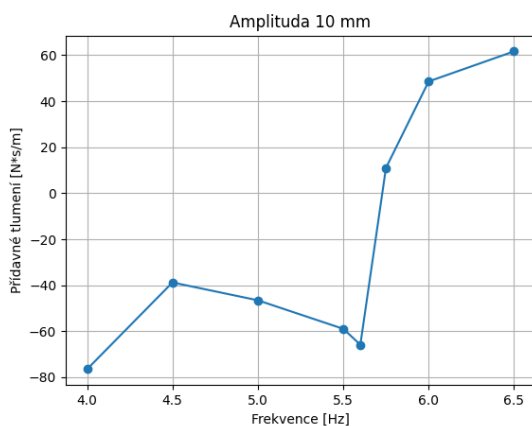
Obrázek 73 Přídavná tuhost (16 mm)

6.1 Zhodnocení

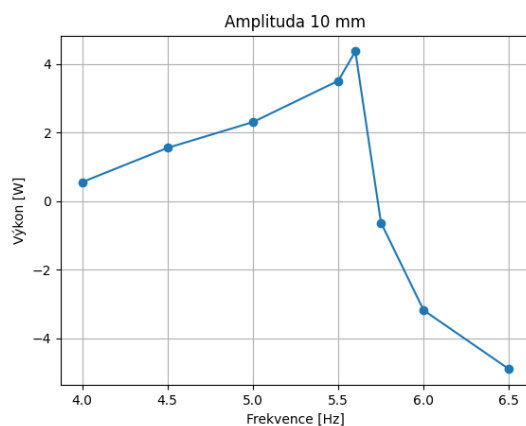
Jak je z předchozích grafů patrné, průběh přídavného tlumení v závislosti na frekvenci má stejný průběh jako činné výkony, akorát převrácený kolem osy frekvence (osa x), znamená to tedy, že u frekvencí, kde je činný výkon kladný je záporné přídavné tlumení. Jediné výjimky, kdy toto nemusí platit jsou nízké frekvence, které byly tělesu předepsány. Je to způsobeno tím, že kmitání na těchto nízkých frekvencích není stabilní, tudíž nedochází k periodickému průběhu síly F_y , a tím pádem je i vyhodnocení jak výkonů, tak přídavných účinků nepřesné. Nepřesnost je způsobena neperiodickým průběhem síly F_y , takže nelze provést přesně FFT, skrze kterou byly vyhodnocovány jak výkony, tak přídavné účinky. Na obrázcích 74 a 75, které zobrazují průběhy činného výkonu a přídavného tlumení pro amplitudu 10 mm, si je možno všimnout podobnosti v jejich průbězích.

Pokud je přídavné tlumení záporné, znamená to, že kapalina těleso netlumí, nýbrž budí. Je tedy logické, že u frekvencí, kdy je přídavné tlumení záporné vyšel kladný činný výkon, protože kapalina předává energii tělesu. Pokud je přídavné tlumení kladné, kapalina těleso tlumí, a tím pádem u těchto frekvencí vychází i záporné činné výkony.

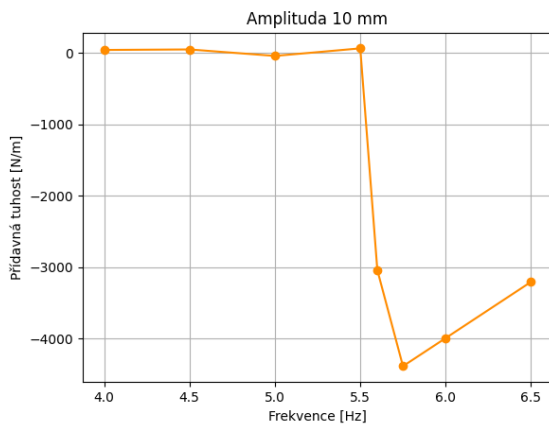
Průběhy přídavné tuhosti přesně odpovídaly průběhům jalových výkonů (obrázky 76 a 77). Záporné hodnoty přídavné tuhosti indikují, že se jedná o nestabilní kmitání. Přídavnou tuhost ale do jisté míry ovlivnila zvolená hodnota přídavné hmotnosti. Z rovnice 6.20 vyplývá, že čím větší bude přídavná hmotnost tím větší bude i přídavná tuhost. Je tedy možné, že byla zvolena příliš malá přídavná hmotnost, což má pak za následek záporné hodnoty přídavné tuhosti. V případě frekvencí, kdy se hodnoty přídavné tuhosti pohybují v řádech tisíců v záporných hodnotách už nemusí mít přídavná hmotnost takový vliv a nejspíš se jedná o nestabilní kmitání.



