

Využití mikrováhového senzoru při detekci prachových částic

Usage of microbalance system for dust particle detection

Bc. Petr Běšínský

Diplomová práce
2009



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta aplikované informatiky
Ústav aplikované informatiky
akademický rok: 2008/2009

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

(PROJEKTU, UMĚLECKÉHO DÍLA, UMĚLECKÉHO VÝKONU)

Jméno a příjmení: **Bc. Petr BĚŠÍNSKÝ**
Studijní program: **N 3902 Inženýrská informatika**
Studijní obor: **Počítačové a komunikační systémy**

Téma práce: **Využití mikrováhového senzoru při detekci prachových částic**

Zásady pro vypracování:

1. Prostudujte doporučenou literaturu a další informační zdroje.
2. Vypracujte literární rešerši týkající se problematiky piezoelektrického mikrováhového senzoru a jeho možných aplikací.
3. Navrhněte a z dostupných prostředků sestavte měřicí systém na bázi piezoelektrického mikrováhového snímacího prvku za účelem detekce dynamiky usazování prachových částic.
4. Vyberte vhodné programové prostředí (Matlab, Vee Pro apod.) a vytvořte odpovídající uživatelskou aplikaci pracující v reálném čase, která bude umožňovat nastavení důležitých parametrů měření a průběžné ukládání naměřených dat.
5. Pomocí sestaveného měřicího systému proveďte základní demonstrační měření v laboratořích FAI UTB a také na různých místech v různých časových periodách (den, týden).
6. Vyhodnoťte výsledky experimentů a zvažte vhodnost této metody pro praktické užití, resp. navrhněte možnosti pokračování.

Rozsah práce:

Rozsah příloh:

Forma zpracování diplomové práce: **tištěná/elektronická**

Seznam odborné literatury:

1. REGTIEN P. P. L.: Measurement science for engineers, London and Sterling, VA, 2004.
2. FRADEN, J.: Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications, 2nd ed. New York, Springer Verlag, 1996.
3. ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B.: MATLAB – tvorba uživatelských aplikací. 1. vyd. Praha : BEN – technická literatura, 2004.
4. SEDLÁČEK, M., ŠMÍD, R.: MATLAB v měření. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2005.
5. SEDLÁČEK, M.: Zpracování signálů v měřicí technice. Dotisk 2. vyd.. – Praha : ČVUT, ISBN 80-01-01785-0, 1999.
6. ĎAĎO, S., KREIDL, M.: Senzory a měřicí obvody, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996.

Vedoucí diplomové práce: **Ing. Milan Navrátil, Ph.D.**
Ústav elektrotechniky a měření

Datum zadání diplomové práce: **20. února 2009**

Termín odevzdání diplomové práce: **27. května 2009**

Ve Zlíně dne 13. února 2009

prof. Ing. Vladimír Vašek, CSc.
děkan



doc. Ing. Ivan Zelinka, Ph.D.
ředitel ústavu

ABSTRAKT

Cílem diplomové práce bylo využití mikrováhového senzoru pro detekci prachových částic. Jednalo se o stanovení teplotní závislosti, vlivu vlhkosti a tlaku na průběh měření, výpočet relativní hmotnosti prachových částic a provedení měření na různých místech v různých periodách. Při psaní diplomové práce bylo využito informací čerpaných z odborné literatury. Praktická část je zpracována do tří hlavních celků. První část obsahuje vytvořený program pro automatický sběr dat a popis jeho základních funkcí včetně postupu tvorby ve vývojovém prostředí Agilent Vee Pro 9.0 a návrh systému na bázi piezoelektrického mikrováhového snímacího prvku za účelem detekce dynamiky usazování prachových částic. Druhá část je věnována jednotlivým měřením a obsahuje také vyhodnocení všech provedených měření. V závěrečné části je uvedena vzorová laboratorní úloha včetně postupu práce a výsledného protokolu. V této části jsou rovněž navrženy různé možnosti pokračování měření a vhodnost této metody pro praktické využití. Veškerá data získaná během měření a zhotovený obslužný program pro automatický sběr dat jsou umístěna na příloženém CD.

Klíčová slova:

Mikrováhový senzor, prachové částice, frekvence krystalu, absolutní frekvence, relativní frekvence, skutečná frekvence, relativní hmotnost, teplota, vlhkost, tlak.

ABSTRACT

The objective of this graduation thesis was the usage of microbalance system for dust particle detection. The experiment includes setting temperature, humidity and pressure influence on course of measurement, calculation of relative weight of dust particle and completion of each measurement in different places and different periods. During the compilation the information from the specialised literature was used. The practical part contains three main parts. First chapter includes created computer program for automatic gathering of computer data and description of basic function including process of creating in development environment of Agilent Vee Pro 9.0 and system design based on piezoelectric microbalance scanning element for dynamic detection of dust particle. Second chapter is dedicated to single measurement and also includes evaluation of all finished measurement. In the final chapter sample laboratory protocol including progress of work is

included. This part also includes variable ways of continuing of work and fitness of this method for practical usage. All data obtained during measurement and created computer program for automatic gathering of computer data are placed on included CD.

Keywords:

Microbalance system, dust particle, crystal frequency, absolute frequency, relative frequency, real frequency, relative weight, temperature, humidity, pressure.

Rád bych poděkoval panu Ing. Milanu Navrátilovi, Ph.D. za podnětné náměty a připomínky k mé práci.

Prohlašuji, že

- beru na vědomí, že odevzdáním diplomové/bakalářské práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb. o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších právních předpisů, bez ohledu na výsledek obhajoby;
- beru na vědomí, že diplomová/bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému dostupná k prezenčnímu nahlédnutí, že jeden výtisk diplomové/bakalářské práce bude uložen v příruční knihovně Fakulty aplikované informatiky Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně a jeden výtisk bude uložen u vedoucího práce;
- byl/a jsem seznámen/a s tím, že na moji diplomovou/bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 1 autorského zákona má UTB ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- beru na vědomí, že podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – diplomovou/bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- beru na vědomí, že pokud bylo k vypracování diplomové/bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tedy pouze k nekomerčnímu využití), nelze výsledky diplomové/bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- beru na vědomí, že pokud je výstupem diplomové/bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

že jsem na diplomové práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval.

V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.

Ve Zlíně 27. května 2009

.....
Podpis diplomanta

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	12
1 PRINCIP PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU	13
1.1 NÁHRADNÍ SCHÉMA PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU.....	15
2 POUŽÍVANÉ PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY	17
3 KŘEMENNÉ VÝBRUSY	18
3.1 CHARAKTERISTIKA	18
4 POSTUPY PŘI MĚŘENÍ	21
4.1 AKTIVNÍ METODA	21
4.2 PASIVNÍ METODA.....	21
5 ELEKTRONIKA PIEZOELEKTRICKÝCH SENZORŮ	22
6 VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH SENZORŮ	23
6.1 PIEZOELEKTRICKÉ SENZORY ZRYCHLENÍ KMITAVÉHO POHYBU.....	23
6.2 PIEZOELEKTRICKÉ SENZORY SÍLY A TLAKU.....	23
7 POUŽITÉ PŘÍSTROJE	26
7.1 PŘÍSTROJ QCM200	26
7.1.1 Možné aplikace QCM200	26
7.1.2 Sestava přístroje QCM200	27
7.1.3 Parametry přístroje QCM200	30
7.1.4 Hlavní rovnice pro měření hmotnosti.....	30
7.1.5 Princip činnosti přístroje QCM200	31
7.2 MEMMERT UNP 200	31
7.3 MULTIFUNKČNÍ PŘÍSTROJ TESTO 435	32
8 POUŽITÉ SOFTWARE VYBAVENÍ	34
8.1 VÝVOJOVÉ PROSTŘEDÍ VEE PRO 9.0.....	34
8.1.1 Možnosti Vee Pro 9.0.....	34
8.2 TESTO COMFORT SOFTWARE X35	36
II PRAKTICKÁ ČÁST	37
9 ZPRACOVÁNÍ ZADÁNÍ	38
9.1 NÁVRH MĚŘICÍHO SYSTÉMU NA BÁZI PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU.....	38
9.2 TVORBA PROGRAMU V PROSTŘEDÍ VEE PRO 9.0.....	39
9.2.1 Obsluha programu	40

9.3	IO MANAGER	41
9.4	SBĚR DAT Z PŘÍSTROJE TESTO 435.....	42
9.5	REALIZOVANÁ MĚŘENÍ.....	43
9.5.1	Měření prachových částic v závislosti na teplotě – stanovení korekční křivky	43
9.5.2	Měření prachových částic v laboratorních podmínkách.....	44
9.5.3	Měření prachových částic v závislosti na tlaku.....	50
9.5.4	Měření prachových částic v závislosti na relativní vlhkosti.....	52
9.5.5	Dlouhodobější měření prachových částic v laboratorních podmínkách.....	54
9.5.6	Dlouhodobější měření prachových částic v uzavřené místnosti	55
10	REALIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY	58
10.1	MĚŘENÍ USAZOVÁNÍ PRACHOVÝCH ČÁSTIC	58
11	MOŽNOSTI POKRAČOVÁNÍ A PRAKTICKÉ VYUŽITÍ	61
	ZÁVĚR	62
	ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ.....	64
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY.....	66
	SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	68
	SEZNAM OBRÁZKŮ	69
	SEZNAM TABULEK.....	71
	SEZNAM PŘÍLOH.....	72

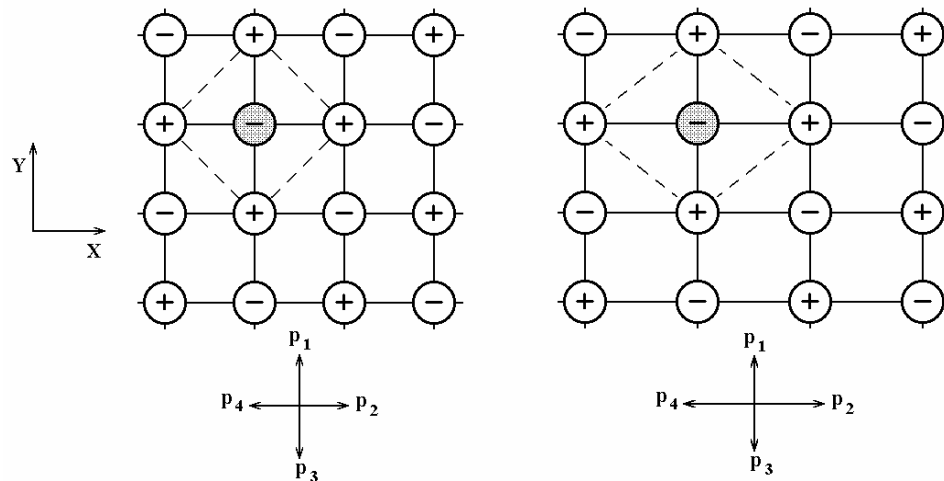
ÚVOD

Pomocí mikrováhového senzoru lze měřit mimo jiné i množství prachových částic v daném prostředí. Je možné jej použít jako detektor v případech, kde je nutné zajistit naprostou čistotu a bezprašnost, například v kontejnerech nebo ve skladovacích prostorech, kde jsou uchovávány citlivá zařízení, a vyloučit či odstranit možná rizika vzniku víření prachových částic a zabránění jejich dalšímu šíření. Další možné praktické využití je měření v různých místnostech, kde je například výpočetní technika, operační sály, pohyb lidí s chronickými alergiemi atd. Zde je možné stanovit přesnou míru prašnosti a navrhnout možné řešení a úpravy, které povedou k odstranění tohoto problému.

Nutností je ověření, zda-li je průběh měření ovlivňován nějakými negativními vlivy, jež mohou znehodnotit relevantnost celého měření. Jedná se především o teplotu. Zde vyplývá již ze samotné konstrukce křemenného krystalu fakt, že do 200°C by měla být prašnost ovlivňována jen minimálně a tedy výsledek celého experimentu by měl být průkazný. Dalšími negativními vlivy mohou být tlak a vlhkost.

Mikrováhový senzor pracuje na principu známému jako piezoelektrický jev. Piezoelektrický jev je schopnost krystalu generovat elektrické napětí při jeho deformování, popřípadě jev opačný, kdy se krystal v elektrickém napětí deformuje. Může se vyskytovat pouze u krystalů, které nemají střed symetrie. Nejznámější piezoelektrickou látkou je monokrystalický křemen, křišťál. Poprvé byl piezoelektrický jev pozorován u Seignettovy soli.

Vznik piezoelektrického jevu lze vysvětlit tak, že při deformaci se ionty opačných nábojů posunou v krystalové mřížce tak, až se elektrická těžiště záporných a kladných iontů, která v nezdeformovaném krystalu souhlasí, od sebe vzdálí. Na určitých plochách krystalu se objeví elektrický náboj. Při obráceném piezoelektrickém jevu, při tzv. elektrostripci, působí vnější elektrické pole posunutí iontů, což vede k deformaci krystalu.



Obr. 1 Souvislost struktury krystalové mřížky se vznikem piezoelektrického jevu

S deformací krystalické mřížky působením vnější síly souvisí i změna měrného elektrického odporu. Tento je označován jako piezorezistivní jev. Při vysokých teplotách dochází u jakéhokoliv materiálu ke ztrátě piezoelektrických vlastností, protože je narušeno uspořádání iontů. K této změně dochází skokově, podobně jako ke změně skupenství. Přechodová teplota je charakteristická pro daný materiál a nazývá se Curieova teplota

Přímý piezoelektrický jev se využívá např. u zapalovačů, v gramofonových přenoskách, v piezoelektrických mikrofonech. Piezorezistivní jev je využíván například v polovodičových tenzometrech.

Využití obráceného piezoelektrického jevu je založeno na působení elektrického pole na krystal. Je-li pole časově periodicky proměnné s kmitočtem, který odpovídá kmitočtu vlastních elastických kmitů krystalu, vzniká mechanická rezonance. Přímý i obrácený (nepřímý) piezoelektrický jev se využívá například v lékařských sonografech generujících ultrazvuk.

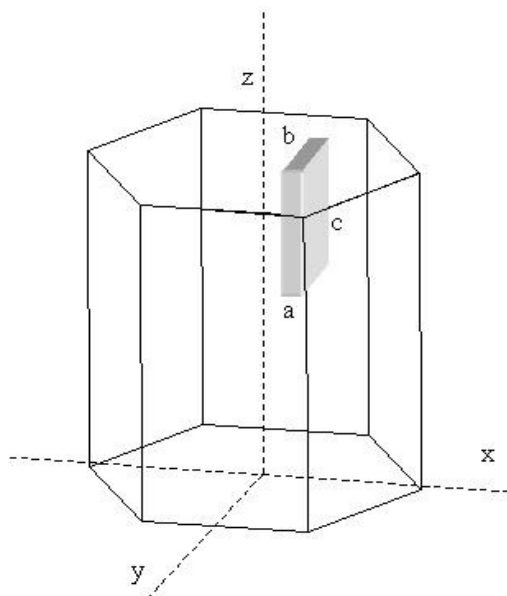
I. TEORETICKÁ ČÁST

1 PRINCIP PIEZOELEKTRICKÉHO SENZORU

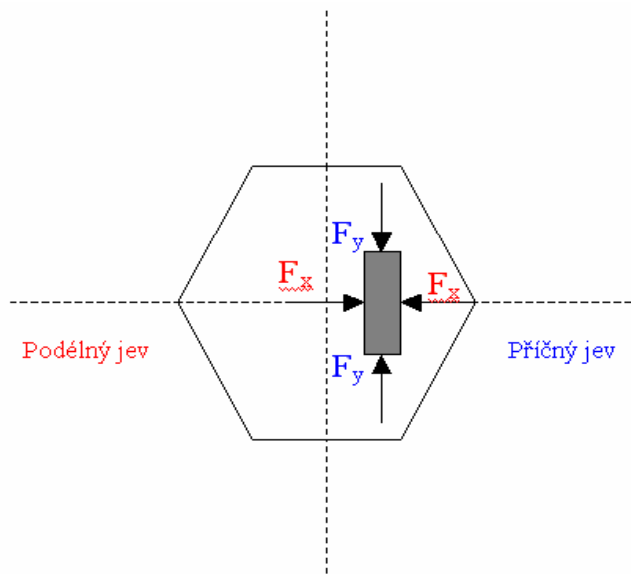
Síla, určená měřeným zrychlením nebo tlakem působícím na piezoelektrickou křemennou destičku v podrezonanční oblasti ve směru její elektrické osy x , vyvolá na protilehlé ploše ve směru této osy elektrický náboj. Hovoříme o podélném přímém piezoelektrickém efektu. Deformujeme-li piezoelektrickou destičku ve směru mechanické osy y (kolmé ke směru osy x), má náboj piezoelektrické destičky opačnou polaritu a vzniká příčný přímý piezoelektrický efekt. Na rozdíl od podélného piezoelektrického efektu je velikost vzniklého náboje závislá na rozměrech křemenné destičky. Využitím příčného přímého piezoelektrického efektu lze zvýšit citlivost senzoru. Je však i příčinou podstatně většího ovlivňování měřicího signálu změnami teploty. Vzniklé elektrické napětí mezi oběma plochami piezoelektrické destičky lze měřit až do frekvencí řádu desítek kHz. [11]

Z teorie piezoelektrického efektu vyplývá, že množství elektřiny vznikající na stěnách piezoelektrické destičky (měřicího elementu) zůstává tak dlouho, dokud působí síla a neuniká náboj.

Piezoelektrický jev závisí na směru deformace vzhledem k osám krystalu (Obr. 2 a Obr. 3). Krystal má tři osy, v jejichž směru může být mechanicky namáhán. Elektrický náboj vzniká jen na stěnách kolmých k elektrické ose krystalu.



Obr. 2 Krystal křemene



Obr. 3 Výbrus snímače

Podélný elektrický jev vzniká působením síly F_x ve směru elektrické osy x . Vektor polarizace P_e je rovnoběžný s osou x a je úměrný působícímu mechanickému tlaku:

$$P_e = k_p p_x = k_p \frac{F_x}{S_x} \quad (1)$$

- p_x je tlak na stěnu s plochou $S_x = bc$ působením síly F_x ,
- k_p je piezoelektrická konstanta (též piezoelektrický modul).

Velikost náboje na stěně kolmé k elektrické ose je podle definice elektrické polarizace dána vztahem:

$$Q_e = P_e S_x = k_p F_x \quad (2)$$

Velikost náboje na elektrodách není závislá na geometrických rozměrech krystalového výbrusu.

Příčný elektrický jev vzniká působením síly F_y ve směru mechanické osy y . Vektor polarizace působí rovněž rovnoběžně s osou x , ale má opačný směr. Pro jeho velikost můžeme opět napsat vztah:

$$P_e = -k_p p_y = -k_p \frac{F_y}{S_y} \quad (3)$$

Pro velikost náboje platí

$$Q_e = P_e S_x = -k_p \frac{F_y S_x}{S_y} = -k_p F_y \frac{b}{a} \quad (4)$$

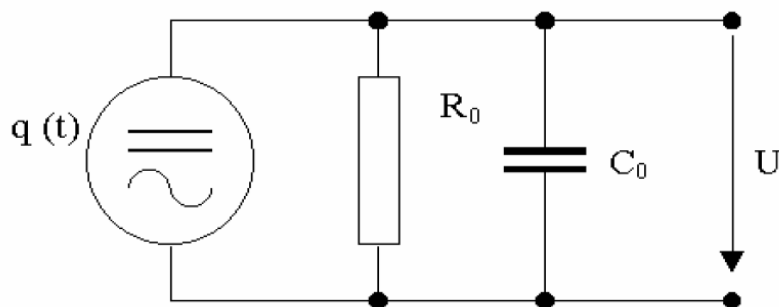
Z rovnice je zřejmé, že velikost náboje na elektrodách je závislá na geometrických rozměrech. Výbrus s polepy představuje i kapacitor s kapacitou C . Pro velikost napětí lze psát:

$$U = \frac{Q_e}{C} = \frac{k_p F_x}{C} = \frac{a}{\epsilon_o \epsilon_r S_x} k_p F_x = k_u F_x \quad (5)$$

- k_u je napěťová citlivost piezoelektrického senzoru.

