

Metoda kvantifikace míry netěsnosti (LRQ) pro akustické kamery

Toros Senan,

PhD., výzkumný pracovník v oblasti akustiky

Úvod

Existuje mnoho aplikací, které vyžadují detekci netěsností. Mezi nejznámější a ve výrobních závodech nejčastěji používané aplikace patří systémy stlačeného vzduchu.

Stručné shrnutí funkcí zařízení ii900/ii910

Zařízení ii900/ii910 využívají 64 mikrofonů uspořádaných do soustavy ve speciálním tvaru. Uprostřed této soustavy se nachází kamera pro viditelné světlo vytvářející vizuální obraz scény. Zařízení vytváří pomocí složitých algoritmů zvukovou mapu neboli snímek zdrojů zvuku a pak prolnou vytvořenou zvukovou mapu s tímto obrazem. V závislosti na poloze zdroje zvuku a s ohledem na zorné pole zařízení ii900/ii910 přijímají jednotlivé mikrofony zvuk s nepatrným časovým posunem. Tento časový posun mezi mikrofony umožňuje zjistit místo, kde se nachází zdroj zvuku: Pokud zvuk přichází z pravé strany zařízení, dostane se do mikrofonů na pravé straně soustavy o zlomek sekundy dříve než do mikrofonů na levé straně. Zařízení ii900/ii910 zobrazí mapu zdrojů zvuku na pravé straně obrazovky.

Jak zařízení ii900/ii910 zjišťuje netěsnosti?

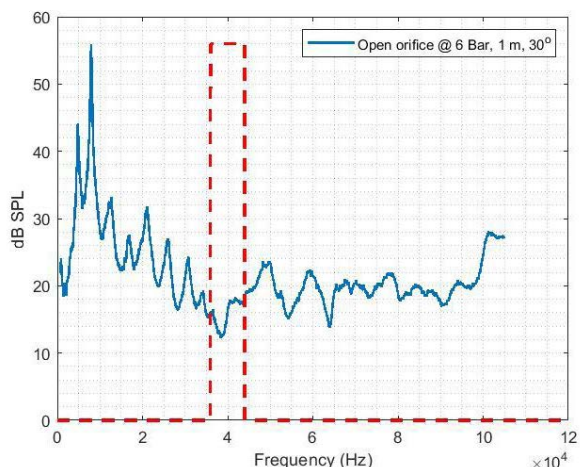
V případě výskytu netěsnosti v tlakovém systému způsobí molekuly unikajícího plynu (vzduchu) turbulenci, která způsobí rychlé změny tlaku a rychlosti proudění. Tyto změny mohou být přenášeny jako zvukové vlny. Zařízení ii900/ii910 dokáže detekovat místo vzniku a intenzitu těchto zvukových vln.

Stlačený vzduch unikající do okolní atmosféry vytváří širokopásmový šum jak ve slyšitelném, tak v ultrazvukovém frekvenčním pásmu (Eret a Meskell, 2012; Holstein a kol., 2016). V průmyslových systémech stlačeného vzduchu jsou k lokalizaci netěsností v rozsáhlém měřítku využívány úzkopásmové ultrazvukové snímače (se střední frekvencí 40 kHz). Nicméně použití úzkopásmového ultrazvukového snímače přináší určitá omezení.

Účinnost ultrazvukových snímačů ovlivňují především dva základní faktory, kterými jsou vzdálenost mezi místem netěsnosti a měřicím zařízením a úhel měření: Zaprvé, vysokofrekvenční zvuk je rychle utlumen atmosférickou absorpcí (viz Wolstencroft a Neale, 2008).