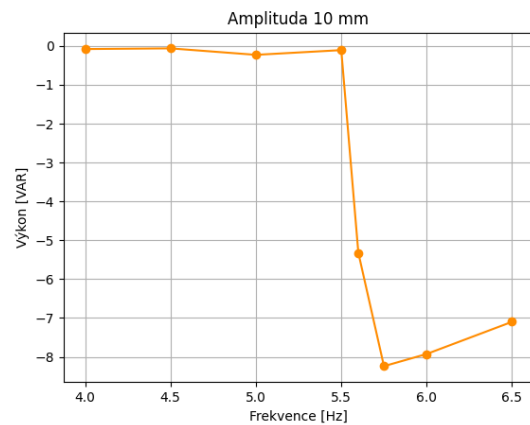
Obrázek 74 Přídavné tlumení (10 mm)



Obrázek 75 Činný výkon (10 mm)



Obrázek 76 Přídavná tuhost (10 mm)



Obrázek 77 Jalový výkon (10 mm)

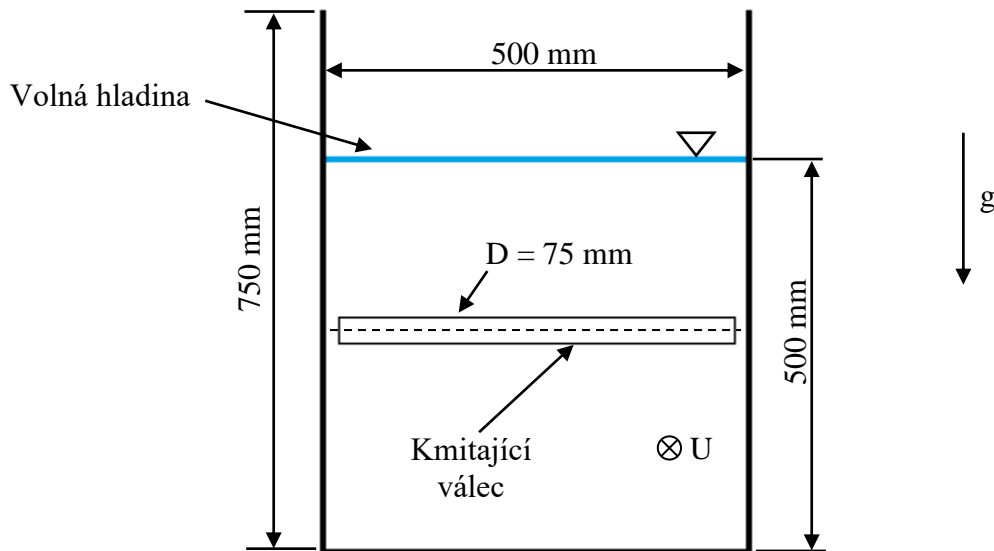
Existuje více způsobů, jak přídavné účinky určit. Z rovnice 6.14 je patrné, že přídavné tlumení je dáno jednoznačně, jelikož se jedná o rovnici o jedné neznámé. Určení přídavné tuhosti a hmotnosti už není tak jednoznačné, protože rovnice 6.13 obsahuje 2 neznámé. V této práci byl zvolen způsob, při kterém se hodnota přídavné hmotnosti zvolí a přídavná tuhost se pak dopočítá. Tato metoda byla zvolena s ohledem na experiment, při kterém bude snaha, aby na těleso v kapalině nepůsobily žádné statické síly. To znamená, že gravitační síla se musí rovnat vztlakové. Při takto zvolené přídavné hmotnosti pak už bylo jednoduché dopočítat přídavnou tuhost pružin, na kterých by mělo být upevněno těleso při experimentu.

Předem bylo očekáváno, že průběhy přídavných tlumení a činných výkonů a zároveň také průběhy přídavných tuhostí a jalových výkonů budou podobné. Vyplývá to z definice výkonů. Činný výkon je síla promítnuta do rychlosti, a jelikož byla rychlost v UDF zadána se sinem, jedná se tedy o průmět síly do průběhu sinu. Jalový výkon je naopak průmět síly do průběhu kosinu. Vyhodnocování přídavných účinků pak probíhalo s využitím FFT, díky které bylo možné rozdělit průběh síly na součet průběhů sinu a kosinu. Přídavné tlumení pak bylo vyhodnocováno z průběhu sinu a přídavná tuhost z kosinu. Je tedy patrné, že činný výkon a přídavné tlumení vychází ze sinové části průběhu síly a jalový výkon a přídavná tuhost zase z kosinové složky. Toto je důvod, proč jsou jejich průběhy stejné.

