

# MERANIE PRIETOKU STLAČENÉHO VZDUCHU ULTRAZVUKOVOU METÓDOU V ZÁVODE O-I DUBÍ

Ivan Šafránek<sup>1</sup>, David Kamarýt<sup>2</sup>, Ján Il'ko<sup>3</sup>, Miroslav Rusko<sup>4</sup>

<sup>1</sup>O-I Czech Republic a.s., Dubí, Česká republika

<sup>2</sup>ECM Ecomonitoring a.s., Dobrá, Česká republika

<sup>3</sup>Flexim GmbH, Olbendorf, Rakúsko

<sup>4</sup>Slovenská spoločnosť pre životné prostredie, Bratislava, Slovenská republika

## Abstrakt

Následující článek pojednává o integrácii merania prietoku stlačeného vzduchu neinvazívnou metódou merania pomocou ultrazvuku na kompresorovej stanici výrobného závodu OI Dubí v Českej republike. Meranie bolo inštalované za účelom riadenia sekvencie kompresorov. Pred integráciou stacionárneho ultrazvukového prietokomera bolo vykonané meranie prenosným tiež ultrazvukovým meračom prietoku pre zistenie prevádzkových parametrov média a zvolenie optimálneho bodu merania.

*Kľúčové slová: Stlačený vzduch, neinvazívne meranie, ultrazvuk, prietok, energia, riadenie*

## Abstrakt

Der folgende Artikel befasst sich mit der Integration der Druckluftstrommessung durch eine nicht-invasive Messmethode mit Ultraschall an der Kompressorstation der OI Dubí-Produktionsanlage in der Tschechischen Republik. Die Messung wurde installiert, um die Kompressorsequenz zu steuern. Vor der Integration des stationären Ultraschall-Durchflussmessers wurde die Messung mit einem portablen Ultraschall-Durchflussmesser durchgeführt, um die Betriebsparameter des Mediums zu bestimmen und den optimalen Messpunkt auszuwählen.

*Schlüsselwörter: Druckluft, nicht-invasive Messung, Ultraschall, Durchfluss, Energie, Kontrolle*

## Úvod

Stlačený vzduch je technologické médium s vysokou energetickou náročnosťou na jeho získanie. Meranie prietoku stlačeného vzduchu poskytuje okamžitú informáciu o jeho spotrebe a z dlhodobého hľadiska je dôležité pre energetické a finančné bilancie v rámci podnikového manažmentu. Existuje niekoľko možností merania prietoku tohoto média avšak využitie ultrazvuku predstavuje ideálne riešenie, nakoľko meranie je vykonávané neinvazívne, vykazuje vysokú presnosť v závislosti od podmienok merania a významnú úlohu hrá flexibilita, nakoľko je meraný bod možné meniť, ak to technologické možnosti prevádzky dovoľujú.

## Ciel a účel mrania

- Meranie prietoku hlavného prívodu stlačeného vzduchu 0,4 MPa do závodu,
- náhrada zásuvného termického meradla, ktoré po výmene potrubia pri GO 2016/2017 ukazovalo nespoľahlivé a nestabilné výsledky.

## Procesné potrubie a médium

Meranie je nainštalované na hlavný prívod stlačeného vzduchu do technológie závodu o tlaku 0,4 Mpa. Parametre potrubia sú nasledovné:

- Vonkajší priemer 324 mm,
- hrúbka steny 3 mm,
- materiál potrubia AISI 314L = austenitická ocel Cr/Ni 18/10.

Parametre procesného média priamo za sušičkou vzduchu sú nasledovné:

- $p = 0,4 - 0,43$  Mpa,
- $t = 23 - 27$  °C,
- tlakový rosný bod  $1 - 4$  °C,
- neustálené, turbulentné prúdenie v mieste merania, len 3 m dlhý priamy úsek potrubia, vpredu a za ním koleno 90° a „T“ 90°.

## Požiadavky na meranie

Kritéria pre výber monitora prietoku stlačeného vzduchu boli zvolené nasledovne:

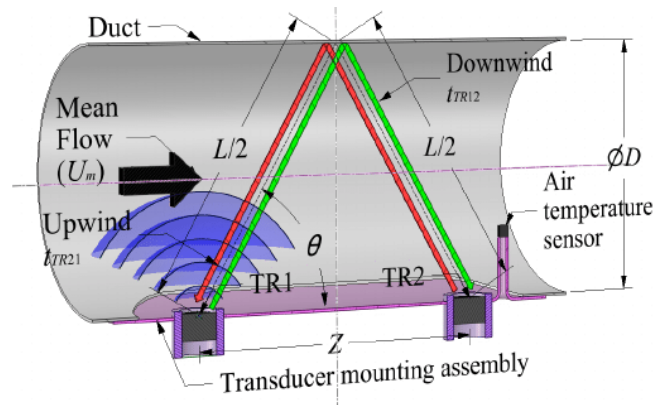
- Spustenie merania do prevádzky bez prerušenia výroby stlačeného vzduchu,
- on-line korekcia na teplotu a tlak (regulácia výkonu kompresorov je daná tlakom v potrubí v rozsahu (0,40 - 0,43) MPa,
- výstup z monitora prietoku do riadiaceho systému kompresorov,

- pseudoprava surovín je riadená/spúšťaná len v prípade dostatečnej rezervy množstva vzduchu,
- online výpočet a monitoring efektivity výroby vzduchu - kWh/Nm<sup>3</sup>.