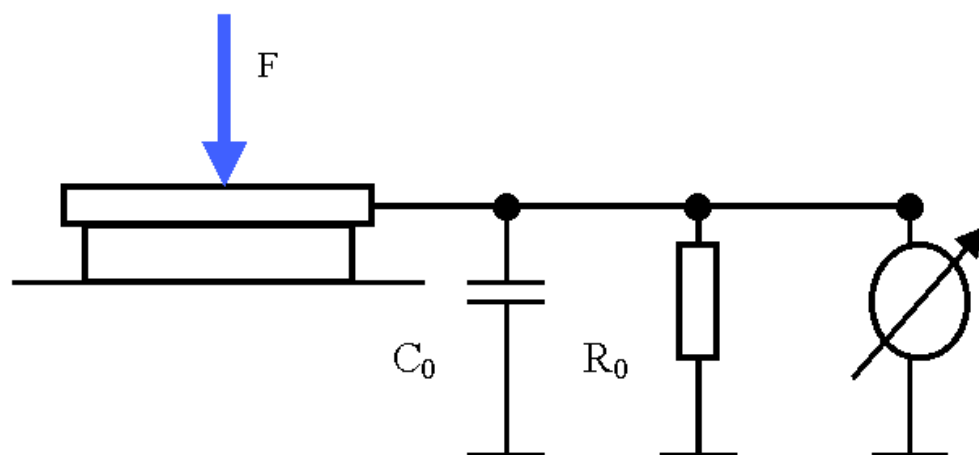
1.1 Náhradní schéma piezoelektrického senzoru

Při působení neelektrické veličiny se piezoelektrický senzor chová jako generátor náboje, jehož náhradní elektrické schéma zobrazuje obrázek (Obr. 4).



Obr. 4 Náhradní elektrické schéma piezoelektrického senzoru

Praktické náhradní schéma zapojení s piezoelektrickým senzorem zobrazuje obrázek (Obr. 5). Kapacita C_0 je dána geometrickou kapacitou mezi polepy výbrusu, odpor R_0 je svodový odpor výbrusu. Nebude-li uvažována vlastní sériová rezonance, bude při polarizaci výbrusu náhradní schéma obsahovat pouze C_0 a R_0 . Kmitočet deformační měřené veličiny (síly) musí být nižší, než je vlastní kmitočet výbrusu. Piezoelektrické snímače se používají do kmitočtu 10^5 Hz. [11]



Obr. 5 Praktické náhradní elektrické schéma piezoelektrického senzoru

2 POUŽÍVANÉ PIEZOELEKTRICKÉ MATERIÁLY

Mezi nejpoužívanější piezoelektrické materiály patří oxid křemičitý SiO_2 a keramiky titaničitanu barnatého BaTiO_3 . Působením mechanického namáhání nepřevyšujícího u křemene $1,5 \text{ kN/m}^2$ a u titaničitanu barnatého $0,3 \text{ kN/m}^2$ nedochází k nelineárnímu zkreslení elektrického signálu.

Oxid křemíku se vyskytuje v přírodě jako čistý křišťál nebo se vyrábí uměle. Do teploty $200 \text{ }^\circ\text{C}$ reaguje na změny teploty minimálně a rovněž tak při velmi nízkých teplotách. U titaničitanu barnatého je teplotní rozsah měření od -20 do $+70 \text{ }^\circ\text{C}$ běžně rozšiřován až do $100 \text{ }^\circ\text{C}$. Výjimečně se využívá i směsný titaničitan a zirkoničitan olovnatý pro měření v menším frekvenčním rozsahu. [10]

Existují další piezoelektrické materiály s jistými omezeními pro použití v senzorech mechanických veličin. Jde především o Seignettovu sůl a o primární fosforečnan amonný, vyznačující se vysokou teplotní závislostí piezoelektrického modulu, nízkou dielektrickou konstantou a malou mechanickou odolností.

Tabulka 1 Základní vlastnosti některých piezoelektrických materiálů

Název	Seignettova sůl	Křemen	Titaničitan barnatý	Titaničitan zirkoničitooolovnatý
Chemický vzorec	$\text{NaKC}_4\text{H}_4\text{O}_6 \cdot 4\text{H}_2\text{O}$	SiO_2	BaTiO_3	PbTrTiO_5
$k_p [\text{CN}^{-1}]$	300	2,1	120	-
$k_u [\text{VN}^{-1}]$	18	5	1	-
Max. teplota [$^\circ\text{C}$]	45	550	110	120
$\epsilon_r [-]$	350	4,5	$1200 \div 1700$	2700
Mechanická pevnost [MPa]	$1,5 \cdot 10^4$	$1 \cdot 10^5$	$8 \cdot 10^4$	-
Meze relativní vlhkosti [%]	30 – 85	0 - 100	0 - 100	-
Hustota [$\text{kg} \cdot \text{dm}^{-3}$]	1,77	2,6	5,5	7,6

3 KŘEMENNÉ VÝBRUSY

3.1 Charakteristika

Křemenné výbrusy jsou tenké kruhové destičky s průměrem od 4,0 do 20 mm i větší, vyrobené z krystalu křemene. Povrch výbrusů může být jemně broušený, chemicky leptaný nebo leštěný. Pro označení úhlu řezu se většinou používá skupina AT-řezů, řez BT, CT, DT, X a Y. Používají se pro výrobu křemenných krystalových jednotek, křemenných krystalových filtrů, piezoelektrických snímačů a pro další aplikace.

Mohou být vyhotoveny jako nepokovené nebo pokovené s kovovými elektrodami. Tloušťka výbrusů může být od 0,040 do 1 mm i více. Pro řezy AT, BT, X a Y může být tloušťka specifikována rezonančním kmitočtem a jeho tolerancí. Tvar výbrusů může být plan-paralelní (nezkosený nebo zkosený), plan-konvexní nebo bi-konvexní se specifikovaným poloměrem konvexního povrchu viz následující obrázek (Obr. 6).

Tabulka 2 Typické parametry křemenných výbrusů

Parametr	Minimálně	Maximálně
Průměr [mm]	4,0 ± 0,02	20,0 ± 0,02
Tloušťka [mm]	0,04 ± 0,001	1,0 nebo více
Tolerance úhlu řezu	± 15" (pro řez AT)	± 30'
Nerovnost povrchu	leštěný	dle požadavku
Označení osy X	dle požadavku	dle požadavku

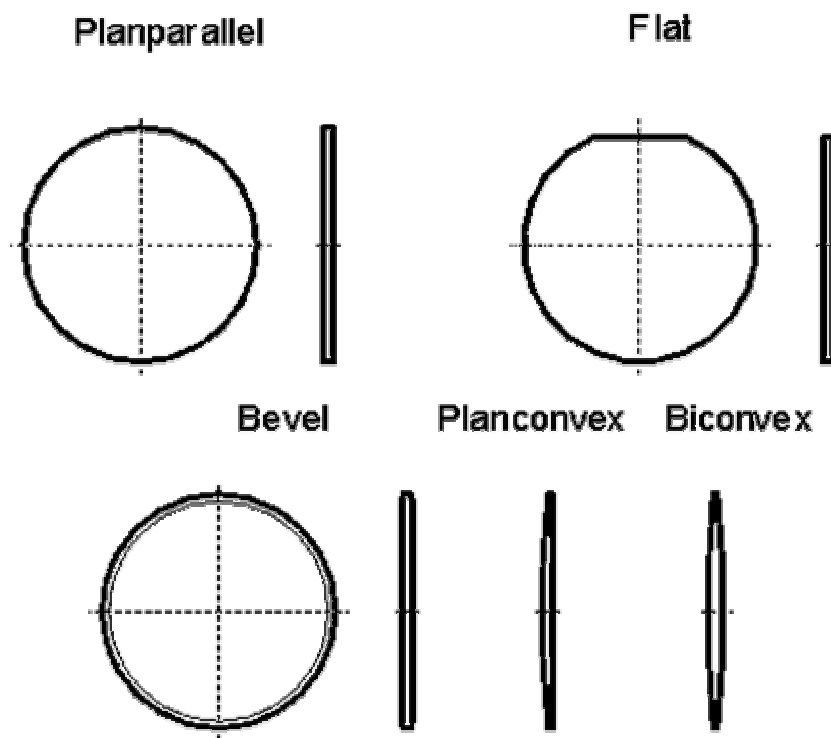
Specifikace syntetického křemene (podle EN/IEC 60758:2004, Ed.3):

- stupeň kvality: Stupeň C (standard), Stupeň B, Stupeň A (podle specifikace zákazníka)
- hustota inkluzí: stupeň Ib (standard) nebo lepší (podle požadavku)
- hustota leptacích kanálků: stupeň 3 (standard) nebo lepší (podle požadavku)

Specifikace parametrů křemenného výbrusu:

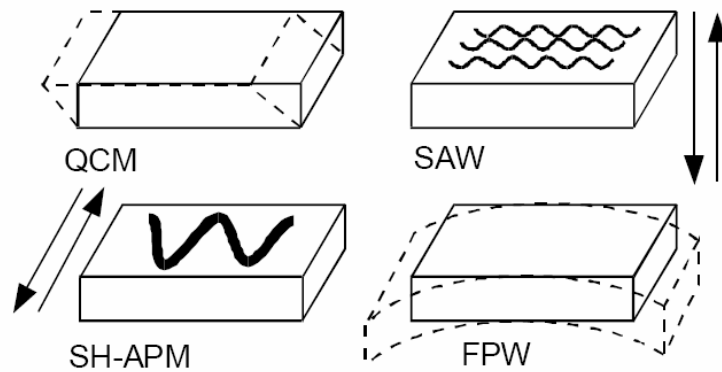
- průměr s tolerancí
- řez s tolerancí
- tloušťka nebo kmitočet s tolerancí

- nerovnost povrchu (R_a v mm, nebo velikost brusných zrn)
- označení osy X (for Y-rotated cuts)
- tvar povrchu (plan-paralelní, plan-paralelní fazetovaný, plan-konvexní nebo bi-konvexní)
- u pokovených výbrusů specifikace elektrod byla dosažena citlivost $510 \text{ Hz}/\mu\text{g}$, rozlišení 40 ng.



Obr. 6 Typické tvary křemenných výbrusů AT

V piezoelektrických systémech může oscilace probíhat v celém objemu materiálu, nebo pouze v povrchové vrstvě. Konkrétní systémy jsou uvedeny na následujícím obrázku (Obr. 7). Někdy se uplatňuje několik oscilací současně. Základní typy oscilací jsou QCM (quartz crystal microbalance), SAW (surface acoustic wave), SH-APM (shear horizontal acoustic plate mode) a FPW (flexural plate wave) neboli Lambova vlna.



Obr. 7 Základní typy oscilací

Rezonanční frekvenci f_0 určují fyzikální vlastnosti křemene a také tloušťka destičky (čím tenčí tím rychlejší vibrace a vyšší f_0). U tohoto typu bývá f_0 běžně od 5 MHz do 20 MHz, dál už jsou krystaly příliš tenké a lámou se. Při aplikaci látky na aktivní povrch elektrod dojde ke změně rezonanční frekvence f_0 . Změní se hmotnost celého systému a vibrace se zpomalí, a tedy frekvence poklesne. Pokud krystal navíc osciluje v přítomnosti kapaliny, dochází k dalším změnám f_0 v důsledku tlumení oscilací (viskozita prostředí). [21]

4 POSTUPY PŘI MĚŘENÍ

Měření s piezoelektrickými krystaly se dá provádět dvěma různými metodami. První je aktivní metoda a druhá metoda pasivní

4.1 Aktivní metoda

Krystal je součástí širokopásmového oscilačního obvodu, jehož rezonanční frekvence se řídí vlastnostmi krystalu a aktuální frekvence se nastaví dle čítače, rozlišení je 0,1 až 1 Hz, při základní frekvenci 10 MHz až 20 MHz, citlivost 3 ng/Hz a mez detekce 10 ng/cm².

4.2 Pasivní metoda

Na piezoelektrický krystal se zvenčí přivádí střídavé napětí o známé proměnné frekvenci a v okolí rezonance se změří impedanční charakteristika, závislost velikosti impedance Z a fázového úhlu na frekvenci. Je zapotřebí nákladná aparatura, ale lze odlišit a spolehlivě změřit hmotnostní a viskozitní změny.

5 ELEKTRONIKA PIEZOELEKTRICKÝCH SENZORŮ

Vzniklé elektrické napětí mezi oběma plochami piezoelektrické destičky lze měřit do frekvencí řádu desítek kHz. Nemožnost měřit napětí o velmi nízkých frekvencích je způsobena tím, že piezoelektrický senzor funguje jako nabíjený kondenzátor. Jeho vybíjení podstatně snižuje přesnost měření na nejnižších frekvencích, proto musí být zajištěn dostatečně vysoký izolační odpor výstupních vývodů senzoru i vstupního obvodu připojované elektroniky, aby elektrický náboj unikal co nejpomaleji zejména v těch případech, kdy je požadováno měření quazistatických průběhů a statické cejchování. Reálně dosahovaný odpor piezoelektrických senzorů může být 10^{12} až $10^{14} \Omega$.

Protože velikost výstupního odporu piezoelektrických senzorů snižuje i délka přívodů k elektronice, je senzor spojen zpravidla krátkým kabelem vybaveným keramickou izolací s předzesilovačem měřicího signálu s vysokým vstupním odporem. Tento spojovací kabel má i dobré stínění proti vnějším rozptylovým polím, vykazuje malou kapacitu a její konstantní hodnotu při ohýbání kabelu, a izolační odpor nezávislý na působení vlhkosti. Předzesilovač je normálním libovolně dlouhým kabelem připojen k měřicímu zesilovači obsahujícímu dolnofrekvenční propust korigující nepatrně tlumenou rezonanci měřicí soustavy senzoru a případně další obvody korigující amplitudové a fázové chyby vznikající působením různých parazitních vlivů na měřicí signál. [30]

6 VYUŽITÍ PIEZOELEKTRICKÝCH SENZORŮ

6.1 Piezoelektrické senzory zrychlení kmitavého pohybu

Piezoelektrické senzory zrychlení kmitavého pohybu mají aktuální význam při měření kmitání lopatek leteckých proudových motorů, při geofyzikálních měřeních atd. V některých případech vyžaduje jejich využití měřit vysokofrekvenční zrychlení při teplotách několika set stupňů Celsia. Za těchto okolností jsou piezoelektrické senzory chlazeny vodou.

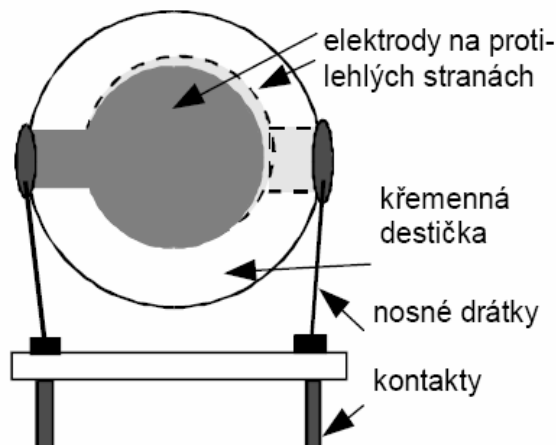
Pozornost je třeba věnovat dostatečně tuhému spojení akcelerometrů s měřeným objektem, aby nevznikalo zkreslení v oblasti vlastní frekvence měřicí soustavy tvořené hmotou senzoru a stykovou tuhostí spojení senzor - měřený objekt.

Hmotnost piezoelektrických akcelerometrů, zaznamenaná u předních světových výrobců, se pohybuje v rozsahu 5 až 25 g. Při používání senzoru zrychlení drženého rukou na povrchu měřeného objektu je třeba vyloučit značné nepřesnosti měření dolnofrekvenční propusti s mezní frekvencí cca 1 kHz. Piezoelektrické senzory zrychlení jsou minimálně citlivé k příčným kmitům v rovině kolmé k hlavní ose senzoru a nepřesahují ve většině případů 1 % její citlivosti. Síla, vyvolaná měřenou mechanickou veličinou, musí rovnoměrně působit po celé ploše destičky piezoelektrického materiálu i při deformaci základny senzoru přiléhající k povrchu měřeného objektu, který z různých důvodů může měnit teplotu.

6.2 Piezoelektrické senzory síly a tlaku

Vedle piezoelektrických akcelerometrů se vyrábějí piezoelektrické senzory tlaku. Piezoelektrické senzory síly mají stejnou konstrukci jako senzory tlaku a elektrický výstup definovaný v jednotkách síly působící na měřicí soustavu senzoru ve frekvenční oblasti pod její vlastní frekvencí. V posledních letech se podstatně zvyšuje potřeba piezoelektrických senzorů tlaku v raketovém výzkumu, jaderné fyzice, ve výzkumu výbušnin a při měření nezkresleného průběhu spalovacích tlaků dieselových motorů, čehož je dosahováno při nezkresleném frekvenčním přenosu do 15 kHz.

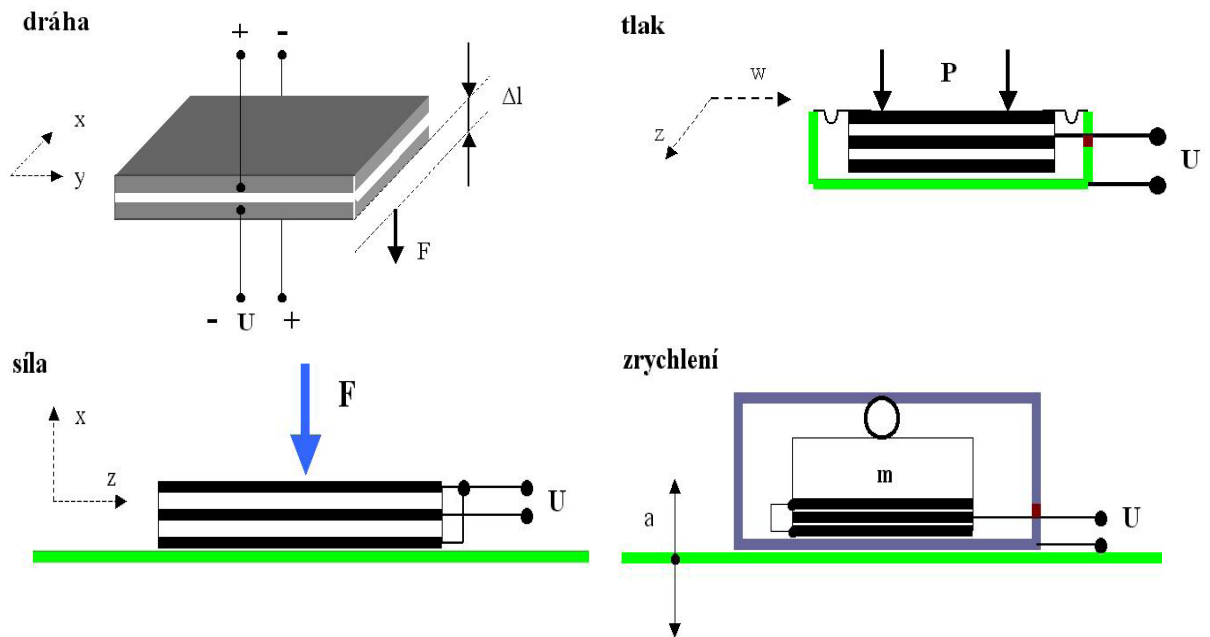
K dosažení bezpečné odolnosti vůči značným vlivům okolí (vibrace, hluk) je nejvýhodnější použití piezoelektrických senzorů s krystalem křemene. Dlouhodobé zkoušky piezorezistentních senzorů za dobu několika let vykazují změnu citlivosti menší než 2 %. Přímý piezoelektrický jev se též využívá ke konstrukci vibrátorů, umožňujících měření frekvenčních charakteristik senzorů parametrů kmitavého pohybu od několika Hz do desítek kHz. Piezoelektrické vibrátory jsou sestavovány z několika desítek destiček piezoelektrického keramického materiálu pevně spojených vhodným tmelem. Elektricky jsou spojeny destičky paralelně. Piezoelektrické vibrátory jsou napájeny výkonovým RC generátorem. Produkují mechanické kmity v nejširším frekvenčním rozsahu až do 100 kHz. [10]



Obr. 8 Piezoelektrický krystal

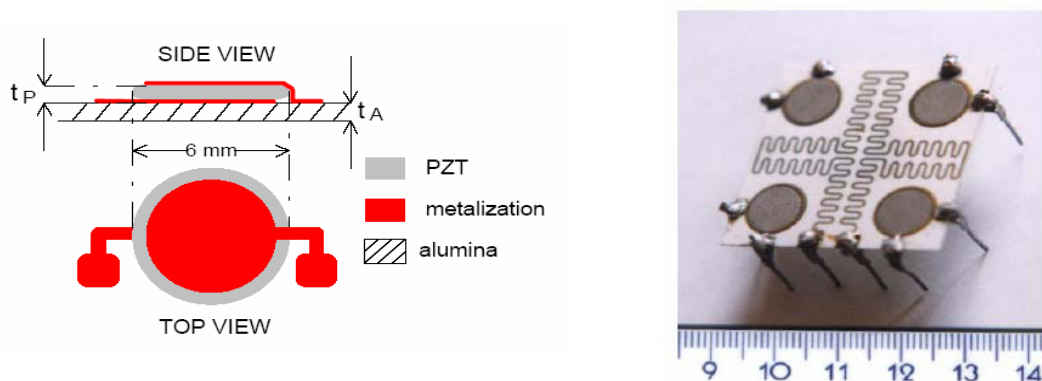
Vzhledem ke všeobecnému pokroku ve strojírenství charakterizovaném zvyšováním otáček různých strojů, zvyšováním tlaků ve spalovacích prostorech pístových motorů, náročností konstrukcí vysokotáčkových motorů s lopatkovými rotory atd. nabývají aplikace piezoelektrického jevu v měřicí technice mechanických veličin na významu. Pozitivní je, že při splnění definovaných fyzikálních podmínek poskytuje piezoelektrický senzor v určeném frekvenčním rozsahu měřicí signál s dostatečnou přesností a citlivostí.

