

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI

FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2301 Strojní inženýrství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Experimentální vyšetření aerodynamických vazeb při suvně krutovém
kmitání lopatek v přímé mříži

Autor: **Jan Horák**

Vedoucí práce: **prof. Ing. Jiří LINHART, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Poděkovat bych chtěl zejména prof. Ing. Jiřemu Linhartovi za teoretické vedení této práce a Ing. Jiřimi Hruškovi za praktické vedení na experimentálním zařízení. Také bych chtěl poděkovat Davidu Fenderlovi a Ladislavu Paškovi za asistenci při obsluze experimentálního zařízení. Také Miloslavu Sládkovi za výrobu hřebenové sondy a dalších prvků.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

AUTOR	Příjmení Horák	Jméno Jan	
STUDIJNÍ OBOR	2301R016-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“		
VEDOUCÍ PRÁCE	Příjmení (včetně titulů) Prof. Ing. Linhart, CSc.	Jméno Jiří	
PRACOVIŠTĚ	ZČU - FST - KKE		
DRUH PRÁCE	DIPLOMOVÁ	BAKALÁŘSKÁ	Nehodící se škrtněte
NÁZEV PRÁCE	Experimentální vyšetření aerodynamických vazeb při suvně krutovém kmitání v přímé mříži		

FAKULTA	strojní	KATEDRA	KKE	ROK ODEVZD.	2013
---------	---------	---------	-----	-------------	------

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

CELKEM	40	TEXTOVÁ ČÁST	25	GRAFICKÁ ČÁST	15
--------	----	--------------	----	---------------	----

<p>STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK)</p> <p>ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL, POZNATKY A PŘÍNOSY</p>	<p>Práce je zaměřena na problematiku kmitání lopatkové řady, která je obtékána proudem vzduchu. Lopatková řada je modelem profilů oběžných lopatek turbíny. Lopatky byly buzeny elektricky a byl měřen vliv na ostatní lopatky v řadě. Obsahuje ladící měření, které bylo potřeba před samotným měřením vlivů udělat. Cílem bylo zprovoznění tunelu a měření sil přenášejících se proudícím vzduchem.</p>
<p>KLÍČOVÁ SLOVA</p> <p>ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE</p>	<p>Proudění, vibrační jednotka, suvně torzní vibrace, aerodynamické síly, lopatková řada, rychlostní profil, frekvenční charakteristika, cejchování</p>

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

AUTHOR	Surname Horák	Name Jan	
FIELD OF STUDY	2301R016-13 „Stavba energetických strojů a zařízení		
SUPERVISOR	Surname (Inclusive of Degrees) Prof. Ing. Linhart, CSc.	Name Jiří	
INSTITUTION	ZČU - FST - KKE		
TYPE OF WORK	DIPLOMA	BACHELOR	Delete when not applicable
TITLE OF WORK	Experimental determination of aerodynamic coupling coefficients at bending and torsional vibration between blades in the direct cascade		

FACULTY	Mechanical Engineering	DEPARTMENT	Design of Power Machines and Equipment	SUBMITTED IN	2013
---------	---------------------------	------------	--	-----------------	------

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

TOTALLY	40	TEXT PART	25	GRAPHICAL PART	15
---------	----	-----------	----	----------------	----

BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS	<p>The thesis is focused on problematic of oscillation of the airfoil cascade, which is flowed around by flowing air. The airfoil cascade is model of the profiles of the rotor's blades. The blades were excited by electric current and the influence on the other blades was measured. It includes measurements, which needed to be done before measurement of the aerodynamic forces. The goal was to make the device functional and the measurement of the forces.</p>
KEY WORDS	<p>Flowing, vibration unit, bending and torsional oscillation, aerodynamic forces, airfoil cascade, velocity profile, frequency characteristic, calibrating</p>

Obsah

Úvod – Uvedení do problematiky [1].....	8
Popis tunelu	8
Aerodynamické vazební koeficienty [1].....	9
Vyrovnání rychlostního profilu.....	11
Za lopatkovou mříží [2]	11
Před lopatkovou mříží [8],[5]	12
Měření s vlivem a bez vlivu proudící tekutiny	14
S vlivem proudící tekutiny [6],[3]	14
Bez vlivu proudící tekutiny [3].....	16
Numerické simulace [6],[4]	17
Pracovní koeficienty a jejich změna [7]	19
Porovnání výsledků experimentu a simulací [4]	22
Sestavení vyhodnocovacích rovnic	24
Stav bez proudění:	27
Stav s prouděním:	27
Dílčí měření.....	28
Měření frekvenčních charakteristik	28
Měření cejchovních koeficientů	31
Vyrovnání rychlostního profilu	32
Ladící měření aerodynamických sil	32
Měření aerodynamických sil s různými rychlostmi proudu.....	32
Měření vazebních sil pro několik fázových úhlů krut versus posuv	36
Závěr	40
Seznam použité literatury	42

1. Úvod – Uvedení do problematiky [1]

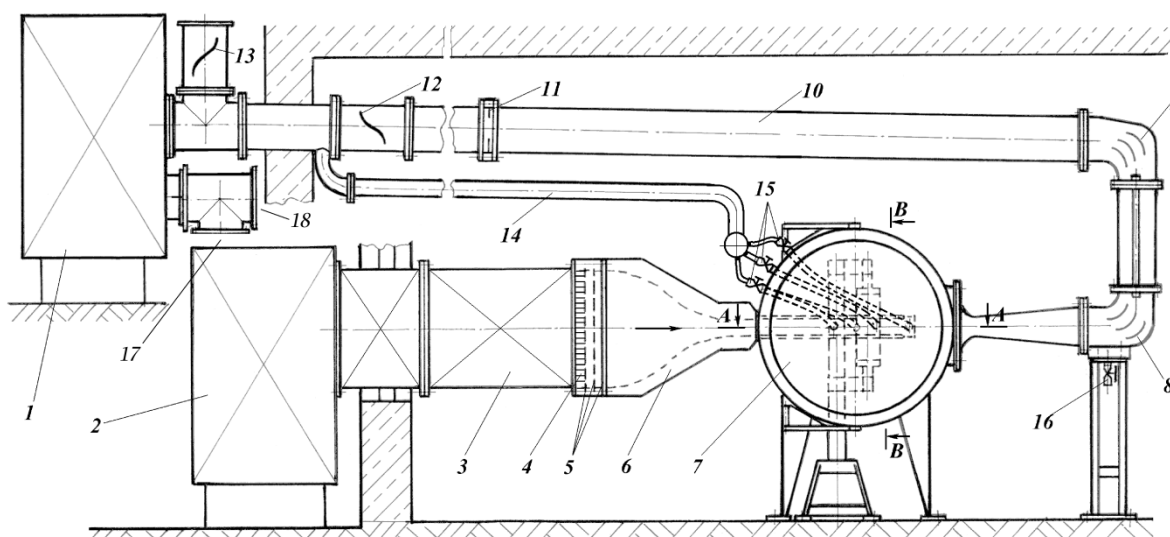
Na životnost a spolehlivost turbokompresorů a turbín jsou v dnešní době kladeny čím dál větší nároky. Důležitou roli hrají vibrace lopatek. Ty jsou vystaveny extrémnímu namáhání a kmitání se na ně přenáší mechanicky přes rotor, aerodynamickým působením odtrhávajících vírů od obtékaného profilu. Nezanedbatelné a tudíž významné jsou samobuzené vibrace lopatek.

Moderní technologie dnes nabízejí výpočetní softwary založené na metodě konečných objemů, které dokážou poměrně přesně simulovat proudění tekutiny a hlavně její obtékání jakkoli složitých těles a proměnných geometrií. Lze dobře simulovat i různé vlivy na tělesa, jako síly od průtočné tekutiny.

1.1. Popis tunelu

Experimenty jsou prováděny na aerodynamickém tunelu. Experimentální zařízení nacházející se na Katedře energetických strojů a zařízení na ZČU je vybudované s ohledem na co nejširší možnosti měření.

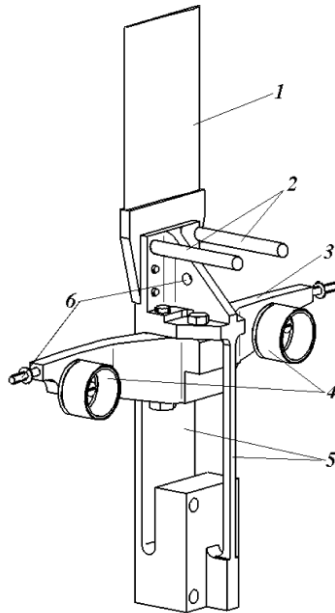
Jednoduché schéma experimentálního aerodynamického tunelu je zobrazeno na obrázku 1. Vlastní měření aerodynamických sil probíhá v měřicím prostoru označeném číslem 7. Zde je lopatková řada s osmi modely lopatek, z nich čtyři prostřední jsou připevněny k vibrouzlům, které jsou na obrázku 2. Měřicí prostor je v sací části tunelu. Rychlost proudění je možné regulovat otáčkami turbokompresoru 1 a klapkami na regulaci sání 12, přísávání 13 a výtaku kompresoru 17 a 18. Rychlost tekutiny se měří na clonce 11. Vyrovnávat rychlostní profil (viz níže) lze odsáváním mezní vrstvy od stěn lopatkové řady přes regulační ventily 15 trubkou 14. Před měřicím prostorem 7 jsou dvě ustalovací komory, vně budovy je komora 2 a uvnitř budovy je to komora 3.



Obr. 1: Schéma aerodynamického tunelu

Jak již bylo zmíněno, čtyři prostřední lopatky jsou vybaveny vibrouzly. Schéma paralelogramu jednoho vibrouzlu je na obrázku 2. Lopatka 1 je umístěna na paralelogramu 5. Ten zajišťuje, aby kmitání lopatky bylo skutečně surné, tj. aby rozdíl posuvu na špičce a patě

modelu byl minimální. Na vahadle **3** se pak nacházejí dvě malé cívky **4**, ty jsou ve vibrouzlu zasunuty do větších cívek nahrazujících permanentní magnety. Buzeny střídavým proudem pak tyto malé cívky umožňují budít vibrace suvné, resp. torzní. Do nich je přiveden proud ve stejné fázi, resp. v protifázi. Skutečný pohyb lopatky je měřen bezkontaktními snímači polohy na bázi vířivých proudů **2**.



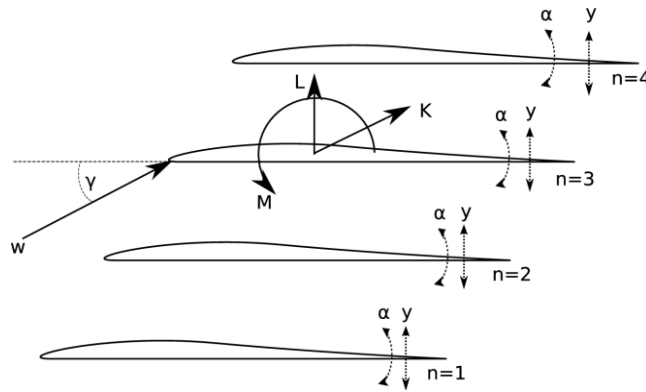
Obr. 2: Schéma vibrouzlu

Potřebným vybavením pro měření je traverzovací mechanismus se dvěma tlakovými sondami pro měření rychlostního profilu za, resp. před lopatkovou řadou, snímači statického tlaku, teploty a tlaku v jednotlivých odsávacích komorách a další přístroje.

2. Aerodynamické vazební koeficienty [1]

Okolní proudění tekutiny působí na danou lopatku silami a momenty. Tyto vlivy mohou vést k rozkmitání lopatky. Tato lopatka reaguje zpětně do okolí a předává část své kinetické energie prostřednictvím aerodynamické vazby okolním lopatkám. Mezi lopatkami je také velmi silná mechanická vazba. Bere se ale jako parazitní veličina, jelikož není ovlivněna prouděním tekutiny. Předávání energie z lopatky na lopatku lze popsat aerodynamickými vazebními koeficienty, tj. koeficienty, které popisují aerodynamickou vazbu mezi dvěma lopatkami.

Lopatky uvažujeme se třemi stupni volnosti. V praxi uvažujeme jen dva a to suvně a torzní kmity. Třetím stupněm je translační kmit v x-ovém směru a ten je pro všechny lopatky stejný a navíc zanedbatelný díky konstrukci. Schéma lopatkové řady je na obrázku 3.



Obr. 3: Schéma lopatkové řady

Komplexní aerodynamické koeficienty aerodynamické síly L a momentu M lze uvažovat ve tvaru

$$\bar{L} = q \cdot b \sum_{n=1}^4 \left(l_{ny} \cdot \frac{y_n}{b} + l_{n\alpha} \cdot \alpha_n \right),$$

$$\bar{M} = q \cdot b^2 \sum_{n=1}^4 \left(m_{ny} \cdot \frac{y_n}{b} + m_{n\alpha} \cdot \alpha_n \right),$$

kde $q = \rho v^2 d$ pro hustotu ρ , rychlost v a délku lopatky d , dále l je aerodynamická síla, m je moment a y , resp. α je posuv, resp. natočení lopatky. Jedná se tedy v tomto případě o lineární matematický model popsany soustavou osmi rovnic vždy pro dva stupně volnosti každé z lopatek. Přesnost je podmíněna přesností měření výchylek a úhlů natočení. Pohybové rovnice pro kmitání bez vlivu tekutiny jsou

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y = F_0$$

$$I\ddot{\alpha} + b_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M_0$$

a s vlivem tekutiny

$$m\ddot{y} + b_y\dot{y} + k_y y = F_f + \bar{L}$$

$$I\ddot{\alpha} + b_\alpha\dot{\alpha} + k_\alpha \alpha = M_f + \bar{M}$$

kde m je hmotnost lopatky, I je moment setrvačnosti pro torzi kolem osy rotace, b_y , resp. b_α je koeficient mechanického tlumení pro posuv, resp. torzi, k_y resp. k_α je tuhost pro posuv, resp. torzi, F_0 síla a M_0 moment.

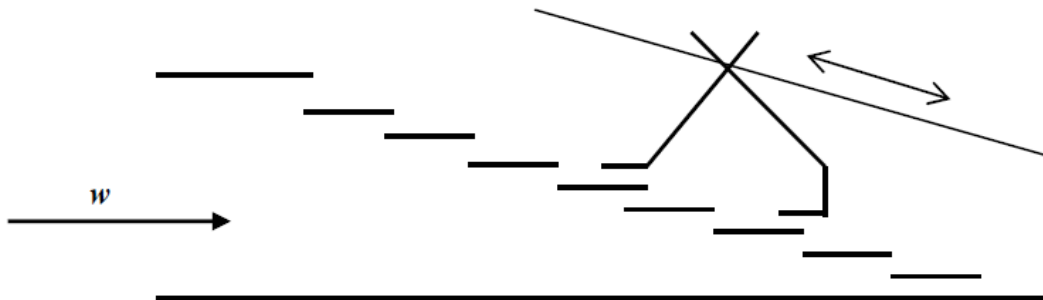
Pokud jsou shodné tvary kmitání při proudění a bez proudění, které docílíme přesnou regulací, bude levá a pravá strana rovnic stejná. Rovnice lze sečíst a získat hledané hodnoty

$$\bar{L} = F_0 - F_f, \bar{M} = M_0 - M_f.$$

3. Vyrovnání rychlostního profilu

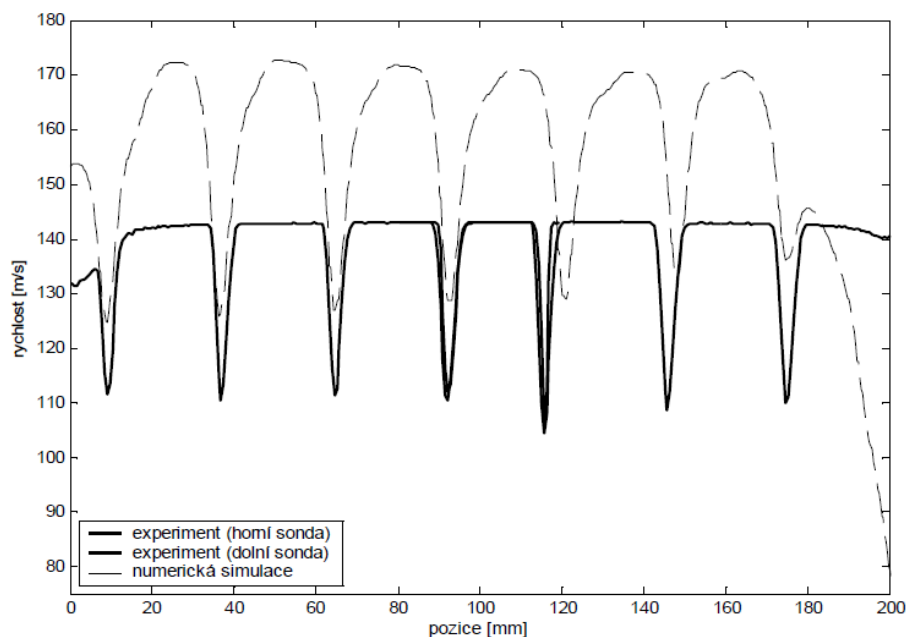
3.1. Za lopatkovou mříží [2]

Nerovnoměrnost rychlostního profilu činí klín lopatkové kaskády a pro jeho vyrovnání se odsává mezní vrstva s pórovitých stěn náběžného kanálu. Rychlostní profil za lopatkovou kaskádou dle numerických výpočtů charakterizujeme rovnoměrným, neboli podává větší výkon. Možnost ověření je za pomoci traverzou s dvěma tlakovými sondami, jelikož jedna sonda by neproměřila celou dráhu za lopatkovou řadou. Krokový motor pomocí vodícího šroubu způsobuje pojezd těchto tlakových sond.