### Meranie prietoku ultrazvukom

Veľkou výhodou tejto metódy je rýchla odozva aj skutočnosť, že ultrazvukové monitory umožňujú meranie zvonku - takzvaný clamp on system.<sup>1</sup> Princíp tohto merania je znázornený na obrázku 1. Princíp je jasne popísaný vo videu na nasledujúcom odkaze:

<https://www.youtube.com/embed/A2zSrgZfVD8?rel=0&controls=2&showinfo=0&autoplay=1>



Obr. 1 Princíp merania ultrazvukového monitora prietoku<sup>2</sup>

### Výber typu meracieho zariadenia

Prenosný prietokomer plynu je možné aplikovať na vnútorné priemery potrubia v rozmedzí od 6 mm do 2100 mm (bez obmedzenia hrúbky steny potrubia alebo materiálu) a pri teplotách média od -40 °C do 100 °C. Merací systém je navyše nezávislý na tlaku vo vnútri potrubia. S dvoma meracími kanálmi možno prenosný prietokomer plynu FLUXUS G601 použiť aj na náročné meracie body a nie je úplne ovplyvnený hustotou, viskozitou a zložením plynu, ako aj teplotou a tlakom. Možno merať dokonca aj mokrý plyn až do frakcie kvapalného objemu 5 %.<sup>3</sup>

### Zadefinovanie vstupných dát pre výber a špecifikáciu prietokomera

Ako základné vstupné údaje je dôležité vedieť:

- Druh meraného média,
- materiál potrubia,
- geometria potrubia – priemer a hrúbka steny,
- približná teplota média.

V prípade merania plynného média na kovových potrubiach je potrebné na povrch rúry nalepiť tlmiacu fóliu, prvok absorbujúci zvukovú energiu pripevnený k danému potrubiu aspoň v mieste medzi prvým a druhým senzorom a ktorý prijíma a rozptyľuje ultrazvukovú energiu, ktorá sa šíri cez stenu uvedeného potrubia z od prvého do druhého meniča, pričom uvedený prvok absorbujúci zvukovú energiu obsahuje viskózný materiál tlmiaci zvukovú energiu.<sup>4</sup> Tlmiaci kompozit je vytvorený z dvoch kovových vrstiev oddelených oveľa tenšou viskoelastickou vrstvou, ktorá má počiatočnú hrúbku najmenej 1 mm.<sup>5</sup> V závislosti od danej situácie tieto redukcie nie sú iba za účelom zmenšenia amplitúdy, ale aj zmeny tvarov a frekvencií vibrácií.<sup>6</sup>

<sup>1</sup> HALPER, Christian - ILKO, Ján - RUSKO, Miroslav. Application of ultrasonic method for measuring the sound velocity in a medium to determine the temperature change and fluctuations. In *Annals of DAAAM 2018: Volume 29, No. 1. The 29th DAAAM International Symposium on Intelligent Manufacturing and Automation. Zadar, Croatia, 21. - 28. 10. 2018.* 1. vyd. Vienna : DAAAM International, 2018, S. 0687-0697. ISSN 2304-1382. ISBN 978-3-902734-21-1.

<sup>2</sup> RAINE, Andrew & ASLAM, Nauman & UNDERWOOD, Christopher & DANAHER, Sean. (2015). Development of an Ultrasonic Airflow Measurement Device for Ducted Air. *Sensors*. 15. 10705-10722. 10.3390/s150510705. ISSN 1424-8220

<sup>3</sup> FLEXIM. The Portable Gas flow meter. - [on-line] available on URL: <https://www.flexim.com/en/products/portable-flowmeters-gases/fluxus-g601>

<sup>4</sup> BAUMOEL, Joseph. *Mounting structure for transducers with sonic-energy absorbing means.* U.S. Patent No 5,131,278, 1992.

<sup>5</sup> HANSEN, Richard M.; VYDRA, Edward J. *Method of forming noise-damping material with ultra-thin viscoelastic layer.* U.S. Patent No 6,202,462, 2001.

<sup>6</sup> WODTKE, H.-W.; LAMANCUSA, J. S. Sound power minimization of circular plates through damping layer placement. *Journal of Sound and vibration*, 1998, 215.5: 1145-1163. ISSN. 0022-460X

### Realizácia skúšobného merania

Najprv sa uskutočnilo testovacie meranie prietoku na mapovanie procesných podmienok média. Na tento účel bol použitý prenosný monitor prietoku G601 Flexim, znázornený na obrázku 2.



Obr. 2 Prenosný ultrazvukový prietokomer FLEXIM G601 <sup>7</sup>

Meranie bolo vykonané na dvoch bodoch kompresorovej stanice. Prvé meranie na vertikálnom potrubí pri procesnom tlaku 6 bar(a) a druhé na horizontálnom potrubí pri tlaku 4 bar(g).

