



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING

ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ

INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

**OPTIMALIZACE ULTRAZVUKOVÉHO DETEKTORU ÚNIKŮ
PNEUMATICKÉHO SYSTÉMU**

OPTIMIZATION OF ULTRASONIC LEAK DETECTOR OF PNEUMATIC SYSTEM

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE

AUTHOR

Ondřej Macků

VEDOUCÍ PRÁCE

SUPERVISOR

Ing. František Vlašic, Ph.D.

BRNO 2020

Zadání bakalářské práce

Ústav: Ústav konstruování
Student: **Ondřej Macků**
Studijní program: Strojírenství
Studijní obor: Základy strojního inženýrství
Vedoucí práce: **Ing. František Vlašic, Ph.D.**
Akademický rok: 2019/20

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma bakalářské práce:

Optimalizace ultrazvukového detektoru úniků pneumatického systému

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

V současné době není na trhu nabízeno ani v odborných publikacích popisováno mobilní diagnostické a testovací zařízení pro vyhledávání úniků vzduchu při kontrolní a servisní činnosti. Nový detektor by měl přispět ke zvýšení citlivosti detekce a mobility jednotky.

Typ práce: vývojová – konstrukční

Cíle bakalářské práce:

Hlavním cílem je modifikovat konstrukční návrh ultrazvukové sondy a porovnat různé typy nástavců z hlediska kvality detekovaného signálu.

Dílčí cíle bakalářské práce:

- porovnat chování navržených nástavců vůči provoznímu hluku (v hale),
- navrhnout detektor s max. citlivostí a směrovostí vůči úniku s využitím rapid prototyping metod,
- ověřit navržený detektor na sériích měření úniků vzduchu.

Požadované výstupy: průvodní zpráva, laboratorní protokol, digitální data.

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 – 20 stran textu bez obrázků).

Časový plán, struktura práce a šablona průvodní zprávy jsou závazné:

<http://ustavkonstruovani.cz/texty/bakalarske-studium-ukoncení/>

Seznam doporučené literatury:

MOORE, P. O., Nondestructive Testing Handbook - Acoustic Emission Testing, Vol. 6, ASNT, Third Edition, 2005.

NAZARCHUK, Z., SKALSKYI, V., et al., Acoustic Emission - Methodology and Application, Springer, Foundations of Engineering Mechanics, 2017.

SHULL, P. J., Nondestructive Evaluation - Theory, Techniques, and Applications, Marcel Dekker, Inc., New York Basel, 2002.

KREIDL, M., ŠMÍD, R., Technická diagnostika, Technická Literatura Ben, 2006.

KOPEC, B. a spol., Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí, ČNDT, Akademické nakladatelství CERM, s.r.o, 2008.

Termín odevzdání bakalářské práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2019/20

V Brně, dne

L. S.

prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.
ředitel ústavu

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

ABSTRAKT

Tato práce se zabývá návrhem a optimalizací vyměnitelných modulů pro lokalizaci vzduchem šířeného ultrazvuku v rámci konstrukčního návrhu ultrazvukové sondy. Využitím technologie rapid prototyping bylo vyrobeno několik sérií těchto modulů, které byly následně testovány na uměle vytvořeném zdroji úniku. Na základě těchto verifikačních experimentů byly vybrány a upraveny dva typy, které pokrývají široké použití při identifikaci úniků v pneumatickém systému, tj. modul pro dlouhý dosah pro přesnější a rozšířený dosah detekce úniku a fokusační nástavec pro zúžení přijímaného pásma skenovacího modulu a eliminaci okolního ultrazvuku.

Součástí práce je také analýza akustického signálu zpracovaného na moderních analyzátorech akustické emise, které umožňují kromě záznamu standardních parametrů také kontinuální vzorkování až do 10 MHz a dále konstrukční řešení uchycení přídatných modulů na detektor. Práce je tak přínosná z hlediska rozšíření povědomí o problematice měření úniků, výroby prototypů za použití 3D tisku a vytvoření návrhu a hotových modulů.

KLÍČOVÁ SLOVA

měření, únik, stlačený vzduch, pneumatický systém, akustická emise

ABSTRACT

The thesis deals with design and optimization of exchangeable modules for localization of air distributable ultrasound in concept of ultrasound probe design. Several series of these modules were manufactured using the technology of rapid prototyping and tested on artificially created source of air leak. Based on these verification experiments two types covering wide use for identification of pneumatic systems leaks were selected and modified. These two types are long range module for more accurate and expended reach of the leak detection and focusing attachment for narrowing the received range of scanning module and elimination of surrounding ultrasound. Part of the thesis is also analysis of the acoustic signal processed by modern acoustic emission analysers which allow besides standard parameters recording also continuous sampling up to 10 MHz and design solution for attachment of add-on modules to the detector. The thesis is beneficial for raising awareness of leak measurements, prototype manufacturing by using the 3D printing and designing and manufacturing of modules.

KEYWORDS

measurement, leak, compressed air, acoustic emission

BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

MACKŮ, Ondřej. *Optimalizace ultrazvukového detektoru úniků pneumatického systému*. Brno, 2020. Dostupné také z: <https://www.vutbr.cz/studenti/zav-prace/detail/124863>. Bakalářská práce. Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, Ústav konstruování. Vedoucí práce František Vlašic.

PODĚKOVÁNÍ

Děkuji svému vedoucímu Ing. Františku Vlašicovi, Ph.D. za cenné rady a připomínky při tvorbě bakalářské práce. Také děkuji své rodině a známým za podporu po celou dobu studia.

PROHLÁŠENÍ AUTORA O PŮVODNOSTI PRÁCE

Prohlašuji, že diplomovou práci jsem vypracoval samostatně, pod odborným vedením Ing. Františka Vlašice, Ph.D. Současně prohlašuji, že všechny zdroje obrazových a textových informací, ze kterých jsem čerpal, jsou řádně citovány v seznamu použitých zdrojů.

.....

Podpis autora

OBSAH

1	ÚVOD	13
2	PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ	14
2.1	Určení nejvyšší dovolené netěsnosti	14
2.2	Určení ztráty stlačeného vzduchu na vzdušníku	15
2.3	Měření průtoků	16
2.4	Hledání netěsností - úniků	17
2.4.1	Kde očekávat výskyt netěsností	17
2.5	Proudění plynu netěsností	18
2.6	Metody hledání netěsností	20
2.6.1	Metody bublinkové	20
2.6.2	Měření změn tlaku	23
2.6.3	Metody měření a hledání netěsností za pomoci zkušebního plynu	26
2.6.4	Metoda využití generovaného ultrazvuku	27
2.6.5	Vibro-akustická metoda	28
2.6.6	Metoda akustické emise	29
3	ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE	31
3.1	Analýza problému	31
3.2	Cíle práce	32
4	MATERIÁL A METODY	33
4.1.1	Systém DAKEL ZEDO	33
4.1.2	Analýzátor DAKEL-BAT3	34
4.1.3	3D tiskárna Ultimaker 3	34
4.1.4	Měřicí sonda	35
4.2	Vybraný materiál	35
4.3	Příprava experimentu	36
4.4	Návrh modulů	38
4.4.1	Uchycení tělesa modulu na měřicí sondu	39
4.5	Postup experimentu	41
4.5.1	Intervalové měření v krátkých vzdálenostech	41
4.5.2	Spojité měření ve velkých vzdálenostech	41
4.5.3	Spojité měření ve velkých vzdálenostech s vyosením úniku	41

5	VÝSLEDKY	42
6	DISKUZE	49
7	ZÁVĚR	50
8	CITACE	51
9	SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN	52

1 ÚVOD

S pneumatickými soustavami se dnes setkáváme téměř každý den. Ať už jde o systém otevírání dveří v autobusu nebo například rozvod stlačeného vzduchu po výrobní hale, jedno mají všechny tyto aplikace společné. Úniky. I v případě nejpokročilejších prvků se s nimi setkáme. Běžně se tyto úniky pohybují kolem 10 až 25 %[2]. To pro nás může představovat rozdíly v řádu stovek tisíc korun. Vzduch jako takový nás totiž sice nic nestojí, ale náklady na jeho stlačení a skladování jsou nezanedbatelné. Proto se v praxi snažíme co nejvíce přiblížit právě k 10 %. Toho lze docílit tím, že jsme schopni tyto úniky změřit a poté je i lokalizovat.

Některé úniky lze slyšet lidským sluchem, některé lze snadno lokalizovat přiložením dlaně. Takto lze ale nalézt jen velké úniky a to pouze v bezprostřední blízkosti od nich. Můžeme tak tedy lokalizovat únik například na hadičce vedoucí do nějakého stroje, hůře se už bude hledat únik na pneumatickém vedení umístěném pod stropní římsou haly. V případě, že přítomnost úniku chceme zjišťovat pouze lidským sluchem, je velmi důležitým faktorem, že v okolí se nesmí nacházet žádné zdroje ultrazvuku, které by byly silnější než únik. Takto nelze hledat úniky ani v případě, že systémem proudí médium, které je zdraví škodlivé. V takovém případě by hrozilo ohrožení zdraví technika, provádějícího kontrolu.

Tato práce obsahuje přehled metod pro zjišťování množství uniklého vzduchu, a i následného hledání dílčích úniků. V současné době totiž existuje řada metod založených na různých fyzikálních principech, které se liší jak možným použitím, tak náklady na provoz.

2 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

Ve snaze snížit co nejvíce počet úniků je zapotřebí provést několik kroků. Prvním krokem bývá stanovení nejvyšší dovolené netěsnosti. Poté musíme zjistit, kolik vzduchu nám ze soustavy uniká. Pokud tato hodnota bude vyšší než námi zvolená nejvyšší dovolená netěsnost, musíme začít tyto ztráty řešit. Snížit ztráty můžeme několika způsoby. Nejjednodušší je snížit tlak v celé soustavě. Tím se nám sníží ztráty, jelikož díky sníženému tlaku bude ze soustavy unikat méně vzduchu. Stává se totiž, že je soustava pod zbytečně velkým tlakem [2]. Pokud už další snížení tlaku není z provozních důvodů možné, tak je zapotřebí najít místa zdrojů úniků a postupně je začít řešit. Tato práce se bude zabývat hledáním a posuzováním úniků. To se provádí v několika krocích, z nichž první je zjištění, kolik vzduchu nám ze soustavy uniká.

2.1 Určení nejvyšší dovolené netěsnosti

Určení maximální možné netěsnosti je obtížný úkol. Musíme totiž vzít v úvahu řadu skutečností. Jedna z nejdůležitějších je, že při měření vzniká poměrně velká chyba [2]. S tím souvisí také to, že se nám nikdy nepodaří nalézt všechny netěsnosti. Z toho důvodu musí mít nejvyšší dovolená netěsnost rezervu. Zároveň čím nižší bude, tím vyšší budou náklady na čas a techniku. Také bude nutnost častějších oprav a sníží se i životnost jednotlivých komponentů. V neposlední řadě bude také nutné upravit odpovídajícím způsobem jednotlivé díly, což povede ke zvýšení jejich výrobní ceny.

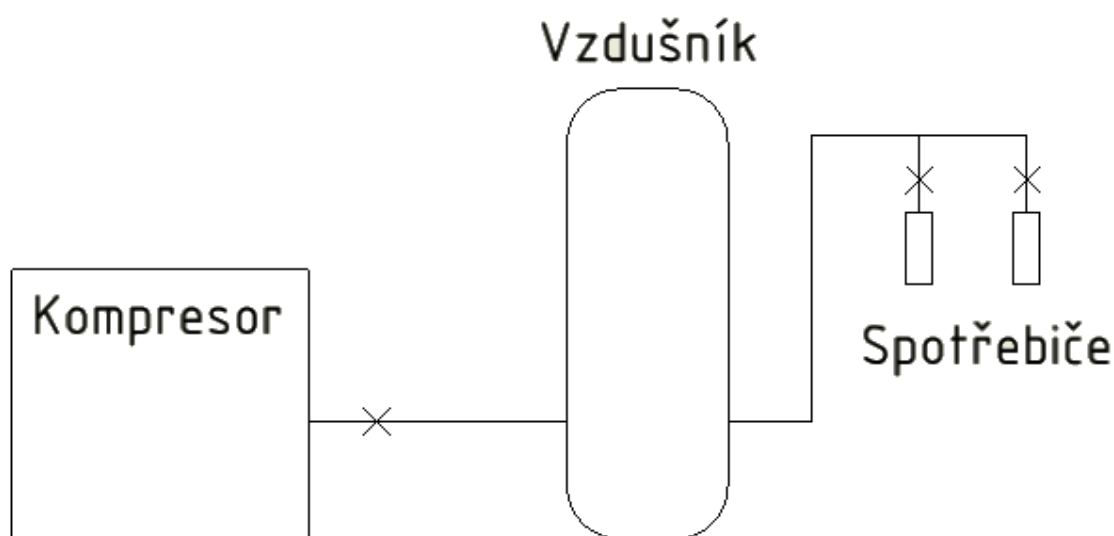
2.2 Určení ztráty stlačeného vzduchu na vzdušníku

Určení celkové ztráty stlačeného vzduchu lze nejjednodušeji určit z poklesu tlaku ve vzdušníku [2]. Tato metoda spočívá v natlakování vzdušníku a následném odpojení všech spotřebičů i kompresorů. Poté už jen sledujeme pokles tlaku v čase.