Zadruhé, hladina akustického tlaku vytvářená únikem stlačeného vzduchu se liší v závislosti na úhlu měření (Wolstencroft a Neale, 2008). Navíc je známo, že hlučná prostředí zhoršují vlastnosti úzkopásmových ultrazvukových snímačů (Eret a Meskell, 2012). Uživatelé mohou výše uvedená omezení kompenzovat použitím širokopásmových snímačů, které pracují jak ve slyšitelném, tak v ultrazvukovém frekvenčním pásmu. Poskytovaná flexibilita ohledně rozsahu frekvencí zvyšuje robustnost systému detekce netěsností. Například na obrázku 1 je patrné, že stlačený vzduch unikající otevřeným otvorem pod tlakem systému 6 bar vytváří širokopásmový šum. Obrázek 1 ukazuje, že frekvenční oblast s nejvyšší naměřenou hladinou akustického tlaku se nachází ve slyšitelném pásmu. Naproti tomu hladina akustického tlaku naměřená ve frekvenčním pásmu 35 až 45 kHz (ohrazeněm na obrázku 1 červenými přerušovanými čarami) je znatelně nižší než u zbývajících částí spektra.





Obrázek 1: Stlačený vzduch unikající přes otevřený otvor (1/4 palce). Měření bylo provedeno zařízením ii910 ze vzdálenosti 1 metru od zdroje netěsnosti, pod úhlem 30 stupňů. Modrá čára zobrazuje vyhlazené spektrum a červená přerušovaná čára označuje frekvenční oblast kolem 40 kHz.

Existuje omezený počet studií, které zkoumají frekvenční charakteristiky zvuků unikajícího stlačeného vzduchu. Ve studii, kterou vypracovali Holstein a kol. (2016), byla prezentována frekvenční spektra měření úniku stlačeného vzduchu pro systematicky zvyšovaný průtok (viz obr. 2, Holstein a kol., 2016). Zdrojem netěsnosti byl otevřený kruhový otvor a měření byla prováděna ze vzdálenosti 20 cm od tohoto zdroje. Frekvenční spektra ukazují, že se zvyšujícím se průtokem dochází ke zvýšení energie nad 50 kHz. Pro nejvyšší průtok naměřený v uvedeném experimentu dosáhlo frekvenční spektrum špičkové hodnoty přibližně 80 kHz.

Faktory ovlivňující detekci netěsností

V této části jsou samostatně popsány faktory, které ovlivňují detekci netěsností. Je nutné poznamenat, že faktory vysvětlené v této části na sebe vzájemně působí, a měly by být proto považovány za jednotlivé složky rozsáhlého a složitého jevu.

Faktory zdroje netěsnosti:

1. Tlak v systému

Obecně platí, že čím vyšší je tlak v systému, tím větší je únik, a tedy i vyšší intenzita zvuku, což usnadňuje detekci.

2. Průtok

Stejně jako u tlaku platí, že čím vyšší je průtok v soustavě, tím větší je únik, a tedy i vyšší intenzita zvuku naměřená v místě netěsnosti. Vyšší intenzita zvuku usnadňuje akustickou detekci.

3. Velikost a tvar otvoru

Velikost a tvar otvoru je nutné posuzovat společně. Když vezmeme v úvahu širokou škálu možných úniků vzduchu, brzy zjistíme, že je

obtížné poskytnout vodítko pro stanovení vlivu tvaru a velikosti na detekci netěsností. Tento seznam obsahuje některé z možných zdrojů netěsností. Velikost i tvar otvoru se pro každou položku z tohoto seznamu liší. Vzduchové hadice a připojení nebo spojky vzduchových hadic

- Opotřebená rozpojení nebo rozpojení s chybějícími těsnicemi O-kroužky
- Nesprávně instalované filtry, maznice nebo regulátory
- Otevřené výpusti
- Otevřené odlučovače kondenzátu
- Netěsná nebo neodborně sestavená odtoková vedení
- Vadné, nekvalitní nebo nesprávně aplikované těsnicí materiály pro závit
- Regulační a uzavírací ventily
- Opotřebená plochá nebo jiná těsnění
 - Staré nebo nesprávně udržované pneumatické nástroje
 - Odstavené nebo nepoužívané stroje či výrobní zařízení se vstupem vzduchu