Výhodou piezoelektrických senzorů jsou malé rozměry, jednoduchost a lineární převodní charakteristika. Používají se zejména k měření tlaku, tlakové síly, zrychlení, výchylky a mechanického napětí. Příklady využití ukazuje obrázek (Obr. 9).



Obr. 9 Příkladů využití piezoelektrických senzorů

Jeden příklad využití je v oblasti vážení hmotnosti, kde se využívá piezoelektrický rezonátor. Jeho náčrt a realizaci jako mikrováhy ukazuje následující obrázek (Obr. 10). Substrát obsahuje topný element, který udržuje pracovní teplotu na $45\text{ }^{\circ}\text{C}$, čímž se zamezí teplotním driftům rezonančního kmitočtu senzoru. Oscilátor je založen na fázovém závěsu, jehož vstup je přepínán ze všech čtyřech senzorů. Oscilátor pracuje na kmitočtu $7,16\text{ MHz}$. Hmotnostní citlivost dosáhla hodnoty $510\text{ Hz}/\mu\text{g}$, rozlišení 40 ng .



Obr. 10 Piezoelektrická rezonanční mikrováha

7 POUŽITÉ PŘÍSTROJE

Při samotném měření byly použity přístroje QCM200 od firmy SRS a multifunkční přístroj Testo 435 od firmy Testo AG.

7.1 Přístroj QCM200

Přístroj QCM200 je přesný křemenný mikrováhový senzor určený pro měření hmotnosti a viskozity v reálném čase. Jako gravimetrický přístroj měří hmotnost v rozsahu mikrogramů až k nanogramům. Dokáže také vyhodnotit rezonanční frekvenci a odpor AT-řezu křemenného krystalu. [9]

Přístroj obsahuje vestavěný čítač pulsů a ohmmetr. Měřená frekvence a odpor jsou zobrazeny na displeji přístroje. Ovládání probíhá přímo na předním panelu přístroje nebo pomocí počítače a použitým obslužným programem. Zde je využito rozhraní RS-232. Může být použit libovolný software pracující pod operačními systémy Windows nebo MAC OS.

7.1.1 Možné aplikace QCM200

Přístroj QCM200 je možné využít pro následující aplikace:

- měření míry kontaminace prostředí
- detekce výskytu virů a bakterií
- stanovení prašnosti v daném prostředí
- imunosenzory
- adsorpce proteinů
- sledování vývoje koroze
- monitorování oxidace
- adsorpce hydrogenů na kovových materiálech
- testování biologických materiálů
- senzory vlhkosti

Z celého výčtu možností uplatnění piezoelektrického váhového senzoru vyplývá jeho všestranné použití a nasazení v praxi. Jedná se pouze o hrubý výčet některých zajímavých možných aplikací. Mezi další lze zařadit různé senzory adsorpce, sorpce a desorpce. Jistě lze také zmínit možnosti nasazení tohoto přístroje v oblasti reakce materiálu na expozici laseru (ablace a desorpce).



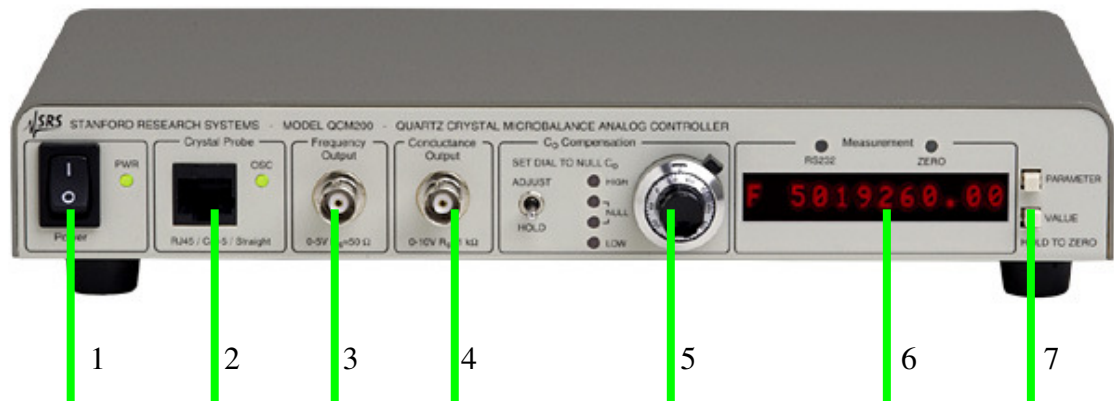
Obr. 11 Přístroj QCM200 s měřicí sondou a přístroj QCM100

7.1.2 Sestava přístroje QCM200

Sestava přístroje se skládá z hlavní vyhodnocovací jednotky a měřicí sondy se senzorem.

Vyhodnocovací jednotka

Hlavní výhodou této řady přístroje oproti staršímu typu QCM100 je přítomnost displeje a možnost komunikace s počítačem přes sériové rozhraní RS-232. Díky svým kompaktním rozměrům a nízké váze je přístroj plně mobilní a je ho tudíž možné použít i v terénu, kde je ovšem nutné zabezpečit napájení této hlavní jednotky. Výrobce, firma Stanford Research System, zvolila následující rozložení ovládacích prvků na předním panelu přístroje:



Obr. 12 Přístroj QCM200 – přední panel

Přední panel přístroje

1. Spínač – zapnutí nebo vypnutí přístroje
2. Komunikační rozhraní měřicí sondy – RJ45
3. TTL výstup oscilátoru
4. Výstupní rozhraní vodivosti
5. Manuální nastavení kompenzace
6. Stavový displej
7. Tlačítka Parametr a Value

Zadní panel přístroje

1. Komunikační rozhraní RS-232
2. Analogový výstup
3. Frekvenční výstup
4. Uzemnění šasi
5. Napájení přístroje



Obr. 13 Přístroj QCM200 – zadní panel

Měřicí sonda

Měřicí sonda obsahuje senzor, jehož citlivá část sleduje stav měřené veličiny. Výstupní veličinou je elektrický signál. U tohoto přístroje se jedná o piezoelektrický jev. Jako piezoelektrický materiál je použit křemenný krystal SiO_2 . Toto je zde vyřešeno pomocí tenké kruhové destičky.

Na samotné sondě jsou dvě elektrody, na které tento senzor dosedne, resp. se připojí a pomocí plastové objímky se závitem se na pevno přichytí k této sondě. Měřicí sonda se poté k hlavní jednotce připojí pomocí UTP kabelu a konektoru RJ-45. [9] Jde tedy o běžně dostupnou kabeláž a v případě dodatečné koupi měřicí sondy či poruchy přívodního kabelu jej lze nahradit prakticky jakýmkoliv shodným kabelem známým jako kroucená dvojlinka.



Obr. 14 Měřicí sonda a senzory

7.1.3 Parametry přístroje QCM200

Tabulka 3 Parametry QCM200

Název	Jednotka	Hodnoty	Popis
Frekvence absolutní	Hz	-	Sériová rezonanční frekvence krystalu
Frekvence relativní	Hz	-	Frekvence absolutní - offset frekvence
Relativní hmotnost	ng	-	Frekvence relativní/-0,0566
Odpor absolutní	Ω	-	Sériový rezonanční odpor krystalu
Odpor relativní	Ω	-	Odpor absolutní-offset odporu
Doba snímání	s	10s,1s,100ms	Doba načítání frekvence
Časová základna	-	Internal Ext ± 100 Ext N/A	Použití interního či externího TCXO oscilátoru
Měřítka frekvence	Hz/V	200Hz/V 500Hz/V 1 kHz/V 2 kHz/V 5 kHz/V 10 kHz/V 20kHz/V	Frekvence relativní/analogový výstup frekvence

7.1.4 Hlavní rovnice pro měření hmotnosti

Sauerbreyova rovnice popisuje závislost změny rezonanční frekvence krystalu na změně zatížení krystalu. Jedná se o měření tenké vrstvy pevné látky.

Upravená Sauerbreyova rovnice:

$$m_{rel.} = f_{rel.} / -0,0566 \quad (6)$$

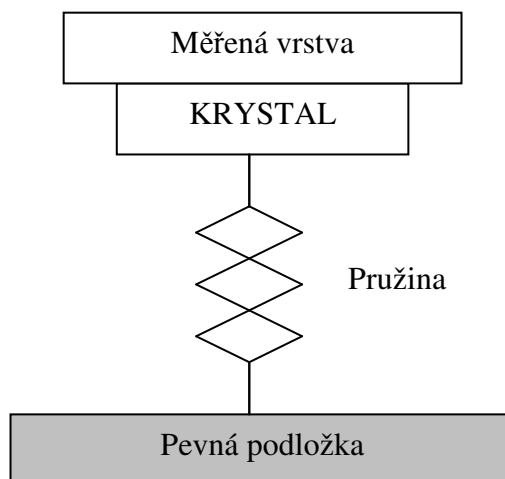
$m_{rel.}$ - výsledná naměřená hmotnost prachových částic [ng]

$f_{rel.}$ - vypočtená relativní rezonanční frekvence krystalu [Hz]

7.1.5 Princip činnosti přístroje QCM200

Pro snadné pochopení funkce tohoto přístroje si jej lze představit jako pružinu pevně fixovanou na podložku, na jejíž druhé straně je připevněn krystal. Tento krystal je nezatížen a kmitá s danou frekvencí. [8] Jestliže je krystal zatížen, dochází ke změně hmotnosti resp. zatížení krystalu a tedy i ke změně frekvence kmitů. Z tohoto jevu lze vypočítat, jak je frekvence kmitání závislá na hmotnosti předmětu umístěného na krystalu.

Čím je tedy hmotnost předmětu těžší, tím více bude krystal zatížen, a tedy tím méně bude pružina kmitat. Frekvence kmitání se tedy sníží. Vše je znázorněno na následujícím zjednodušeném obrázku (Obr. 15).

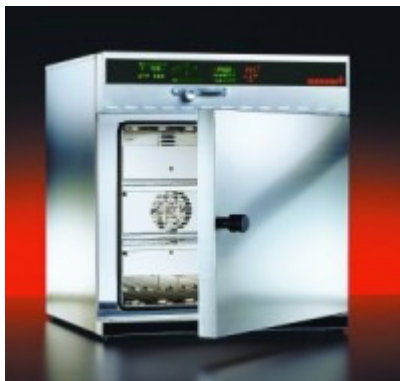


Obr. 15 Princip funkce QCM200

7.2 Memmert UNP 200

Universální horkovzdušná sušárna MEMMERT UNP 200 má objem komory 32 l s přirozenou ventilací. Regulátor Perfect s multifunkčním programovatelným PID regulátorem s fuzzy-logikou umožňuje regulovat teplotu od +30 do 250 °C. Lze nastavit složitou teplotní křivku až ze 40 segmentů. Pro každý segment může být zvolen čas od 1 minuty do 999 hodin, tedy lze volit i rychlost nárůstu či poklesu teploty. Ovládat lze otáčky ventilátoru a polohu odvětrávací klapky. Teplota v komoře se snímá dvěma čtyřkanálovými čidly PT100. Systém vícenásobné ochrany proti nežádoucímu přehřátí spouští optický a akustický alarm a blokuje další funkce, aby nedošlo ke znehodnocení

vzorku. Příklad byl použit k zajištění konstantních hodnot teploty při stanovení korekční křivky. Uvnitř pece byla umístěna sonda s krystalem, který byl zaslepen, aby nedocházelo k usazování prachových částic a ke zkreslení měření. Následně byla pec vytopena na teplotu 40 °C a poté nastalo samovolné ochlazování. Hodnoty teploty byly pomocí aplikace pro automatický sběr dat zaznamenány a následně z nich vyhodnocena teplotní korekční křivka, jež se stala základem pro zvolená měření.



Obr. 16 Memmert UNP 200

7.3 Multifunkční přístroj Testo 435

Jedná se o multifunkční měřicí přístroj s integrovaným měřením diferenčního tlaku pro klimatizaci, větrání a kvalitu vzduchu v místnosti s pamětí naměřených hodnot, PC-softwarem a USB kabelem pro přenos dat.



Obr. 17 Multifunkční přístroj Testo 435

1. Displej přístroje
2. Funkční tlačítka – funkce dle zobrazení na displeji
3. Tlačítka pro posun v nabídce, nastavování parametrů
4. Okamžitý tisk
5. Tlačítko pro zapnutí a vypnutí přístroje
6. Výstupy pro připojení sond

Měřicí přístroj pro zjišťování kvality vzduchu v místnosti pro regulování a kontrolu zařízení RLT se vyznačuje efektivním průběhem měření. Komfortní měřicí přístroj nabízí pro každou aplikaci a různé rychlosti proudění správnou techniku měření, jako např. termické sondy, vrtulku nebo Pitotovu trubici. Navíc je možné připojit lux-sondu pro měření intenzity osvětlení a sondu prostředí pro zjišťování průvanu. Čistou analýzu a archivaci zajišťuje počítačová dokumentace. U nové termické sondy je integrováno měření teploty a vlhkosti. Je možné bezdrátově připojit další teplotní a vlhkostní sondu, tzn. přenosem naměřených dat využitím rádiového signálu, lze na přehledném displeji měřicího přístroje zobrazit naměřené hodnoty až tří teplotních nebo vlhkostních sond.

8 POUŽITÉ SOFTWARE VYBAVENÍ

Pro samotné měření bylo použito vývojové prostředí od firmy Agilent Vee Pro 9.0 a software pro záznam hodnot měření od firmy Testo AG Comfort Software X35.

8.1 Vývojové prostředí Vee Pro 9.0

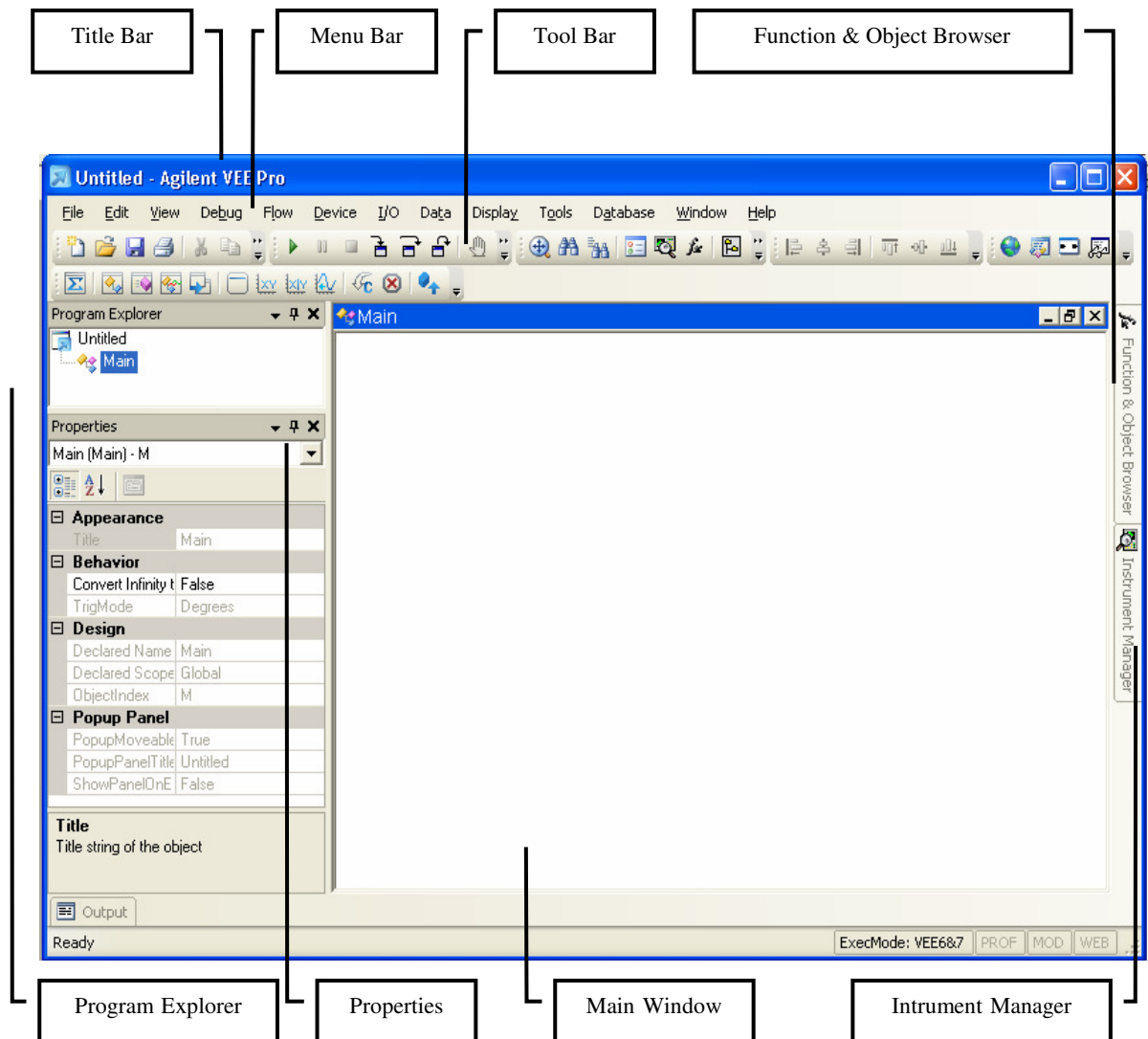
Pro vývoj samotného obslužného programu byl zvolen software od firmy Agilent Vee Pro v nejnovější verzi 9.0.

Software Agilent VEE Pro je graficky orientované vývojové prostředí pro tvorbu programových aplikací pro automatizaci měřicích procesů, zpracování dat a řízení. Tvorba programu zjednodušeně odpovídá vytváření vývojového diagramu automatizovaného měřicího procesu. Maximální důraz je kladen na jednoduchost propojení s měřicími přístroji prostřednictvím různých typů sběrnic. K dispozici jsou ovladače pro více než 1000 měřicích přístrojů od 70 různých výrobců. Velká pozornost je věnována funkcím pro grafické zobrazení a matematickému zpracování naměřených dat. [7]

Pro snadnou komunikaci s ostatními aplikacemi a zdroji dat obsahuje VEE Pro Active X Automation Server a Microsoft NET Framework, díky kterým je možné snadno získávat data z jiných aplikací, generovat automatická e-mailová hlášení či automaticky obnovovat data na webových stránkách.

8.1.1 Možnosti Vee Pro 9.0

Program Vee Pro 9.0 nabízí široké možnosti použití jako například test funkčnosti, ověření návrhu, kalibrace, získávání dat a jejich kontrolu. Pracuje s nástroji pro vstupně výstupní přenos. Umožňuje přenos a komunikaci po sériové lince, LAN, PC apod. Lze také importovat knihovny od různých výrobců měřicích přístrojů. Používá ActiveX prvky pro automatické řízení jiných programů jako například Microsoft Word, Excel a Access, které používá k exportu a ukládání získaných dat a jejich následného použití. Obsahuje vlastní kompilační program a pokročilé profesionální vývojové nástroje určené pro tvorbu rozsáhlých programů, za předpokladu zachování přehlednosti navrhovaného programu. Obsahuje podpora textových jazyků Visual Studio NET. Veškeré textové jazyky, které umožňuje Visual Studio NET mohou být použity i ve VEE Pro. VEE Pro taktéž umožňuje i použití jiných textových jazyků jako například C/C++, Visual Basic, Pascal a Fortran.



