



Article

# MERANIE PRIETOKU NA DVOCH PROFILOVO AJ MATERIÁLOVO ROZDIELNYCH POTRUBIACH ROZVODU STLAČENÉHO VZDUCHU VÝROBNÉHO PROCESU PRÍLOŽNÝM PRIETOKOMEROM

Ján IEKO<sup>1</sup> - Michal VILČKO<sup>2</sup>

## FLOW MEASUREMENT ON TWO COMPRESSED AIR DISTRIBUTION PIPELINES OF DIFFERENT PROFILES AND MATERIALS IN A PRODUCTION PLANT USING CLAMP-ON FLOW METER

INTEGRATED SAFETY OF THE ENVIRONS

INTEGRATED SAFETY OF ENVIRONS '2023

<sup>1</sup> EMERSON-FleximGmbH, Berlin, Bundesrepublik Deutschland / Slovenská spoločnosť chemického inžinierstva, Bratislava, Slovenská republika

ORCID iD: 0009-0000-4696-7194

<https://orcid.org/0009-0000-4696-7194>

<sup>2</sup> SMC Automation, Košice, Slovenská republika

*Competing interests : The author declare no competing interests.*

*Publisher's Note: Slovak Society for Environment stays neutral with regard to jurisdictional claims in published maps and institutional affiliations. Copyright: © 2023 by the authors.*



*This article is an open access article distributed under the terms and conditions of the Creative Commons Attribution (CC BY) license (<https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/>) This license allows reusers to distribute, remix, adapt, and build upon the material in any medium or format, so long as attribution is given to the creator. The license allows for commercial use.*

*Review text in the conference proceeding: Contributions published in proceedings were reviewed by members of scientific committee of the conference. For text editing and linguistic contribution corresponding authors.*

*Slovak Society for the Environment ( Slovenská spoločnosť pre životné prostredie ) Bratislava, Slovak Republic*

### ABSTRAKT

Stlačený vzduch je náročné energetické médium. Pre zabezpečenie spoľahlivého chodu celého pneumatického systému je dôležité vykonávať periodické kontroly a údržbu. Počas prevádzky staníc stlačeného vzduchu sú kompresory takmer nepretržite v prevádzke. Pri stálom zaťažovaní dochádza k opotrebovaniu dielov pneumatického systému, čo vedie k nežiaducim únikom a tým aj energetickým stratám. Pomocou on-line merania prietoku je možné vykonávať kontrolu spotreby vzduchu na jednotlivých vetvách a tiež detekovať úniky stlačeného vzduchu. Definovaním správnych meracích



bodov je možné únik vzduchu lokalizovať. Štúdia pojednáva o meraní stlačeného vzduchu v prevádzke výrobného závodu na dvoch rozdielnych vetvách. Zahŕňa popis a vyhodnotenie meraní a možnosti využitia pre energetický manažment, údržbu, a technický personál pre zabezpečenie spoľahlivého chodu prevádzky.

**Príčné slová:** *Stlačený vzduch, systém distribúcie vzduchu, meranie prietoku*

## ABSTRACT

Compressed air is a demanding energy medium. To ensure the reliable operation of the entire pneumatic system, it is important to carry out periodic inspections and maintenance. During operation of compressed air stations, compressors are almost continuously in operation. With constant loading, parts of the pneumatic system wear out, which leads to unwanted leaks and thus energy losses. Using online flow measurement, it is possible to check air consumption on individual lines and also detect compressed air leaks. By defining the correct measuring points, the air leak can be located. This study discusses the measurement at compressed air lines in operation of a production plant on two different pipes. It includes a description and evaluation of measurements and application possibilities for energy management, maintenance, and technical personnel to ensure reliable operation.

**Key words:** *Compressed Air, Air distribution system, Flow metering*

## Úvod

Výrobné závody využívajúce stlačený vzduch majú často problém so stratami stlačeného vzduchu spôsobenými netesnosťami na rozvodoch alebo priamo na pneumatikách častiach strojov. Počas prevádzky technológie je takmer nemožné nájsť únik z dôvodu veľkého hluku. Zvyčajne sú úniky veľmi malé, na ventiloch, pneumatikách pohonoch, piestoch, atď. Moderné stroje majú špeciálny program na sekvenčné spínanie pneumatikých systémov a tak dokážu lokalizovať problém. Pomocou ultrazvukového monitora prietoku vo vhodnej konfigurácii meracích bodov je možné systém priebežne kontrolovať celkovo aj lokálne. V nasledujúcej štúdii je ukážka praktického merania na dvoch potrubiach rozdielnych materiálov a geometrie. Je tu poukázané na správne osadenie senzorov, zber nameraných údajov vrátane diagnostických parametrov a v diskusii je rozbor z pohľadu správnosti, spoľahlivosti aj presnosti meraní.

## Stlačený vzduch ako energetické médium

Energetická náročnosť Slovenska je jedna z najvyšších v členských štátoch Európskej únie.<sup>1</sup> Stlačený vzduch je zvyčajne jedným z najdrahších médií v priemyselnom sektore. Pri navrhovaní energeticky úsporných systémov stlačeného vzduchu sa používajú rôzne metódy na zníženie strát energie a minimalizáciu spotreby energie.<sup>2</sup> Energetická účinnosť mnohých systémov stlačeného vzduchu je však nízka. Zlepšenia v rozsahu od 5 do 50 % sú možné, ale pri súčasných trhovách a rozhodovacích mechanizmoch sa nerealizuje veľký technický a ziskový potenciál úspor.<sup>3</sup> Voľba požadovanej hodnoty výrazne ovplyvňuje spotrebu energie.<sup>4</sup>

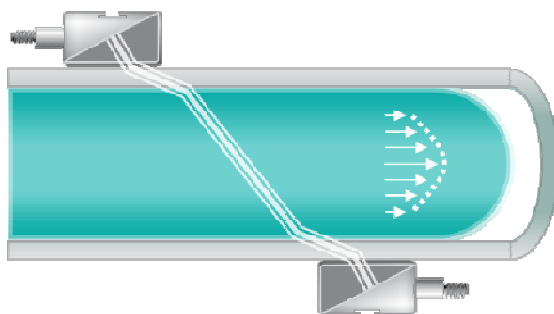
Stlačený vzduch je jedna z najmenej účinných foriem energie. Len asi 10 – 30 % stlačeného vzduchu sa dostane na miesto konečného použitia, zatiaľ čo zvyšok sa stratí ako tepelná energia a v menšej miere z úniku a neefektívneho využitia.<sup>5</sup> Typický systém stlačeného vzduchu sa skladá z rôznych komponentov, ako je vzduchový kompresor, sušiče vzduchu, filtre, chladiče, rozvetvené potrubia, ventily, dýzy a ovládače. Každá z týchto zložiek predstavuje potenciál pre stratu energie vo forme straty prietoku alebo tlaku v systéme. Vo fáze vývoja systému stlačeného vzduchu alebo dokonca v období používania existuje mnoho ďalších dôležitých faktorov, ako je veľkosť kompresora alebo určenie riadiaceho systému, ktoré majú veľký vplyv na energetickú účinnosť systému a tieto by sa mali vziať do úvahy.<sup>6</sup> Prekážkami môžu byť nesprávne spotrebiteľské správanie, dodatočne realizované energeticky úsporné opatrenia, resp. vžitie stereotypy.<sup>7</sup>