Plyn	Vzorec	Po (kg/m ³)
Acetylen	C ² H ²	1,173
Vzduch	–	1,2929
Čpavek	NH ³	0,7710
Argon	A	1,7837
Oxid uhličitý	CO ²	1,977
Oxid uhelnatý	CO	1,250
Chlór	Cl ²	3,214
Etan (10 °C)	C ² H ⁶	1,356
Etylen	C ² H ⁴	1,260
Helium	He	0,1785
Vodík	H ²	0,0899
Sirovodík	H ² S	1,539
Metan	CH ⁴	0,7168
Neon	Ne	0,9003
Oxid dusnatý (10 °C)	NO	1,34
Dusík	N ²	1,2506
Oxid dusný	N ² O	1,977
Kyslík	O ²	1,429
Propan	C ³ H ⁸	2,9009
Oxid siřičitý	SO ²	2,927
Pára (100 °C)	H ² O	0,598
Fluorid sírový**	SF ⁶	6,17
Chladivo R134a***	CH ² FCF ³	14,433

Tabulka 1: Seznam hodnot hustoty plynů. Hustota plynu (po) při teplotě 0 °C a tlaku 1 atm*

*Handbook of Chemistry and Physics (Příručka chemie a fyziky). 48. vyd.

**https://en.wikipedia.org/wiki/Sulfur_hexafluoride

***https://www.engineeringtoolbox.com/r134a-properties-d_1682.html

Vlastnosti tekutin

Vlastnosti tekutin ovlivňují zvuk, který vzniká při jejich úniku z místa netěsnosti.

4. Hustota

Níže uvedená tabulka obsahuje hustotu plynů v kg/m³ při teplotě 0 °C a tlaku 1 atm. Hustota plynu má vliv na intenzitu zvuku, který vydává unikající plyn. Například při srovnání hélia a stlačeného vzduchu za předpokladu, že budou mít stejný průtok a tlak, nízká hustota hélia způsobí, že v místě netěsnosti bude naměřena nižší hladina akustického tlaku než u stlačeného vzduchu. Zkušenosti z praxe potvrzují, že detekce úniku hélia je obtížná.

5. Viskozita

Viskozita plynu ovlivňuje hladinu akustického tlaku v místě netěsnosti. Nicméně míra jejího vlivu je menší než u hustoty.

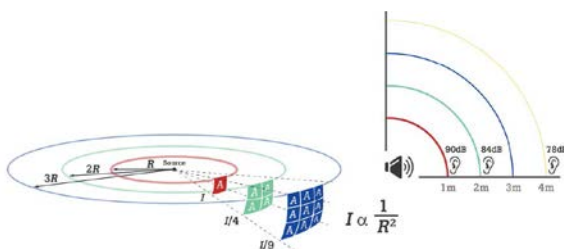
6. Okolní teplota

V úvahu je nutné vzít také okolní teplotu, a to jak u zdroje netěsnosti, tak u dráhy unikajícího plynu. V případě zdroje netěsnosti ovlivní okolní teplota hustotu a viskozitu. Oba tyto faktory změni hladinu akustického tlaku v místě netěsnosti. Se zvyšující se okolní teplotou se zvyšuje i kinetická energie molekul, což vede ke zvýšené intenzitě zvuku v místě netěsnosti.

7. Okolní tlak

Okolní tlak má přímý vliv na hustotu plynu. Při poklesu okolního tlaku se sníží hustota, a tedy i intenzita zvuku v místě netěsnosti.

Faktory dráhy a atmosférické vlivy



Při zdvojnásobení vzdálenosti mezi zdrojem zvuku a místem měření v terénu se intenzita zvuku sníží o 6 dB.

