

Verifikace funkčnosti ultrazvukového analyzátoru plynů

Ing., Michal, Vítek

Vedoucí práce: Doc. Ing., Václav, Vacek, CSc.

Abstrakt

Vytvořili jsme ultrazvukový analyzátor založený na měření rychlosti zvuku v plynech a jejich směsích. Složení plynu je zjišťováno srovnáním z měřené hodnoty s tabulkovou hodnotou vypočítanou z vhodné stavové rovnice. Rychlost zvuku je vypočtena z doby průchodu ultrazvukových pulsů přes známou délku, která je měřena speciálně vyvinutou elektronikou. Analyzátor je schopen pracovat v širokém pásmu tlaků (max. 12 bar_a) i teplot (od -40°C do 80°C). Měřená data jsou komunikována do řídicího počítače, kde je v aplikaci vytvořené v prostředí PVSS SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) provedena rychlá analýza složení měřeného plynu probíhající v reálném čase.

Klíčová slova

Analyzátor, rychlost zvuku, směsi plynů, SCADA komponenta

1. Úvod

V rámci práce na projektu jsme vyvinuli ultrazvukový analyzátor plynů založený na měření rychlosti zvuku v analyzovaném médiu založený na studiích (Hallewell et al., 1988, Vacek et al., 2001, Hallewell, Vacek, Doubek, 2010). Ultrazvuková vlna je generována ultrazvukovým převodníkem ve formě sady obdélníkových pulsů, které jsou následně zachyceny na druhém ultrazvukovém převodníku, který převádí zvuk na elektrický signál. Analyzátor je primárně určen k analýze směsí dvou plynů (např. R116, R218) za různých teplot a tlaků.