Obr. 4: Lopatkový klín a traverzér s dvojicí tlakových sond

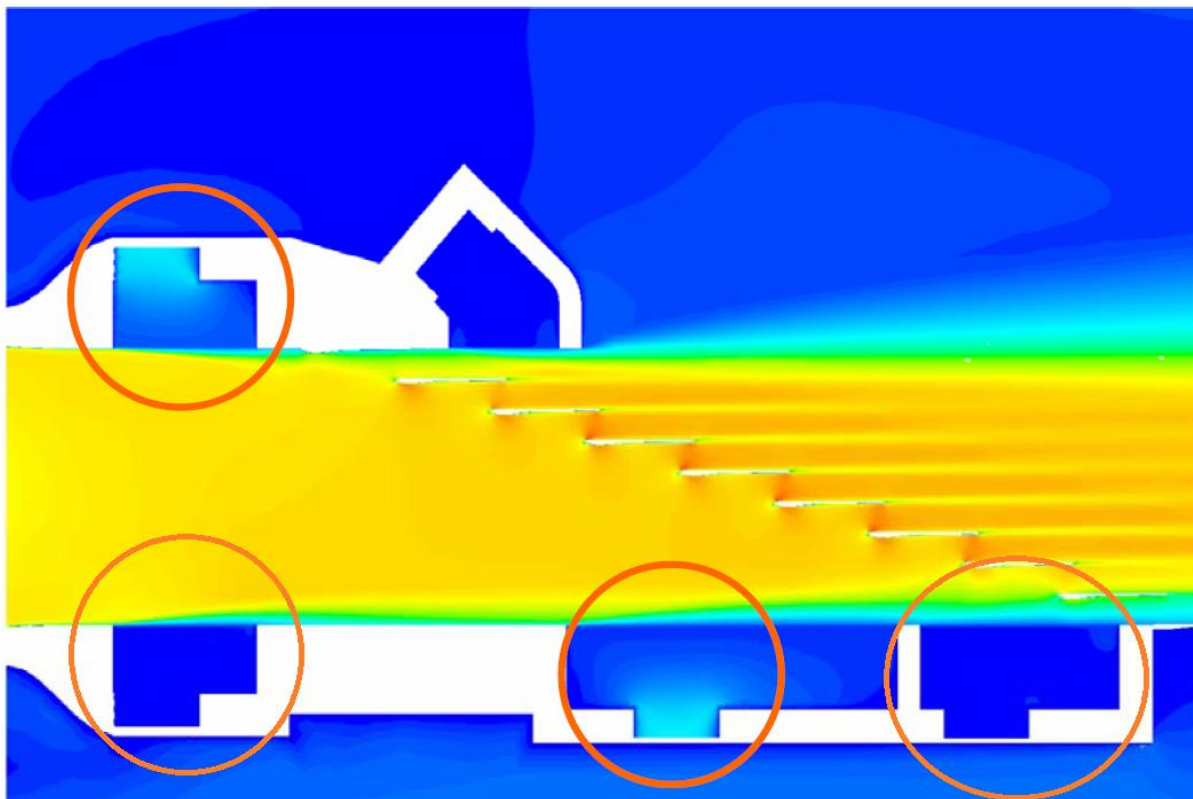
Numerická simulace proudění v prostoru lopatkové kaskády byla provedena pro navrhované maximální průtokové hodnoty tunelem. Na skutečném díle jsme stejných poměrů nedosáhli, proto musíme pouze srovnávat charakter průběhů grafů rychlostních profilů a neposuzovat absolutní velikosti rychlostí. Jelikož numerické výpočty se prováděly se stacionární soustavou lopatek, omezili jsme při měření volné vibrace systému pružně uložených lopatek magnetickým tlumením. Měření potvrdilo vyrovnaný rychlostní profil za lopatkovou kaskádou a to pro proudění s odsáváním. Typický průběh rychlostního profilu a zároveň srovnání experimentu s výpočtem vykazuje obrázek 5.



Obr. 5: Rychlostní profily za kaskádou

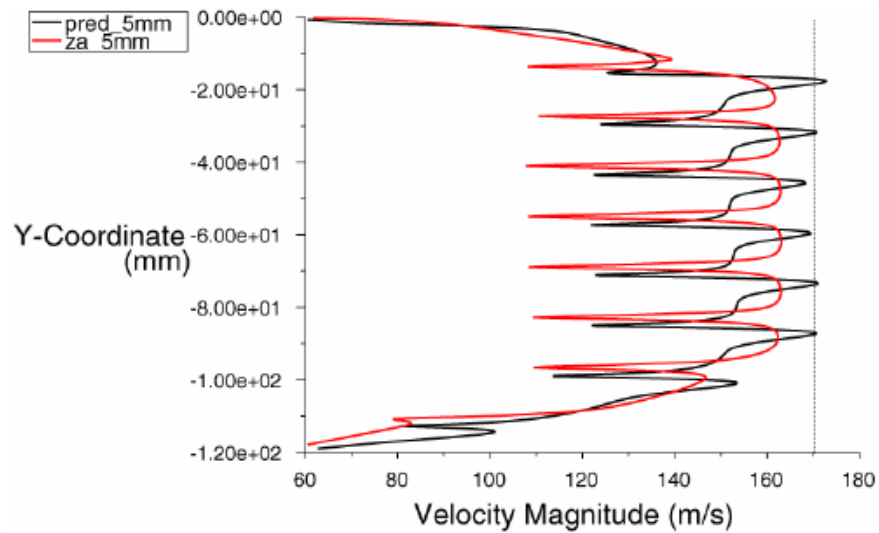
3.2. Před lopatkovou mříží [8],[5]

Lopatková mříž je opatřena tlakovými sondami, které jsou umístěny za ní (viz výše). Nicméně numerické simulace prokázaly, že měření rychlostního profilu za mříží je nedostatečné. K vyřešení tohoto problému byly vyvinuty tlakové sondy k měření rychlostního profilu před lopatkovou mříží. K zabránění vlivu těchto sond na měření, byly tyto sondy upevněny za pórovitou stěnu jak je vidět z obrázku 6.

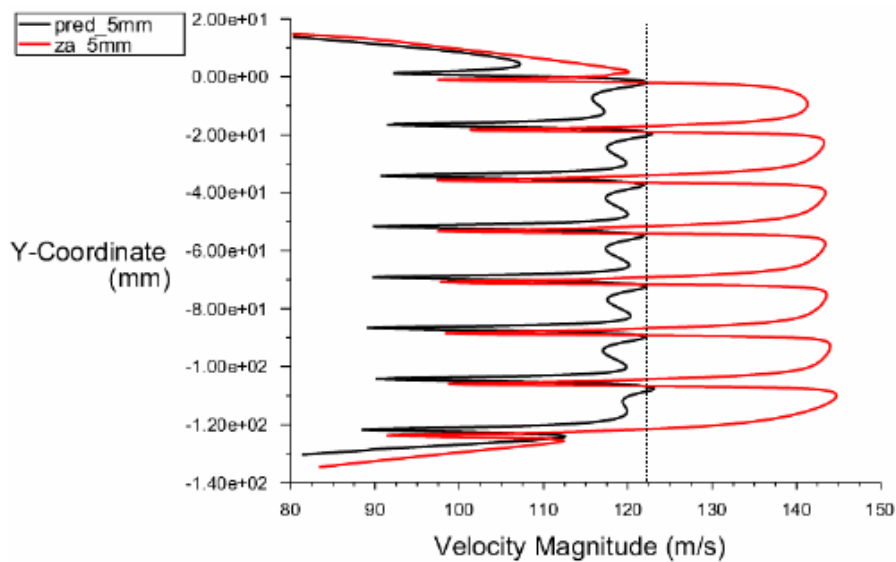


Obr. 6: Tlakové sondy před lopatkovou mříží odsávající mezní vrstvu

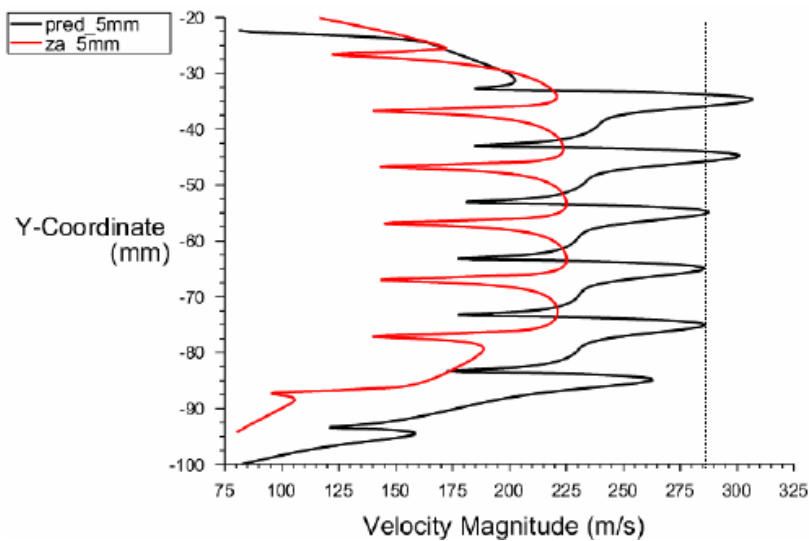
Vyrovnání rychlostního profilu s odsáváním mezní vrstvy je ukázáno na obrázcích 7-9, kde je měřeno s náběhovými úhly 0° , $+5^\circ$, -5° .



Obr. 7: Vyrovnaný rychlostní profil při úhlu náběhu 0°



Obr. 8: Vyrovnaný rychlostní profil při úhlu náběhu $+5^\circ$



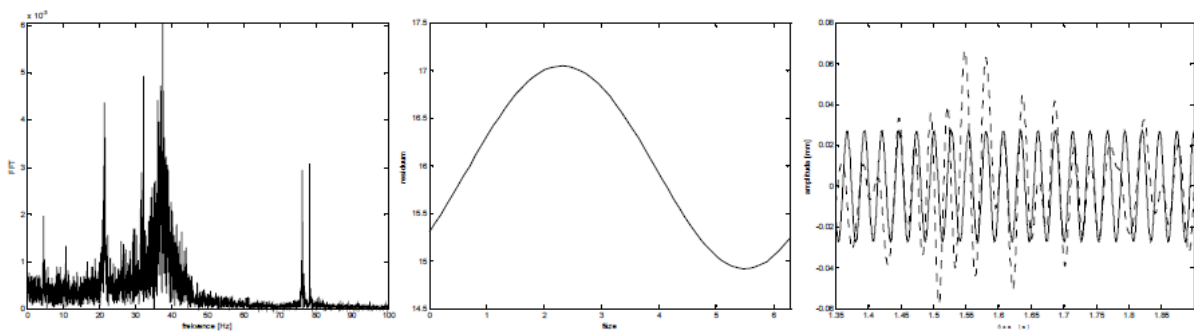
Obr. 9: Vyrovnaný rychlostní profil při úhlu náběhu -5°

4. Měření s vlivem a bez vlivu proudící tekutiny

4.1.S vlivem proudící tekutiny [6],[3]

Na jednotlivých lopatkách byla uskutečněna série měření. Pro tyto experimenty byly použity lopatky číslo 3 a 4 (viz obr. 3). Při prvním měření byly obě lopatky buzeny proudem protékaného vzduchu a byly měřeny výchylky lopatek. Při druhém měření byla pak vibrátorem buzena lopatka číslo 3 harmonickým signálem o frekvenci 78 Hz a byl sledován její vliv na kmitání lopatky číslo 4.

Pro numerické simulace bylo potřeba najít vhodnou funkci, která byla získána s naměřených dat. Byly uvažovány jen surné vibrace, protože rozdíl na obou snímačích je zanedbatelný. Nejprve pomocí Fourierovy transformace (dále FFT) byly stanoveny dominantní frekvence signálu. Porovnáním integrálu absolutní hodnoty naměřeného a spočteného signálu bylo určeno kritérium pro stanovení amplitudy. Fáze pak byla stanovena optimalizací hledané funkce ve smyslu nejmenších čtverců. Výsledky pro první sérii měření pro lopatku č. 3 lze nalézt na obrázku 10. Zleva je znázorněna FFT signálu, průběh residua fáze a srovnání naměřeného signálu (čárkovaně) s proloženou funkcí.



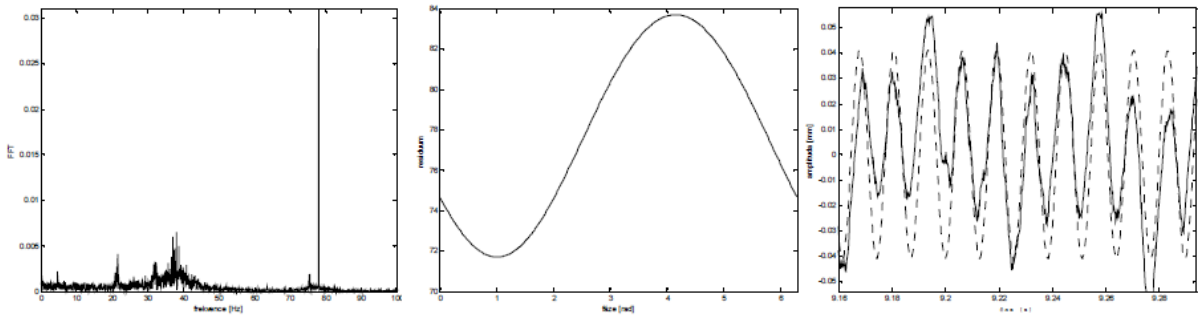
Obr. 10: Lopatka č. 3 buzená proudem

Nejléších výsledků (ve smyslu minimalizace residua dle metody nejmenších čtverců) bylo dosaženo při použití jednoduché funkce

$$q(t) = A_q \sin(2\pi ft + \varphi_q),$$

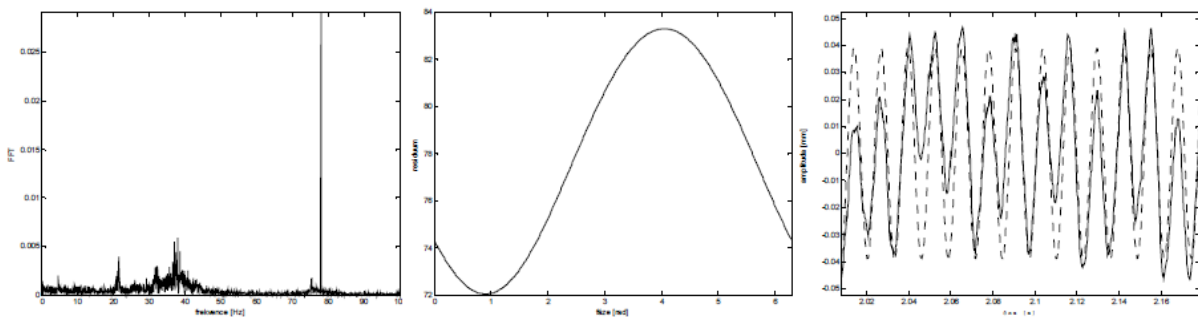
kde frekvence signálu $f = 37,6 [Hz]$, fáze signálu $\varphi_q = 5,4 [rad]$ a amplituda $A_q = 0,027 [mm]$. Velmi podobné výsledky (včetně fázového posuvu) byly získány i pro proudem buzenou lopatku číslo 4. Je zřejmé, že obě lopatky se ovlivňují vzájemně.

Obdobně lze nahradit měřený průběh výchylek pro lopatku 3 buzenou sinusovým signálem o dané frekvenci 78Hz. Výsledky jsou zakresleny na obrázku 11. Dle očekávání je nejlepší aproximací opět sinusová funkce o frekvenci $f = 78 [Hz]$. Fáze byla stanovena na $\varphi_q = 1,01 [rad]$ a amplituda $A_q = 0,041 [mm]$.



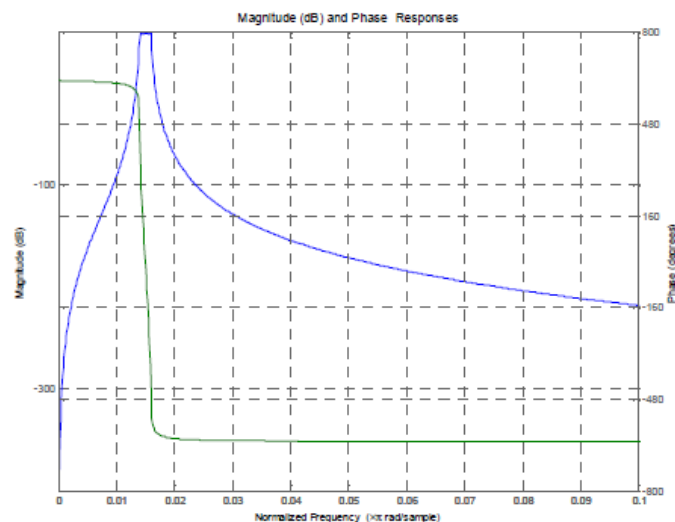
Obr. 11: Lopatka 3 buzená harmonicky

Lopatka 4 byla v tomto případě buzena opět pouze proudem. Lze předpokládat vliv nuceně kmitající lopatky 3. Výsledky pro toto měření nalezneme na obrázku 12. I v tomto případě je frekvence daná frekvencí buzení, tj. $f = 78 \text{ [Hz]}$. Amplituda je dle očekávání nižší $A = 0,039 \text{ [mm]}$. Rozhodující pro numerickou simulaci je ovšem fázový posuv $\varphi = 0,91 \text{ [rad]}$.