Výpočet lze zapsat vzorcem (1)

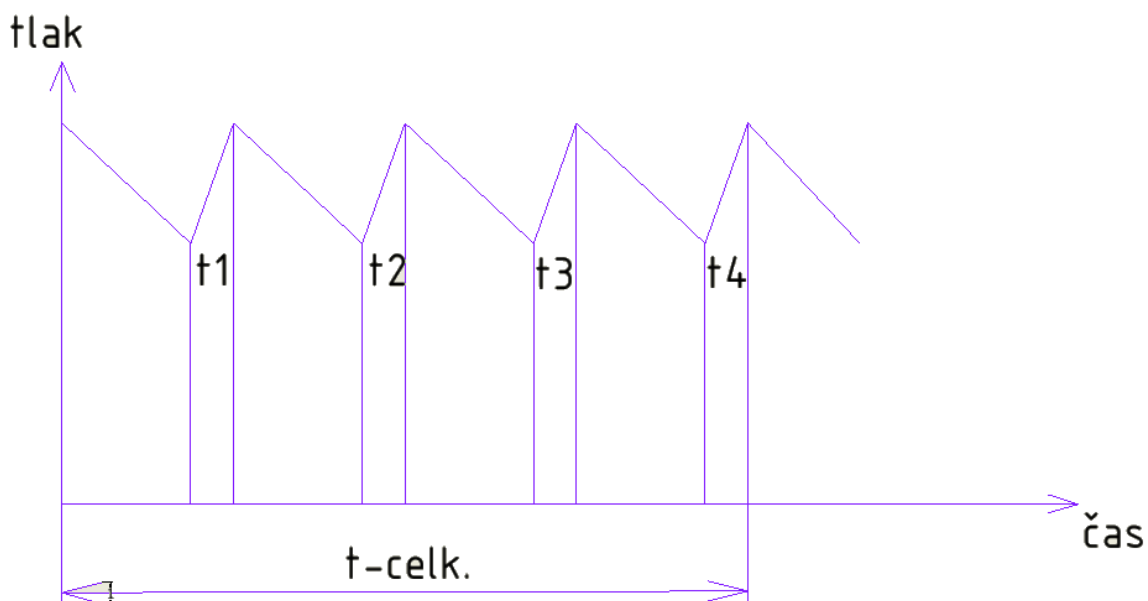
$$Q = \frac{V * (p_1 - p_2)}{t} \quad (1)$$

Kde Q je celková velikost ztrát, p_1 je počáteční tlak ve vzdušníku a p_2 je tlak ve vzdušníku na konci měření v čase t.



Obr. 2-1 Schéma zapojení pro měření celkových ztrát

Druhá, taktéž jednoduchá metoda, spočívá ve sledování pracovních cyklů kompresoru při odpojených spotřebičích. [2] Lze ji použít pouze v případě, že soustavu pohání kompresor s pevnými otáčkami. Stejně jako v předchozím případě je důležité vypnutí všech spotřebičů, aby se stlačený vzduch spotřebovával pouze vlivem úniků. Po poklesu tlaku ve vzdušníku se kompresor zapne, aby vyrovnal ztráty způsobené úniky, a poté se zase vypne. Tento cyklus se opakuje.



Obr. 2-2 Závislost tlaku na čase při měření pracovních cyklů kompresoru

Celkové ztráty se poté určí ze vztahu (2)

$$Q = \frac{Q_k * (t_1 + t_2 + \dots + t_x)}{t_{celk}} \quad (2)$$

Kde Q jsou opět celkové ztráty, Q_k je množství stlačeného vzduchu dodávané kompresorem, t_1 až t_x jsou doby provozu kompresoru a t_{celk} je celková doba měření.

2.3 Měření průtoků

Z porovnání průtoků v různých místech sestavy zjistíme, kolik vzduchu nám v jednotlivých částech uniklo. Zároveň tím také můžeme zjistit výkon kompresorů. Existuje však několik druhů průtoků [3].

Jsou to

- Rychlostní průtok (m/s) - jde o střední rychlost proudění měřeného média
 - Hmotnostní průtok (kg/s) – jde o hmotnost vzduchu, která proteče potrubím za jednotku času
 - Objemový průtok (m³/h) – jde o objem tekutiny, který proteče potrubím za jednotku času (určuje výkon kompresoru)
- [3]

Každý z těchto průtoků má jinou fyzikální charakteristiku, jednotku a měří se odlišnými typy průtokoměrů.

2.4 Hledání netěsností - úniků

Těsnost je odpor stěn a spojů z rozmanitých materiálů proti pronikání tekutin (plynů, par a kapalin) ze strany jejich větší koncentrace na stranu koncentrace menší [4]. Netěsnost je poté zhoršení této vlastnosti. Poloha netěsnosti je pro nás někdy informací primární, někdy však jen pomocnou. Zpravidla se netěsnosti hledají až když úniky překročí stanovenou mez. V oboru zkoušení těsnosti se obvykle neudává její přesná velikost, neboť chyba měření zde bývá poměrně vysoká. Proto se definuje, že netěsnost je větší nebo menší než určitá hodnota. Velikost úniku (netěsnosti) není definovaná geometrií úniku, nýbrž intenzitou průtoku. Je známo, že tekutina proudí skulinou, jejíž rozměr je alespoň 10x větší než průměr molekuly proudícího média [4]. Netěsnost jako taková se skládá z jedné nebo více komunikací s rozdílnými průřezy po jejich délce. Složitým experimentálně početním postupem lze zjistit střední průměr a počet komunikací. Ten se pohybuje v řádu miliónů [4]. Přesnou geometrii úniku však nelze zjistit žádnými metodami, neboť jeho rozměry jsou příliš malé. Přitom průměr komunikace zásadně určuje, jaký druh proudění v ní nastává.

2.4.1 Kde očekávat výskyt netěsností

Existuje řada míst, kde lze netěsnosti očekávat a kde se také dají dobře lokalizovat. Velké množství netěsností se vyskytuje přímo na potrubí [4]. U plastových potrubí je to hlavně vlivem stárnutí nebo poškození otěrem, u kovových potom vlivem koroze. Mnoho netěsností vzniká také v místech spojů jednotlivých trubek nebo trubek s různými armaturami [4]. Většinou to bývá v důsledku stárnutí těsnění nebo chybou při výrobě, popřípadě montáži.

Existuje ale také řada míst, kde netěsnosti lokalizovat nelze. Mezi ně patří například svar příruby navařené na trubku dvojicí svarů (vnitřní a vnější). Vnitřní svar je totiž při natlakování nepřístupný a vnější nelze vystavit tlaku, neboť je jeho kořen oddělen vnitřním svarem. Ve většině těchto případů je nemožné únik najít právě díky špatné přístupnosti. Proto, má-li být součást určena ke kontrole těsnosti, musí se to zohlednit už při její konstrukci.

2.5 Proudění plynu netěsností

Abychom vysvětlili toto téma, musíme netěsnost geometricky idealizovat do kapiláry kruhového průřezu o stejném průměru po celé délce. Plyn proudí touto kapilárou o průměru D a délce L z prostoru o větším tlaku p_1 do prostoru s menším tlakem p_2 . V závislosti na rozdílu těchto dvou tlaků a průměru D mohou v kapiláře nastat čtyři typy proudění. Jedná se o proudění turbulentní, viskózní (laminární), přechodové (Knudsenovo) a molekulární [4]. Je také možné, že se jednotlivé typy proudění budou po délce kapiláry měnit.

Pro vznik určitého typu proudění existuje několik řídících parametrů. Jedním z těchto parametrů je Reynoldsovo číslo [7]. Jedná se o bezrozměrné číslo charakterizující chování proudící kapaliny. Lze ho spočítat dle vztahu (3)

$$Re = \frac{\rho * D * v}{\eta} \quad (3)$$

Kde ρ je hustota proudící kapaliny o viskozitě η rychlostí v v kapilárou o průměru D .

Dalším z parametrů je střední volná dráha [6]. Jedná se o vzdálenost, kterou urazí daná molekula bez toho, aniž by se srazila s jinou molekulou. Uvažujeme zde ideální pohyb, při kterém je trajektorie rovnoběžná s osou kapiláry, tudíž molekula nenarazí na stěnu. Střední volná dráha je nepřímo úměrná počtu částic v jednotce objemu (tedy tlaku plynu) a zároveň není nijak závislá na teplotě.

Je-li Reynoldsovo číslo větší než 4000, jedná se turbulentní proudění. V rozmezí od 2300 do 4000 se nachází přechod mezi turbulentním a viskózním. Pod touto hranicí je tedy už proudění viskózní a to až do extrémních hodnot střední volné dráhy. Když bude střední volná dráha větší než délka trhliny L , vznikne v kapiláře proudění molekulární. Na hranici mezi prouděním viskózním a molekulárním pak vzniká proudění přechodové [7]. Při stejném rozdílu tlaku uniká při každém typu proudění jiné množství plynu. Nutno podotknout, že následující vzorce platí pouze pro vzduch při standartních podmínkách, tj. teplotě 0°C a tlaku 1013,25mbar.

Pro proudění turbulentní platí:

$$Q = \frac{134 * D}{p_1 - p_2} * \left(\frac{D^3 * (p_1^2 - p_2^2)}{2 * L} \right)^{\frac{4}{7}} * \frac{p_1 + p_2}{2} \quad (4)$$

Pro proudění viskózní platí:

$$Q = \frac{\pi}{128} * \frac{D^4}{L} * \frac{1}{\eta} * (p_1^2 - p_2^2) \quad (5)$$

Pro proudění přechodové platí:

$$Q = \left[\left(135 * \frac{p_1 + p_2}{2} * \frac{D^4}{L} \right) + 12,1 * \frac{D^3}{L} * \left(\frac{1 + 189 \frac{p_1 + p_2}{2} * D}{1 + 235 * \frac{p_1 + p_2}{2} * D} \right) \right] * (p_1 - p_2) \quad (6)$$

Pro proudění molekulární platí:

$$Q = 12,17 * \frac{D^3}{L} * (p_1 - p_2) \quad (7)$$

Kde D [cm] je průměr kapiláry, L [cm] je její délka, η [Pa * s] je dynamická viskozita proudící látky a p_1 a p_2 [Pa] jsou tlaky na začátku a konci kapiláry. Celkový průtok kapilárou q pak vychází v [mbar * l/s]

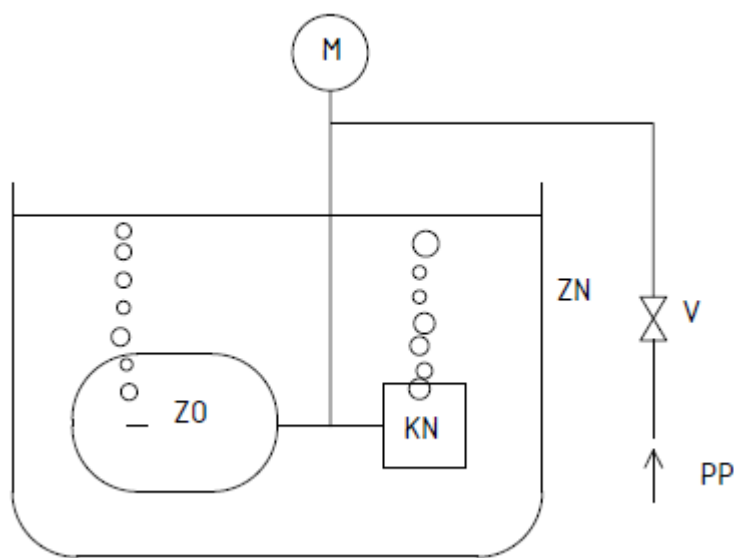
Když porovnáme jednotlivé vzorce pro proudění, zjistíme, že pro každý typ proudění je určující jiný parametr. Pro turbulentní proudění je určující rozdíl tlaků a hustota plynu. Vliv viskozity je zde zanedbatelný. Toto proudění se vyskytuje u větších netěsností, které lze nejlépe hledat ultrazvukovým snímačem [4]. Pro viskózní proudění je charakteristická čtvrtá mocnina průměru a druhá mocnina tlaku. Dynamická viskozita a délka zde mají vliv pouze lineární. Toto proudění je charakteristické pro středně velké netěsnosti a nejlepší způsob pro jejich hledání představuje bublinková metoda [4]. U molekulárního proudění nemá viskozita žádný vliv a tlak pouze lineární. Zato zde hraje důležitou roli teplota a molekulová hmotnost. Toto proudění se typicky vyskytuje u malých netěsností, které zkoušíme heliovými hledači [4]. Množství plynu proudícího netěsností Q se od turbulentního přes viskózní a přechodové až k molekulárnímu stále zmenšuje. Musíme však mít na paměti, že reálná netěsnost se výrazně liší od idealizované výpočtové a tedy se skládá z množiny komunikací různých průměrů a navíc s proměnnou geometrií po délce netěsnosti L .

2.6 Metody hledání netěsností

2.6.1 Metody bublinkové

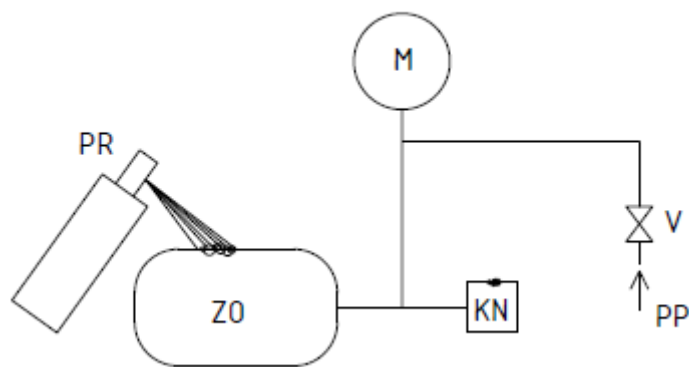
Základem těchto metod je zviditelnění plynu pronikající netěsností buď tím, že musí procházet kapalinou nebo filmem pěnivého roztoku. Tím se začnou tvořit bublinky, jejichž souvislý vývoj je důkazem existence netěsnosti. Tyto metody jako jedny z mála vyžadují vizuální kontrolu. Tomu musí tedy i odpovídat zrakové schopnosti zkušební technika. Některé varianty lze i automatizovat. Detekci bublinek je poté možno přenechat snímačům. Citlivost těchto metod se pohybuje od $0,1 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ do $1,0\text{E}-5 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ [4]. V laboratorních podmínkách se lze dostat až na hodnoty kolem $1,0\text{E}-7 \text{ Pa} \cdot \text{m}^3/\text{s}$ [4]. Citlivost zkoušení roste se zkušebním tlakem.

První provedení této metody se nazývá ponořovací. Zařízení pro tuto metodu se skládá z nádoby ZN se zkušební kapalinou, zdroje zkušebního plynu PP a kontrolní netěsnosti KN. Jako zkušební kapalina je zde nejčastěji používána demineralizovaná voda s přísadou prostředku pro zmenšení povrchového napětí a prostředku s protikorozními účinky. Zkušební nádoba je nejčastěji otevřená a pro menší díly i průhledná. Zdroj plynu má uzavírací ventil V a manometr M pro měření zkušebního tlaku. Zkušebním plynem většinou bývá čistý vysušený vzduch, ale lze také použít dusík nebo kterýkoliv jiný inertní plyn, jako například Helium či Argon. Nesmí se použít hořlavé a nebezpečné plyny. Pozitivním nálezem jsou všechna místa, kde došlo k trvalé tvorbě bublinek. U této metody lze určit přesně místo netěsnosti, avšak její velikost pouze přibližně, neboť rozsah této metody je v dílenském prostředí přes tři řády. V některých případech lze bublinky jímat a integrálně volumetricky měřit [4].