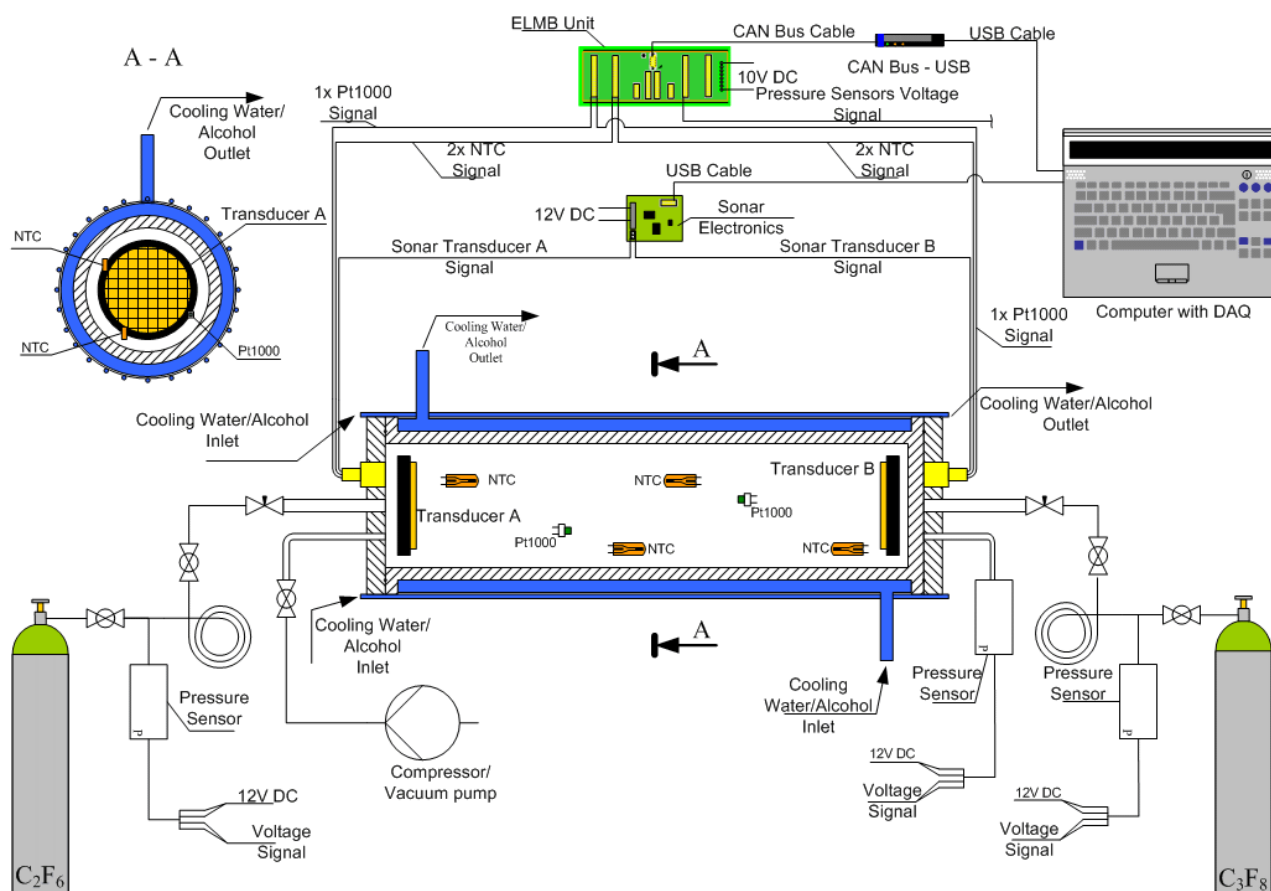
2. Popis zařízení

Ultrazvukové převodníky jsou nainstalovány v komoře analyzátoru a jsou od sebe vzdáleny známou (kalibrovanou) vzdáleností. Převodníky jsou identické, přičemž jeden standardně pracuje v režimu přijímače a druhý v režimu vysílače. V případě potřeby je možné provozovat analyzátor v duplexním režimu, kdy je rychlost zvuku měřena v obou směrech, což navíc umožňuje analyzátoru fungovat jako průtokoměr. Komora, která umožňuje variování vnitřní teploty, je v průběhu měření zaplněna analyzovaným plynem nebo směsí plynů. Současná verze analyzátoru se skládá z následujících hlavních součástí: (I) Nerezová komora analyzátoru s instalovanými ultrazvukovými převodníky a senzory tlaku a teploty; (II) Externí temperační plášť umožňující generování homogenního teplotního pole uvnitř komory analyzátoru; (III) Elektronika analyzátoru umožňující měření času průchodu ultrazvukové vlny komorou analyzátoru; (IV) monitorovací a řídicí softwarová komponenta běžící v počítači připojeném k elektronice analyzátoru, ve které probíhá vlastní analýza plynu. Analyzátor instalovaný v sestavě umožňující vytváření binárních směsí plynů je zobrazen na Obrázku 1.

Struktura analyzátoru, v rámci které je odděleno vlastní časování elektroniky, měření času průchodu ultrazvukové vlny mezi převodníky, a zpracování dat analyzovaného plynu umožňuje rychlou adaptaci analyzujících algoritmů bez nutnosti náročné modifikace firmwaru elektroniky.

Kalibrace vzdálenosti mezi ultrazvukovými převodníky byla prvotně provedena s xenonem, jehož chování je podobné chování ideálního plynu a u nějž je rychlost zvuku blízká rychlosti zvuku v plynech R116 a R218. Délka komory analyzátoru byla na základě provedených

měření vypočtena jako 250.7 mm. Následně byla provedena ověřovací měření v dusíku a argonu.



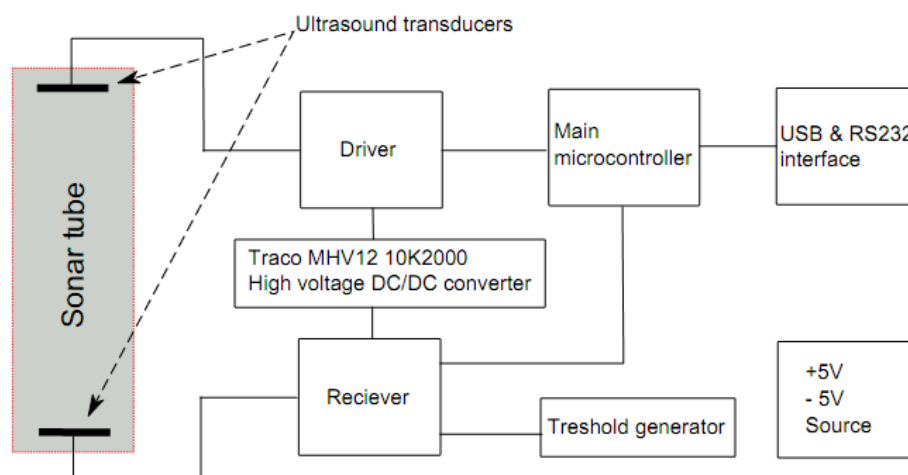
Obrázek 1. Měřicí sestava s ultrazvukovým analyzátozem plynů umožňující měření směsí plynů C_3F_8 (R218) a C_2F_6 (R116).