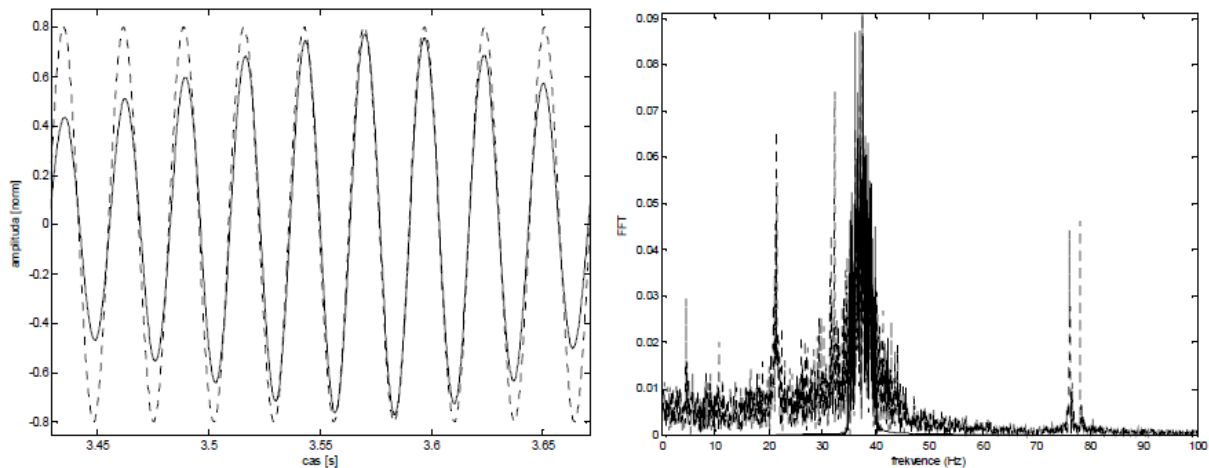
Obr. 12: Lopatka 4 buzená proudem, ovlivněna harmonicky buzenou lopatkou 3

Po několika experimentech díky filtraci původního signálu byl zvolen Chebyševův filtr. Jeho normovaná frekvenční odezva je vidět na obrázku 13. Jedná se o pásmovou propust s propustným pásmem 30 až 45 Hz.



Obr. 13: Frekvenční odezva Chebyševova filtru

Na obrázku 14 je zakresleno porovnání filtrovaného signálu (plnou čarou) s původní spočtenou aproximací (tečkovaně). Dále je zachycena FFT původního měřeného a filtrovaného signálu. Je patrné, že shoda je uspokojivá. Filtrovaný signál vykazuje menší odchylku než signál spočtený původním způsobem a je přitom vhodný i pro numerické simulace.



Obr. 14: Filtrovaný signál (vlevo) a jeho Fourierova transformace (vpravo)

4.2. Bez vlivu proudící tekutiny [3]

Identifikaci systému bez vlivu tekutiny provedeme z frekvenční charakteristiky. Byl uvažován lineární systém s jedním vstupem a jedním výstupem, neboť lopatka opět kmitala suvně, tj. na oba vstupy vibrouzlu je přiveden stejný harmonický signál. Důležité je sledovat rozdíl obou snímačů, aby byl dodržen předpoklad suvných vibrací. Body frekvenční charakteristiky dostaneme porovnáním vstupů a výstupů, které dostaneme buzením harmonickými signály o různých frekvencích a měřením odezvy (výchylky).

Pro tlumení, lze systém popsat přenosovou funkcí ve tvaru

$$H(i\omega) = \frac{1}{k - m\omega^2 + bi\omega} = \frac{\frac{1}{k}}{-\frac{m}{k}\omega^2 + \frac{b}{k}i\omega + 1}$$

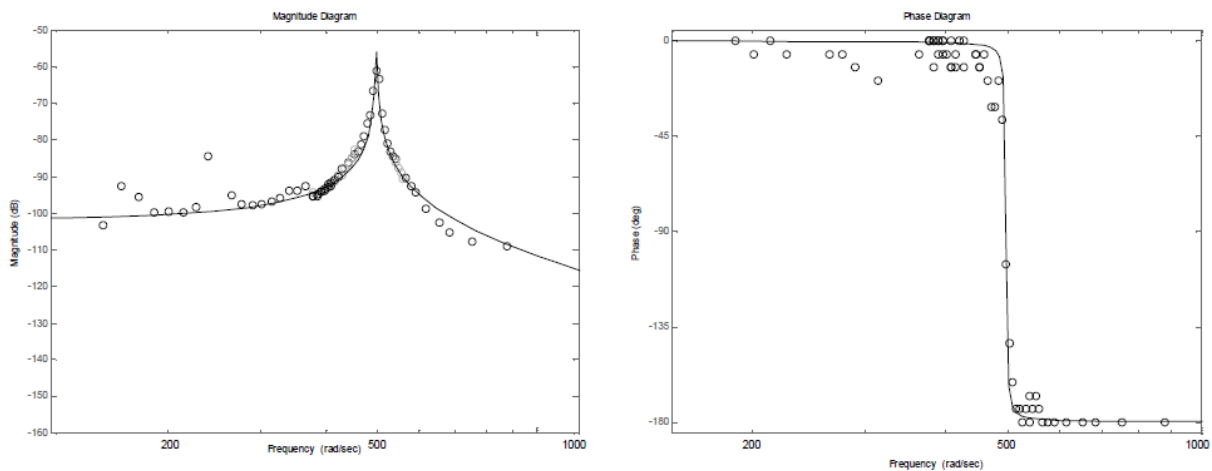
odtud také dostáváme vztah pro výpočet vlastní frekvence modelu Ω_D

$$\Omega = \sqrt{\frac{k}{m}}; \quad \Omega_D = \Omega \sqrt{1 - \left(\frac{b}{2m\Omega}\right)^2}$$

Na obrázku 15 je srovnání naměřených hodnot s amplitudovou (vlevo) a fázovou (vpravo) frekvenční charakteristikou. Tato frekvenční charakteristika odpovídá následujícím parametrům:

$$\begin{aligned} k &= \frac{1}{b_0} = 12392 \text{ Nm}^{-1} & b &= a_1 k = 1,26 \text{ Nsm}^{-1} \\ m &= a_2 k = 0,502 \text{ kg} & \Omega_D &= 496,9 \text{ rad} \cdot \text{s}^{-1} \Rightarrow f_D = 79,08 \text{ Hz} \end{aligned}$$

Výpočet je velmi citlivý na koeficient tuhosti k . Ten je však při měření zatížen největší chybou. Spočtená frekvence odpovídá vlastní frekvenci systému. To je patrné ze srovnání FFT na obrázku 10 a frekvenčních charakteristik na obrázku 15.



Obr. 15: Srovnání frekvenčních charakteristik modelu s naměřenými hodnotami

5. Numerické simulace [6],[4]

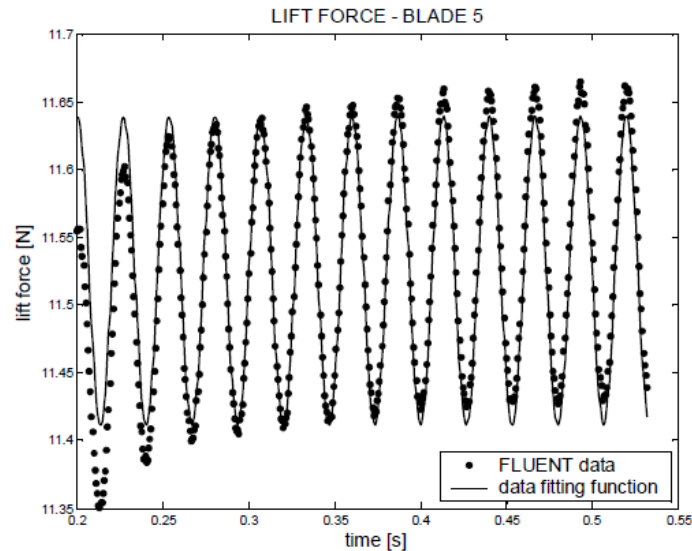
Pro numerickou simulaci byly použity vstupní podmínky vyšetřené experimentálně. Dále byly vyšetřeny aerodynamické síly na lopatky pomocí nestacionárního numerického výpočtu turbulentního vazkého proudění ve vzduchovém tunelu. K tomu byl použit program FLUENT. Vzájemným vztahem výchylky a síly lze stanovit její stabilitu vibrací.

Pro vlastní numerické řešení byl použit segregovaný řešič, implicitní schéma prvního řádu přesnosti v čase a druhého řádu přesnosti v prostoru. Bylo modelováno vazké nestacionární turbulentní 2D proudění. Pro řešení turbulence byl použit model Spalart-Allmaraz. Pracovním mediem pro numerickou simulaci byl stlačitelný vzduch, což odpovídá pracovnímu mediu experimentálního zařízení. Předpisem vibrací lopatky 3 a 4 jsou harmonické funkce stanovené výše. V průběhu nestacionárního řešení byly monitorovány rozdíly hmotnostního toku mezi vstupem a výstupem, kvalita výpočtové sítě a v neposlední řadě také aerodynamické síly na lopatky.

Aerodynamické síly působící ve směru výchylky jsou po ustálení výpočtu harmonickou funkcí času, kterou je možné zapsat jako

$$F(t) = F_S + A_F \sin(2\pi ft + \varphi_F).$$

Střední hodnotu, amplitudu a fázový posun síly získáme z bodů, které poskytuje numerická simulace. Tyto body jsou pomocí Gauss-Newtonovy metody nejmenších čtverců proloženy harmonickou funkcí. Jako správný předpoklad bylo uvažování frekvence síly stejné jako budící frekvence. Funkční předpis pro lopatku 3 je patrný z obrázku 16.



Obr. 16: Náhrada výpočtově zjištěné aerodynamické síly harmonickou funkcí

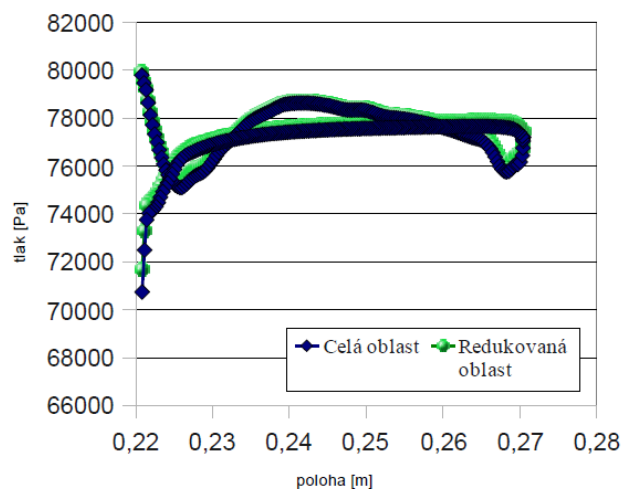
Při řešení se změněným úhlem náběhu bylo předpokládáno, že se okrajové podmínky nezmění. Změní se jen směr vstupní rychlosti.

Okrajové podmínky byly zvoleny tak, aby v místě, kde se nachází sonda v experimentálním zařízení, byla rychlost proudění 115 [m/s], shodná s experimentem. Tento postup zaručuje srovnatelné rychlostní profily před lopatkovou mříží a tedy i okrajové podmínky.

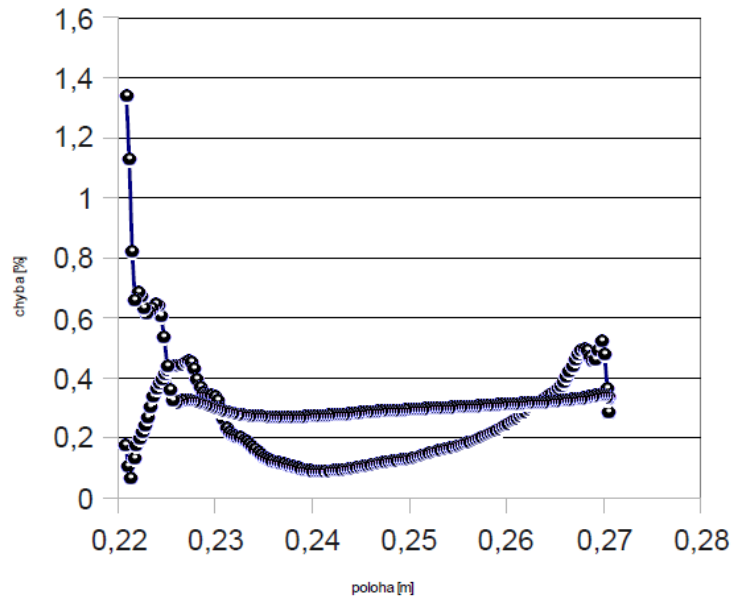
Vibrace předepsané harmonickou funkcí byly uděleny lopatce číslo 2 a na lopatce číslo 3 byly měřeny aerodynamické síly. Ostatní lopatky byly fixované.

Na obrázku 17 je vidět porovnání rozložení statického tlaku na povrchu lopatky. Z obrázku je patrná shoda modelu celé měřící oblasti a redukované oblasti.

Na obrázku 18 je zobrazena chyba daného zjednodušení. Průměrná chyba byla 0,3%, nejvyšší 1,34% a to na náběžné hraně lopatky. Toto porovnání mohlo být provedeno pouze pro nulový náběžový úhel.



Obr. 17: Porovnání rozložení statického tlaku na povrchu lopatky v celé a redukované oblasti



Obr. 18: Rozdíl mezi rozložením statického tlaku na povrchu lopatky v celé a redukované oblasti

6. Pracovní koeficienty a jejich změna [7]

Aerodynamické chování systému bez zohlednění mechanického tlumení je definováno pracovními koeficienty, která je rovna práci provedenou aerodynamickými silami během jednoho cyklu kmitání. Kladná hodnota práce značí přenos energie z tekutiny do lopatky a tím i podpora vibrací, záporná hodnota právě naopak a tím tlumení vibrací. Hodnotu práce pro torzní kmitání vyjadřuje vztah

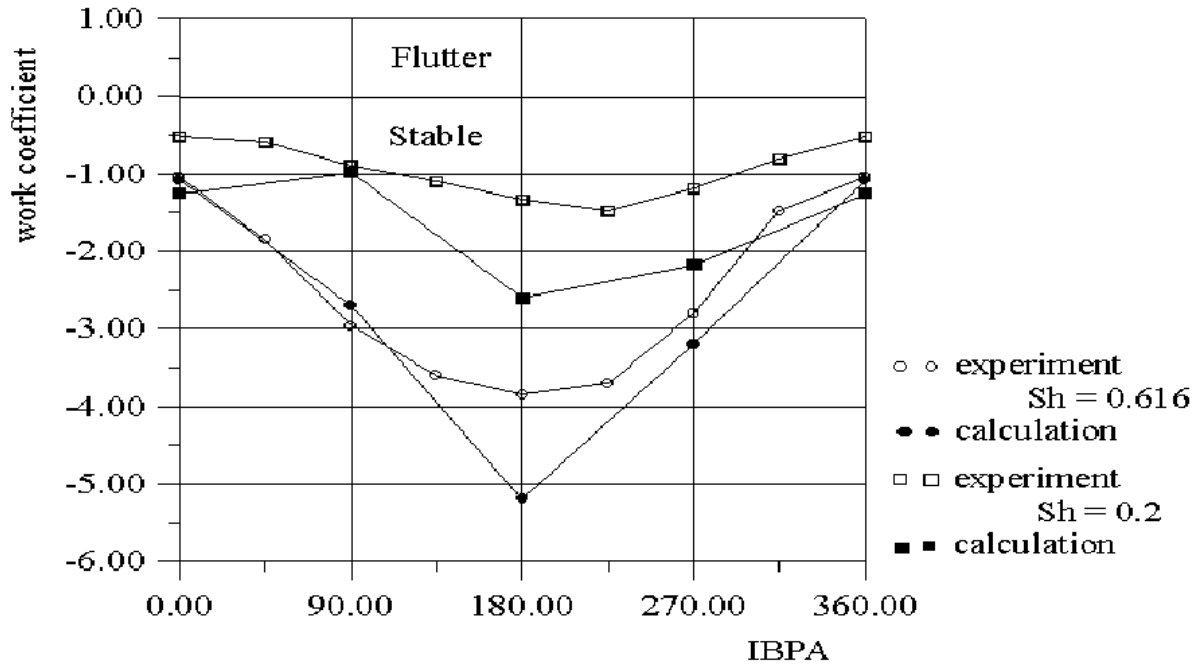
$$W = \int M \cdot d\alpha$$

A pro suvné kmitání

$$W = \int F \cdot dq$$

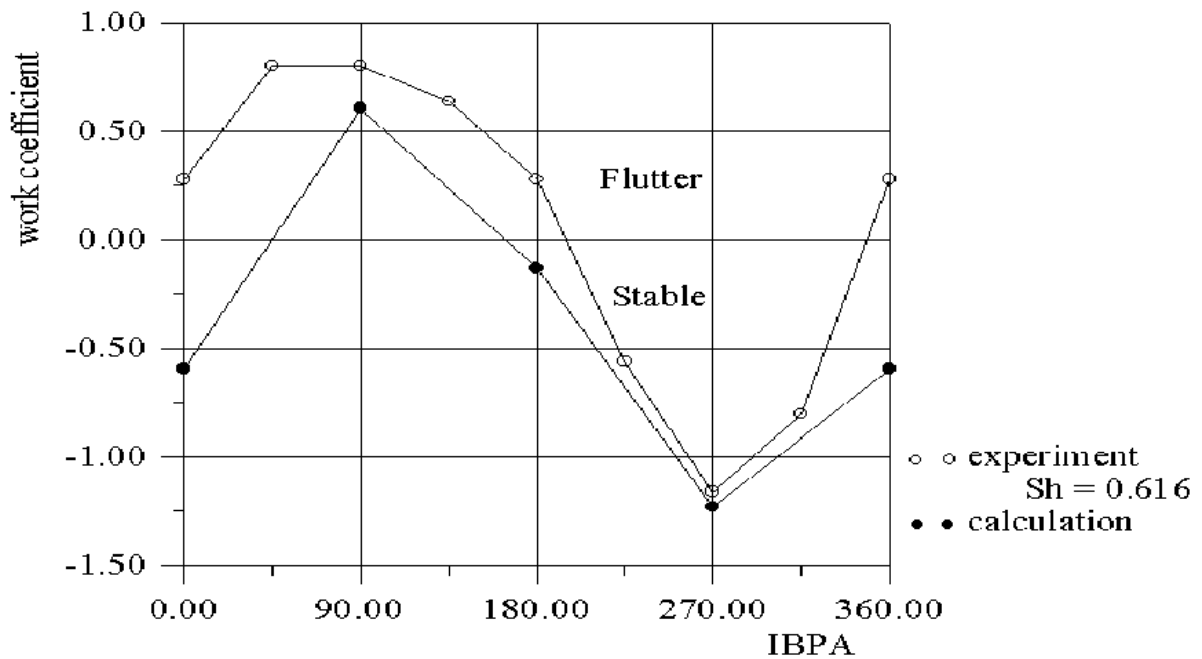
Změna pracovních koeficientů versus mezilopatkový fázový úhel (dále IBPA) pro různé průtokové režimy kmitání je zobrazeno na obrázcích 19-21.