Obr. 18 Výchozí okno aplikace Agilent Vee Pro 9.0

Title Bar - horní lišta s popisem se standardním rozložením hlavních ovládacích prvků okna

Menu Bar - obsahuje položky menu, všechny volby a příkazy programu VEE

Tool Bar - nástrojová lišta, obsahující ikony pro přímý přístup k příkazům programu

Function & Object Browser - prohlížeč objektů a jejich funkcí

Program Explorer - struktura programu

Properties - vlastnosti zvoleného objektu

Main Window - pracovní oblast, oblast pro vytváření a úpravy programu

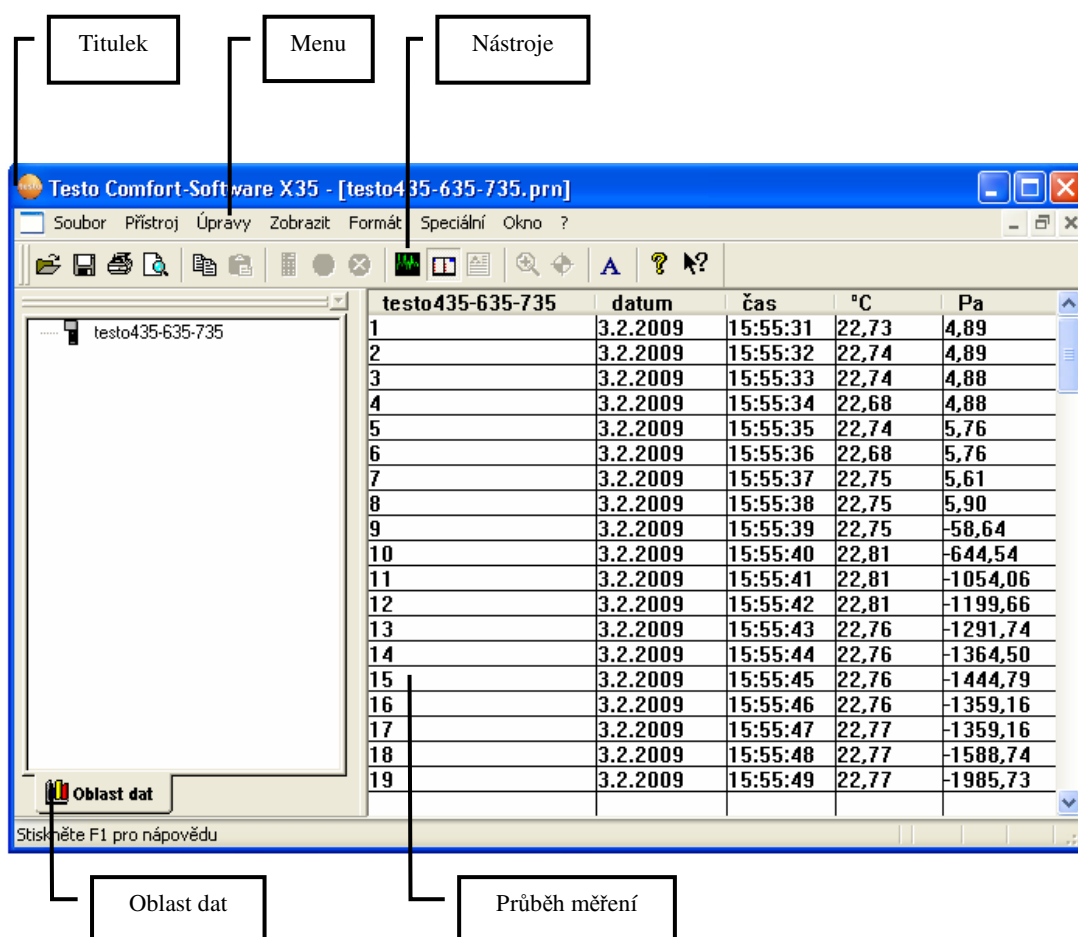
Instrument Manager - manager přístrojů

Status Area - informace o stavu či průběhu programu

8.2 Testo Comfort Software X35

Aplikace od firmy Testo AG se používá pro zaznamenání hodnot měření tj. teploty a tlaku v prováděném experimentu.

Tento program dodávaný přímo od výrobce multifunkčního přístroje Testo 435, zaznamenává hodnoty z přístroje do počítače a ty lze následně přenést do programu Microsoft Excel. Jako první je třeba pro použitý přístroj nainstalovat potřebný ovladač, který je součástí software od výrobce. Následně je třeba spárovat tento přístroj s programem Testo Comfort Software X35. Jedná se o výběr přesného typu přístroje z nabídky a nastavení jeho parametrů. Poté již v okně měření dochází k zaznamenávání žádaných dat (Obr. 19). Ty lze po skončení měření přenést do libovolné aplikace jako například Microsoft Excel či notepad apod.



Obr. 19 Okno aplikace Testo Comfort Software X35

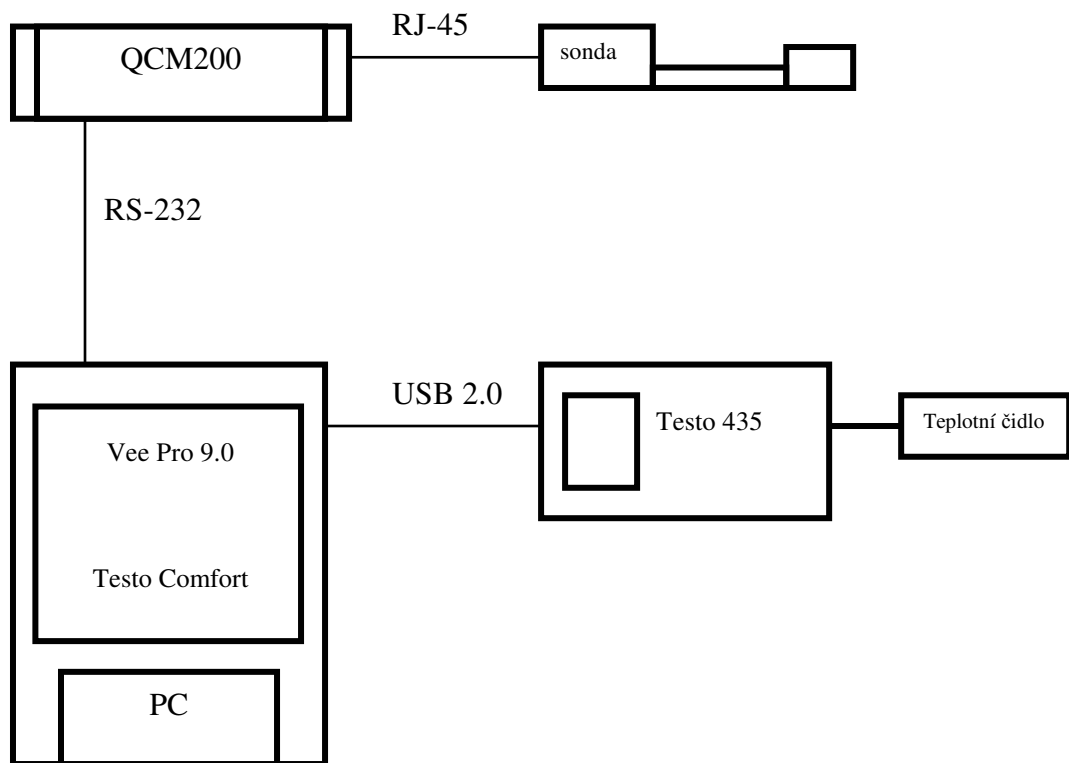
II. PRAKTICKÁ ČÁST

9 ZPRACOVÁNÍ ZADÁNÍ

Byl sestaven měřicí systém na bázi piezoelektrického senzoru, vytvořen program pro automatický sběr dat, provedena daná měření a vyhodnoceny jejich výsledky. Také byla navržena vzorová laboratorní úloha pro studenty předmětu zpracování signálů.

9.1 Návrh měřicího systému na bázi piezoelektrického senzoru

Základní měřicí sestava se skládá z přístroje QCM200 a sondy, multifunkčního přístroje Testo 435 s teplotním čidlem a počítače, na kterém byl spuštěn program pro automatický sběr dat.

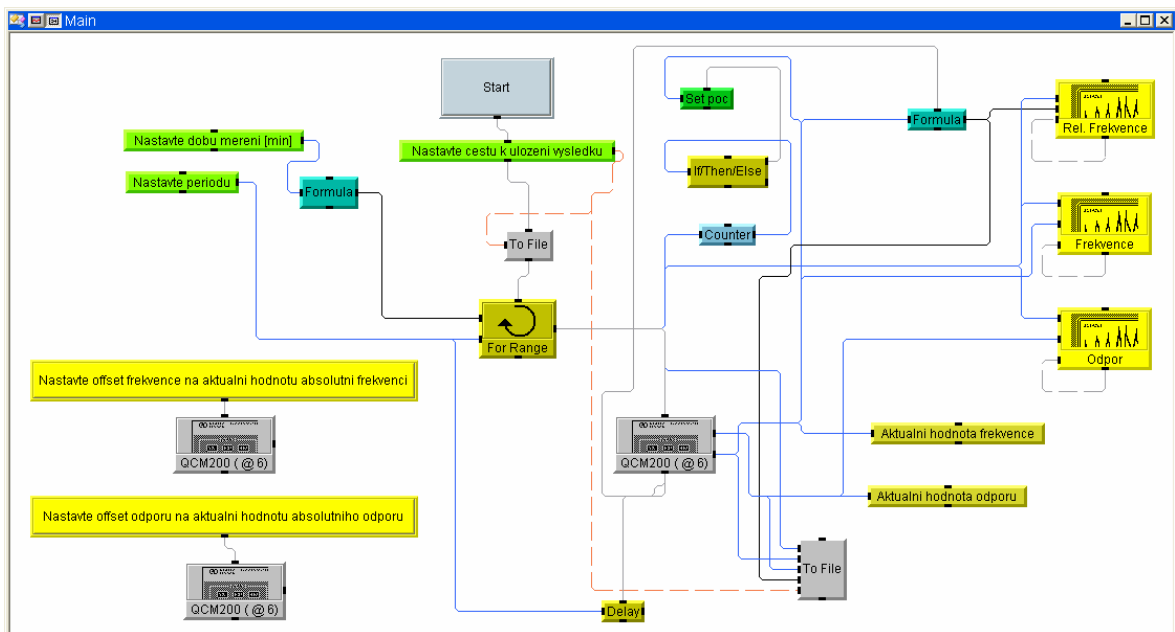


Obr. 20 Schéma zapojení systému na bázi piezoelektrického senzoru

Měřicí sonda k přístroji QCM200 byla připojena pomocí konektoru RJ-45 a UTP kabelu. Přístroj QCM200 a obslužný počítač, kde běžel program pro automatický sběr dat, byl spojen pomocí RS-232 komunikačního rozhraní. Následně byl k pracovní stanici pomocí USB 2.0 připojen multifunkční měřicí přístroj Testo 435 a k němu zapojeno teplotní čidlo. V závislosti na požadovaném měření byla k tomuto přístroji připojena buď vlhkostní sonda, nebo byl využit vstup pro měření tlaku.

9.2 Tvorba programu v prostředí Vee Pro 9.0

Pro sběr dat z přístroje QCM200 bylo nutné vytvořit program, který tyto hodnoty dokáže průběžně ukládat do zvoleného souboru. Proto bylo zvoleno vývojové prostředí od firmy Agilent Vee Pro 9.0. Zde byl vytvořen program, který dokáže zaznamenávat požadované údaje zejména frekvenci a relativní frekvenci. Pomocí možných nastavení lze měnit některé vstupní hodnoty jako doba měření, perioda vzorkování, místo uložení a název souboru s daty apod.

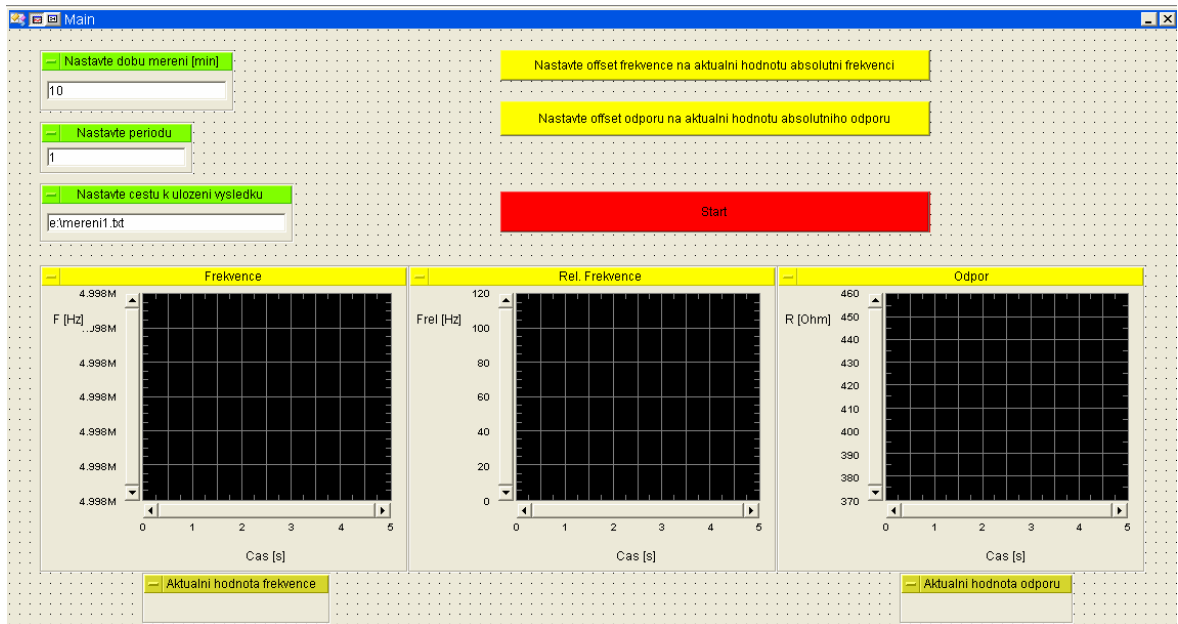


Obr. 21 Detailní pohled na obslužný program – Agilent Vee Pro 9.0

Na obrázku (Obr. 21) je zobrazeno podrobné rozložení všech objektů a ovládacích prvků. Jedná se zejména o položky zadávání vstupů jako je doba měření, perioda, cesta k uložení souboru, nastavení offsetu frekvence popř. odporu. Dále jsou viditelné objekty jako for cyklus, čítače apod. Tyto objekty jsou následně obsluze skryty z důvodu přehlednosti a nemožnosti zásahu do programu a jeho další modifikace. Je možné kdykoliv do tohoto okna vstoupit a pokud bude uživatel dostatečně seznámen s funkcí programu, může jej upravit dle aktuálního měření. Na pravé straně okna jsou vidět již jednotlivé objekty grafů a hodnoty aktuálních veličin. Tyto budou zobrazeny i uživateli k zjištění průběhu měření v reálném čase.

V uvedeném okně byl program vytvářen, a proto slouží v tomto zobrazení spíše pro ilustraci funkčnosti objektů a jejich jednotlivého propojení.

Hlavní okno programu ukazuje následující obrázek (Obr. 22). Po spuštění vývojového prostředí Agilent Vee Pro 9.0 přes položku Otevřít najdeme program, který slouží ke sběru dat a otevřeme jej.



Obr. 22 Výchozí okno obslužného programu – Agilent Vee Pro 9.0

9.2.1 Obsluha programu

Pro přehlednost a jasnou funkci programu jsou viditelné pouze položky, které může uživatel měnit resp. zadávat počáteční hodnoty ovlivňující průběh měření, obslužná tlačítka a grafy se zobrazeným průběhem měření a jejich aktuální hodnoty.

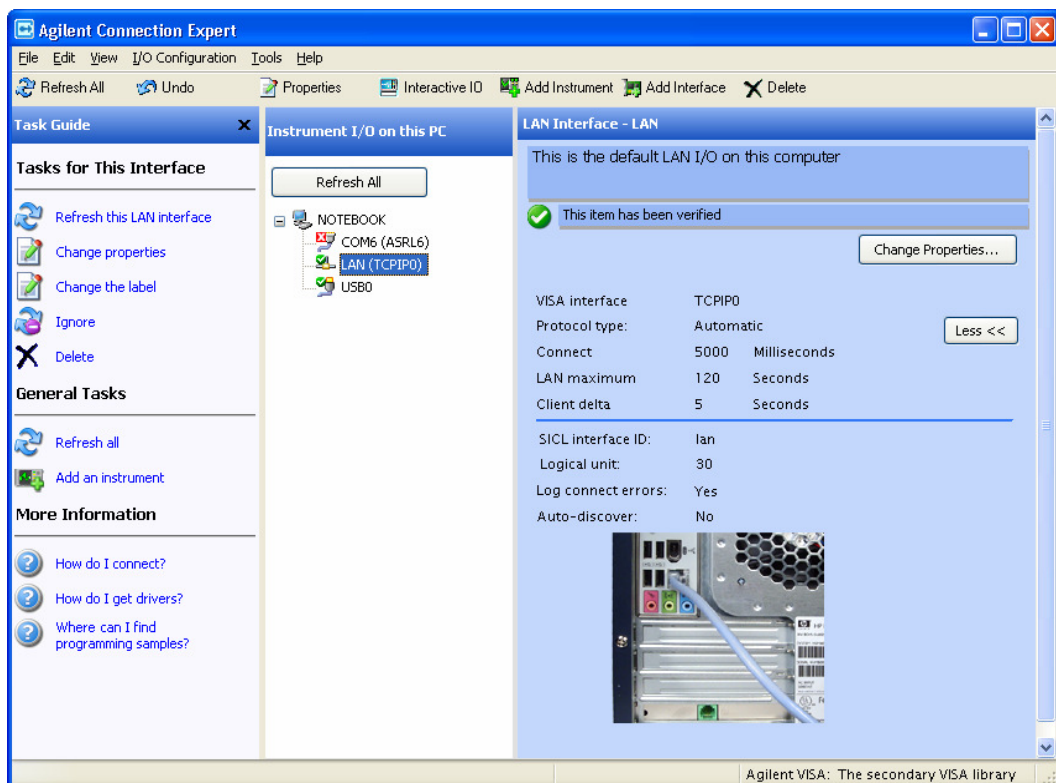
Jako první je nutné nastavit dobu měření a periodu, dále pak cestu k uložení souboru s výsledky měření. Tato okna jsou barevně odlišena, mají zelenou barvu a musí být vyplněna.

Další dvě tlačítka nastavení offsetu jsou před započítím aktivována kliknutím myši. Následně je stisknuto tlačítko Start. Probíhající měření, lze sledovat na hodnotách zobrazených v objektech nejnižše umístěných a také samozřejmě na průbězích jednotlivých grafů.

První graf zobrazuje závislost frekvence na čase, druhý závislost relativní frekvence na čase a třetí hodnoty odporu v závislosti na čase.

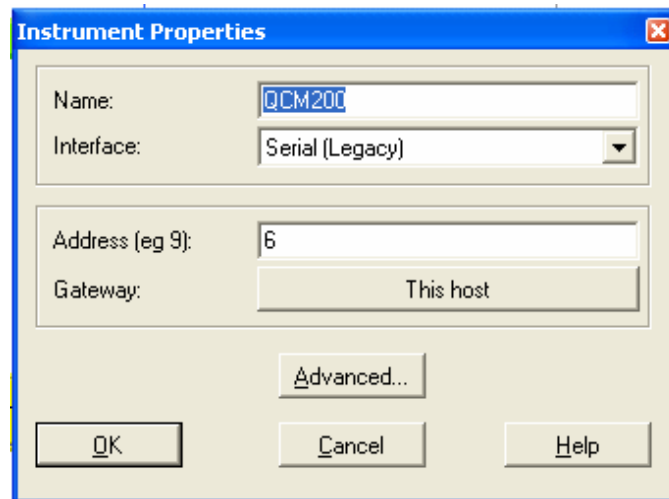
9.3 IO Manager

Před každým měřením je nutné namapovat port přístroje QCM200 v prostředí programu Vee Pro 9.0. Nejprve přes Agilent Connection Expert zjistíme, přes jaké rozhraní je přístroj připojen, a následně zjistíme číslo portu. Můžeme provést aktualizaci připojených zařízení nebo jejich editaci (Obr. 23).