3. Elektronika analyzátoru

Elektronika analyzátoru, kterou jsme vyvinuli (Obrázek 2), zajišťuje vybuzení vysílacího ultrazvukového převodníku krátkou sadou obdélníkových pulzů vysokého napětí o frekvenci 50Khz. Pulsy jsou generovány v budícím obvodu s mikrokontrolerem připojeném k vysílacímu převodníku, přičemž přijímací převodník je připojen zesilovači a komparátoru. Rychlý časovač (20MHz), zajištěný stejným mikrokontrolerem, je spuštěn synchronně s náběžnou hranou prvního přeneseného 50Khz pulzu. První zachycený pulz, který má větší amplitudu, než je úroveň nastavená na komparátoru, zastaví časovač. Čas naměřený mezi prvním odeslaným a prvním zachyceným pulsem je měřen mikrokontrolerem, který též zajišťuje komunikaci dat do nadřazených systémů po sběrnici RS232 nebo USB.

3.1. Ultrazvukové převodníky

V současné době je dostupná celá řada technologií ultrazvukových převodníků založených na různých fyzikálních principech. My jsme pro náš analyzátor vybrali kapacitní převodníky Polaroid pro jejich rychlou mechanickou odezvu, chemickou kompatibilitu a známé chování při různých teplotách a tlacích. V tomto převodníku je senzitivním prvkem tenká zlatá fólie vybuzená signálem o vysokém napětí a frekvenci 50KHz.



Obrázek 2. Blokové schéma elektroniky analyzátoru.

Převodník má otevřenou konstrukci, což umožňuje analyzovanému plynu obklopit membránu z obou stran a pracovat v širokém spektru tlaků. Při našich měřeních jsme používaly budící signál o napětí 280V, kdy na přijímacím převodníku bylo nastaveno napětí konstantní a na vysílacím oscilovalo mezi 0V a 280V s frekvencí 50KHz (řada obdélníkových pulzů). Jako zdroj vysokého napětí pro převodníky byl použit DC/DC konvertor.

3.2. Elektronika analyzátoru

Měření času odražené odezvy je spuštěno synchronně s náběžnou hranou prvního vyslaného obdélníkového pulsu o frekvenci 50KHz a je ukončeno v momentu, kdy přijatý odražený signál překoná definovanou mez. Prahová mez je obvykle stanovena na minimální možnou hodnotu, která umožní odlišit přijatý signál od elektronického šumu. Prahová mez je nastavena se stejnou polaritou, jako je amplituda první odražené přijaté vlny. Přijímací DC převodník je spojen s jednostupňovým AC zesilovačem se jmenovitým zesílením na úrovni 190. Testovali jsme dva druhy zesilovačů vhodných pro tento účel, kdy první z nich byl levnější operační zesilovač s rychlostí přechodu $9\text{V}/\mu\text{s}$ a následně také nákladnější rychlý zesilovač LT1220 s rychlostí přechodu $250\text{V}/\mu\text{s}$. Pomalá dynamická odezva levnějšího zesilovače měla negativní vliv na přesnost měření doby přijetí odražené vlny, a proto bylo nakonec možné použít pouze s LT1220. Jako finální element obvodu za zesilovačem byl nasazen velmi rychlý komparátor s dobou odezvy 7ns. Funkčnost elektroniky byla ověřena kalibrací v plynech se známými termofyzikálními parametry. Z výsledků kalibrací je patrné, že navržená elektronika skutečně měří čas průchodu ultrazvukové vlny od vysílacího do přijímacího ultrazvukového převodníku.