Obrázek 15 ukazuje pracovní koeficient jako funkci IBPA pro suvné kmitání, jestliže náběhový úhel na lopatky je roven nule. Světlé čtverce (kroužky) korespondují s experimentálními daty, černé čtverce (kroužky) korespondují s numerickými výsledky. S klesajícím Strouhalovým číslem (zvyšující vstupní rychlost) stabilita klesá. V IBPA hodnotách blízkých se 180° je pozorováno maximální tlumení a hodnoty blízkých se 0° korespondují s minimálním tlumením.



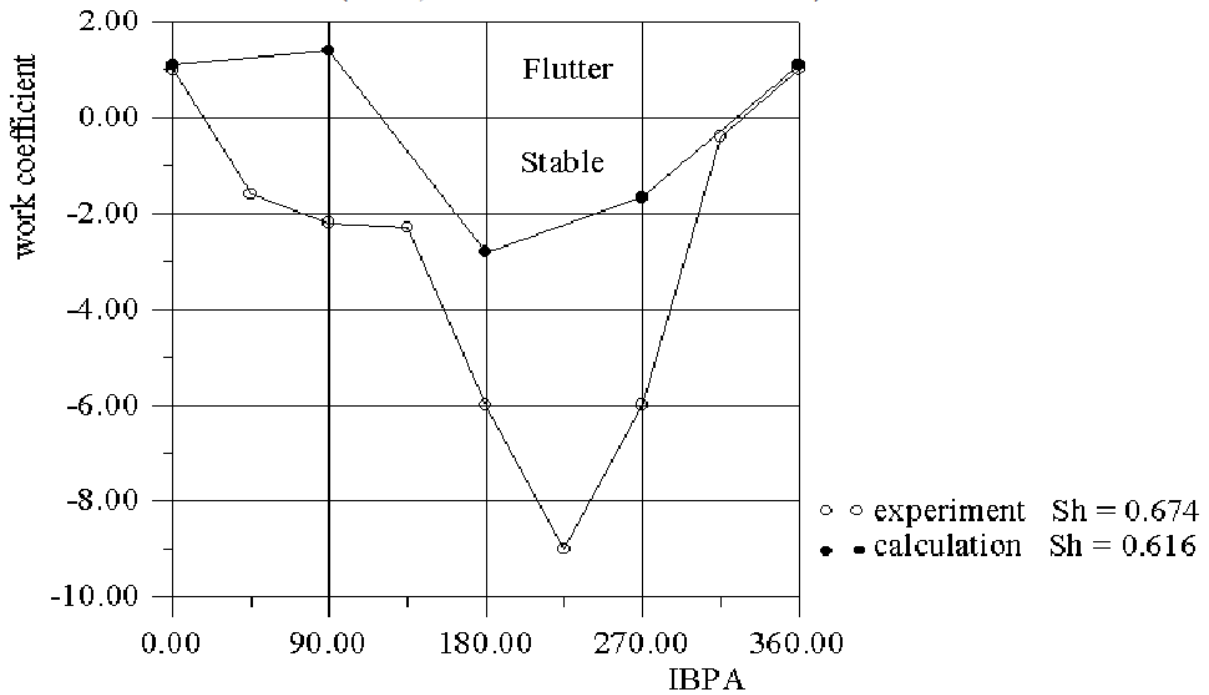
Obr. 19: Pracovní koeficienty versus IBPA pro suvně kmitání

Na obrázku 20 je uvedena změna pracovního koeficientu versus IBPA pro torzní kmitání s dopadovým úhlem na lopatky 0° . Lze pozorovat, že k maximálnímu vybuzení dojde kolem 90° .



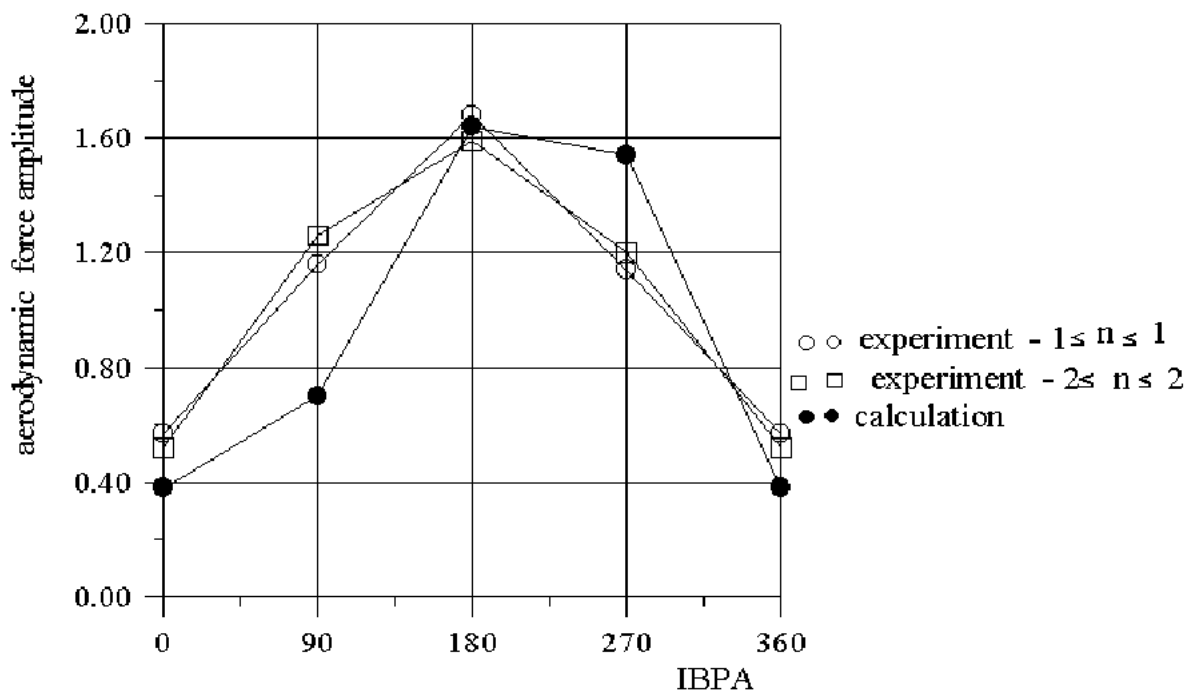
Obr. 20: Pracovní koeficienty versus IBPA pro torzní kmitání

Na obrázku 21 můžeme vidět změnu pracovních koeficientů při suvně kmitání. Dopadový úhel na lopatky je však 16° .

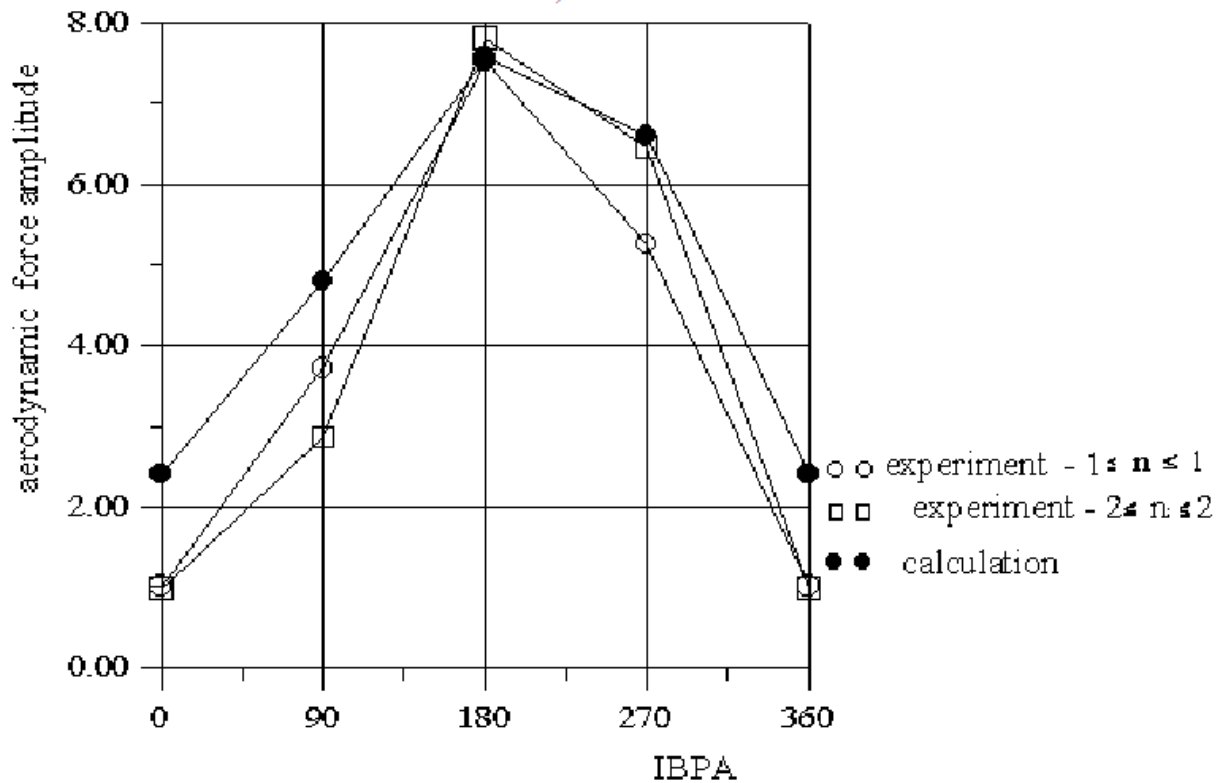


Obr. 21: Pracovní koeficienty versus IBPA při surném kmitání s náběhovým úhlem 16°

V obrázcích 22-23 jsou ukázány vypočtené a naměřené amplitudy nestálých sil při surném kmitání pro různé dopadové úhly. Výpočet nestálých amplitud byl proveden použitím vlivu koeficientů s přihlédnutím na dvě sousedící lopatky. Z výsledků uvedených v těchto obrázcích je vidět, že byla dosažena vyhovující shoda s numerickými výpočty.



Obr. 22: Amplituda aerodynamické síly při surném kmitání



Obr. 23: Amplituda aerodynamické síly při surném kmitání s dopadovým úhlem 16°

7. Porovnání výsledků experimentu a simulací [4]

Pro experiment (stejně i pro výpočet) byly stanoveny shodné parametry proudění i vibrací jednotlivých lopatek. To znamená, že lopatka č. 2 byla nuceně buzena k surnému kmitání s amplitudou 0,7 [mm] a frekvencí 81,5 [Hz]. Síly byly poté měřeny siloměry umístěnými na vibrouzlu lopatky č. 3. Siloměry zároveň lopatku 3 fixovaly na místě. Ostatní lopatky byly také fixovány a nekmitaly. Rychlost proudění před lopatkovou řadou byla 115 [m·s⁻¹]. Byly testovány postupně dvě varianty. První s úhlem náběhu 0 stupňů, druhá s úhlem náběhu 8 stupňů. Pro výpočet fáze experimentálně získaného signálu byl použit referenční signál výchylek, zatímco výpočet numericky spočtených dat byl prováděn ze skutečného signálu sil působících na referenční lopatku. Výpočet byl prováděn ve 2D, síly jsou tedy vztaženy k jednotkové délce lopatky a nelze je tedy srovnávat přímo s experimentálně zjištěnými silami. Výsledky pro první variantu jsou zapsány v tabulce 1. Síly nejsou v tomto případě přepočteny na shodnou délku lopatek. Naproti tomu aerodynamické koeficienty zjištěné experimentálně a numericky vykazují dobrou shodu. Podstatný rozdíl je pouze ve fázi obou hodnot, což je částečně způsobeno rozdílným způsobem výpočtu fáze pro experiment a pro výpočet. I tak je rozdíl mezi experimentálně a numericky získanými daty 7,35 %.

Výsledky druhé varianty, tj. varianty s úhlem náběhu 8 stupňů, jsou zapsány v tabulce 2. Zde rozdíl překračuje 85 %. Příčinu lze hledat jak v přílišném zjednodušení modelu numerické simulace, tak v nepřesnosti měření.

	Experiment		Výpočet	
	$F_o [N]$	$F_f [N]$	$F_o [N]$	$F_f [N]$
ampl.	-2,9696	-3,2749	0,04407	1,7674
fáze	0,5410	1,0138	0,33418	2,8159
	$L [N]$		$L [N]$	
ampl., fáze	0,5628	-1,5486	1,7234	2,4817
komplexní	-0,3053+0,4728i		-1,3616+1,0565i	
	l_{23}		l_{23}	
komplexní	$(-3,28+5,04i) \cdot 10^{-4}$		$(-3,14+4,24i) \cdot 10^{-4}$	
rozdíl	7,35 %			

Tab. 1: Srovnání experimentu s numerickou simulací pro nulový úhel náběhu

	Experiment		Výpočet	
	$F_o [N]$	$F_f [N]$	$F_o [N]$	$F_f [N]$
ampl.	4,0262	-1,4546	0,04407	4,1837
fáze	-1,5008	0,1818	0,33418	2,0064
	$L [N]$		$L [N]$	
ampl., fáze	-5,4808	1,682	4,1397	1,6724
komplexní	0.60823-5.4469i		-0,41836+4,11847i	
	l_{23}		l_{23}	
komplexní	$(5,312+1,632i) \cdot 10^{-3}$		$(-0,9641 + 9,491i) \cdot 10^{-4}$	
rozdíl	85,25 %			

Tab. 2: Srovnání experimentu s numerickou simulací pro úhel náběhu 8°

8. Sestavení vyhodnocovacích rovnic

Vyhodnocovací rovnice byly sestaveny a modifikovány pro suvně torzní kmitání v díle [11]. Zde budou odvozeny vztahy pro určení aerodynamických momentů a sil přenášejících se proudem od suvně torzního kmitání buzené lopatky. Modely lopatek byly buzeny vibračními jednotkami. Každý model je připojen na dvě vibrační jednotky. Ty rozkmitávají modely lopatek, tak jak je potřeba nebo zafixovat, aby bylo možné měřit vliv buzené lopatky. Momenty a síly popisují závislost přenosu energie mezi jednotlivými modely lopatek a to jak s vlivem proudění a bez vlivu. Ze sil a momentů jsou vypočteny vazební koeficienty.

Odvození vychází ze základního modelu kmitání. Ty jsou modifikovány a byly přidány členy aerodynamických sil a momentů. Buzená lopatka je označena indexem k . Indexem n značí lopatku, na kterou působí tyto momenty a síly. Pokud $n = k$, buzená lopatka působí sama na sebe. Rovnice jsou vztaženy na jednotku délky lopatky.

Rovnice pro suvné (1) a pro torzní (2) kmitání jsou řešeny superpozicí. Členy na levé straně rovnice jsou setrvačné, útlumové a pružné síly, pro torzi momenty. Na pravé straně jsou sumy vazebních aerodynamických sil resp. momentů a sílu rep. moment buzení vibrační jednotky.

$$m\ddot{y}_n + b\dot{y}_n + ky_n = F - \rho S \sum \left(m_{nk}^y \ddot{y}_k + \frac{1}{t_s} m_{nk}^\alpha \ddot{\alpha}_k \right) - \rho w t \sum (b_{nk}^y \dot{y}_k + t b_{nk}^\alpha \dot{\alpha}_k) - \frac{1}{2} \rho w^2 \sum (k_{nk}^y y_k + t k_{nk}^\alpha \alpha_k) \quad (1)$$

$$I_m \ddot{\alpha}_n + B \dot{\alpha}_n + K \alpha_n = M - \rho I \sum \left(\frac{st}{I} I_{nk}^y \ddot{y}_k + I_{nk}^\alpha \ddot{\alpha}_k \right) - \rho w t^3 \sum \left(\frac{1}{t} B_{nk}^y \dot{y}_k + B_{nk}^\alpha \dot{\alpha}_k \right) - \frac{1}{2} \rho w^2 t^2 \sum \left(\frac{1}{t} K_{nk}^y y_k + K_{nk}^\alpha \alpha_k \right) \quad (2)$$

Popis konstant s rozměry je zobrazen v tabulce číslo 3.