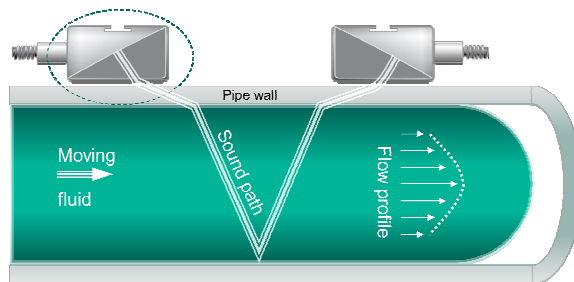
## Metódy

Ultrazvukové metódy majú dôležité výhody pri meraní prietoku plynu, vrátane schopnosti merať takmer akýkoľvek plyn alebo zmes plynov v širokom rozsahu tlaku. Ultrazvukové prietokomery plynu sú tiež schopné merať obojsmerný prietok bez straty tlaku.<sup>8</sup> Ultrazvukové zariadenie poskytuje spoľahlivé meranie, či je tekutina jednofázová alebo nie, zariadenie sa ľahko používa, režim prúdenia môže byť laminárny, prechodný alebo turbulentný, prevodníky sú pre vonkajšiu montáž, žiadny pokles prevádzkového tlaku. Ak sú splnené určité podmienky, presnosť môže byť lepšia ako 0,5 %. Vyznačujú sa rýchlou odozvou, napriek tomu je to spoľahlivá metóda aj pri teplotných extrémoch, primeraná obstarávacia cena, nízke náklady na inštaláciu, prevádzku a údržbu.<sup>9</sup> Meranie prietoku plynov pomocou ultrazvuku sa dlho považovalo za ťažšie ako meranie kvapalín, v skutočnosti je meranie jednoduchšie v dvoch dôležitých ohľadoch. Jedným z nich je metódou kontrapropagácie časový rozdiel proti prúdu a po prúde vo všeobecnosti oveľa väčší pre plyny v dôsledku oveľa nižších rýchlostí zvuku v plynoch v porovnaní s kvapalinami. Ďalším významným faktorom, ktorý sa stáva dôležitým pri meraní hmotnostného prietoku, je existencia teoretických a/alebo empirických vzťahov medzi šírením ultrazvuku a hustotou, pričom ktorýkoľvek z týchto vzťahov je jednoduchšie využiť tak pre plyny ako aj pre kvapaliny.<sup>10</sup>

V tejto štúdii boli vybraté dve potrubia so stlačeným vzduchom vo výrobnej technológii. Pre obe merania boli zvolené rozdielne konfigurácie osadenia ultrazvukových prevodníkov pre možnosť porovnania výsledkov merania pre dva najčastejšie modely merania. Prvé meranie bolo na potrubí z nerez, vonkajšieho priemeru 54,0 mm s hrúbkou steny 1,4 mm. Druhé meranie na potrubí z uhlíkovej ocele, vonkajšieho priemeru 162,3 mm s hrúbkou steny 4,5 mm. Pre meranie na potrubí 1 bola zvolená konfigurácia SP1 (SoundPath 1) ako je ukázané na obr. 1 a pre meranie na potrubí 2 bola zvolená konfigurácia SP2 (SoundPath 2) ako je ukázané na obr. 2.



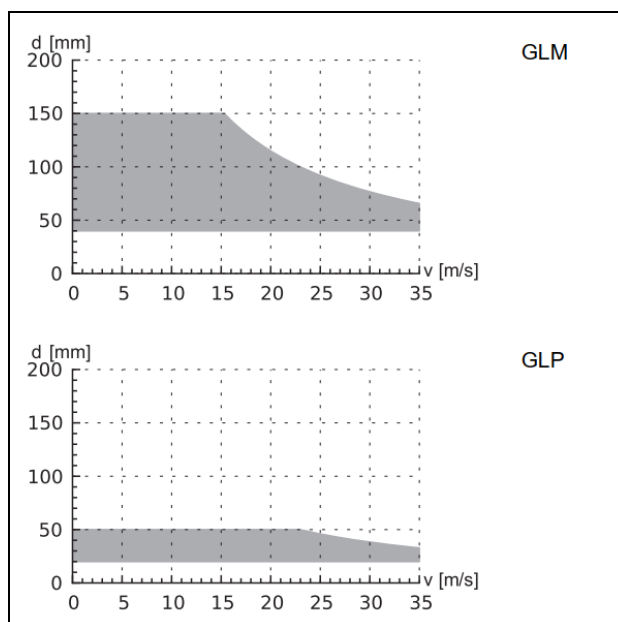
Obr. 1 Osadenie senzorov v konfigurácii SoundPath 1 – meranie na potrubí 1, vonk. priemer: 54 mm.<sup>11</sup>



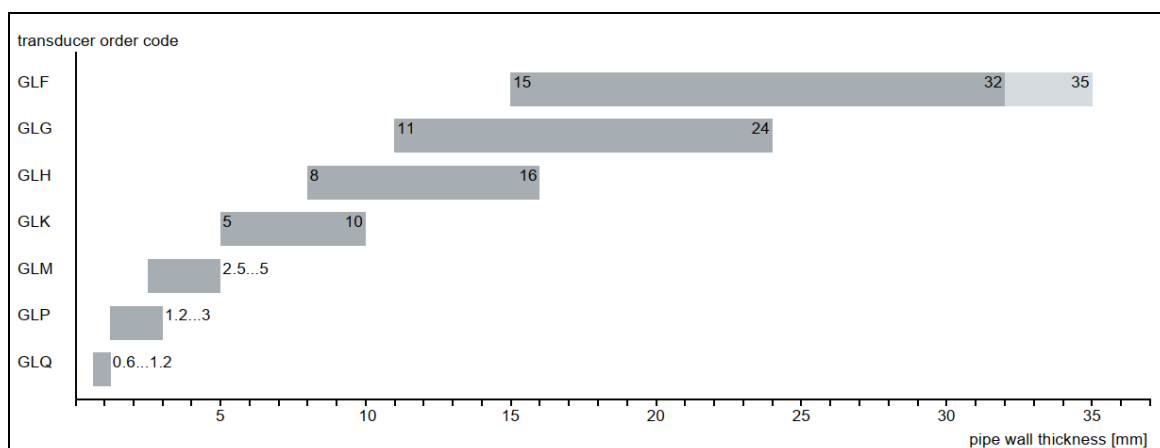
Obr. 2 Osadenie senzorov v konfigurácii SoundPath 2 – meranie na potrubí 2, vonk. priemer: 162,3 mm.<sup>11</sup>



Pre meranie 1 bol vzhľadom k parametrom potrubia zvolený senzor LambWave typu P a pre meranie 2 senzor LambWave typu M podľa nasledujúcich grafov, kde podľa hrúbky steny a vonkajšieho priemeru meraného potrubia sú priradené typy senzorov.