3.3. Kalibrace plynového analyzátoru

Znalost přesné vzdálenosti (většinou lepší než 1mm pro vzdálenost 100cm) mezi fóliemi ultrazvukových převodníků je zásadní pro přesnou analýzu zkoumaného plynu. Tato vzdálenost je manuálně velmi obtížně měřitelná, proto jsme se rozhodli provést kalibraci vzdálenosti měřením v plynech, u nichž je rychlost zvuku za různých teplotních a tlakových podmínek dobře známa. Konkrétně jsme si zvolili tři referenční plyny – argon, xenon a dusík. Před započítáním kalibrace plyny byla manuálně naměřena vzdálenost mezi fóliemi $250 \pm 1\text{mm}$. Následná kalibrace byla provedena při průměrné teplotě 19.6°C a tlaku od 1 do 3.5bar_a . Výsledná vzdálenost byla kalibrací určena jako $250.7 \pm 0.06\text{mm}$ při všech tlacích. Kalibrace též ukázala, že analyzátor je schopen spolehlivě pracovat v prostředích s různou hustotou (hustota xenonu je téměř 5 větší než hustota dusíku při stejném tlaku a teplotě).

4. Experimentální ověřovací měření

Rychlost zvuku v čistých chladivech C_3F_8 (R218) a C_2F_6 (R116) a jejich směsích byla změřena při různých teplotách a tlacích pro kalibrovanou vzdálenost 250.7mm mezi ultrazvukovými převodníky. Naměřené rychlosti zvuku byly srovnány s predikovanými rychlostmi získanými ze stavových rovnic BWR (software NIST REFPROP) a PC SAFT, viz Obrázek 3. Konkrétně byla provedena pro čistá chladiva tato měření:

- C_3F_8 (pro teploty 19.2°C a 19.4°C a tlaky od 0.4bar_a do 2.5 bar_a), viz Tabulka 1.
- C_2F_6 (pro teploty 19.6°C a 19.7°C a tlaky od 1.3bar_a do 2.7 bar_a), viz Tabulka 2.

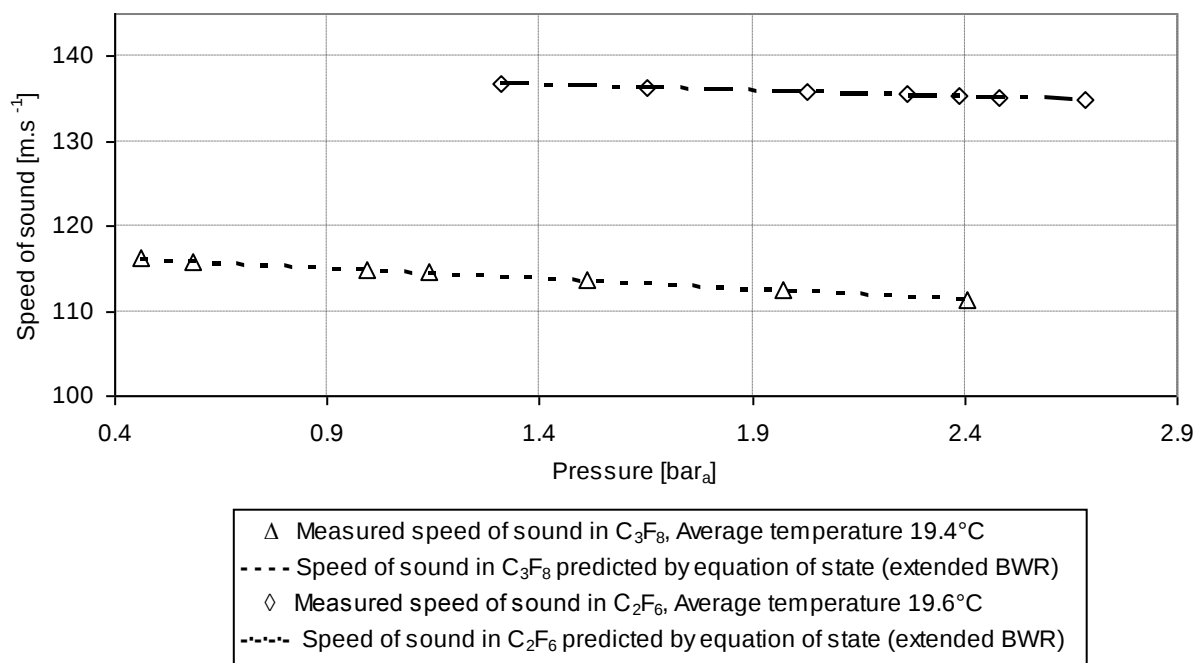
Průměrná difference mezi měřenou a predikovanou rychlostí zvuku byla 0.02% pro obě analyzovaná chladiva. Ověřovací měření pak pokračovala směsí C_2F_6/C_3F_8 při teplotě 19.1°C pro tlaky od 0.9 bar_a do 2bar_a a koncentrace C_2F_6 v C_3F_8 od 0% do 60%, viz Obrázek 4. Průměrná odchylka mezi měřenou a predikovanou rychlostí v pásmu 0.5% pro tlaky nižší než 1.5bar_a a koncentrace do 50% C_2F_6 . Pro ostatní měření byla průměrná odchylka 0.75%. V průběhu měření se průměrná teplota uvnitř komory analyzátoru nezměnila o více než $\pm 0.3^\circ\text{C}$.