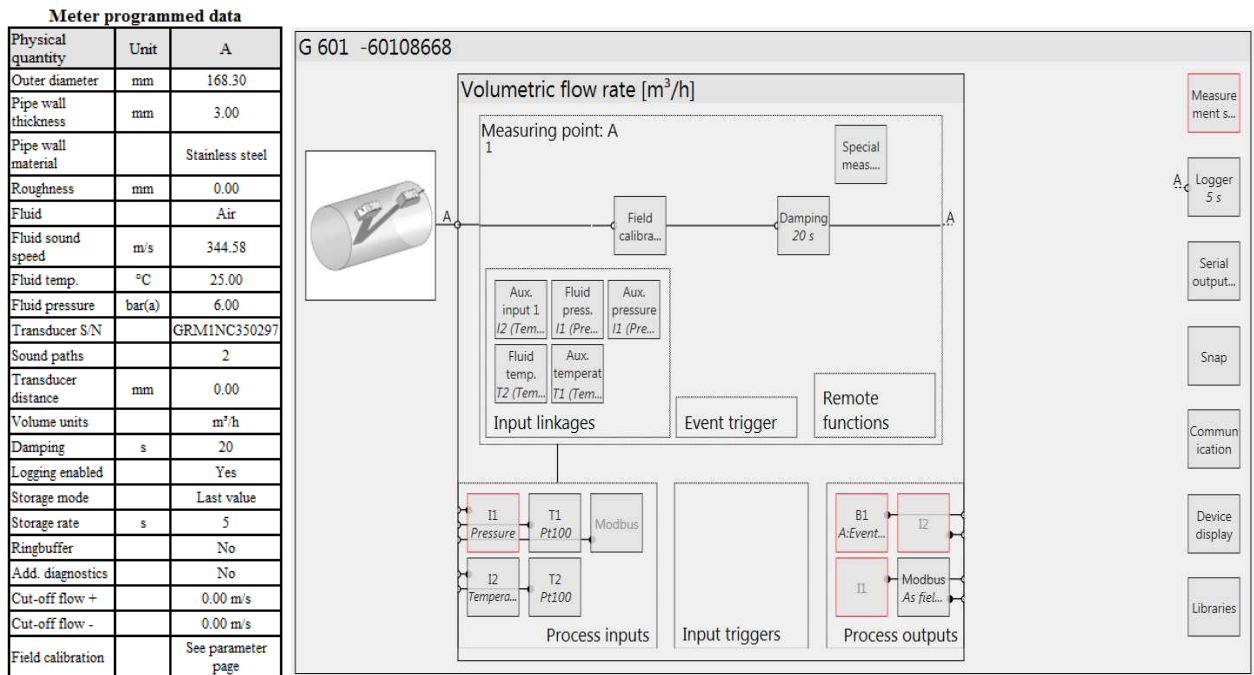


Obr. 3 Meranie č. 1 prietoku na vertikálnom potrubí 6 bar a č. 2 na horizontálnom 4 bar

### Meranie na bode č. 1

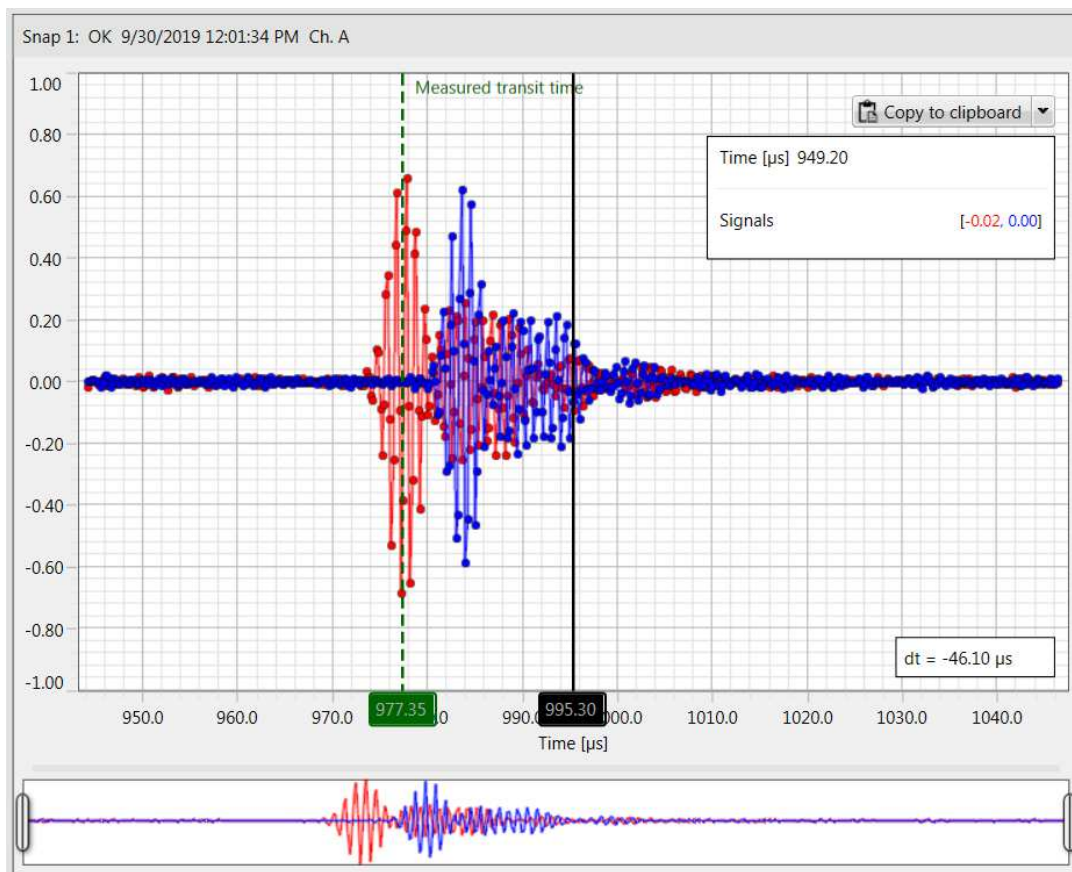
Pre meranie na prvom bode bol na základe procesných parametrov ultrazvukový prietokomer nastavený nasledovne:

<sup>7</sup> FLEXIM. Das portable Durchflussmessgerät für Gase. - [on-line] available on URL: <https://www.flexim.com/de/produkte/portable-durchflussmesser-fuer-gase/fluxus-g601>



Obr. 4 Nastavenie prietokomera FLUXUS G601 pre meraný bod č. 1

Ultrazvukový prietokomer má funkciu snímania obrazu zvuku, tzv. Snap, a pomocou počítača a príslušného softvéru FluxDiag jeho zobrazenie. Táto funkcia umožňuje obsluhu určiť kvalitu signálu a iné technické parametre prebiehajúceho merania. Obraz merania bodu 1 je zobrazený na nasledujúcom obrázku.