Graf 1 Pracovné oblasti senzorov LambWave typu M a P v závislosti od rýchlosti prúdenia a priemere potrubia.<sup>12</sup>



Graf 2 Dimenzovanie senzorov LambWave typu Q až F pre rôzne intervaly hrúbky steny potrubia.<sup>12</sup>

## Priebeh merania

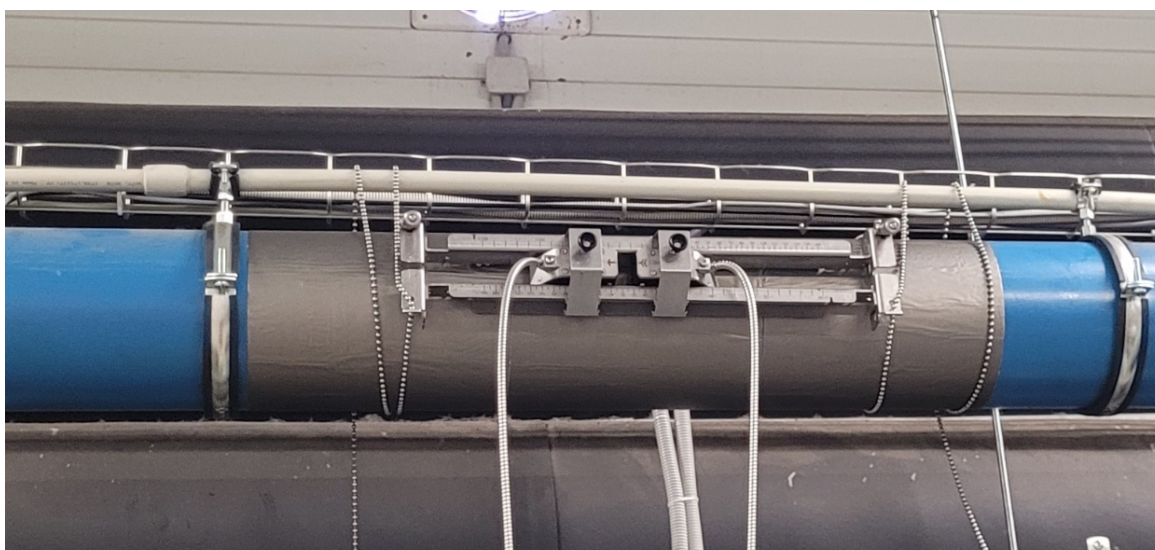
Na zvolené potrubia boli umiestnené sensory ultrazvukového prietokomera FLUXUS G608CA ako je ukázané na obr. 3 a 4. Na obr. 3b je vidieť nalepenú tlmiacu fóliu interferenčných zvukových vln pred osadením ultrazvukových senzorov. Pred nanosením tlmiacej fólie je potrebné povrch potrubia očistiť od hrubých nečistôt a prachu, poprípade umyť technickým liehom. Tlmiaca fólia sa dodáva ako príslušenstvo k prietokomeru a je možné ju dostať na trhu alebo objednať u výrobcu alebo dodávateľa daného prietokomera.



Následne sú do kontrolnej jednotky zadávané údaje o vlastnostiach potrubia – materiál, priemer, hrúbka steny a o meranom médiu – druh média, v tomto prípade vzduch, teplota – stačí odmerať infračerveným teplomerom povrchovú teplotu potrubia, tlak – manometrický alebo absolútny, podľa toho, ktorý z nich je prednastavený užívateľom v prístroji. Je potrebné podotknúť, že použitá jednotka je schopná merať plyny aj kvapaliny. Na výber slúži softvérový prepínač v menu prístroja. Pokiaľ je navolené meranie kvapalín, prístroj poskytne pri zadávaní média knižnicu s kvapalinami a pri plynoch zas knižnicu s plynmi.



Obr. 3 a) Umiestnenie ultrazvukových senzorov na potrubí 1 b) Tlmiaca fólia interferenčných vln na potrubí.



Obr. 4 Umiestnenie ultrazvukových senzorov na potrubí 2.

Ako už bolo uvedené, pred umiestnením senzorov na potrubie je potrebné povrch potrubia očistiť a naniesť tlmiacu fóliu, ktorá zabezpečuje pohlcovanie rušivých signálov zo steny potrubia a kontrolná



jednotka tak môže odfiltrovať užitočný signál od interferencie. Bez použitia tlmiacej fólie na metalickom potrubí pri meraní plynnej zložky by nebolo možné dosiahnutie požadovaných elektrických a akustických parametrov pre zabezpečenie spoľahlivého merania. Následne, do kontrolnej jednotky je potrebné vložiť údaje o potrubí ako je vonkajší priemer, hrúbka steny a materiál potrubia. Ďalej sa zadáva druh média výberom z knižnice v prístroji. Vzďialenosť medzi senzormi je udávaná kontrolnou jednotkou prietokomera na základe zadaných parametrov o médiu a geometrii potrubia užívateľom.

Pomocou upevňovacej konzoly sú senzory upevnené na potrubie. Konzola pre prenosný prietokomer sa upevňuje na potrubie reťazkami, v niektorých prípadoch je možné použiť magnety. Stacionárne verzie používajú najčastejšie oceľové pásy, aby bolo zabezpečené pevné osadenie senzorov.



Obr. 5 Kontrolná jednotka FLUXUS G601 Meranie 1 (vľavo) a Meranie 2 (vpravo).

Zadané parametre o potrubíach a médiu sú uvedené v Tab 1.

Tab. 1 Zadané parametre do kontrolnej jednotky prietokomera FLUXUS G608.

Parameter	Meranie potrubie 1	Meranie potrubie 2
Outer diameter/Vonkajší priemer	54,00 mm	162,30 mm
Pipe wall thickness/Hrúbka steny	1,40 mm	4,50 mm
Pipe wall material /Materiál potrubia	Stainless steel	Carbon steel
Fluid/Médium	Air	Air
Fluid temp./Teplota média	80 °C	50 °C
Fluid pressure/Tlak média	7,00 bar(g)	8,00 bar(g)
Senzor	GRP1NC3	GRM1NC3

Kontrolná jednotka prietokomera má vnútorný datalogger, ktorý umožňuje ukladanie nameraných hodnôt vo zvolených intervaloch, vrátane diagnostických údajov. Umožňuje ukladať priemerné alebo okamžité hodnoty. Pre naše meranie bol zvolený interval jednominútových priemerných hodnôt. Namerané hodnoty sú zobrazené v tab. 2 a 4, minimálne, maximálne a priemerné hodnoty v tab. 3 a 5.



Tab. 2 Namerané hodnoty prietoku média a rýchlosti zvuku, vrátane diagnostiky - Potrubie 1 (54 mm).