7 EXPERIMENT

V této části práce bude popsán experiment, který by měl sloužit k ověření výsledků numerických simulací. Experiment je realizován v hydraulické laboratoři na odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana v Brně. Jelikož vyhodnocení experimentu nebylo hlavním cílem práce, bude v této kapitole jen popsána již postavená měřicí trať a také způsob provedení experimentu.

Nejdříve byl postaven žlab, do kterého je umístěn kmitající válec. Jedná se o žlab s volnou hladinou a obdélníkovým průřezem s rozměry 50 cm na šířku a 70 cm na výšku. Voda sahá jen do výšky 50 cm, a to z důvodu, aby nedocházelo k přetékání. Schéma řezu žlabem je na obrázku 78. Do tohoto kanálu je umístěn kmitající válec s průměrem 75 mm a délkou 45 cm. Válec tedy není přes celou šířku žlabu, ale na každé straně je vůle 25 mm. Válec je umístěn tak, že jeho osa je kolmá na směr proudění kapaliny a jeho průřez je rovnoběžný s gravitačním zrychlením.



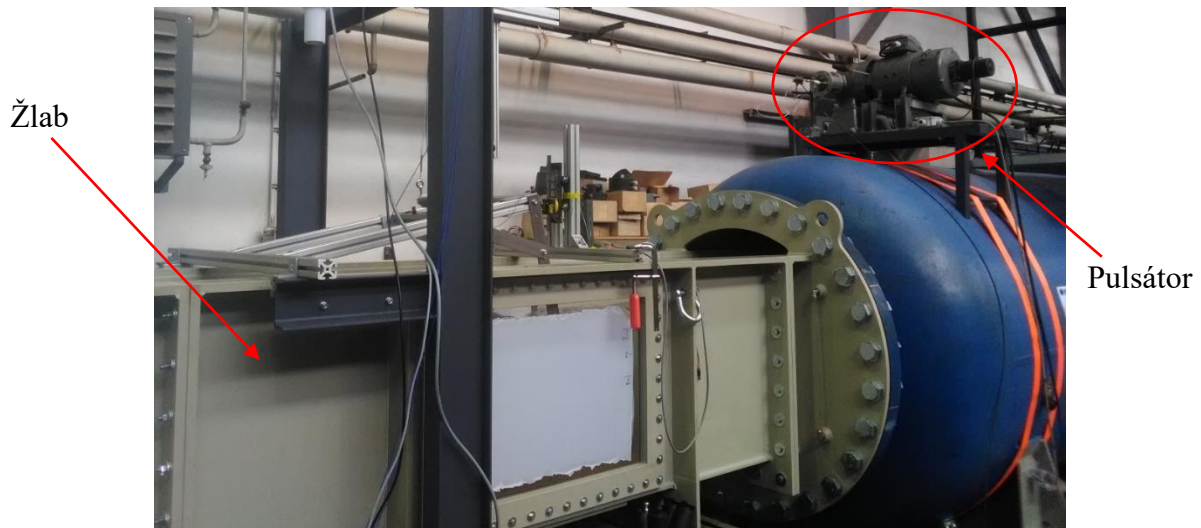
Obrázek 78 Schéma řezu žlabem

Maximální rychlost proudění je limitována podávacím čerpadlem, které zvládne průtok $Q = 250 \text{ l} \cdot \text{s}^{-1}$. Pak je tedy maximální rychlost proudění:

$$U = \frac{Q}{S} = \frac{0,25}{0,5 \cdot 0,5} = 1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1} \quad (7.1)$$

Teoreticky by čerpadlo zvládlo i větší průtoky, ale bylo dohodnuto, že nejvyšší rychlost proudění kapaliny bude ponechána $1 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$.

Stejně jako v této práci i při experimentu je kmitajícímu tělesu předepsán harmonický pohyb pomocí pulsátoru. Měřená je síla působící na válec a jeho výchylka. Pomocí naměřené vztahové síly a známé rychlosti tělesa pak jsou vyhodnoceny výkony stejným způsobem jako v této práci. Vzhledem k tomu, že válec při experimentu má jiné rozměry než válec při numerických simulacích, hodnoty výkonů budou rozdílné. Proto byl vytvořen bezrozměrný graf, aby bylo možné výsledky z experimentu a CFD simulací porovnat.



Obrázek 79 Realizace experimentu

Na obrázku 79 je fotka realizace experimentu v hydraulické laboratoři. V horní části je pulsátor s klikovým mechanismem, kde je možno nastavovat zdvih od 0 do 40 mm. Tímto mechanismem je vytvářen kmitavý pohyb, který je pomocí lanka přenesen na pohyb válce v tekutině. Ukotvení lanka na pohybujícím se mechanismu válce je přes tenzometrický snímač síly, kde bude měřena celková síla působící na mechanismus. Část této měřené síly bude vliv proudící kapaliny na válec. Poloha válce je měřena pomocí lankového dálkoměru.