Tabulka 1. Naměřená rychlost zvuku v čistém C_3F_8 .

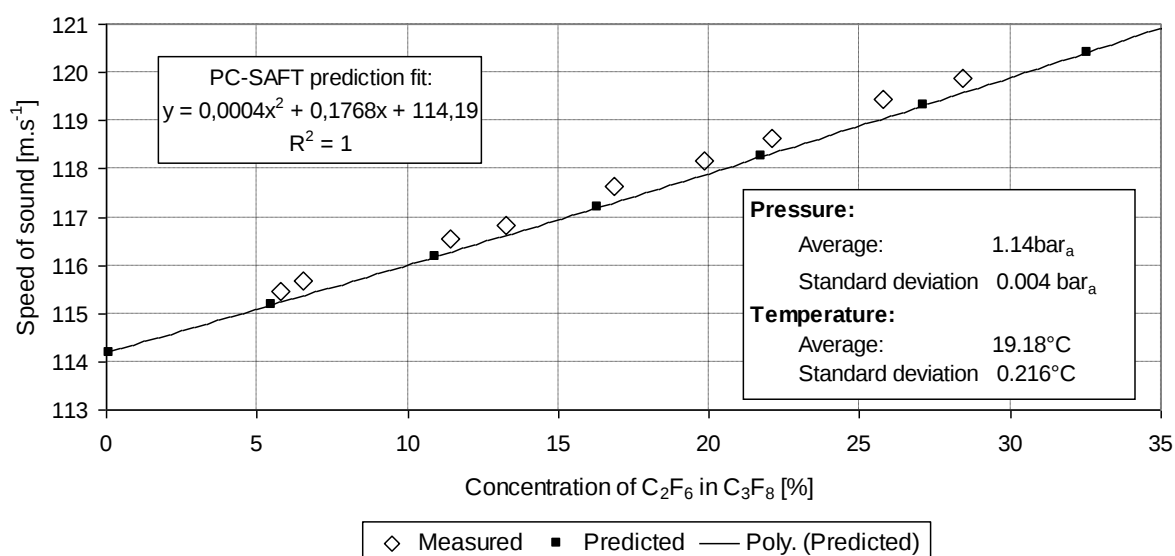
Teplota °C	Tlak bar _a	Naměřená rychlost zvuku m.s ⁻¹	Predikovaná rychlost zvuku m.s ⁻¹	Chyba	
				absolutní m.s ⁻¹	relativní %
19.4	0.46	116.18	116.08	0.10	0.09
19.4	0.59	115.83	115.78	0.05	0.04
19.4	0.99	114.86	114.84	0.02	0.01
19.4	1.14	114.52	114.48	0.04	0.04
19.4	1.51	113.59	113.58	0.01	0.01
19.4	1.97	112.39	112.43	-0.04	-0.03
19.4	2.41	111.29	111.30	-0.01	-0.01

Tabulka 2. Naměřená rychlost zvuku v čistém C_2F_6 .