Interval	Čas	Sound speed [m/s]	Amplitude [%]	Amplification [dB]	Quality [%]	Volumetric flow rate [l/min]	SCNR [dB]	SNR [dB]
1	0:00	377,45	41,0	87,910	99,0	1216,42	40,0	29,0
2	0:01	377,85	41,0	87,910	98,0	1216,42	41,0	29,0
3	0:02	377,78	41,0	87,910	96,0	1252,62	40,0	30,0
4	0:03	377,79	41,0	87,910	99,0	1312,04	39,0	30,0
5	0:04	377,85	40,0	89,400	99,0	1247,43	37,0	30,0
6	0:05	377,86	41,0	87,910	99,0	1259,29	39,0	29,0
7	0:06	377,85	40,0	89,400	99,0	1267,94	41,0	30,0
8	0:07	377,94	40,0	89,400	100,0	1313,52	39,0	30,0
9	0:08	378,00	41,0	87,910	91,0	1250,27	36,0	30,0
10	0:09	378,02	41,0	87,910	96,0	1287,70	38,0	30,0
11	0:10	377,98	41,0	87,910	99,0	1270,65	42,0	30,0
12	0:11	377,91	40,0	89,400	99,0	1241,25	38,0	30,0
13	0:12	377,86	40,0	89,400	99,0	1271,52	42,0	29,0
14	0:13	377,91	40,0	89,400	99,0	1245,82	41,0	30,0
15	0:14	377,92	40,0	89,400	95,0	1282,02	37,0	30,0
16	0:15	378,03	40,0	89,400	97,0	1284,86	38,0	29,0
17	0:16	378,07	40,0	89,400	98,0	1245,70	39,0	30,0
18	0:17	378,02	40,0	89,400	98,0	1284,24	36,0	30,0
19	0:18	378,00	41,0	87,910	99,0	1228,90	41,0	30,0
20	0:19	377,95	41,0	87,910	99,0	1240,64	39,0	30,0
21	0:20	377,95	40,0	89,400	99,0	1272,26	40,0	29,0
22	0:21	377,90	41,0	87,910	98,0	1219,39	41,0	30,0
23	0:22	377,93	41,0	87,910	95,0	1305,99	39,0	29,0
24	0:23	377,92	40,0	89,400	97,0	1254,60	39,0	29,0
25	0:24	377,90	41,0	87,910	99,0	1267,20	39,0	30,0
26	0:25	377,97	40,0	89,400	100,0	1275,35	41,0	30,0
27	0:26	377,96	40,0	89,400	100,0	1293,01	40,0	30,0
28	0:27	377,96	41,0	87,910	99,0	1257,81	42,0	29,0
29	0:28	377,89	41,0	87,910	98,0	1252,74	37,0	29,0
30	0:29	377,90	41,0	87,910	99,0	1303,02	39,0	29,0
31	0:30	377,92	40,0	89,400	97,0	1244,59	37,0	29,0

Tab. 3 Priemerné, minimálne a maximálne hodnoty merania 1.

	Sound speed [m/s]	Amplitude [%]	Amplification [dB]	Quality [%]	Volumetric flow rate [l/min]	SCNR [dB]	SNR [dB]
MIN	377,45	40,0	87,910	91,0	1216,42	36,0	29,0
MAX	378,07	41,0	89,400	100,0	1313,52	42,0	30,0
AVG	377,91	40,5	88,631	98,0	1263,39	39,3	29,6



Tab. 4 Namerané hodnoty prietoku média a rýchlosti zvuku, vrátane diagnostiky - Potrubie 2 (162,3 mm).

Interval	Čas	Sound speed [m/s]	Amplitude [%]	Amplification [dB]	Quality [%]	Volumetric flow rate [l/min]	SCNR [dB]	SNR [dB]
1	0:00	371,43	32,0	101,320	97,0	4873,90	31,0	20,0
2	0:01	371,61	32,0	101,320	95,0	4687,85	28,0	20,0
3	0:02	371,49	32,0	101,320	97,0	4780,88	33,0	20,0
4	0:03	371,37	32,0	101,320	93,0	4910,45	29,0	19,0
5	0:04	371,75	32,0	101,320	92,0	5193,96	29,0	19,0
6	0:05	371,97	32,0	101,320	93,0	4626,94	31,0	19,0
7	0:06	371,99	32,0	101,320	96,0	4613,65	28,0	20,0
8	0:07	371,68	32,0	101,320	94,0	4785,31	33,0	20,0
9	0:08	371,43	32,0	101,320	91,0	4820,74	30,0	19,0
10	0:09	371,49	32,0	101,320	95,0	4753,19	30,0	19,0
11	0:10	371,62	32,0	101,320	95,0	4732,15	31,0	20,0
12	0:11	371,60	32,0	101,320	97,0	4791,95	32,0	20,0
13	0:12	371,75	32,0	101,320	95,0	4759,83	29,0	19,0
14	0:13	371,69	32,0	101,320	94,0	4775,34	32,0	19,0
15	0:14	371,82	32,0	101,320	95,0	4778,66	30,0	20,0
16	0:15	371,91	32,0	101,320	94,0	4636,91	28,0	19,0
17	0:16	371,91	32,0	101,320	93,0	4664,59	29,0	19,0
18	0:17	371,76	32,0	101,320	96,0	4656,84	30,0	20,0
19	0:18	371,56	32,0	101,320	93,0	4739,90	30,0	20,0
20	0:19	371,70	32,0	101,320	96,0	4656,84	28,0	20,0
21	0:20	371,91	32,0	101,320	95,0	4640,23	30,0	20,0
22	0:21	371,76	32,0	101,320	95,0	4667,92	29,0	20,0
23	0:22	371,39	32,0	101,320	94,0	4816,31	31,0	20,0
24	0:23	371,23	32,0	101,320	94,0	4919,31	32,0	19,0
25	0:24	371,48	32,0	101,320	92,0	4789,74	28,0	19,0
26	0:25	371,90	32,0	101,320	92,0	4677,88	29,0	19,0
27	0:26	372,08	32,0	101,320	91,0	4552,74	28,0	20,0
28	0:27	371,58	32,0	101,320	93,0	4749,87	29,0	20,0
29	0:28	371,37	32,0	101,320	93,0	4834,03	33,0	19,0
30	0:29	371,21	32,0	101,320	94,0	4971,36	30,0	19,0
31	0:30	371,61	32,0	101,320	96,0	5254,87	28,0	19,0

Tab. 5 Priemerné, minimálne a maximálne hodnoty merania 2.