Konstanta [jednotka]	Název
m [kg]	hmotnost
I_m [kg/m²]	hmotnostní moment setrvačnosti
b [kg/s]	útlum při suvném kmitání
B [kg/s]	útlum při torzním kmitání
k [N/m]	tuhost při suvném kmitání
K [N/m]	tuhost při torzním kmitání
ρ [kg/m³]	hustota vzduchu
S [m²]	průřez lopatky
I [kg/m²]	polární moment setrvačnosti
t [m]	délka tětiny lopatky
w [m/s]	rychlost proudění mezi lopatkami
$m_{nk}^y, b_{nk}^y, k_{nk}^y, I_{nk}^y, B_{nk}^y, K_{nk}^y$ [-]	vazební koeficienty suvného kmitání
$m_{nk}^\alpha, b_{nk}^\alpha, k_{nk}^\alpha, I_{nk}^\alpha, B_{nk}^\alpha, K_{nk}^\alpha$ [-]	vazební koeficienty torzního kmitání

Tab. 3: Popis konstant

Z tabulky je vidět že je potřeba 12 vazebních koeficientů pro každou lopatku. K jejich určení potřebujeme stejný počet rovnic.

Nyní nastává chvíle pro superpozici torzního a suvného kmitání pro sílu a moment. Tu popisují rovnice (3) a (4).

$$F_{nk} = F_{nk}^y + F_{nk}^\alpha \quad (3)$$

$$M_{nk} = M_{nk}^y + M_{nk}^\alpha \quad (4)$$

Síla na n-tou lopatku od suvného kmitání k-té lopatky:

$$F_{nk}^y = m\ddot{y}_n + b\dot{y}_n + ky_n + \rho S m_{nk}^y \ddot{y}_k + \rho w t b_{nk}^y \dot{y}_k + \frac{1}{2} \rho w^2 k_{nk}^y y_k \quad (5)$$

Síla na n-tou lopatku od torzního kmitání k-té lopatky:

$$F_{nk}^\alpha = m\ddot{y}_n + b\dot{y}_n + ky_n + \rho \frac{I}{t} m_{nk}^\alpha \ddot{\alpha}_k + \rho w t b_{nk}^\alpha \dot{\alpha}_k + \frac{1}{2} \rho w^2 k_{nk}^\alpha \alpha_k \quad (6)$$

Moment na n-tou lopatku od suvného kmitání k-té lopatky:

$$M_{nk}^y = I_m \ddot{\alpha}_n + B \ddot{\alpha}_n + K \alpha_n + \rho S t I_{nk}^y \ddot{y}_k + \rho w t^2 B_{nk}^y \dot{y}_k + \frac{1}{2} \rho w^2 t^2 K_{nk}^y y_k \quad (7)$$

Moment na n-tou lopatku od torzního kmitání k-té lopatky:

$$M_{nk}^\alpha = I_m \ddot{\alpha}_n + B \ddot{\alpha}_n + K \alpha_n + \rho I I_{nk}^\alpha \ddot{\alpha}_k + \rho w t^3 B_{nk}^\alpha \dot{\alpha}_k + \frac{1}{2} \rho w^2 t^2 K_{nk}^\alpha \alpha_k \quad (8)$$

Podle matematického vzorce dosadíme z rovnic (9) až (14) do rovnic (3) až (8). Fázový posun v rovnicích je způsoben zpožděním výchylky resp. síly a momentu.

$$y_k = |y_k| e^{i\omega t} \quad (9)$$

$$\alpha_k = |\alpha_k| e^{i\omega t} \quad (10)$$

$$y_n = |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} \quad (11)$$

$$\alpha_n = |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} \quad (12)$$

$$F_{nk} = |F_{nk}| e^{i(\omega t - \varphi_F)} \quad (13)$$

$$M_{nk} = |M_{nk}| e^{i(\omega t - \varphi_M)} \quad (14)$$

Po dosazení a derivování dostaneme rovnice (15) až (18).

$$\begin{aligned} |F_{nk}^y| e^{i(\omega t - \varphi_F)} = & -\omega^2 m |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} + i\omega b |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} + k |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} \\ & - \omega^2 \rho S m_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} + i\omega \rho w t b_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \rho w^2 k_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (15)$$

$$\begin{aligned} |F_{nk}^\alpha| e^{i(\omega t - \varphi_F)} = & -\omega^2 m |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} + i\omega b |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} + k |y_n| e^{i(\omega t - \varphi_y)} \\ & - \omega^2 \rho \frac{I}{t} m_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} + i\omega \rho w t^2 b_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \rho w^2 t k_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} \end{aligned} \quad (16)$$

$$|M_{nk}^y| e^{i(\omega t - \varphi_M)} = -\omega^2 I_m |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} + i\omega B |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} + K |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} - \omega^2 \rho S t I_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} + i\omega \rho w t^2 B_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \rho w^2 t K_{nk}^y |y_k| e^{i\omega t} \quad (17)$$

$$|M_{nk}^\alpha| e^{i(\omega t - \varphi_M)} = -\omega^2 I_m |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} + i\omega B |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} + K |\alpha_n| e^{i(\omega t - \varphi_\alpha)} - \omega^2 \rho I I_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} + i\omega \rho w t^3 B_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} + \frac{1}{2} \rho w^2 t^2 K_{nk}^\alpha |\alpha_k| e^{i\omega t} \quad (18)$$

Rovnice lze krátit $e^{i\omega t}$. Substitucí vyjádříme setrvačné, útlumové a pružné síly resp. momenty. Ty ještě dělíme na mechanické a aerodynamické. V tabulce číslo 4 vidíme MS, což je mechanická setrvačná síla. MU je mechanická útlumová síla. MP je mechanická pružná síla. Stejně je to u aerodynamických sil, kde M nahradíme A.

$ MS_n^y = \omega^2 m y_0 $	$ MU_n^y = \omega b y_0 $	$ MP_n^y = k y_0 $
$ MS_n^\alpha = \omega^2 I_m \alpha_0 $	$ MU_n^\alpha = \omega B \alpha_0 $	$ MP_n^\alpha = K \alpha_0 $
$ AS_{nk}^{yy} = \omega^2 \rho S m_{nk}^y y_k $	$ AU_{nk}^{yy} = \omega \rho w t b_{nk}^y y_k $	$ AP_{nk}^{yy} = \frac{1}{2} \rho w^2 k_{nk}^y y_k $
$ AS_{nk}^{y\alpha} = \omega^2 \rho \frac{I}{t} m_{nk}^\alpha \alpha_k $	$ AU_{nk}^{y\alpha} = \omega \rho w t^2 b_{nk}^\alpha \alpha_k $	$ AP_{nk}^{y\alpha} = \frac{1}{2} \rho w^2 t k_{nk}^\alpha \alpha_k $
$ AS_{nk}^{\alpha y} = \omega^2 \rho S I_{nk}^y y_k $	$ AU_{nk}^{\alpha y} = \omega \rho w t^2 B_{nk}^y y_k $	$ AP_{nk}^{\alpha y} = \frac{1}{2} \rho w^2 t K_{nk}^y y_k $
$ AS_{nk}^{\alpha\alpha} = \omega^2 \rho I I_{nk}^\alpha \alpha_k $	$ AU_{nk}^{\alpha\alpha} = \omega \rho w t^3 B_{nk}^\alpha \alpha_k $	$ AP_{nk}^{\alpha\alpha} = \frac{1}{2} \rho w^2 t^2 K_{nk}^\alpha \alpha_k $

Tab. 4: Síly a momenty

Síly před dosazením ještě pro přehlednost zobecníme.

$$|MS_n^y|, |MS_n^\alpha| \Rightarrow |MS|$$

$$|MU_n^y|, |MU_n^\alpha| \Rightarrow |MU|$$

$$|MP_n^y|, |MP_n^\alpha| \Rightarrow |MP|$$

$$|AS_{nk}^{yy}|, |AS_{nk}^{y\alpha}|, |AS_{nk}^{\alpha y}|, |AS_{nk}^{\alpha\alpha}| \Rightarrow |AS|$$

$$|AU_{nk}^{yy}|, |AU_{nk}^{y\alpha}|, |AU_{nk}^{\alpha y}|, |AU_{nk}^{\alpha\alpha}| \Rightarrow |AU|$$

$$|AP_{nk}^{yy}|, |AP_{nk}^{y\alpha}|, |AP_{nk}^{\alpha y}|, |AP_{nk}^{\alpha\alpha}| \Rightarrow |AP|$$

$$|F_{nk}^{yy}|, |F_{nk}^{y\alpha}|, |M_{nk}^{\alpha y}|, |M_{nk}^{\alpha\alpha}| \Rightarrow |FM|$$

$$\varphi_y, \varphi_\alpha \Rightarrow \varphi_v ; \varphi_F, \varphi_M \Rightarrow \varphi_S$$

$|MS|, |MU|, |MP|$ jsou amplitudy mechanické setrvačné síly nebo momentu. $|AS|, |AU|, |AP|$ jsou amplitudy aerodynamické síly nebo momentu. $|FM|$ je amplituda síly F nebo momentu M . φ_V je fázový posun výchylky a φ_S je fázový posun síly.

Členy zprava u rovnic (15) až (18) jsou převedeny doleva a za hodnoty (19) jsou dosazeny exponenciální funkce. Nyní jsou dosazeny zobecněné tvary sil a momentů a dostáváme rovnice

$$-1 = e^{i\pi}; \quad i = e^{i\frac{\pi}{2}}; \quad -i = e^{i\frac{3\pi}{2}} \quad (19)$$

$$|FM|e^{-i\varphi_S} + |MS|e^{-i\varphi_V} + |MU|e^{-i(-\varphi_V + \frac{3\pi}{2})} + |MP|e^{-i(-\varphi_V + \pi)} + |AS| + |AU|e^{i\frac{3\pi}{2}} + |AP|e^{i\pi} = 0 \quad (20)$$

Rovnice (20) je vynásobena $e^{i\varphi_V}$ a proveden přepočítání fázového posunu $\varphi_V - \varphi_S = \varphi$.

$$|FM|e^{i\varphi} + |MS| + |MU|e^{i\frac{3\pi}{2}} + |MP|e^{i\pi} + |AS|e^{i\varphi_V} + |AU|e^{i(\varphi_V + \frac{3\pi}{2})} + |AP|e^{i(\varphi_V + \pi)} = 0 \quad (21)$$

8.1. Stav bez proudění:

Aerodynamické útlumové a pružné síly jsou nulové, protože z tabulky 2 je vidět, že jsou závislé na rychlosti. Rychlost ve stavu bez proudění se uvažuje $w = 0$. Indexováno je nulou nad veličinami.

$$|FM|^0 e^{i\varphi^0} + |MS| + |MU|e^{i\frac{3\pi}{2}} + |MP|e^{i\pi} + |AS|e^{i\varphi_V^0} = 0 \quad (22)$$

Nyní je rovnice (22) rozložena na imaginární (23) a reálnou část (24), aby došlo k odstranění komplexního čísla.

$$|FM|^0 \sin \varphi - |MU| + |AS| \sin \varphi_V^0 = 0 \quad (23)$$

$$|FM|^0 \cos \varphi + |MS| - |MP| + |AS| \cos \varphi_V^0 = 0 \quad (24)$$

Z těchto rovnic už snadno vyjádříme setrvačné a útlumové síly.

$$|MU| = |FM|^0 \sin \varphi + |AS| \sin \varphi_V \quad (25)$$

$$|AS| = \frac{1}{\cos \varphi_V} (|MP| - |MS| - |FM|^0 \cos \varphi) \quad (26)$$

Zpětným dosazením za zobecnění dostáváme přesné rovnice pro tyto síly.

8.2. Stav s prouděním:

Rovnice (21) je indexována w nad veličinami. Stejně rovnici rozložíme na imaginární (28) a reálnou část (29) a z těchto rovnic dostáváme rovnice pro aerodynamické útlumové a pružné síly.

$$|FM|^w e^{i\varphi^w} + |MS| + |MU|e^{i\frac{3\pi}{2}} + |MP|e^{i\pi} + |AS|e^{i\varphi_V^w} + |AU|e^{i(\varphi_V^w + \frac{3\pi}{2})} + |AP|e^{i(\varphi_V^w + \pi)} = 0 \quad (27)$$

$$|FM|^w \sin \varphi^w - |MU| + |AS| \sin \varphi_V^w - |AU| \sin \varphi_V^w - |AP| \sin \varphi_V^w = 0 \quad (28)$$

$$|FM|^w \cos \varphi^w + |MS| - |MP| + |AS| \cos \varphi_V^w + |AU| \sin \varphi_V^w - |AP| \cos \varphi_V^w = 0 \quad (29)$$

Pro zjednodušení je provedena substituce.

$$|AU| \sin \varphi_V^w + |AP| \sin \varphi_V^w = |FM|^w \sin \varphi^w - |MU| + |AS| \sin \varphi_V^w = Z \quad (30)$$

$$|AU| \sin \varphi_V^w - |AP| \cos \varphi_V^w = -|FM|^w \cos \varphi^w - |MS| + |MP| - |AS| \cos \varphi_V^w = Y \quad (31)$$

Nyní je řešena soustava rovnic (30) a (31) přes diskriminant. Po úpravě goniometrických funkcí dostaneme

$$|AT| = Y \sin \varphi_V^w + Z \cos \varphi_V^w \quad (32)$$

$$|AP| = Z \sin \varphi_V^w - Y \cos \varphi_V^w \quad (33)$$

Následným dosazením za substituce a dalším dosazením za zobecnění dostaneme rovnice s vlivem proudění při suvně torzním buzení.

9. Dílčí měření

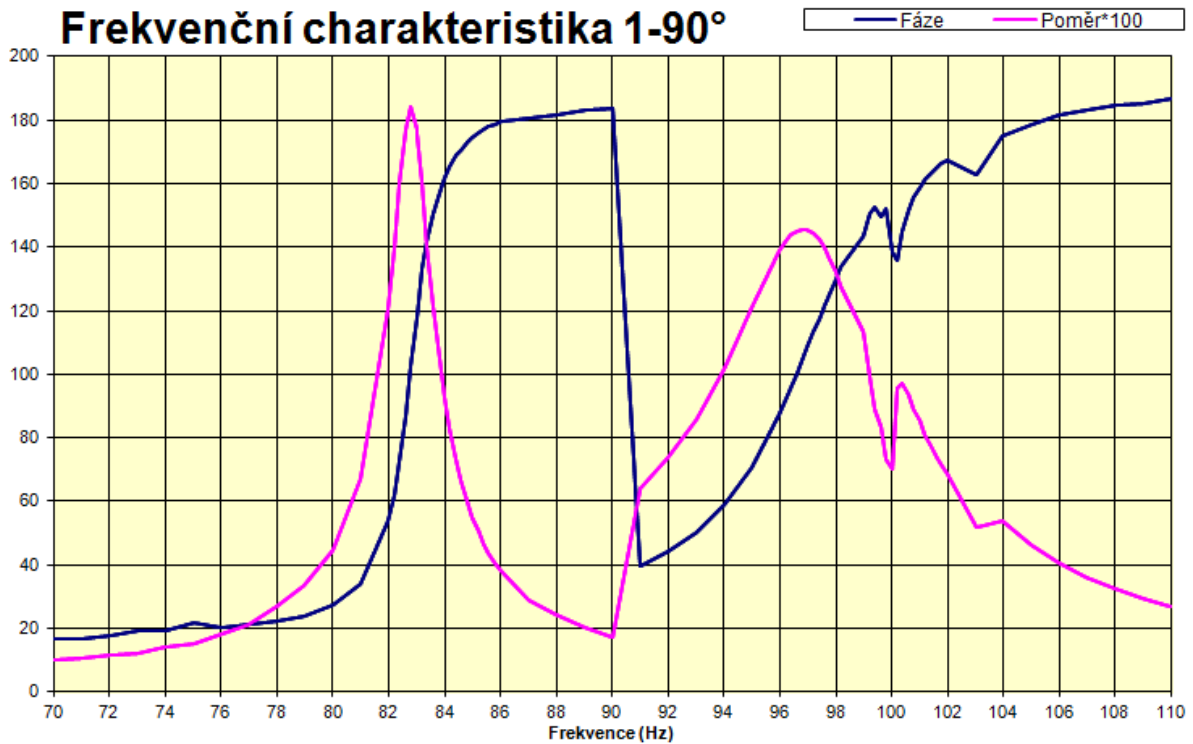
Tato kapitola uvádí ladící měření provedené v laboratořích na Katedře energetických strojů a zařízení. Měření byly frekvenční charakteristiky jednotlivých modelů lopatek při torzně suvném buzení. Tímto měřením budou zjištěny rezonanční frekvence modelů lopatek. Další částí této kapitoly bude zjištění cejchovních koeficientů pro jednotlivé vibrační jednotky s uvedenými cejchovnými vztahy. Nakonec bude provedeno vyrovnání rychlostního profilu za lopatkovou mříží pomocí odsávacích komor.

