

Západočeská univerzita v Plzni
Fakulta aplikovaných věd
Katedra kybernetiky

DIPLOMOVÁ PRÁCE

PLZEŇ, 2016

Martin Káš

Prohlášení

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě diplomovou práci zpracovanou na závěr studia na Fakultě aplikovaných věd Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci vypracoval samostatně a výhradně s použitím odborné literatury a pramenů, jejichž úplný seznam je její součástí.

V Plzni dne 13. května 2016

.....
vlastnoruční podpis

Poděkování

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu práce Ing. Jindřichu Liškovi PhD., za výborné vedení práce, nemalé množství odborných rad, velkou dávku trpělivosti a čas, který věnoval této práci.

Dále bych chtěl poděkovat Ing. Martinu Miczanovi, Ing. Lukáši Kantovi., za cenné rady a technickou podporu při realizaci měření a dále také všem ostatním, kteří také pomohli s tvorbou práce.

Anotace

Tato práce je zaměřena na analýzu vibrací odlehčeného parního ventilu měřených senzory absolutního chvění a zhodnocení správnosti konstrukce ventilu. V práci je využito metod pro zpracování signálů.

Klíčová slova

Analýza vibrací, FFT, Fourierova transformace, STFT, krátkodobá Fourierova transformace, průměrované spektrum, vibrace, akcelerometr, odlehčený ventil, parní ventil, Matlab, LabVIEW.

The Annotation

This paper deals with vibration analysis of a load reduced steam valve measured by absolute vibration sensors and with valve design evaluation. Signal processing and analysis methods are used in this thesis.

Keywords

Vibration analysis, FFT, Fourier transformation, STFT, short time Fourier transformation, averaged spectrum, vibration, accelerometer, load reduced valve, steam valve, Matlab, LabVIEW.

Obsah

Prohlášení.....	I
Poděkování.....	II
Anotace	III
Klíčová slova	III
The Annotation	III
Keywords	III
Obsah	IV
Seznam obrázků.....	V
1 Úvod.....	1
2 Motivace	1
3 Analýza vibrací ventilu	4
3.1 Popis ventilu.....	4
3.2 Měřicí řetězec.....	8
3.2.1 Schéma parního soustrojí.....	8
3.3 Použité senzory	11
3.3.2 Měřicí zařízení	13
3.4 Softwarové nástroje.....	15
3.5 Teoretické nástroje analýzy.....	20
3.5.1 Fourierova transformace	20
3.5.2 Spektrogram.....	21
3.5.3 Průměrované spektrum	22
3.5.4 Normování amplitud frekvenčních složek signálu	24
3.6 Popis experimentu	25
3.7 Přehled provedených experimentů.....	26
3.8 Vliv hydraulického pohonu na vibrace ventilu	27
3.9 Analýza chování při nízkých otevřeních.....	29
3.9.1 Měření na statoru ventilu	33
3.9.2 Měření na vřetenu ventilu	36
3.9.3 Měření na přívodním potrubí.....	39
3.10 Analýza chování při plném otevření ventilu	40
3.10.1 Měření na statoru ventilu	40
3.10.2 Měření na vřetenu ventilu	42
3.10.3 Měření na přívodním potrubí.....	44
4 Závěr	45
Citovaná literatura.....	48

Seznam obrázků

obr. 1 - Zobrazení vibrací v závislosti na otevření ventilu [1].....	2
obr. 2 - Typy proudění páry ventilem [1]	2
obr. 3 - Parní ventil Škoda s odlehčením [3]	4
obr. 4 - Výkres ventilu Škoda	4
obr. 5 - Návrhový výpočet odlehčeného ventilu [3]	5
obr. 6 - Skutečný průběh síly [3]	6
obr. 7 - Zdvih ventilu do 3,5 mm	6
obr. 8 - Zdvih ventilu od 3,5 mm do 16 mm.....	7
obr. 9 - Plné otevření ventilu	7
obr. 10 - Diagram parního zařízení	8
obr. 11 - Akcelerometry na statoru ventilu	9
obr. 12 - Akcelerometr na vřetenu ventilu	9
obr. 13 - Akcelerometr na válci hydraulického pohonu vřetena.....	10
obr. 14 - Akcelerometr na přívodním potrubí.....	10
obr. 15 – Akcelerometry Brüel & Kjær; vlevo [4];vpravo [5].....	11
obr. 16 - Vibro-Meter CA 901 [6]	11
obr. 17 - Vibro-Meter IPC 704 [7].....	12
obr. 18 - Blokové schéma IPC 704 [7]	12
obr. 19 - NI cDAQ-9184 [8]	13
obr. 20 - Měřicí karta NI 8234 [9]	13
obr. 21 – Měřicí karta NI 9229 [10].....	14
obr. 22 - Ukázka prostředí LabVIEW - block diagram	16
obr. 23 - Ukázka prostředí LabVIEW - front panel.....	16
obr. 24 - Front panel zapisovacího programu	17
obr. 25 - Blokové schéma zápisu dat	19
obr. 26 – Vliv velikosti okénka a překrytí na spektrogram [11].....	22
obr. 27 - Délka okénka 2^{17} vzorku	23
obr. 28 - Délka okénka 2^{12} vzorku	23
obr. 29 - Délka okénka 2^7 vzorku	24
obr. 30 - Snímky z termokamery	25
obr. 31 - Měření vibrací válce hydraulické pohonu.....	27
obr. 32 – Vliv hydrauliky na vibrace vřetene ventilu	27
obr. 33 – Vliv hydrauliky na vibrace statoru ventilu	28
obr. 34 - Vliv hydrauliky na vibrace potrubí	28
obr. 35 - Provozní veličiny experimentu	29
obr. 36 - Amplituda vibrací v časové oblasti	30
obr. 37 - Průběh charakteristické veličiny	30
obr. 38 - Spektrogram statoru ventilu (osa x)	31
obr. 39 - Normovaný spektrogram statoru ventilu (osa x).....	31
obr. 40 - Spektrogram vřetene ventilu (osa x)	32
obr. 41 - Normovaný spektrogram vřetene ventilu (osa x).....	32
obr. 42 - Měření statoru ventilu (osa x), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	33
obr. 43 - Měření statoru ventilu (osa x), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	33
obr. 44 - Měření statoru ventilu (osa y), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	34
obr. 45 - Měření statoru ventilu (osa y), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	34
obr. 46 - Měření statoru ventilu (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	35
obr. 47 - Měření statoru ventilu (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	35
obr. 48 - Měření vřetene ventilu (osa x), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	36
obr. 49 - Měření vřetene ventilu (osa x), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	36

obr. 50 - Měření vřetene ventilu (osa y), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	37
obr. 51 - Měření vřetene ventilu (osa y), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	37
obr. 52 - Měření vřetene ventilu (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	38
obr. 53 - Měření vřetene ventilu (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	38
obr. 54 - Měření na potrubí (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ε	39
obr. 55 - Měření na potrubí (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ε	39
obr. 56 - Měření na statoru ventilu (osa x) při plném otevření	40
obr. 57 - Měření na statoru ventilu (osa y) při plném otevření	41
obr. 58 - Měření na statoru ventilu (osa z) při plném otevření	41
obr. 59 - Měření na vřetenu ventilu (osa x) při plném otevření	42
obr. 60 - Měření na vřetenu ventilu (osa y) při plném otevření	42
obr. 61 - Měření na vřetenu ventilu (osa z) při plném otevření	43
obr. 62 - Měření na přívodním potrubí (osa z) při plném otevření	44
obr. 63 - Závislost charakteristické veličiny na ε ; snižování ε	46
obr. 64 - Závislost charakteristické veličiny na ε ; zvyšování ε	47

1 Úvod

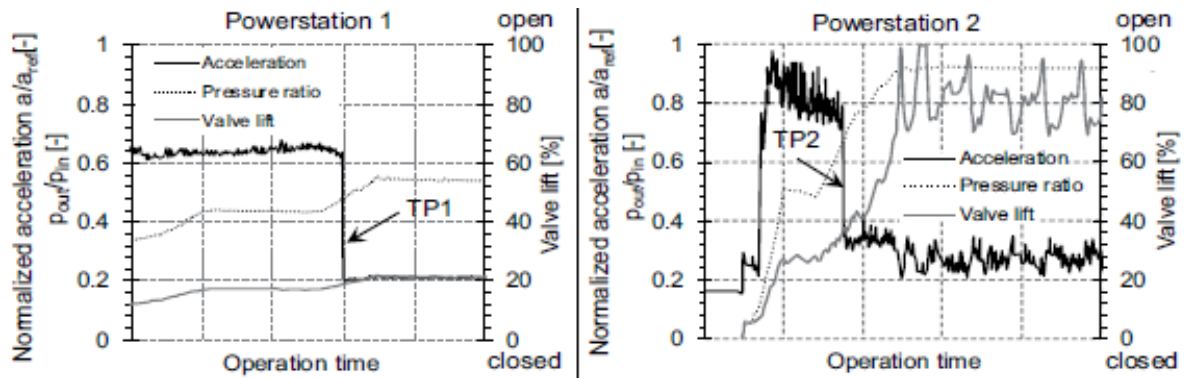
Elektrická energie bezpochyby jednou z nejdůležitějších potřeb současné společnosti. Naše společnost je na dodávce elektřiny do značné míry závislá, a tedy je žádané aby její výroba probíhala pokud možno nepřetržitě. Toho požadavku však nelze dosáhnout díky nejrůznějším odstávkám a výpadkům. Ať už se jedná o plánované odstávky důležité pro údržbu systémů podílejících se na výrobě tak neplánované, vzniklé závadou, je tendence tyto odstávky eliminovat. Na výrobu dílčích systémů jsou kladeny nároky na maximální spolehlivost provozu a zároveň jsou požadovány co nejdelší intervaly mezi plánovanými odstávkami. Největším podílem na výrobě elektrické energie se podílejí stroje využívající tepelnou energii, která je využita pro přeměnu vody na páru. Vzniklá pára se používá pro pohon turbín. Než se tam však dostane, musí projít celou řadou technologických prvků využívajících ventily pro správné předzpracování. Pomocí různých ventilů je dosaženo požadovaných vlastností páry ovlivňující chod turbíny.

V této práci je popsán způsob získávání provozních dat, postupy pro jejich zpracování a následné zhodnocení správnosti návrhu odlehčeného parního ventilu konstrukce Doosan Škoda Power s.r.o.

2 Motivace

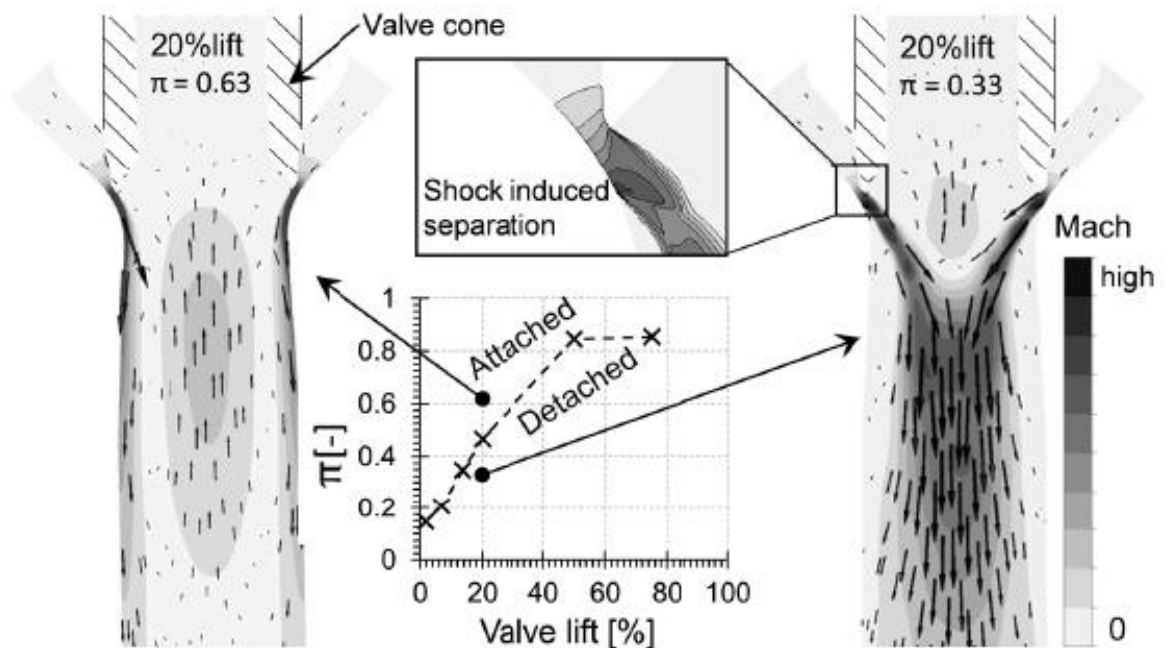
Důvodem pro zavádění odlehčených ventilů je vlastnost, díky které je značnou měrou zmenšena síla potřebná pro jeho otevření. Toho je dosaženo pomocí použití obtokového ventilu, který se napojen na ovládání hlavní kuželky. Při otevírání se tedy postupně otevře obtokový ventil a následně hlavní kuželka. Otevření obtokového ventilu má za následek snížení rozdílu tlaků před a za ventilem. Díky tomu je snížena síla působící zavírání ventilu. Přínosem tohoto řešení je snížení nároků na řídicí silové prvky ventilu – hydraulické nebo elektrické servopohony.

S rozvojem obnovitelných zdrojů energie se však klasická výroba elektrické energie potýká s problémy nestability poptávky. To je způsobeno externími vlivy, například když dostatečně fouká vítr – větrná energie – nebo více svítí slunce – solární energie. Na energetiku využívající tepelných strojů tyto vlivy působí tak, že celé soustrojí, ale hlavně ventily, na které je zaměřená tato práce, pracuje čím dál častěji v režimu sníženého výkonu. Snížením výkonu resp. změnou průtoku páry potrubím se v akčních členech mohou vyskytovat nežádoucí vibrace. Na tyto vibrace však zmíněné komponenty nemusí být konstruované nebo se nachází mimo běžný pracovní rozsah stroje. Bylo zjištěno [1], že provozování mimo návrhový pracovní rozsah vede k dvou až trojnásobnému zvýšení poruchovosti ventilu. Podle obr. 1 a obr. 2 je možno pozorovat pásma zvýšených vibrací při malém otevření ventilů a určitým tlakovém poměru ϵ před a za ventilem.



obr. 1 - Zobrazení vibrací v závislosti na otevření ventilu [1]

Tyto vibrace jsou také nežádoucí z důvodu snižování celkové účinnosti ventilu. Část energie procházejícího média je díky vibracím přeměňována na mechanickou práci tedy akustický hluk a tím snížena celková účinnost. V obr. 1 je znázorněn průběh těchto vibrací, kde v průběhu času (osa x) je vyznačeno relativní otevření ventilu (šedou barvou), tlakový poměr ϵ před a za ventilem (tečkovanou čarou) a normované vibrace (černou barvou). Je vidět, že v určitém intervalu otevření a tlakového poměru ϵ , je oblast skokové změny vibrací ventilu. To je následkem odtržení mezní vrstvy proudu páry od stěny difuzoru. (popsáno níže). Dalším vedlejším efektem je rozechvívání technologických prvků spojených s ventilem. Důsledkem čehož mohou v zařízeních vznikat rezonance, které působí snížení životnosti a v nejhorsím případě až destrukci soustrojí.



obr. 2 - Typy proudění páry ventilem [1]

V obr. 2 jsou zobrazeny dva typy proudění média – s mezní vrstvou přimknutou ke stěně difuzoru (vlevo) a s odtrženou mezní vrstvou (vpravo). V případě, že se jedná o první možnost, médium sleduje stěny difuzoru, přičemž postupně dojde k vyrovnání rychlostního profilu. Tento typ proudění je žádaný, jelikož v médiu nevznikají pulzace, které by způsobovaly zvýšenou úroveň vibrací jak v samotném ventilu, tak i v ostatních zařízeních,

např.: potrubí, další ventily, turbíny. V obr. 1 lze odtržení proudu pozorovat v grafu zrychlení skokovou změnou úrovně vibrací. V případě odtržené mezní vrstvy, by tlakové pulzace mohly být příčinou praskání lopatek turbíny apod.

V minulosti byl již ventil, který je předmětem analýzy v této práci, testován na vznik nežádoucích stavů, ovšem pouze provozem se vzduchem, tj. výstupní část ventilu byla připojena na vstup kompresoru. Na vstupu ventilu byl vzduchový filtr. V této konfiguraci vstupoval do ventilu téměř barometrický tlak a kompresorem se na výstupní straně ventilu vytvářel požadovaný podtlak. Toto uspořádání experimentu umožňovalo instalaci akcelerometru přímo na kuželku ventilu [2]. Ventil však nebyl od kompresoru dynamicky oddělen a tak se do získaných spektrogramů přenášela otáčková frekvence kompresoru – motoru i převodovky – a její harmonické složky. Vývoj ale pokročil a ventil dostal jinou kuželku. Cílem této práce je experimentálně ověřit přítomnost samobuzených frekvencí, které by mohli mít za následek výše popsané snížení životnosti či destrukci zařízení při provozu s párou, a na základě získaných dat vytvořit metodiku pro budoucí experimenty.

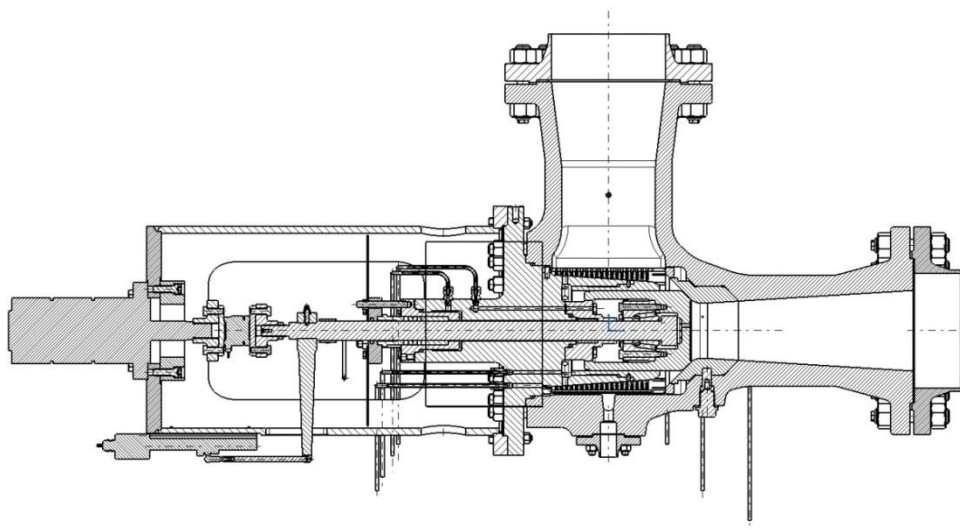
3 Analýza vibrací ventilu

3.1 Popis ventilu

Odlehčené ventily se začaly uvádět do provozu zejména díky tomu, že dochází k významné redukci síly potřebné pro otevření ventilu. To s sebou přináší řadu výhod – použití slabších servopohonů, v tomto případě hydraulických systémů – méně výkonné čerpadlo, tomu odpovídající hadice, olejové hospodářství, koncový efektor; nižší spotřebu energie, nižší pořizovací, servisní i provozní náklady. Tato práce je zaměřena na ventil konstrukce Doosan Škoda Power s.r.o. zobrazený na obr. 3 a obr. 4.

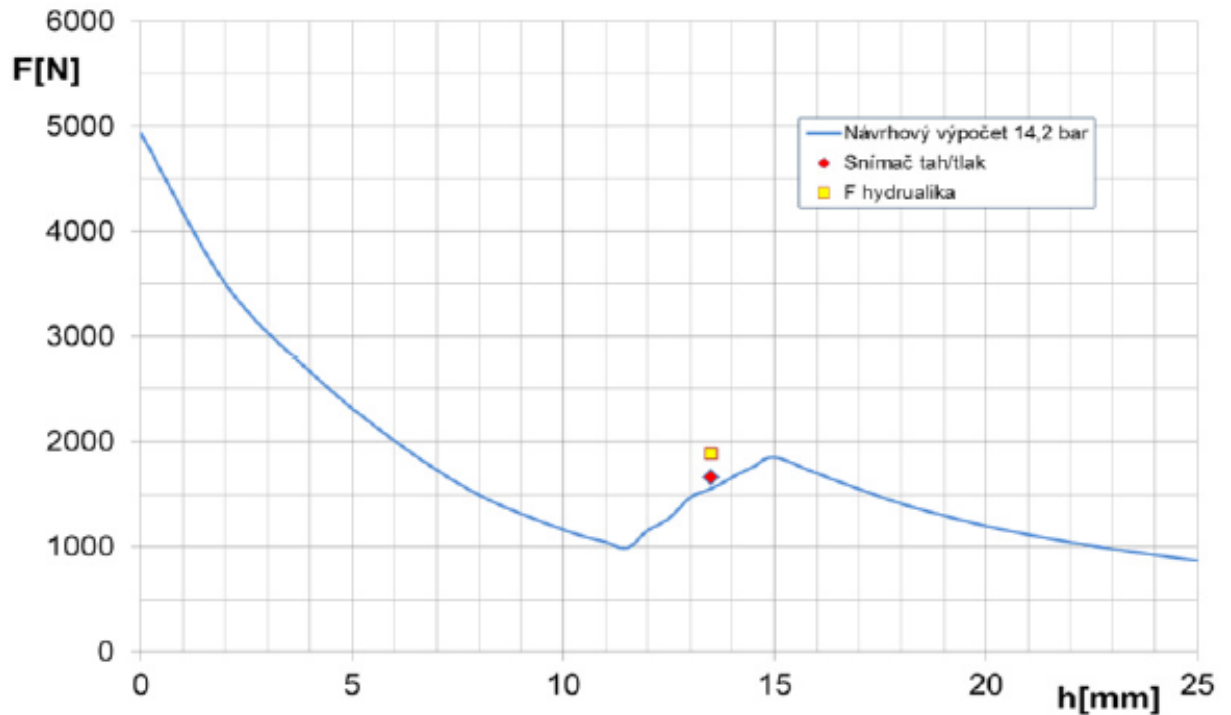


obr. 3 - Parní ventil Škoda s odlehčením [3]



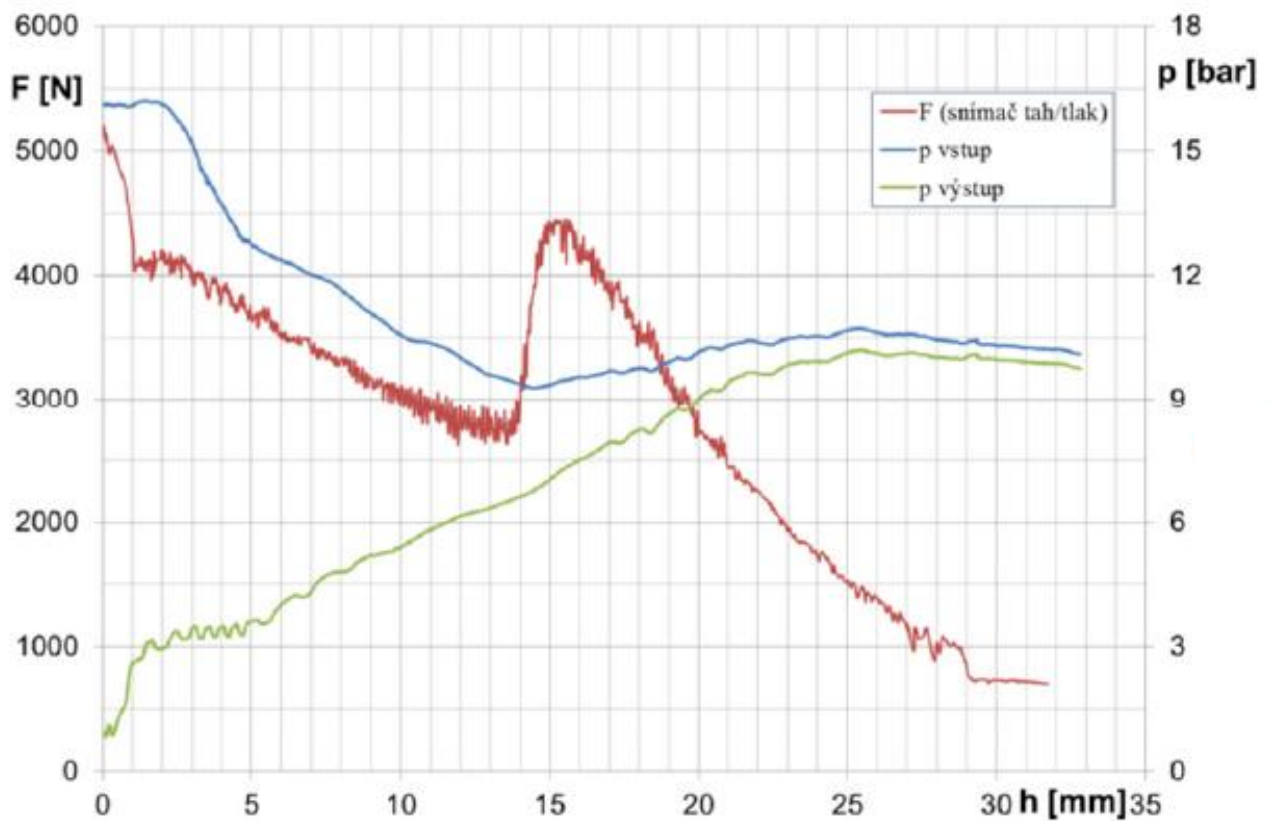
obr. 4 - Výkres ventilu Škoda

Princip odlehčení spočívá v použití pomocného obtokového ventilu, který je v chodu v omezeném rozpětí zdvihů a slouží ke snížení poměru tlaků před a za ventilem ε . Činnost obtokového ventilu je patrná z obr. 5, kde je možno v úseku otevření h 0÷11,5 mm pozorovat snížení otevírací síly v řádu několika tisíc N. Jedná se ale návrhový výpočet, který díky mnoha konstrukčním faktorům nemusí odpovídat reálnému provozu.