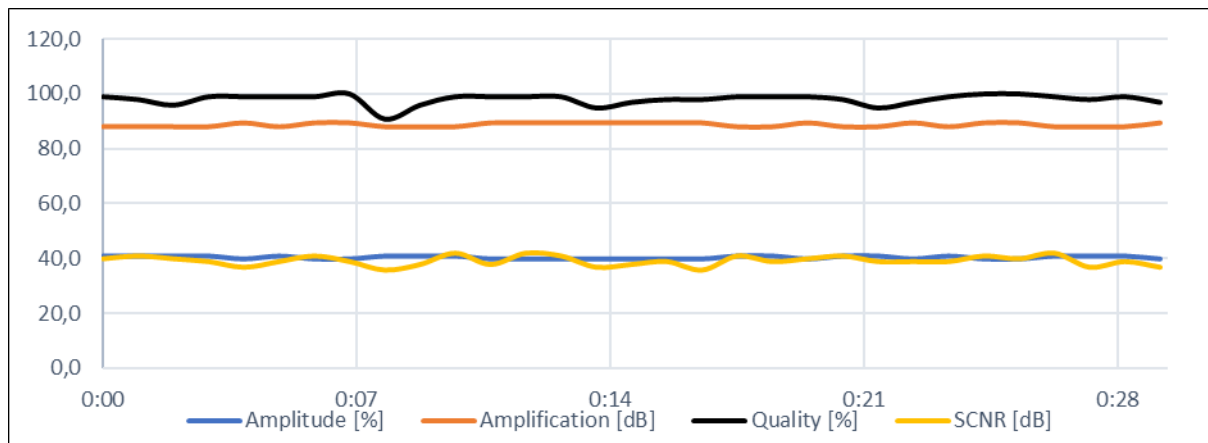
	Sound speed [m/s]	Amplitude [%]	Amplification [dB]	Quality [%]	Volumetric flow rate [l/min]	SCNR [dB]	SNR [dB]
MIN	371,21	32,0	101,320	91,0	4552,74	28,0	19,0
MAX	372,08	32,0	101,320	97,0	5254,87	33,0	20,0
AVG	371,65	32,0	101,320	94,2	4777,88	29,9	19,5

Diagnostické hodnoty z tabuliek 2 a 4 sú graficky zobrazené v grafoch 3 a 4. Trendy zobrazujú zmenu priebehu signálov, ktoré závisia od stavu merania z hľadiska parametrov samotného média, správneho umiestnenia a polohy senzorov na potrubí, stave a geometrii potrubia a interferenčných zvukových vln, ktoré môžu spôsobiť napríklad príruby, kolená, rozdeľovacie T-prvky a pod. V grafe 5

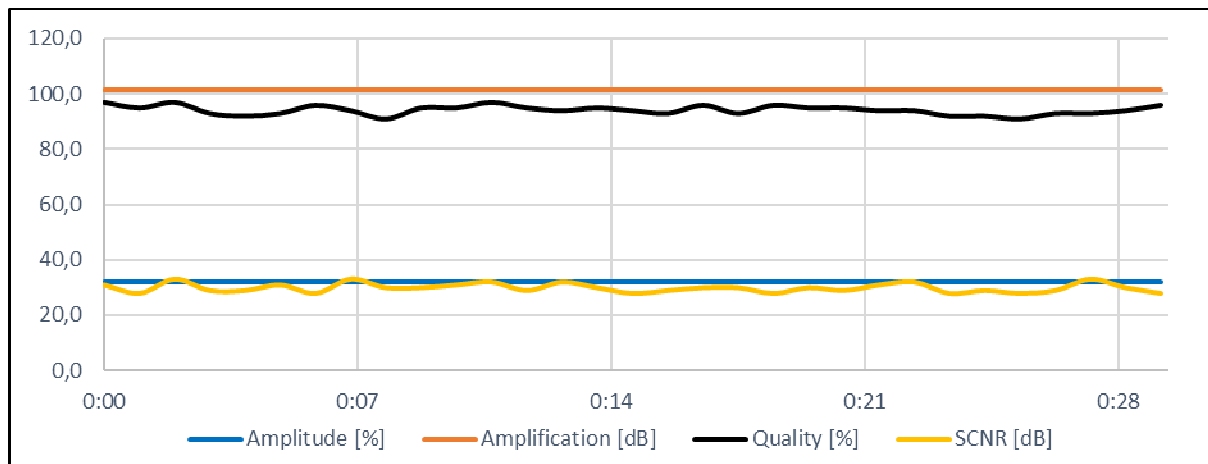




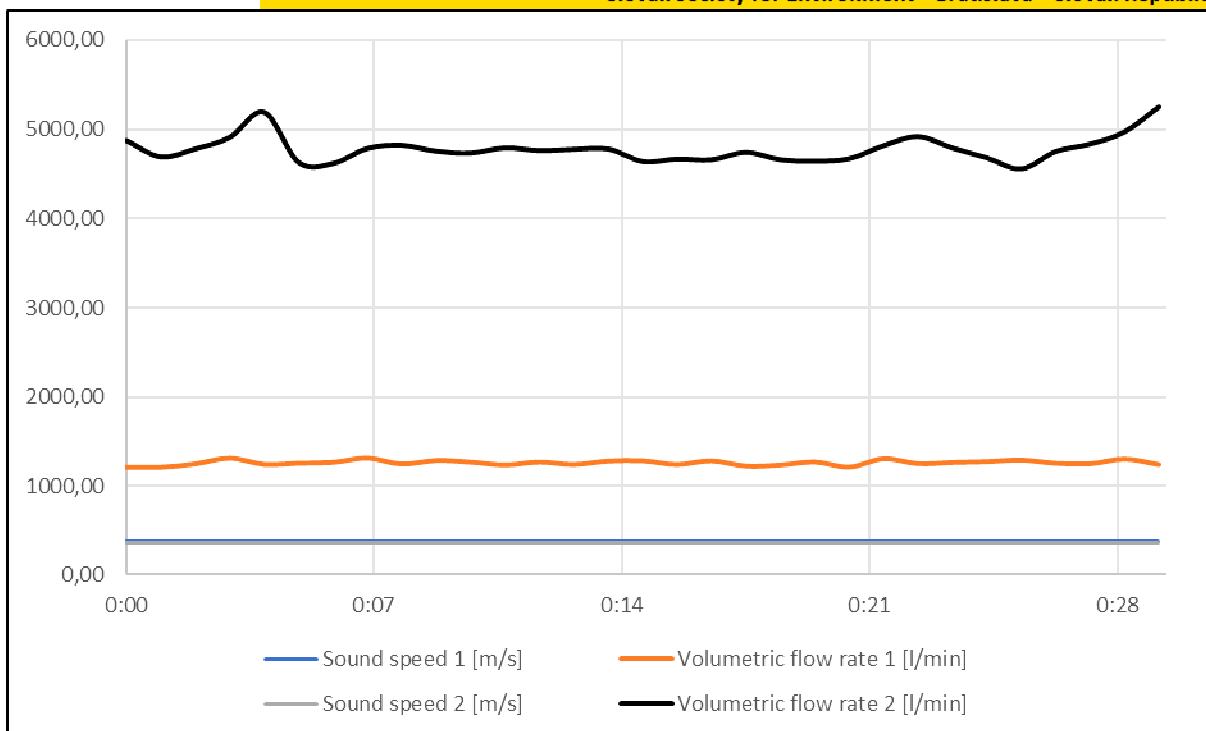
sú priebehy priemerných hodnôt objemových prietokov stlačeného vzduchu v oboch potrubíach a trendy rýchlostí zvuku v meranom médiu. Údaj o rýchlosti zvuku je jeden z hlavných parametrov, ktorý hovorí o správnosti merania. Pokiaľ jeho hodnota nesedí s očakávanou, je pravdepodobné, že analyzovaný signál nie je signál užitočný ale ide o interferenciu alebo boli zadané nesprávne hodnoty, napríklad o hrúbke steny potrubia. Popritom, meranie vyzerá byť na prvý pohľad v poriadku a prístroj tiež nezobrazuje chybné meranie pomocou červenej kontrolky na prednom paneli.