8. Vzdálenost místa netěsnosti od měřicího zařízení

Vzdálenost, z které probíhá měření, ovlivňuje naměřenou hladinu akustického tlaku. Při šíření zvuku všemi směry od zdroje klesá se zvyšující se vzdáleností jeho intenzita.

9. Okolní teplota

Změny okolní teploty mohou vést ke změnám hustoty i viskozity plynů. Oba tyto faktory zase ovlivňují rychlost zvuku, když prochází médii. Čím je teplota vyšší, tím se zvuk šíří rychleji. Změna okolní teploty je jedním z mechanismů, které ovlivňují množství akustické energie absorbované atmosférou. Při nízkých frekvencích a krátkých vzdálenostech je vliv teploty na absorpci vzduchem zanedbatelný (Harris, 1966). Avšak u velmi vysokých frekvencí a dlouhých vzdáleností se hladina akustického tlaku může znatelně snížit (Vladišauskas a Jakevičius, 2004).

10. Vlhkost

Druhým mechanismem, který ovlivňuje hladinu akustického tlaku v důsledku absorpce vzduchem, je vlhkost. Stejně jako v případě okolní teploty je vliv vlhkosti na hladinu akustického tlaku za normálních podmínek zanedbatelný (Harris, 1966). Dopad je zřejmý u velmi vysokých frekvencí a vysokých úrovní vlhkosti (Vladišauskas a Jakevičius, 2004).

11. Okolní tlak

Při uvažování ideálního plynu okolní tlak neovlivňuje hladinu akustického tlaku, protože hustota vzduchu a tlak plynu mají podobné, avšak inverzní účinky na rychlost zvuku. Tyto dva faktory se tak vzájemně vruší. Z tohoto důvodu není očekáván žádný rozdíl mezi hladinou akustického tlaku v místě netěsnosti a v místě měření v důsledku působení okolního tlaku.

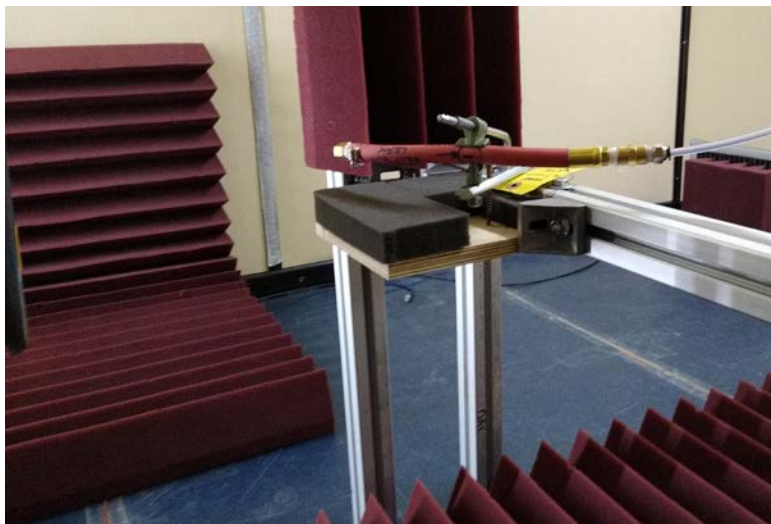
Jaké vlastnosti netěsnosti zařízení ii900/ii910 měří?

Zařízení ii900/ii910 odhaluje typ netěsnosti a odhaduje průtok unikající látky na základě akustických dat. Byla navržena a provedena sada laboratorních zkoušek, která umožnila vyvinout klasifikaci typů netěsností a algoritmy predikce průtoku.