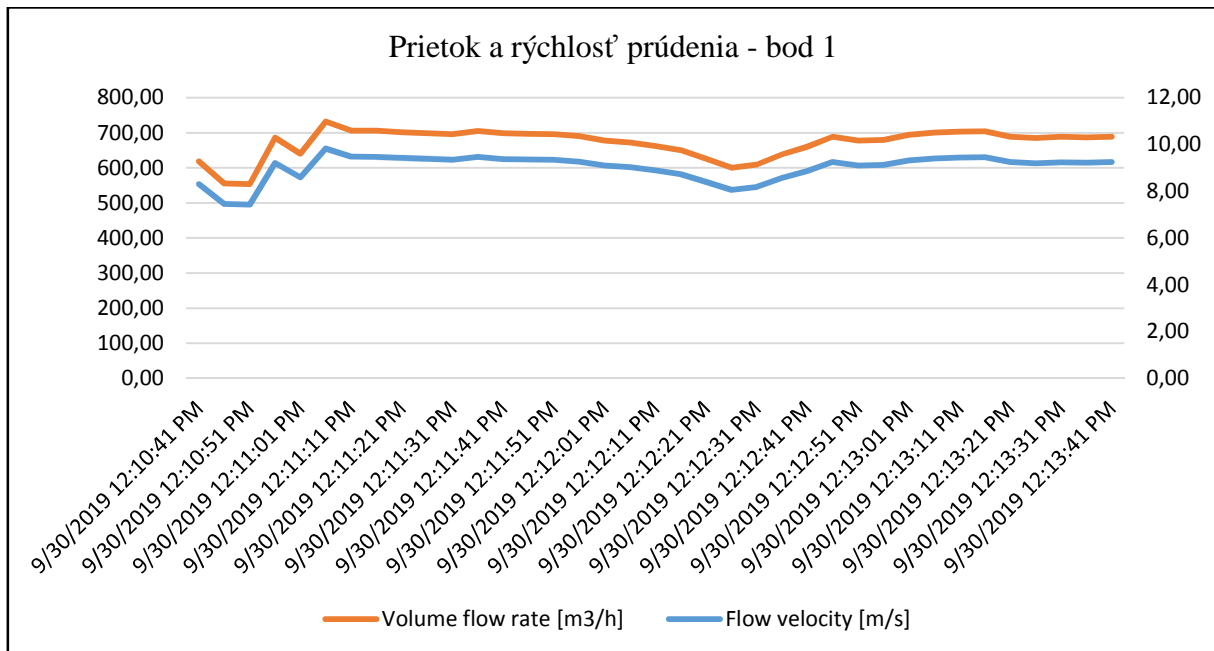
Obr. 5 Obraz (SNAP) ultrazvukového signálu na bode 1 pre diagnostiku merania.

Prístroj FLUXUS F601 disponuje vnútorným dataloggerom s kapacitou 250000 meracích bodov. Je možné zadať odčítanie buď okamžitej alebo priemerovanej hodnoty. Uložené hodnoty prietoku na bode 1 sú uvedené v tabuľke 1.

Tabuľka 1 Namerané hodnoty prietoku na bode 1

Date and time	Flow velocity	Volume flow rate
	[m/s]	[m <sup>3</sup> /h]
9/30/2019 12:10:41 PM	8,30	618,17
9/30/2019 12:10:46 PM	7,46	555,61
9/30/2019 12:10:51 PM	7,43	553,52
9/30/2019 12:10:56 PM	9,21	685,72
9/30/2019 12:11:01 PM	8,60	640,29
9/30/2019 12:11:06 PM	9,82	731,53
9/30/2019 12:11:11 PM	9,49	706,50
9/30/2019 12:11:16 PM	9,48	705,68
9/30/2019 12:11:21 PM	9,42	701,81
9/30/2019 12:11:26 PM	9,39	699,20
9/30/2019 12:11:31 PM	9,35	696,15
9/30/2019 12:11:36 PM	9,46	704,71
9/30/2019 12:11:41 PM	9,38	698,38
9/30/2019 12:11:46 PM	9,36	697,19
9/30/2019 12:11:51 PM	9,34	695,92
9/30/2019 12:11:56 PM	9,27	690,19
9/30/2019 12:12:01 PM	9,10	677,45
9/30/2019 12:12:06 PM	9,03	672,39
9/30/2019 12:12:11 PM	8,90	662,56
9/30/2019 12:12:16 PM	8,73	650,27
9/30/2019 12:12:21 PM	8,40	625,77
9/30/2019 12:12:26 PM	8,06	600,67
9/30/2019 12:12:31 PM	8,18	609,16
9/30/2019 12:12:36 PM	8,57	638,28
9/30/2019 12:12:41 PM	8,87	660,85
9/30/2019 12:12:46 PM	9,25	689,07
9/30/2019 12:12:51 PM	9,10	677,38
9/30/2019 12:12:56 PM	9,12	679,32
9/30/2019 12:13:01 PM	9,32	693,91
9/30/2019 12:13:06 PM	9,41	700,54
9/30/2019 12:13:11 PM	9,45	703,67
9/30/2019 12:13:16 PM	9,46	704,27
9/30/2019 12:13:21 PM	9,24	688,40
9/30/2019 12:13:26 PM	9,19	684,83
9/30/2019 12:13:31 PM	9,24	688,33
9/30/2019 12:13:36 PM	9,23	687,14
9/30/2019 12:13:41 PM	9,24	688,48

Grafické vyjadrenie nameraných hodnôt bodu 1 je v grafe 1. Červená línia zobrazuje priebeh prietoku v m<sup>3</sup>.h<sup>-1</sup>, modrá línia zobrazuje priebeh rýchlosti prúdenia v m.s<sup>-1</sup>.