Obr. 23 Agilent Connection Expert

Přes Instrument Managera v hlavním okně vývojového prostředí Agilent Vee Pro 9.0 nastavíme požadované číslo portu, tuto hodnotu zadáme do okna Adress, popř. zvolíme vhodné rozhraní komunikace.



Obr. 24 Instrument Properties

Následně zjistíme zkušebním spuštěním programu, zdali komunikace mezi přístrojem a obslužným programem funguje korektně (Obr. 24).

9.4 Sběr dat z přístroje Testo 435

Protože bylo nutné zaznamenávat další průběžné hodnoty měření, jako je teplota, tlak apod., bylo zvoleno softwarové vybavení přímo od firmy Testo AG, u něhož lze pomocí již funkčního programu velmi lehce zaznamenat požadované hodnoty měření.

Jako první je třeba nainstalovat potřebný ovladač pro použitý přístroj. Tento ovladač byl součástí software od výrobce. Dále je třeba spárovat tento přístroj s programem Testo Comfort Software X35. Jedná se o výběr přesného typu přístroje z nabídky a nastavení jeho parametrů. Pak již v okně měření dochází k zaznamenávání žádaných dat (Obr. 25), které lze po skončení měření přenést do libovolné aplikace jako například Microsoft Excel či notepad apod.

testo435...	datum	čas	°C	Pa
1	3.2.2009	15:55:31	22,73	4,8900
2	3.2.2009	15:55:32	22,74	4,8900
3	3.2.2009	15:55:33	22,74	4,8800
4	3.2.2009	15:55:34	22,68	4,8800
5	3.2.2009	15:55:35	22,74	5,7600
6	3.2.2009	15:55:36	22,68	5,7600
7	3.2.2009	15:55:37	22,75	5,6100
8	3.2.2009	15:55:38	22,75	5,9000
9	3.2.2009	15:55:39	22,75	-58,640
10	3.2.2009	15:55:40	22,81	-644,50
11	3.2.2009	15:55:41	22,81	-1054,0
12	3.2.2009	15:55:42	22,81	-1199,6
13	3.2.2009	15:55:43	22,76	-1291,7
14	3.2.2009	15:55:44	22,76	-1364,5
15	3.2.2009	15:55:45	22,76	-1444,7

Obr. 25 Průběh měření – Program Testo Comfort-Software X35

9.5 Realizovaná měření

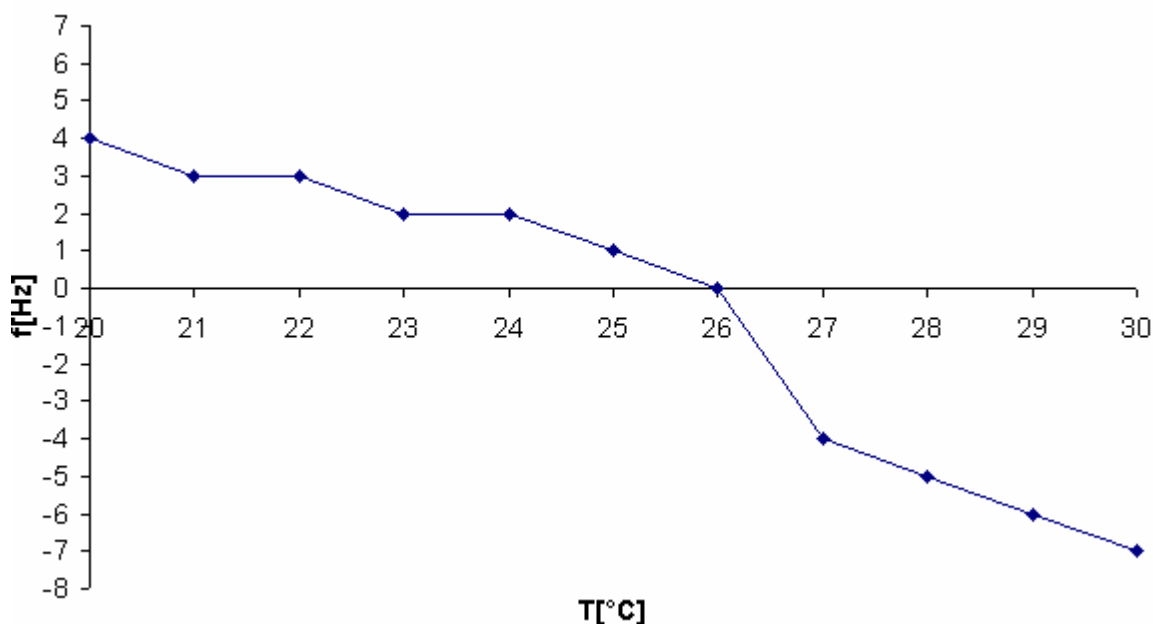
- Měření prachových částic v závislosti na teplotě – stanovení korekční křivky
- Měření prachových částic v laboratorních podmínkách
- Měření prachových částic v závislosti na tlaku
- Měření prachových částic v závislosti na relativní vlhkosti
- Dlouhodobější měření prachových částic v laboratorních podmínkách
- Dlouhodobější měření prachových částic v uzavřené místnosti

9.5.1 Měření prachových částic v závislosti na teplotě – stanovení korekční křivky

Pro stanovení závislosti prachových částic na teplotě bylo nutné provést měření při konstantních hodnotách teplot a sledovat změny frekvence krystalu. Pomocí přístroje

Memmert UNP 200 byla udržována konstantní teplota a následně zaznamenávána společně s hodnotou frekvence krystalu. Sonda přístroje QCM200 byla utěsněna, aby nedocházelo k nechtěnému usazování prachových částic a tudíž ke zkreslení měření. Rozmezí teplot bylo stanoveno na 20 °C až 30 °C, což odpovídá běžným podmínkám měření.

Změna teploty krystalu se projeví změnou rezonanční frekvence krystalu (Obr. 26). Tuto chybu je nutné uvažovat pro další měření. Měřením bylo zjištěno, že pokud je teplota nižší jak 26 °C, rezonanční frekvence mírně klesá. Měření, kdy teplota celého experimentu nepřekročí 26 °C, vyjadřuje směrnice -0,61 Hz/°C. Pokud je teplota vyšší než 26 °C, frekvence klesá strměji. Tento průběh vyjadřuje směrnice o hodnotě -1 Hz/°C. Pomocí zmíněných dvou hodnot směrnice byly dále přepočítány hodnoty skutečné frekvence.



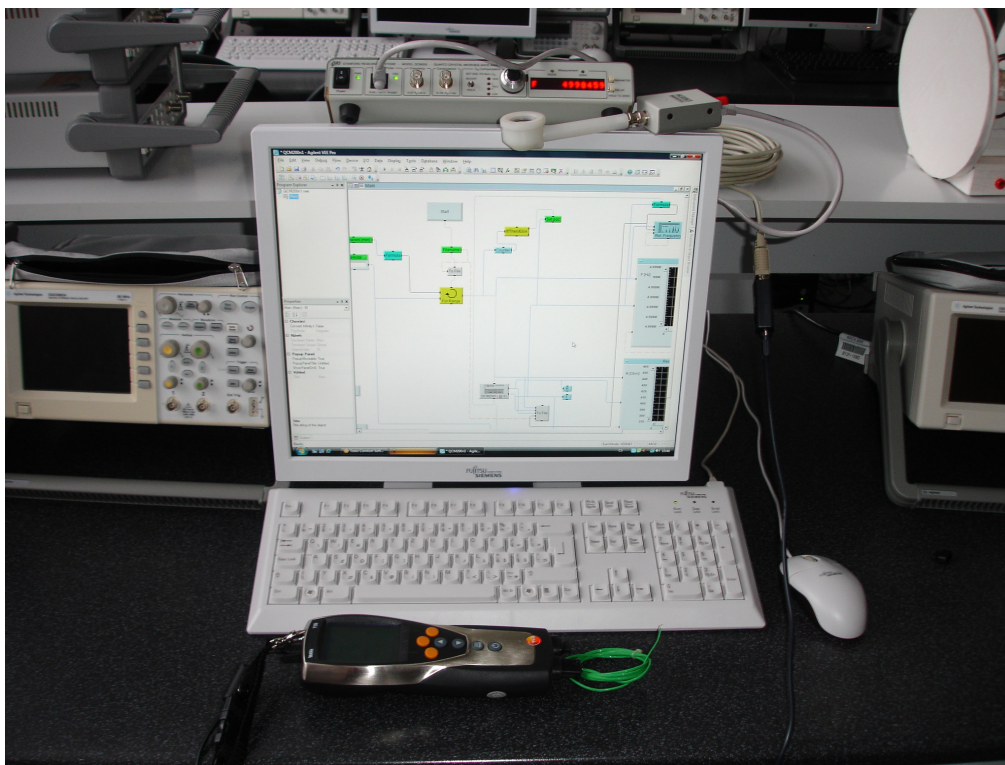
Obr. 26 Závislost změny rezonanční frekvence na teplotě

9.5.2 Měření prachových částic v laboratorních podmínkách

Pro toto měření bylo zvoleno prostředí fakultní laboratoře (Obr. 27). Celkový čas měření byl stanoven na cca 60 hodin v uzavřené místnosti. Perioda měření byla nastavena na 10 minut. Po celou dobu provádění experimentu nebyl umožněn přístup do této místnosti.

Jako první byl kalibrován přístroj QCM200 a řádně zapojen a připojen mikrováhový senzor. Přístroj Testo 435 byl připojen přes rozhraní USB a dále bylo k tomuto přístroji připojeno teplotní čidlo. K měření byl použit fakultní počítač s operačním systémem

Windows XP Pro. Následně byl spuštěn program vytvořený v prostředí Vee Pro 9.0 a program od firmy Testo AG. Pomocí těchto dvou programů byly zaznamenávány především hodnoty frekvence a teplota v laboratoři.



Obr. 27 Pracoviště s PC a přístroji QCM200 a Testo 435

Měření bylo zopakováno celkem třikrát. Výsledky byly zaznamenány pomocí programu vytvořeného ve vývojovém prostředí Agilet Vee Pro 9.0 a software od firmy Testo Comfort Software X35. Celkově se tedy jednalo o cca 180 hodin měření ve stejném prostředí.

Vyhodnocení měření

Nejprve bylo nutno vypočítat skutečnou hodnotu absolutní frekvence pomocí teplotní korekce. Zde bylo použito výsledků z předchozího měření. Pokud teplota v průběhu měření nepřesáhne hodnotu $26\text{ }^{\circ}\text{C}$ je nutno použít $-0,61\text{ Hz}/^{\circ}\text{C}$ jako hodnotu směrnice. Výslednou hodnotu skutečné frekvence zobrazuje následující obrázek (Obr. 28). Pro ilustraci je uvedena i závislost absolutní frekvence na čase (Obr. 29). Jedná se tedy o hodnoty zaznamenané přímo přístrojem bez korekce pomocí teplotní křivky.

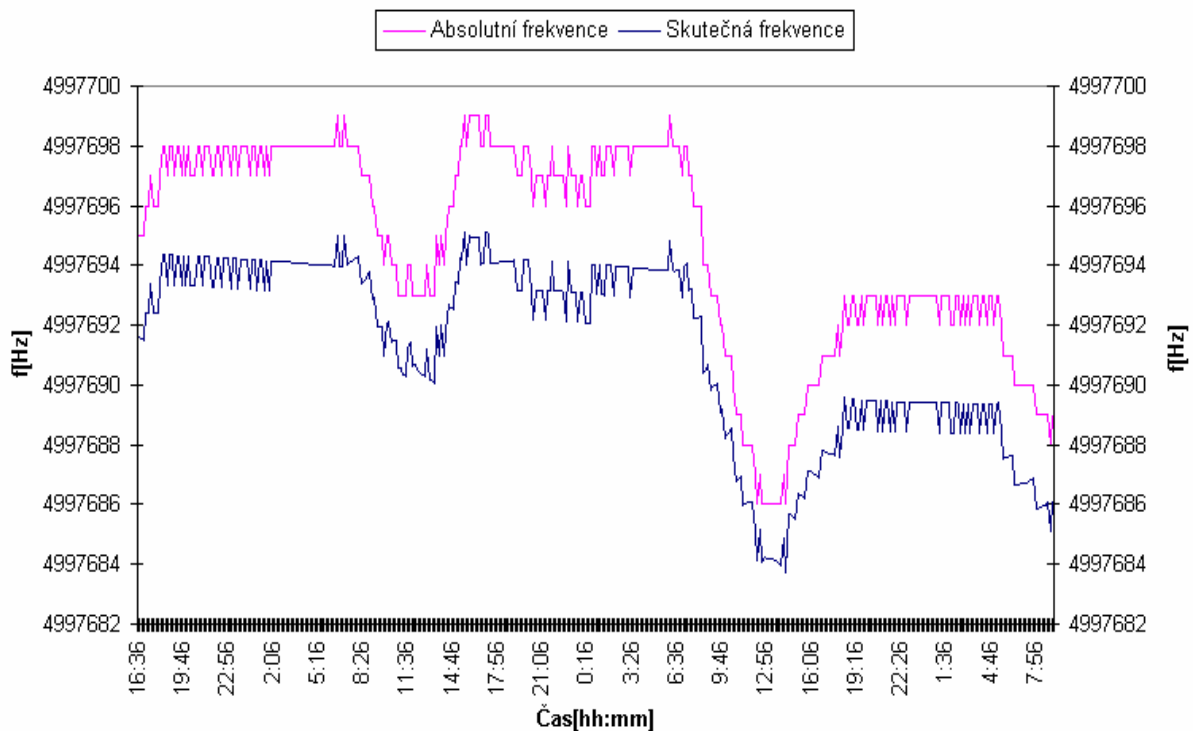
Výpočet skutečné frekvence

$$f_{skut.} = f_{abs.} - 0,61Hz / ^\circ C \cdot (26 - T) \quad (7)$$

Za první hodnotu absolutní frekvence byl zvolen offset frekvence. Následně byly vypočítány příslušné hodnoty relativní frekvence.

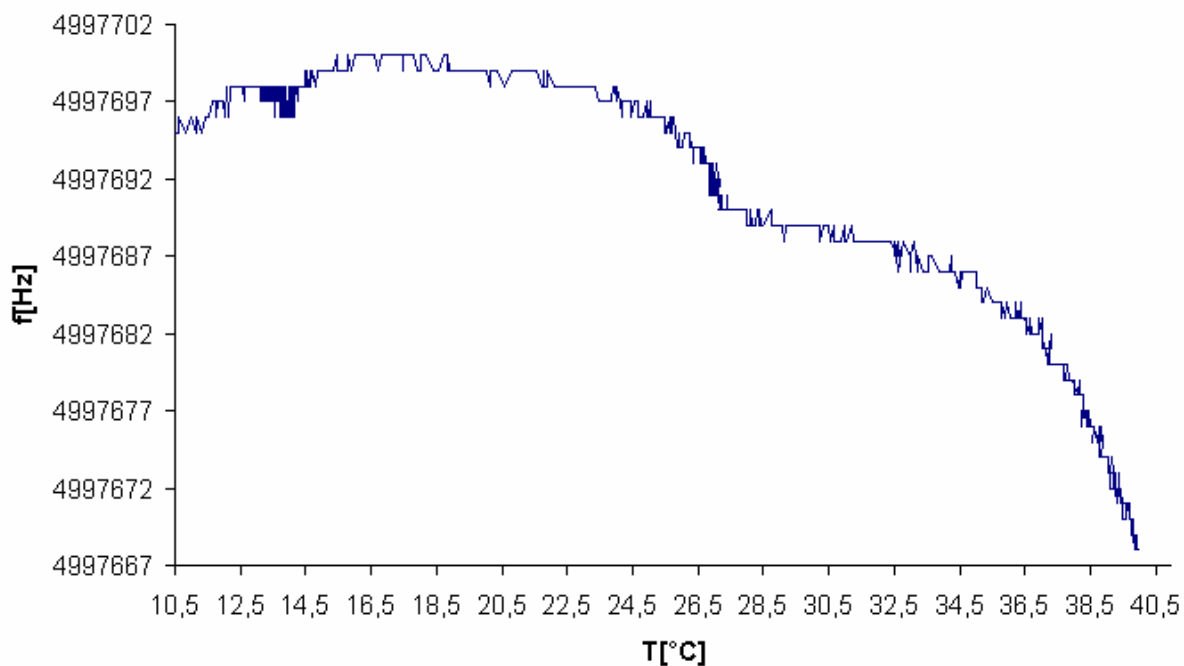
Výpočet relativní frekvence

$$f_{rel.} = f_{skut.} - offset \quad (8)$$



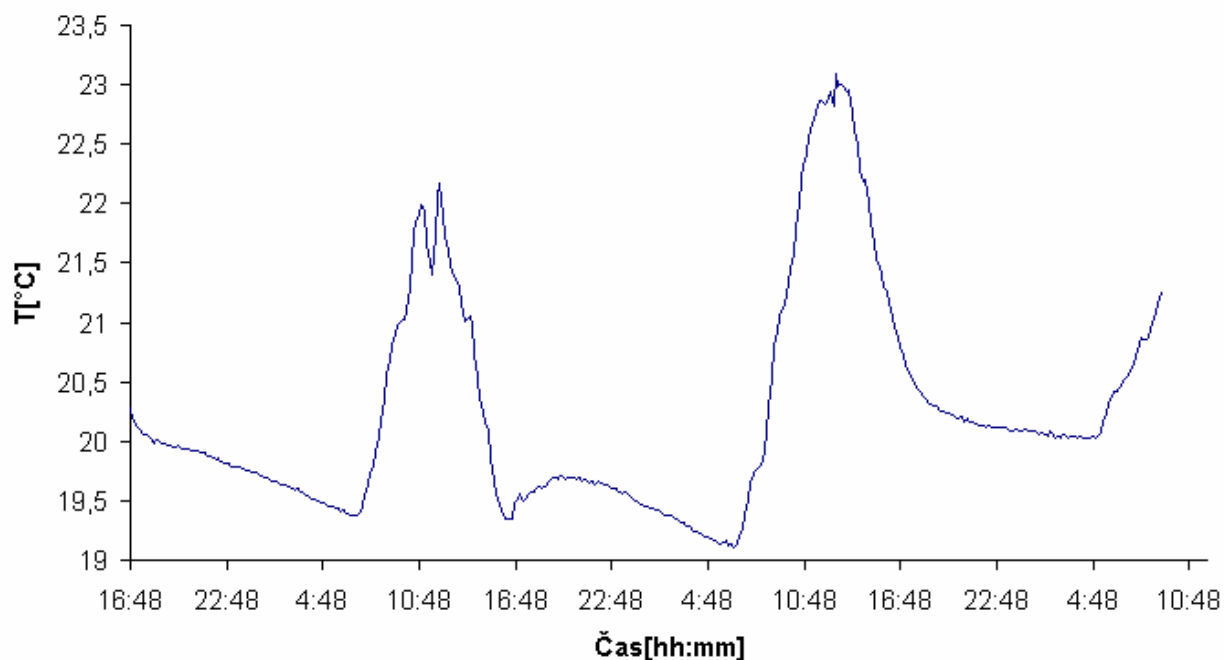
Obr. 28 Závislost skutečné frekvence na čase a absolutní frekvence na čase

Jak je z předchozího obrázku (Obr. 28) patrné, celková změna frekvence se při zkorigování měření pomocí teplotní křivky liší pouze o 2 Hz. Tudíž je tato změna pro měření za daných podmínek prakticky zanedbatelná.



Obr. 29 Závislost absolutní frekvence na teplotě

V průběhu měření byla zaznamenávána i teplota, což dokumentuje následující obrázek (Obr. 30), na němž je přehledně znázorněno, jak teplota v průběhu dne kolísá.