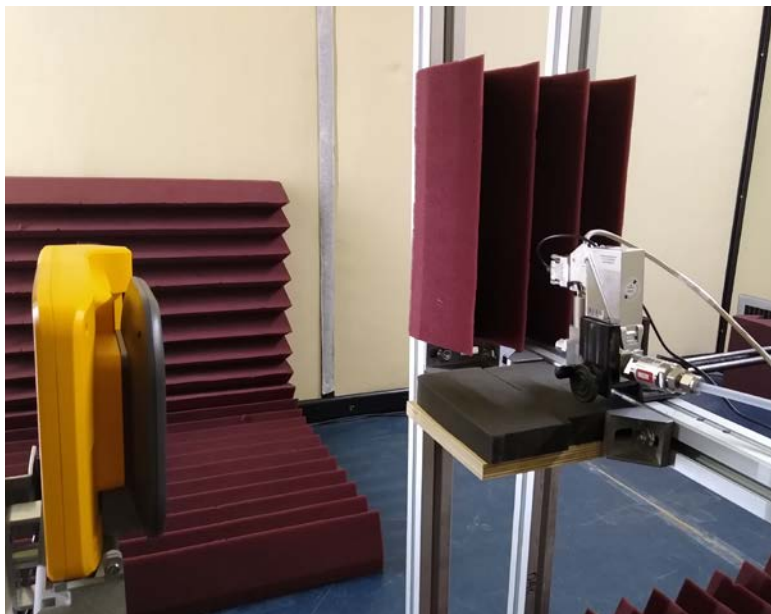
Klasifikace typů netěsností zařízením ii900/ii910

Zařízení ii900 a ii910 klasifikují zjištěné netěsnosti s využitím zaznamenaných akustických dat podle místa, kde se netěsnost vyskytuje: hadice, otevřený konec, rychlospojka nebo závitová spojka. Čtyři klasifikace, čtyři typy netěsností, byly instalovány na konec potrubního systému stlačeného vzduchu, přičemž akustická měření byla prováděna v částečně bezdozvukové komoře. Dva příklady zkušební sestavy jsou zobrazeny na obr. 3 a obr. 4. Na obr. 5 jsou zachyceny spojovací díly, které vytvářely čtyři stavy netěsnosti pro potřeby experimentu.

1. **Hadice:** Hadice je pružná trubice, která umožňuje snadnou instalaci vedení. Avšak na rozdíl od kovové nebo mosazné trubky je vyrobena z citlivějšího materiálu. Z tohoto důvodu může po celé délce hadic, které spojují vzduchový kompresor s pneumatickými zařízeními, snadno dojít k proříznutí nebo vytvoření dír. K zaznamenání akustických dat o netěsnosti hadice pro účely klasifikace a predikce průtoku byla použita proříznutá hadice (obr. 3 a obr. 5a).
2. **Otevřený konec:** Trubka s otevřeným koncem nebo otevřený otvor představují nejběžnější typ netěsnosti používaný ve vědeckých studiích (reference). Dochází k němu, když je trubka nebo část potrubní sítě systému stlačeného vzduchu ponechána otevřená. Při zkouškách pro klasifikaci a predikci průtoku byla během vývojové fáze zařízení ii900 použita trubka s otevřeným koncem (obr. 4 a obr. 5b).
3. **Rychlospojka:** Rychlospojky umožňují snadno a rychle provést připojení a rozpojení. Rychlospojky využívají zešikmení, která lze zasunout v jednom směru, a jsou odolné proti tahu v opačném směru. Pokud stlačený vzduch uniká přes rychlospojku, je obvykle příčinou poškození jednoho nebo více těchto vnitřních zešikmení. Vzduch se rozptýluje kolem spojky a směr unikajícího stlačeného vzduchu se v jednotlivých případech liší podle deformace. Pro akustická měření během vývoje algoritmů klasifikace a predikce průtoku pro zařízení ii900/ii910 byla použita deformovaná rychlospojka (obr. 5c).



Obrázek 3: Měření netěsnosti typu hadice pod úhlem 30 stupňů.



Obrázek 4: Zkušební sestava pro měření netěsnosti typu otevřený konec pod úhlem 90 stupňů.



Obrázek 5: Čtyři typy netěsností, které byly zkoumány během zkoušek: hadice (a), otevřený konec (b), rychlé spojení (c) a závitová spojka (d).