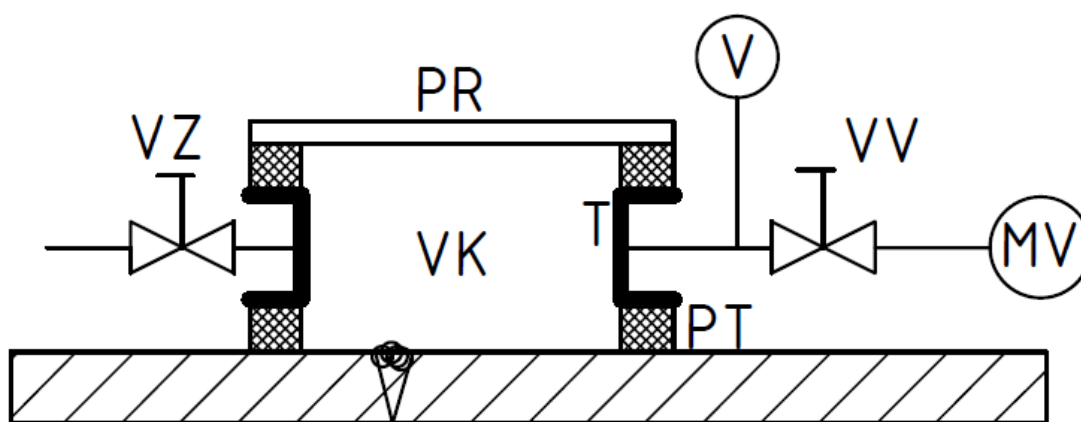
Obr. 3-3 Schéma ponořovací bublinkové metody

Druhé provedení se nazývá nanášecí. Pro tuto zkoušku je zapotřebí pouze zdroj tlakového plynu, kontrolní netěsnost a pěnotvorný roztok. Připojovací konec tlakového plynu musí mít oddělovací uzavírací ventil V, manometr M a referenční netěsnost KN. Velikost této netěsnosti se volí na dolním konci zkušebního intervalu [4]. Použitý pěnotvorný roztok musí být pro zkoušený materiál neškodný. Tento roztok je možno nanášet buď za použití štětce nebo přelitím či sprejem. Nástřik pistolí není vhodný, neboť by mohl roztok napěnit již při aplikaci [4]. Pro pozorování musí být zajištěno dostatečné osvětlení kontrolovaného místa, přizpůsobené povrchu materiálu. Jiný zdroj volíme za předpokladu, že máme povrchy černé a jiný pro povrchy lesklé. Ke zkoušení se nejčastěji volí čistý, vysušený vzduch. Je možné použít také kterýkoliv jiný inertní plyn. Je ovšem zakázáno použít hořlavé a nebezpečné plyny. Jedinou výjimku zde tvoří zkoušky na živých zařízeních. Zde je možné pracovat i s hořlavým či nebezpečným plynem [4]. Zkouška se provádí tak, že se zařízení připojí na zkušební aparát, natlakuje a poté odstaví od zdroje tlaku. Následně se nanese pěnotvorný roztok na referenční netěsnost a sleduje se na ní tvorba bublinek. Pokud bublinky vznikají, je to důkaz, že je vše v pořádku a zkušební aparát funguje. Následně se roztok nanese i na kontrolovaný díl. Pozitivním nálezem jsou všechna místa, kde došlo k trvalé tvorbě bublinek. U této metody lze bezpečně určit místo netěsnosti, avšak její velikost jen přibližně. V některých případech lze bublinky jímat a integrálně volumetricky měřit [4].



Obr.3-4 Schéma nanášecí bublinkové metody

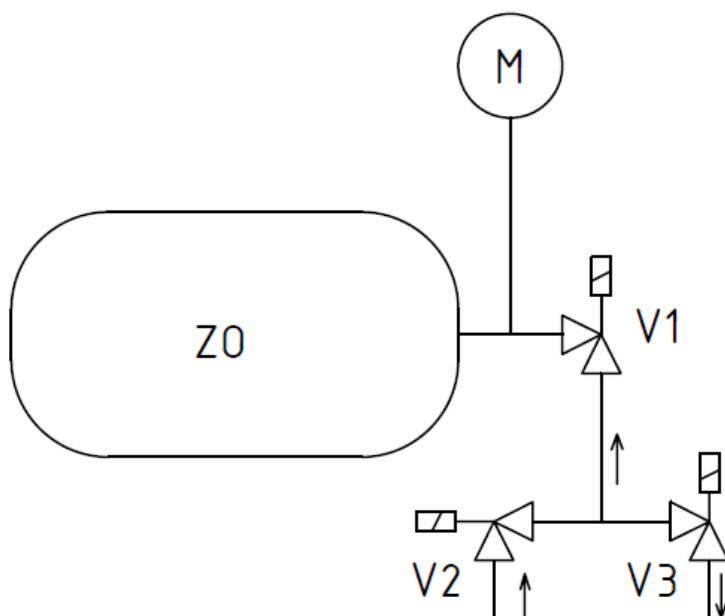
Poslední provedení této metody se nazývá komůrkové. Zkušebním zařízením je zde vakuová komora VK a vývěva MV. Tvar a rozměry komory jsou různé, dle místa použití. Komora se sestává z polotuhého tělesa T, které je opatřeno na spodní straně měkkým těsněním PT, schopným hermetického styku i na nerovných plochách. Na horní straně je na tělese za pomoci těsnění upevněn průzor PR z organického skla. Celá komora musí být dostatečně pružná, aby se přizpůsobila nerovné ploše zkoušeného tělesa a současně dost tuhá, aby odolala zatížení způsobené vnějším barometrickým tlakem. Ke komoře jsou připojeny dva ruční kohouty. Kohout označený VZ slouží k napouštění vzduchu a kohout VV k odsávání vzduchu vývěvou MV. Je vhodné použít membránovou vývěvu, která může bez problému čerpat jak směs vzduchu, tak i směs vodních par [4]. Za pomoci výše zmiňovaných kohoutů můžeme v komoře nastavit a stabilizovat libovolný tlak od barometrického až po mezní vakuum vývěvy. Zkouška probíhá tak, že se na zkoušený úsek nanese pěnотvorný roztok a následně se na něj přiloží vakuová komora. Komora se přitiskne a otevře se kohout na straně vývěvy. Následně se vytvoří podtlak a tlak atmosféry komoru přitiskne silou odpovídající ploše a podtlaku. Následně se manipulací s oběma kohouty nastaví menší vakuum. Pozitivním nálezem jsou všechna místa, kde došlo k trvalé tvorbě bublinek nebo pěny. U této zkoušky lze určit polohu netěsnosti, avšak její velikost lze určit pouze odhadem. Navíc zde nelze bublinky jímat a tím změřit velikost dané netěsnosti [4].



Obr. 3-5 Schéma komůrkové bublinkové metody

2.6.2 Měření změn tlaku

V hermetickém systému se existence netěsností musí nutně projevit změnou tlaku plynu. Pokud je systém vakuový, dochází k jeho růstu a pokud je přetlakový, tak dochází k jeho poklesu. To je základem celé řady zkušebních metod. Měření a vyhodnocení vychází z aplikace stavové rovnice plynu [8]. První provedení této metody se nazývá přímé. Ke zkoušenému objektu ZO je připojen ventil měření V1, ventil přívodu zkušebního plynu V2, ventil odfuku zkušebního plynu V3 a měřidlo tlakoty a tlaku M. Jako zkušební plyn se volí nejčastěji upravený a vysušený vzduch, dusík nebo některý z inertních plynů [4]. Není dovoleno použití plynů toxických, nebezpečných nebo škodících životnímu prostředí. Jedinou výjimku zde tvoří zkoušení těsnosti za provozu, kde jsou tyto plyny běžnou pracovní látkou. [4] Zkouška probíhá tak, že se zkoušený objekt naplní zkušebním plynem do výše zkušebního tlaku. Poté se uzavře ventil V1 a následuje prodleva pro stabilizaci stavu. Následně se měří změna tlaku a teploty v závislosti na čase. Stabilizace stavu je nezbytná, protože při plnění se plyn ohřál kompresním teplem a rovněž tlak pulzuje [4]. Po skončení měření se plyn vypustí.



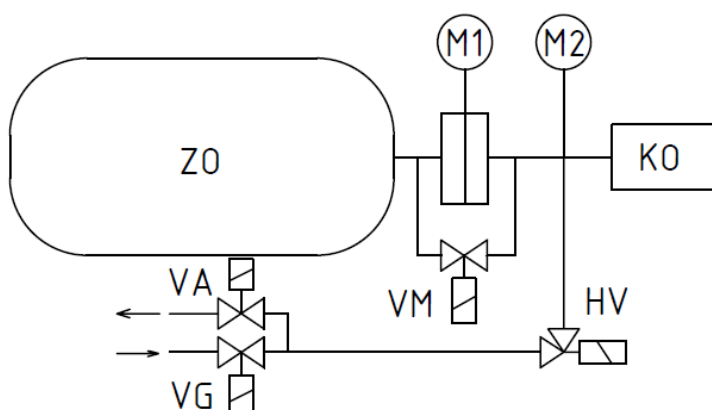
Obr. 3-6 Schéma přímého měření změn tlaku

Při vyhodnocení se vychází ze stavové rovnice ideálního plynu, z Boyleova a Charlesova zákona [9]. Pro netěsnost q pak platí:

$$q = V * \frac{dp}{t} [Pa * m^3 * s^{-1}] \quad (8)$$

Je však zapotřebí do vzorce zahrnout vliv změny teploty. To lze aplikací Charlesova zákona. Při zkoušení s vlhkým plynem je nutno počítat separátně změny stavu plynu a změny stavu páry. Je nepřijatelné, aby ve zkušebním plynu vlivem změny teploty a tlaku kondenzovala voda. Tímto způsobem se například měří těsnost pneumatik [4].

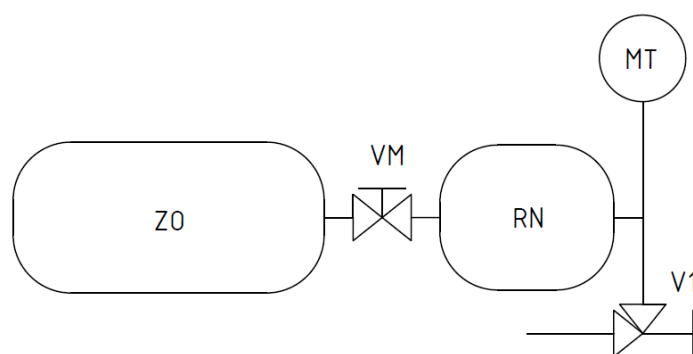
Další provedení této metody spočívá v porovnání ztráty tlaku ve zkoušeném objektu vůči objektu kontrolnímu. Může jím být např. referenční nádoba, již prověřený díl, který je tvarově stejný jako zkoušený díl nebo díl s kontrolní netěsností [4]. Ve všech těchto případech neměříme absolutní velikost tlaků, ale pouze rozdíl mezi dvěma tlaky. Měřicí ústrojí se skládá ze zkoušeného objektu ZO, který je za pomoci měřidla rozdílového tlaku a teploty M1 a ventilu měření VM propojen s kontrolním objektem KO a také s hlavním ventilem plynu HV. Před kontrolním objektem je zapojeno ještě měřidlo absolutního tlaku M2. Ten je dále napojen na ventil přívodu VG a ventil odvodu VA stlačeného plynu. Zkouška probíhá tak, že se otevře ventil přívodu stlačeného vzduchu, hlavní ventil plynu a také ventil měření. Zároveň se uzavře ventil odvodu stlačeného vzduchu. Po dosažení zkušebního tlaku se uzavře hlavní ventil plynu a následně i ventil měření. Tím se oddělí zkušební objekt od kontrolního tělesa. Následně se za pomoci rozdílového měřidla tlaku a teploty sleduje rozdíl tlaků mezi objektem kontrolním a zkoušeným. Jakmile získáme dostatek údajů, měření se ukončí a otevřením všech ventilů (kromě ventilu přívodu stlačeného vzduchu) se vypustí všechn stlačený vzduch.



Obr. 3-7 Schéma referenčního měření změn tlaku

Toto byl jen krátký přehled těch nepoužívanějších metod, založených na změně tlaku. Samozřejmě, že existuje spousta dalších provedení, avšak ty už nejsou tak univerzálně použitelné, jako výše popsané. Také zde byly popsány pouze metody na měření v přetlakových systémech.

Pro většinu těchto metod je nutné zjistit velikost volného objemu zkoušeného tělesa V . U jednodušších těles je možné ho jednoduše vypočítat, u složitějších ho můžeme zjistit například metodou měření volného objemu statickou expanzí. Měřit lze se zanedbáním teploty, nebo složitěji a přesněji s jejich zahrnutím do výpočtu. Opět vycházíme z Boyleova a Charlesova zákona. Měřicí aparát se skládá ze zkoušeného objektu ZO, který je připojen uzavíracím ventilem VM na referenční nádobu RN, měřidlo tlaku MT a zdroj zkušebního plynu oddělený uzavíracím ventilem V1. Zdroj plynu můžeme nahradit vývěvou pro součásti pracující s vakuem. Měření začíná otevřením ventilu VM. Následně se ventilem V1 naplní oba objemy plynem o stejném tlaku. Tlak necháme ustálit a následně ho změříme měřidlem VM. Tuto hodnotu tlaku označíme p_1 . Poté se uzavře ventil VM a do referenční nádoby doplníme plyn na tlak p_2 , větší než byl tlak p_1 . Uzavřeme ventil V1 a po ustálení změříme hodnotu tlaku p_2 . Poté otevřeme ventil měření VM a v obou nádobách se tlak nastaví na hodnotu p_k . Tato hodnota je menší než p_2 a větší než p_1 . Známe-li už velikosti tlaků p_1 , p_2 a p_k a také objem referenční nádoby, tak lze vypočítat velikost dosud neznámého objemu zkušební součásti. Pokud chceme měřit přesněji, musíme do výpočtu zahrnout změny teploty, které při adiabatické kompresi nejsou nijak malé.

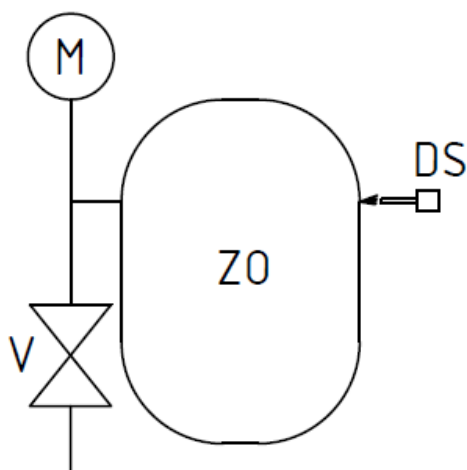


Obr. 3-8 Schéma měření volného objemu

2.6.3 Metody měření a hledání netěsností za pomoci zkušebního plynu

Tyto metody pracují na principu detekce průniků zkušebního plynu netěsností stěn a spojů. Jako zkušební plyn se volí medium, jehož výskyt a tedy i parciální tlak je ve volné atmosféře zanedbatelný .