Jak již bylo zmíněno, vyhodnocení experimentu není hlavním cílem práce, proto nebude provedeno. Samotný experiment bude tématem pro další práce a v současné době na něm pracují zaměstnanci odboru fluidního inženýrství Viktora Kaplana.

ZÁVĚR

Úvodní tři kapitoly této práce byly věnovány rešerši. První kapitola se věnovala hydrokinetickým systémům. Jedná se o systémy, které využívají kinetickou energii proudící kapaliny, kterou přeměňují na mechanickou. Blíže byly popsány hydrokinetické systémy s turbínou a bez turbíny. V druhé kapitole byly rozebrány a přiblíženy lineární a nelineární oscilátory. Třetí kapitola se zabírala vibracemi indukovanými víry. Právě trhání vírů v úplavu za tělesem má za následek působení síly na těleso ve směru kolmém na směr proudění, proto bylo třeba i tuto problematiku přiblížit v rešeršní části.

Další kapitoly už se věnovaly praktické části práce. Hlavním cílem této práce bylo provést numerické simulace ve 2D obtékaného válcového tělesa v proudu kapaliny. Veškeré simulace byly prováděny v softwaru Ansys Fluent. Tělesu byl pomocí UDF předepsán harmonický pohyb v ose kolmé na směr proudění. Měněny byly amplitudy výchylky a frekvence pohybu. Cílem simulací bylo určit silové účinky působící na těleso.

Po provedení numerických simulací byly určovány činné a jalové výkony. K určení těchto výkonů bylo potřeba znát vztlakovou sílu působící na těleso a rychlost tělesa ve stejné ose, ve které působí vztlaková síla. Rychlost byla předem známá, protože byla zadaná v UDF a síla byla dopočítána v Ansys Fluent. Významnější z hlediska využitelnosti je výkon činný. Jedná se o výkon, který lze ze zařízení odebrat a využít jej dále k výrobě elektřiny. Jalový výkon využít nelze, ale souvisí s naladěním tělesa. Cílem bylo určit takovou frekvenci a amplitudu výchylky při kterých bude činný výkon největší. Po zpracování dat ze simulací vyplynulo, že největší činný výkon 4,37 W se dá získat u amplitudy výchylky 10 mm. Druhý největší činný výkon vyšel u amplitudy 12 mm (4,23 W) a třetí u amplitudy 14 mm (4,14 W). Je tedy patrné, že činný výkon je maximální u amplitudy výchylky 10 mm a poté už s rostoucí výchylkou klesá.

Veškeré vyhodnocené výkony se týkaly pouze jednoho konkrétního válce, pro který byly prováděny numerické simulace v této práci. Aby tato práce mohla posloužit jako podklad k dalšímu výzkumu, bylo třeba uvést bezrozměrné výsledky, aby je bylo možné aplikovat i na tělesa jiných rozměrů. Místo činného výkonu tedy byla zavedena účinnost, dále byly zavedeny bezrozměrné amplitudy (amplituda výchylky podělena průměrem tělesa) a také bezrozměrné rychlosti ve tvaru modifikovaného Strouhalova čísla. Z těchto veličin pak byl vytvořen graf obsahující bezrozměrné výsledky pro všechny počítané amplitudy výchylky a frekvence pohybu.

Dále byly vyhodnocovány přídavné účinky. Skrze přídavné tlumení je odebírán činný výkon, proto je důležité jej znát. Přídavná hmotnost od kapaliny byla volena s ohledem na experiment, při kterém bude snaha, aby těleso v kapalině pouze plavalo a nepůsobily na něho žádné statické síly. Dále pak byla dopočítána přídavná tuhost pružin, na kterých by těleso mělo být během experimentu připevněno. Přídavné účinky tedy byly vyhodnoceny hlavně proto, aby se zjistilo, jak má být těleso při experimentu uloženo, aby na něj působila právě taková síla, jaká byla napočítána v Ansys Fluent, a tudíž i kmitalo stejně, jak mu bylo v Ansys Fluent přepsáno. Průběh přídavného tlumení odpovídal průběhu činného výkonu až na to, že jejich hodnoty byly obrácené. Znamená to tedy, že kde byl činný výkon kladný, tam bylo přídavné tlumení záporné. Toto bylo předem očekáváno, protože pokud je přídavné tlumení záporné, kapalina těleso netlumí, ale rozkmitává, takže mu předává energii, a tím pádem činný výkon musí být kladný. Průběh přídavné tuhosti přesně odpovídal průběhu jalového výkonu.