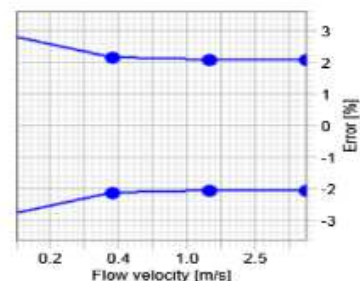
Graf 1 Prietok a rýchlosť prúdenia stlačeného vzduchu na bode 1

Pre vyhodnotenie presnosti merania má program FluxDiag integrovanú funkciu „Uncertainty“ a dokáže vypočítať chybu a opakovateľnosť merania spolu s grafickým vyobrazením, ako je ukázané na nasledujúcom obrázku.

#### Total uncertainty over flow velocity

Standard Uncertainty			Sensit- Factors	Flow velocities $\bar{v}_i$ [m/s]			
Formula	Source	Value		0.1	0.4	1.4	5.0
$u(x_i)$		$\frac{u(x_i)}{x_i}$	$\frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V}$	$\left  \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right $			
$u(K_{pk})$	flow profile	0.30%	1	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
$u(A)$	cross sectional area	0.23%	1	0.23%	0.23%	0.23%	0.23%
$u(K_a)$	acoustic calib. factor	0.97%	1	0.97%	0.97%	0.97%	0.97%
$u(\Delta t)$	time difference [s]	3.00E-10	1	0.93%	0.25%	0.07%	0.02%
$u(t_d)$	delay time	0.32%	0.05	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
$u(t_p)$	transit time	0.02%	-1	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
Standard uncertainty			$\frac{u(V)}{V} =$	1.40%	1.07%	1.05%	1.04%
expanded uncertainty k=2 (95%)				2.79%	2.15%	2.09%	2.09%

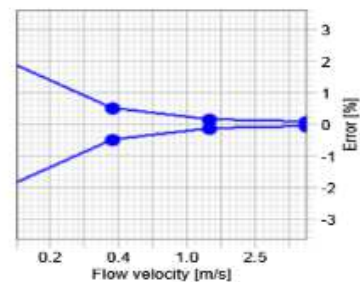
$$\frac{u(V)}{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2}$$



#### Repeatability

Standard Uncertainty			Sensit- Factors	Flow velocities $\bar{v}_i$ [m/s]			
Formula	Source	Value		0.1	0.4	1.4	5.0
$u(x_i)$		$\frac{u(x_i)}{x_i}$	$\frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V}$	$\left  \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right $			
$u(K_{pk})$	flow profile		1				
$u(A)$	cross sectional area		1				
$u(K_a)$	acoustic calib. factor		1				
$u(\Delta t)$	time difference [s]	3.00E-10	1	0.93%	0.25%	0.07%	0.02%
$u(t_d)$	delay time		0.05				
$u(t_p)$	transit time	0.02%	-1	0.02%	0.02%	0.02%	0.02%
Standard uncertainty			$\frac{u(V)}{V} =$	0.93%	0.25%	0.07%	0.03%
expanded uncertainty k=2 (95%)				1.85%	0.50%	0.14%	0.05%

$$\frac{u(V)}{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left( \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right)^2}$$



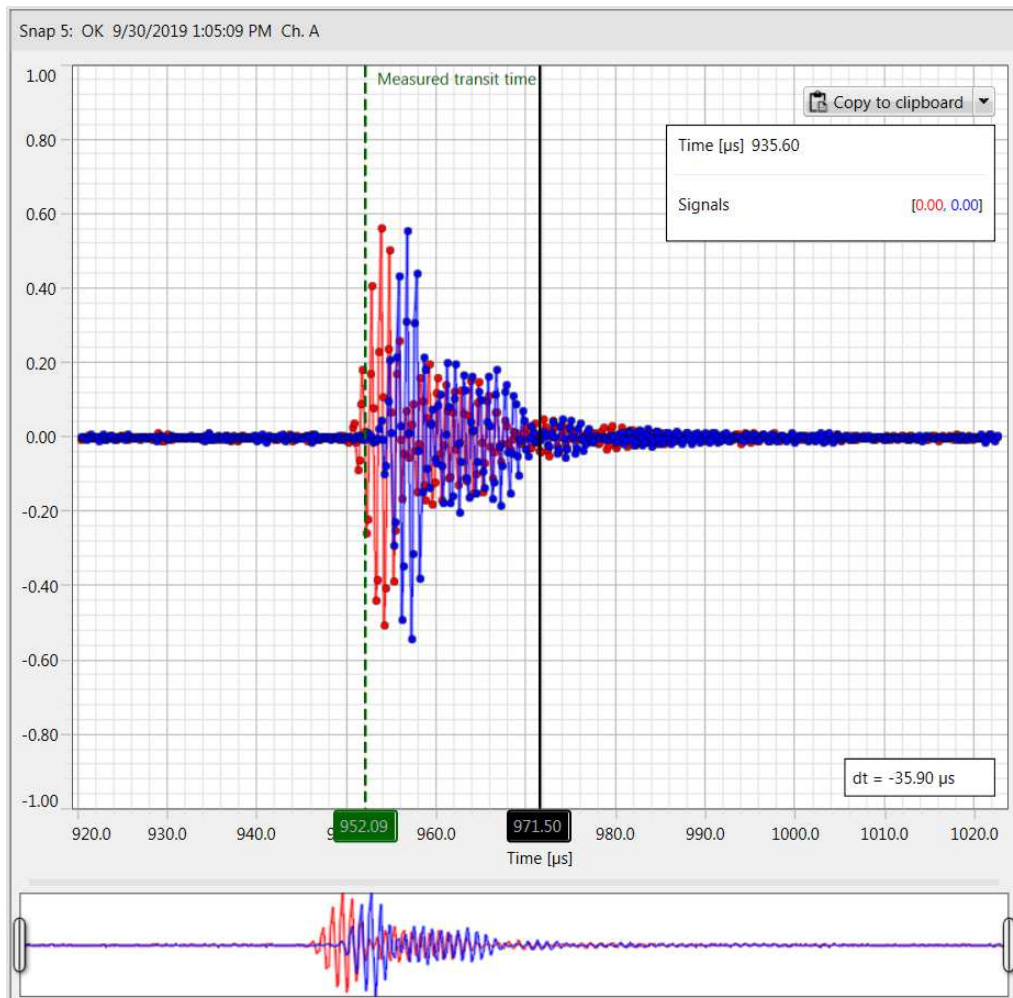
Obr. 6 Stanovenie neistoty merania programom FLEXIM FluxDiag