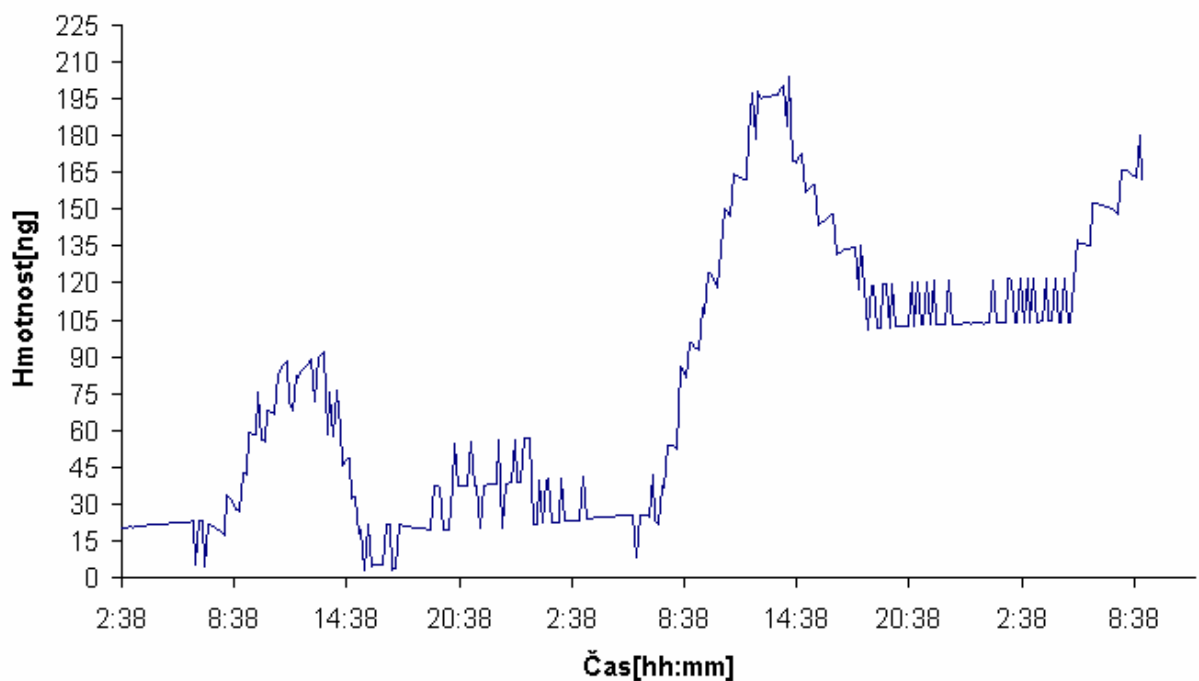
Obr. 30 Závislost teploty na čase

Stanovení relativní hmotnosti

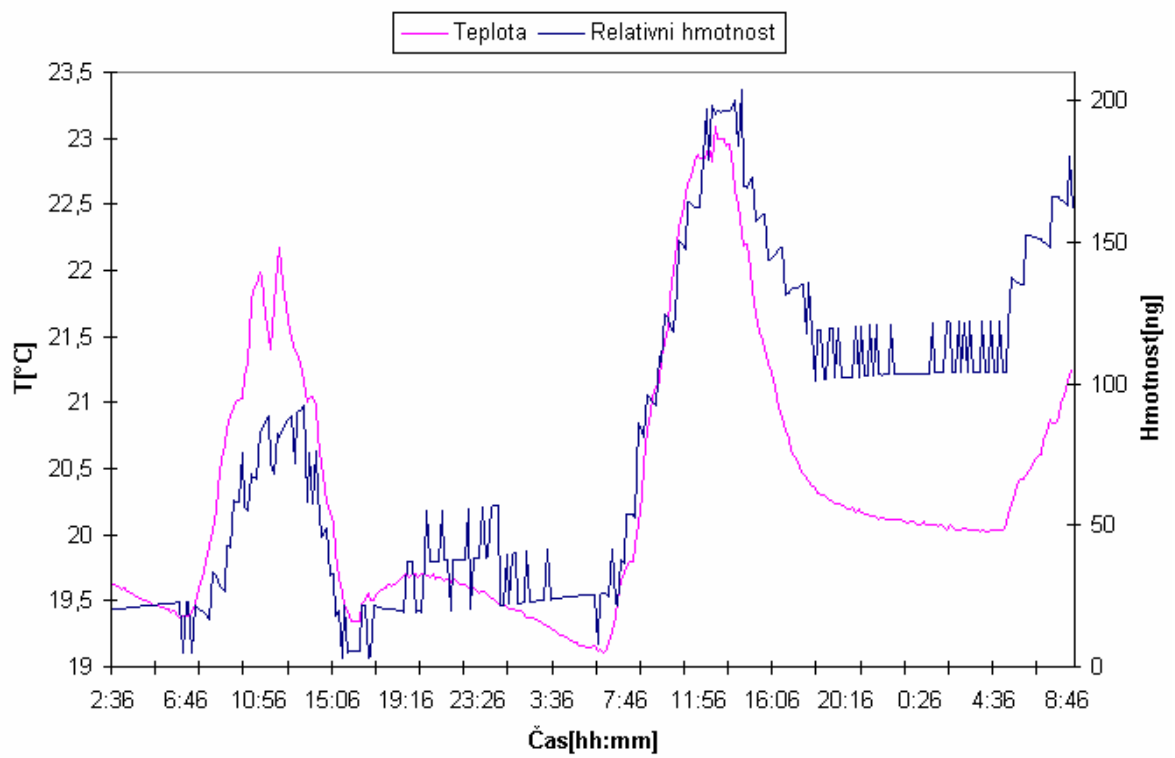
Z relativní frekvence byla pomocí následující rovnice vypočítána relativní hmotnost (Obr. 31).

Výpočet relativní hmotnosti

$$m_{rel.} = f_{rel.} / -0,0566 \quad (9)$$



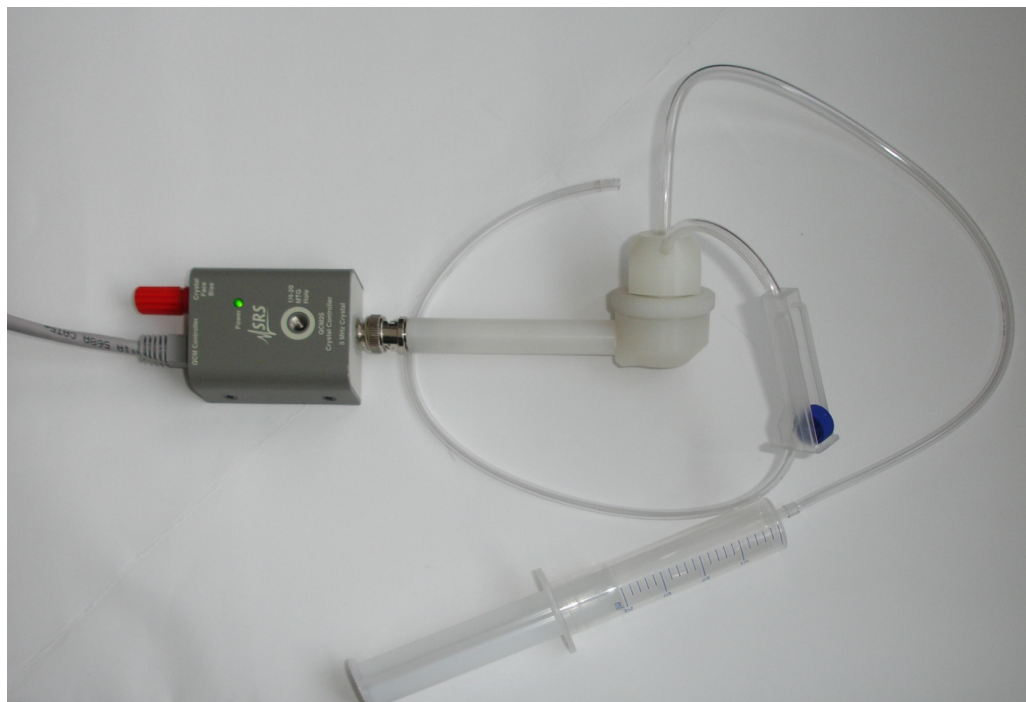
Obr. 31 Závislost relativní hmotnosti na čase



Obr. 32 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase

9.5.3 Měření prachových částic v závislosti na tlaku

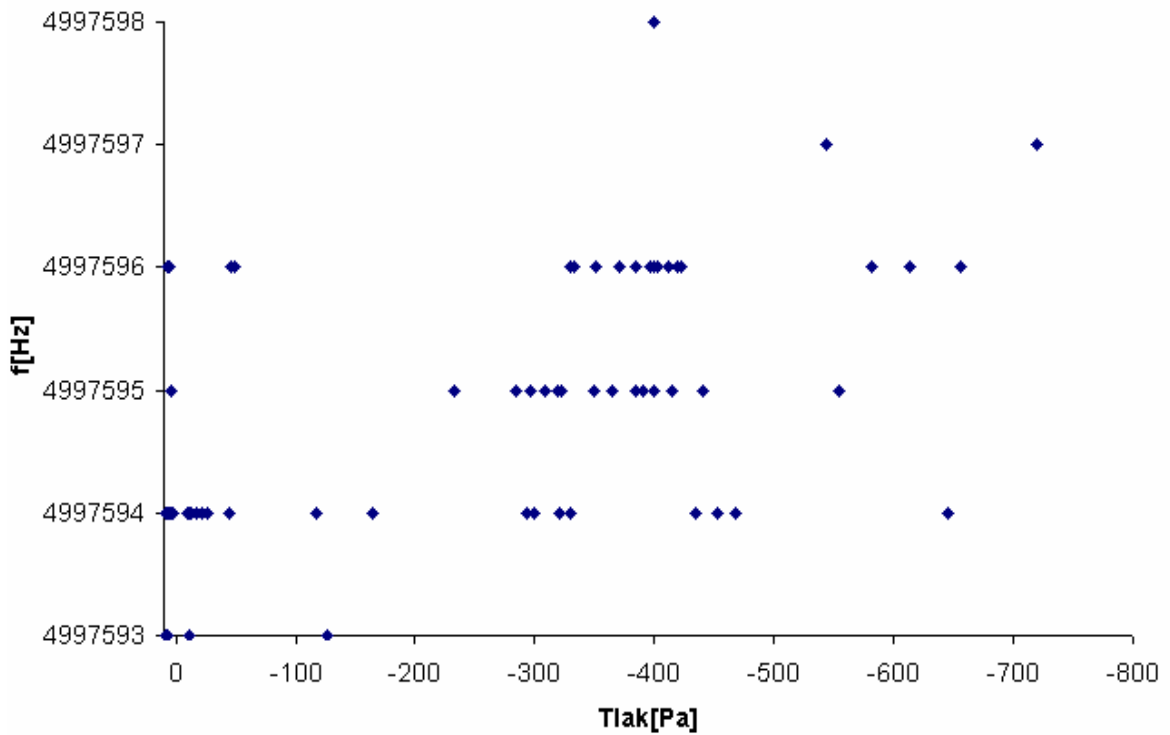
Bylo provedeno měření prachových částic v závislosti na změně tlaku. Pomocí měřicí cely byla sestavena měřicí aparatura a pomocí multifunkčního přístroje měřena diference tlaku. Pomocí injekční stříkačky byl vytvářen podtlak nebo přetlak v systému a byla zaznamenávána hodnota absolutní frekvence z přístroje QCM200.



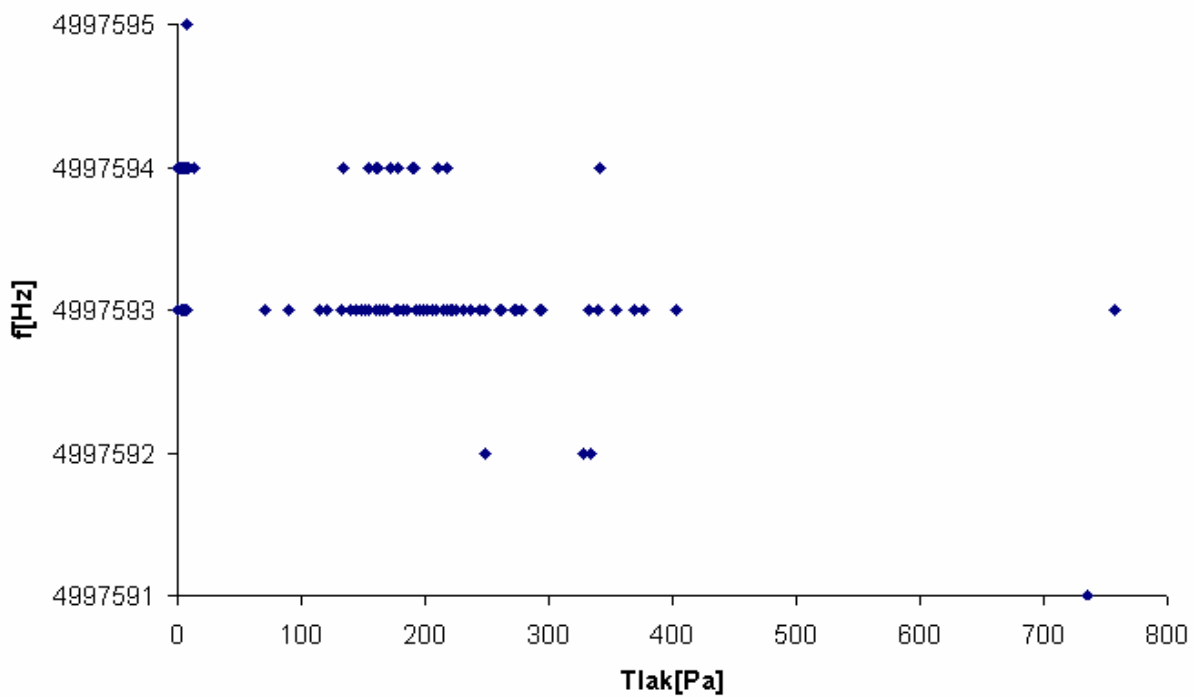
Obr. 33 Sonda s měřicí celou

Jak je z výsledků měření patrné, změna tlaku vyvolá jen nepatrnou změnu frekvence. Jednalo se maximálně o 3 Hz, ovšem po značnou část měření se frekvence měnila spíše o 1 Hz. Tato minimální změna frekvence, tedy i velikosti tlaku samotného, je závislá na provádění experimentu, resp. s jakou rychlostí je pomocí injekční stříkačky tlačěn vzduch do systému či z něj vysáván. Pomocí 20 ml injekční stříkačky byl po cca 2 vteřinách systém natlakován, tím byl v systému vytvořen podtlak a to vždy po pěti dílcích stupnice, což odpovídá 5 ml. Poté se tlak ustálil na počáteční hodnotu cca 6 Pa. Následně bylo pokračováno s měřením po dalších pěti dílcích stupnice injekční stříkačky. Po skončení daného bloku měření byla trubice odpojena a znovu připojena pro další měření přetlaku či podtlaku.

Následující obrázky (Obr. 34, Obr. 35) dokumentují změnu tlaku v průběhu měření a závislost na absolutní frekvenci krystalu.



Obr. 34 Závislost absolutní frekvence na tlaku - podtlak



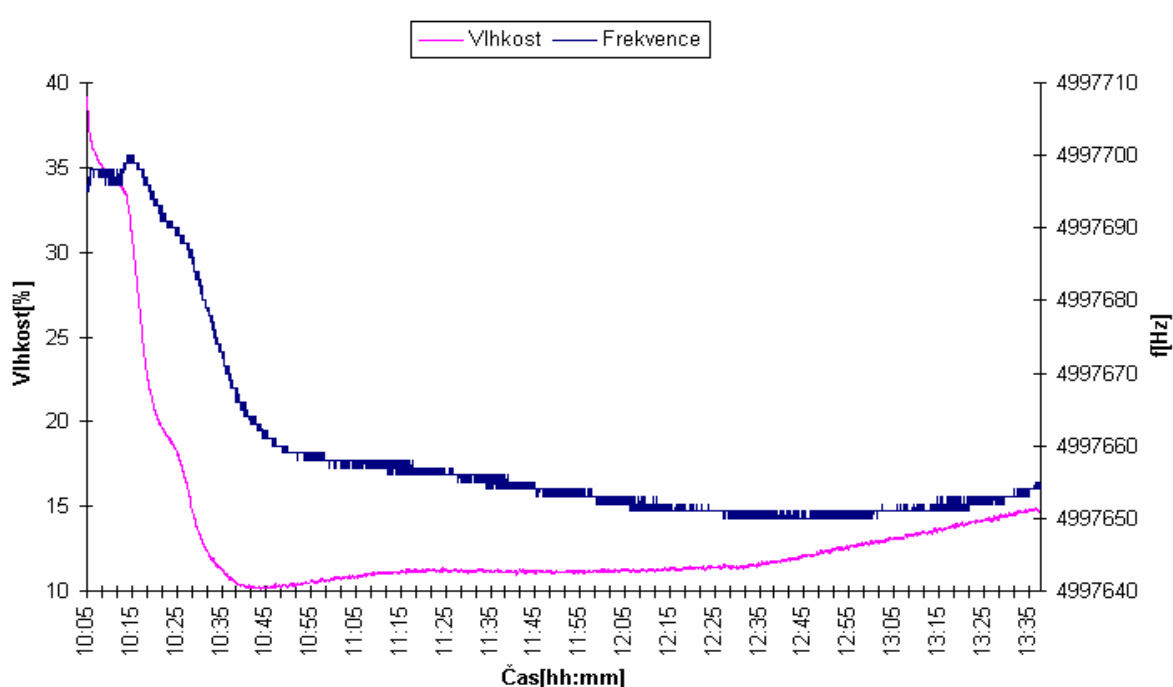
Obr. 35 Závislost absolutní frekvence na tlaku – přetlak

Z měření tedy vyplývá, že usazování prachových částic není závislé na změně tlaku. Lze pozorovat změny absolutní frekvence v řádech jednotek resp. u přetlaku pouze o 4 Hz.

Jedná se tedy o naprosto minimální změnu absolutní frekvence krystalu, která navíc závisí, jak už bylo zmíněno výše, na rychlosti resp. přesnosti práce s injekční stříkačkou, tedy na nasávání vzduchu do systému nebo vysávání vzduchu ze systému.

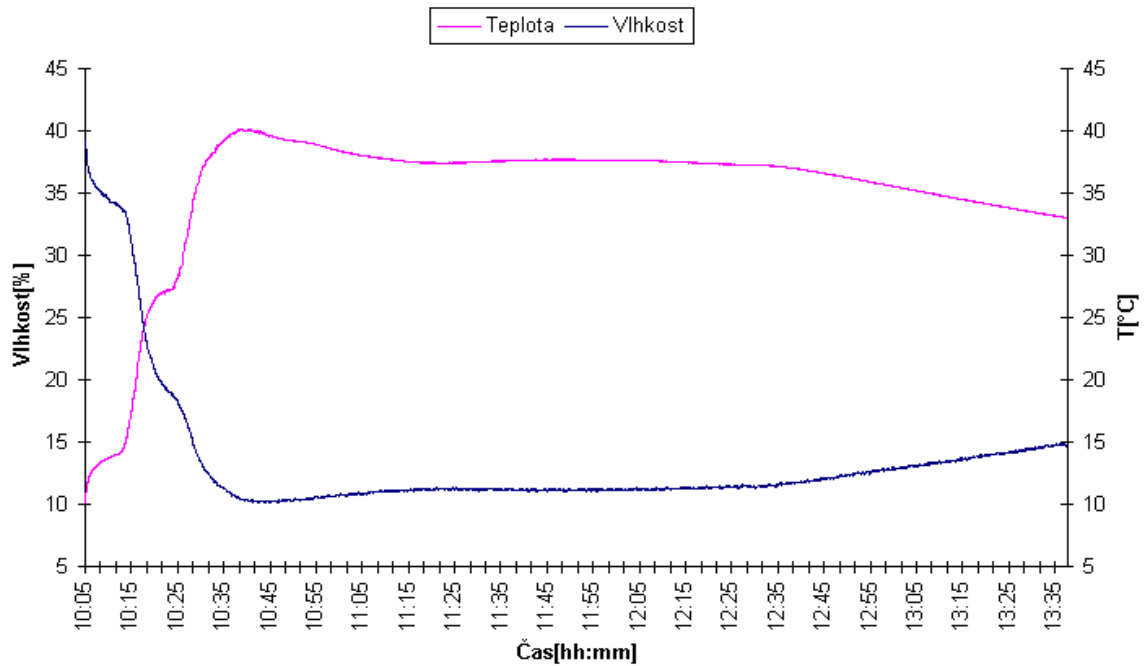
9.5.4 Měření prachových částic v závislosti na relativní vlhkosti

Pomocí přístroje Memmert UNP 200 byla udržována konstantní teplota a následně zaznamenávána společně s hodnotou relativní vlhkosti prostředí a frekvence krystalu. Sonda přístroje QCM200 byla utěsněna, aby nedocházelo k nechtěnému usazování prachových částic a tudíž ke zkreslení měření.