Opět existuje mnoho různých praktických provedení této metody, avšak za nejuniverzálnější je považována metoda hledání úniků zkušebního plynu atmosférickou sondou. Zkušební aparát se skládá ze zkoušeného objektu ZO, který je vyplněn zkušebním plynem (například heliem). Netěsnostmi N uniká zkušební plyn do volné atmosféry, kde jeho přítomnost zjišťuje detekční sonda DS. Ta na přítomnost zkušebního plynu reaguje buď vizuálně, či akusticky. I tato metoda má ovšem své zápory. Unikající látka se rychle mísí s okolním vzduchem, a proto touto metodou nemůžeme hledat příliš malé úniky. Když jsou úniky příliš velké, tak zase zamoří okolní oblast do té míry, že nelze najít, odkud zkušební plyn uniká. Při tomto druhu měření je nutno vést ústí sondy cca 1mm nad zkoušeným povrchem s velmi malou postupovou rychlostí. [4] Detektor totiž reaguje se zpožděním a při nárůstu signálu se již sonda nachází mimo únik. Při vyšší rychlosti jsou tedy výsledky měření zkreslené a zkoušení je tedy časově náročné. Díky této metodě jsme schopni relativně přesně lokalizovat danou netěsnost, avšak její velikost lze určit pouze odhadem.



Obr. 3-9 Schéma hledání netěsností za pomoci zkušebního plynu

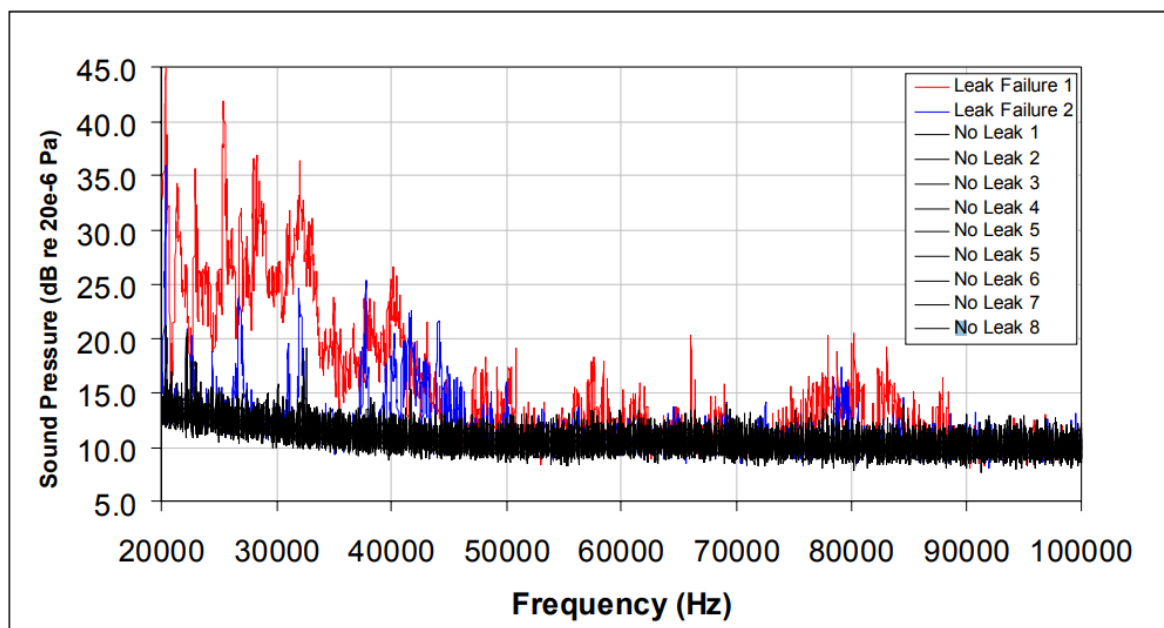
2.6.4 Metoda využití generovaného ultrazvuku

Přístroj pro měření touto metodou se skládá z vysílače a měřiče ultrazvukového signálu. Měřič může být buď součástí vysílače, nebo může jít o samostatné zařízení. Při této metodě je ultrazvuková odezva generována právě vysílačem neboli takzvaným emitorem. Ten vygeneruje ultrazvukový puls namířený do námi zvoleného místa a měřič změří velikost odezvy, která se následně kontroluje. Kontrola, v případě, že signál zasáhne nějaké heterogenity materiálu, popř. vady nebo praskliny, se provádí většinou v závislosti na čase nebo frekvenci [4]. Rozsáhlé možnosti použití má tato metoda ve zdravotnictví, například pro zobrazování plodu. Tato metoda má mnoho výhod, ale není vhodná k testování velkých složitých struktur, jako jsou například vozidla, která jsou materiálně a geometricky rozmanitá [1].

2.6.5 Vibro-akustická metoda

Měřicí zařízení pro tuto metodu se skládá z malého elektrodynamického „shakeru“ s proměnným sinovým buzením od 20Hz do 8kHz, který je připojen na měřenou součást a vysokofrekvenční mikrofon [1]. Lze použít kontaktní nebo bezkontaktní mikrofon. Kontaktní je výhodnější v tom, že signál není ovlivněn zvukem, který se šíří ve vzduchu. Bezkontaktní se používá v hůře měřitelných místech. Cílem je rozkmitat okraj otvoru, popř. vady na rezonanční frekvenci, což vytvoří ultrazvukový signál, který jsme schopni detekovat. Tato metoda je používána pro mnoho typů úniků u různých druhů součástí. Výsledek může být ve formě Fourierovy funkce nebo holých dat. Mezi výhody této metody patří to, že ji lze do jisté míry použít pro heterogenní materiály a také to, že pneumatická soustava při ní není pod tlakem, což je výhodné při větších soustavách, ve kterých je větší objem vzduchu. Většinou následuje natlakování a poté popřípadě může proběhnout jiná zkouška. Tato metoda spolu se správně zvoleným budícím rozsahem eliminuje jakékoliv výkyvy, které by mohly vést k chybné detekci úniku.

Obrázek 10. nám ukazuje výsledek této zkoušky pro 2 součásti, na nichž byl nalezen únik a 8 součástí, které byly v pořádku. Během měření byl mikrofon umístěn 5mm od povrchu dané součásti. Vysoká odchylka (ultrazvukového vlnění) od linearity vypovídá o existenci úniku [1].



Obr. 3-10 Výsledek měření za použití vibro-akustické metody

Základní vibro-akustická metoda je vhodná především pro snadněji detekovatelné úniky. Pro hledání obtížněji naležitelných úniků slouží nelineární verze vibro-akustické metody. U této metody je třeba vyvolat nelineární vibrační charakteristiku tenkých stěn. Pokud nízkofrekvenční globální vibrace a vysokofrekvenční signál působí na součást, pak tento signál bude ovlivněn nelineární vibrací určitého typu defektu. V této době se zkoumá použitelnost této metody pro hledání úniků [1].

2.6.6 Metoda akustické emise

Pojem akustická emise (dále AE) byl objeven ve fyzikálních laboratořích při studiu plastické deformace kovů. Byl tak nazván jev, který doprovázel plastickou deformaci kovů. Tento jev se projevoval akustickým tedy zvukovým popraskáváním či šumem emitovaným vně materiálu v průběhu deformace [10]. S AE se však nesetkáme pouze v laboratoři. Jako AE se označuje například i popraskávání suché větve před zlomením [4]. V tomto případě jde o zvuk slyšitelný lidským sluchem, který se šíří ve formě vlnění od větve vzduchem až k našemu uchu. Toto vlnění jsme však schopni mnohem citlivěji detekovat přímo ve větvi, k jeho vyhodnocení je však už zapotřebí patřičné přístrojové vybavení [4]. Mezi hlavní výhody využití této metody patří to, že se jedná o integrální metodu, tedy je možné změřit AE emitovanou v kterékoliv části měřeného tělesa. Dalšími výhodami je rychlost měření a vysoká citlivost. Ta způsobuje, že jsme schopni detekovat vady už v počátečním stádiu, které jsou ostatními metodami nezjistitelné. Zároveň jsou detekovány jen aktivní vady, to jest vady projevující se při zatížení [4].

Tato metoda se používá nejčastěji pro hledání vnitřních vad materiálu na tlakových nádobách. Touto metodou jsme schopni detekovat změny v materiálu na úrovni krystalové mřížky. Další možnosti využití jsou právě pro hledání úniků v pneumatických systémech [4].

Důležitou věcí je to, že AE vzniká pouze při vzniku a šíření vad [10]. Pokud tedy chceme AE použít pro hledání vad, musíme měřit přímo při zatěžování. V případě hledání úniků na pneumatických systémech vytváří AE vzduch proudící skrze únik. Na rozdíl od ultrazvukových metod zde tedy není zapotřebí ultrazvukový vysílač. Aby unikající zvuk byl detekovatelný, musí vytvářet turbulentní proudění, měřitelné ve frekvenčním rozsahu měřicího přístroje [10]. Je vhodné pracovat v rozsahu zvuku s vyššími frekvencemi vzhledem k nedostatku dalších zdrojů takových zvuků v okolí.

Měřicím přístrojem je vysokofrekvenční, komerčně dostupný mikrofón, obvykle s odezvou do 100kHz [1]. Pokud se mikrofón nachází přímo v proudu vzduchu, tak proud vzduchu vytvoří ultrazvukovou odezvu (díky generovaným turbulencím) a to proto, že vzduch udeří na krytí mikrofónu. Tato odezva může být následně transponována na zvuk o nižší frekvenci, která je pro člověka slyšitelná a může být poslána operátorovi do sluchátek, nebo může být ve formě grafu zobrazena na obrazovce. Operátor pak může posoudit existenci, velikost a umístění úniku, nebo může uložit záznam odezvy k dalšímu zpracování. V případě použití lidského operátora není tato metoda vhodná například pro rychlé testování svarů na tlakových nádobách kvůli nedostatečné rychlosti a spolehlivosti. Je intuitivní, že s rostoucím tlakem roste množství proudícího vzduchu skrze únik, avšak pouze do určitého bodu. Při vysokém tlaku se dají snáze měřit úniky do velikosti 20 mikrometrů [1]. Měřit menší díry touto metodou představuje problém. Proudícím médiem bývá většinou vzduch, popřípadě helium, dusík nebo vodík [1]. Tyto plyny se používají kvůli menší atomové velikosti molekul ve srovnání se vzduchem. To umožňuje, aby byly detekovány otvory s menší velikostí. Výhoda této metody je, že úniky lze měřit téměř okamžitě po dostatečném natlakování soustavy. Většina ostatních metod vyžaduje čekání na tlakovou ztrátu v závislosti na čase k určení relevantních výsledků [1].

Důležitou součástí měření je správná volba frekvenčního pásma. Pokud budeme měřit při nižších frekvencích, bude mít ruch okolí nezanedbatelný vliv [4]. Tento vliv ještě roste se vzdáleností mikrofónu od místa úniku. Pokud tedy již není možné přiblížit mikrofón ke kontrolovanému objektu, je zapotřebí co nejvíce rušivých zvuků odstínit. Nejjednodušeji to lze udělat vložení ruky, popřípadě nějakého předmětu deskového tvaru mezi mikrofón a zdroj rušení [11]. V mnoha případech je však zdrojů rušení více a proto se musí na mikrofón umístit modul, který bude co nejvíce těchto rušení odstíňovat [11].

3 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

3.1 Analýza problému

Měření za využití AE vyžaduje na rozdíl od ostatních měřících metod podstatně méně času. Je pravdou, že zde platí omezení a že tuto metodu nelze použít ve všech případech (například v okolí stroje vydávajícího ultrazvuk). Dalším důležitým faktorem je správně zvolit tvar a rozměry modulu, který se umísťuje mezi těleso měřicí sondy a únik. Je důležité myslet na citlivost modulu, ale i na jeho kompaktnost

Většina výrobců dodává k měřícím zařízením (určeným k bezkontaktnímu měření AE) několik modulů, z nichž každý je vhodný pro jiné použití. Nejčastěji jsou vyráběny z plastu technologií vstřikování. Plast je možné použít, neboť moduly nejsou nijak namáhané a není tedy zapotřebí využívat materiál s lepšími mechanickými vlastnostmi. Nejčastěji se setkáváme s cca 150 až 200 mm dlouhým, kuželovým či parabolickým modulem. Ten se směrem od detektoru rozšiřuje a to až do cca 60 mm. Tento modul bývá určen pro měření z větší vzdálenosti. Dalším typem bývá kratší cca 50 až 100 mm dlouhý modul válcového tvaru. Ten je určen pro měření z kratší vzdálenosti a přesnějšímu určení místa úniku.

Ústav konstruování ve spolupráci se společností Poličské strojírny v tuto chvíli vyvíjí bezkontaktní měřící zařízení, pracující právě na principu metody AE. Tento přístroj bude sloužit právě pro detekci úniků na pneumatických systémech, které se používají pro ovládání dveří v autobusech. Únik zde totiž může vést až k omezení či zastavení funkce celého pneumatického systému. Proto je zde klíčová rychlost samotné detekce.

3.2 Cíle práce

Hlavním cílem této práce je na základě měření určit co nejoptimálnější parametry pro dva moduly. První by měl vykazovat co nejvyšší citlivost a druhý by měl únik co nejlépe lokalizovat. Měření bude probíhat na dvou měřících systémech AE. DAKEL-ZEDO a DAKEL-BAT3, přičemž se bude měnit vzdálenost modulu a zdroje úniku, směrovost a také velikost úniku.

Dílčí cíle bakalářské práce

- Zmapovat vědecké studie zabývající se měřením úniku stlačeného vzduchu
- Navrhnout upnutí modulu na měřící zařízení
- Navrhnout postup pro měření AE vydávané únikem v závislosti na použitém modulu
- Stanovit útlumovou charakteristiku pro jednotlivé moduly

4 MATERIÁL A METODY

4.1.1 Systém DAKEL ZEDO

Systém DAKEL ZEDO je výkonný a moderní modulární systém pro měření akustické emise, který lze použít v širokém rozsahu aplikací této diagnostické metody. [12] Například při detekci a lokalizaci vzniku a rozvoje vad materiálů, za podmínek mechanické, tepelné nebo korozní stimulace, monitorování eroze, koroze, rázů, netěsností, technologických procesů, atp. [12]

Systém ZEDO se skládá z měřících kanálových jednotek ZEDO-AE, které jsou vkládány do rámu ZEDO-BOX. Je tedy možné vytvořit systém o velikosti od 2 až do stovek měřících kanálů.