Graf 3 Grafické zobrazenie hodnôt signálnych parametrov merania 1 na potrubí 1 (54 mm).



Graf 4 Grafické zobrazenie hodnôt signálnych parametrov merania 2 na potrubí 2 (162,3 mm).



Graf 5 Grafické zobrazenie hodnôt objemových prietokov oboch meraní a hodnôt meraných rýchlostí zvuku.

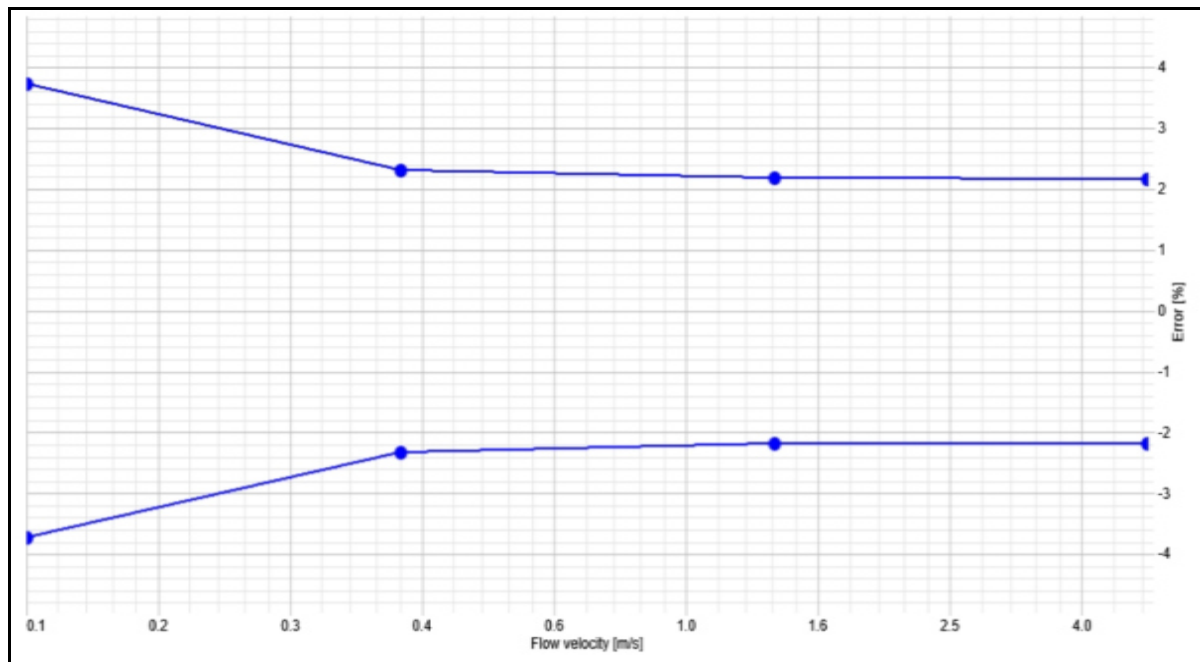
Nasledujúce tabuľky a grafy sú vygenerované programom FluxDiag a sú tu vyjadrené neistoty merania na podmienky v danom meracom bode.

V tab. 6 a 7 sú vyjadrené štandardné a rozšírené neistoty merania pri vybraných rýchlostiach prúdenia.

V grafoch 6 a 7 sú zobrazené číselné hodnoty graficky.

Tab. 6 Výpočet neistoty merania I pomocou programu FluxFlow.

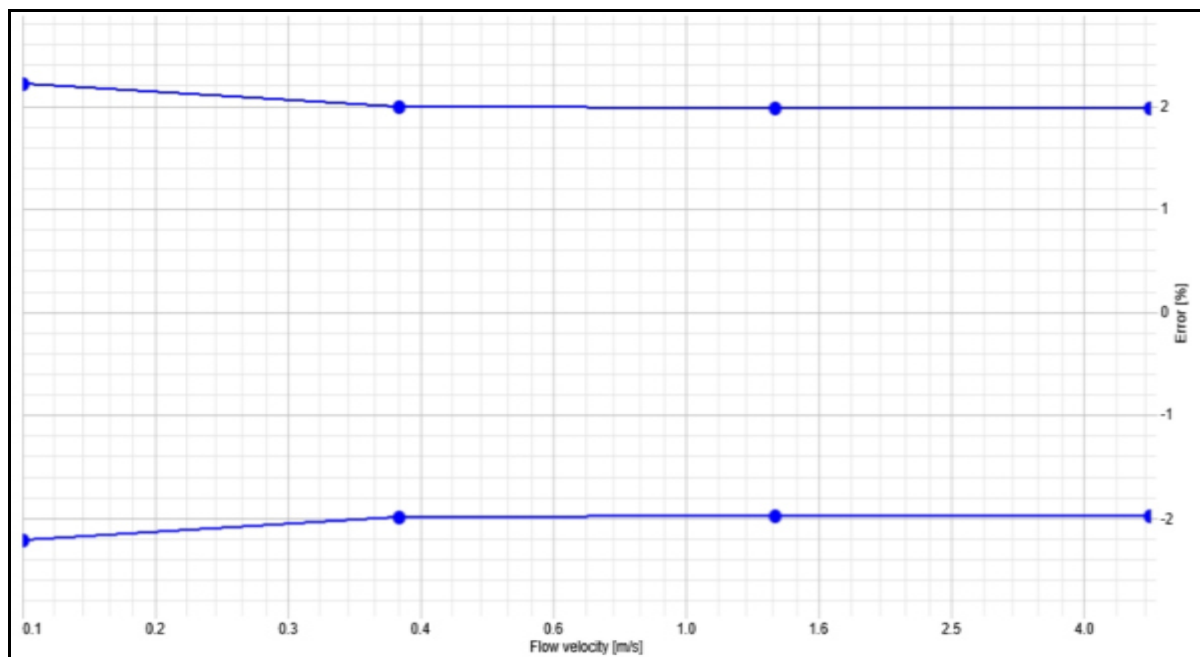
Contribution to uncertainty calculation	Source of uncertainty	Value of standard uncertainty		Sensitivity factor	Flow velocity			
					0.10 m/s	0.37 m/s	1.36 m/s	5.00 m/s
					Transit time difference			
					9.879e-9 s	3.655e-8 s	1.344e-7 s	4.940e-7 s
$u(x_i)$		$u(x_i)$	$u_r(x_i) = \frac{u(x_i)}{x_i}$	$c_{r,i} = c_i \frac{x_i}{\dot{v}}$	Contribution $ c_{r,i} u_r(x_i) $			
$u(K_{20})$	Flow profile		0.28 %	1.00	0.28 %	0.28 %	0.28 %	0.28 %
$u(A)$	Cross sectional area		0.37 %	1.00	0.37 %	0.37 %	0.37 %	0.37 %
$u(K_a)$	Acoustical calibration factor		0.98 %	1.00	0.98 %	0.98 %	0.98 %	0.98 %
$u(\Delta t)$	Transit time difference	1.500e-10		1.00	1.52 %	0.41 %	0.11 %	0.03 %
$u(t_0)$	Delay time		0.25 %	0.15	0.04 %	0.04 %	0.04 %	0.04 %
$u(t_p)$	Transit time		0.03 %	-1.00	0.03 %	0.03 %	0.03 %	0.03 %
Standard uncertainty $u_r(\dot{v}) = \frac{u(\dot{v})}{\dot{v}}$					<b>1.87 %</b>	<b>1.16 %</b>	<b>1.09 %</b>	<b>1.08 %</b>
Expanded uncertainty k = 2 (95 %)					<b>3.73 %</b>	<b>2.32 %</b>	<b>2.18 %</b>	<b>2.17 %</b>



Graf 6 Grafické vyjadrenie neistoty merania pri rôznych rýchlostiach prúdenia – Meranie 1.