Obr. 36 Závislost absolutní frekvence na čase a relativní vlhkosti na čase

Jak je patrné z obrázku (Obr. 36), závislost relativní vlhkosti na čase má podobný průběh jako závislost frekvence krystalu na čase. V průběhu měření se relativní vlhkost ustálila na cca 10 %, jakmile klesala teplota, rostla vlhkost. Toto je patrné ke konci měření.



Obr. 37 Závislost teploty na čase a vlhkosti na čase

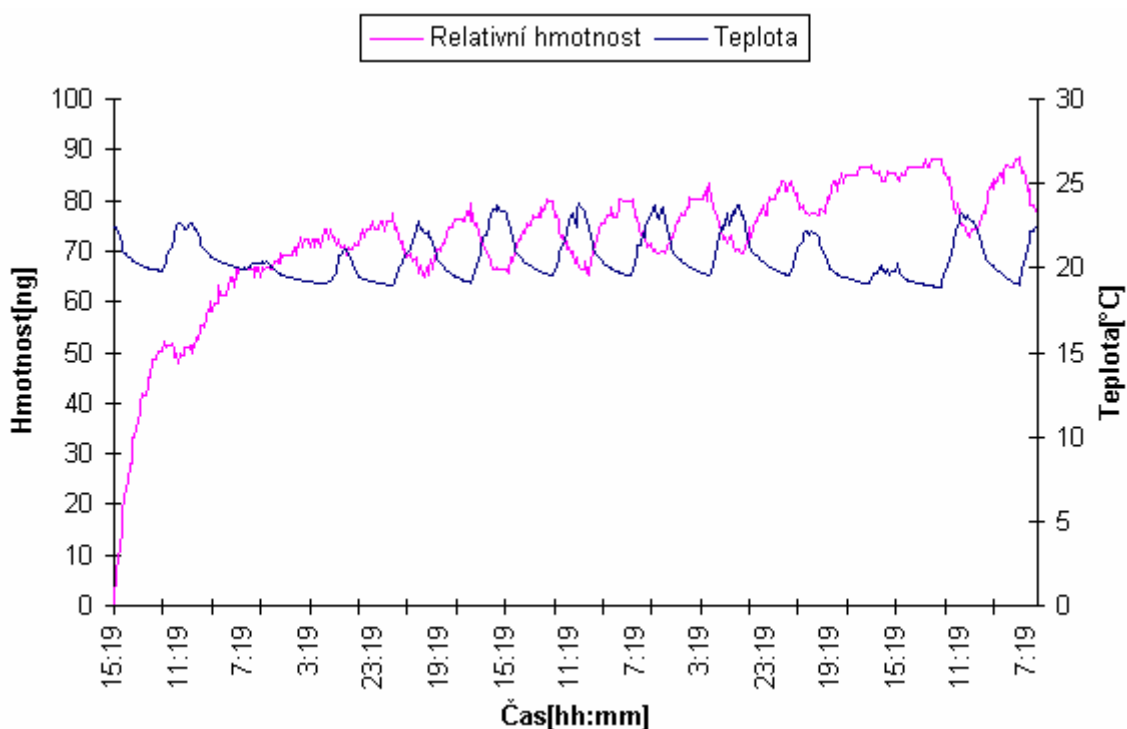
Z výše uvedeného obrázku (Obr. 37) je patrné, že při poklesu vlhkosti roste teplota a naopak. Vzdušná vlhkost tedy v tomto prostředí klesá se zvyšující se teplotou, a jakmile vzroste teplota, klesá vlhkost. Hodnoty teploty se v tomto měření pohybovaly od cca 10 °C do 40 °C. Hodnoty relativní vlhkosti se pohybovaly od 10 % do 40 %.

9.5.5 Dlouhodobější měření prachových částic v laboratorních podmínkách

Celková doba měření byla stanovena na sedm dní. Sonda byla umístěna do uzavřeného boxu. V tomto boxu byly vytvořeny dva otvory. Jeden pro možnost připojení sondy k zařízení QCM200, kde byl použit UTP kabel. Uvnitř boxu byl poté pomocí krimpovacích kleští nasazen konektor RJ-45. Druhý otvor byl vytvořen pro hadičku, připojenou na multifunkční přístroj Testo 435, kterým byl měřen tlak.

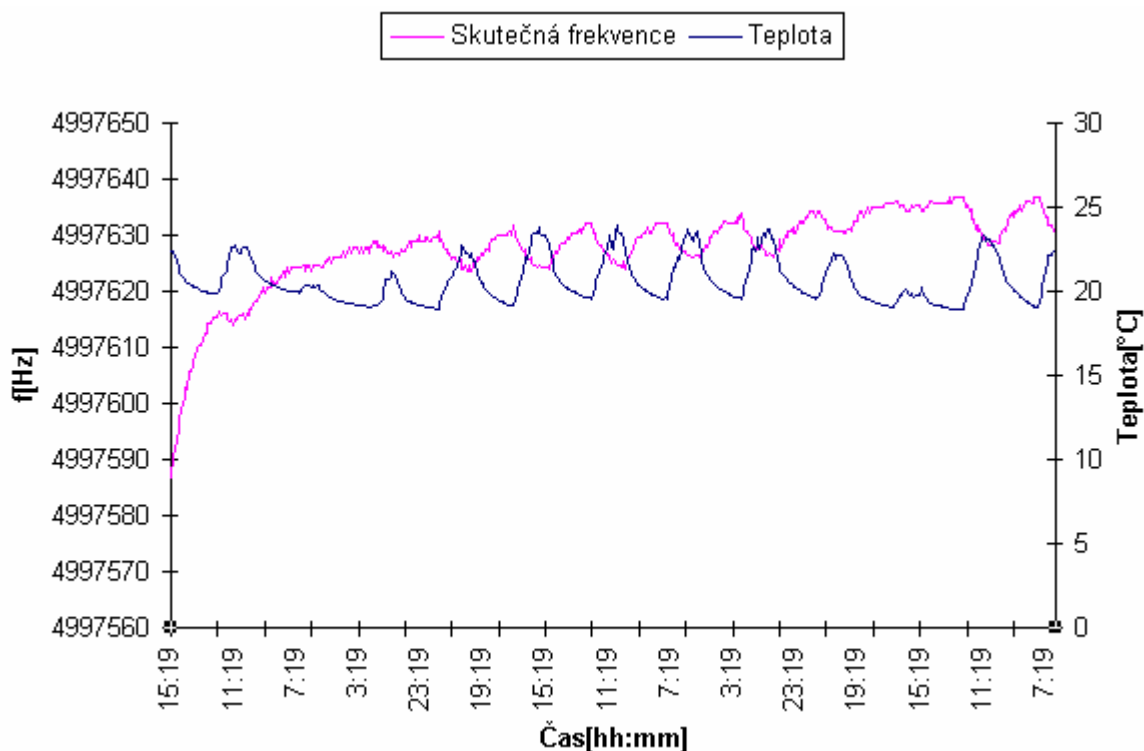
Z výsledku měření lze pozorovat téměř nepatrnou změnu tlaku. Ta se pohybovala kolem hodnot 6 Pa a 7 Pa.

Hodnoty relativní hmotnosti se pohybovaly kolem 60 ng až 80 ng. Tyto hodnoty jsou tedy nižší než hodnoty naměřené ve výše uvedeném měření, protože zde byl použit box, v němž byla umístěna sonda, a z tohoto důvodu tedy docházelo k menšímu usazování prachu na krystalu.



Obr. 38 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase

V průběhu měření se neustále usazoval prach na krystalu, jak dokládá celkové měření (Obr. 38), šlo o periodický průběh.

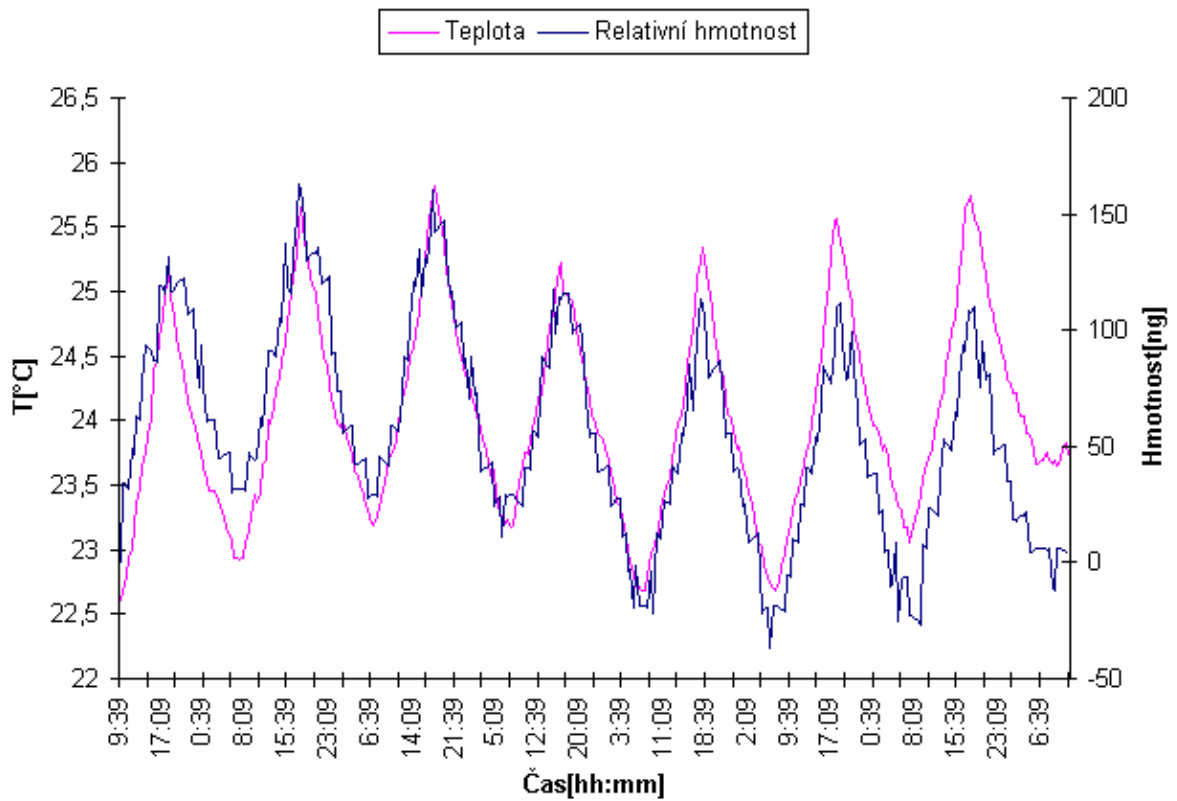


Obr. 39 Závislost skutečné frekvence na čase a teploty na čase

V průběhu celého měření se skutečná frekvence krystalu měnila maximálně o 14 Hz (Obr. 39). Tuto malou změnu frekvence způsobilo umístění sondy do uzavřeného boxu, kde nedocházelo k tak velkému pohybu prachových částic jako v otevřeném prostředí.

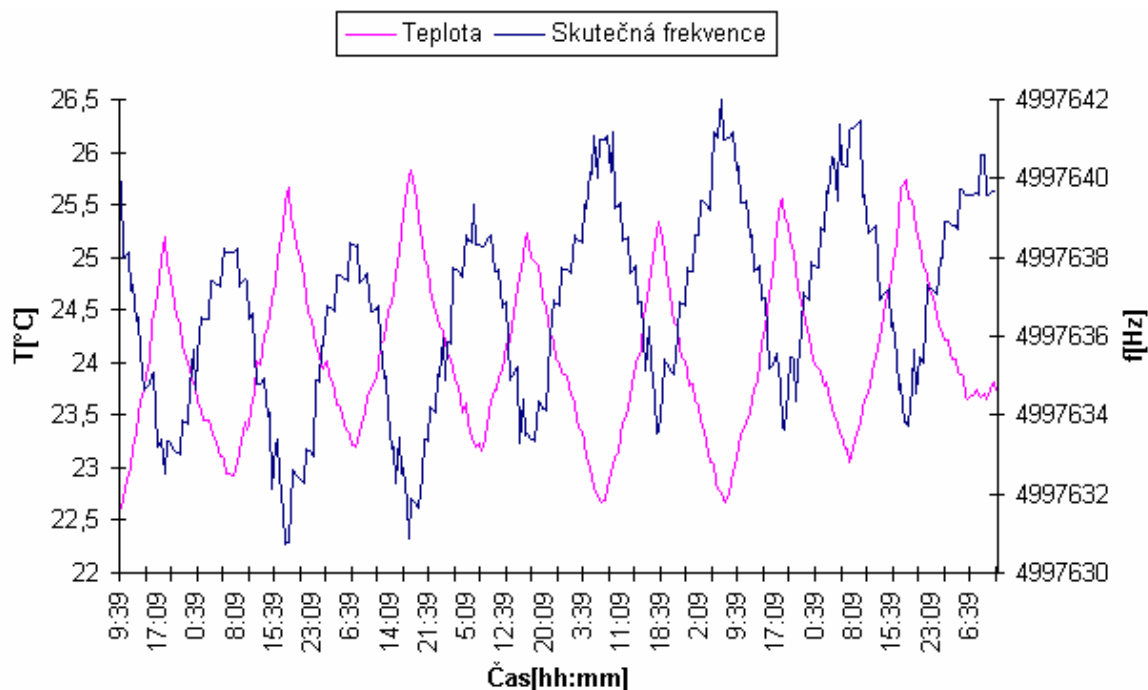
9.5.6 Dlouhodobější měření prachových částic v uzavřené místnosti

Toto měření bylo provedeno v místnosti, kam nebyl umožněn přístup a nedocházelo tedy k ovlivňování měření. Délka celého měření byla stanovena na 7 dní. Teploty se pohybovaly v rozmezí 22°C až 25°C. Jednalo se tedy o nepatrně vyšší teploty než při předchozím měření, což bylo dáno zejména prostředím, v němž experiment probíhal; jednalo se o půdu rodinného domu. Z výsledku měření je patrné, že během dne docházelo k usazování prachu na povrchu krystalu a tedy i k růstu relativní hmotnosti. Toto bylo možné vypořádat zejména do cca 18:00 hodin, pak následoval pokles pohybu víření prachových částic a teploty a tedy i pokles relativní hmotnosti. Z důvodu prakticky stejných podmínek v průběhu měření lze pozorovat opakující se cyklus každý den (Obr. 40).



Obr. 40 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase

Ve čtvrtém dni došlo k poklesu teploty a tedy i k poklesu množství nahromaděných prachových částic na povrchu krystalu. Množství prachových částic, resp. jejich pohyb, tedy závisí na teplotě prostředí. Při poklesu teploty dochází k mírnému poklesu víření prachových částic a tedy i menšímu usazování na povrchu krystalu. Jak je patrné z obrázku (Obr. 41) při teplotě cca 25 °C je relativní hmotnost prachových částic největší, což odpovídá tomuto tvrzení.



Obr. 41 Závislost skutečné frekvence na čase a teploty na čase

Skutečná frekvence byla přepočítána pomocí směrnice pro teplotu nižší než 26 °C, protože tato teplota nebyla v průběhu měření překročena. Rozsah skutečné frekvence činí 12 Hz, vypočítaná maximální relativní hmotnost činila cca 166 ng.

Jestliže skutečná frekvence roste, klesá relativní hmotnost a naopak. Při vyšších hodnotách frekvence je na krystalu menší množství prachových částic a tudíž krystal kmitá s mnohem vyšší frekvencí než při větším zatížení prachovými částicemi, což analogicky znamená útlum kmitů resp. frekvence krystalu.

10 REALIZACE LABORATORNÍ ÚLOHY

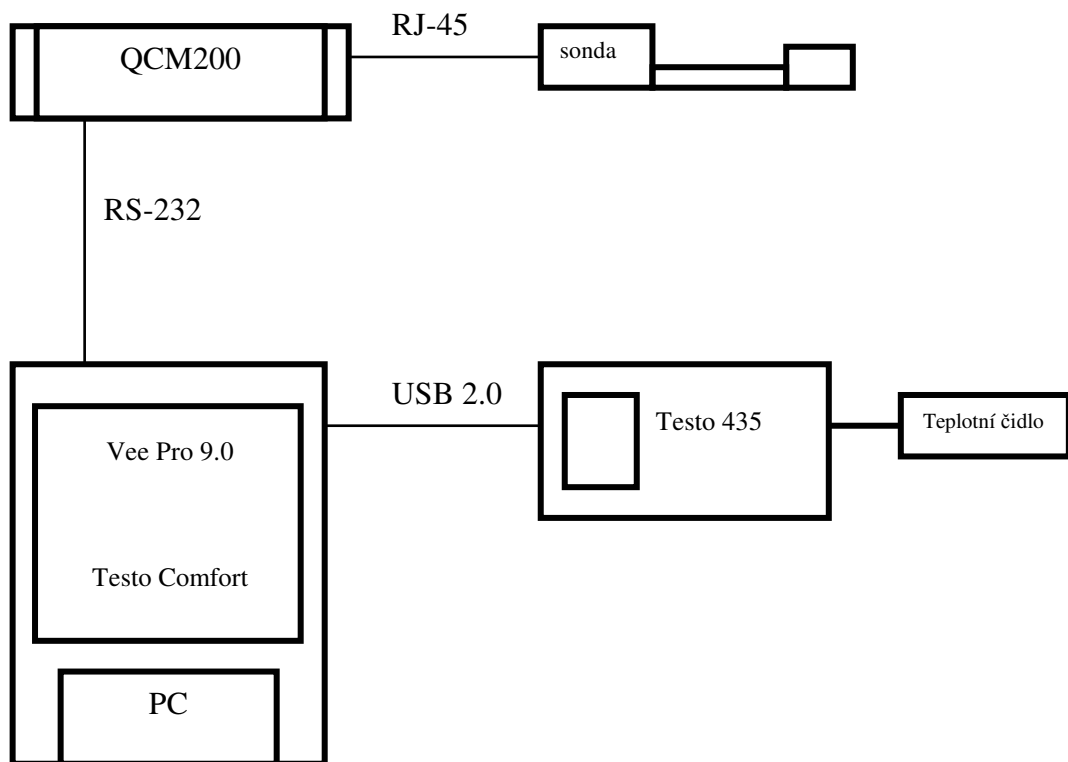
Pro studenty předmětu zpracování signálů je možné tuto laboratorní úlohu zpracovat v rámci standardního měření během dvou vyučovacích hodin v průběhu letního semestru. Laboratorní úloha je koncipována tak, aby se student seznámil s použitými přístroji, byl schopen provést alespoň základní nastavení parametrů přístroje QCM200 a následně pomocí aplikace pro automatický sběr dat zpracovat naměřená data do takové podoby, jež je schopen vysvětlit a popř. obhájit v diskuzi před ostatními studenty či vyučujícím.

Celková doba pro provedení laboratorní úlohy byla stanovena na 90 min, tudíž by měl student stihnout všechny požadavky, které tato úloha stanoví, během dvou vyučovacích hodin. Seznámení se s přístroji a základní zapojení dle schématu zabere celkově 15 min. Následné zapojení a vyzkoušení správnosti zapojení trvá asi 5 min a samotný průběh měření 45 minut. Doba trvání experimentu je samozřejmě flexibilní a není nutno se jí striktně držet. Je tedy možné ji dle potřeby zkrátit či mírně prodloužit. Následné výpočty v programu Microsoft Excel a vynesení požadovaných závislostí do grafů zabere maximálně 15 min. Následná konzultace se studenty a vyučujícím spolu s úklidem pracoviště je stanovena na 10 min.

10.1 Měření usazování prachových částic

Studenti se seznámí s použitými přístroji a provedou zapojení dle níže uvedeného schématu (Obr. 42). Veškeré použité přístroje a pomůcky mají k dispozici na pracovišti. Po zapojení a propojení přístrojů s počítačem přivolají vyučujícího, který zkontroluje řádné zapojení a kalibraci přístroje. Po dohodě s vyučujícím zvolí potřebné parametry měření, jako je doba a perioda měření a nastaví cestu k souboru, do kterého se budou v průběhu měření ukládat data z přístroje QCM200. Data z přístroje Testo 435 zaznamenává aplikace dodávaná přímo s tímto multifunkčním přístrojem. Tuto studenti spustí také a následně naměřená data exportují přímo z výchozího okna aplikace do programu Microsoft Excel. Zde tedy není nutné ukládat žádný soubor s naměřenými daty. Poté studenti pohybem sondy rozvíří prachové částice v boxu a budou v okně aplikace pro automatický sběr dat sledovat změnu rezonanční frekvence krystalu resp. relativní frekvenci.