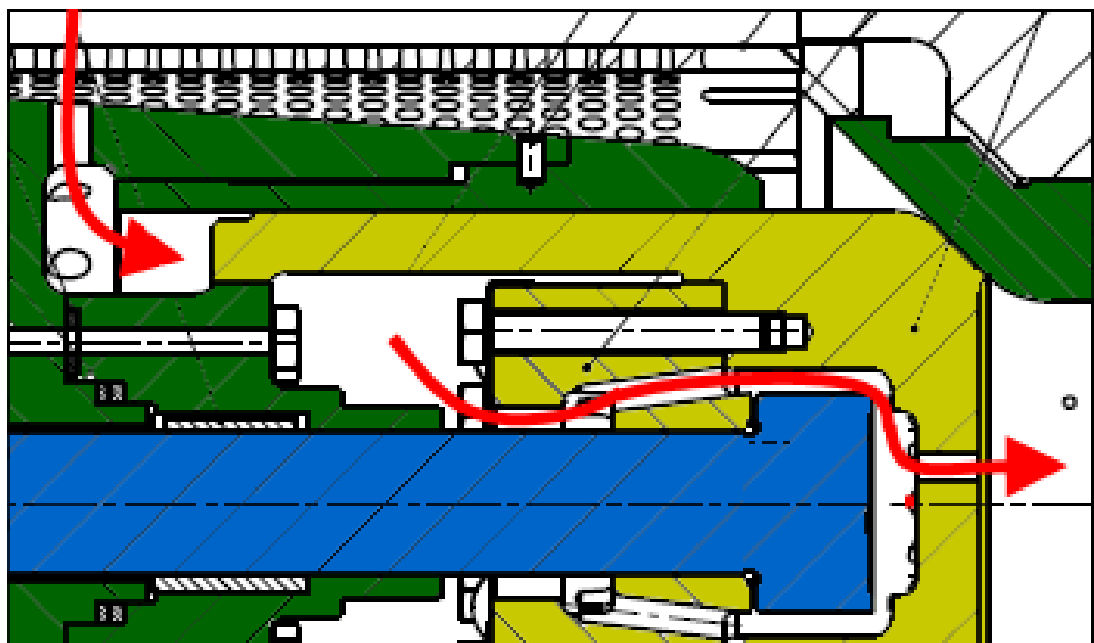
obr. 5 - Návrhový výpočet odlehčeného ventilu [3]

Skutečný průběh síly lze pozorovat v obr. 6. Od návrhového výpočtu se však odlišuje. To je dáno především konstrukčním řešením a skutečností, že návrh je postaven na předpokladu, že vstupní tlak do ventilu je konstantní. Toho se však v reálném provozu dá docílit špatně. Pro ověření a porovnání silového namáhání skutečného a vypočteného průběhu je tedy potřeba naměřenou sílu kompenzovat. To však není předmětem této práce.



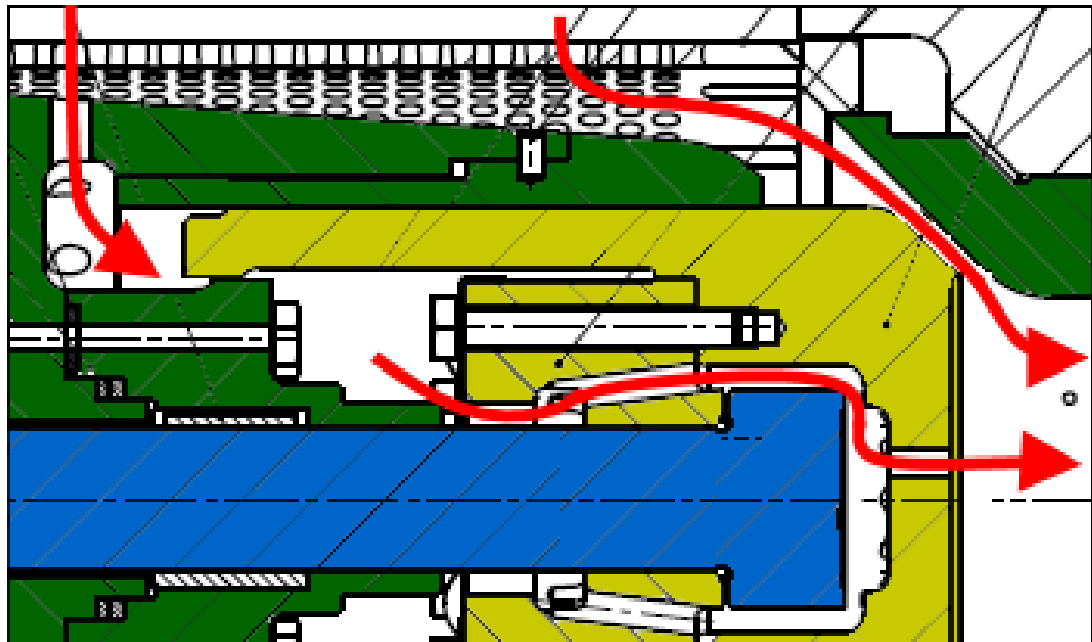
obr. 6 - Skutečný průběh síly [3]

Z obr. 6 lze však získat celkový náhled na princip činnosti ventilu. Podle výkresové dokumentace v intervalu od úplného zavření ventilu do zdvihu 3,5 mm proudí pára pouze přes obtokový ventil (obr. 7) tvořený koncem vřetena (modrá barva) a konstrukčním řešením hlavní kuželky. Kuželka (žlutá barva) je tlakem páry držena v uzavřené poloze. Stator ventilu je zvýrazněn zelenou barvou.



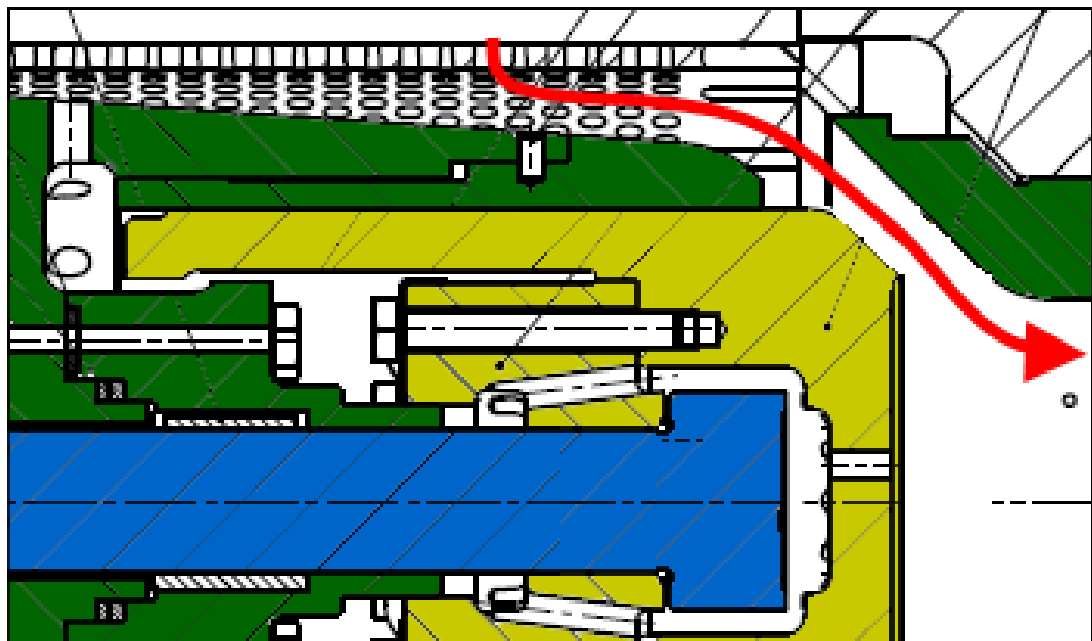
obr. 7 - Zdvih ventilu do 3,5 mm

Od zdvihu 3,5 mm do 16 mm včetně ventilu dosedá na kuželku, kterou tím pádem uvádí do pohybu – obr. 8. V tomto rozsahu pára proudí jak kolem kuželky, tak skrz obtokový ventil.



obr. 8 - Zdvih ventilu od 3,5 mm do 16 mm

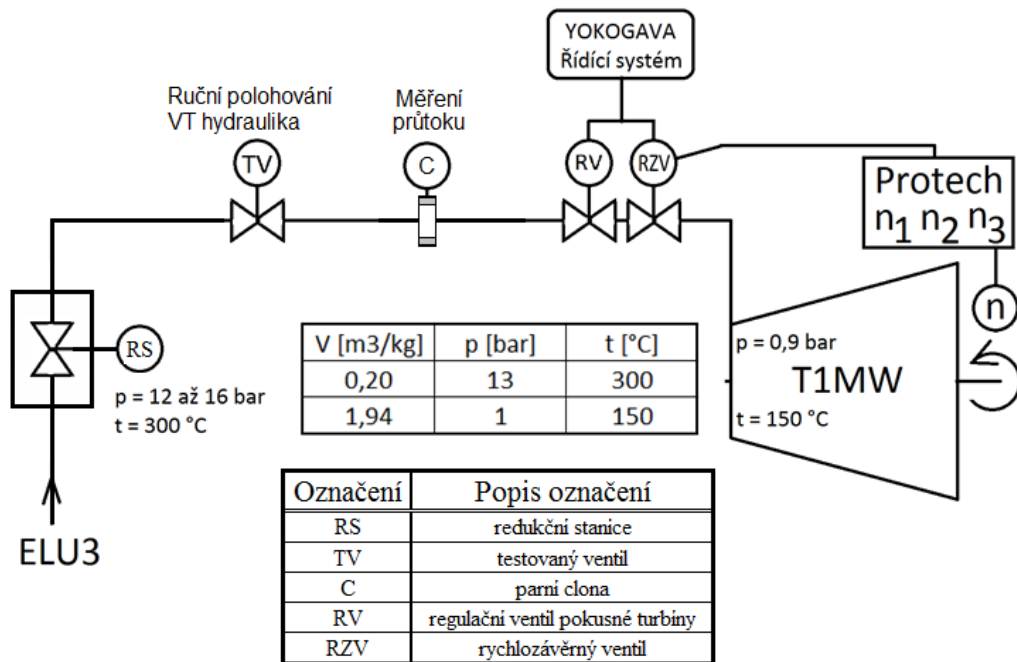
Při zdvihu nad 16 mm až do úplného otevření je obtokový ventil uzavřen. Pára proudí pouze kolem kuželky (obr. 9). Zde již chování ventilu odpovídá ventilu bez odlehčení.



obr. 9 - Plné otevření ventilu

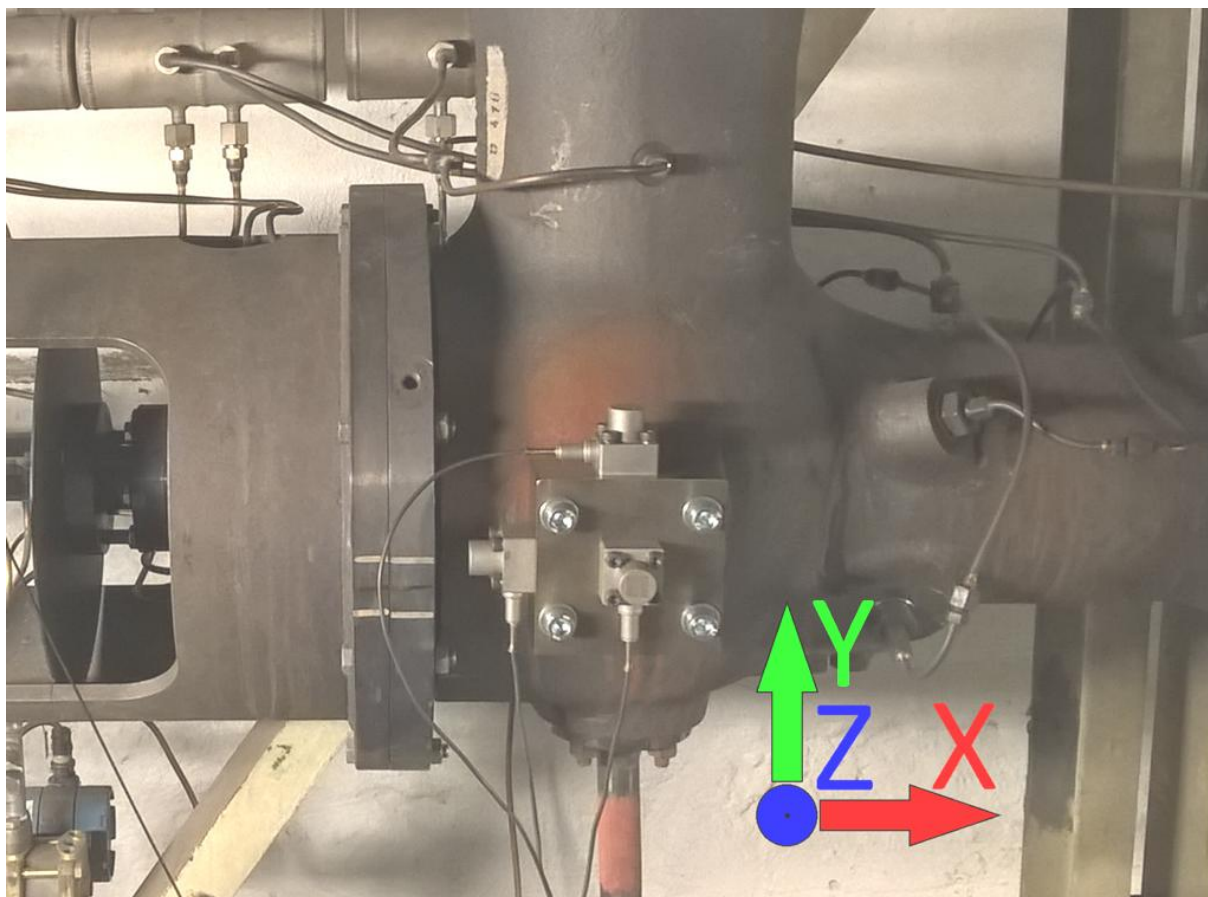
3.2 Měřicí řetězec

3.2.1 Schéma parního soustrojí



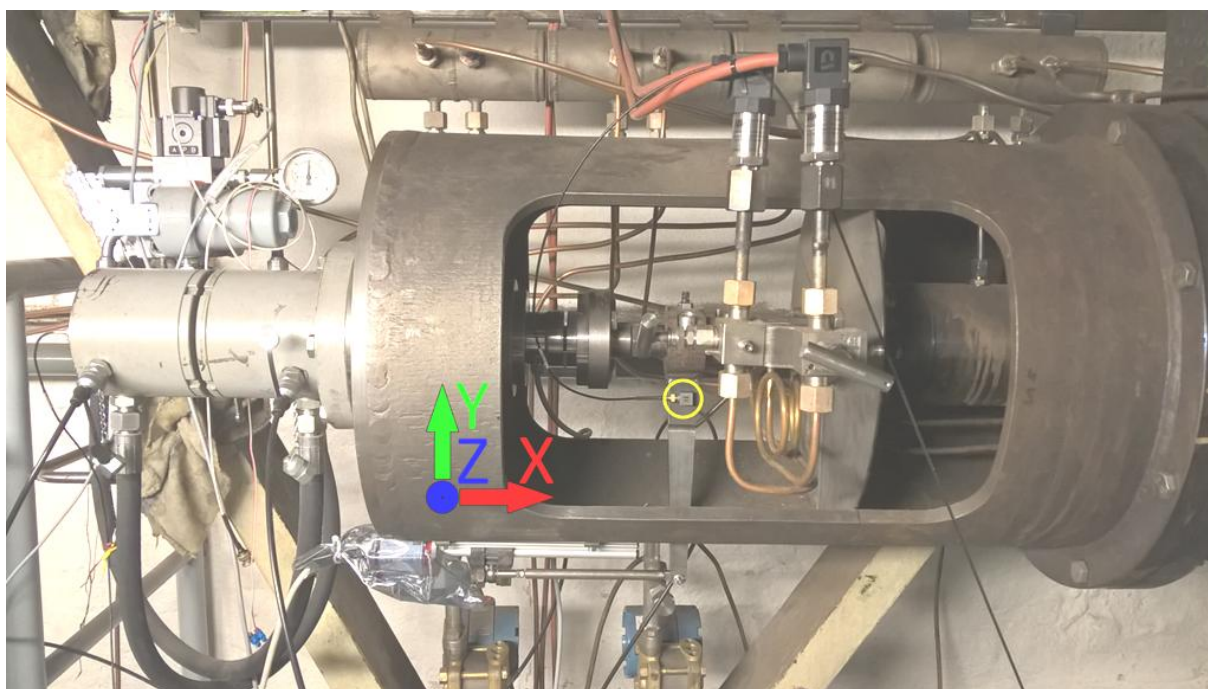
obr. 10 - Diagram parního zařízení

Testovaný ventil je instalován v hale experimentálního výzkumu společnosti Doosan Škoda Power s.r.o. v blízkosti redukční stanice. Hala je zásobována parou z provozu Plzeňské energetiky a.s. ELÚ III. Ventil byl osazen akcelerometry (detailněji popsány níže) na několika různých místech. Pro měření celkových vibrací ventilu (obr. 10, TV) bylo zvoleno místo s frézovanou plochou, na kterou se pomocí šroubového spoje připevnil přípravek osazený akcelerometry CA 901, viz obr. 11. Akcelerometry byly připevněné opět šrouby. Spoje byly zajištěny proti povolení pojistnými kroužky.



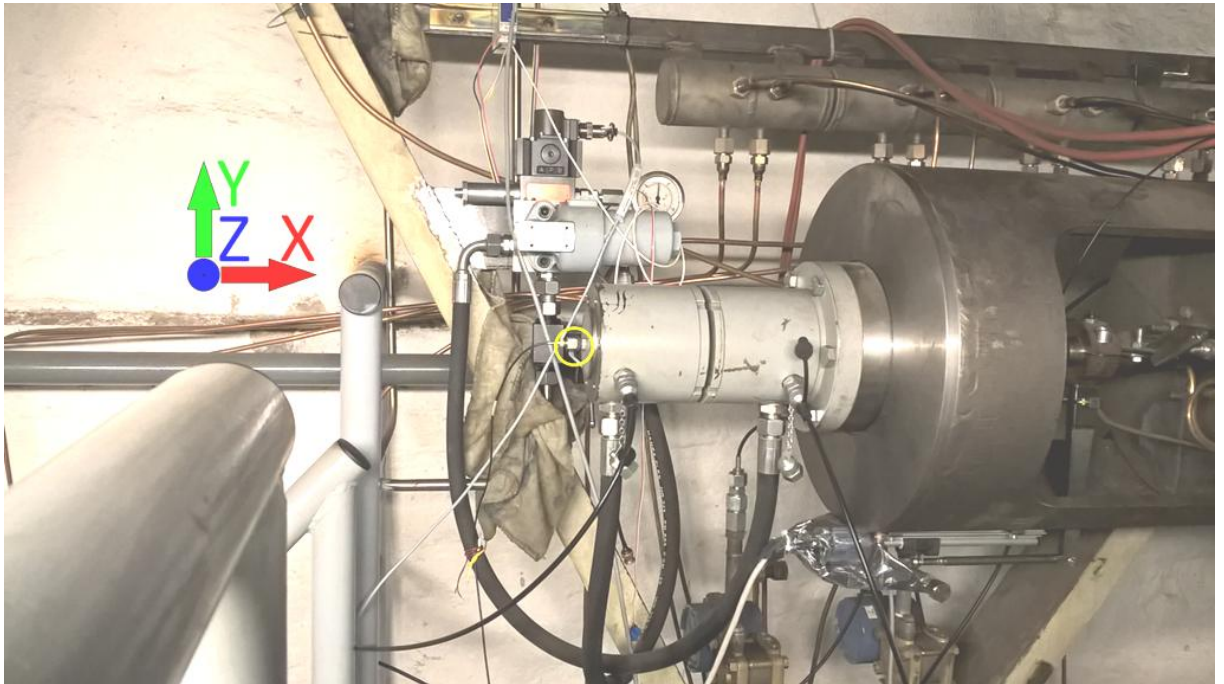
obr. 11 - Akcelerometry na statoru ventilu

Další sada akcelerometrů resp. jeden tříosý akcelerometr (Brüel & Kjær 4527) byl nainstalován na přípravku připojeném na vřeteno ventilu a senzor polohy (otevření) ventilu v těsné blízkosti vřetena (obr. 12) pomocí šroubového spoje.