Přístroj, který vlastní Ústav Konstruování a na kterém probíhalo měření je dvoukanálový



Obr. 4-11 Systém DAKEL-ZEDO

4.1.2 Analyzátor DAKEL-BAT3

Jedná se o analyzátor AE vybavený 18-bitovým AD převodníkem s 15MHz vzorkovací frekvencí a maximálním zesílením 90dB. Na monitoru lze současně sledovat obálku maximálních amplitud s nastavitelnou úrovní časové komprese. Jelikož velikost ukládaných dat je poměrně vysoká, je možné pouze zobrazovat obálky vstupních napětí bez ukládání na pevný disk. To umožňuje pohodlné nastavení zesílení jednotlivých měřících kanálů ještě před zahájením měření. Vyhodnocení se provádí v programu Dakel UI, který pracuje pod operačním systémem linux. Jedním z výsledků měření mohou být například i grafy spektrálního složení signálu AE.



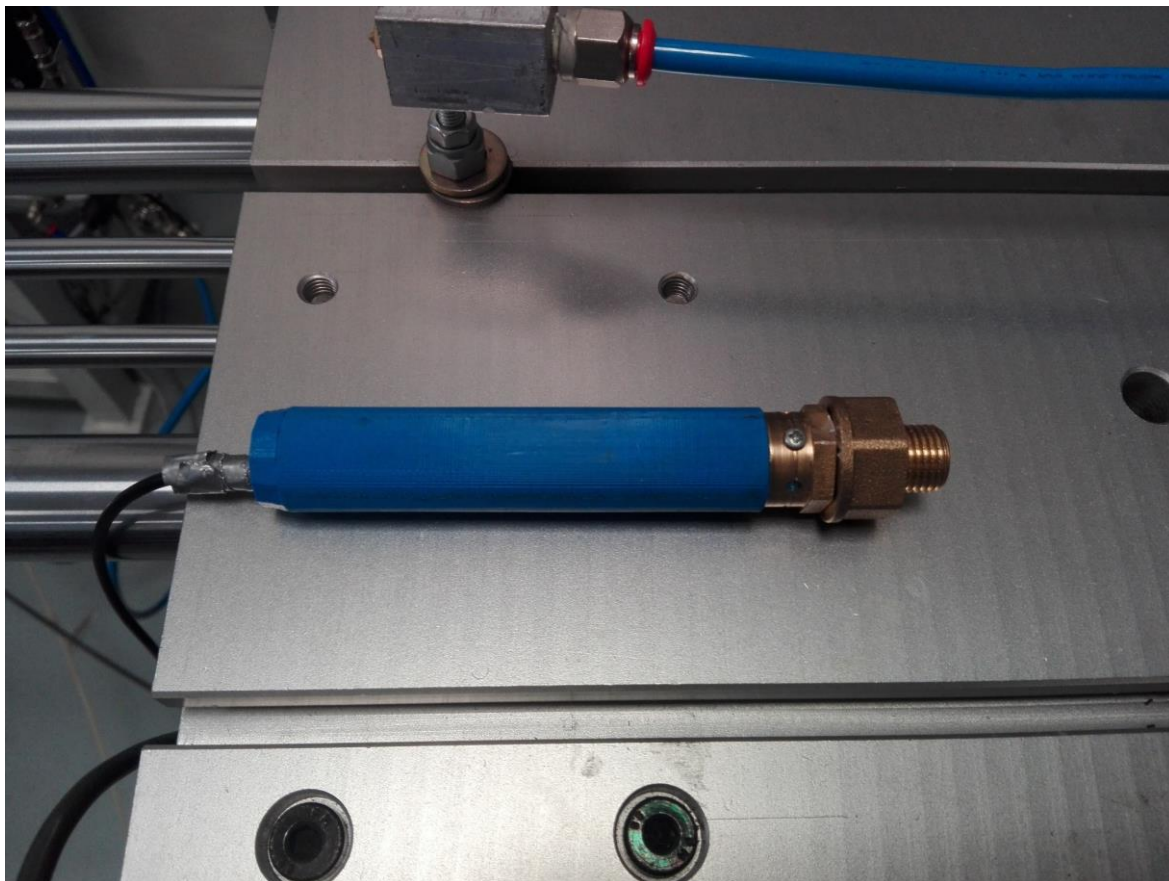
Obr. 4-12 Analyzátor DAKEL- BAT3

4.1.3 3D tiskárna Ultimaker 3

Pro tisk modulů byla použita tiskárna Ultimaker 3 od firmy Ultimaker B.V. Jedná se o 3D tiskárnu využívající metodu FDM, která má tiskovou plochu 215mm x215mm a tiskovou výšku 200mm. Maximální rychlost tisku je 300mm/s a je schopna pracovat s velkým množstvím různých materiálů jako například ABS, PLA, Nylon atd.

4.1.4 Měřicí sonda

Měřicí sonda se skládá z komponent které jsou umístěny na tělese sondy. Uvnitř tělesa sondy je vysokofrekvenční mikrofón. Na sondě je umístěna redukce, která je opatřena závitem, díky kterému je možné moduly na sondu upnout.



Obr. 4-13 Měřicí sonda

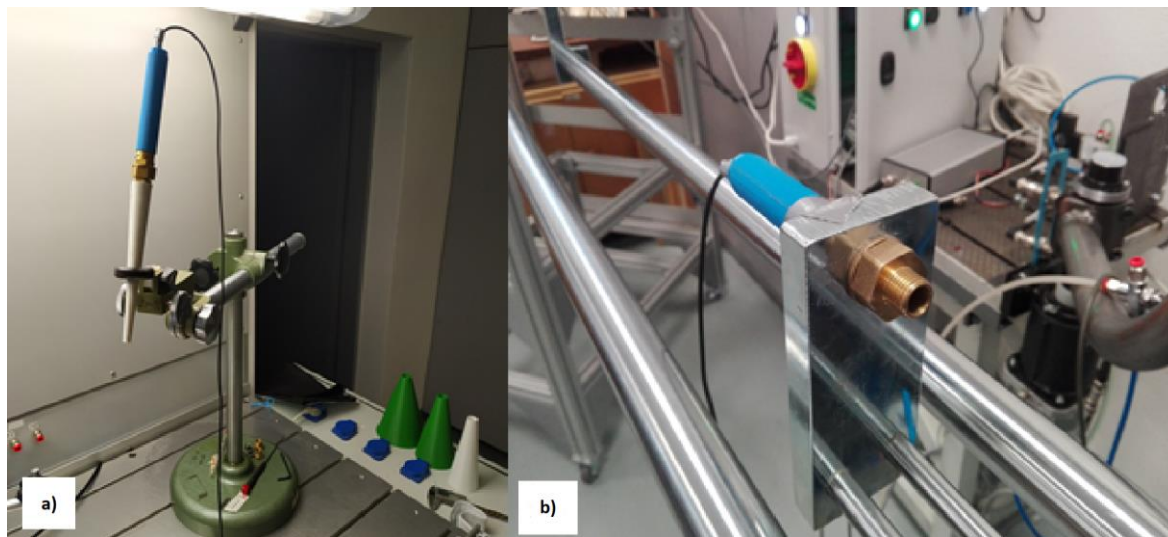
4.2 Vybraný materiál

Jako materiál pro moduly bylo použito čisté PLA. Jedná se o nejuniverzálnější materiál pro technologii tisku FDM, který je vhodný i pro tisk velkých dílů. Jde o plast, který je díky přirozenému původu (nejčastěji se vyrábí z kukuřice, brambor či cukrové třtiny) biologicky rozložitelný. Lze ho též modifikovat přidáním vhodné příměsi jako například částičky dřeva, bronzu či oceli.

4.3 Příprava experimentu

V rámci tohoto experimentu byl vytvořen jednoduchý pneumatický systém sestávající se ze zdroje stlačeného vzduchu, který je hadičkou spojen s manometrem, škrtícím ventilem a následně tryskou. Ta zde představuje únik. Tělo trysky je přišroubováno k měřicímu stolu.

Pro pevné upnutí a správné ustavení měřicí sondy jsou dvě možnosti. Lze použít těžký litinový stojan, ovšem ten umožňuje posun pouze cca 40cm. Navíc nelze zaručit plynulost posuvu v závislosti na souososti úniku a měřicí sondy.



Obr. 4-14 Možnosti upnutí sondy (a) litinový stojan (b) výsuvný panel

Druhá možnost je použít výsuvný panel, který se nachází na pracovním stole. Hlavní výhodou této možnosti je to, že panel lze vysunout až do vzdálenosti 1m a spolu s posuvem trysky lze tedy dosáhnout vzdálenosti až 2m. Navíc je posuv spojitý a je zde zaručená stálá souosost, popřípadě stejná osová vzdálenost úniku a měřicí sondy.

Prvním krokem je nastavení ventilu. Kdyby v soustavě nebyl zapojený, tak by únik (který zde představuje tryska) byl příliš velký a neregulovatelný. Díky ventilu jsme schopni nastavit širokou škálu úniků a díky připojenému manometru a známé velikosti trysky jsme schopni přepočítat skutečnou velikost úniku dle vzorce (9)

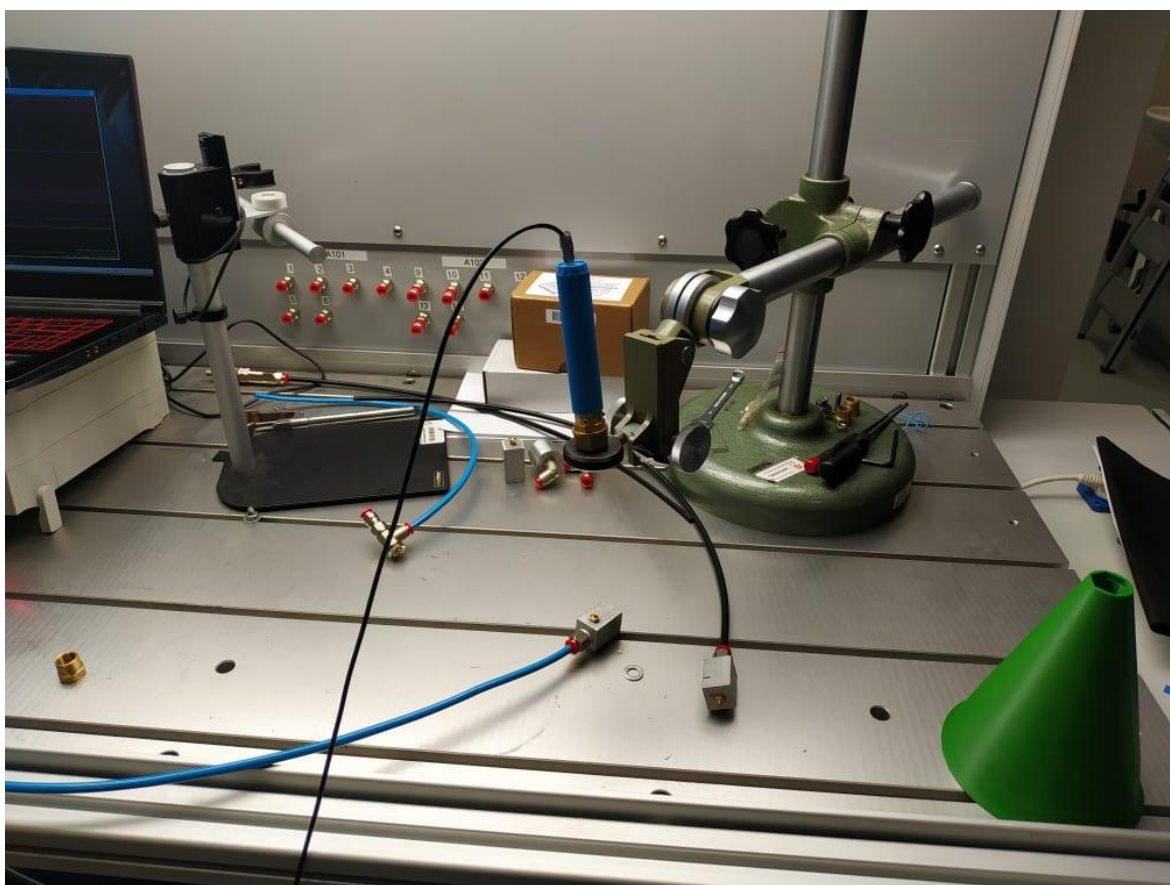
$$d_0 = d_t * \frac{\Delta p_1}{\Delta p_2} \quad (9)$$

Kde d_0 je skutečný průměr úniku, d_t je průměr trysky v mm, Δp_1 je rozdíl tlaků ve stavech, kdy je ventil úplně uzavřený a úplně otevřený, Δp_2 je rozdíl tlaků ve stavech, kdy je ventil úplně uzavřený a stavu při měření tj. při průměru úniku x.

Jak již bylo psáno výše, tak velikost úniku se udává jako velikost průtoku plynu únikem. Lze ji spočítat dle vzorce (10)

$$Q = 4,17 * C * \left(\frac{d_0}{4,654}\right)^2 * p_1 * \left(1 - \frac{p_1 - p_2}{3 * \gamma * x_t}\right) * \sqrt{\frac{p_1 - p_2}{p_1 T}} \quad (10)$$

Kde Q je velikost úniku, C je výtokový součinitel, který zohledňuje skutečný a teoretický průtok tryskou, d_0 je průměr úniku, p_1 je tlak v soustavě při daném úniku, p_2 je tlak okolí (v našem případě se jedná o tlak atmosférický), γ je Poissonova konstanta, x_t je koeficient zohledňující změnu tlaků na ústí trysky.