Poslední kapitola byla věnována experimentu, který měl sloužit k ověření výsledků simulací. Jelikož ale nebylo v časových možnostech laboratoře realizovat experiment do doby, kdy by

ještě bylo možné stihnout vyhodnotit výsledky, byla v poslední kapitole jen popsána již postavená měřicí trať a způsob, jakým se experiment provádí.

V této práci byl zkoumán vliv amplitudy výchylky a frekvence na činné a jalové výkony zařízení. Jelikož je *energy harvesting* v současné době velmi rozsáhlé téma existuje proto i mnoho dalších možností výzkumu a také numerických simulací na toto téma. Například by bylo možné zkoumat jiné tvary tělesa než válec. Dále by bylo možné tělesu dovolit rotaci kolem své osy. Důležité je také zkoumání vlivu Reynoldsova čísla. Je ovšem nutné si uvědomit, že numerické simulace slouží pouze jako podklad k výzkumu a měly by být vždy ověřovány experimentem.

V současné době je kladen velký důraz na obnovitelné zdroje energie, mezi které patří i *energy harvesting*. Je tedy zřejmé, že se jedná o aktuální téma, tudíž se dá předpokládat, že ve výzkumu bude pokračováno. Tato práce tedy může posloužit i jako podklad k dalšímu zkoumání problematiky získávání energie pomocí kmitajícího tělesa.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] IBRAHIM, Wan, Mohd MOHAMED, Raja ISMAIL, Puiki LEUNG, Wei XING a Akeel SHAH. Hydrokinetic energy harnessing technologies: A review. *Energy Reports* [online]. 2021, (7), 2021-2042 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z: doi:doi.org/10.1016/j.egy.2021.04.003
- [2] CARDONA-MANCILLA, Cristian, Jorge SIERRA DEL RÍO, Edwin CHICA-ARRIETA a Diego HINCAPIÉ-ZULUAGA. *Horizontal axis hydrokinetic turbines: A literature review* [online]. *Tecnología y ciencias del agua*, 2018, [cit. 2024-03-01]. ISSN 2007-2422. Dostupné z: https://www.scielo.org.mx/scielo.php?pid=S2007-24222018000300180&script=sci_arttext&lng=en
- [3] MAIKA, Nosare, Khatamifar MEHDI a Mehdi KHATAMIFAR. Přehled systémů gravitačních vodních vírových vodních turbín pro výrobu vodní energie. *Energies* [online]. 2023, 2023(16) [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/en16145394>
- [4] NAQVI, Areeba, Ahsan ALI, Wael ALTABEY a Sallam KOURITEM. Energy Harvesting from Fluid Flow Using Piezoelectric Materials: A Review. *Energies* [online]. 2022, (15) [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.3390/en15197424>
- [5] LI, Zhiyuan, Shengxi ZHOU a Zhichun YANG. Recent progress on flutter-based wind energy harvesting. *International Journal of Mechanical System Dynamics* [online]. 2022, (2), 82-98 [cit. 2024-03-09]. ISSN 2767-1402. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1002/msd2.12035>
- [6] Energy harvesting from flutter. In: *CRIACIV* [online]. 2017 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.criaciv.com/energy-harvesting-flutter/>
- [7] BARRERO-GIL, Antonio, Santiago PINDADO a Sergio AVILA. Extracting energy from Vortex-Induced Vibrations: A parametric study. *Applied Mathematical Modelling* [online]. 2012, (36), 3153-3160 [cit. 2024-03-09]. ISSN 0307904X. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.apm.2011.09.085>
- [8] LEE, Yin, Yi QI, Guangya ZHOU a Kim LUA. Vortex-induced vibration wind energy harvesting by piezoelectric MEMS device in formation. *Scientific Reports* [online]. 2019, (9) [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1038/s41598-019-56786-0>
- [9] BERNITSAS, Michael, 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 Ocean Engineering and Science* [online]. 2006(2), 619-637 [cit. 2024-05-15]. ISSN 2468-0133. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1115/OMAE2006-92645>
- [10] KIM, Eun, Hai SUN, Hongrae PARK, Sung-chul SHIN, Eun CHAE, Ryan OUDERKIRK a Michael BERNITSAS. Development of an alternating lift converter utilizing flow-induced oscillations to harness horizontal hydrokinetic energy. *Renewable and Sustainable Energy Reviews* [online]. 2021, (145) [cit. 2024-03-09]. ISSN 13640321. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111094>
- [11] ZHAO, Daoli, Xinyu HU, Ting TAN, Zhimiao YAN a Wenming ZHANG. Piezoelectric galloping energy harvesting enhanced by topological equivalent aerodynamic design. *Energy Conversion and Management* [online]. 2020, (222) [cit.