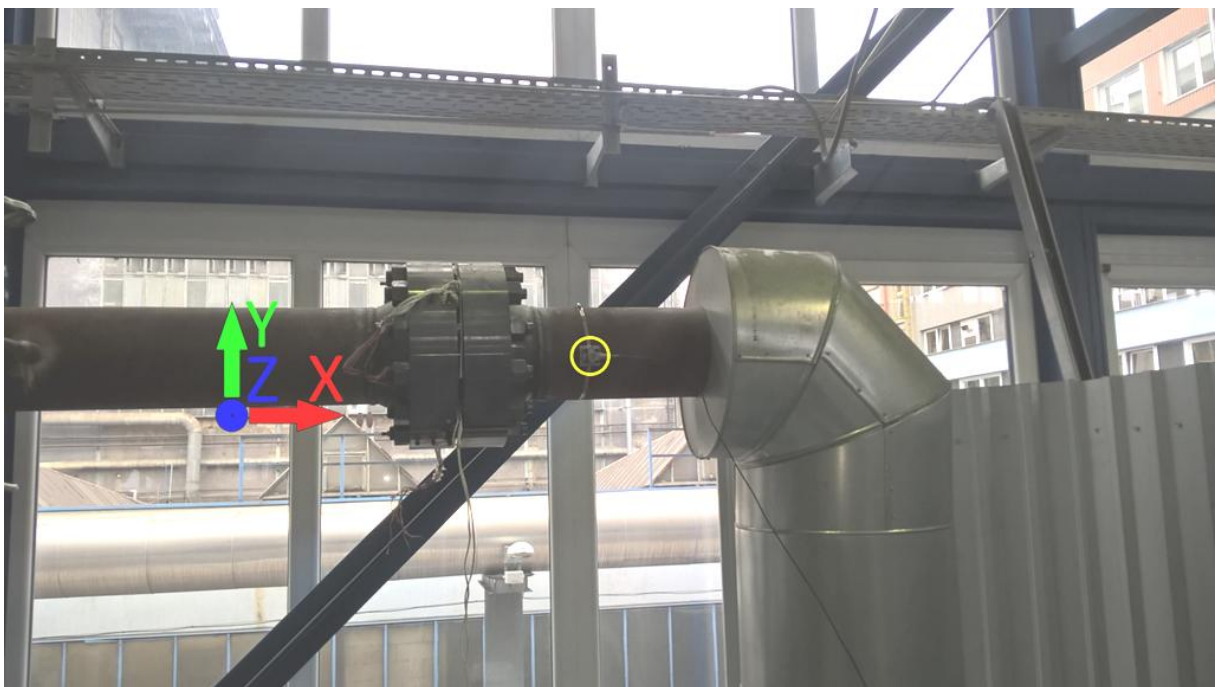
obr. 12 - Akcelerometr na vřetenu ventilu

Další tříosý akcelerometr (Brüel & Kjær 4524B) byl umístěn na válci hydraulického pohonu (obr. 13), pomocí kterého byl ventil řízen. Akcelerometr byl připevněn magnetem, lepeným spojem a plastovým přípravkem dodávaným výrobcem.



obr. 13 - Akcelerometr na válci hydraulického pohonu vřetena

Poslední instalovaný akcelerometr (CA 901) byl připevněn na přívodním potrubí mezi ventilem a redukční stanicí (obr. 14) pomocí přípravku (šroubový spoj) a kovové pásky. Kvůli vlastnostem uchycení potrubí byla zvolena orientace ve směru osy z – ve směru osy x by docházelo k tlumení vibrací díky přítomnosti redukční stanice a ve směru osy y vlastní vahou a pružnému zavěšení potrubí, které konstruováno pro potlačení vibrací.



obr. 14 - Akcelerometr na přívodním potrubí

3.3 Použité senzory

Na ventilu jsou nainstalovány tříosé akcelerometry [Brüel & Kjær 4524B](#), [Brüel & Kjær 4527](#) a čtyři jednoosé vysokoteplotní akcelerometry [Vibro-Meter CA 901](#) spolu s převodníky jejich signálů [Vibro-Meter IPC 704](#).

3.3.1.1 Brüel & Kjær

Akcelerometry této společnosti využívají piezoelektrického jevu. Díky použití technologie OrthoShear – piezoelektrický materiál pro všechny osy je spojen s jedním společným seizmickým tělesem – bylo dosaženo velmi malých rozměrů senzorů. Bez konektoru se do krychlového titanového pouzdra o hraně 1 cm podařilo vměstnat i předzesilovač. Citlivost senzorů je $\sim 100\text{mV/g}$, více stránkách výrobce (<http://www.bksv.com>).



obr. 15 – Akcelerometry Brüel & Kjær; vlevo [4];vpravo [5]

3.3.1.2 Vibro-Meter CA 901

Tento senzor také využívá měření vibrací piezoelektrického jevu. Jeho klíčovou vlastností je odolnost proti extrémním teplotám – až 700°C – nemá vestavěný předzesilovač. Citlivost senzoru je 10 pC/g ; rozlišení $500\text{ }\mu\text{g}$. Více v katalogovém listu [6].



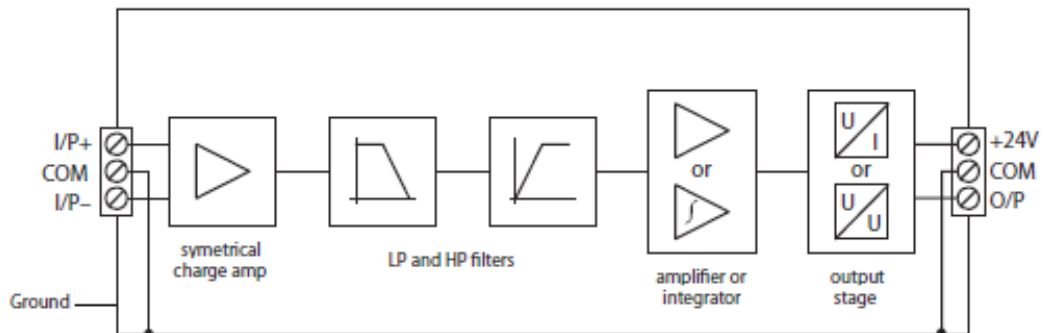
obr. 16 - Vibro-Meter CA 901 [6]

3.3.1.3 Vibro-Meter IPC 704

Externí signálový předzesilovač je sladěn s ohledem na typ použitého akcelerometru a jeho použití. V tomto případě je jeho vstupní citlivost 10 pC/g. Od výrobce má pevně nastavený filtr typu pásmová propust od 2 Hz do 5 kHz a napěťový výstup s citlivostí 20 mV/g. Více v dokumentaci [7]. Předzesilovač vyžaduje napájení 24 V – realizováno laboratorním zdrojem.



obr. 17 - Vibro-Meter IPC 704 [7]



obr. 18 - Blokové schéma IPC 704 [7]

3.3.2 Měřicí zařízení

Pro záznam dat bylo použito univerzální modulární šasi [NI cDAQ-9184](#), měřicí karty [NI 9234](#) a [NI 9229](#) a termokamery [FLIR TG165](#).

3.3.2.1 NI cDAQ-9184

Toto zařízení je pouze základní šasi obsluhující komunikaci využívající technologie Ethernet. Disponuje čtyřmi 32bitovými čítači/časovači. Umožňuje měřit současně až 128 elektrických, akustických nebo mechanických signálů. Měření signálů probíhá pomocí vložených modulů.



obr. 19 - NI cDAQ-9184 [8]

3.3.2.2 NI 9234

Tento měřicí modul má čtyři 24bitové vstupy s rozsahem ± 5 V. Dynamický rozsah je 102dB. Je vybaven anti-aliasing filtry, umožňuje programově volit filtrování stejnosměrné složky (horní propust od 0,5 Hz), programově volit napájení senzoru IEPE. Maximální vzorkovací frekvence je 51,2 kHz na každý kanál. Lze využít vestavěné funkce měření ve fyzikálních jednotkách – v této práci využito měření vibrací v $m*s^{-2}$.



obr. 20 - Měřicí karta NI 8234 [9]

3.3.2.3 NI 9229

Tento měřicí modul má rovněž čtyři 24bitové vstupy avšak s rozsahem ± 60 V. Dynamický rozsah je 128 dB. Je vybaven anti-aliasing filtry. Maximální vzorkovací frekvence je 50 kHz na každý kanál. K dispozici jsou dvě varianty: s BNC konektory nebo se svorkovnicí. V této práci je využita varianta s BNC konektory. Tento modul měří pouze napětí a tak je potřeba data dále zpracovat.



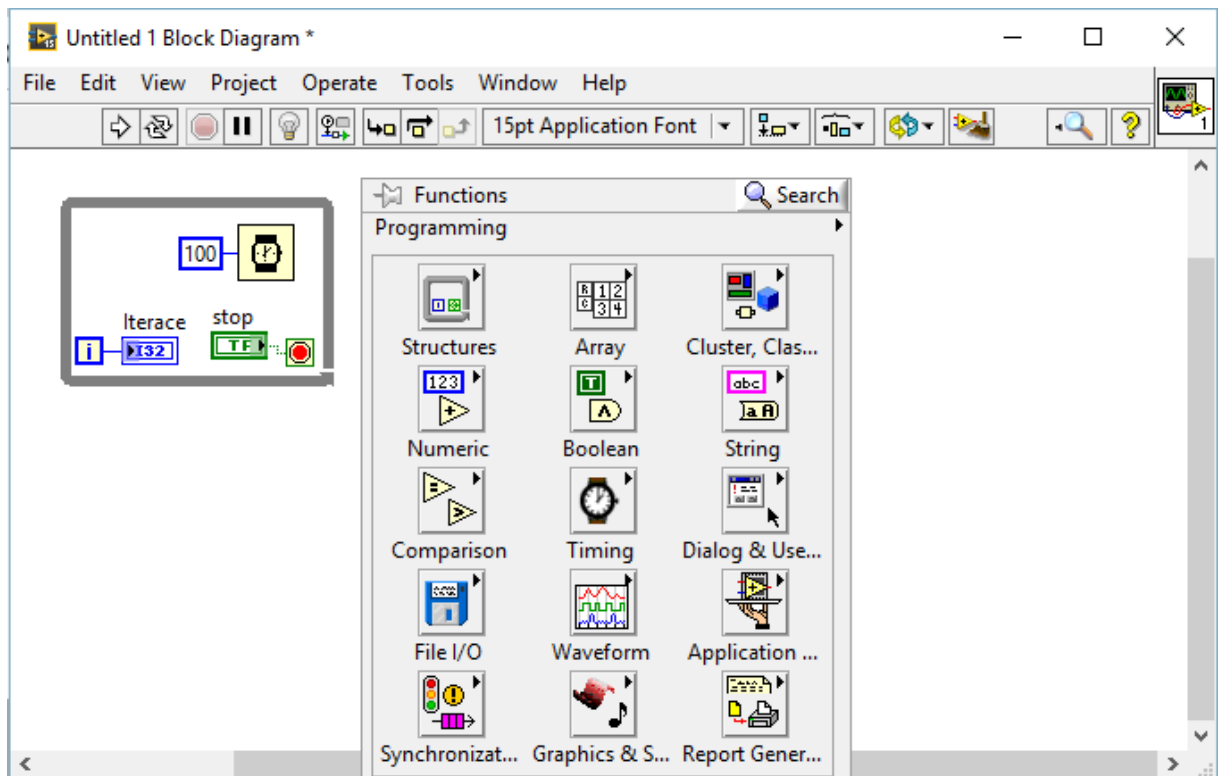
obr. 21 – Měřicí karta NI 9229 [10]

Dále je využito několik dalších zařízení, které jsou umístěny v dlouhodobé instalaci haly experimentálního provozu. Sledují provozní hodnoty jako např.: teplota páry, tlak páry, hmotnostní průtok páry, otáčky turbíny...

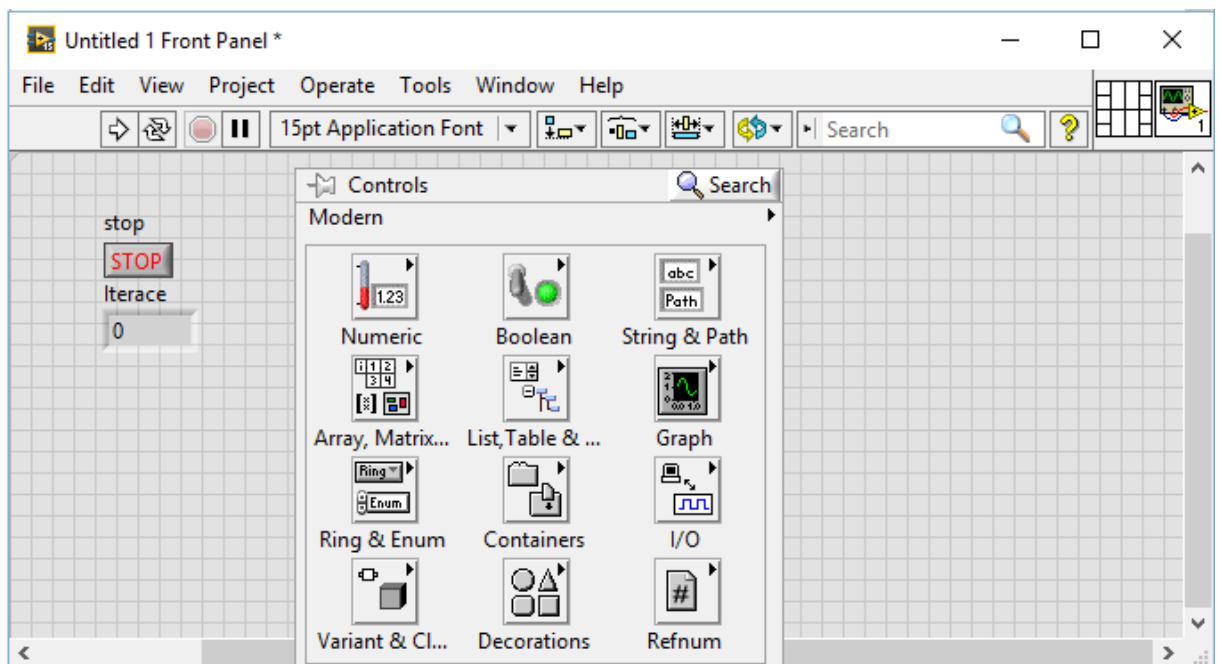
3.4 Softwarové nástroje

Úloha zpracování dat je rozdělena do dvou částí – akvizice dat a jejich analýza. Pro tyto účely bylo použito nástrojů Matlab a LabVIEW. Výchozím nástrojem pro analýzu dat bylo programovací prostředí Matlab, hlavně díky množství vestavěných funkcí pro zpracování časo-frekvenčních událostí a také nižší složitosti návrhu a implementace programu a následné zobrazení výsledků. Analýza dat zahrnovala zpracování dat naměřených akcelerometry ale také zpracování provozních dat zaznamenaných trvale instalovanými senzory. Pro jejich vyhodnocení bylo potřeba převést tyto soubory do anglické lokalizace – potřeba desetinné tečky – a sjednotit časové značky napříč všemi souborovými formáty. Data z akcelerometrů byla zachycována s ekvidistantním vzorkováním, a pro porovnávání s ostatními provozními veličinami tedy stačilo využít čas v názvu souboru. Ostatní provozní data byla ke každému záznamu opatřena vlastní časovou značkou, a tedy bylo nutné vytvořit několik jednoúčelových funkcí. Následně byla sjednocená data vyhodnocena zmíněnými postupy (kapitola 3.5).

Pro záznam dat ze všech měřených míst ventilu bylo použito vývojové prostředí LabVIEW společnosti National Instruments (NI). Jedná se o grafické vývojové prostředí běžně používané pro sběr dat, řízení nástrojů a průmyslovou automatizaci. Poprvé bylo uvedeno v roce 1986 pro Apple Macintosh. Nyní je prostředí multiplatformní a lze jej provozovat pod operačními systémy společnosti Apple, Microsoft, systémy na základě UNIX a Linux. Prostředí využívá Dataflow architekturu neboli program řízený tokem dat. Program se skládá ze dvou částí – ovládacího panelu (Front panel, FP) a blokového diagramu (Block diagram). Vykonání programu je odvozeno od blokového diagramu, který tvoří uživatel přetahováním a spojováním bloku z palety prostředí. Front panel slouží ke konfiguraci vstupů a výstupů či interakcí s uživatelem (grafy, tlačítka, apod.). Výhodou tohoto přístupu je zpřístupnění větší skupině lidí, kteří se nepohybují v oblasti programování. Díky široké nabídce knihoven je snadný přístup k ovládání řady zařízení at' už společnosti NI či jiných komunikujících po sběrnících definovanými průmyslovými standardy. Snadno lze program také paralelizovat (ve smyslu využití více vláken) například pouhým vložením dvou WHILE smyček do jednoho blokového diagramu.



obr. 22 - Ukázka prostředí LabVIEW - block diagram



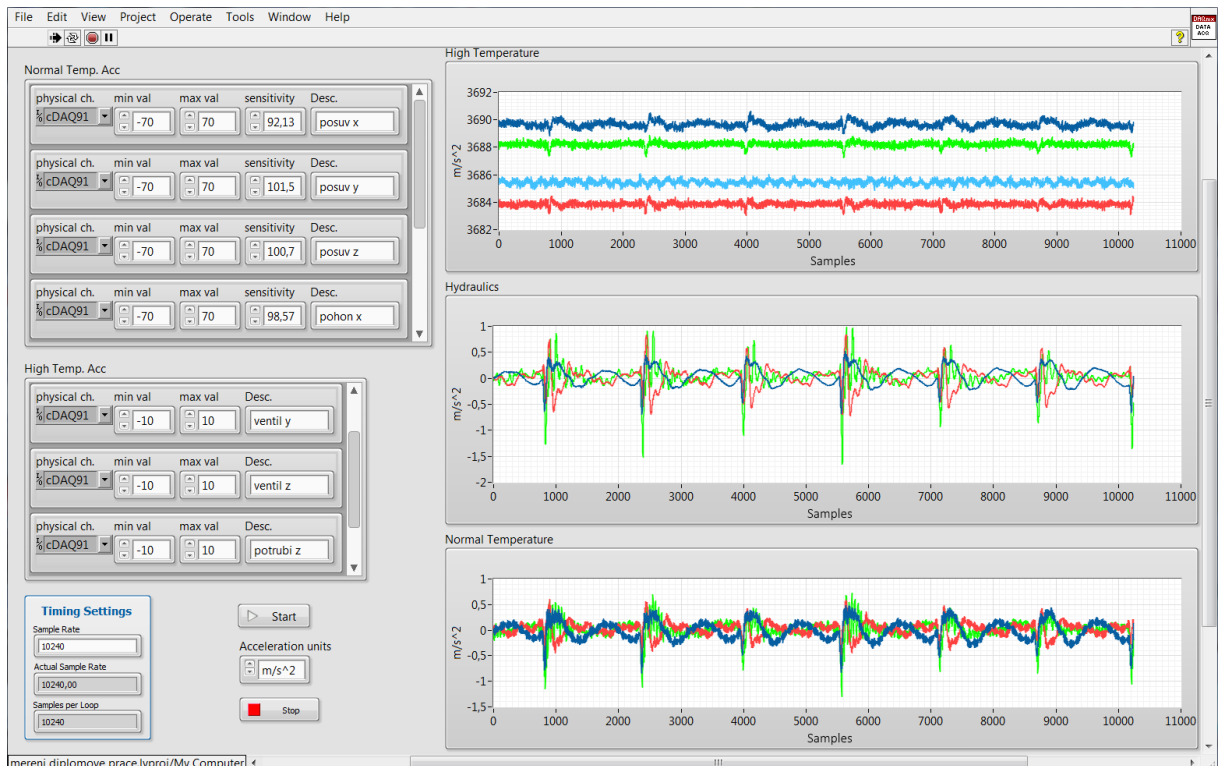
obr. 23 - Ukázka prostředí LabVIEW - front panel

Pro akvizici měřených dat je však potřeba mnohem složitějšího programu. Díky velkému datovému toku při záznamu hodnot vibračních dat byla zvolena architektura PRODUCER-CONSUMER. Tento přístup odděluje smyčku pro čtení dat ze záznamových karet a předzpracování dat s jejich zápisem na disk pomocí datové struktury typu fronta. Každá skupina operací má svou vlastní smyčku a běží na sobě nezávisle - paralelně. V roli producenta je zde smyčka pro čtení dat, a jelikož se zaznamenává jednou za sekundu se

vzorkovací frekvencí 10240 Hz z deseti různých míst, je tedy pokaždé nutné zapsat 102400 hodnot ve formátu double spolu s jejich oddělovači. Data ze senzorů CA 901 jsou díky použité kartě reprezentována pomocí elektrického napětí ve voltech a proto je nutné je převést do jednotek zrychlení podle rovnice 3.4.1. Citlivost převodníku je 20 mV/g. Ostatní senzory jsou již díky konfiguraci měřicí karty ve fyzikálních jednotkách.

$$a_{m/s^2} = a_V \frac{g}{s} \quad 3.4.1$$

kde g je gravitační zrychlení, s je citlivost převodníku. V roli konzumenta je zde smyčka pro předzpracování a zápis dat do souboru ve formátu csv. Předzpracování převádí mezi lokalizacemi LabVIEW (desetinná čárka) a Matlabu (desetinná tečka). Pokud by totiž zpracování a zápis dat trvalo déle než načtení nových, docházelo by ke ztrátě dat. Před samotným spuštěním měření se však musí vytvořit soubor, do kterého se časový průběh signálu bude zapisovat – vytvoří se soubor formátu csv s názvem obsahující datum a čas vytvoření ve tvaru „d.m.rrrr h-mm-ss.csv“. Díky tomu a znalosti vzorkovací frekvence (10240 Hz) je možno v Matlabu porovnat signál z akcelerometrů s ostatními provozními veličinami (tlakový poměr před a za ventilem ϵ , průtok páry,...). Ostatní provozní veličiny mají různé vzorkování, které není vždy ekvidistantní.



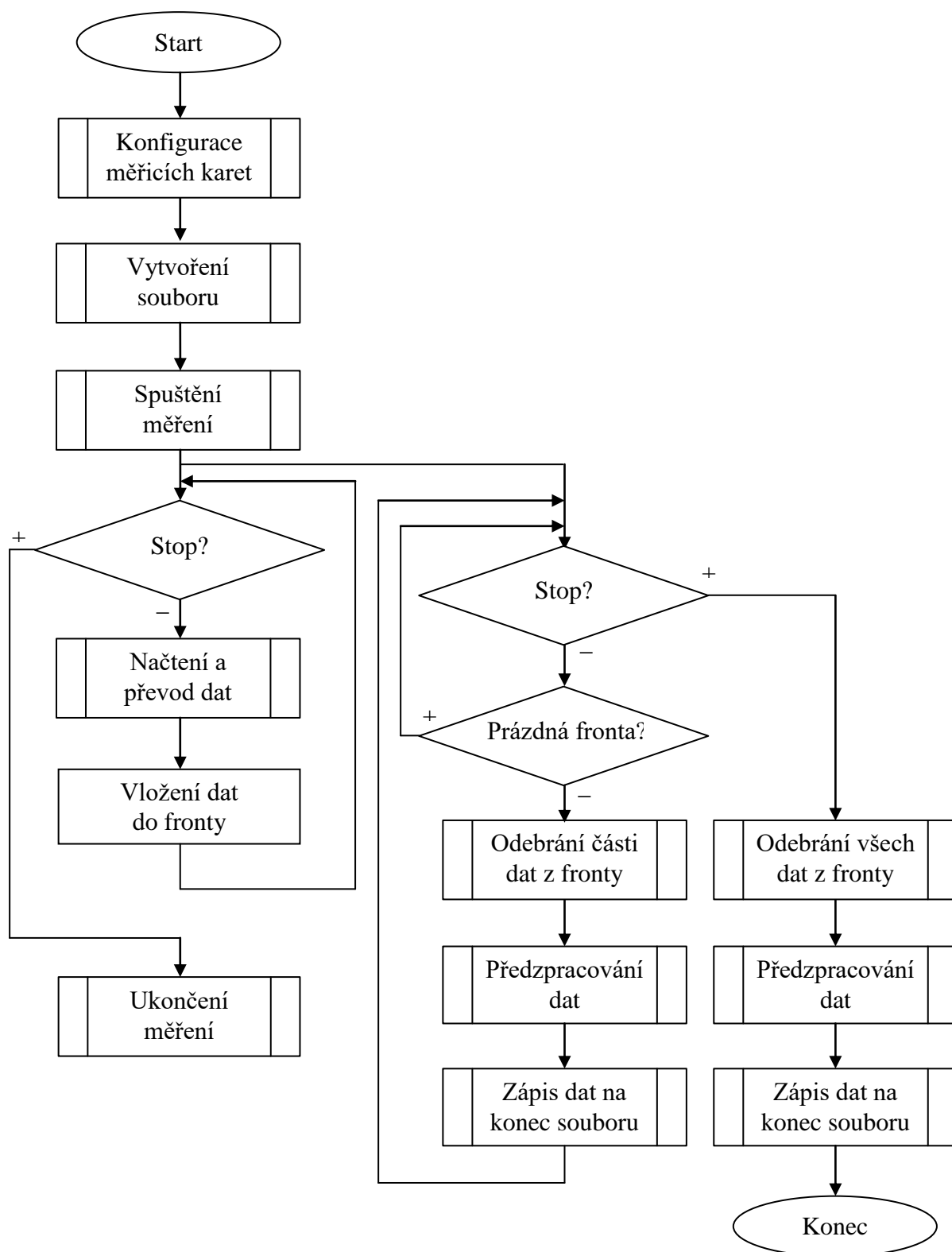
obr. 24 - Front panel zapisovacího programu

Vzorkovací frekvence byla nastavena v závislosti na měřicích kartách, které umožňovaly pouze specifické hodnoty – od 1.652 kHz do 50 kHz (průnik intervalů obou karet). Vzorkovací frekvenci lze vypočítat podle vztahu 3.4.2.

$$f_s = \frac{(f_M \div 256)}{n} \quad 3.4.2$$

kde $n = 1,2,3,\dots,31$ a f_M 12.8 MHz pro NI 9229 a 13.1072 MHz pro NI 9234. Dále také na parametrech filtru signálového převodníku IPC 704, pásmová propust od 2 Hz do 5 kHz. Při vzorkovací frekvenci 10 kHz vykazoval program pro záznam měření značnou nestabilitu, což bylo způsobeno kartou NI 9234. Při testovacím provozu pouze s touto kartou program vracel místo požadované vzorkovací frekvence 10 kHz kartou nastavenou frekvenci 10.24 kHz. Při použití obou typů karet použitím frekvence 10.24 kHz se problémy se stabilitou nevyskytovaly.