9.1. Měření frekvenčních charakteristik

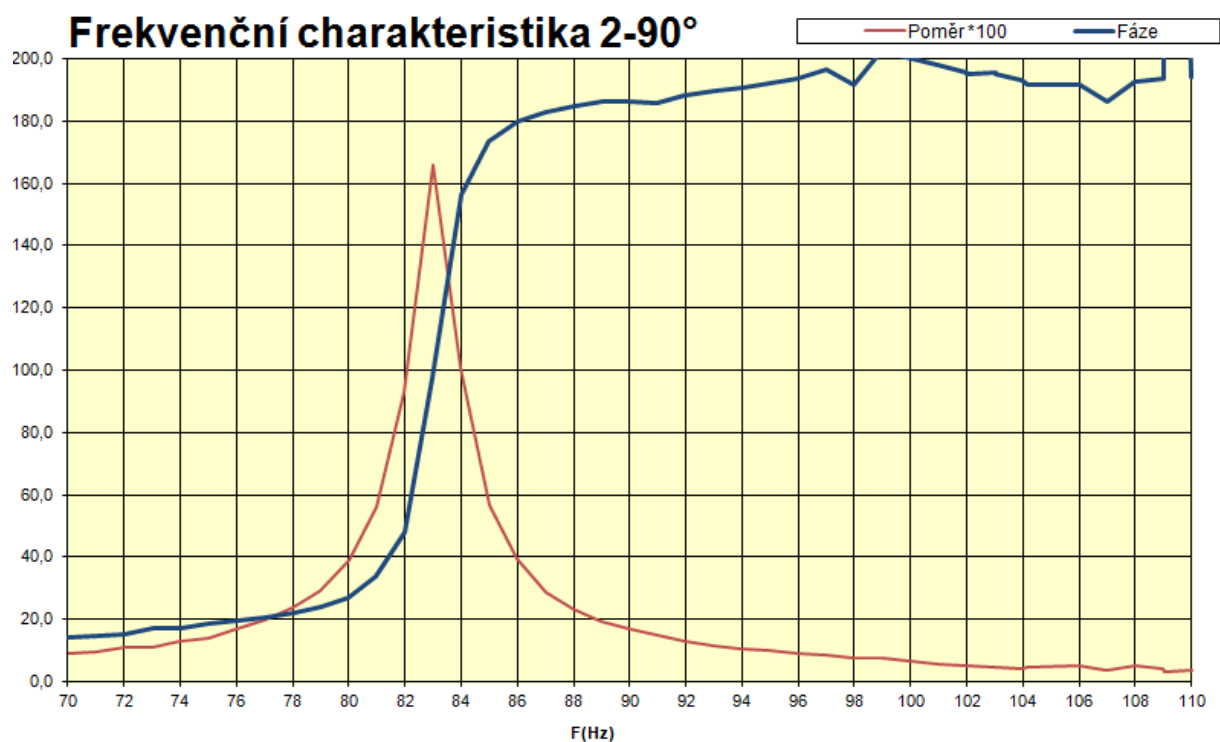
Před měřením muselo být provedeno následující měření z důvodu zjištění rezonančních frekvencí modelů lopatek. Tyto frekvence pak způsobují samovolné vybuzení modelů lopatek. U měření aerodynamických momentů a sil musí být modely lopatek buzeny tak, aby k tomuto jevu nedocházelo.

U torzně suvného buzení bylo nalezeno více rezonančních frekvencí díky kombinaci vibrací. Hlavní rezonanční frekvence byly měřením nalezeny v okolí 84 Hz. Měřeno bylo od 70 do 110 Hz po jednom Hz. Snahou bylo udržet výchylku pomocí napětí na generátoru a pro jemnější regulaci byl využit potenciometr. Výchylka úhlu byla držena na $0,14^\circ$ a výchylka vzdálenosti na 0,28 mm.

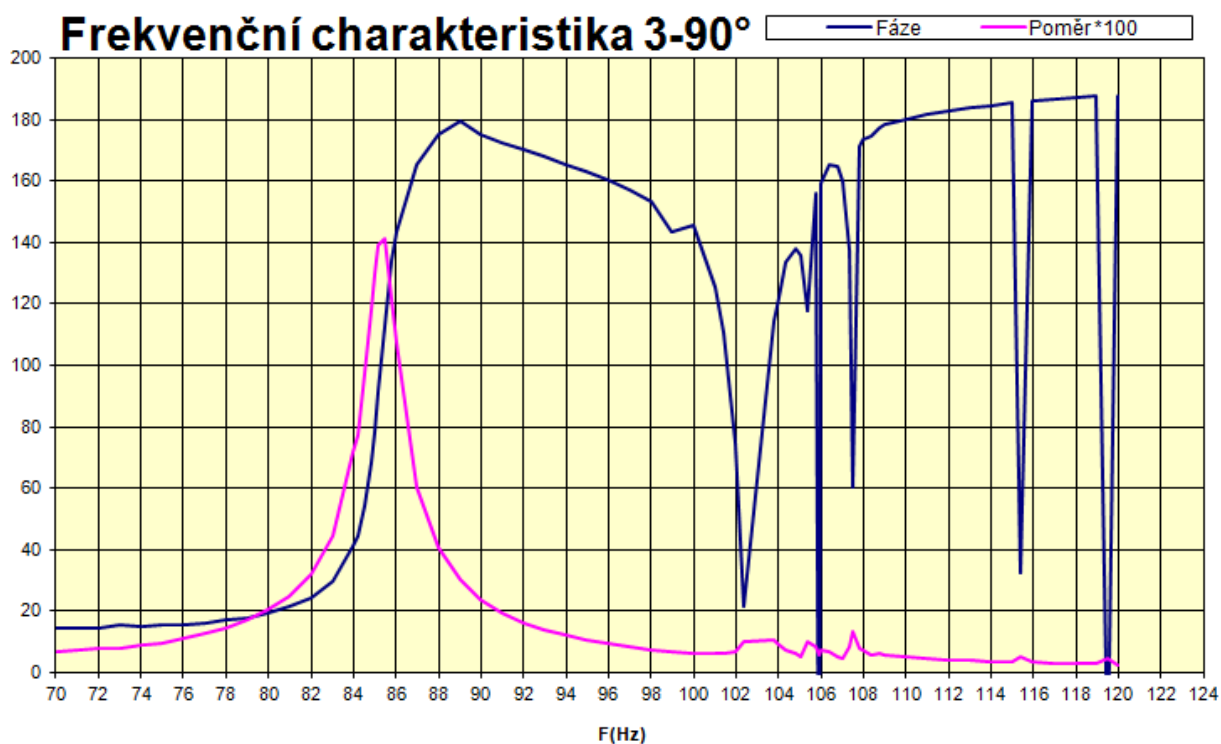
Na obrázcích 24-26 je vidět graf s průběhem frekvenční charakteristiky pro torzně surné buzení lopatek 1 až 3. Na vodorovné ose je frekvence a na svislé ose je fáze. Modře je znázorněn průběh fáze a červeně poměr výchylky a proudu, který je potřeba k vytvoření této výchylky. Díky chybě v programu došlo u fáze k překročení 180° , což ve skutečnosti není možné. Rezonanční frekvence jsou uvedeny v tabulce 5. Díky zjištění rezonanční frekvence můžeme budít modely lopatek frekvencí 70 Hz a docházet k samovolnému vybuzení docházet nebude.



Obr. 24: Frekvenční charakteristika první lopatky



Obr. 25: Frekvenční charakteristika druhé lopatky



Obr. 26: Frekvenční charakteristika třetí lopatky

Číslo lopatky	Proud [A]	Výchylka úhlu [°]	Výchylka y [mm]	Poměr výchylky a proudu	Rezonanční frekvence [Hz]
1.	0,175	0,14	0,28	1,844	82,8
2.	0,18	0,14	0,28	1,658	82,99
3.	0,097	0,14	0,28	1,239	83,54

Tab. 5: Přehled rezonančních frekvencí

9.2. Měření cejchovních koeficientů

Cílem cejchování vibračních jednotek je určit závislost mezi proudem a silou u suvného a momentem u torzního kmitání. Pro suvně torzní kmitání musí být naměřeny cejchovní konstanty jak pro suvné tak pro torzní kmitání. Jde o konstanty K a konstantu fázového posunu φ . Měřeno bylo bez vlivu proudící tekutiny. Nejprve byly naměřeny hodnoty pro nezátížená ramena paralelogramu a poté bylo měřeno s přidáním závaží o stejné hmotnosti na každé straně paralelogramu. Dále jsou uvedeny vztahy vytažené z programu, který koeficienty počítá. Konečné výsledky cejchovních koeficientů uvádí tabulka 5.

Číslo lopatky	Suvné buzení		Torzní buzení	
	KR	φ_R	KT	φ_T
1.	2,395	10,203	4,753	13,854
2.	1,791	9,620	4,586	13,139
3.	1,474	7,956	4,678	12,778

Tab. 5: Naměřené cejchovní koeficienty

$$A = \frac{1}{(D_m \cdot y \cdot \omega^2)} \quad ; \quad \omega = 2\pi f$$

$$B = A$$

$$A = A \cdot (I_1 \cos \varphi_1 - I_2 \cos \varphi_2)$$

$$B = B \cdot (I_1 \sin \varphi_1 - I_2 \sin \varphi_2)$$

$$K = \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}}$$

$$\varphi = \frac{180}{\pi} \cdot \arctg \frac{B}{A}$$

D_m – hmotnost závaží [kg]
 y – střední výchylka
 f – frekvence kmitání
 I_1 – proud bez závaží
 I_2 – proud se závažím
 φ_1 – fázový posuv bez závaží
 φ_2 – fázový posuv se závažím

9.3. Vyrovnání rychlostního profilu

Před několika lety byl rychlostní profil měřen pomocí traverzeru, který proměřoval tlak mezi modely lopatek pomocí krokového motoru. Tyto výsledky nebylo možné použít, jelikož experimentální zařízení bylo z části rozebráno a opraveno. Tudíž byla potřeba naměřit nový rychlostní profil a ten poté pomocí odsávání vyrovnat. Byla navržena a vyrobena hřebenová sonda, která dokáže na principu Pitotovi trubice měřit tlak v každé mezeře mezi modely lopatek. Sonda byla připevněna na pojezd traverzeru tak, aby trubice směřovali do mezery kolmo na proud vzduchu. Pomocí hadiček byla sonda napojena na ústřednu měřící celkový tlak. Dále byl měřen pomocí stejné hadičky statický tlak uvnitř měřícího zařízení. V tabulce 6 je tlak v mezilopátkových prostorech. Poslední hodnota (9) zobrazuje statický tlak uvnitř experimentálního zařízení. Nejlepších výsledků bylo dosaženo otevřením odsávacích komor P1, P2 a L1. Pro srovnání jsou v druhé řádce hodnoty bez odsávání.

Měření	1	2	3	4	5	6	7	8	9
	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]	[kPa]
S odsáváním	5,486	5,489	5,501	5,500	5,497	5,431	5,482	5,495	5,626
Bez odsávání	6,214	6,215	6,222	6,222	6,219	5,486	6,148	6,222	6,338

Tab. 6: Tlak v mezilopátkových mezerách a v okolí

10. Ladící měření aerodynamických sil

Obsahem této kapitoly je naměření vazebních momentů pro surně torzní buzení jedné lopatky při různých rychlostech proudění mezi modely lopatek. Náběhový úhel byl nastaven na 5° .

10.1. Měření aerodynamických sil s různými rychlostmi proudu.

Rychlost proudění byla proměřena od 60 do 115 m/s. Pro torzní buzení byla nastavena výchylka na $0,4^\circ$. Z této hodnoty byla převodem nastavena výchylka pro surně torzní buzení modelu lopatky na $y = 0,14 \text{ mm}$ a $\alpha = 0,28^\circ$. Frekvence budícího signálu byla nastavena na hodnotu 70 Hz. Další tři modely lopatek byly fixovány vibračními jednotkami. Signál, který musí být vynaložen na fixaci lopatek byl zaznamenán. Z něho byla vypočtena hodnota aerodynamické síly.

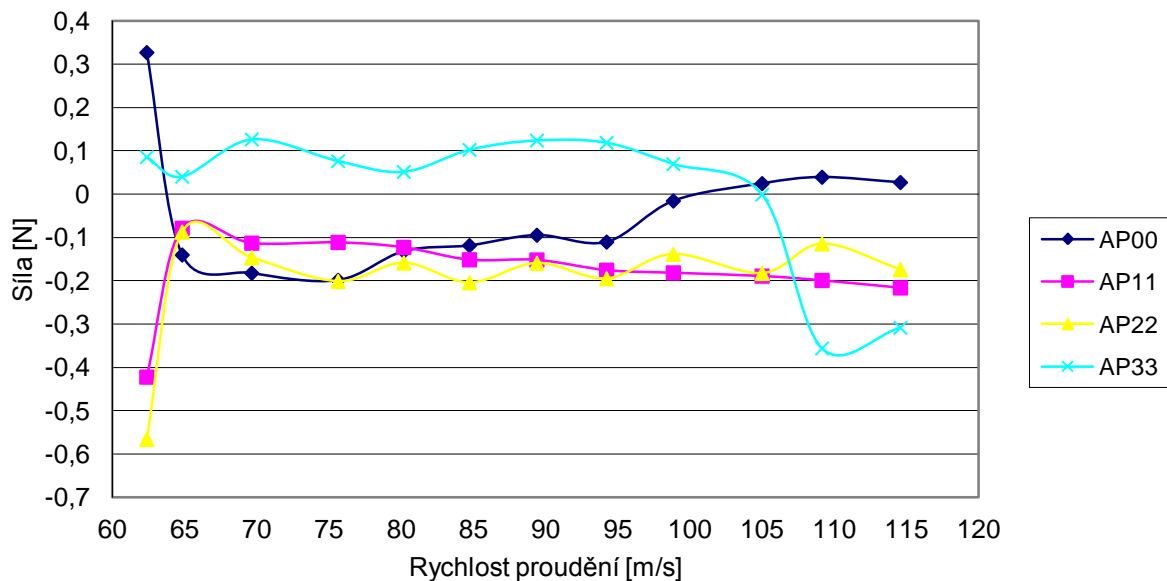
Z vyhodnocovacích rovnic odvozených výše plyne, že důležité pro výpočet je měření bez vlivu proudícího vzduchu. Nastavení amplitudy, fáze a frekvence bylo stejné jako při měření s vlivem proudícího vzduchu.

Nejdříve musí být použita Fourierova transformace (FFT) pro vyčištění šumu, který vzniká díky velké rychlosti proudění. FFT dokáže vyčistit velké množství frekvencí, které vnikají při proudění. Dominantní frekvence buzení je dále jasná.

Regulace otáček na motoru kompresoru dokáže vytvořit rychlost proudění od 60 do 115 m/s. Otáčky kompresoru byly regulovány tak, aby bylo měřeno po 5 m/s. Z grafů je patrné, že rychlost proudění příliš neovlivňuje aerodynamické síly. Bohužel výkon kompresoru dosahuje jen na rychlost 115 m/s, tudíž další hodnoty nad touto hranicí nebyly zaznamenány.

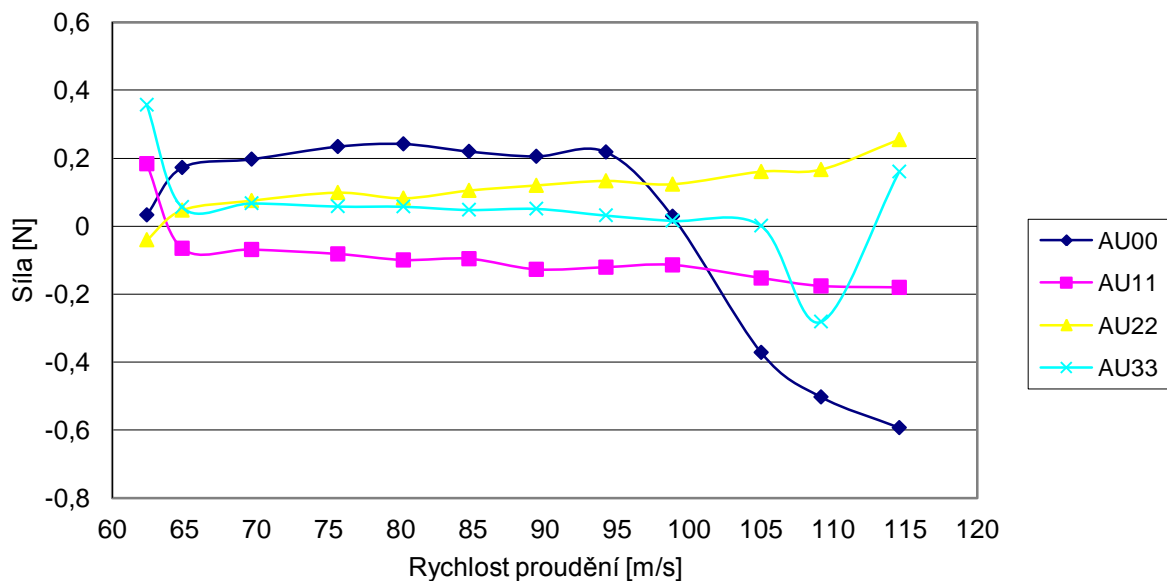
Z výsledků už se snadno vypočtou momenty použitím délky tětivy modelu lopatky. Výsledky jsou prezentovány na grafech popisující průběh sil působících od buzené lopatky zpět na buzenou a dále působení buzené lopatky na jednu fixovanou. Dle programu postupně budíme model lopatky číslo 1 až 3 a sledujeme vliv na model číslo 0. Síly musejí být chápány v absolutní hodnotě.

Obrázek 27 ukazuje průběhy pružných aerodynamických sil buzené lopatky samu na sebe. Žádná větší závislost zde není vidět, jen při vyšší rychlosti dochází k drobnému výkyvu síly.