Teplota °C	Tlak bar _a	Naměřená rychlost zvuku m.s ⁻¹	Predikovaná rychlost zvuku m.s ⁻¹	Chyba	
				absolutní m.s ⁻¹	relativní %
19.6	1.31	136.72	136.73	-0.01	-0.01
19.6	1.65	136.28	136.30	-0.02	-0.01
19.6	2.03	135.79	135.81	-0.02	-0.02
19.6	2.27	135.46	135.50	-0.04	-0.03
19.6	2.39	135.26	135.34	-0.08	-0.06
19.6	2.48	135.14	135.22	-0.08	-0.06
19.6	2.68	134.94	134.96	-0.02	-0.02



Obrázek 3. Naměřená rychlost zvuku v C₃F₈ a C₂F₆.



Obrázek 4. Srovnání měřených a predikovaných dat získaných pro směs C₃F₈ a C₂F₆.

5. Softwarová komponenta analyzátoru

Pro ultrazvukový analyzátor plynů jsme vyvinuly speciální samostatnou softwarovou "Prediktivní Komponentu Analyzátoru" (PAK). PAK je implementovaná v programovém SCADA prostředí PVSS II ve verzi 3.8.

Hlavními úkoly komponenty jsou:

- Zajištění komunikace s elektronikou analyzátoru - komunikační cyklus (KC) a detekce chyb komunikace a jejich odstranění.
- Odhad termofyzikálních parametrů analyzovaných plynů – odhadující cyklus (OC).
- Sledování tlaku a teploty v systému a detekce nestabilních podmínek.
- Grafické uživatelské prostředí (GUI).

5.1 Struktura

PAK je složena ze tří hlavních částí KC, OC, a GUI uvedených v předchozím oddílu. Komponenty jsou organizovány do dvouvrstvé hierarchie, kde KC a OC jsou ve spodní vrstvě a GUI ve vrchní vrstvě. PAK je nainstalována v distribuovatelném PVSS projektu, který je určen výhradně pro ultrazvukový analyzátor. Jeden PVSS projekt je schopen pracovat s daty z libovolného počtu analyzátorů, přičemž jediným omezením je výpočetní výkon CPU počítače, na kterém je projekt provozován. Data jsou ukládána buď na lokálním disku nebo ve vzdálené databázi, dle volby uživatele.

5.2 Komunikační cyklus

Komunikační cyklus je navržen jako proces zodpovědný za komunikaci mezi PVSS a elektronikou analyzátoru. Komunikace, která probíhá po sériové sběrnici rychlostí 9600 bit/s, je typu half-duplex a používá námi navržený komunikační protokol. Protokol je definován skupinou zpráv se standardizovanou délkou a pravidly určujícími akce, které se ke zprávám vztahují. KC umožňuje zasílání zpráv ve třech režimech – normálním, nouzovém, a servisním. V normálním režimu KC periodicky zasílá elektronice analyzátoru zprávy, které spouští měření doby průchodu ultrazvukové vlny komorou analyzátoru i odečet hodnot z teplotních a tlakových senzorů. Všechny zprávy jsou odeslány/přijaty přes FIFO (First In First Out) zásobník. Komunikační cyklus můžeme rozložit na čtyři hlavní kroky: **(a)** KC zašle zprávu spouštějící měřicí cyklus; **(b)** prodleva 8s umožňující elektronice sesbírat žádaná data; **(c)** KC si pomocí zpráv vyžádá dat (v případě chyby je spuštěn alarm); **(d)** data jsou dekodována a uložena do databáze. V případě spuštění alarmu KC automaticky přejde do nouzového režimu, který funguje jako rozšíření normálního režimu. KC se snaží obnovit komunikaci pomocí speciálních zpráv elektronice analyzátoru, které jsou odeslány před a po odeslání normální zprávy.

5.3 Odhadující cyklus

Odhadující cyklus je složen ze dvou nezávislých částí – Výpočetní Část (CP) a Prediktivní Část (PP), které jsou spouštěny jako dvojice nesynchronizovaných vláken operačního systému. CP v pravidelných intervalech vypočítává všechny proměnné nezbytné pro následnou predikci složení analyzovaného plynu (rychlost zvuku, průměrnou teplotu, průměrný tlak, a jejich plovoucí průměry). CP také kontroluje konzistenci a pravost dat z teplotních senzorů. Všechny senzory, jejichž teploty se liší od aritmetického průměru o hodnotu větší než zadanou v nastavení měření, jsou automaticky vyřazeny z výpočtu průměru. PP odhaduje rychlost zvuku (čistý plyn) a složení plynu (směsi) na základě plovoucího průměru měřené teploty, tlaku a rychlosti zvuku. Změřená data jsou porovnávána s předpřipravenými tabulkovými hodnotami vypočtenými ze stavových rovnic NIST BWR a PC SAFT. Hodnota predikce je pak získána pomocí algoritmu hledajícího vážený průměr 4 tabulkových hodnot s minimální kvadratickou normou n_i danou rovnicí (1).