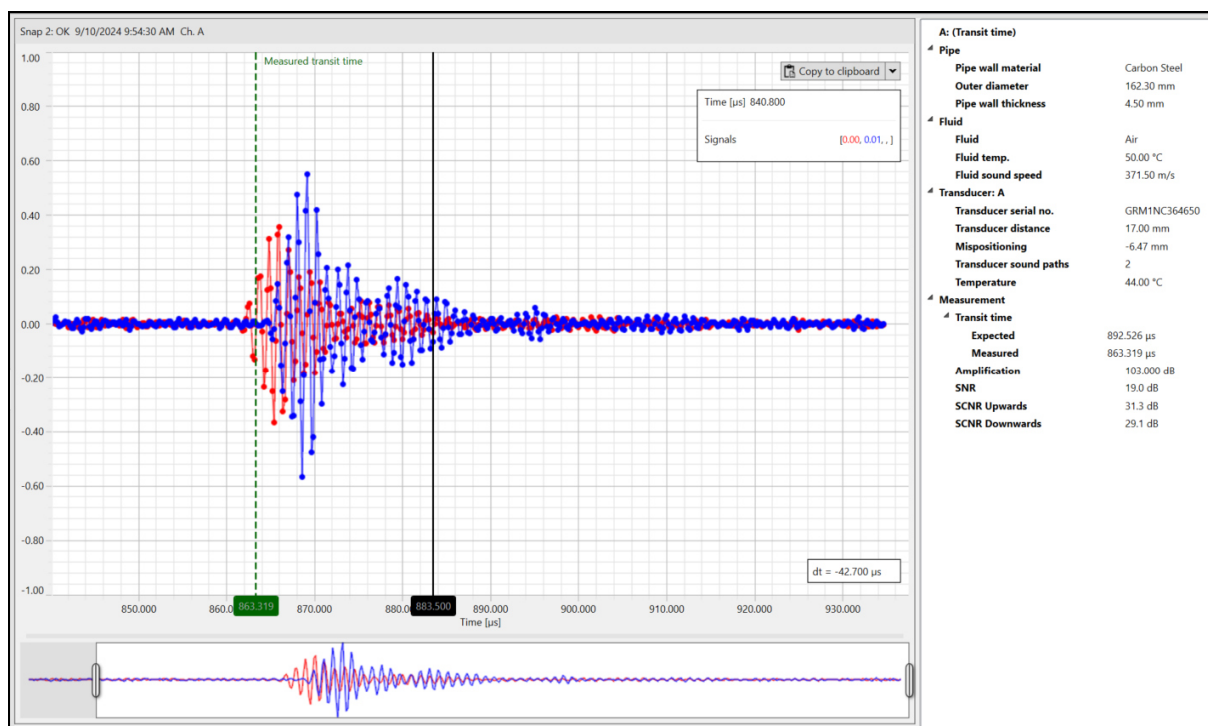
Tab. 7 Výpočet neistoty merania 2 pomocou programu FluxFlow.

Contribution to uncertainty calculation	Source of uncertainty	Value of standard uncertainty		Sensitivity factor	Flow velocity			
					0.10 m/s	0.37 m/s	1.36 m/s	5.00 m/s
					Transit time difference			
					5.974e-8 s	2.211e-7 s	8.125e-7 s	2.987e-6 s
$u(x_i)$		$u(x_i)$	$u_r(x_i) = \frac{u(x_i)}{x_i}$	$C_{r,i} = C_i \frac{x_i}{\hat{v}}$	Contribution $ C_{r,i} u_r(x_i) $			
$u(K_{Re})$	Flow profile		0.28 %	1.00	0.28 %	0.28 %	0.28 %	0.28 %
$u(A)$	Cross sectional area		0.13 %	1.00	0.13 %	0.13 %	0.13 %	0.13 %
$u(K_a)$	Acoustical calibration factor		0.94 %	1.00	0.94 %	0.94 %	0.94 %	0.94 %
$u(\Delta t)$	Transit time difference	3.000e-10		1.00	0.50 %	0.14 %	0.04 %	0.01 %
$u(t_0)$	Delay time		0.45 %	0.04	0.02 %	0.02 %	0.02 %	0.02 %
$u(t_{tr})$	Transit time		0.01 %	-1.00	0.01 %	0.01 %	0.01 %	0.01 %
Standard uncertainty $u_r(\hat{v}) = \frac{u(\hat{v})}{\hat{v}}$					<b>1.11 %</b>	<b>1.00 %</b>	<b>0.99 %</b>	<b>0.99 %</b>
Expanded uncertainty k = 2 [95 %]					<b>2.22 %</b>	<b>1.99 %</b>	<b>1.98 %</b>	<b>1.98 %</b>



Graf 7 Grafické vyjadrenie neistoty merania pri rôznych rýchlostiach prúdenia – Meranie 2.

Kontrolná jednotka s programom FluxDiag poskytuje aj diagnostiku merania pomocou tzv. SNAP-ov. Je to funkcia aktivovaná stlačením klávesy 5 na klávesnici kontrolnej jednotky. Tento povet vygeneruje graf s tvarom signálu vysielača aj prijímača a zaznamená priebežné hodnoty merania s vybranými parametrami procesu. Na základe týchto dát je technický pracovník schopný zistiť viac dôležitých parametrov o procese a meraní. SNAP z merania 2 je na obr. 5.



Obr. 5 Zobrazenie tvaru ultrazvukového signálu vysielača aj prijímača spolu s diagnostikou.



## Diskusia

Obidve merania prebehli bez prerušenia. Prúdenie na oboch líniach bolo turbulentné. Štandardne je odporúčané osadiť senzory na rovný úsek minimálne 10 priemerov potrubia za a päť priemerov potrubia pred rušivým prvkom, čo je napríklad koleno, príruha alebo T-prvok. Pri prvkoch zaradených do cesty ako pumpa alebo ventil sú odporúčané ešte väčšie vzdialenosti. Prístroj FLUXUS G601 je vybavený prepracovaným softvérom s rôznymi funkciami, ktoré umožňujú merať spoľahlivo aj na kratších úsekoch bez značného vplyvu na výslednú presnosť merania.