V obr. 24 v grafu pro časový průběh údajů vysokoteplotních akcelerometrů je vidět hodnoty v řádech tisíců m/s^2 . To je způsobeno konstrukcí IPC 704, díky které je v signálu připočtena stejnosměrná složka $7.5 V \pm 0.2 V$. Po přepočtení na zvolenou fyzikální veličinu (m/s^2) signál nabývá takovýchto hodnot. Pro odstranění vlivu stejnosměrné složky jsou všechny analýzy ve frekvenční oblasti od 7,5 Hz.



obr. 25 - Blokové schéma zápisu dat

3.5 Teoretické nástroje analýzy

3.5.1 Fourierova transformace

Hlavním nástrojem pro analýzu naměřených dat je Fourierova transformace (FT; vztah 3.5.1) resp. její diskretní varianta (DFT; vztah 3.5.2)).

$$S(\omega) = \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad 3.5.1$$

$$D(n) = \sum_{k=0}^{N-1} d(k) e^{-j\frac{2\pi nk}{N}}, n = 0, 1, \dots, N-1 \quad 3.5.2$$

V současnosti se však používá rychlá Fourierova transformace (FFT). Jelikož všechny signály jsou dnes diskretní, je to metoda postavená na DFT. Nejedná se však o aproximaci, ale o algoritmus výpočtu. Klasická DFT potřebuje provést $2N^2$ operací s komplexními čísly. Pokud však vstupní signál má délku $N=2^k$, kde k je z oboru kladných celých čísel, lze snížit počet operací na $N \log_2 N$. Existují dva přístupy – s rozkladem v časové oblasti a s rozkladem ve frekvenční oblasti. V obou přístupech se využívá N -bodové transformace, kdy se vstupní signál dělí na několik posloupností o stejném počtu bodů, např.: vstupní vektor délky 8 se rozdělí na dvě 4bodové posloupnosti, následně na čtyři 2bodové atd.

3.5.1.1 Rozklad v časové oblasti

Posloupnost $d(n)$ se rozdělí na sudé prvky $g(m)$ a liché prvky $h(m)$, kde každá posloupnost má svou vlastní DFT. Pro výpočet touto metodou se nejdříve provede rozdělení a následně proběhne výpočet transformace. Dělení však je nutno udělat rekurzivně až do stavu kdy rozdělené posloupnosti (vztah 3.5.3) obsahují pouze jeden prvek. Z tohoto stavu se následně proběhne výpočet postupně zpět, až od původní velikosti signálu – od vztahu 3.5.4 dále.

$$g(m) = d(2m) \quad h(m) = d(2m + 1) \quad 3.5.3$$

kde m náleží $\langle 0; N/2-1 \rangle$

$$G(k) = \sum_{m=0}^{M} g(m) e^{-j\frac{2\pi mk}{M}} \quad H(k) = \sum_{m=0}^{M} h(m) e^{-j\frac{2\pi mk}{M}} \quad 3.5.4$$

kde k náleží $\langle 0; N/2-1 \rangle$

$$W^k = e^{-j\frac{2\pi k}{N}} \quad 3.5.5$$

$$D(k) = G(k) + W^k H(k) \quad 3.5.6$$

$$D(k) = \sum_{m=0}^{N/2-1} g(m) e^{-j\frac{4\pi kn}{N}} + e^{-j\frac{2\pi k}{N}} \sum_{m=0}^{N/2-1} h(m) e^{-j\frac{4\pi mn}{N}} \quad 3.5.7$$

3.5.1.2 Rozklad ve frekvenční oblasti

Posloupnost $d(n)$ se rozdělí na dvě po sobě jdoucí posloupnosti. Tento přístup je od předchozího odlišný tím, že dělení na další úroveň probíhá až po spočtení transformace. Dělení opět probíhá rekurzivně až do stavu kdy rozdělené posloupnosti (vztah 3.5.8) obsahují pouze jeden prvek.

$$g(m) = d(m) \quad h(m) = d(m + N/2) \quad 3.5.8$$

kde \mathbf{m} náleží $\langle 0; N/2-1 \rangle$

$$D(2k) = \sum_{m=0}^{N/2-1} (g(m) + h(m)) e^{-j\frac{4\pi km}{N}} = DFT\{g + h\} \text{ pro sudé prvky} \quad 3.5.9$$

$$D(2k + 1) = \sum_{m=0}^{N/2-1} (g(m) - h(m)) W^k e^{-j\frac{4\pi km}{N}} \quad 3.5.10$$

$= DFT\{(g - h)W^k\}$ pro liché prvky

$$D(k) = \sum_{m=0}^{N/2-1} (g(m) - e^{-j\pi k} h(m)) e^{-j\frac{4\pi km}{N}} \quad 3.5.11$$

Rychlá Fourierova transformace přináší zrychlení pouze v případě se vstupní signál má 2^k vzorků. Pokud má méně je vhodné signál v zájmu zachování informace rozšířit o nulové vzorky.

3.5.2 Spektrogram

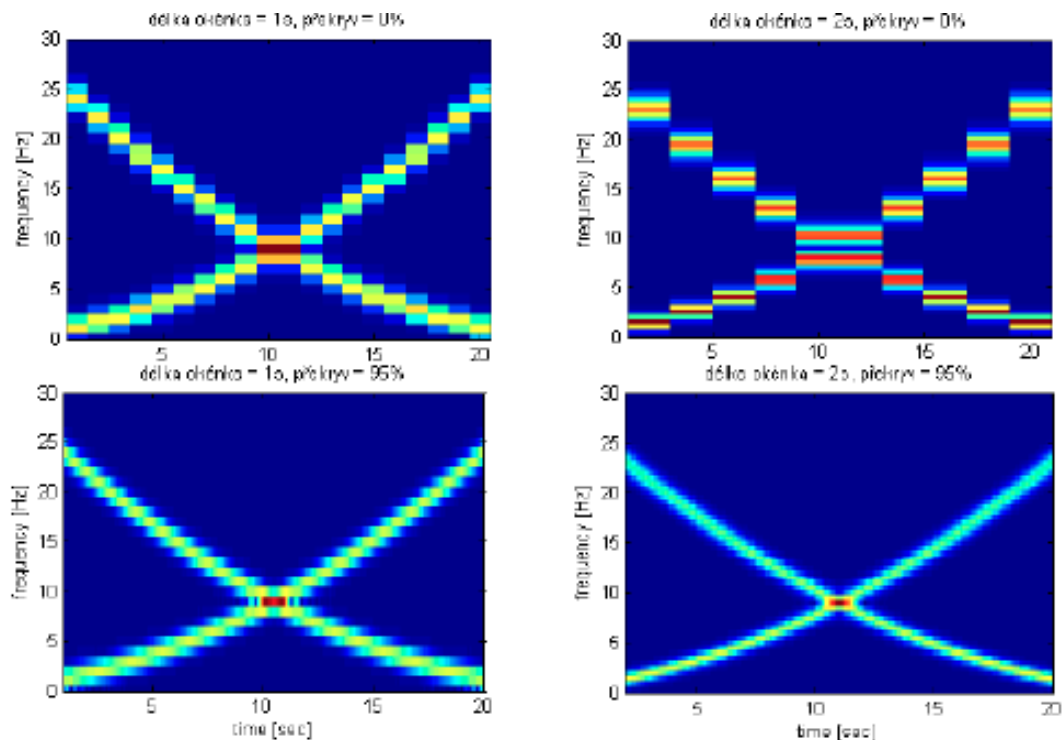
Spektrogram využívá krátkodobé Fourierovy transformace k zobrazení frekvenčního spektra v měnícím se čase. Ta je vypočtena z krátkých úseků analyzovaného signálu (vztah 3.5.12 – spojitá verze).

$$X(t, \omega) = \int_{-\infty}^{\infty} x(\tau) h(\tau - t) e^{-j\omega t} d\tau \quad 3.5.12$$

Kde $x(t)$ je analyzovaný signál, $h(t)$ je okénková funkce. Základním okénkem je takzvané pravoúhlé okénko. Okénka se využívají pro omezení úniku ve spektru. Pravoúhle okénko má konstantní úroveň o velikosti 1, tudíž není moc vhodné. Vhodnější je použít složitější okénko – Hanningovo, Hammingovo, Blackmanovo, ... Jeho použitím dochází k útlumu amplitudy signálu na jeho okrajích, což má za následek snížení průměrné energie signálu. Díky tomu je potřeba provést korekci výstupu (vztah 3.5.13). Tímto způsobem se z komplexního signálu $X(t, \omega)$ získá amplituda frekvenčních složek, což je hlavním analytickým nástrojem práce.

$$A(t, \omega) = 2 \frac{|X(t, \omega)|}{\frac{1}{T_w} \int_0^{T_w} h(\tau) d\tau} \quad 3.5.13$$

Velikost okénka je nutno volit s ohledem na očekávané jevy v signálu – řídí se principem neurčitosti. Delší okénko přináší lepší rozlišení ve frekvenci, avšak není vhodné pro rychlé nestacionární jevy- rázy – díky horšímu rozlišení v čase. Kratší okénko zase přináší dobré rozlišení v čase – dobrá identifikace událostí v čase, ale horší ve frekvenci – např. při odhalování stabilních rezonancí. Tomuto jevu se lze částečně vyhnout volbou překrytí jednotlivých krátkých úseků signálu. Větší překrytí úseků zvyšuje rozlišení v čase. Vždy se však jedná o kompromis. Vliv velikosti okénka je dobře znázorněn v obr. 26 [11], kde v levé části je délka okénka 1 s, v pravé 2 s. Překryv je v horní části 0% a v dolní 95%. Velikost překrytí zdánlivě řeší problém s délkou okénka, avšak je nutno vzít v úvahu vyšší výpočetní náročnost, například při použití v aplikacích běžících v reálném čase.

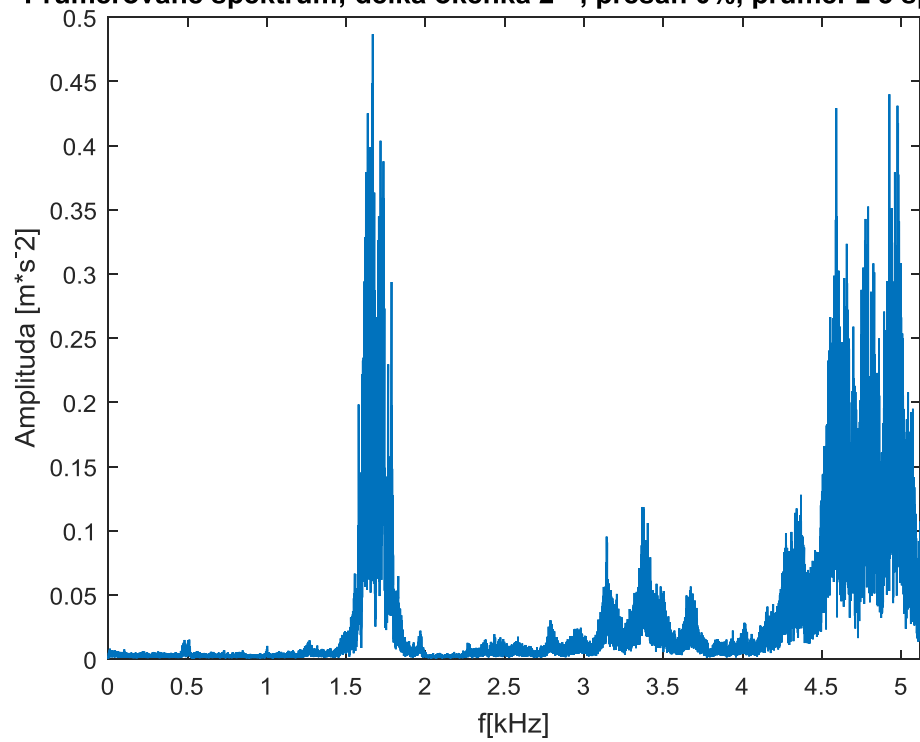


obr. 26 – Vliv velikosti okénka a překrytí na spektrogram [11]

3.5.3 Průměrované spektrum

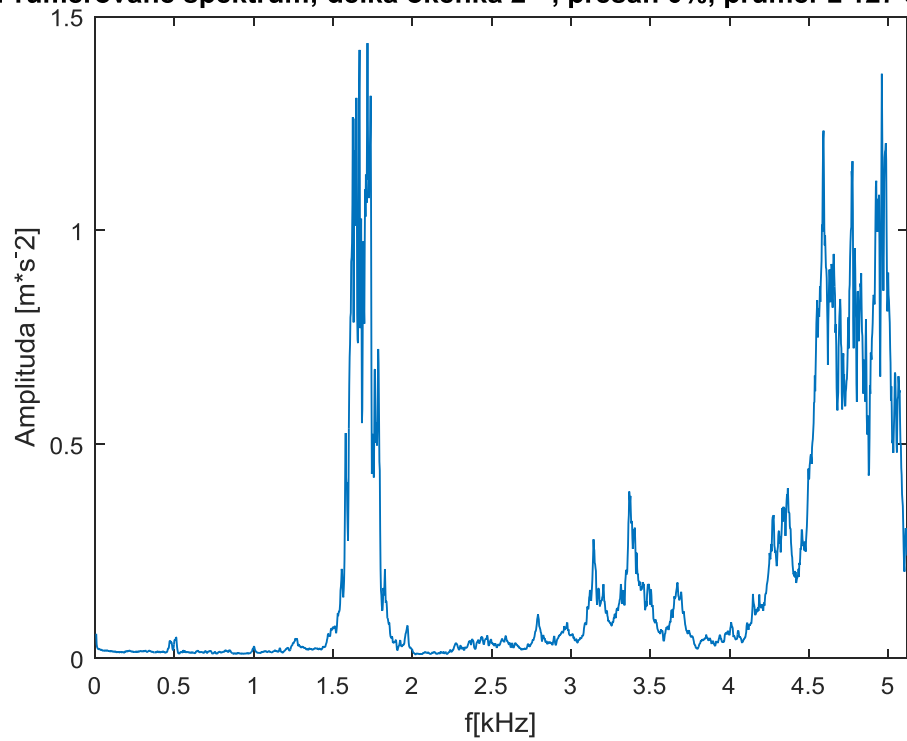
Toto je metoda také využívající krátkodobé Fourierovy transformace (3.5.12). Její využití je však odlišné od spektrogramu. Jedná se o nástroj sloužící k identifikaci významných frekvenčních pásem v lineárním stacionárním signálu. Pokud nejsou splněny tyto podmínky, tak výsledek může být chybně interpretován. Je to však relativně jednoduchá metoda, ve které díky průměru spekter dochází filtraci méně častých amplitud. Volí se zde oproti spektrogramu velké okénko. Je potřeba brát v úvahu také počet spekter, ze kterých bude výsledek průměrován. Překrytí úseku se volí podle potřeby. Signál pochází z měření na statoru ventilu při otevření 5 mm.

Průměrované spektrum; délka okénka 2^{17} , přesah 0%, průměr z 3 spekter



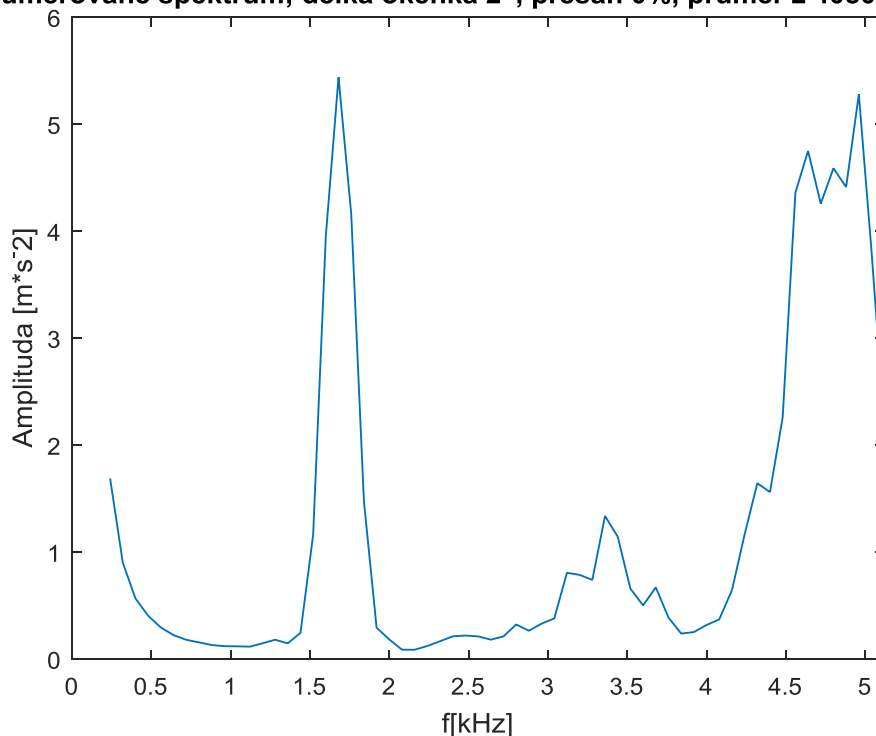
obr. 27 - Délka okénka 2^{17} vzorku

Průměrované spektrum; délka okénka 2^{12} , přesah 0%, průměr z 127 spekter



obr. 28 - Délka okénka 2^{12} vzorku

Průměrované spektrum; délka okénka 2^7 , přesah 0%, průměr z 4080 spekter



obr. 29 - Délka okénka 2^7 vzorku

3.5.4 Normování amplitud frekvenčních složek signálu

Metoda pro identifikaci časo-frekvenčních událostí v signálu. Normování probíhá pomocí vypočtené střední hodnoty a směrodatné odchylky signálu.

$$A_n(f, t) = \frac{A(f, t) - \mu(f, t)}{\sigma(f, t)} \quad 3.5.14$$

Reálné vlastnosti μ a σ nejsou známy a je tedy nutné použít jejich odhad. Normování probíhá vzhledem ke známému stavu zařízení. Dochází při něm k filtraci rezonancí a strukturálních vibrací.

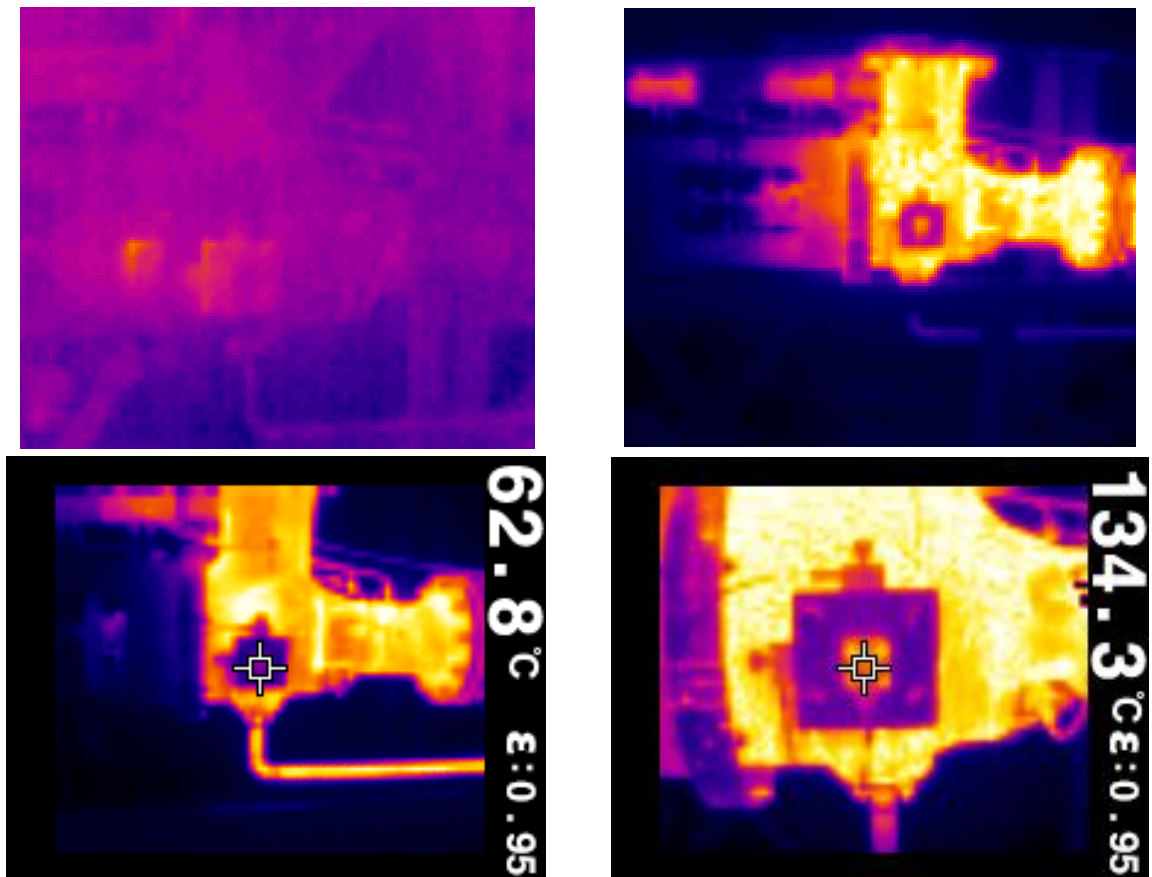
Na základě této metody byla vytvořena bezrozměrná charakteristická veličina, pomocí které lze určit charakter proudění.

$$v(t) = \frac{1}{N} \sum_{i=0}^N A_n(f_i, t) \quad 3.5.15$$

kde N je počet frekvencí v normovaném spektrogramu. V případě, že hodnota této funkce přesáhne 2, lze tvrdit, že došlo k odtržení mezní vrstvy od stěny difuzoru (viz obr. 2) a ventil je namáhán nadměrným chvěním.