## Meranie na bode č. 2 pri procesnom tlaku 4 bar(g)

Pre meranie na druhom bode bol ultrazvukový prietokomer nastavený na základe procesných parametrov pre daný bod ako je ukázané na obr. 7. Opäť bol odsnímaný obraz signálu pre ďalšiu diagnostiku – obr. 8. Uložené hodnoty prietoku na bode 2 sú uvedené v tabuľke 2.

Meter programmed data		
Physical quantity	Unit	A
Outer diameter	mm	323.90
Pipe wall thickness	mm	3.00
Pipe wall material		Stainless steel
Roughness	mm	0.00
Fluid		Air
Fluid sound speed	m/s	344.37
Fluid temp.	°C	25.00
Fluid pressure	bar(a)	5.00
Transducer S/N		GRM1NC350297
Sound paths		1
Transducer distance	mm	-6.70
Volume units		m <sup>3</sup> /h
Damping	s	20
Logging enabled		Yes
Storage mode		Last value
Storage rate	s	5
Ringbuffer		No
Add. diagnostics		No
Cut-off flow +		0.00 m/s
Cut-off flow -		0.00 m/s
Field calibration		See parameter page

Obr. 7 Nastavenie prietokomera FLUXUS G601 pre meraný bod č. 2



Obr. 8 Obráz (SNAP) ultrazvukového signálu na bode 2 pre diagnostiku merania

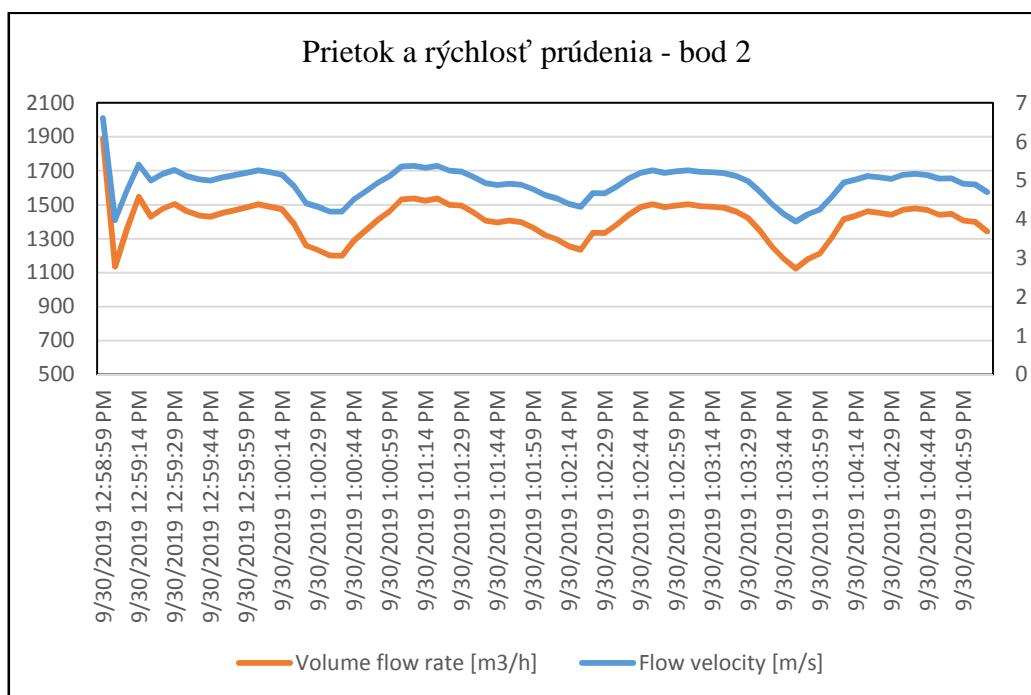
Tabuľka 2 Namerané hodnoty prietoku na bode 2