Meranie 1 so senzormi LambWave P bolo vykonané na veľmi krátkom úseku na nerezovom potrubí s priemerom 54 mm. Napriek krátkemu rovnému úseku boli diagnostické údaje stabilné a v hodnotách umožňujúcich spoľahlivé meranie. Priemerná hodnota SCNR odstup signál-šum (korelovaný) – čo je smerodajný parameter určujúci funkčnosť merania a má byť jeho hodnota minimálne 25 dB, bola 39,3 dB a neklesla pod hodnotu 36,0 dB. SNR je parameter, ktorý ak je pod 10 dB a SCNR je v limite, problém je pravdepodobne s elektrickým tienením a je potrebné preveriť integritu kábla senzorov. Problém s tienením sa prejaví pri mechanickom poškodení káblu senzora pri stacionárnych prietokomeroch alebo napr. nesprávnym uzemnením. Najnižšia hodnota SNR bola 29 dB. Rýchlosť zvuku je parameter, ktorý prístroj meria spolu s rýchlosťou prúdenia. Jej hodnota by mala zodpovedať očakávanej rýchlosti zvuku, čo v prípade vzduchu je okolo 345 m.s<sup>-1</sup>. Pri aktuálnom tlaku vzduchu v potrubí je táto hodnota vyššia, v našom prípade bola priemerná hodnota 377,91 m.s<sup>-1</sup>.

Meranie 2 so senzormi LambWave M bolo vykonané na relatívne dlhom rovnom úseku na potrubí z uhlíkovej ocele s priemerom 54 mm. Diagnostické údaje boli stabilné a v hodnotách umožňujúcich spoľahlivé meranie. Priemerná hodnota SCNR bola 29,9 dB a neklesla pod hodnotu 28,0 dB. SNR mal priemernú hodnotu 19,5 dB s minimom na 19,0 dB. Rýchlosti zvuku pri aktuálnom tlaku vzduchu v potrubí bola v priemere 377,65 m.s<sup>-1</sup>. Fluktuácie SCNR súvisia s turbulentným prúdením.

Presnosť merania je vypočítaná pomocou programu FluxDiag dodávaného výrobcom prietokomera. Vyjadrené neistoty sú pri niekoľkých rýchlostiach prúdenia. Z tabuliek 6 a 7 je vidieť číselné hodnoty štandardných neistôt a rozšírených neistôt. Z grafov 6 a 7 je vidieť priebeh kriviek vygenerovaných z číselných hodnôt. Neistota merania stúpa s klesajúcou rýchlosťou prúdenia. Najvyššia kvantifikovaná rozšírená neistota merania bola pri najnižšom prietoku na potrubí 1 s priemerom 54 mm.

## Záver

Ultrazvukové prietokomery s príloženými senzormi sú spoľahlivé a presné meracie zariadenia vhodné pre širokú oblasť v technickej praxi. Ich inštalácia a obsluha je jednoduchá a vďaka tomu na fakt, že je to neinvazívna metóda, neprichádza prístroj ani obsluha do kontaktu s procesným médiom a preto je bezpečnosť práce oveľa vyššia ako pri invazívnych metódach, najmä pri meraní nebezpečných látok alebo pri vysokých teplotách a tlakoch.

Pri odstavenej technológii, keď nie je odber stlačeného vzduchu, je vidieť malé prietoky vzduchu spôsobené netesnosťami v rozvodoch. Ultrazvukové prietokomery majú oproti kinetickým prietokomerom nízky detekčný limit a sú schopné zaznamenať veľmi nízke prietoky a takto odhaliť netesnosti v rozvodoch stlačeného vzduchu. Vďaka tomu je možné ultrazvukom merať veľmi nízke prietoky blízke nule. Takéto prístroje sa ničím nelíšia oproti štandardným ultrazvukovým prietokomerom, len sú kalibrované pri veľmi nízkych prietokoch. Takéto presné kalibrácie sa tiež vykonávajú na kalibračnom zariadení AperCal.



## ZOZNAM BIBLIOGRAFICKÝCH ODKAZOV

- <sup>1</sup> PREDAJNIANSKA, A.; TAKACS, J. 2021. Single-step and double-step heat recuperation of waste water from thermal baths. *IOP Conference Series: Materials Science and Engineering*. IOP Publishing, 2021. p. 012023. <https://doi.org/10.1088/1757-899X/1209/1/012023>
- <sup>2</sup> DINDORF, R. 2012. Estimating potential energy savings in compressed air systems. *Procedia Engineering*, 39: 204-211. <https://doi.org/10.1016/j.proeng.2012.07.026>
- <sup>3</sup> RADGEN, P.; BLAUSTEIN, E. 2001. Compressed air systems in the European Union: energy, emissions, savings potential and policy actions. LOG\_X. ISBN 3-932298-16-0. 168 p.
- <sup>4</sup> STRAKOVÁ, Z.; VOJTAŠŠÁK, J.; TAKÁCS, J.; KURČOVÁ, M.; ŠTEFANIČ, P.; MALÍŠEK, S. Heat Recovery Variable Refrigerant Volume System Installation and Experiences from its Summer Operation. *Periodica Polytechnica Mechanical Engineering* [online]. 2024, vol. 68, issue 1 [cit. 2023-12-03]. Dostupné na internete: <https://pp.bme.hu/me/article/view/21907> [pp.bme.hu]. ISSN 1587-379X, p. 1-5. <https://doi.org/10.3311/PPme.21907>
- <sup>5</sup> SAIDUR, R.; RAHIM, N.A.; HASANUZZAMAN, M. 2010. A review on compressed - air energy use and energy savings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*. p. 1135 - 1153.
- <sup>6</sup> MOUSAVI, S.; KARA, S.; KORNFELD, B. 2014. Energy efficiency of compressed air systems. *Procedia Cirp*, 2014, 15: 313-318. <https://doi.org/10.1016/j.procir.2014.06.026> *Procedia Cirp* 15: 313-318.
- <sup>7</sup> VOJTAŠŠÁK, J.; STRAKOVÁ, Z. 2023. Cyklovanie kompresora tepelného čerpadla. *TZB Haustechnik*. ISSN 1210-356X, 2023, roč. 31, č. 4, s. 36-38.
- <sup>8</sup> JACOBSON, S. 2008. New developments in ultrasonic gas analysis and flowmetering. *2008 IEEE Ultrasonics Symposium. IEEE*, 2008. p. 508-516. ISSN: 1051-0117
- <sup>9</sup> LYNNWORTH, L. C.; LIU, Yi. Ultrasonic flowmeters: Half-century progress report, 1955–2005. *Ultrasonics*, 2006, 44: e1371-e1378. ISSN: 0041-624X. <https://doi.org/10.1016/j.ultras.2006.05.046>
- <sup>10</sup> CONRAD, K.; LYNNWORTH, L. [online]- Fundamentals of ultrasonic flow meters. American School of Gas Measurement Technology, 2002, 1: 53-54. Available on URL: <https://asgmt.com/paper/fundamentals-of-ultrasonic-flow-meters-2002/>
- <sup>11</sup> FLEXIM. *Powerpoint principle template*. Internal document of Flexim GmbH.
- <sup>12</sup> FLEXIM. Technical specification Fluxus G601. *Portable ultrasonic flowmeter for gas, steam and liquids*. Internal document of Flexim GmbH.