3.6 Popis experimentu

Před samotným měřením vibrací je nutné uvést parní soustrojí do provozního stavu. Je to časově náročná procedura, při které se plynule zvyšuje tlak v potrubí z atmosférického tlaku na provozní – až 14 bar. Následně je potřeba parní potrubí prohřát na provozní teplotu, kdy již nedochází ke kondenzaci vody na stěnách technologických prvků tj. potrubí, ventily, turbína. Průběh prohřívání je znázorněn v obr. 30 – vlevo nahoře je odstavený ventil, vpravo nahoře je ventil po několika hodinách provozu, současně je pozorovatelný přenos tepla ostatní zařízení – včetně ventilu, přípravek pro připevnění hydraulického pohon a kondenzační nádobky pro měřicí systémy. Vlevo dole je snímek z doby prohřívání, kde je jasně viditelné odvodňovací potrubí ventilu. Tmavě je zobrazen přípravek pro upevnění akcelerometrů ne z důvodu, že by měl nižší teplotu, ale protože jeho povrch byl hladký a tím pádem má nízký koeficient vyzařování – i přes jeho teplotu dochází k odrazu tepelného záření od ostatních technologických prvků. Vpravo dole je ventil již dostatečně prohřátý a tak odvodňovacím neodtéká zkondenzovaná voda a tedy není ničím ohříváno a chladne.



obr. 30 - Snímky z termokamery

Stejným způsobem se musí rovnoměrně prohřát i turbína, jinak by došlo vlivem kondenzace vody k prudkému teplotnímu i silovému namáhání k poškození. Vlivem nerovnoměrně rozložené teploty dochází k změnám rozměrů materiálu rotoru a došlo by i k tzv. rubbingu. To by mělo za následek zvýšení vibrací, což by vedlo k odstavení turbíny (případně k poškození) a tím pádem nemožnosti zajištění dostatečného průtoku páry testovaným ventilem.

Cílem experimentu bylo ověřit výsledky numerické simulace [12] v reálném provozu. Testování probíhalo na zmenšeném modelu ventilu. Při experimentálním provozu byl kladen důraz na analýzu vibrací v nominálním stavu, tedy při plném otevření, a při malých otevřeních. Analýza chování při malých otevřeních ventilu.

3.7 Přehled provedených experimentů

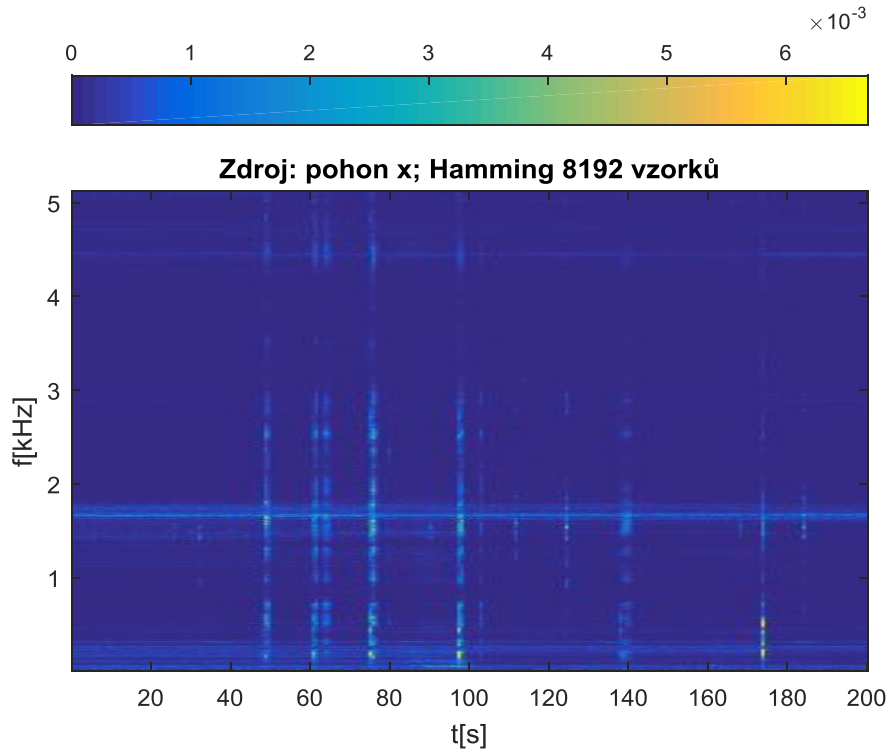
Bylo provedeno několik typů měření s cílem identifikovat režimy, ve který dochází k výraznému nárůstu vibrací vzhledem k nominálnímu stavu. Samotný nominální stav, plné otevření, byl několikrát měřen při různých tlacích na vstupu do turbíny – to mělo za následek odlišný průtok páry. Měření probíhalo tak, že po nastavení a ustálení (jednotky minut) vstupního tlaku se spustil záznam vibračních dat na řádově desítky sekund.

Dalším způsob měření – měření v malých otevřeních – probíhal tak, že se nastavilo konstantní otevření a pomocí řídicího systému YOKOGAVA (obr. 10) se měnil vstupní tlak turbíny takovým způsobem, aby bylo dosaženo kontinuální změny tlakového poměru před a za testovaným ventilem ε . Měření v malých otevřeních je důležité zejména pro určení pásem zvýšených vibrací – vztaženo k plnému otevření. Jelikož se nejedná o návrhový pracovní bod ventilu, může provozování v tomto režimu způsobit snížení spolehlivosti. Při měření byl pozorován jev, kdy se skokově zvýšila úroveň vibrací. Tento fenomén je daný charakterem proudění ventilem (obr. 2) a bylo zjištěno, že nastává pouze u otevření do 10 mm, dále již nebyl pozorovatelný.

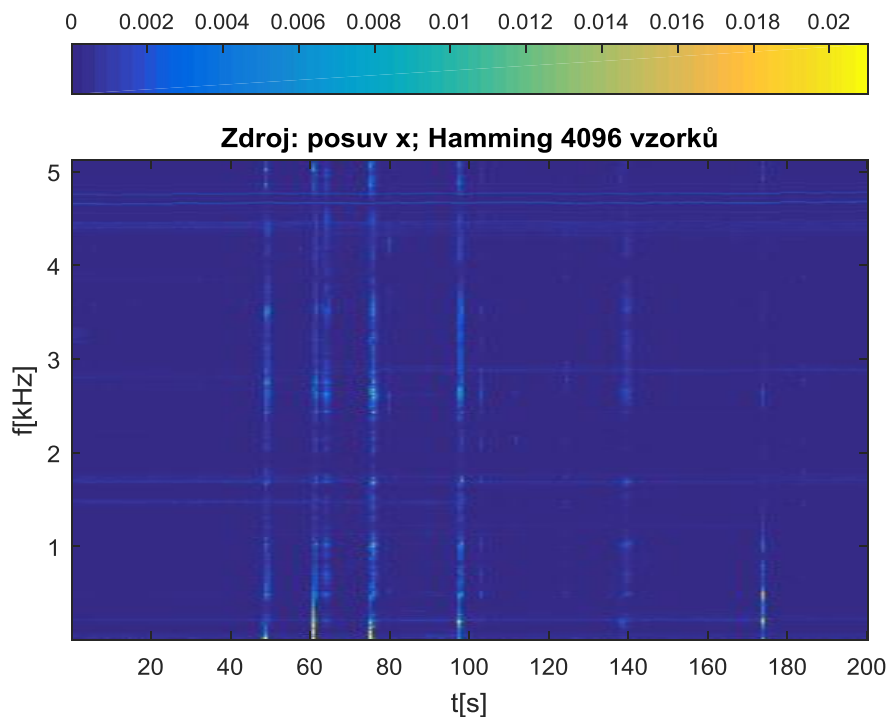
Bylo provedeno měření vlivu hydraulického pohonu ventilu na velikost vybuzených vibrací. Měření bylo provedeno v prohřátém stavu avšak bez průtoku páry ventilem.

3.8 Vliv hydraulického pohonu na vibrace ventilu

Při měření vlivu hydraulického pohonu, bylo zjištěno, že rázy vzniklé změnou otevření ventilu nemají vliv na buzení rezonančních frekvencí ventilu. Ve spektrogramech měření (obr. 31 až obr. 34) je možno jasně identifikovat rázy vzniklé řízením na všech senzorech (zobrazeny pouze průběhy pro osu x – směr působení pohonu a pohybu kuželky ventilu).

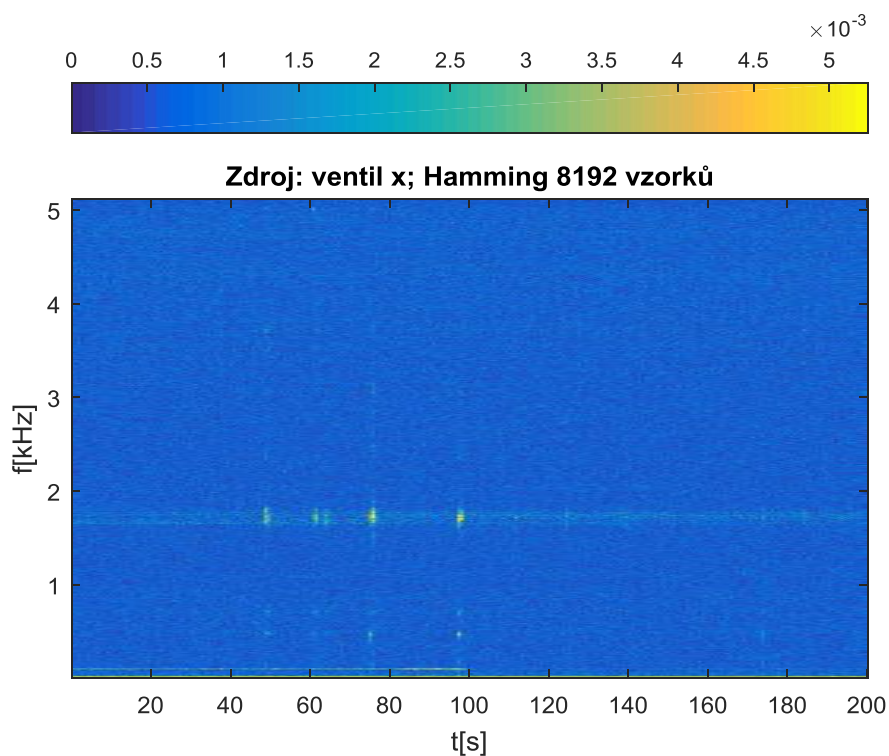


obr. 31 - Měření vibrací válce hydraulické pohonu

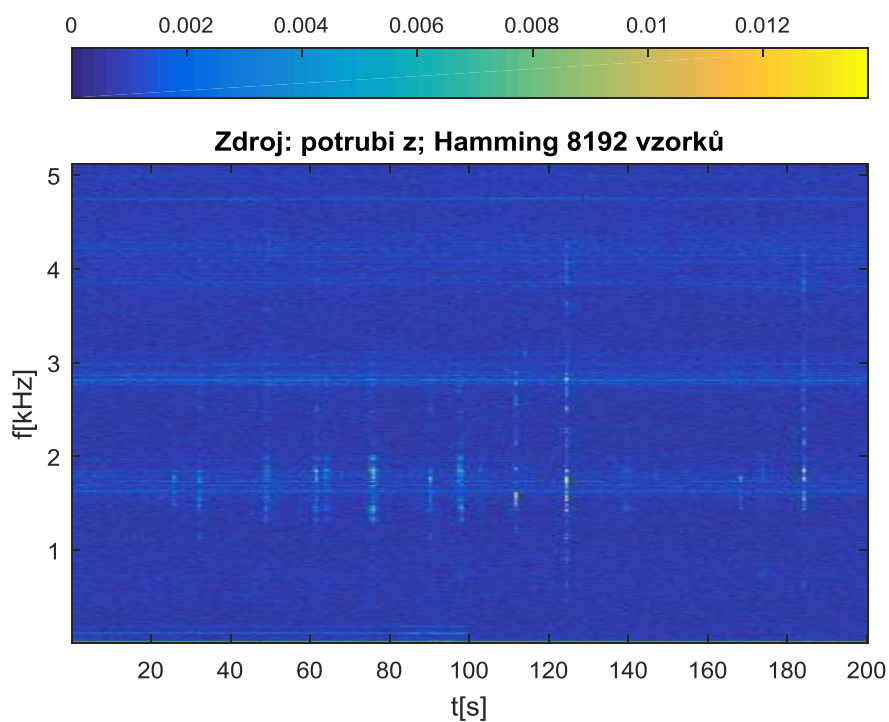


obr. 32 – Vliv hydrauliky na vibrace vřetene ventilu

Tyto rázy se šíří materiálem ale nemají vliv na buzení kmitání ventilu či jeho částí – vybuzené vibrace mají velmi nízkou amplitudu (oproti měření s proudící parou) a jsou rychle utlumeny. Při tomto měření došlo k postupnému otevírání ventilu ze zcela zavřeného stavu do plně otevřeného stavu po kroku 5 mm.



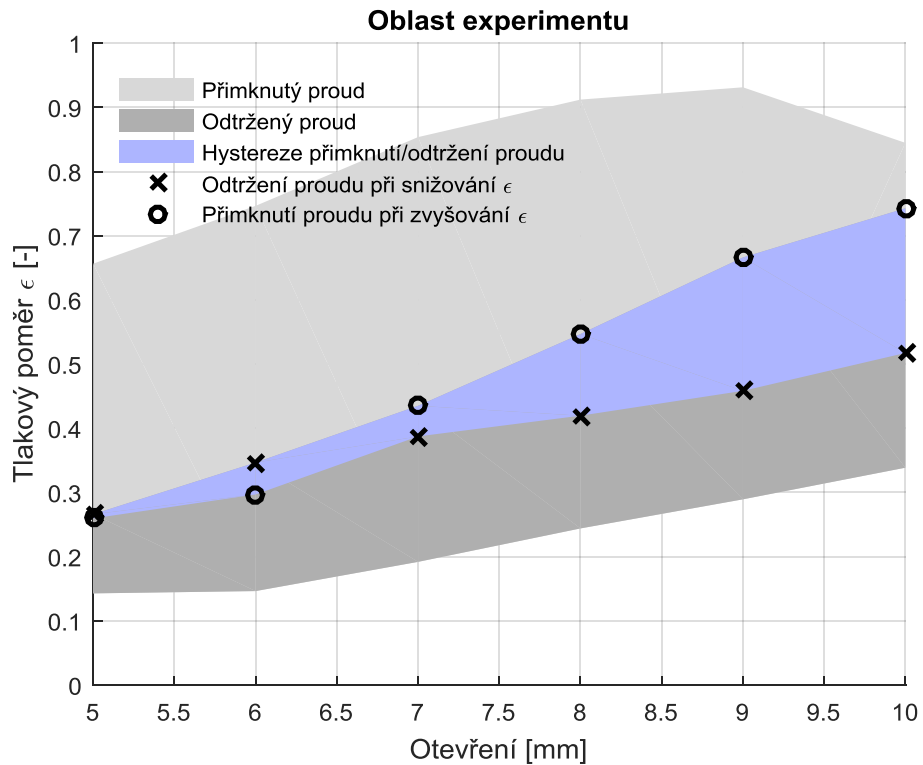
obr. 33 – Vliv hydrauliky na vibrace statoru ventilu



obr. 34 - Vliv hydrauliky na vibrace potrubí

3.9 Analýza chování při nízkých otevřeních

V průběhu tohoto experimentu se nastavilo konstantní otevření ventilu a pomocí řídicího systému YOKOGAVA (obr. 10) na vstupu do turbíny se měnil tlakový poměr ϵ před a za testovaným ventilem. Otáčky turbíny byly po celou dobu experimentu konstantní.



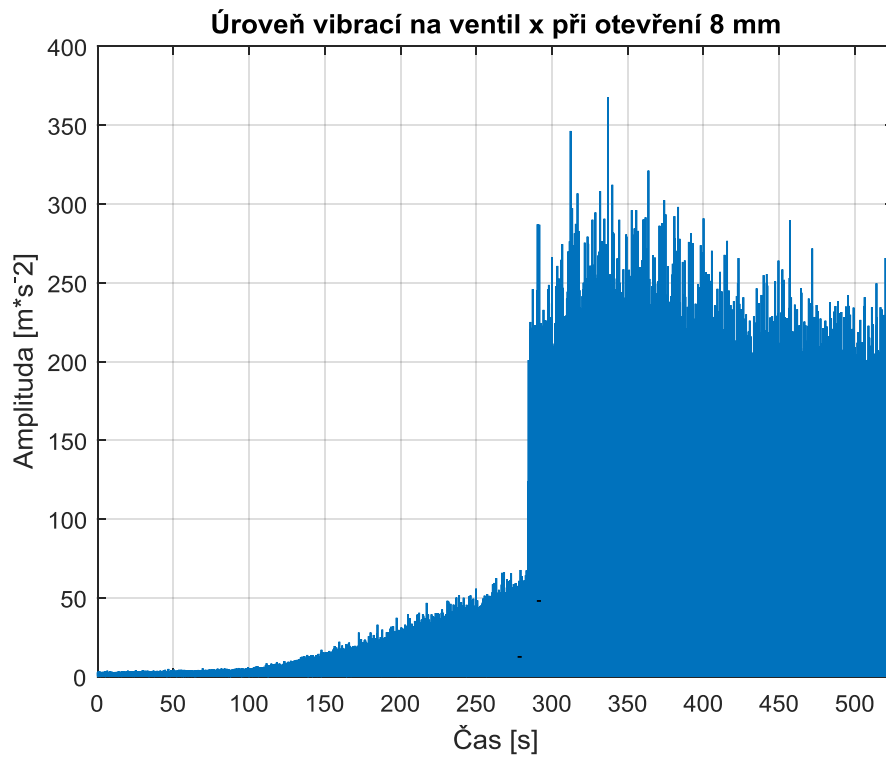
obr. 35 - Provozní veličiny experimentu

V tabulce (tab. 1) jsou zaznamenány přesné hodnoty tlakového poměru ϵ a průtoku páry, při kterých došlo k odtržení/přimknutí mezní vrstvy ke stěně difuzoru.

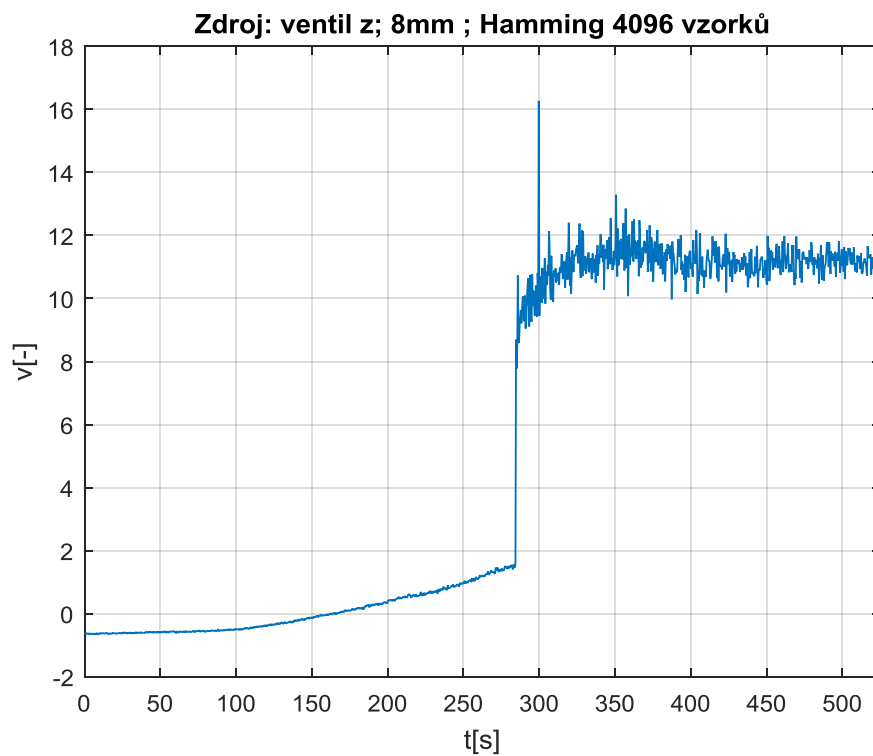
ϵ [-]	otevření [mm]	ϵ min [-]	ϵ max [-]	ϵ při odtržení [-]	průtok páry [t/h]
↓	10	0,5221	0,3412	0,5173	12,18
	9	0,9312	0,2893	0,4583	11,03
	8	0,912	0,2446	0,4196	9,645
	7	0,8468	0,1919	0,3873	7,981
	6	0,7465	0,1476	0,3466	6,265
	5	0,6564	0,1437	0,2661	4,577
ϵ [-]	otevření [mm]	ϵ min [-]	ϵ max [-]	ϵ při přimknutí [-]	průtok páry [t/h]
↑	10	0,8446	0,3386	0,7427	10,41
	9	0,9132	0,2894	0,6661	9,898
	8	0,8777	0,244	0,5468	9,09
	7	0,8536	0,2128	0,435	7,499
	6	0,6765	0,1464	0,2969	5,85
	5	0,3882	0,1428	0,2596	4,161

tab. 1 - Provozní veličiny experimentu

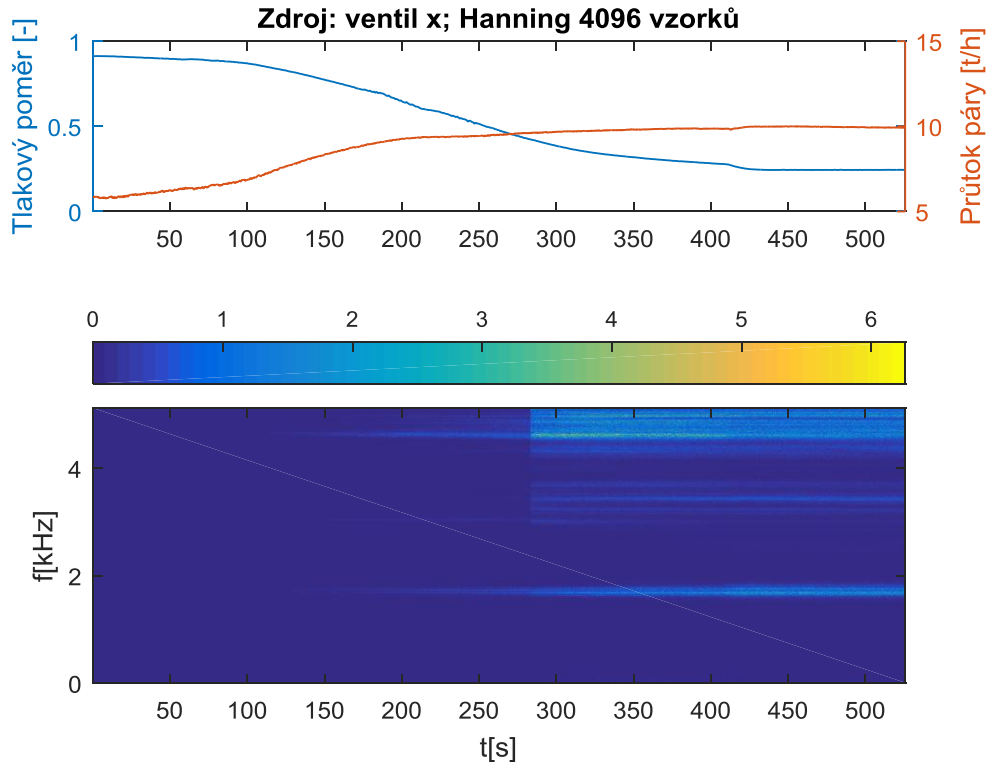
Z výběru spektrogramů (obr. 38 a obr. 40; otevření 8 mm) lze pozorovat nárůst vibrací oproti úseku kdy je charakter proudění s přimknutou mezní vrstvou. Při použití metody normování spektrogramu (obr. 39 a obr. 41; otevření 8 mm) je vidět značná změna vibrací v celém měřeném spektru.