$$n_i = k_1(p_{i, \text{table}} - p_{\text{floatingaverage}})^2 + k_2(t_{i, \text{table}} - t_{\text{floatingaverage}})^2 + k_3(\text{SoS}_{i, \text{table}} - \text{SoS}_{\text{floatingaverage}})^2 \quad (1)$$

Přesnost výsledku predikce je kromě vstupních dat závislá i na hustotě tabulkových hodnot. V současné době se nám daří získávat výstupní data, které mají odchylku menší než 0.5 % z celého rozsahu. Algoritmus predikce je navržen tak, aby minimalizoval zátěž CPU a dosahoval rychlosti použitelné u “real-time” aplikací.

5.4 Uživatelské rozhraní

Uživatelské rozhraní je navrženo tak, aby umožňovalo obsluhu běžným uživatelům (průmyslové nastavení) i expertům (laboratorní nastavení). U běžného uživatele je předpokládána jen základní znalost plynového analyzátoru a očekává se, že potřebuje přístup pouze k výsledkům analýzy a informacím o potenciálních problémech (alarmech). Na druhé straně expert potřebuje mít přístup ke všem informacím týkajícím se stavu komunikace, stavu prostředí v analyzátoru (teplota, tlak), archivace dat i ke všem nastavením. GUI je proto

organizováno do stromové struktury, která je v současné době složena z 25 panelů, pokrývajících zmíněné potřeby.

6. Závěr

Prototyp ultrazvukového analyzátoru plynů, umožňující měření v širokém rozsahu tlaků a teplot, byl vyvinut a testován spolu se všemi nezbytnými hardwarovými i softwarovými součástmi. Přesnost analyzátoru byla experimentálně ověřena kalibrací v xenonu, argonu a dusík, a řadou měření ve fluorokarbonych (C_3F_8 a C_2F_6) a jejich směsích. Při měřeních byla zachována konstantní teplota a byl měněn tlak. Změřená rychlost zvuku byla následně srovnána s rychlostí zvuku získanou ze stavové rovnice NITS BWR nebo PC SAFT EOS upravené pro fluorokarbony. Výsledky z testů ukazují, že průměrná nejistota měření času průchodu ultrazvukové vlny je 209ns, což odpovídá nejistotě elektroniky analyzátoru (200ns), kterou jsme vyvinuli. Tato nejistota času průchodu znamená pro rychlost zvuku 125 m.s^{-1} a vzdálenost 250.7mm nejistotu 0.013m/s. Tato nejistota je klíčová jak pro měření v čistých plynech tak pro měření ve směsích plynů. Přesnost analýzy je též dána přesností použitých tlakových a teplotních senzorů. Přesnost námi použitých senzorů spolu s nejistotou elektroniky ukazuje na přesnost výsledků složení analyzovaného plynu 0.75% (pro nízké koncentrace C_2F_6 v C_3F_8).

Poděkování

Tato práce byla podpořena grantem Studentské grantové soutěže ČVUT č. SGS/FIS No.: 10-802460.

7. Reference

1. Hallewell G, Crawford G, McShurley D, Oxoby G and Reif R. 1988, A sonar-based instrument for the ratiometric determination of binary gas mixtures, *Nucl. Instr. & Meth.*:219-264
2. Vacek V, Hallewell G, Lindsay S. 2001, Velocity of sound measurements in gaseous per-fluorocarbons and their mixtures, *Fluid Phase Equilibria*, 185(1-2): 305-314
3. Hallewell G, Vacek V, Doubek M. 2010, Novel and simple sonar gas analyzers, *Proc. of the 9th Asian Thermophysical Properties Conference*, Beijing, October 19–22, CD ROM Paper No.:109296: 1-6