Date and time	Flow velocity	Volume flow rate
	[m/s]	[m <sup>3</sup> /h]
9/30/2019 12:58:59 PM	6,61	1889,04
9/30/2019 12:59:04 PM	3,98	1136,39
9/30/2019 12:59:09 PM	4,74	1355,56
9/30/2019 12:59:14 PM	5,41	1547,00
9/30/2019 12:59:19 PM	5,00	1429,57
9/30/2019 12:59:24 PM	5,17	1477,28
9/30/2019 12:59:29 PM	5,27	1505,57
9/30/2019 12:59:34 PM	5,11	1461,28
9/30/2019 12:59:39 PM	5,03	1436,42
9/30/2019 12:59:44 PM	5,00	1429,85
9/30/2019 12:59:49 PM	5,08	1452,14
9/30/2019 12:59:54 PM	5,14	1467,28
9/30/2019 12:59:59 PM	5,20	1484,43
9/30/2019 1:00:04 PM	5,26	1503,57
9/30/2019 1:00:09 PM	5,21	1488,14
9/30/2019 1:00:14 PM	5,15	1472,43
9/30/2019 1:00:19 PM	4,86	1387,85
9/30/2019 1:00:24 PM	4,41	1259,26
9/30/2019 1:00:29 PM	4,32	1234,40
9/30/2019 1:00:34 PM	4,20	1201,26
9/30/2019 1:00:39 PM	4,20	1200,11
9/30/2019 1:00:44 PM	4,51	1287,84
9/30/2019 1:00:49 PM	4,72	1349,27
9/30/2019 1:00:54 PM	4,94	1411,28
9/30/2019 1:00:59 PM	5,11	1460,71
9/30/2019 1:01:04 PM	5,36	1530,43
9/30/2019 1:01:09 PM	5,38	1537,00
9/30/2019 1:01:14 PM	5,33	1523,86
9/30/2019 1:01:19 PM	5,38	1536,72
9/30/2019 1:01:24 PM	5,25	1499,86
9/30/2019 1:01:29 PM	5,23	1495,29
9/30/2019 1:01:34 PM	5,10	1456,71
9/30/2019 1:01:39 PM	4,93	1407,28
9/30/2019 1:01:44 PM	4,88	1395,28
9/30/2019 1:01:49 PM	4,92	1406,13
9/30/2019 1:01:54 PM	4,89	1396,99
9/30/2019 1:01:59 PM	4,78	1365,56
9/30/2019 1:02:04 PM	4,63	1322,41
9/30/2019 1:02:09 PM	4,54	1296,12
9/30/2019 1:02:14 PM	4,40	1256,98
9/30/2019 1:02:19 PM	4,32	1234,69
9/30/2019 1:02:24 PM	4,68	1335,84
9/30/2019 1:02:29 PM	4,67	1333,84
9/30/2019 1:02:34 PM	4,84	1382,99
9/30/2019 1:02:39 PM	5,05	1441,57
9/30/2019 1:02:44 PM	5,20	1486,71
9/30/2019 1:02:49 PM	5,26	1502,43
9/30/2019 1:02:54 PM	5,20	1485,86



9/30/2019 1:02:59 PM	5,24	1495,86
9/30/2019 1:03:04 PM	5,26	1503,86
9/30/2019 1:03:09 PM	5,22	1491,57
9/30/2019 1:03:14 PM	5,21	1488,14
9/30/2019 1:03:19 PM	5,19	1482,43
9/30/2019 1:03:24 PM	5,11	1459,00
9/30/2019 1:03:29 PM	4,98	1421,85
9/30/2019 1:03:34 PM	4,71	1346,99
9/30/2019 1:03:39 PM	4,39	1252,98
9/30/2019 1:03:44 PM	4,13	1180,11
9/30/2019 1:03:49 PM	3,94	1124,68
9/30/2019 1:03:54 PM	4,13	1180,11
9/30/2019 1:03:59 PM	4,25	1213,26
9/30/2019 1:04:04 PM	4,57	1305,27
9/30/2019 1:04:09 PM	4,95	1414,99
9/30/2019 1:04:14 PM	5,02	1435,28
9/30/2019 1:04:19 PM	5,11	1460,71
9/30/2019 1:04:24 PM	5,08	1451,57
9/30/2019 1:04:29 PM	5,04	1441,28
9/30/2019 1:04:34 PM	5,15	1471,57
9/30/2019 1:04:39 PM	5,17	1477,86
9/30/2019 1:04:44 PM	5,14	1469,00
9/30/2019 1:04:49 PM	5,05	1441,57
9/30/2019 1:04:54 PM	5,06	1446,14
9/30/2019 1:04:59 PM	4,92	1406,13
9/30/2019 1:05:04 PM	4,90	1398,99
9/30/2019 1:05:09 PM	4,70	1343,84

Grafické vyjadrenie nameraných hodnôt bodu 2 je v grafe 2. Červená línia zobrazuje priebeh prietoku v  $\text{m}^3 \cdot \text{h}^{-1}$ , modrá línia zobrazuje priebeh rýchlosti prúdenia v  $\text{m} \cdot \text{s}^{-1}$ .



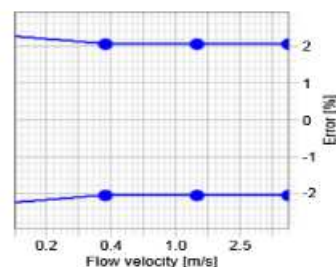
Graf 2 Prietok a rýchlosť prúdenia stlačeného vzduchu na bode 2

Presnosť merania je zobrazená na protokole vygenerovanom programom FluxDiag na nasledujúcom obrázku.