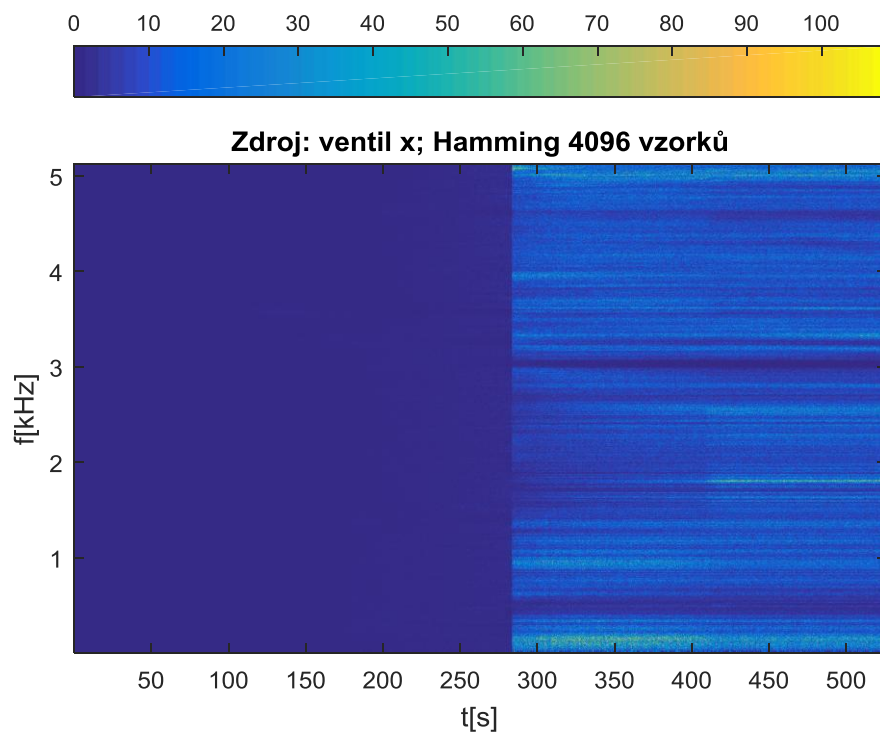
obr. 36 - Amplituda vibrací v časové oblasti



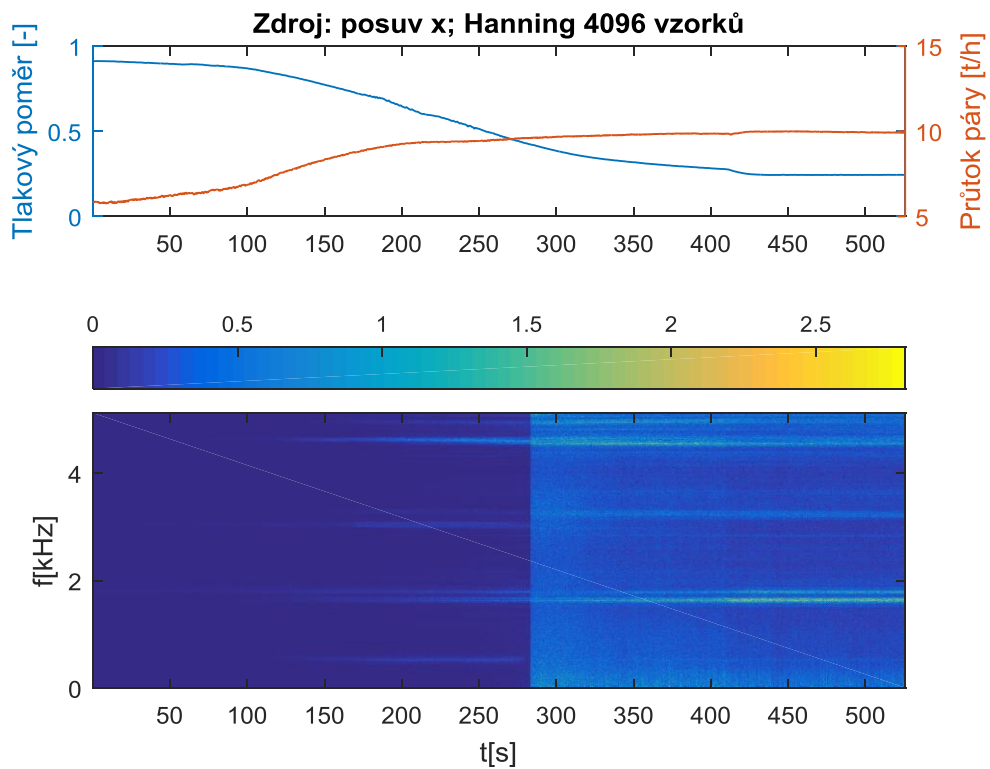
obr. 37 - Průběh charakteristické veličiny



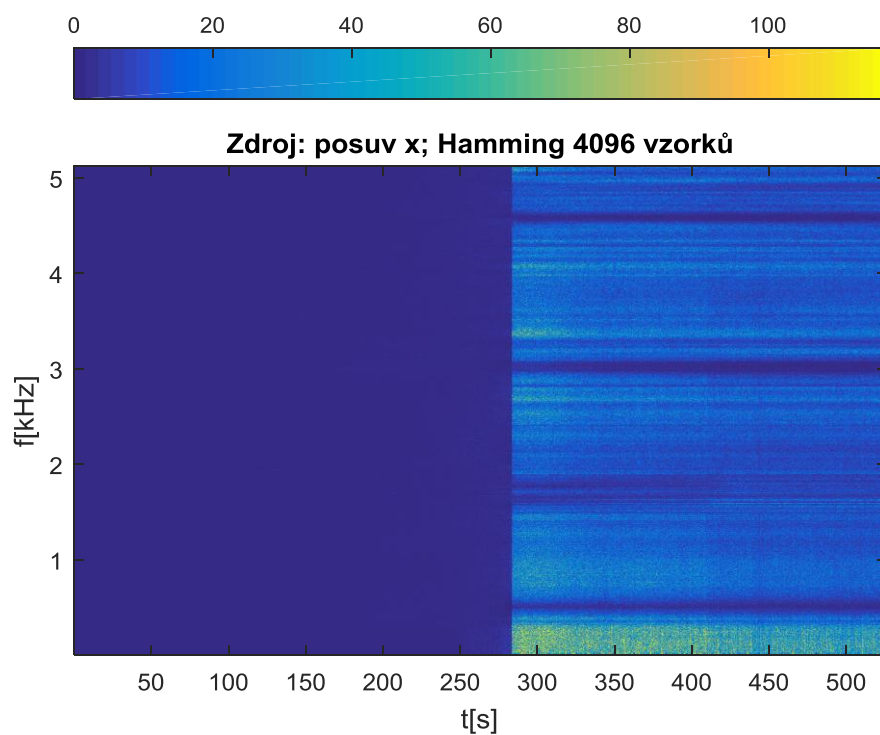
obr. 38 - Spektrogram statoru ventilu (osa x)



obr. 39 - Normovaný spektrogram statoru ventilu (osa x)

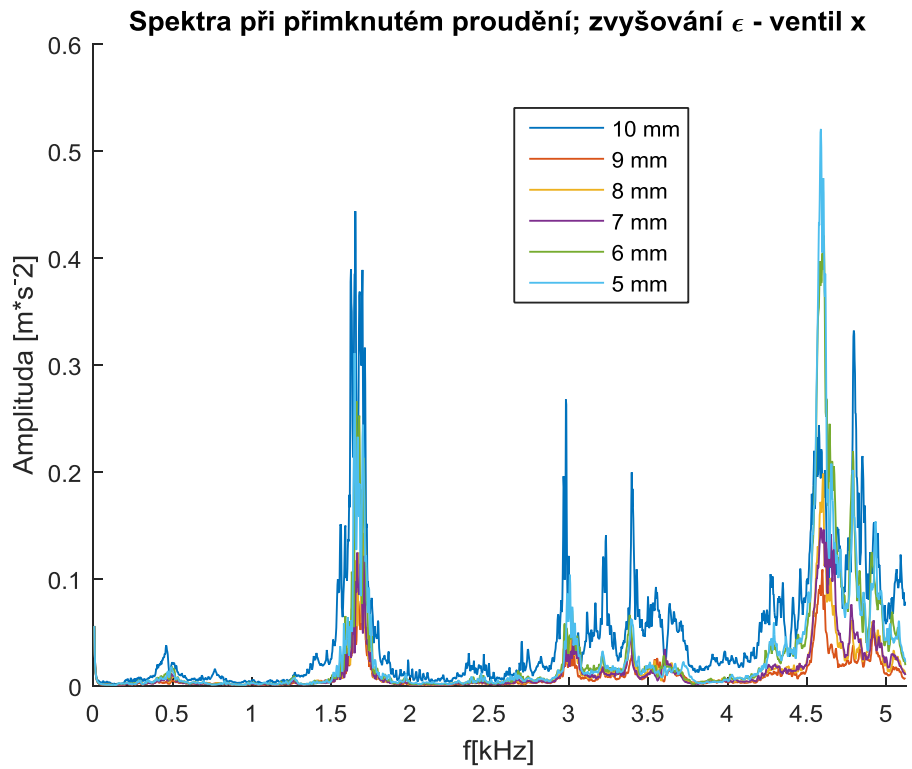


obr. 40 - Spektrogram vřetene ventilu (osa x)

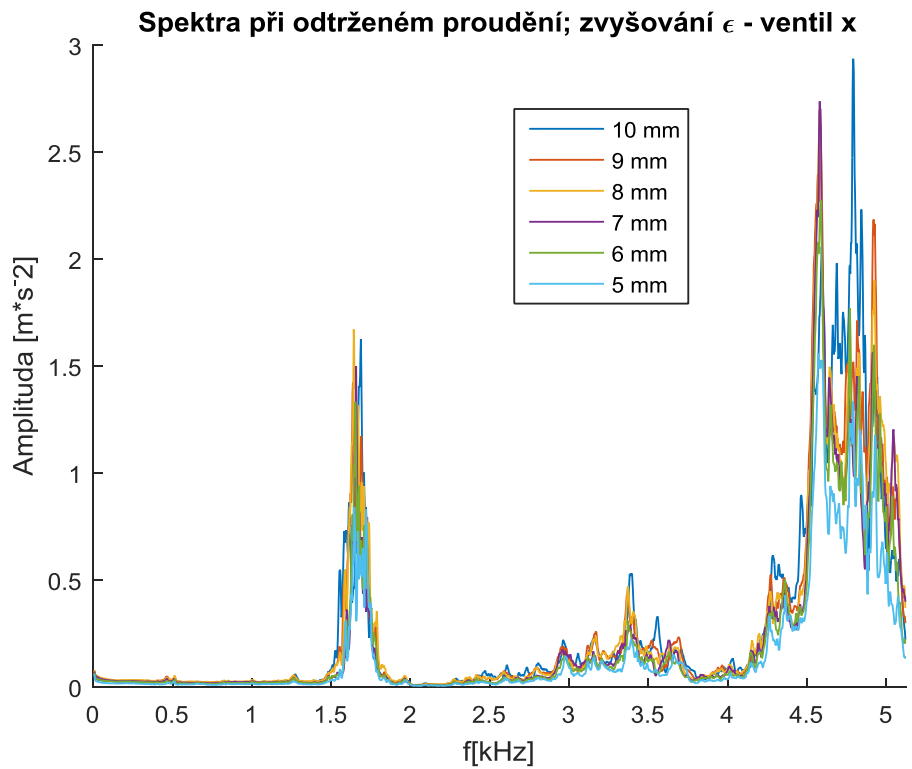


obr. 41 - Normovaný spektrogram vřetene ventilu (osa x)

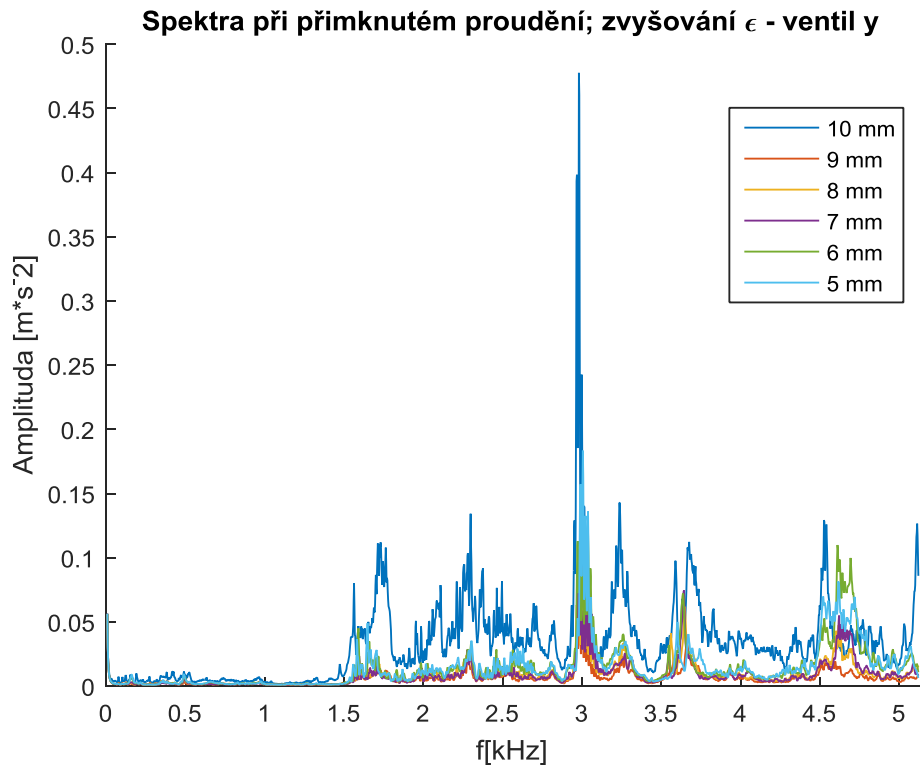
3.9.1 Měření na statoru ventilu



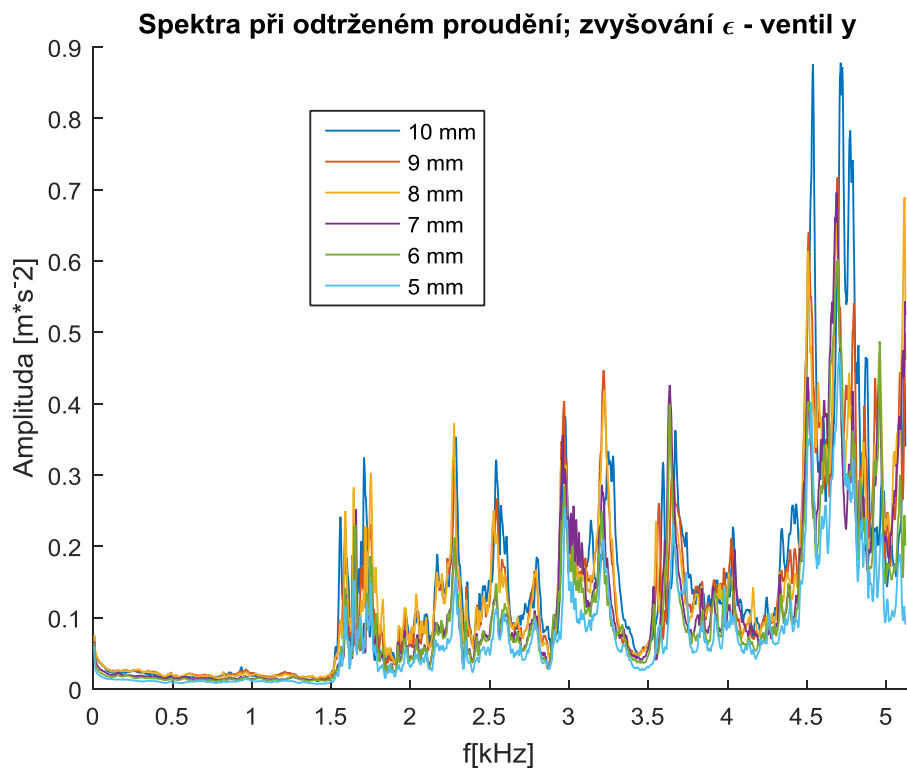
obr. 42 - Měření statoru ventilu (osa x), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ



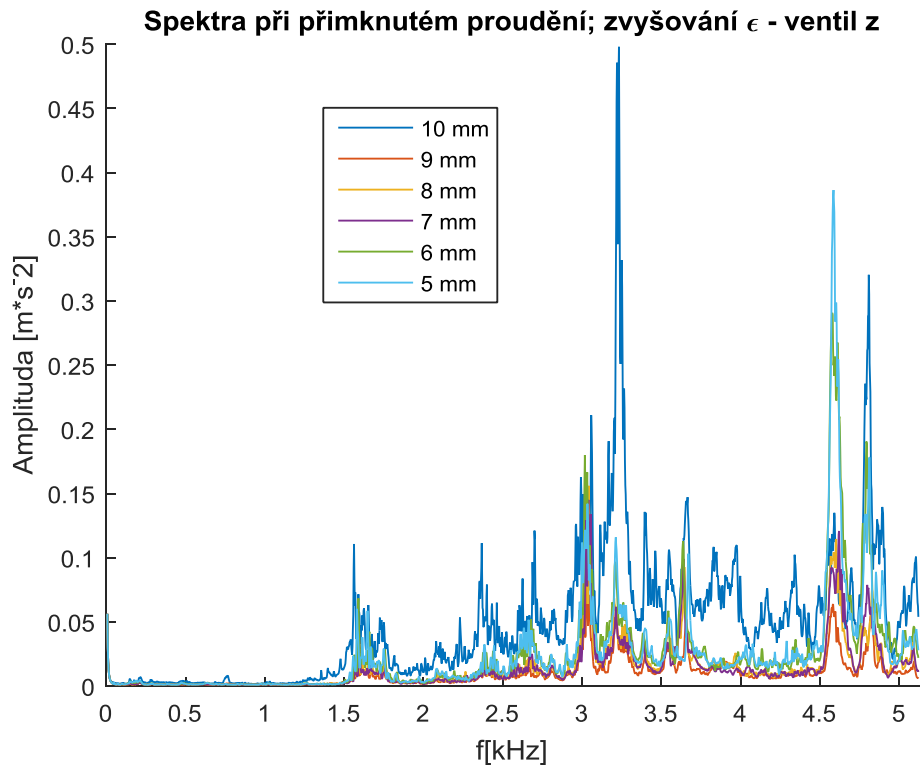
obr. 43 - Měření statoru ventilu (osa x), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ



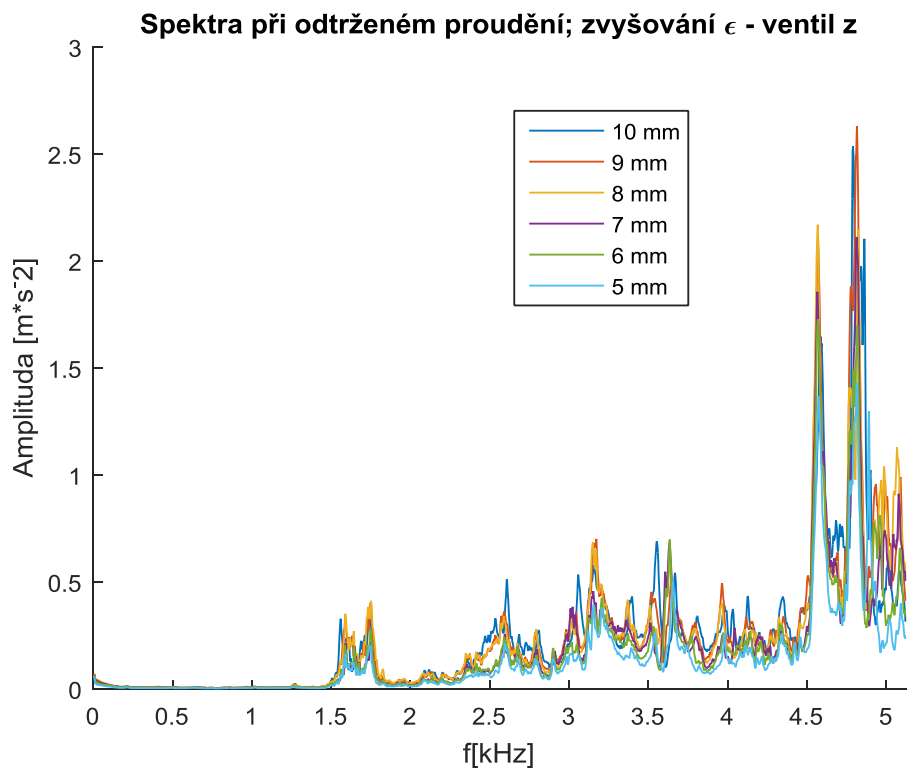
obr. 44 - Měření satoru ventilu (osa y), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ



obr. 45 - Měření satoru ventilu (osa y), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ

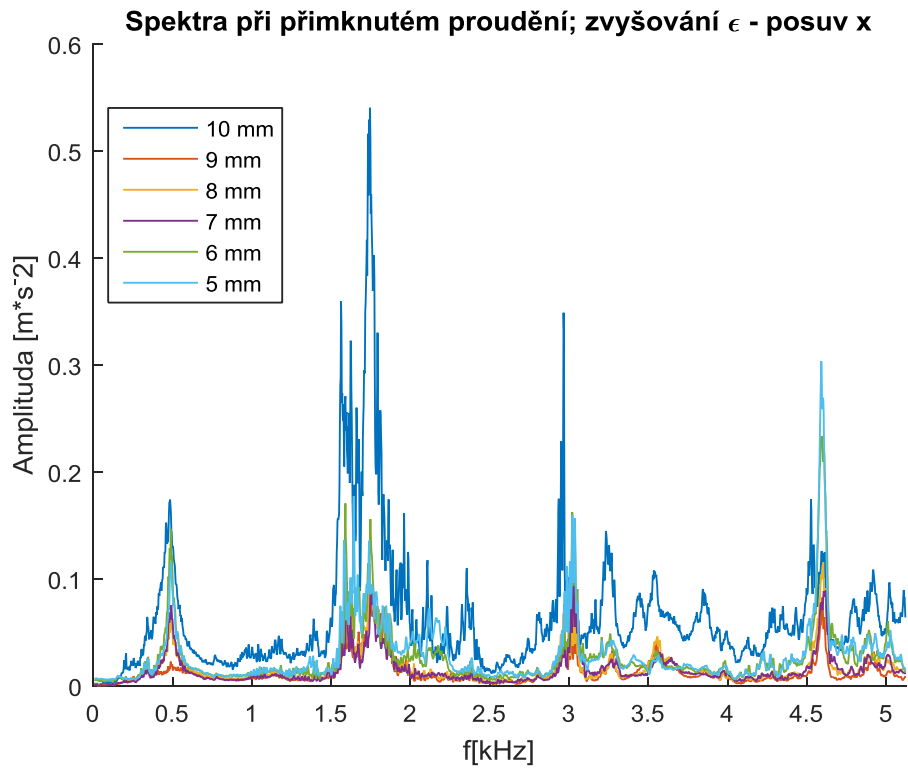


obr. 46 - Měření statoru ventilu (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ

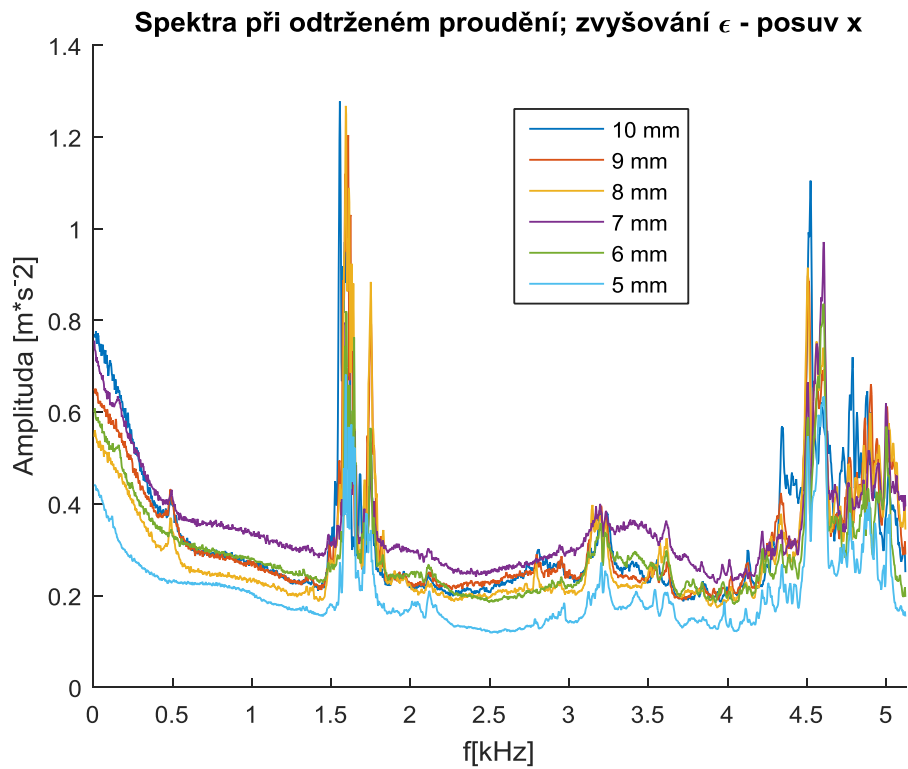


obr. 47 - Měření statoru ventilu (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ

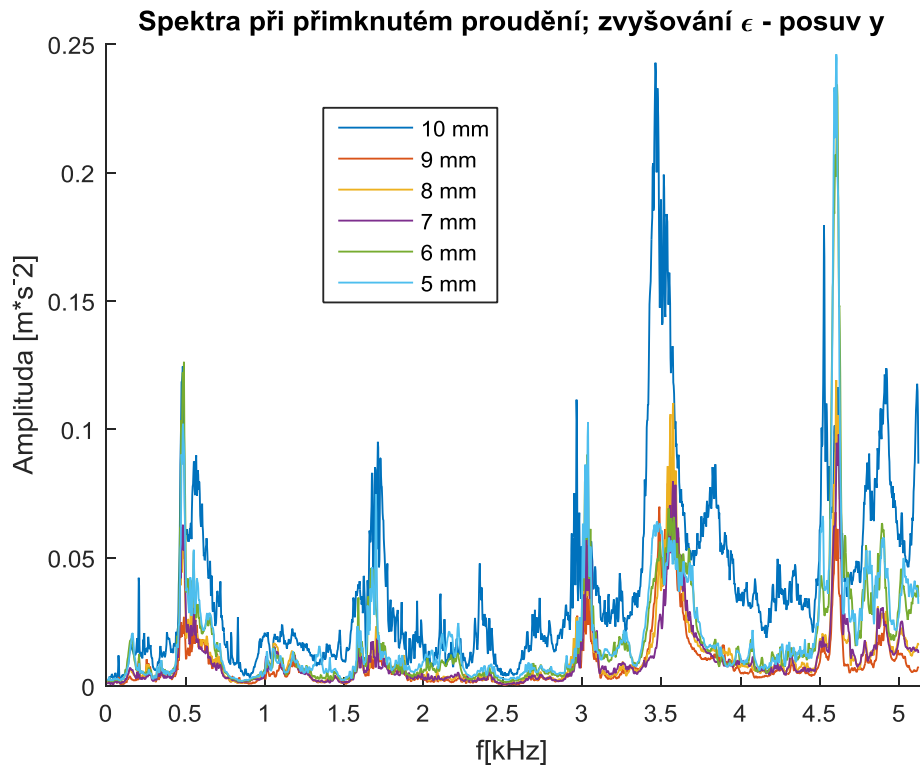
3.9.2 Měření na vřetenu ventilu



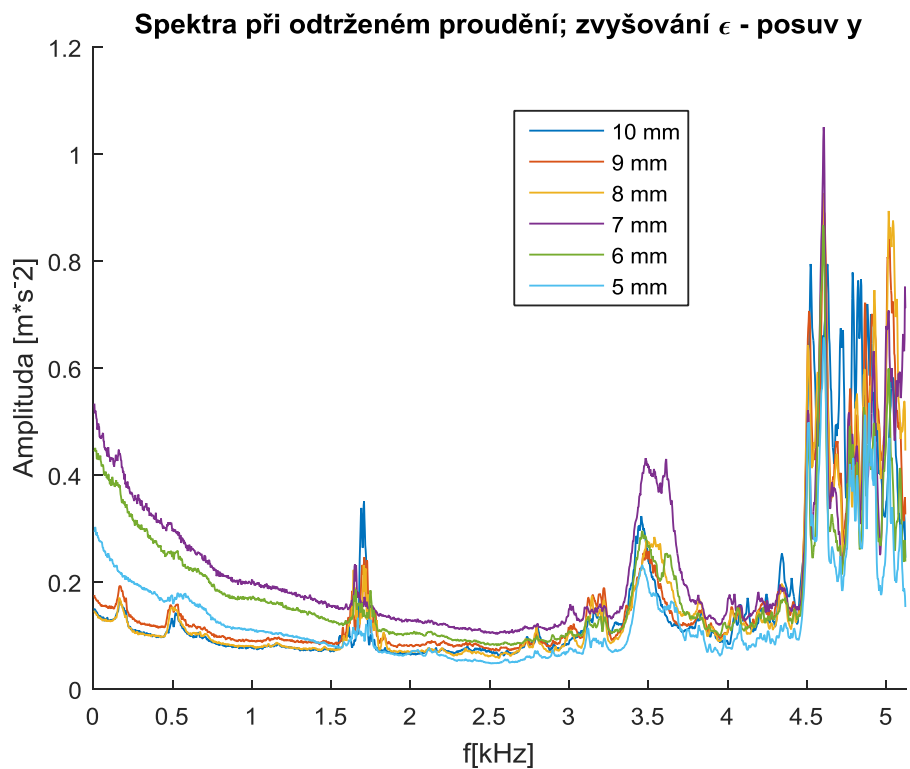
obr. 48 - Měření vřetene ventilu (osa x), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ



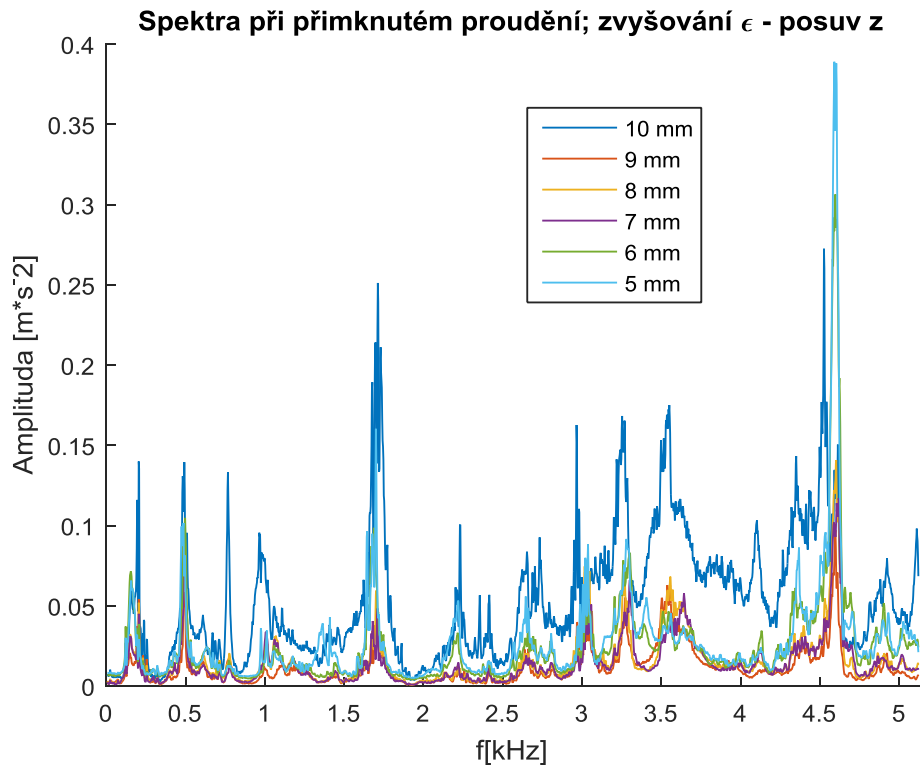
obr. 49 - Měření vřetene ventilu (osa x), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ



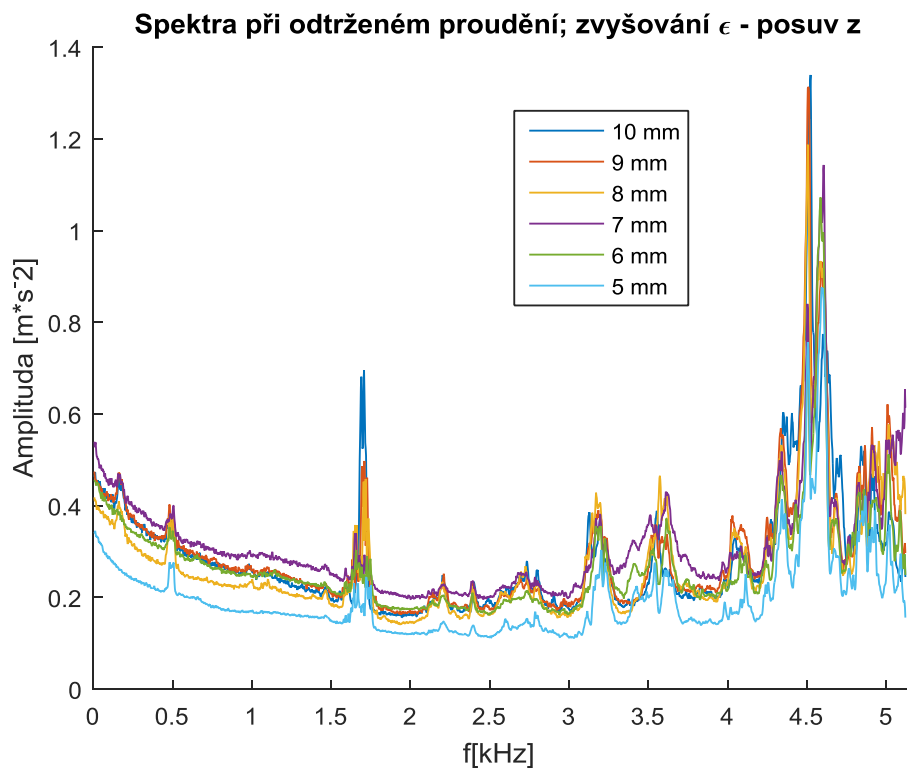
obr. 50 - Měření vřetene ventilu (osa y), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ



obr. 51 - Měření vřetene ventilu (osa y), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ

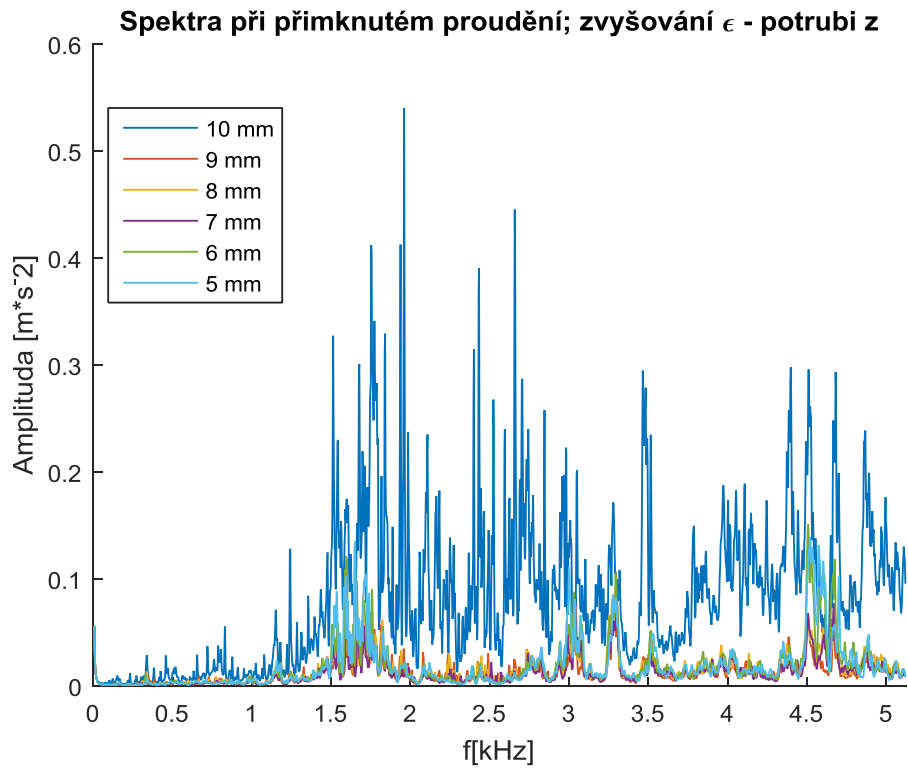


obr. 52 - Měření vřetene ventilu (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ

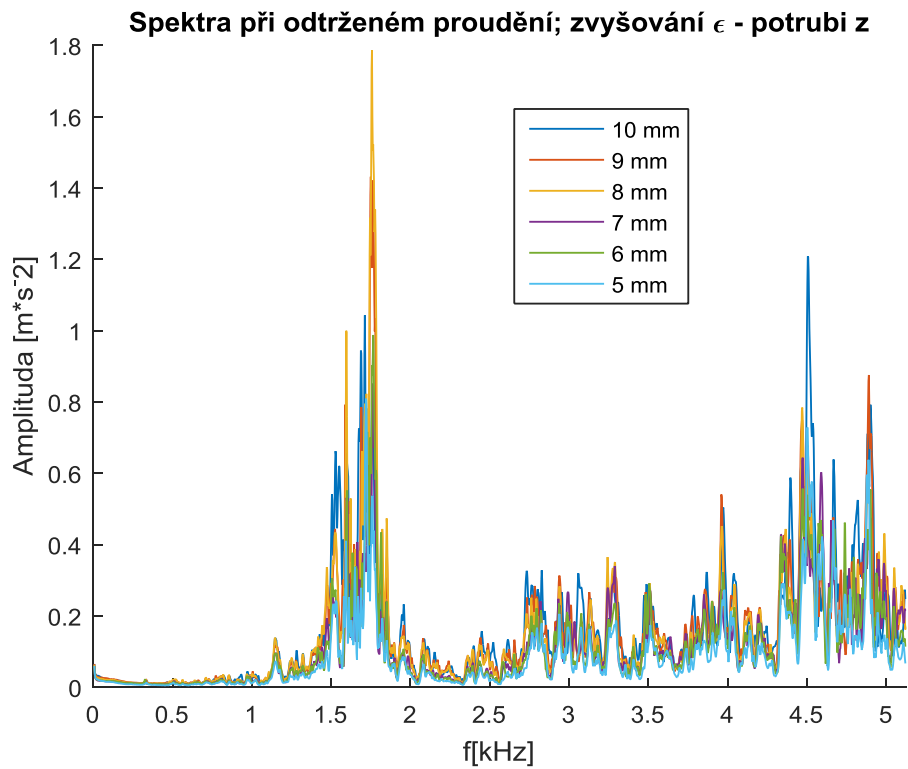


obr. 53 - Měření vřetene ventilu (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ

3.9.3 Měření na přívodním potrubí



obr. 54 - Měření na potrubí (osa z), malé otevření, přimknutý proud, zvyšování ϵ



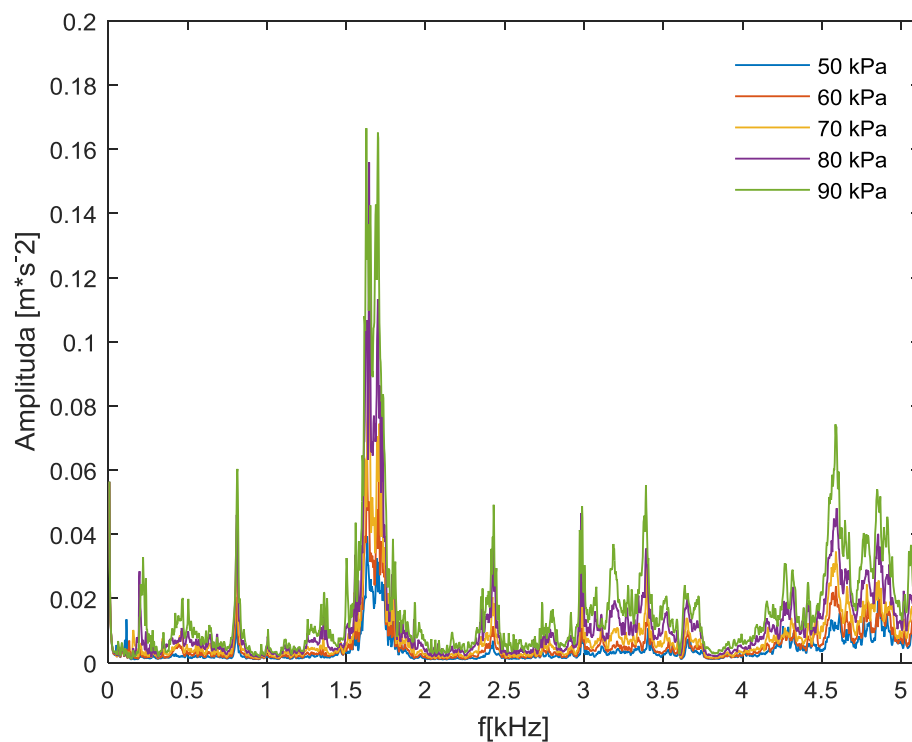
obr. 55 - Měření na potrubí (osa z), malé otevření, odtržený proud, zvyšování ϵ

Z výsledků experimentu nelze jednoznačně zjistit, zdali s rostoucím otevřením ventilu rostou i vibrace vřetena/kuželky a ventilu. Je však patrné, že charakter proudění páry má na hladinu vibrační ventilu zásadní vliv – v případě, že došlo k utržení proudu od stěn difuzoru, došlo také k nárůstu vibrací na všech měřených místech na v průměru 3-5 násobek původní hladiny v celém spektru.

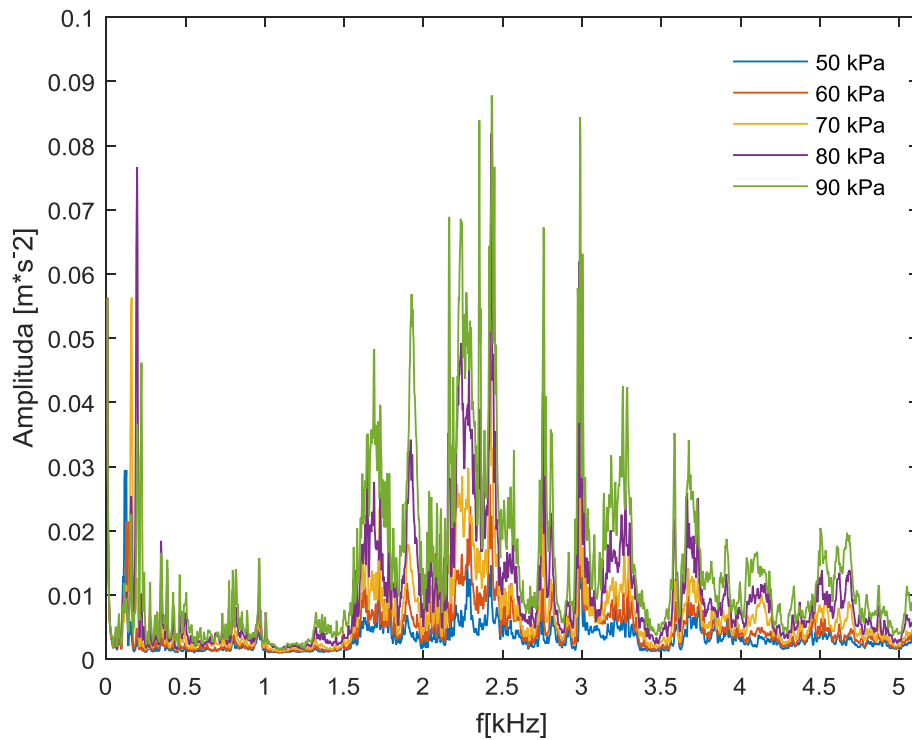
3.10 Analýza chování při plném otevření ventilu

Chování ventilu při plném otevření je jedním z nejdůležitějších provozních stavů – jedná se totiž o stav, ve kterém bude ventil po většinu své životnosti provozován. Cílem je tedy odhalit nebezpečné samobuzené rezonance. Následující grafy zobrazují amplitudy vibrační naměřené na statoru ventilu. Naměřeno bylo několik průběhů s rozdílnými vstupními tlaky do turbíny. Měření probíhalo tak, že se měřil vždy krátký časový úsek (30-40 s) s konstantním tlakem. Následně došlo ke změně tlaku. Poté co se tlak ustálil, se naměřil další průběh.