Obr. 4-15 Příprava experimentu

4.4 Návrh modulů

Dalším krokem je návrh, vymodelování a následné vytištění jednotlivých modulů. Byly použity dva tvary nástavců - kuželový a paraboloidní. Délka všech modulů byla zvolena 150 mm. Je totiž zřejmé, že čím kratší nástavec a tím pádem i menší vzdálenost mezi únikem a snímačem, tak tím silnější signál získáme. Co ovšem už jasné není je závislost vnějšího průměru modulu na kvalitě a síle signálů. V rámci této práce bylo vytvořeno 6 prototypů modulů, jejichž tvary a vnější průměry jsou uvedeny v tabulce X

Tab. 4-1 Charakteristiky jednotlivých modulů

Název modulu	Vnější průměr modulu	Tvar modulu
1	5	Válec
2	11	Válec
3	60	Válec
3p	60	Paraboloid
4	90	Válec
5	120	Válec

Modul 3p má parabolický tvar. Nejvyšší citlivosti by bylo dosaženo při umístění ohniska paraboloidu přímo do mikrofону. To zde však není kvůli konstrukci upínací části sondy možné.

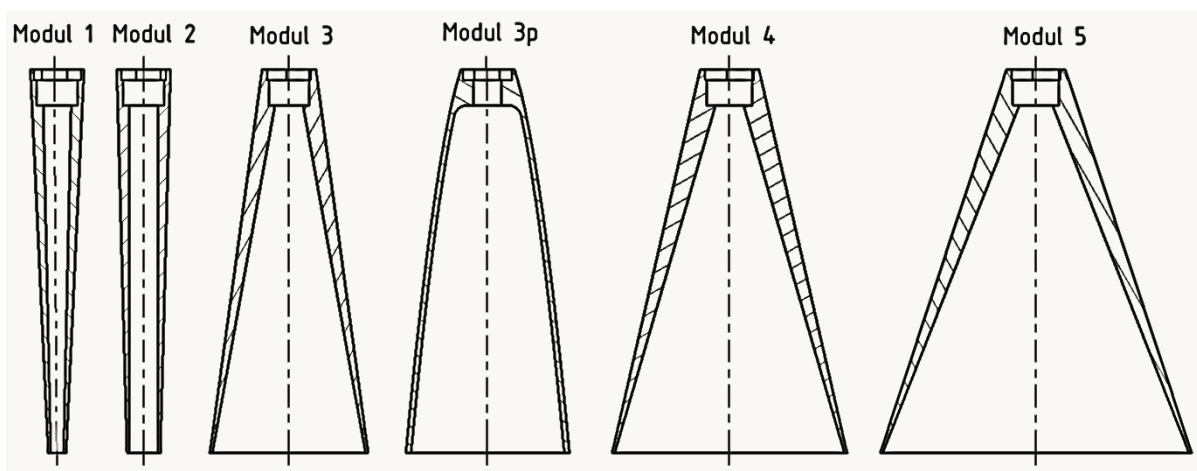
4.4.1 Uchycení tělesa modulu na měřicí sondu

Z tělesa sondy vyčnívá 14 mm dlouhý válec s trubkovým závitem G 1/4“. Řešení, které se tedy nabízí, je umístit na vstupní průměr modulu válec s vnitřním závitem téhož typu jako je na sondě. Jsou zde tři možnosti, jak toho docílit. První a zároveň nejjednodušší je vytisknout moduly přímo se závitem. Tato možnost je rychlá a levná, avšak závit z plastu nemá příliš velkou trvanlivost a jelikož se moduly budou při experimentu měnit, tak by se závit pravděpodobně poškodil a nebyl by funkční. Další možnost je vyříznout závit do plastového tělesa modulu. To ovšem trpí stejnými problémy jako závit vytištěný. Třetí a nakonec i zvolenou variantou je vložit do tělesa modulu kovovou redukci, která na sobě už má potřebný závit. Redukce byla do tělesa sondy vlepena vteřinovým lepidlem.

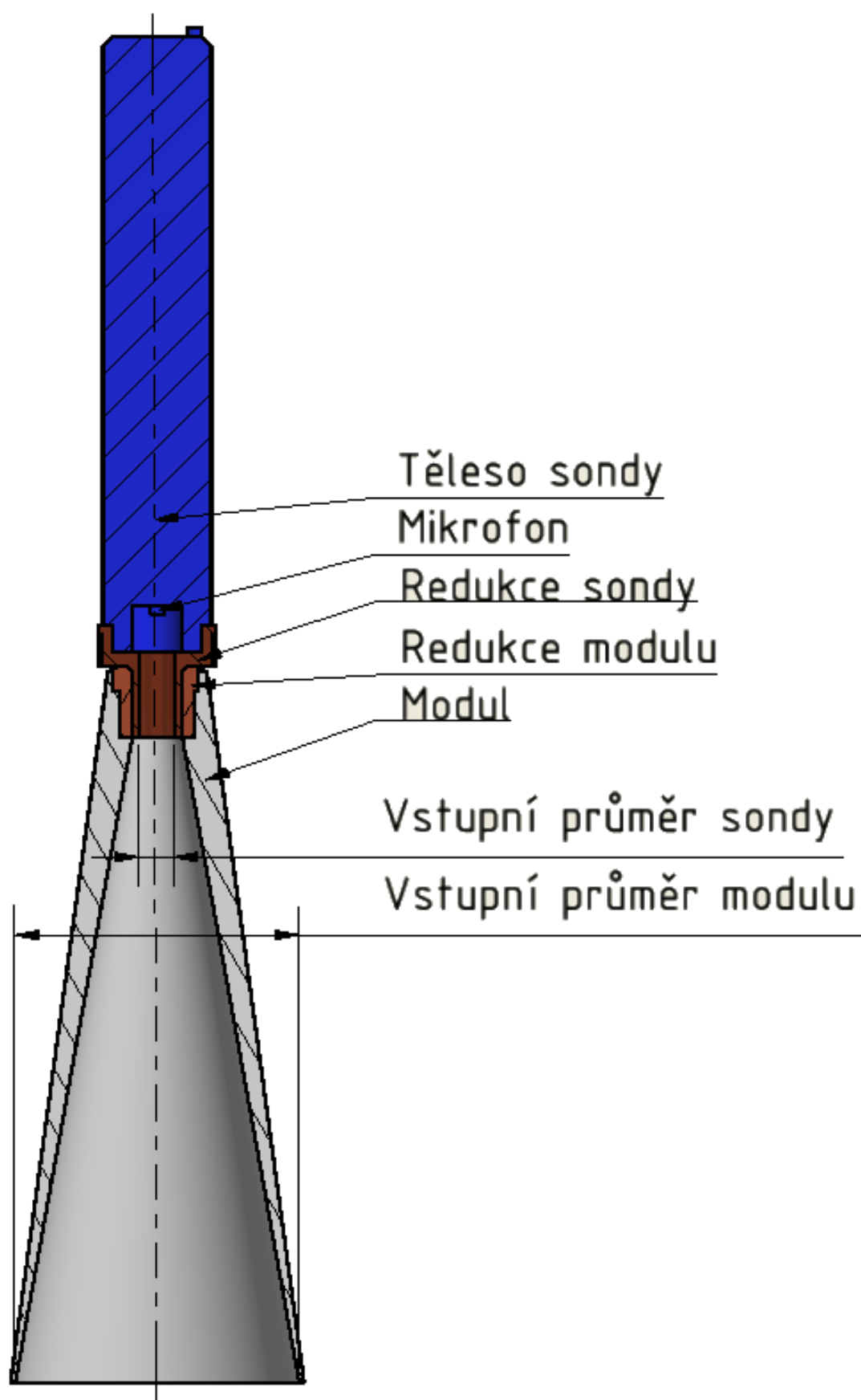


Obr. 4-16 Redukce vyčnívající ze sondy

Modul 3p má parabolický tvar. Nejvyšší citlivosti by bylo dosaženo při umístění ohniska paraboloidu přímo do mikrofonu. To zde však není možné, neboť ohnisko by se nacházelo uvnitř válce vyčnívajícího ze sondy. Došlo zde tedy ke kompromisu a ohnisko je o pár milimetrů posunuto od mikrofonu a část paraboloidu je vyplněna materiálem. (viz obr. 4-17)



Obr. 4-17 Schémata jednotlivých modulů



Obr. 4-18 Řez počítačového modelu měřicí sondy s upnutým modulem 3

4.5 Postup experimentu

V rámci tohoto experimentu byly provedeny tři různé typy měření. Ve všech typech byli střídány jednotlivé moduly a byla zjišťována závislost citlivosti jednotlivých modulů na vnějších podmínkách daných typem měření.

4.5.1 Intervalové měření v krátkých vzdálenostech

Při prvním typu měření byla sonda upnuta na litinovém stojanu. Únik byl měřen ze čtyř vzdáleností, z nichž nejnižší byla 200 mm a nejvyšší byla 350 mm. Měření bylo intervalové a tedy není možné z něj získat spojitou útlumovou charakteristiku daného modulu. Vyhodnocení se provádělo na analyzátoru DAKEL- BAT3. Pro vyhodnocení byly využity spektrogramy. Analyzátor DAKEL-BAT3 sice vyhodnotí spektrogramy až do 1000 kHz, avšak únik vytváří akustickou emisi maximálně do 200 kHz. Proto na vyšší frekvence nebyl brán zřetel. Jako vyhodnocující údaj sloužila velikost plochy pod křivkou od 0 kHz do 200 kHz.

4.5.2 Spojité měření ve velkých vzdálenostech

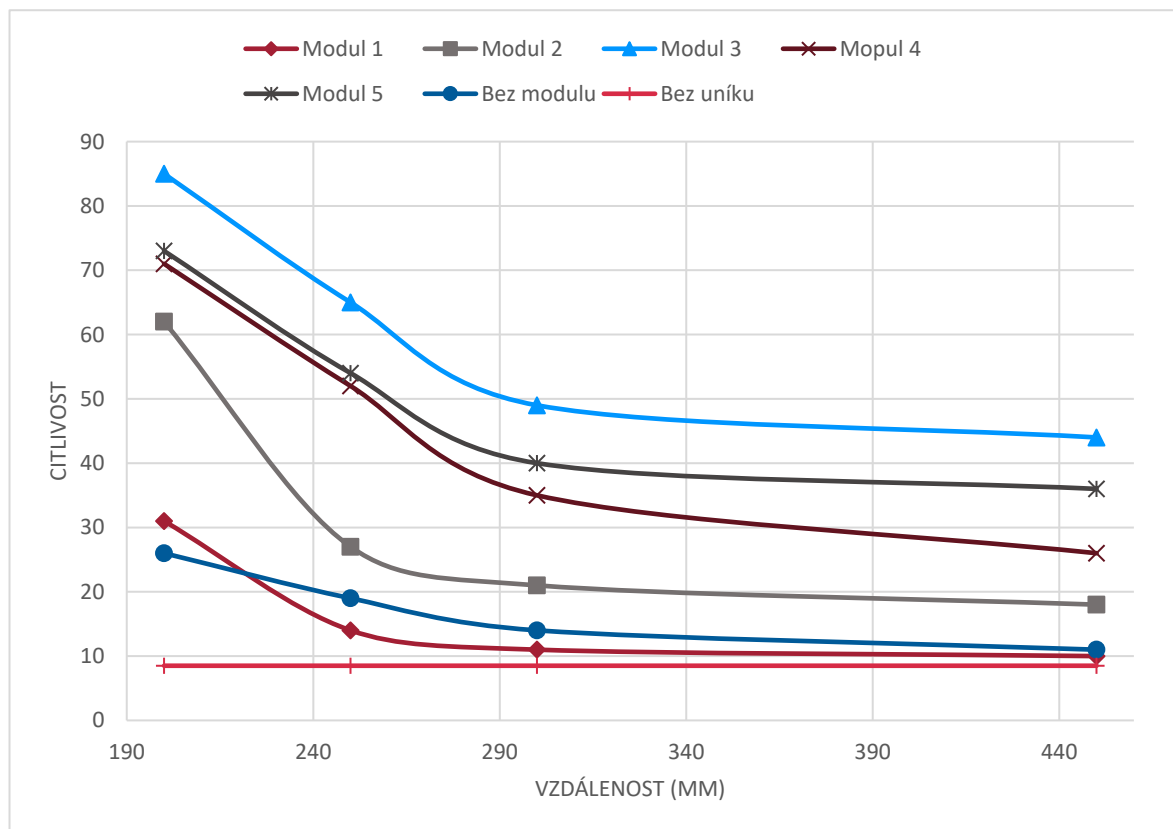
Při druhém typu měření byla sonda upnuta ve výsuvném panelu, který je na pracovním stole. Měření bylo spojitě a získali jsme z něj tedy spojitou útlumovou charakteristiku jednotlivých modulů. Měření začínalo na vzdálenosti 0,15 m a končilo ve vzdálenosti 2 m. Vyhodnocení se provádělo na systému DAKEL ZEDO.

4.5.3 Spojité měření ve velkých vzdálenostech s vyosením úniku

V obou předchozích typech měření byl únik v ose měřicí sondy a tedy i modulu. V tomto typu měření však únik vychýlíme o 150 mm. Měření je spojitě a začíná na vzdálenosti 0,15m a končí ve vzdálenost 2 m. Sonda byla, stejně jako v předchozím případě, upnuta k výsuvnému panelu umístěném na pracovním stole. K vyhodnocení byl opět použit systém DAKEL ZEDO.

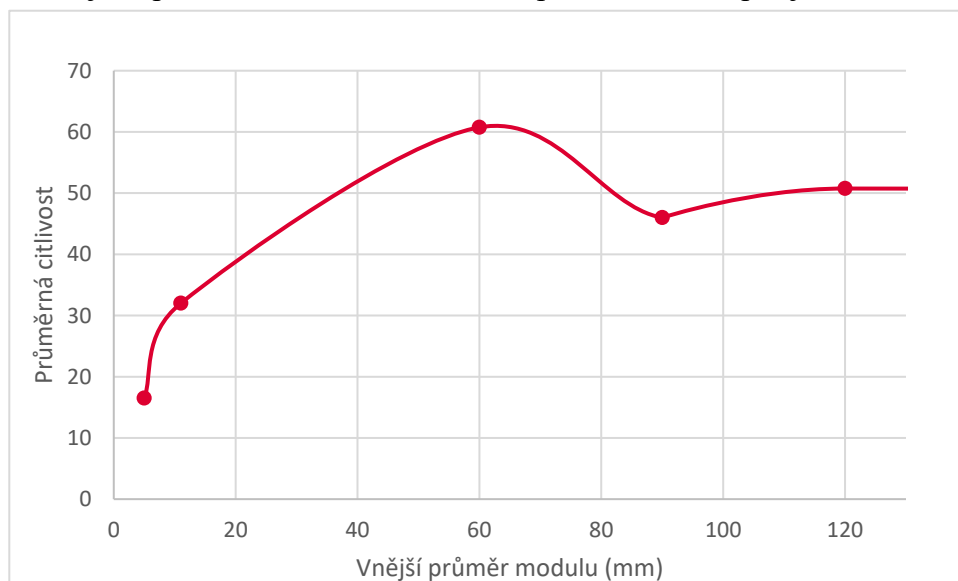
5 VÝSLEDKY

Pro první měření byla použita tryska s průměrem 0,25 mm a škrťací ventil byl nastaven tak, že výsledný únik $Q = 0,0082 \text{ Nl/min}$. Jednotka Nl představuje normální krychlový metr, tedy objem vzduchu zaujímajícího 1 litr při normálních podmínkách tedy tlaku 101325 Pa a teploty 0 °C.