4. **Závitová spojka:** Pro koncové body systému stlačeného vzduchu jsou běžně používány koncovky se závitem. Koncovky se závitem musí být pečlivě umístěny a správně instalovány, pokud jde o počet závitů, které se musí zasunout do koncové trubky. Techničtí pracovníci mohou někdy nechat tyto koncové sekce uvolněné. Kromě toho se koncovky se závitem mohou při mnoha použitích zdeformovat. V takových případech stlačený vzduch uniká přes koncovku, a tím nepříznivě ovlivňuje účinnost systému. Jako zdroj netěsnosti byla při zkouškách použita nedostatečně utažená koncovka se závitem (obr. 5d).

Index kvantifikace míry netěsnosti

Zařízení ii900/ii910 poskytuje odhad průtoku v místě netěsnosti na základě zaznamenaných akustických dat. Algoritmy stanovení průtoku byly navrženy na základě výsledků laboratorních měření, která byla provedena v částečně bezdozvukové komoře. Vzhledem k rozdílným akustickým charakteristikám jednotlivých typů netěsnosti existuje pro každý typ netěsnosti jeden algoritmus predikce průtoku. Z tohoto důvodu jsou algoritmy pro odhad průtoku používány až po fázi klasifikace.

Předpovídaný průtok daného typu netěsnosti je poté převeden na index kvantifikace míry netěsnosti (LRQ). LRQ nabývá hodnoty od 0 do 10. Vyšší hodnota LRQ vyjadřuje větší průtok v místě netěsnosti a lze ji považovat za doporučení k provedení opravy.

Závěry

Zařízení ii900/ii910 poskytuje efektivní frekvenční rozsah a uživatelsky optimalizované řešení ručního zařízení, jehož cílem je snížit obtížnost detekce netěsnosti a poskytnout kvantifikaci. Funkce stanovení LRQ je velmi důležitá pro zachování účinnosti systému stlačeného vzduchu a funkce pro poskytování zpráv urychlují komunikaci mezi technikou údržby.

Reference

- Eret, P.; Meskell, C. (2012). Microphone arrays as a leakage detection tool in industrial compressed air systems (Mikrofonní pole jako nástroj pro detekci netěsnosti v průmyslových systémech stlačeného vzduchu). *Advances in Acoustics and Vibration* (Pokrok v oblastech akustiky a vibrací), 2012.
- Harris, C. M. (1966). Absorption of sound in air versus humidity and temperature (Absorpce zvuku ve vzduchu ve vztahu k vlhkosti a teplotě). *Časopis Journal of the Acoustical Society of America*, 40 (1), str. 148–159.
- Holstein, P.; Barth, M.; Probst, C. (2016). Acoustic methods for leak detection and tightness testing (Akustické metody pro detekci úniků a zkoušky těsnosti). Sborník z 19. světové konference o nedestruktivním testování (str. 13–17).
- Vladišauskas, A.; Jakevičius, L. (2004). Absorption of ultrasonic waves in air (Absorpce ultrazvukových vln ve vzduchu). *Ultragarsas*, 50 (1), str. 46–49.
- Wolstencroft, H.; Neale, J. (2008). Characterisation of compressed air leaks using airborne ultrasound (Charakterizace úniků stlačeného vzduchu pomocí vzduchem přenášeného ultrazvuku). Sborník z konference Acoustics 2008 (AAS'08).

Fluke. *Keeping your world up and running.*®

Fluke Europe B.V.
P.O. Box 1186
5602 BD Eindhoven
The Netherlands
Tel: +31 4 0267 5406
E-mail: cee.cs@fluke.com
www.fluke.cz

©2020–2021 Fluke Corporation. Všechna práva vyhrazena. Případné změny jsou vyhrazeny bez předchozího upozornění.
06/2021 210581-cs

Změny tohoto dokumentu nejsou povoleny bez písemného schválení společnosti Fluke Corporation.