- 2024-03-09]. ISSN 01968904. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.enconman.2020.113260>
- [12] LI, Hai-Tao, He REN, Fan CAO a Wei-Yang QIN. Improving the galloping energy harvesting performance with magnetic coupling. *International Journal of Mechanical Sciences* [online]. 2023, (237) [cit. 2024-03-09]. ISSN 00207403. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ijmecsci.2022.107785>
- [13] LIANG, Shengping, Jiasong WANG a Zhongming HU. VIV and galloping response of a circular cylinder with rigid detached splitter plates. *Ocean Engineering* [online]. 2018, (162), 176-186 [cit. 2024-03-09]. ISSN 00298018. Dostupné z:
doi:<https://doi.org/10.1016/j.oceaneng.2018.05.026>
- [14] ANCHORDOQUI, Luis. Simple Harmonic Motion. In: *Luis Anchordoqui's WebPage* [online]. New York: Lehman College, 2021 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z:
<https://www.lehman.edu/faculty/anchordoqui/chapter23.pdf>
- [15] CLINE, Douglas. *Variational Principles in Classical Mechanics* [online]. University of Rochester: Libre Texts, 2017 [cit. 2024-03-31]. ISBN 978-0-9988372-4-6. Dostupné z:
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Variational_Principles_in_Classical_Mechanics_\(Cline\)](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Variational_Principles_in_Classical_Mechanics_(Cline))
- [16] Superposition of Harmonic Oscillations. In: SVIRIN, Alex. *Math24* [online]. 2009 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://math24.net/superposition-harmonic-oscillations.html>
- [17] GUSTAVSON, Grant. Forced Undamped Oscillations. In: *Grant B. Gustafson at math.utah.edu* [online]. Utah: University of Utah, 2008 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z:
<https://www.math.utah.edu/~gustafso/f2010/forcedVibrationsUndamped2008.pdf>
- [18] LEBL, Jiří. *Differential Equations for Engineers* [online]. Oklahoma State University: Libre Texts, 2024 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z:
[https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Differential_Equations_for_Engineers_\(Lebl\)](https://math.libretexts.org/Bookshelves/Differential_Equations/Differential_Equations_for_Engineers_(Lebl))
- [19] POGOSYAN, Dmitri. Lecture 8: Damped and Forced Oscillations. In: *Dmitri Pogosyan* [online]. Alberta: University of Alberta [cit. 2024-02-22]. Dostupné z:
https://sites.ualberta.ca/~pogosyan/teaching/PHYS_130/FALL_2010/lectures/lect8/lecture8.html
- [20] DOURMASHKIN, Peter. *Classical Mechanics* [online]. Massachusetts Institute of Technology: Libre Texts, 2024 [cit. 2024-02-22]. Dostupné z:
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_\(Dourmashkin\)](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Classical_Mechanics_(Dourmashkin))
- [21] LIKHAREV, Konstantin K. *Essential Graduate Physics - Classical Mechanics* [online]. 1. Stony Brook University: IOP Publishing, 2018 [cit. 2024-03-31]. ISBN 978-0750313995. Dostupné z:
[https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Essential_Graduate_Physics_-_Classical_Mechanics_\(Likharev\)](https://phys.libretexts.org/Bookshelves/Classical_Mechanics/Essential_Graduate_Physics_-_Classical_Mechanics_(Likharev))
- [22] WHEELER, Nicholas. *Nonlinear oscillators* [online]. In: . [cit. 2024-03-31]. Dostupné z:
<https://www.reed.edu/physics/faculty/wheeler/documents/Sophomore%20Class%20Notes%202007/Chapter%205.pdf>
- [23] KANAMARU, Takashi. Duffing oscillator. *Scholarpedia* [online]. 2008, 3(3), 6327 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi:doi:10.4249/scholarpedia.6327
- [24] DOBRUSHKIN, Vladimir. *Duffing Oscillators* [online]. In: . [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.cfm.brown.edu/people/dobrush>