Obr. 5-19 Vyhodnocení prvního měření

Výsledky prvního měření jsou zapsány do grafu 5-19. Na ose x je zde vzdálenost od úniku a na ose y je citlivost sondy. Ta byla získána jako obsah plochy pod křivkou ve spektrogramu z daného měření a tedy nemá žádné jednotky, jelikož jde pouze o hodnotu, která porovnává citlivost při použití jednotlivých modulů. Je zde vidět, že největší citlivosti lze dosáhnout s použitím modulu číslo 3. Tento modul si zároveň díky nepříliš velkému vstupnímu průměru zachovává vysokou kompaktnost, která je při měření v takto krátkých vzdálenostech velmi důležitá. Z grafu jsou také patrné vysoké rozdíly mezi moduly 1 a 2. Modul 1 se stává už po prvních pár centimetrech horším než samotná sonda bez jakéhokoliv modulu. A jelikož je jeho citlivost dále klesající, už nebyl použit při dalším měření. Naopak modul 2 si zachovává část citlivosti i v 450 milimetrech od úniku. Při prozkoumání charakteristik modulů 3, 4 a 5 zjišťujeme, že modul 4, ač vstupním průměrem je mezi modulem 3 a 5, má z nich nejhorší citlivost. To ukazuje, že závislost mezi citlivostí a průměrem modulu má více než jeden vrchol. Pokud budeme brát měření bez modulu jako měření s modulem s nekonečně velkým průměrem, pak jelikož mezi moduly 4 a 5 citlivost opět stoupá, tak je možné, že při vnějších průměrech, větších než má modul 5, nalezneme průměr modulu, který bude vykazovat citlivost vyšší než modul 3. Závislost průměru modulu na citlivosti sondy je znázorněna v grafu 5-20. Na ose y je průměrná citlivost, která byla získána jako průměrná hodnota citlivosti z prvního měření pro jednotlivé moduly.

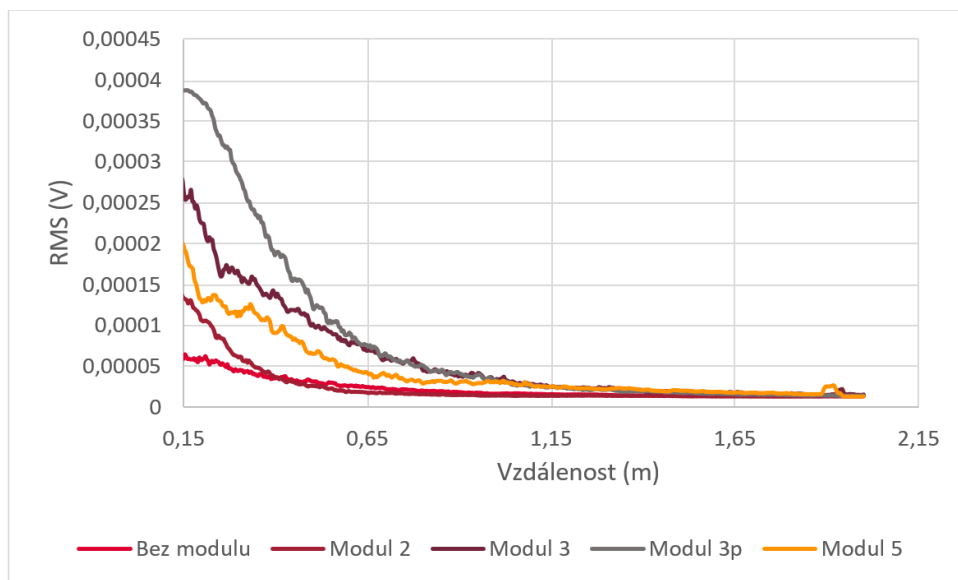


Obr. 5-20 Závislost průměrné citlivosti na vnějším průměru modulu.

Důležitým faktorem při měření v takto malých vzdálenostech je ovšem i schopnost modulu přesně lokalizovat daný únik. Modul 3 má sice vysokou citlivost, avšak oproti modulu 2 má téměř 30x větší vstupní plochu. To znamená, že modul 2 je schopen lokalizovat únik téměř 30x přesněji.

Ve druhém měření byla použita tryska s průměrem 0,3 mm a maximální vzdálenost byla navýšena na 2 m. Toto měření bylo rozděleno na dvě části. V první části byl nastaven únik, který měl velikost $Q_1 = 0,0029 \text{ NI/min}$. Toto měření s únikem je popsáno grafem 5-21.

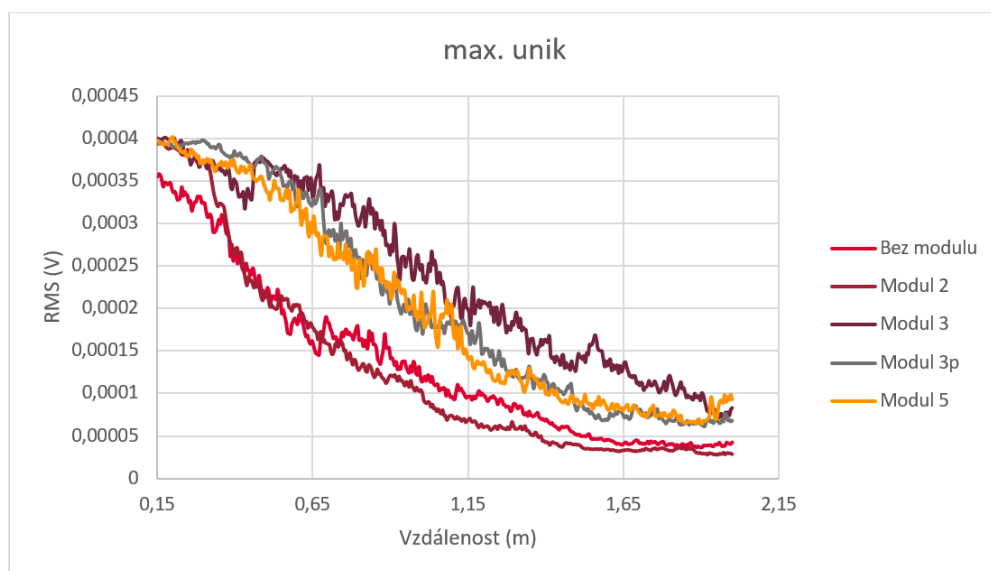
Na ose x je zde vzdálenost, která začíná na 0,15 m a končí na 2 m. Začátek je volen jako nejkratší vzdálenost při použití modulů, které mají právě 0,15 m. Na ose y je RMS ve voltech.



Obr. 5-21 Výsledky druhého měření -min únik

Je zde vidět, že použití modulů 3 a 3p vykazuje nejvyšší citlivost. Při takto malých únicích je znát i rozdíl mezi kuželovým a paraboloidním tvarem modulu a to obzvláště při malých vzdálenostech. Od cca 0,65 m mají charakteristiku téměř stejnou. Únik jako takový je při jejich použití detekovatelný až z cca 1 m. Modul 5 se zde ukazuje jako špatná varianta, neboť je nejméně kompaktní a přitom má vcelku špatnou citlivost. Je zřejmé, že modul 2 zůstává použitelný pouze pro krátké vzdálenosti cca do 30 cm. Jak však bylo již psáno výše, je vhodný spíše pro přesnější lokalizaci, takže horší citlivost zde nepředstavuje problém. Pro porovnání je zde i zobrazeno, jak vypadá měření bez modulu.

V druhé části měření byl nastaven únik větší a to konkrétně $Q_2 = 0,0044 \text{ Nl/min}$. Toto měření je popsáno grafem 5-22. Na tomto grafu je vidět, že při vyšších únicích je modul 2 z hlediska citlivosti téměř srovnatelný, ne-li horší než měření bez modulu. Zároveň se ukazuje, že při takto velkých únicích není tak důležité, jestli je modul kuželového nebo paraboloidního tvaru. Modul 3 se opět ukazuje jako nejvhodnější. Je zajímavé, že všechny moduly zde mají podobné charakteristiky a nejsou zde tak velké rozdíly jako u předchozích měření.

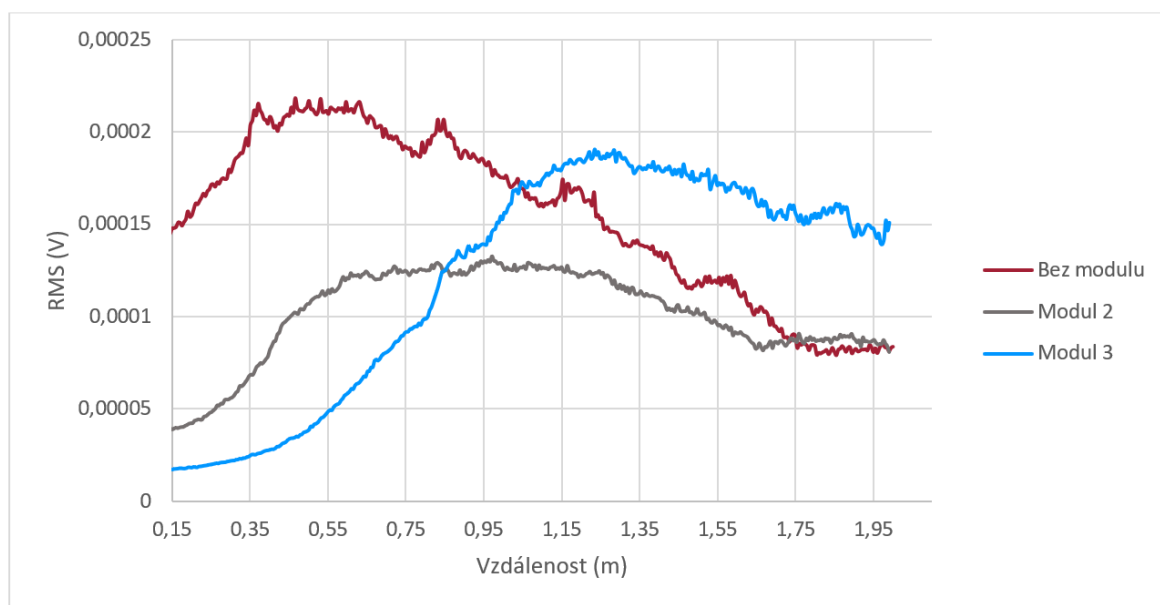


Obr. 5-22 Výsledky druhého měření -max únik

Posledním typem měření bylo měření při vyosení úniku. Únik byl vyosen o 15 cm a jeho velikost byla $Q = 0,0039 \text{ Nl/min}$. Toto měření je popsáno grafem 5-23. Na tomto grafu je vidět, že při použití modulu jsme schopni lokalizovat úniky buď z větší vzdálenosti nebo v případě, kdy se osa úniku blíží ose modulu.

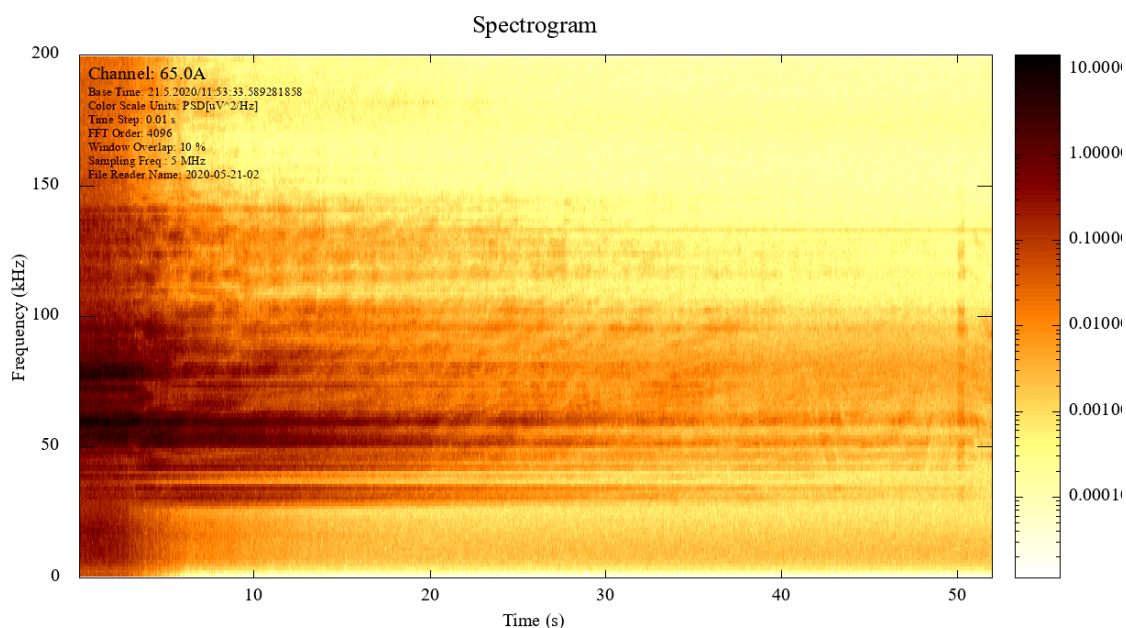
Citlivost, při měření bez použití modulu, nejprve krátce stoupá cca do 350mm a poté má až do konce měření klesající tendenci. K prvotnímu stoupání zde dochází díky tomu, že měřicí sonda se na počátku teprve dostává do oblasti ovlivněné únikem. Poté, co se do ní dostane, tak se začne pohybovat směrem od úniku, což způsobuje klesání citlivosti až do nulových hodnot. Podobné je to i při použití modulů. Modul 2 se zde ukazuje jako špatná varianta, neboť má ve všech vzdálenostech horší nebo stejnou citlivost jako bez použití modulu. Modul 3 se zde jeví jako dobrá varianta pro měření od cca 1 m.

Pro hledání úniků v krátkých vzdálenostech je proto vhodné provést první měření bez modulu. Díky tomu zjistíme, jestli se v dané části nějaké úniky nacházejí. Poté můžeme použít modul 2 a ten nám při krátkých vzdálenostech přímo lokalizuje únik. Pro měření při větších vzdálenostech je vhodné použít modul 3 pro přibližnou lokalizaci úniku a následně se přiblížit k úniku blíže a opět použít modul 2.