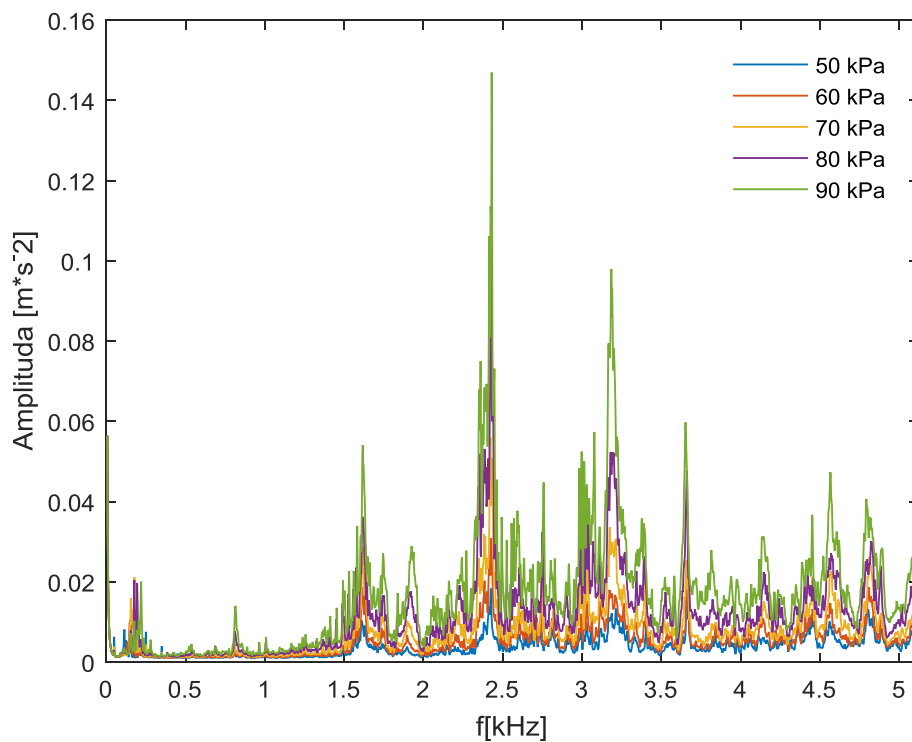
3.10.1 Měření na statoru ventilu



obr. 56 - Měření na statoru ventilu (osa x) při plném otevření



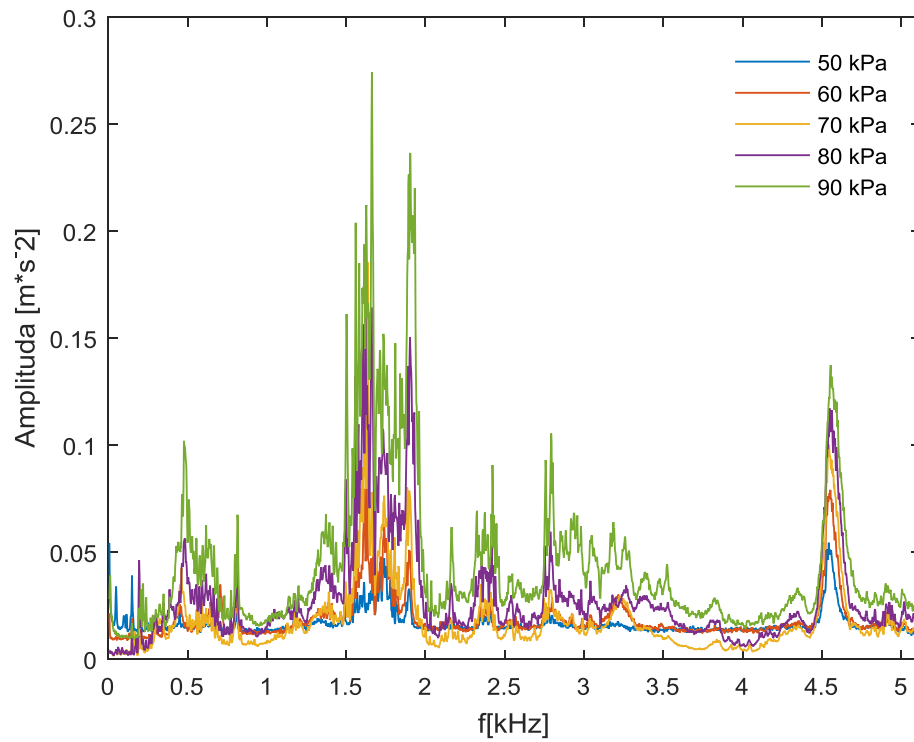
obr. 57 - Měření na statoru ventilu (osa y) při plném otevření



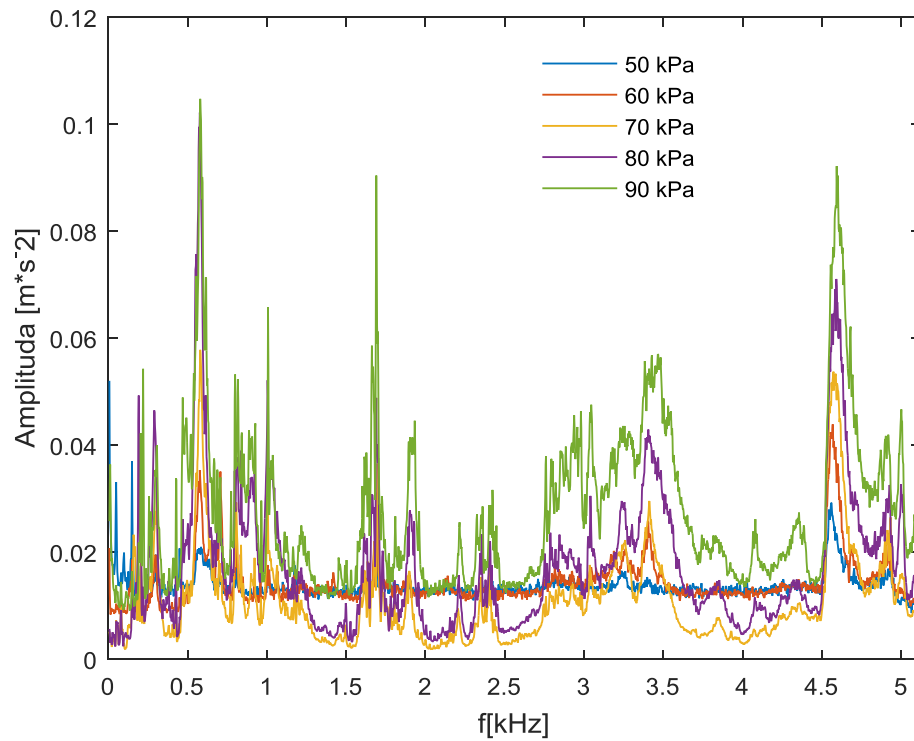
obr. 58 - Měření na statoru ventilu (osa z) při plném otevření

Z grafů je vidět, že úroveň vibrací je závislá na tlaku páry – vyšší tlak odpovídá vyšším vibracím v celém spektru. Nejvýraznější vibrace jsou zjištěny ve směru osy vřetena/kuželky ventilu – osa x.

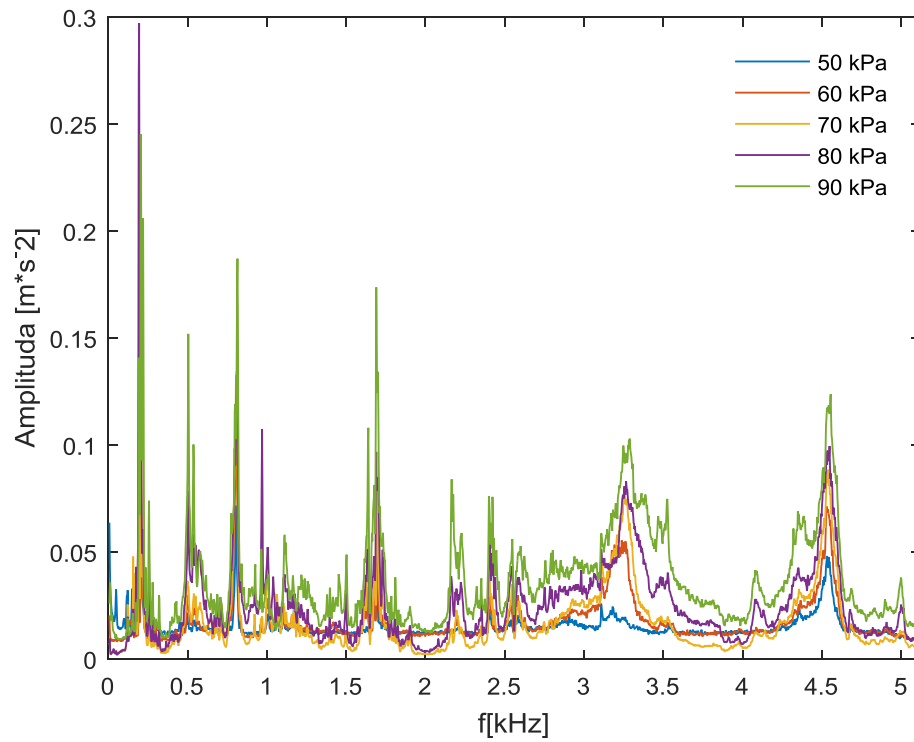
3.10.2 Měření na vřetenu ventilu



obr. 59 - Měření na vřetenu ventilu (osa x) při plném otevření



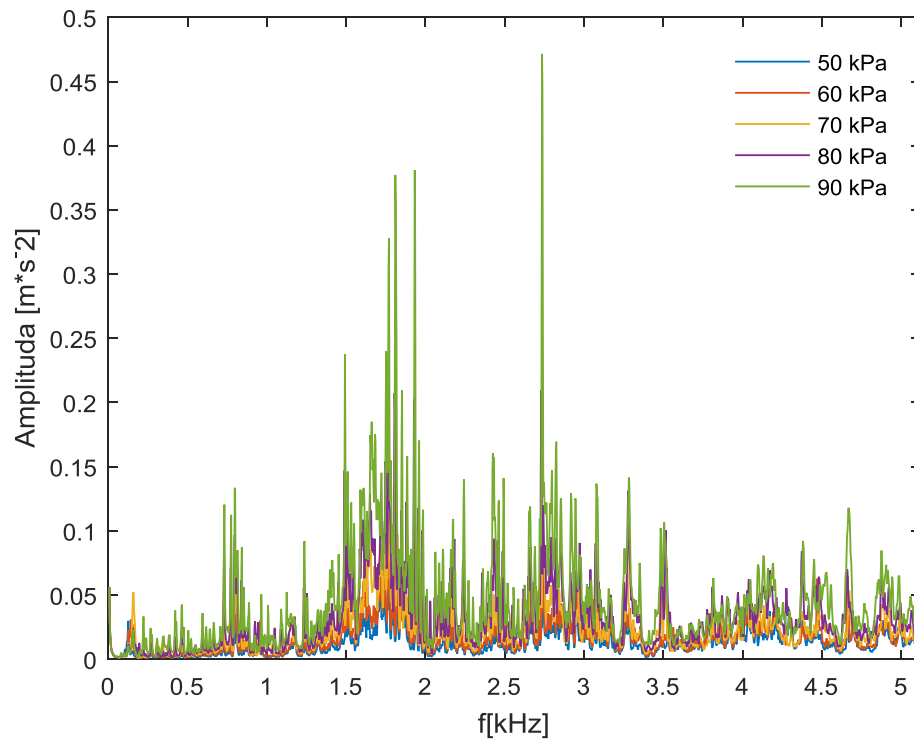
obr. 60 - Měření na vřetenu ventilu (osa y) při plném otevření



obr. 61 - Měření na vřetenu ventilu (osa z) při plném otevření

Z obr. 59 je také možno pozorovat závislost vibrací vřetena na úrovni tlaku páry. Nejvýraznější pásmo vibrací 1,5-2 kHz a 4,5 kHz je přítomno jak při měření na statoru tak na vřetenu ventilu.

3.10.3 Měření na přívodním potrubí



obr. 62 - Měření na přívodním potrubí (osa z) při plném otevření

V měření na potrubí (obr. 62) se také vyskytlo několik pásem nacházejících se i na vřetenu ovšem osy vibrací jsou o 90° posunuty.

4 Závěr

Experimenty bylo zjištěno, že v nominálním stavu testovaný ventil obsahuje rezonance v několika frekvenčních pásmech – nejvýraznější se nachází mezi 1,5 – 2 kHz, 3 – 3,5 kHz a 4,5 – 5 kHz. Tyto rezonance lze pozorovat prakticky na všech měřených místech. Jedná se o vibrace buzené proudem páry. V nominálním stavu dochází k maximální úrovni vibrací ve směru osy x, tedy osy vřetena a pohybu kuželky a ve směru osy z – v kolmém směru k osám potrubí bez ohledu na měřené místo. Maximální amplituda vřetena (v ose x) $0,2744 \text{ m/s}^2$ na frekvenci 1663 Hz při 90 kPa a v ose z $0,2971 \text{ m/s}^2$ na frekvenci 195 Hz při vstupním tlaku turbíny 80 kPa. Výsledky měření při nízkých otevřeních ukazují, že v určitém rozsahu tlakových poměrů dochází k odtržení mezní vrstvy proudící páry od stěny difuzoru, což se projevuje skokovou změnou amplitudy vibrací. Nejvíce ve zmíněných osách x, z – ve směru osy x vlivem zpětných proudů v difuzoru, ve směru osy z vlivem kolmých složek sil zpětných proudů a také absencí tlumících prvku – zavěšení ventilu, vedení potrubí. Měření při otevřeních nižších než 5 mm nebylo z provozních důvodů provedeno – stabilita chodu turbíny by byla ohrožena, tudíž by došlo k zásahu řídicího systému a turbína by byla odstavena, což by mělo za následek zastavení průtoku páry ventilem a nemožnosti měření.

Nejlépeším způsobem analýzy vibrací ventilu se jeví systematické měření při různých otevřeních ventilu a kontinuálních změnách tlakového poměru ϵ . Tímto postupem lze vytvořit přehlednou tabulku kde je možno pozorovat změny úrovně vibrací. V tab. 2 a tab. 3 jsou znázorněny změny středních hodnot a směrodatných odchylek vibrací v těsné blízkosti události – odtržení/přimknutí mezní vrstvy ke stěně difuzoru. Uvedeny jsou tabulky ze dvou měřených míst – vibrace měřené na statoru a vřetenu ventilu v hlavním směru pohybu kuželky ventilu (osa x).

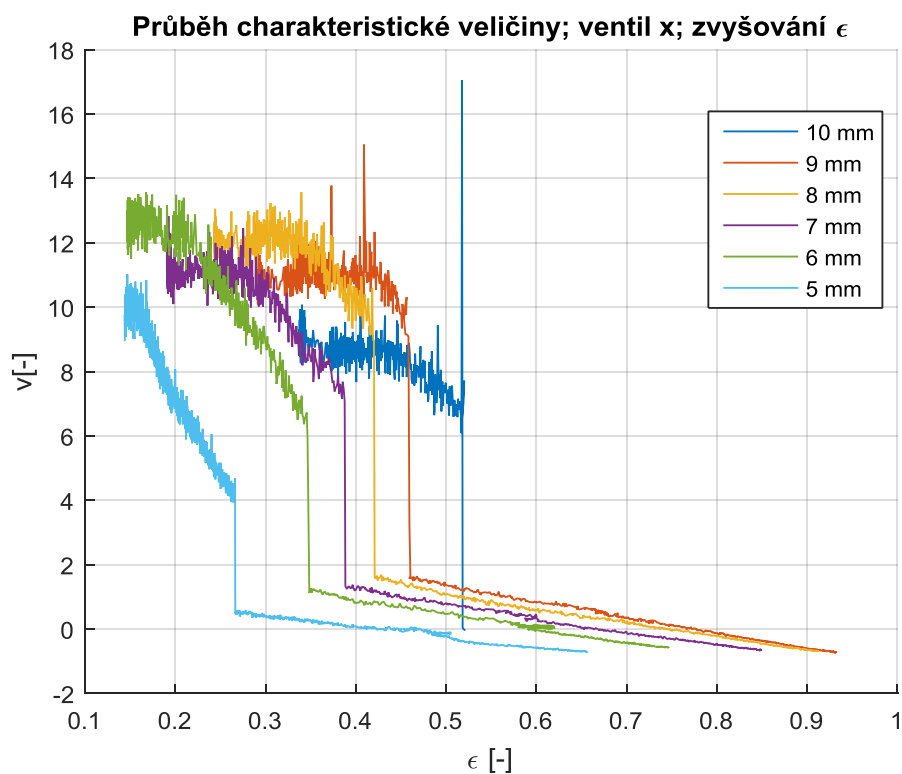
ϵ [-]	Otevření [mm]	před [m/s ²]	σ před [m/s ²]	po [m/s ²]	σ po [m/s ²]	max. [m/s ²]	σ max. [m/s ²]	rozdíl [m/s ²]	poměr [-]	rozdíl σ [m/s ²]	Poměr σ [-]
↓	10	10,40	7,73	47,05	36,10	53,94	40,94	36,65	4,52	28,37	4,67
	9	12,14	9,17	52,00	39,87	53,47	40,84	39,86	4,28	30,70	4,35
	8	12,78	9,68	48,24	37,28	54,02	40,95	35,46	3,78	27,60	3,85
	7	13,13	9,96	39,07	29,36	45,44	34,43	25,94	2,98	19,40	2,95
	6	11,15	8,46	28,17	21,15	38,88	29,45	17,02	2,53	12,69	2,50
	5	8,41	6,37	20,63	15,70	35,33	26,88	12,21	2,45	9,33	2,46
↑	10	26,26	19,90	9,17	6,92	54,07	41,44	17,09	0,35	12,98	0,35
	9	9,86	7,52	3,64	2,76	61,92	47,17	6,23	0,37	4,75	0,37
	8	13,15	10,04	6,19	4,70	56,56	43,01	6,96	0,47	5,34	0,47
	7	16,33	12,31	7,90	5,95	53,10	39,72	8,43	0,48	6,36	0,48
	6	20,45	15,56	9,66	7,36	45,14	34,34	10,79	0,47	8,20	0,47
	5	13,41	10,39	7,38	5,56	36,07	27,74	6,04	0,55	4,84	0,53

tab. 2 - Střední hodnoty amplitud vibrací - stator (osa x)

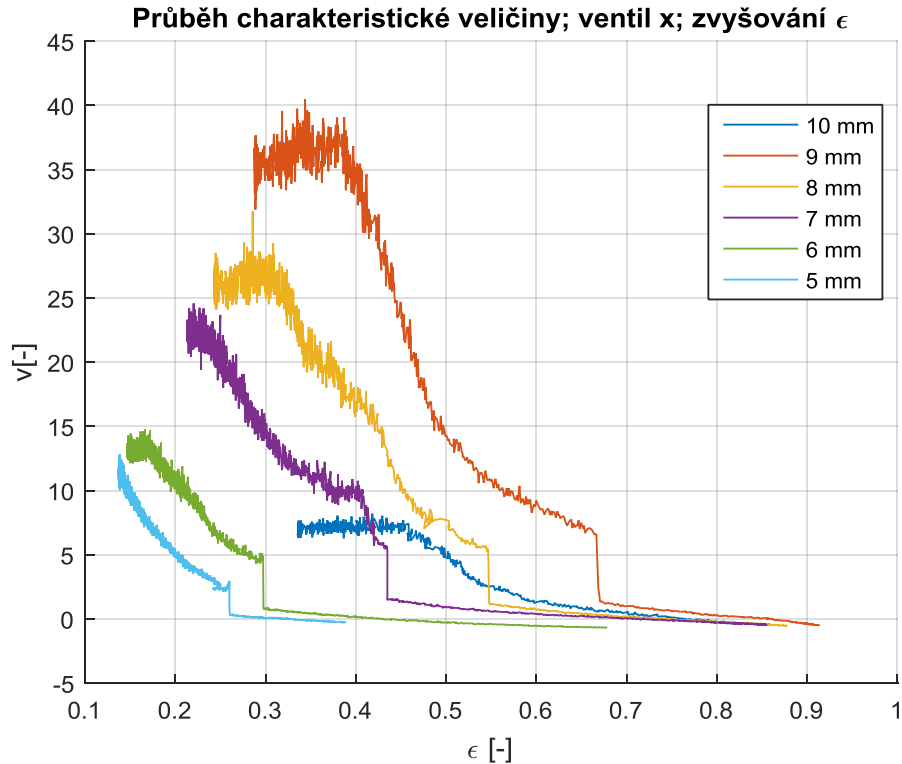
ϵ [-]	Otevření [mm]	před [m/s ²]	σ před [m/s ²]	po [m/s ²]	σ po [m/s ²]	max. [m/s ²]	σ max. [m/s ²]	rozdíl [m/s ²]	poměr [-]	rozdíl σ [m/s ²]	Poměr σ [-]
↓	10	16,59	18,96	26,22	21,12	33,90	28,72	9,63	1,58	2,16	1,11
	9	10,58	8,22	44,14	35,88	37,51	30,81	33,56	4,17	27,66	4,37
	8	11,04	8,30	41,88	33,70	37,98	30,73	30,84	3,79	25,40	4,06
	7	8,71	6,55	42,33	34,14	39,59	32,34	33,62	4,86	27,58	5,21
	6	7,10	5,38	36,59	29,38	36,67	29,76	29,50	5,16	24,00	5,46
	5	6,13	4,64	25,09	20,56	28,58	23,83	18,96	4,09	15,92	4,43
↑	10	16,42	12,99	9,13	6,96	35,09	29,64	7,29	0,56	6,03	0,54
	9	8,58	6,50	3,10	2,34	36,73	31,10	5,48	0,36	4,15	0,36
	8	9,39	7,16	4,35	3,32	36,73	29,95	5,04	0,46	3,83	0,46
	7	11,63	9,00	5,11	3,82	43,77	36,01	6,52	0,44	5,18	0,42
	6	23,28	19,34	5,89	4,48	35,03	28,92	17,39	0,25	14,86	0,23
	5	14,36	12,14	4,97	3,70	25,01	20,98	9,39	0,35	8,45	0,30

tab. 3 - Střední hodnoty amplitud vibrací - včetně (osa x)

Pro lepší znázornění lze v obr. 63 a obr. 64 pozorovat souhrnné zobrazení změny charakteristické veličiny v závislosti na změně tlakového poměru ϵ pro všechna otevření ventilu. Zobrazeno pro měření vibrací na statoru ventilu se směru osy x.



obr. 63 - Závislost charakteristické veličiny na ϵ ; snižování ϵ



obr. 64 - Závislost charakteristické veličiny na ϵ ; zvyšování ϵ

I když podle práce [12] nebylo pomocí CDF simulace potvrzeno odtržení mezní vrstvy od stěny difuzoru, výsledky experimentu však dokazují, že v nízkých otevřeních tj. od 5 do 10 mm, k odtržení dochází. Chyba mohla vzniknout vlivem zanedbání proudění média přes obtokový ventil.

Měřením na hydraulickém válci se neprokázalo, že pohon ventilu by způsoboval vysokofrekvenční vibrace ventilu. Tyto vibrace jsou způsobeny aerodynamickými silami proudící páry.

Jediným omezením tedy na přípustné vibrace jsou konstrukční omezení – dostatečné dimenzování jednotlivých částí (odolnost vůči praskání a únavovým lomům) a omezení na celkovou hlučnost. Vzhledem k faktu, že se jedná o zmenšený model ventilu, je možné při provozu v plném měřítku, jak v oblasti rozměrů tak vstupních tlaků, by vibrace vzniklé odtržením mezní vrstvy mohly působit extrémní namáhání vedoucí k poškození ventilu. Pro potlačení vlivu odtržení mezní vrstvy se na základě výzkumu [13] jako vhodné řešení jeví použití dusiče.

Na základě naměřených dat by bylo možné pomocí metody charakteristické veličiny vytvořit automatický systém, který by v reálném čase informoval o charakteru proudění páry ventilem.

Citovaná literatura

- [1] C. B. Domnick, F. K. Benra, D. Brillert, H. J. Dohmen a C. Musch, „IMPROVING THE DESIGN OF STEAM TURBINE INLET VALVES BY NUMERICAL“.
- [2] R. Pašek, „Dynamické chování ventilu - MEI s odlehčením 16x6“.
- [3] M. Miczan, „Steam control valve in experimental laboratory in Skoda Power,“ Plzeň, 2014.
- [4] „4527 - Triax accelerometer, high temp, 10 mV/g, side conn, hermetic, M3 tapped hole, excl. cable,“ [Online]. Available: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4527>. [Přístup získán 11 květen 2016].
- [5] „4524 - Triaxial CCLD piezoelectric accelerometer,“ [Online]. Available: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4524>. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [6] „Katalogový list snímače CA 901,“ Meggitt, [Online]. Available: http://www.vibro-meter.com/pdf/energy/DS_CA901-e-Aug08.pdf. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [7] „Katalogový list signálového převodníku IPC 704,“ Meggitt, [Online]. Available: http://www.vibro-meter.com/pdf/DS_IPC704-e-Jun06.pdf. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [8] „Katalogový list NI cDAQ 9184,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-427>. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [9] „Katalogový list NI 9234,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-316>. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [10] „Katalogový list NI 9229,“ [Online]. Available: <http://www.ni.com/datasheet/pdf/en/ds-199>. [Přístup získán 11 Květen 2016].
- [11] J. Liška, „Výukový materiál k předmětu ZSI“.
- [12] P. Turecký, „Rozbor tlakových ztrát v difuzoru regulačního ventilu,“ Praha, 2015.
- [13] L. Tajč, L. Bednář, R. Pašek, L. A. Feldberg a R. Matas, *Proudové a dynamické charakteristiky regulačních ventilů parních turbín*.