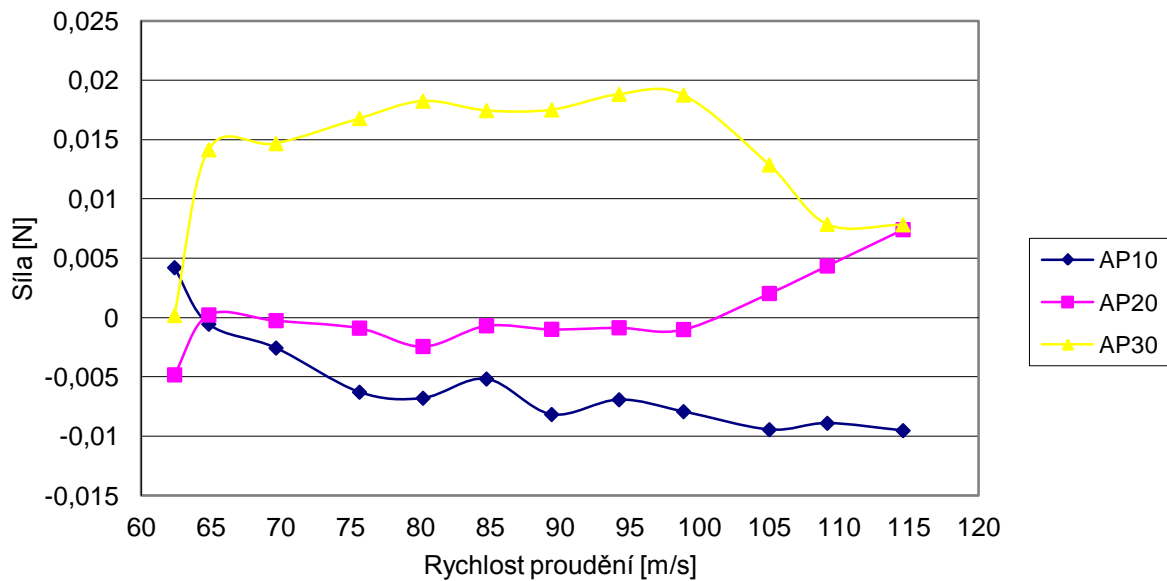
Obr. 27: Aerodynamické pružné síly

Na obrázku 28 je zobrazen průběh útlumových aerodynamických sil. Absolutní hodnoty útlumových sil mírně stoupají s přibývajícím rychlosti proudícího vzduchu.

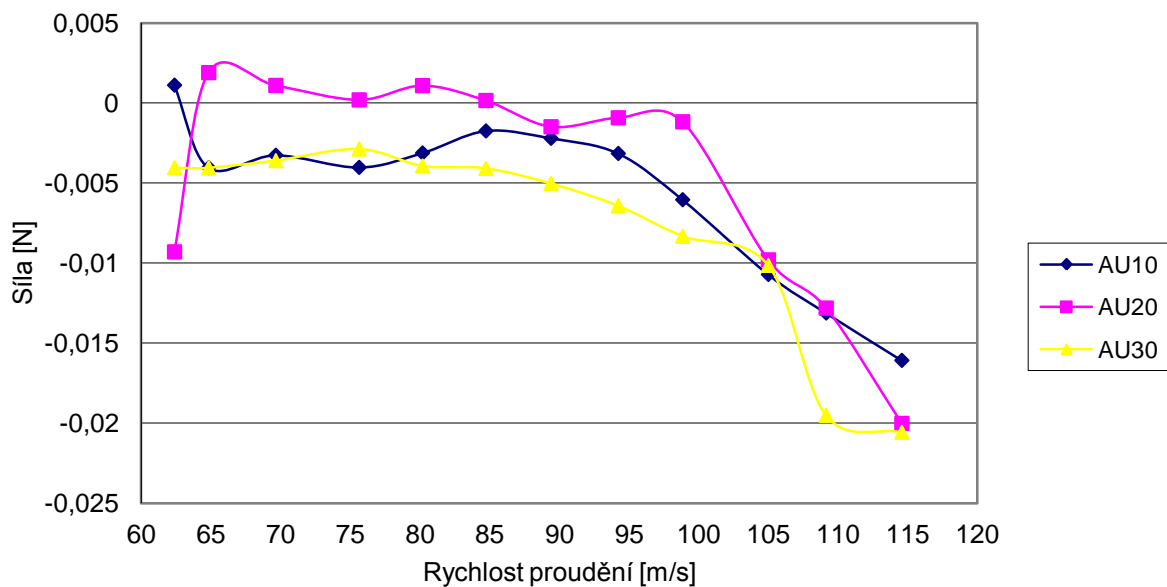


Obr. 28: Aerodynamické útlumové síly

Obrázek 29 a 30 ukazují průběh pružné a útlumové síly. Postupným buzením třech lopatek je zaznamenán vliv na čtvrtou. Hodnoty jsou skoro o 2 řády nižší a rostou z přibývajících rychlostí. U rychlostí nad 100 m/s už útlumové síly rostou mnohem rychleji než při nižších rychlostech.



Obr. 29: Aerodynamické pružné síly působící na fixovanou lopatku



Obr. 30: Aerodynamické útlumové síly působící na fixovanou lopatku

Byly naměřeny i hodnoty sil působících na další lopatky. Pro ty už ale nejsou udělány grafy. Pro představu autor přikládá tabulky s naměřenými hodnotami všech kombinací buzení.

VP	AP00	AP10	AP20	AP30	AP01	AP11	AP21	AP31
62,38	0,32708	0,00421	-0,00482	0,00019	0,00143	-0,4221	-0,02287	-0,00076
64,83	-0,1402	-0,00055	0,00023	0,01415	-0,00109	-0,07865	-0,00133	0,01002
69,65	-0,18223	-0,00256	-0,00025	0,01467	-0,00345	-0,11291	-0,00274	0,01177
75,63	-0,19876	-0,00628	-0,00088	0,01678	-0,00618	-0,11127	-0,00351	0,01101
80,18	-0,13172	-0,00679	-0,00243	0,01825	-0,00652	-0,12265	-0,00593	0,0124
84,73	-0,11852	-0,00517	-0,00068	0,01745	-0,00749	-0,15122	-0,00777	0,01075
89,4	-0,0946	-0,00816	-0,00098	0,01751	-0,00702	-0,15169	-0,00761	0,0107
94,23	-0,11039	-0,00692	-0,00085	0,01882	-0,00767	-0,17537	-0,00846	0,01233
98,85	-0,01556	-0,00792	-0,001	0,01876	-0,01072	-0,18153	-0,00784	0,01418
105	0,02463	-0,00944	0,00204	0,01287	-0,01332	-0,1889	-0,01168	0,01312
109,15	0,03927	-0,0089	0,00436	0,00787	-0,01224	-0,19903	-0,0124	0,00303
114,58	0,02711	-0,00952	0,00742	0,00783	-0,01304	-0,21613	-0,01251	0,00497

VP	AP02	AP12	AP22	AP32	AP03	AP13	AP23	AP33
62,38	0,00537	0,0257	-0,56568	0,00772	0,00552	0,00584	-0,02291	0,08558
64,83	0,00674	-0,0035	-0,08735	0,00214	0,00543	0,00294	0,00021	0,04045
69,65	0,0069	-0,00649	-0,14645	-0,00125	0,00515	0,00185	-0,00134	0,12652
75,63	0,00601	-0,01145	-0,20127	0,00016	0,00545	0,00162	-0,00189	0,07651
80,18	0,00759	-0,01399	-0,15872	-0,00232	0,00533	0,00322	-0,00409	0,05155
84,73	0,00763	-0,01334	-0,20426	-0,00486	0,00517	0,00254	-0,0044	0,10249
89,4	0,00743	-0,01535	-0,15923	-0,00122	0,00522	-0,00177	-0,00447	0,12404
94,23	0,00764	-0,01363	-0,19504	-0,00199	0,00533	-0,00021	-0,00584	0,11872
98,85	0,00404	-0,01548	-0,13867	-0,00486	0,00353	0,00059	-0,00783	0,06969
105	-0,00161	-0,02165	-0,18273	-0,00892	0,00082	-0,00233	-0,0092	-0,00093
109,15	-0,00183	-0,02188	-0,11477	-0,01644	0,00079	-0,00179	-0,00937	-0,35607
114,58	-0,00315	-0,02268	-0,17418	-0,01851	0,00001	0,00168	0,00179	-0,30837

Tab. 7: Naměřené hodnoty pružných sil při různých rychlostech

VP	AU00	AU10	AU20	AU30	AU01	AU11	AU21	AU31
62,38	0,03246	0,00111	-0,00931	-0,00406	0,02737	0,18302	-0,01563	-0,011
64,83	0,17194	-0,00405	0,00189	-0,00406	-0,00064	-0,06598	-0,00027	-0,00759
69,65	0,19658	-0,00327	0,00109	-0,00361	0,00202	-0,06953	-0,00203	-0,00779
75,63	0,2337	-0,00403	0,00019	-0,00288	0,0033	-0,08255	-0,00325	-0,00824
80,18	0,2415	-0,00313	0,00108	-0,00394	0,00344	-0,10024	-0,00203	-0,00966
84,73	0,21938	-0,00175	0,00015	-0,00409	0,00572	-0,09663	-0,00299	-0,00827
89,4	0,20495	-0,00221	-0,00149	-0,00504	0,00507	-0,12789	-0,00337	-0,00861
94,23	0,21774	-0,00316	-0,00093	-0,00643	0,00683	-0,12156	-0,00259	-0,01011
98,85	0,02848	-0,00605	-0,00118	-0,00833	0,00727	-0,11488	-0,00191	-0,01135
105	-0,37236	-0,01072	-0,00981	-0,01015	0,01378	-0,15341	-0,00342	-0,00781
109,15	-0,50348	-0,01313	-0,01282	-0,01952	0,01654	-0,17682	-0,00462	-0,01988
114,58	-0,59384	-0,01609	-0,02003	-0,02058	0,01907	-0,18107	-0,01277	-0,02173

VP	AU00	AU10	AU20	AU30	AU01	AU11	AU21	AU31
62,38	0,03246	0,00111	-0,00931	-0,00406	0,02737	0,18302	-0,01563	-0,011
64,83	0,17194	-0,00405	0,00189	-0,00406	-0,00064	-0,06598	-0,00027	-0,00759
69,65	0,19658	-0,00327	0,00109	-0,00361	0,00202	-0,06953	-0,00203	-0,00779
75,63	0,2337	-0,00403	0,00019	-0,00288	0,0033	-0,08255	-0,00325	-0,00824
80,18	0,2415	-0,00313	0,00108	-0,00394	0,00344	-0,10024	-0,00203	-0,00966
84,73	0,21938	-0,00175	0,00015	-0,00409	0,00572	-0,09663	-0,00299	-0,00827
89,4	0,20495	-0,00221	-0,00149	-0,00504	0,00507	-0,12789	-0,00337	-0,00861
94,23	0,21774	-0,00316	-0,00093	-0,00643	0,00683	-0,12156	-0,00259	-0,01011
98,85	0,02848	-0,00605	-0,00118	-0,00833	0,00727	-0,11488	-0,00191	-0,01135
105	-0,37236	-0,01072	-0,00981	-0,01015	0,01378	-0,15341	-0,00342	-0,00781
109,15	-0,50348	-0,01313	-0,01282	-0,01952	0,01654	-0,17682	-0,00462	-0,01988
114,58	-0,59384	-0,01609	-0,02003	-0,02058	0,01907	-0,18107	-0,01277	-0,02173

Tab. 8: Naměřené hodnoty útlumových sil při různých rychlostech

VP značí rychlost proudění a dvě čísla na konci značí vliv buzené lopatky na k-tou lopatku.

11. Měření vazebních sil pro několik fázových úhlů krut versus posuv

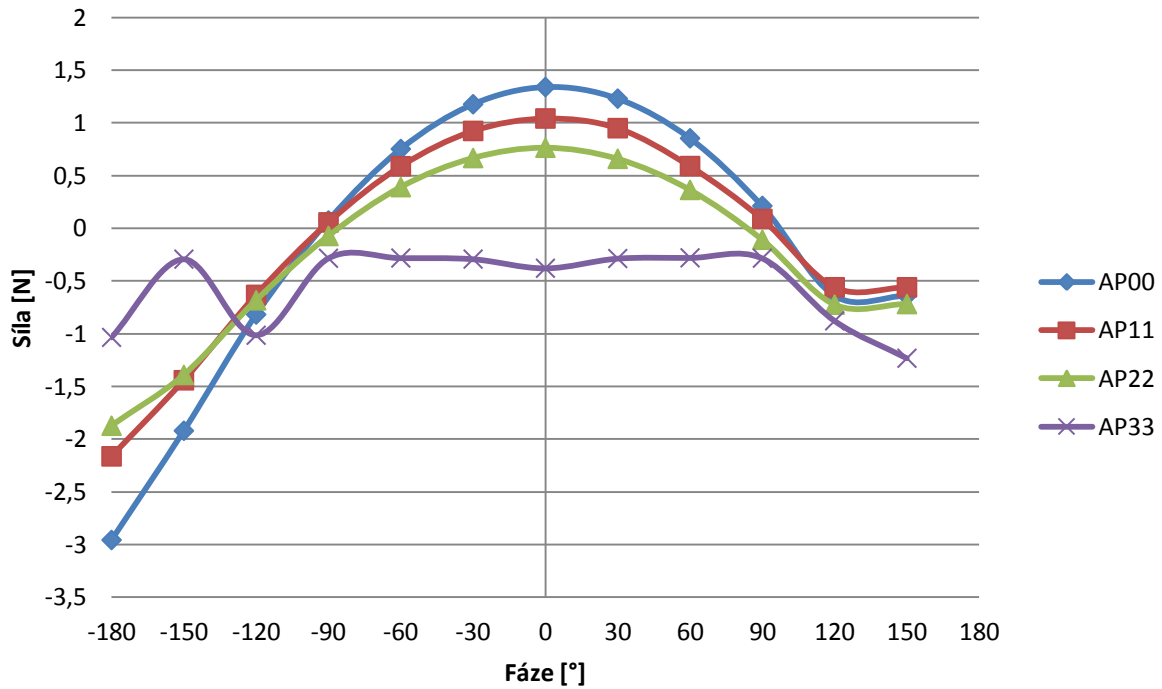
Zde bylo cílem naměření vazebních momentů, což je hlavní cíl této práce. Rychlost proudění je konstantní, ale mění se fázový posun signálu buzené lopatky. Náběhový úhel byl nastaven na 5° .

Fáze byla proměřena od 0° do 360° po 30° . Frekvence budícího signálu byla stanovena dosti vzdáleně od rezonanční frekvence a to 70 Hz. Amplituda signálu byla udržována okolo 1200 mA.

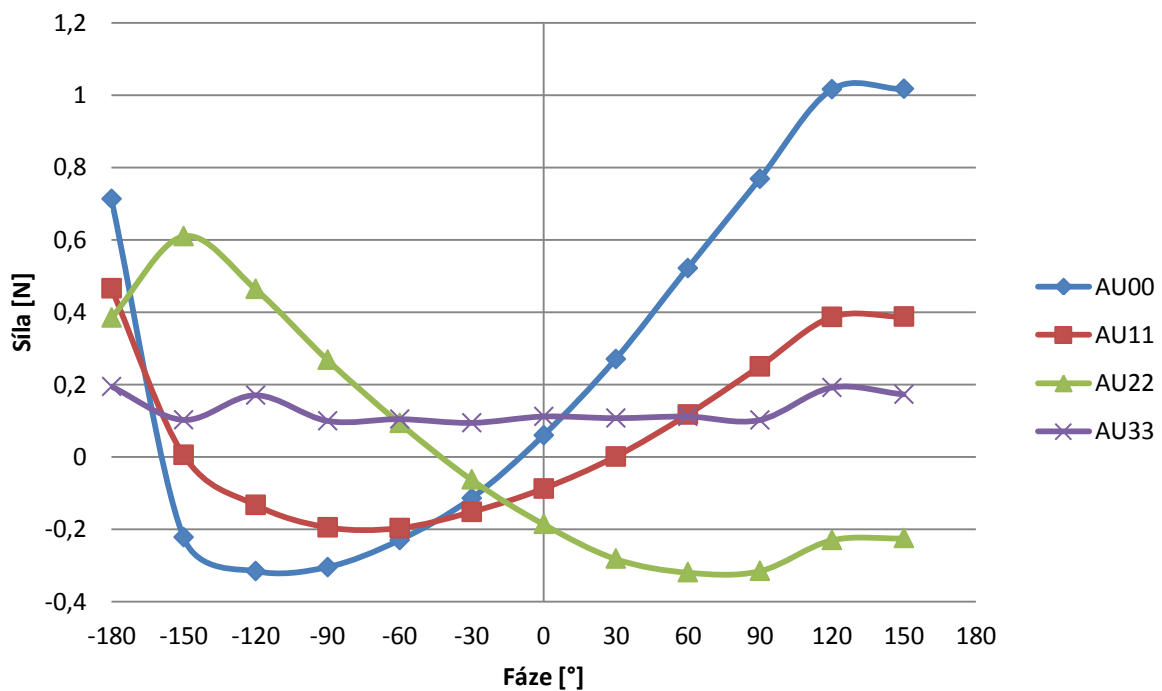
Měření znovu předcházela Fourierova transformace pro vyčištění šumu a určení správné frekvence.

Pomocí generátoru byla nastavena nejdříve fáze pro buzení torzně. Rychlost proudění byla pomocí regulace otáček motoru kompresoru nastavena na 90 m/s. Od té chvíle nebyla rychlost, amplituda ani frekvence měněna. Měněn byl už jen fázový posun signálu. Výsledky jsou prezentovány v grafech, které vykazují velkou změnu jak pružných, tak útlumových sil. Které se mění od buzení torzně do buzení suvně. Jako výše bude ukázáno, jak při různých úhlech působí buzená lopatka sama na sebe a postupně buzené tři lopatky působící na fixovanou.

Obrázek 31 a 32 ukazuje pružné a útlumové síly buzené lopatky samu na sebe. U pružných sil je vidět, jak síly dosahují vrcholů při fázovém posunu signálu 0° a 180° , což je suvné a torzní buzení. Lopatka dle programu číslo 3 byla při měření vychýlena, a tudíž její vliv nemůžeme brát jako správný. U útlumových sil jsou síly rozházené a jejich vrcholy jsou na rozdíl od pružných sil u každé lopatky jinde.