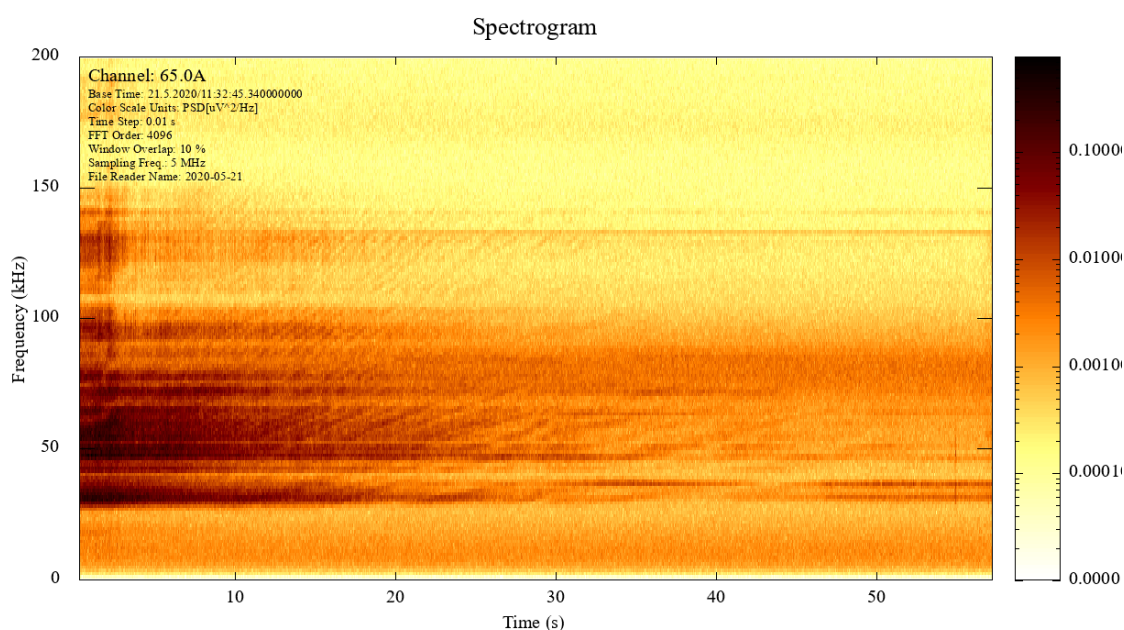
Obr. 5-23 Výsledky třetího měření

Podívejme se ještě, jak se s rostoucí vzdáleností mění spektrum signálu. Na obrázku 5-24 je vidět, jak se ultrazvukové spektrum mění v situaci, kdy se sonda pohybuje směrem od mikrofonu. V tomto případě jde konkrétně o sondu s modulem 3, která se pohybuje od 0,15 m do 2 m. Je zde vidět, že některé frekvence již po malé chvíli (tedy v ne příliš velké vzdálenosti sondy od místa úniku) rychle klesají, a naopak, že některé frekvence jsou intenzivní i na konci měření, kdy už sonda únik nebyla schopna detekovat. Ani jeden z výše zmiňovaných případů pro nás není zajímavý neboť to, že intenzita některých frekvencí hned zpočátku prudce klesá, znamená, že byl mikrofon sondy zahlcen a tedy není schopen podat pravdivou informaci o spektrálním složení signálu. Druhý případ je způsoben šumem okolí. Ve spektrogramu nám tedy zůstanou dvě poměrně velké oblasti s relativně plynule proměnným signálem. První je cca od 145 kHz do 110 kHz. V této oblasti sice nejsou frekvence tak intenzivní, avšak s časem (a tedy i vzdáleností) klesnou téměř na nulu. Je tedy jednodušší rozeznat, zda jde o únik nebo ne. Druhý velmi výrazný interval je cca od 25 kHz do 110 kHz. V tomto intervalu se nachází velmi intenzivní frekvence, ale tyto frekvence se vzdáleností tolik neklesají. Což znamená, že je v ní obsažena určitá část šumu.



Obr. 5-24 Spektrogram -při použití modulu 3

Oba tyto intervaly jsou pro nás z hlediska studia signálu akustické emise a hledání úniků zajímavé. Pro porovnání je na obr 5-25, ukázáno jak vypadá stejné měření bez použití modulu. Je zde vidět, že stupnice intenzity je zde 100x zmenšena oproti předchozímu spektrogramu. I přes to, že intenzita všech frekvencí je zde nižší, stále jsou zde ony dvě oblasti s plynule proměnným signálem. To dokazuje, že úniky vzduchu z pneumatických systémů vydávají ultrazvuk právě o těchto frekvencích. Dále si všimněme, že u zvuku slyšitelného lidským uchem (tedy cca. Do 20 kHz) se vyskytuje po celou dobu měření velká míra šumu. Za použití modulu (obr. 5-24) je při těchto frekvencích detekovatelný pouze z velké blízkosti a bez použití modulu (obr. 5-25) pak není detekovatelný vůbec. To dokazuje jednak to, že únik byl opravdu malý a zároveň to, že použití správného modulu je velmi důležité.



Obr. 5-25 Spektrogram -bez použití modulu

6 DISKUZE

Jak ukazuje obr 5-20, tak není vhodné volit vstupní průměr modulů menší než 11 mm. Takové moduly by měly výrazně nižší citlivost než moduly s větším vstupním průměrem a přesnější lokalizace úniku, která by při jejich použití byla možná, už je zbytečná. Za ideální vstupní průměr považuji 10-20 mm. Záleží ovšem na tom, jak přesná lokalizace je zapotřebí a jaké jsou upínací možnosti. Ve všech měřeních byla použita sonda, která měla vstupní průměr právě 11 mm. Proto bylo toto číslo zvoleno pro modul 2 jako vstupní průměr. Tento modul se tedy ukázal jako nejvhodnější pro přesnou lokalizaci úniku.

Pro hledání úniků z větších vzdáleností je dle provedeného experimentu vhodný vstupní průměr cca 60 mm. Modul s tímto vstupním průměrem vykazuje nejlepší citlivost ve všech vzdálenostech a i minimální nastavitelný únik je při jeho použití detekovatelný ze vzdálenosti až 1 m. Se vzrůstající velikostí úniku detekovatelná vzdálenost samozřejmě stoupá.

Důležitým faktem je také to, že zjišťujeme-li, jestli se v dané oblasti nějaký únik nachází a probíhá-li toto měření v krátkých vzdálenostech mezi měřicí sondou a místem, kde hledáme únik, je pro nás nejlepší nepoužít žádný modul a měřit pouze se sondou.

Další možností, jak zvýšit citlivost, je modifikovat tvar modulu. Z tohoto experimentu vyplývá, že paraboloidní tvar je lepší nebo při nejmenším stejně dobrý jako tvar kuželový. Paraboloidní modul, který byl použit při tomto experimentu navíc neměl ohnisko přímo v mikrofону, jelikož to nebylo možné díky konstrukci sondy.

Nutno říct, že parametry mnou zvolených modulů jsou pouze orientační a při dalších experimentech by tedy mohly být navrženy moduly s ještě větší citlivostí. Tato práce má však za úkol pouze stanovit přibližné rozměry modulů.

Další problém, který zde byl, bylo uchycení modulu na tělese sondy. Všechny prototypy, které byly v rámci toho experimentu vytvořeny, jsou opatřeny trubkovým závitem, díky čemuž jdou na těleso sondy snadno zašroubovat. Vnitřní průměr sondy je však pouze 11 mm, což vzhledem k délce upínacího válce (také 11 mm) nepovažuji za zcela vhodné řešení. Zvláště při použití rozšiřujícího modulu se díky tomu ztrácí nemalá část signálu. Za vhodnější považuji například použití bajonetového závitu, který vyžaduje podstatně kratší upínací délku než zde zvolený trubkový závit. Další možnosti pro upnutí představují například magnety. Modul by držel na svém místě až do doby, než by byla překročena síla potřebná pro jeho odepnutí. V neposlední řadě je tu také možnost použití hladkých upínacích válců, které by byly vyrobeny s určitým přesahem. Opět by pro upnutí nebo následné odepnutí byla zapotřebí určitá síla, větší než síla třecí mezi modulem a sondou.

7 ZÁVĚR

Cílem této práce bylo optimalizovat ultrazvukový detektor úniků pneumatického systému, který je vyvíjen na Ústavu konstruování ve spolupráci s firmou Poličské strojírny. Toho bylo dosaženo optimalizací modulů, které se umísťují na těleso sondy. V rámci této práce byl vytvořen experiment, který měl za úkol simulovat reálný únik a jeho měření. Na základě znalostí získaných z odborných článků pak byly navrženy prototypy modulů, které se následně testovaly při různých podmínkách.

Při návrhu jednotlivých modulů bylo zapotřebí brát v potaz tvar, vstupní průměr, ale i kompaktnost jednotlivých modulů. Jako materiál pro moduly bylo zvoleno PLA neboť jde o materiál, který je levný a lze ho snadno použít při 3D tisku.

Na základě získaných výsledků byly vybrány dva typy modulů a to modul s parabolickým tvarem a vstupním průměrem 60 mm, který je vhodný pro detekci úniků z větší vzdálenosti a válcový modul s průměrem 11 mm pro lokalizaci malých úniků.

Dílním cílem bylo také navrhnutí způsobu upnutí modulů k tělesu sondy. To bylo řešeno jednoduše vložením kovové redukce do plastového modulu. Nasazení, popřípadě výměna modulů se potom prováděla šroubováním a následným odšroubováním jednotlivých modulů.

Všechny cíle této bakalářské práce byly splněny.

8 CITACE

- [1] Moon, C., Brown, W., Mellen, S., Frenz, E. et al., "Ultrasound Techniques for Leak Detection," SAE Technical Paper 2009-01-2159, 2009, <https://doi.org/10.4271/2009-01-2159>.
- [2] *Úniky stlačeného vzduchu* [online]. Praha: Kompresory Vzduchotechnika, 2017 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/poradna/uniky-stlaceneho-vzduchu/>
- [3] *Měření průtoků stlačeného vzduchu* [online]. Praha: Kompresory Vzduchotechnika, 2017 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://www.kompresory-vzduchotechnika.cz/poradna/uniky-stlaceneho-vzduchu/>
- [4] KOPEC, Bernard. Nedestruktivní zkoušení materiálů a konstrukcí: (nauka o materiálu IV). Vyd. 1. Brno: Akademické nakladatelství CERM, 2008, 571 s. ISBN 978-80-7204-591-4
- [5] *Prof. Ing Bohumil MÍŠEK, DrSc.* Brno: TESIYO s.r.o, 2014. ISBN 978-80-87102-09-1.
- [6] *Střední volná dráha* [online]. Praha: MFF UK, 2009 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: https://physics.mff.cuni.cz/kfpp/skripta/kurz_fyziky_pro_DS/display.php/molekul/6_2
- [7] CARLTON, JS. *Marine Propellers and Propulsion*. 2. Singapore: Elsevier, 2007. ISBN 978-0-7506-8150-6.
- [8] *EQUATION OF STATE* [online]. Moscow: Russian Academy of Science, 2011 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <http://www.thermopedia.com/content/734/>
- [9] *ZÁKON CHARLESŮV* [online]. Praha: Mgr. Magda Králová, 2012 [cit. 2020-06-22]. Dostupné z: <https://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/plyny/stavove-zmeny/zakon-charlesuv>
- [10] WANG, M.L., ed. *Sensor Technologies for Civil Infrastructures*. 2. Singapore: Elsevier, 2014. ISBN 978-1-78242-242-6.
- [11] *ULTRAPROBE® 10000SD* [online]. Brno: UE Systems, 2016 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.uesystems.com/wp-content/uploads/manual-cz-UP10000SD.pdf>
- [12] *Systém DAKEL-ZEDO* [online]. Brno: DAKEL, 2017 [cit. 2020-06-24]. Dostupné z: <https://www.dakel.cz/index.php?pg=prod/dev/zedo>

9 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

Q	m^3/s	-velikost úniku
Q_k	m^3/s	-množství stlačeného vzduchu dodávané kompresorem
V	m^3	-objem
P_1, P_2	Pa	-tlaky
t	s	-čas
Re	-	-Reynoldsovo číslo
ρ	kg/m^3	-hustota
D	m	-průměr
v	m/s	-rychlost
η	$N \cdot s/m^2$	-kinematická viskozita
L	m	-délka
C	-	-výtokový součinitel
γ	-	-Poissonova konstanta
x	-	- koeficient
T	K	-teplota

10 SEZNAM OBRÁZKŮ A GRAFŮ

Obr. 2-1	Schéma zapojení pro měření celkových ztrát	15
Obr. 2-2	Závislost tlaku na čase při měření pracovních cyklů kompresoru	16
Obr. 3-3	Schéma ponořovací bublinkové metody	20
Obr. 3-4	Schéma nanášecí bublinkové metody	21
Obr. 3-5	Schéma komůrkové bublinkové metody	22
Obr. 3-6	Schéma přímého měření změn tlaku	23
Obr. 3-7	Schéma referenčního měření změn tlaku	24
Obr. 3-8	Schéma měření volného objemu	25
Obr. 3-9	Schéma hledání netěsností za pomoci zkušebního plynu	26
Obr. 3-10	Výsledek měření za použití vibro-akustické metody	28
Obr. 4-11	DAKEL-ZEDO	33
Obr. 4-12	Analyzátor DAKEL- BAT3	34
Obr. 4-13	Měřicí sonda	35
Obr. 4-14	Možnosti upnutí sondy	36
Obr. 4-15	Příprava experimentu	37
Obr. 4-16	Redukce vyčnávající ze sondy	39
Obr. 4-17	Schémata jednotlivých modulů	39
Obr. 4-18	Řez počítačového modelu měřicí sondy s upnutým modulem 3	40
Obr. 5-19	Vyhodnocení prvního měření	42
Obr. 5-20	Závislost průměrné citlivosti na vnějším průměru modulu	43
Obr. 5-21	Výsledky druhého měření -min únik	44
Obr. 5-22	Výsledky druhého měření -max únik	45
Obr. 5-23	Výsledky třetího měření	46
Obr. 5-24	Spektrogram -při použití modulu 3	47
Obr. 5-25	Spektrogram -bez použití modulu	48

11 SEZNAM TABULEK

Tab. 4-1 Charakteristiky jednotlivých modulů

39

12 SEZNAM PŘÍLOH

Příloha 1: Počítačové modely modulů