- [25] KANAMARU, Takashi. Van der Pol oscillator. *Scholarpedia* [online]. 2007, 2(1), 2202 [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: doi:doi:10.4249/scholarpedia.2202
- [26] DOBRUSHKIN, Vladimir. *Van der Pol Equations* [online]. In: . [cit. 2024-03-31]. Dostupné z: <https://www.cfm.brown.edu/people/dobrush/am34/Mathematica/ch3/pol.html>
- [27] BORAZJANI, Iman a Fotis SOTIROPOULOS. Vortex-induced vibrations of two cylinders in tandem arrangement in the proximity–wake interference region. *Journal of Fluid Mechanics* [online]. 2009, (621), 321-364 [cit. 2024-03-09]. ISSN 14697645, 00221120. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1017/S0022112008004850>
- [28] JAIN, Anil B. *Vortex-Induced Vibrations of an Inclined Cylinder in Flow* [online]. Massachusetts, 2012 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://scholarworks.umass.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2032&context=theses>. Masters theses. University of Massachusetts Amherst. Vedoucí práce Yahya Modarres-Sadeghi.
- [29] DERKSEN, Adriaan, Mikko FOLKERSMA a Axelle VIRÉ. *Numerical simulation of a forced and freely-vibrating cylinder at supercritical Reynolds numbers* [online]. 2019 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/333751600_Numerical_simulation_of_a_forced_and_freely-vibrating_cylinder_at_supercritical_Reynolds_numbers
- [30] MENDEZ, Miguel, Massimiliano DI NARDO a Carlo BENOCCI. *Running FineOpen43 Simulations at VKI: A tutorial and a collection of scripts* [online]. 2017 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: doi:10.13140/RG.2.2.19214.31041
- [31] Vortex induced vibration. In: *Ivory Research* [online]. 2019 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: <https://www.ivoryresearch.com/samples/vortex-induced-vibration/>
- [32] MORGENTHAL, Guido. *Fluid-Structure Interaction in Bluff-Body Aerodynamics and Long-Span Bridge Design: Phenomena and Methods* [online]. 2000 [cit. 2024-03-09]. Dostupné z: https://www.researchgate.net/publication/238696727_Fluid-Structure_Interaction_in_Bluff-Body_Aerodynamics_and_Long-Span_Bridge_Design_Phenomena_and_Methods
- [33] BLEVINS, Robert D. *Flow-induced vibration*. 2. New York: Van Nostrand Reinhold, 1990. ISBN 9780442206512.
- [34] VAVERKA, Jakub. *CFD simulace hydrokinetického měniče energie využívajícího vibrace indukované prouděním* [online]. Brno, 2023 [cit. 2024-05-15]. 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.
- [35] BISHOP, Richard a Yassin HASSAN. The lift and drag forces on a circular cylinder oscillating in a flowing fluid. *Proceedings of the Royal Society of London* [online]. 1964, (277), 32-50 [cit. 2024-03-14]. ISSN 2053-9126. Dostupné z: doi:<https://doi.org/10.1098/rspa.1964.0005>
- [36] Y+ value for K Omega SST Model. In: *Ansys Learning Forum* [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://forum.ansys.com/forums/topic/y-value-for-k-omega-sst-model/>
- [37] Ansys Fluent User's Guide. In: *ANSYS, Inc.* [online]. [cit. 2024-04-18]. Dostupné z: https://ansyshelp.ansys.com/account/secured?returnurl=/Views/Secured/corp/v232/en/flu_ug/flu_ug.html
- [38] *K-Omega Turbulence Models* [online]. In: . 2023 [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.simscale.com/docs/simulation-setup/global-settings/k-omega-sst/>

- [39] PARK, Hongrae, Andreas MENTZELOPOULOS a Michael BERNITSAS. Hydrokinetic energy harvesting from slow currents using flow-induced oscillations. *Renewable Energy* [online]. 2023, 2023(214), 242-254 [cit. 2024-04-08]. ISSN 09601481. Dostupné z: doi:10.1016/j.renene.2023.05.110
- [40] AHMAD, Munir. Active Power, Reactive Power, Apparent Power, and the Role of Power Factor. In: *Control Automation* [online]. [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: <https://control.com/technical-articles/active-power-reactive-power-apparent-power-and-the-role-of-power-factor/>
- [41] KHAN, Waseem. Why is power factor so important in electrical power system?. In: *Dara Switchboards* [online]. [cit. 2024-04-09]. Dostupné z: <https://electricalswitchboards.com.au/power-factor-important-electrical-power-system/>
- [42] HECKBERT, Paul. Fourier Transforms and the Fast Fourier Transform (FFT) Algorithm. In: *CMU School of Computer Science* [online]. [cit. 2024-03-13]. Dostupné z: <https://www.cs.cmu.edu/afs/andrew/scs/cs/15-463/2001/pub/www/notes/fourier/fourier.pdf>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