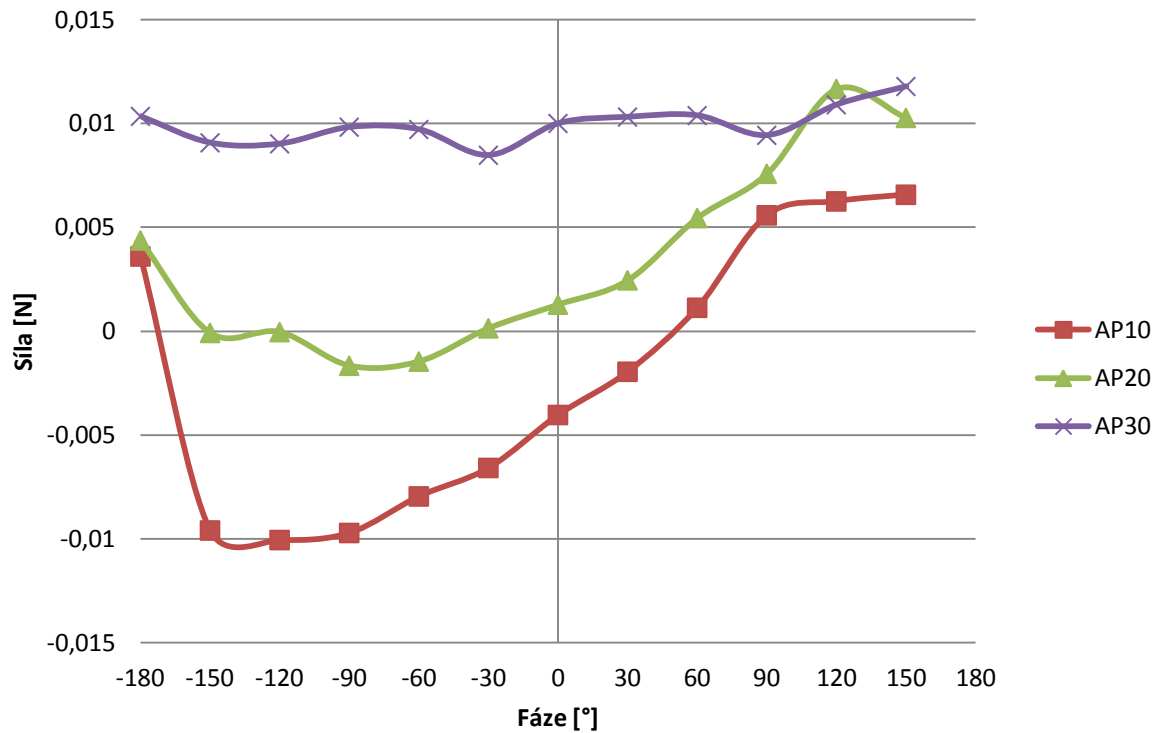


Obr. 31: Aerodynamické pružné síly

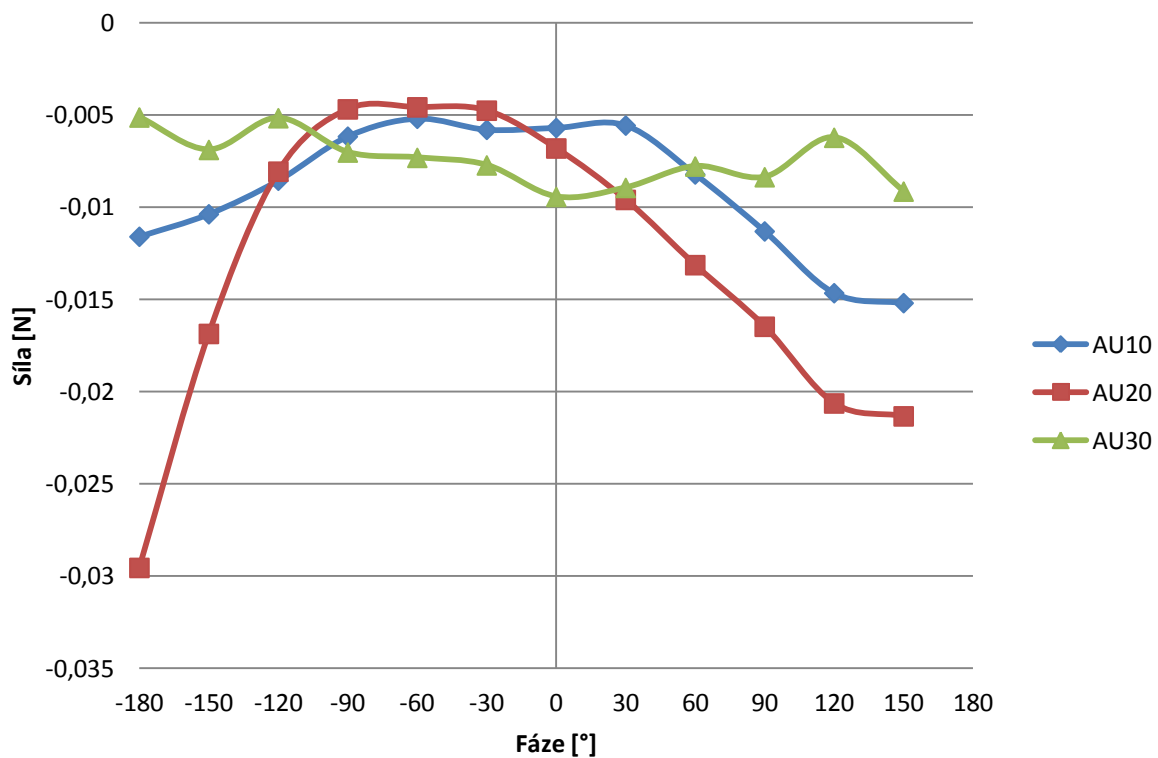


Obr. 32: Aerodynamické útlumové síly

Na obrázku 33 a 34 jsou vidět průběhy aerodynamických pružných a útlumových sil působících na fixovanou lopatku. U pružných i útlumových sil se vrcholy přesunují do surně tozního buzení.



Obr. 33: Aerodynamické pružné síly působící na fixovanou lopatku



Obr. 34: Aerodynamické útlumové síly působící na fixovanou lopatku

Byly naměřeny i hodnoty sil působících na další lopatky. Pro ty už ale nejsou udělány grafy. Pro představu autor přikládá tabulky s naměřenými hodnotami všech kombinací buzení.

Fáze	AP00	AP10	AP20	AP30	AP01	AP11	AP21	AP31
-180	-2,95572	0,0036	0,00437	0,01034	0,0168	-2,16196	-0,01056	0,01055
-150	-1,91939	-0,00959	-0,00008	0,00907	-0,00833	-1,44032	-0,01519	0,00923
-120	-0,81627	-0,01005	-0,00004	0,00902	-0,01468	-0,63033	-0,01256	0,0089
-90	0,07556	-0,00971	-0,00166	0,00982	-0,01464	0,05721	-0,0138	0,00785
-60	0,75367	-0,00795	-0,00146	0,00971	-0,01224	0,59	-0,01346	0,0091
-30	1,17803	-0,00658	0,00014	0,00847	-0,01077	0,92489	-0,01112	0,00761
0	1,34143	-0,00403	0,00128	0,01	-0,00811	1,04316	-0,00929	0,0093
30	1,23151	-0,00195	0,00245	0,01031	-0,00429	0,95138	-0,00652	0,00963
60	0,85525	0,00113	0,00545	0,01038	-0,00121	0,59146	-0,00366	0,00963
90	0,21379	0,00558	0,00758	0,00943	-0,00034	0,08984	0,00003	0,00941
120	-0,63714	0,00625	0,01166	0,0109	0,00272	-0,5582	0,00513	0,01239
150	-0,63776	0,00657	0,01027	0,01178	0,00218	-0,55859	0,00261	0,01286

Fáze	AP02	AP12	AP22	AP32	AP03	AP13	AP23	AP33
-180	0,00013	0,0186	-1,87139	-0,01172	0,00406	0,00061	-0,01195	-1,03354
-150	0,00016	-0,01249	-1,3902	-0,00729	0,00196	-0,00728	-0,01627	-0,29134
-120	-0,00199	-0,0174	-0,68148	-0,01241	0,00019	-0,00738	-0,01211	-1,01327
-90	-0,00234	-0,0178	-0,0713	-0,00723	-0,00026	-0,00654	-0,00982	-0,28288
-60	-0,00274	-0,01658	0,39228	-0,00739	-0,00076	-0,00621	-0,00731	-0,28074
-30	-0,00386	-0,01513	0,66817	-0,01014	-0,001	-0,00509	-0,00341	-0,29086
0	-0,00502	-0,01034	0,76589	-0,00815	-0,00167	-0,00311	-0,0006	-0,37773
30	-0,00325	-0,00549	0,66079	-0,00793	-0,00028	-0,00089	0,00131	-0,2853
60	-0,00286	0,0014	0,36578	-0,00909	-0,00001	0,00221	0,00437	-0,2787
90	-0,00481	0,01042	-0,10693	-0,00865	-0,00084	0,00621	0,00605	-0,28245
120	-0,00441	0,0142	-0,7228	-0,00967	0,00003	0,00702	0,00893	-0,87612
150	-0,00493	0,01389	-0,71713	-0,01175	-0,0006	0,00716	0,00724	-1,23156

Tab. 9: Naměřené hodnoty aerodynamických pružných sil při změně fáze

Fáze	AU00	AU10	AU20	AU30	AU01	AU11	AU21	AU31
-180	0,71266	-0,0116	-0,02956	-0,00513	-0,0081	0,46553	-0,03582	-0,00042
-150	-0,2222	-0,01038	-0,01687	-0,00689	0,01392	0,00533	-0,01121	-0,00286
-120	-0,31599	-0,00856	-0,00807	-0,00517	0,0126	-0,13302	0,00221	0,0003
-90	-0,30505	-0,00617	-0,00469	-0,00703	0,00858	-0,19502	0,00659	-0,00348
-60	-0,23043	-0,0052	-0,00458	-0,00732	0,00398	-0,19727	0,0063	-0,00258
-30	-0,11451	-0,0058	-0,00476	-0,00773	-0,00207	-0,1524	0,00305	-0,0036
0	0,05938	-0,0057	-0,00681	-0,00944	-0,00931	-0,08788	-0,00168	-0,0064
30	0,26996	-0,00557	-0,0096	-0,00895	-0,01644	0,00059	-0,00685	-0,00542
60	0,52107	-0,00822	-0,01314	-0,00779	-0,02328	0,11667	-0,0131	-0,00362
90	0,76804	-0,01131	-0,01648	-0,00837	-0,03031	0,24969	-0,01896	-0,00489
120	1,01553	-0,01466	-0,02064	-0,00623	-0,03534	0,3864	-0,02682	-0,0029
150	1,01696	-0,0152	-0,02134	-0,00915	-0,03472	0,38748	-0,02787	-0,00633

Fáze	AU00	AU10	AU20	AU30	AU01	AU11	AU21	AU31
-180	0,71266	-0,0116	-0,02956	-0,00513	-0,0081	0,46553	-0,03582	-0,00042
-150	-0,2222	-0,01038	-0,01687	-0,00689	0,01392	0,00533	-0,01121	-0,00286
-120	-0,31599	-0,00856	-0,00807	-0,00517	0,0126	-0,13302	0,00221	0,0003
-90	-0,30505	-0,00617	-0,00469	-0,00703	0,00858	-0,19502	0,00659	-0,00348
-60	-0,23043	-0,0052	-0,00458	-0,00732	0,00398	-0,19727	0,0063	-0,00258
-30	-0,11451	-0,0058	-0,00476	-0,00773	-0,00207	-0,1524	0,00305	-0,0036
0	0,05938	-0,0057	-0,00681	-0,00944	-0,00931	-0,08788	-0,00168	-0,0064
30	0,26996	-0,00557	-0,0096	-0,00895	-0,01644	0,00059	-0,00685	-0,00542
60	0,52107	-0,00822	-0,01314	-0,00779	-0,02328	0,11667	-0,0131	-0,00362
90	0,76804	-0,01131	-0,01648	-0,00837	-0,03031	0,24969	-0,01896	-0,00489
120	1,01553	-0,01466	-0,02064	-0,00623	-0,03534	0,3864	-0,02682	-0,0029
150	1,01696	-0,0152	-0,02134	-0,00915	-0,03472	0,38748	-0,02787	-0,00633

Tab. 10: Naměřené hodnoty aerodynamických útlumových sil při změně fáze

Dvě čísla na konci značí vliv buzené lopatky na k-tou lopatku.

12. Závěr

V teoretické části práce bylo důležité pochopení celé problematiky týkající se proudění a jeho vliv na obtékané modely lopatek. Rešerše pomohla k pochopení celého problému měření na experimentálním zařízení umístěného na Katedře energetických strojů a zařízení. Další podobné zařízení pracující na stejném principu se nachází mimo Českou republiku.

Před samotným měřením aerodynamických sil bylo důležité celé experimentální zařízení uvést do chodu. Po náročných a dlouhodobých úpravách a opravách se podařilo zařízení zprovoznit. Velkým problémem bylo vytvořit generátor, který by dovedl měnit fázový posun, aby bylo možné budit modely lopatek kombinací suvného a torzního kmitání. To se nakonec také podařilo a nic nebránilo tomu, aby se začalo měřit.

Dalším úkolem bylo naměřit frekvenční charakteristiky, ze kterých byly zjištěny rezonanční frekvence. Pro suvně torzní buzení dosahovali rezonanční frekvence jinak než u suvného nebo torzního kmitání. Díky velkému parazitnímu buzení docházelo po první dominantní rezonanční frekvenci ke skokovým změnám. Aby nedocházelo k samobuzení modelů lopatek, byla vybrána frekvence daleko pod první rezonanční frekvenci.

Pro správné měření bylo třeba ocejchovat vibrační jednotky. Nejprve byly měřeny hodnoty s buzením lopatky bez přidané hmotnosti. Poté byly přidány závaží. Měřeními byly získány cejchovní koeficienty.

Pomocí odsávacích komor byla odsávána mezní vrstva před a za lopatkovou řadou. Tím byl srovnán rychlostní profil mezi všemi modely lopatek.

Pomocí FFT byly vybrány dominantní budící frekvence a přes ty vypočteny aerodynamické pružné a útlumové síly. Měřeno bylo nejprve bez vlivu proudícího vzduchu a poté byla regulována rychlost proudu a měřeno od 60 do 115 m/s.

Naposledy byly proměřeny aerodynamické síly při konstantní rychlosti a měněn byl fázový posun po 30° .

Útlumové a pružné síly buzených lopatek působících samu na sebe vyšli přibližně o dva řády větší než vliv buzených lopatek fixovanou vibrační jednotkou. Síly s úhlem náběhu 5° jsou velmi malé a pohybují se od desetin do tisíců newtonů. A to i při měření se změnou rychlosti i se změnou fáze.

Byly vytvořeny jen grafy vlivu působení lopatek samu na sebe a vlivu buzených lopatek na jednu fixovanou. Samozřejmě byly proměřeny všechny kombinace. Ty jsou uvedeny v tabulkách u jednotlivých měření.

Problematika kmitání lopatek je zajímavá, ale je náročné vyhledávat informace o této metodě měření. Existují totiž jen dvě místa, kde se tato metoda používá a není příliš známa. Měřeno bylo poprvé po dlouhé době a je důležité udržovat zařízení stále v chodu a pracovat na něm.

13. Seznam použité literatury

- [1] KRIVÁNKA, D.; ŠVARNÝ, J. Vývoj experimentálního zařízení pro výzkum aerodynamických soustav a jeho regulace. *In* Riadenie tekutinových systémov 2008. Žilina : Hydropneutech s.r.o., 2008. s. 94-99. ISBN 978-80-968479-7-6.
- [2] KRIVÁNKA, D.; ERET, P. Měření rychlostního profilu na lopatkové kaskádě. *In* Computational mechanics 2005 . Pilsen : University of West Bohemia, 2005. s. 359-364. ISBN 80-7043-400-7
- [3] KRIVÁNKA, D. Identifikace systému proudem buzených lopatek. *In* Energetické stroje - termomechanika - mechanika tekutin - 2006. Plzeň : Západočeská univerzita, 2006. s. 93-96. ISBN 80-7043-449-X.
- [4] KRIVÁNKA, D.; PACÁK, A.; POLÍVKA, J.; ŠVARNÝ, J.; LINHART, J. Experimentální a numerické vyšetřování vibrací proudem buzené lopatkové kaskády. *In* Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín. Žilina : EDIS-vydavateľstvo Žilinské univerzity, 2008. s. 157-164. ISBN 978-80-8070-825-2.
- [5] KRIVÁNKA, D. Measurement in blade cascade flow. *In* Soutěžní přehlídka studentských a doktorských prací FST 2007. Plzeň : Západočeská univerzita, 2007. s. 155-159. ISBN 978-80-7043-544-1.
- [6] KRIVÁNKA, D.; PACÁK, A.; LINHART, J. Experimentální a numerické vyšetřování vibrací proudem buzené lopatkové kaskády. *In* Aplikácia experimentálnych a numerických metód v mechanike tekutín. Žilina : EDIS-vydavateľstvo Žilinské univerzity, 2006. s. 231-236. ISBN 80-8070-533-X.
- [7] GNESIN, V., RZADKOWSKI, R., The Comparison of the numerical results obtained from 3D Flutter inviscid code with experimental data of the airfoil cascade for harmonic vibration. *In* Cieplne maszyny przeplywowe 2002.
- [8] PLAČEK, T., Vyrovnání rychlostního profilu před lopatkovou mříží. Diplomová práce ZČU 2004
- [9] POLÍVKA, J., Experimentální a numerické vyšetření vibrací lopatkové kaskády při surném kmitání. Diplomová práce ZČU 2007.
- [10] GOLDSTEIN, R. J., Fluid mechanics measurements. Taylor and Francis 1996.
- [11] LINHART, J. Vyhodnocovací rovnice pro zjištění aerodynamických sil a momentů