### Total uncertainty over flow velocity

Standard Uncertainty			Sensit.- Factors	Flow velocities $v_{[m/s]}$			
Formula	Source	Value		0.1	0.4	1.4	5.0
$u(x_i)$		$\frac{u(x_i)}{x_i}$	$\frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V}$	$\left  \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right $			
$u(K_{ps})$	flow profile	0.30%	1	0.30%	0.30%	0.30%	0.30%
$u(A)$	cross sectional area	0.13%	1	0.13%	0.13%	0.13%	0.13%
$u(K_a)$	acoustic calib. factor	0.97%	1	0.97%	0.97%	0.97%	0.97%
$u(\Delta t)$	time difference [s]	3.00E-10	1	0.47%	0.13%	0.03%	0.01%
$u(t_d)$	delay time	0.32%	0.03	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
$u(t_p)$	transit time	0.01%	-1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
	Standard uncertainty		$\frac{u(V)}{V} =$	<b>1.13%</b>	<b>1.03%</b>	<b>1.03%</b>	<b>1.03%</b>
	expanded uncertainty k=2 (95%)			<b>2.26%</b>	<b>2.07%</b>	<b>2.05%</b>	<b>2.05%</b>

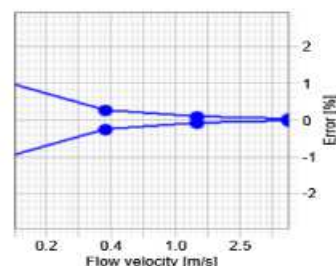
$$\frac{u(V)}{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right|^2}$$



### Repeatability

Standard Uncertainty			Sensit.- Factors	Flow velocities $v_{[m/s]}$			
Formula	Source	Value		0.1	0.4	1.4	5.0
$u(x_i)$		$\frac{u(x_i)}{x_i}$	$\frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V}$	$\left  \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right $			
$u(K_{ps})$	flow profile		1				
$u(A)$	cross sectional area		1				
$u(K_a)$	acoustic calib. factor		1				
$u(\Delta t)$	time difference [s]	3.00E-10	1	0.47%	0.13%	0.03%	0.01%
$u(t_d)$	delay time		0.03				
$u(t_p)$	transit time	0.01%	-1	0.01%	0.01%	0.01%	0.01%
	Standard uncertainty		$\frac{u(V)}{V} =$	<b>0.47%</b>	<b>0.13%</b>	<b>0.04%</b>	<b>0.01%</b>
	expanded uncertainty k=2 (95%)			<b>0.95%</b>	<b>0.26%</b>	<b>0.07%</b>	<b>0.03%</b>

$$\frac{u(V)}{V} = \sqrt{\sum_{i=1}^n \left| \frac{dV}{dx_i} \frac{x_i}{V} \frac{u(x_i)}{x_i} \right|^2}$$



Obr. 9 Stanovenie neistoty merania č. 2 programom FLEXIM FluxDiag

### Diskusia

Spotreba vzduchu závodu bola opakovane nastavená na nominálne maximum 1 kompresora ROW600 (konštantný prietok vzduchu po dobu 10 minút) a potom na maximum 2x kompresorov ROW 600 (takmer konštantný, 2x väčší prietok vzduchu). Mierne nárasty a poklesy tlaku v rozsahu 0,01 - 0,02 MPa boli patrné i na zmenách prietokov.

Namerané hodnoty prietoku vzduchu boli stabilné a zodpovedali predpokladom a predchádzajúcim skúsenostiam. Pri priamom porovnaní s kompresormi ROW300 (polovičný výkon než ROW600, merané termickým meradlom) dosahovali kompresory ROW600 presne dvojnásobného nominálneho prietoku.

Namerané výsledky potvrdili vhodnosť daného typu monitora prietoku pre požadovaný druh procesného systému.

### Záver

Meranie ultrazvukom umožňuje nasadenie do procesných aplikácií za špecifických podmienok. Výhodné je najmä z hľadiska BOZP, procesnej bezpečnosti, environmentálnej bezpečnosti a časovej nenáročnosti. Časovo náročná môže byť táto metóda pri veľmi špecifických podmienkach, ako sú napríklad krátke úseky medzi technickými prvkami ako napr. ventily, príruby, rozdvójky a kolená.

Pri aplikáciách s fluktuáciou kvalitatívnych parametrov ako napr. viskozita a teplota je niekedy potrebné pripojiť senzor merania teploty k prietokomeru. Tu sa naskytuje niekoľko možností. Najjednoduchšie je pripojenie clamp-on senzora, ktorý sa montuje na povrch potrubia a nenarúša integritu meraného bodu ale jeho odozva je pomalšia a rozdiel medzi skutočnou teplotou média a meranou je väčší, čo vnaša nepresnosť do celkového merania prietoku. Avšak, prietokomery Flexim majú integrovanú funkciu kompenzácie teplotnej diferencie pre tento druh senzorov. Druhá možnosť je pripojenie in-situ senzora, čo však vyžaduje narušenie potrubia a úpravy. Možné je pripojenie externého signálu o teplote vo forme unifikovaného signálu.

Prístroje tohto druhu sa vyrábajú ako prenosné s vlastným napájaním z vnútorného akumulátora ale aj ako stacionárne. V oboch prípadoch sa používajú clamp-on senzory a presunutie merania na iný technologický bod nie je ani mechanicky ani časovo náročné.

Ako nevýhoda je vyššia cena ako pri invazívnych prietokomeroch avšak výhody spomenuté vyššie často tento nedostatok kompenzujú a kladú tento druh meracích prístrojov na popredné miesta technologických meraní a významne zvyšujú komfort a bezpečnosť pri práci.