Symbol	Veličina	Jednotka
A	Amplituda	m
t	Čas	s
f	Frekvence	Hz
ω_0	Vlastní úhlová frekvence	s^{-1}
ω	Úhlová frekvence	s^{-1}
k	Tuhost pružiny	$N \cdot m^{-1}$
l_r	Délka pružiny v rovnovážné poloze	m
C	Konstanta	-
E	Konstanta	-
l_0	Natažení pružiny	m
x	Poloha v ose x	m
\dot{x}	Rychlost v ose x	$m \cdot s^{-1}$
\ddot{x}	Zrychlení v ose x	$m \cdot s^{-2}$
x_0	Počáteční poloha v ose x	m
v_x	Rychlost v ose x	$m \cdot s^{-1}$
v_0	Počáteční rychlost	$m \cdot s^{-1}$
$v_{x,0}$	Počáteční rychlost v ose x	$m \cdot s^{-1}$
T	Perioda	s
F_0	Amplituda síly	N
x_R	Amplituda výchylky při rezonanci	m
m	Hmotnost	kg
b	Tlumení	$N \cdot s \cdot m^{-1}$
F_k	Vratná síla od pružiny	N
F_b	Tlumící síla	N
α_u	Koeficient útlumu	s^{-1}
ω'	Vlastní frekvence tlumených kmitů	s^{-1}
U_p	Potenciální energie	J
U	Rychlost volně proudící kapaliny	$m \cdot s^{-1}$
D	Průměr obtékaného válce	m
L	Délka obtékaného válce	m
ν	Kinematická viskozita	$m^2 \cdot s^{-1}$
Re	Reynoldsovo číslo	-
St	Strouhalovo číslo	-
θ	Úhel natočení FEH	deg
h	Výchylka FEH	m
Y	Amplituda výchylky v ose y	m
Y'	Bezrozměrná amplituda výchylky v ose y	-
f'	Bezrozměrná frekvence	-

F_y	Síla působící na těleso v ose y	N
F_x	Síla působící na těleso v ose x	N
C_L	Vztlakový koeficient	-
C_D	Odporový koeficient	-
ρ	Hustota	$\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$
h_{\min}	Minimální výška buňky dynamické sítě	m
h_{ideal}	Ideální výška buňky dynamické sítě	m
α_s	Rozdělovací faktor	-
α_c	Faktor kolapsu	-
η	Kinematická viskozita	$\text{Pa}\cdot\text{s}$
u	Rychlost na vstupu zadaná v Ansys Fluent	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
Δt	Velikost časového kroku	s
s	Výška nejmenší deformující se buňky dynamické sítě	m
P	Výkon	W
v_y	Rychlost tělesa v ose y	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
n	Počet časových kroků	-
φ	Fázový posuv	rad
a_y	Zrychlení tělesa v ose y	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
Y_0	Zadaná maximální výchylka tělesa v ose y	m
$P_{\text{činný}}$	Činný výkon	W
$P_{\text{jalový}}$	Jalový výkon	VAR
$f_{\text{zadaná}}$	Frekvence předepsaná tělesu	Hz
v_b	Bezrozměrná rychlost	-
η	Účinnost systému	-
P_{max}	Maximální výkon	W
y	Poloha v ose y	m
\dot{y}	Rychlost v ose y	$\text{m}\cdot\text{s}^{-1}$
\ddot{y}	Zrychlení v ose y	$\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$
$F(t)$	Síla působící na těleso v ose y	N
m_p	Přídavná hmotnost	kg
b_p	Přídavné tlumení	$\text{N}\cdot\text{s}\cdot\text{m}^{-1}$
k_p	Přídavná tuhost	$\text{N}\cdot\text{m}^{-1}$
F_c	Reálná složka amplitudy po FFT	N
F_s	Imaginární složka amplitudy po FFT	N
V_T	Objem ponořeného tělesa	m^3
Q	Průtok podávacího čerpadla	$\text{m}^3\cdot\text{s}^{-1}$
S	Plocha průřezu žlabu	m^2
<i>VIV</i>	<i>Vortex induced vibration</i>	-
<i>FIO</i>	<i>Flow induced oscillation</i>	-
<i>FEH</i>	<i>Fluetter-based energy harvester</i>	-

<i>VIVACE</i>	<i>Vortex induced vibration aquatic clean energy</i>	-
<i>UDF</i>	<i>User defined function</i>	-
<i>FFT</i>	<i>Fast Fourier transform</i>	-
<i>CFD</i>	<i>Computational fluid dynamics</i>	-

SEZNAM PŘÍLOH

1. UDF k definování pohybu tělesa v programovacím jazyku C

PŘÍLOHY

1. UDF k definování pohybu tělesa v programovacím jazyku C

Ukázka UDF pro amplitudu 16 mm a frekvenci 5 Hz:

```
#include "udf.h"
#include <math.h>
#define PI 3.141592654

static real vely = 0.0;

real f = 5.0; // Frekvence pohybu

real y = 0.0160; // Amplituda výchylky

real omega = 2.0 * PI * f; // Úhlová rychlost

DEFINE_CG_MOTION(moving_mesh, dt, vel, omega, time, dtime)
{
    vely = omega * y * sin(omega * time); // Zadaná rychlost v ose y

    vel[1] = vely;

    Message("time = %f, vel[1] = %f\n", time, vel[1]); // Vypisuje do konzole hodnoty rychlosti
    v ose y v čase
}
```