Po provedení měření studenti vyhodnotí, resp. vypočítají potřebné údaje a vynesou jednotlivé závislosti do grafů. Tyto výpočty a interpretace jejich výsledků budou součástí protokolů. Po konzultaci s vyučujícím rovněž napíše závěr výsledků měření a zamyslí se nad možnými faktory, které mohou ovlivňovat měření.



Obr. 42 Schéma zapojení systému na bázi piezoelektrického senzoru

Studenti za použití korekční křivky získají skutečnou absolutní frekvenci a z této frekvence následně vypočítají relativní frekvenci, ze které si vyjádří relativní hmotnost pomocí upravené Sauerbreyovy rovnice:

$$m_{rel.} = f_{rel.} / -0,0566 \quad (10)$$

$m_{rel.}$ - výsledná naměřená hmotnost prachových částic [ng]

$f_{rel.}$ - vypočtená relativní rezonanční frekvence krystalu [Hz]

Následně vykreslí závislost relativní hmotnosti na čase a skutečné absolutní frekvence na čase. Pro zajímavost mohou do jednoho grafu vynést i závislost absolutní frekvence a skutečné absolutní frekvence na čase a diskutovat, jakou změnu přinesl přepočet pomocí teplotní korekční křivky resp. její směrnice. Je možné vykreslit i graf, ve kterém studenti

uvidí závislost teploty na čase spolu se závislostí skutečné absolutní frekvence na čase a mohou sledovat průběh obou veličin v rámci experimentu.

V závěru studenti uvedou, jaké faktory ovlivnily měření a jak s frekvencí krystalu souvisí teplota prostředí popř. jiné vlivy.

11 MOŽNOSTI POKRAČOVÁNÍ A PRAKTICKÉ VYUŽITÍ

Z hlediska praktického využití je možné přístroj QCM200 díky jeho malým rozměrům použít i v malých prostorách resp. v uzavřených boxech či kontejnerech. Toto je zejména využitelné při skladování materiálů a techniky, jež nesmí přijít do styku s prachovými částicemi, a proto se musí uchovávat ve speciálních kontejnerech. I zde totiž dochází k usazování prachu díky netěsnosti boxů a jejich manipulaci. Přístroj QCM200 lze připojit k přenosnému počítači a není tudíž problém nasazení i v místech, kde není instalována výpočetní technika.

Studenti se mohou dle zhotovené laboratorní úlohy seznámit s funkcí přístroje a aplikací pro automatický sběr dat. Následně mohou pomocí této aplikace provést měření, jako je závislost relativní hmotnosti na čase nebo skutečné absolutní frekvence na čase. Zajímavé je také pozorovat vliv zejména vyšších teplot na průběh rezonanční frekvence krystalu. Díky multifunkčnímu přístroji Testo 435 je možné měřit jak zmíněnou teplotu, tak i tlak resp. jeho diferenci vně a uvnitř systému, i vlhkost pomocí dané sondy.

ZÁVĚR

Cílem diplomové práce bylo využití mikrováhového senzoru pro detekci prachových částic. Jednalo se zejména o sestavení systému na bázi piezoelektrického mikrováhového snímacího prvku za účelem detekce dynamiky usazování prachových částic a vytvoření programu pro automatický sběr dat ve vývojovém prostředí Agilent Vee Pro 9.0.

V prvním měření jsem provedl měření prachových částic v závislosti na teplotě a stanovil jsem korekční křivku. V druhém experimentu jsem měřil prachové částice v laboratorních podmínkách po dobu cca 60 hodin bez možnosti vstupu do této místnosti. Dále jsem provedl měření v závislosti na tlaku pomocí měřící cely, kde jsem pomocí sestaveného aparátu vytvářel podtlak či přetlak v systému. Jako další měření jsem zvolil závislost prachových částic na relativní vlhkosti. Zde jsem pomocí sondy připojené k multifunkčnímu přístroji Testo 435 zaznamenával relativní vlhkost prostředí a teplotu okolí. Poslední dvě měření byly dlouhodobější a trvaly sedm dní. V prvním případě byla sonda přístroje QCM200 umístěna do uzavřeného boxu, kde byly měřeny prachové částice spolu s tlakem resp. jeho diference uvnitř a vně boxu. Druhý dlouhodobější experiment proběhl v místnosti s vyšším výskytem prachových částic. Jednalo se o půdní vestavbu, kde ještě nebyly ukončeny všechny úpravy a tudíž není obývána. Zde již nebyla sonda přístroje QCM200 umístěna v uzavřeném boxu, ale volně a současně byla měřena také teplota prostředí.

Všechna data, získaná měřením, jsem vyhodnotil pomocí programu Microsoft Excel a jsou součástí příloženého CD stejně jako program pro automatický sběr dat. Z výsledků měření jsem zjistil, že frekvence krystalu je přímo závislá pouze na množství usazeného prachu. Vliv teploty na frekvenci krystalu je patrný spíše pro vyšší teploty okolo 40 °C a více, a proto je frekvence v průběhu experimentů ovlivňována minimálně, protože zde teploty nepřekročily 30 °C. I přesto jsem provedl teplotní korekci. Ostatní veličiny jako tlak nebo vlhkost souvisí právě s teplotou a tedy s prašností daného prostředí a ovlivňují frekvenci krystalu nepřímo. Toto je dáno zejména konstrukcí samotného krystalu křemene, který do teploty 200 °C prakticky nereaguje na teplotní výkyvy, resp. reaguje minimálně.

Připravil jsem rovněž vzorovou laboratorní úlohu, kterou mohou použít studenti v předmětu zpracování signálů. Navrhuji případné pokračování měření zejména zaměřením se na vlivy vyšších teplot a použití přístroje QCM200 ve speciálních boxech či

kontejnerech určených pro skladování citlivých zařízení a možnosti praktického využití zejména díky mobilitě měřicího přístroje QCM200.

ZÁVĚR V ANGLIČTINĚ

The objective of this graduation thesis was the usage of microbalance system for dust particle detection. It was mainly focused on the system design based on piezoelectric microbalance scanning element for dynamic detection of dust particle and creating of computer program for automatic gathering of computer data in development environment of Agilent Vee Pro 9.0.

In first experiment I carried out measurement of dust particle influence on temperature and set correction curve. In second experiment I measured dust particles in laboratory environment for 60 hours without entering this room. Further I did measurement with influence on pressure by measuring cell, where by the help of laboratory devices I generated underpressure or overpressure in system. As a next experiment I have selected dust particle influence on relative humidity. Here I recorded with probe plugged into multifunction device Testo 435 relative humidity and temperature of environment. Last two long-term measurement took about seven days. In first case was QCM200 probe placed into closed box, where dust particle and pressure were measured. Second long-term measurement was set up in environment with higher appearance of dust particles. This place was loft, where all building activities was not done and because of this was not occupied. QCM200 probe was not placed in closed box, but freely in environment and temperature was measured.

I evaluated all data from measurement with Microsoft Excel and they are part of the included cd so as computer program for automatic gathering of computer data. From the measurement results I find out that the crystal frequency directly depends only on amount of dust particle. Temperature influence on crystal frequency is evident with higher temperatures around 40°C and that is why is frequency during experiments effected minimally because temperature did not take over 30°C. In spite of this I carried out temperature correction at the beginning of experiment. Other values such as pressure or humidity is associated with temperature and therefore with dust in environment and affect frequency indirectly. This is given to construction of quartz crystal which up to 200°C do not react or react minimally on temperature fluctuation.

I also prepared sample laboratory protocol which can be used by the students in subject of signal processing. I suggest possible ways of continuing of work for example influence of

higher temperatures and usage of QCM200 in special boxes or containers for storage of sensitive devices and fitness of this method for practical usage especially due to QCM200 measurement device mobility.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

- [4] REGTIEN P. P. L.: *Measurement science for engineers*, London and Sterling, VA, 2004
- [5] FRADEN, J.: *Handbook of Modern Sensors: Physics, Designs, and Applications*, 2nd ed. New York, Springer Verlag, 1996.
- [6] ZAPLATÍLEK, K., DOŇAR, B.: *MATLAB - tvorba uživatelských aplikací*. 1. vyd. Praha : BEN - technická literatura, 2004.
- [7] SEDLÁČEK, M., ŠMÍD, R.: *MATLAB v měření*. 1. vyd. Praha : ČVUT, 2005.
- [8] SEDLÁČEK, M.: *Zpracování signálů v měřicí technice*. Dotisk 2. vyd.. - Praha : ČVUT, ISBN 80-01-01785-0, 1999
- [9] ĎAĎO, S., KREIDL, M.: *Senzory a měřicí obvody*, Vydavatelství ČVUT, Praha 1996
- [10] *Agilent Technologies, Inc.: Practical graphical programming*. 2008 edition.
- [11] *Agilent Technologies, Inc., VEE Pro Advanced Programming Techniques*.
Dostupný z WWW: <<http://www.home.agilent.com/agilent>>
- [12] *Stanford Research System: QCM200*. Dostupný z WWW:
<<http://www.thinksrs.com/downloads/PDFs/Manuals/QCM200m.pdf>>
- [13] *Piezelektrické senzory zrychlení kmitavého pohybu a časově proměnných tlaků*.
Dostupný z WWW: <<http://www.techtydenik.cz>>
- [14] HUBÁLEK, J., ADÁMEK, M.: *Mikrosenzory a mikroelektromechanické systémy*, Vydavatelství ČVUT, Praha 2006
- [152] SKLÁDAL, P.: *Biosensory* [on line]. Brno : Masarykova univerzita, 2002 [cit. 2006-05-24]. Dostupný z WWW:
<<http://orion.chemi.muni.cz/pskl/vyuka/Biosensory.pdf>>
- [163] MOŤKA, P.: *Měření parametrů piezokrystalů jako mikrováhových senzorů*. [s.l.], 2002. 53s. Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně. Fakulta technologická. Vedoucí diplomové práce doc. RNDr. Vojtěch Křesílek, CSc.

- [14] *QCM200 Quartz Crystal Microbalance: Operation and Service Manual*. 2.0th rev. Edition. USA. : Stanford Research Systems, Inc., 2004. Xii, 106 s.
- [175] TR instruments spol. s r. o.. *Analytické přístroje* [on line]. C1991-2006 [cit. 2006-05-24]. Dostupný z WWW:
<http://www.instruments.cz/produkty/provozni/vedecke/analyticke-pristroje>
- [186] *Quartz Crystal Theory*, [on line]. [Cit. 2005-10-26]. Dostupný z WWW:
<<http://www.jauch.de/home/index.php?sprache=en&seite=27&modausid=crystal%20notes>>
- [19] NOVÁKOVÁ, M., HANUŠ, V., JIRSA, M.: *Matematické, fyzikální a chemické tabulky*, Státní pedagogické nakladatelství, n. p., Praha 1987
- [18] *Pharmaceutical International* [on line]. [Cit. 2005-10-26]. Dostupný z WWW:
<http://www.pharmaceutical-int.com/categories/qcm-technology/what-is-a-quartz-crystal-microbalanceqmc.asp>
- [19] *Quartz Crystal Microbalance*, [on line]. [Cit. 2005-10-26]. Dostupný z WWW:
<http://www.thinksrs.com/products/QMC200.htm>

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

QCM	quartz crystal microbalance.
SAW	surface acoustic wave
SH-APM	shear horizontal acoustic plate mode
FPW	flexural plate wave

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obr. 1 Souvislost struktury krystalové mřížky se vznikem piezoelektrického jevu	11
Obr. 2 Krystal křemene	13
Obr. 3 Výbrus snímače.....	14
Obr. 4 Náhradní elektrické schéma piezoelektrického senzoru.....	15
Obr. 5 Praktické náhradní elektrické schéma piezoelektrického senzoru.....	16
Obr. 6 Typické tvary křemenných výbrusů AT.....	19
Obr. 7 Základní typy oscilací	20
Obr. 8 Piezoelektrický krystal.....	24
Obr. 9 Příklady využití piezoelektrických senzorů	25
Obr. 10 Piezoelektrická rezonanční mikrováha	25
Obr. 11 Přístroj QCM200 s měřicí sondou a přístroj QCM100.....	27
Obr. 12 Přístroj QCM200 – přední panel	28
Obr. 13 Přístroj QCM200 – zadní panel	28
Obr. 14 Měřicí sonda a senzory	29
Obr. 15 Princip funkce QCM200.....	31
Obr. 16 Memmert UNP 200	32
Obr. 17 Multifunkční přístroj Testo 435.....	32
Obr. 18 Výchozí okno aplikace Agilent Vee Pro 9.0.....	35
Obr. 19 Okno aplikace Testo Comfort Software X35	36
Obr. 20 Schéma zapojení systému na bázi piezoelektrického senzoru.....	38
Obr. 21 Detailní pohled na obslužný program – Agilent Vee Pro 9.0.....	39
Obr. 22 Výchozí okno obslužného programu – Agilent Vee Pro 9.0	40
Obr. 23 Agilent Connection Expert	41
Obr. 24 Instrument Properties.....	42
Obr. 25 Průběh měření – Program Testo Comfort-Software X35	43
Obr. 26 Závislost změny rezonanční frekvence na teplotě	44
Obr. 27 Pracoviště s PC a přístroji QCM200 a Testo 435.....	45
Obr. 28 Závislost skutečné frekvence na čase a absolutní frekvence na čase.....	46
Obr. 29 Závislost absolutní frekvence na teplotě.....	47
Obr. 30 Závislost teploty na čase	47
Obr. 31 Závislost relativní hmotnosti na čase.....	48

Obr. 32 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase	49
Obr. 33 Sonda s měřicí celou	50
Obr. 34 Závislost absolutní frekvence na tlaku - podtlak	51
Obr. 35 Závislost absolutní frekvence na tlaku – přetlak	51
Obr. 36 Závislost absolutní frekvence na čase a relativní vlhkosti na čase	52
Obr. 37 Závislost teploty na čase a vlhkosti na čase.....	53
Obr. 38 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase	54
Obr. 39 Závislost skutečné frekvence na čase a teploty na čase	55
Obr. 40 Závislost relativní hmotnosti na čase a teploty na čase	56
Obr. 41 Závislost skutečné frekvence na čase a teploty na čase	57
Obr. 42 Schéma zapojení systému na bázi piezoelektrického senzoru.....	59

SEZNAM TABULEK

Tabulka 1 Základní vlastnosti některých piezoelektrických materiálů.....	17
Tabulka 2 Typické parametry křemenných výbrusů.....	18
Tabulka 3 Parametry QCM200.....	30

SEZNAM PŘÍLOH

PŘÍLOHA 1 VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA	73
---	----

PŘÍLOHA 1 VZOROVÁ LABORATORNÍ ÚLOHA

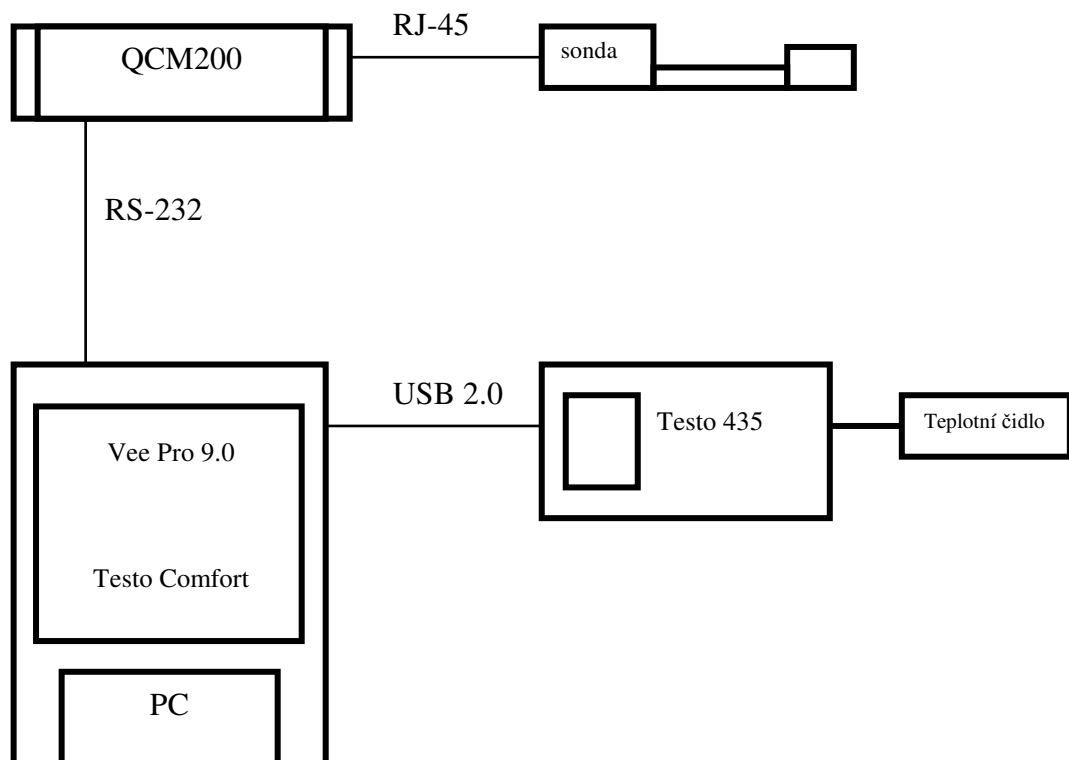
Úkol měření

1. Seznamte se s principem činnosti přístroje QCM200 a přiložené aplikace pro automatický sběr dat.
2. Sestavte měřicí systém pro měření absolutní frekvence a teploty.
3. Změřte závislost frekvence krystalu na čase.
4. Pomocí korekční křivky vypočítejte skutečnou frekvenci krystalu.
5. Vypočítejte závislost relativní hmotnosti na čase a vynesete ji do grafu.
6. Vykreslete závislost skutečné absolutní frekvence na čase do grafu.
7. Ze získaných hodnot vyvodte závěr.

Seznam použitých přístrojů

Mikrováhový senzor	typ: QCM200
Multifunkční přístroj	typ: Testo 435

Schéma zapojení



Obr. 1. Schéma zapojení systému na bázi piezoelektrického senzoru

Postup měření:

Jako mikrováhový senzor zvolte přístroj od firmy SRS QCM200, k němuž připojte pomocí UTP kabelu a konektoru RJ-45 sondu obsahující křemenný krystal. Pro tyto účely využijte box s již upevněným kabelem a konektorem. Poté dovnitř vložte již zmíněnou sondu spolu s teplotním čidlem od multifunkčního přístroje Testo 435 od firmy Testo AG. Nyní mikrováhový senzor QCM200 připojte k pracovní stanici pomocí rozhraní RS-232 přes přiloženou USB redukci. Přes USB rozhraní rovněž připojte multifunkční přístroj Testo 435.

Nyní přístroj QCM200 zapněte a proveďte počáteční kompenzaci rezonanční frekvence. Páčku přepněte do polohy ADJUST. Pro kompenzaci musí svítit obě LED diody v pozici NULL. Poté změňte polohu páčky do pozice HOLD.

Spusťte přiloženou aplikaci pro automatický sběr dat v prostředí Agilent Vee Pro 9.0, zde zvolte příslušný sériový port přes položku Instrument Manager a následně spusťte program od firmy Testo AG Testo Comfort Software X35 k zaznamenávání teploty. V prostředí programu Agilent nastavte požadovanou dobu měření a periodu. Zvolte také místo pro uložení získaných dat. Po kontrole vyučujícího můžete spustit měření.

Všímejte si zejména změny průběhu frekvence, pokud nějakým způsobem budete manipulovat s boxem nebo přímo se sondou. Veškeré hodnoty se budou zaznamenávat na zvolené místo do souboru typu *.txt. Poté stačí příslušná data přenést do programu Microsoft Excel.

I při nízkých teplotách, jaké jsou v laboratoři, je třeba počítat s vlivem teploty na frekvenci krystalu. Proto je nutné upravit absolutní frekvenci dle teplotní korekční křivky. Jestliže byly naměřené teploty v průběhu měření nižší než 26 °C, použijte směrnici -0,61 Hz/°C. Pokud hodnota teploty překročila hranici 26 °C, zvolte jako směrnici hodnotu -1 Hz/°C. Díky tomuto přepočtu dostanete skutečnou hodnotu frekvence. Z této frekvence poté získáte frekvenci relativní, kterou použijete pro výpočet relativní hmotnosti dle upravené Sauerbreyovy rovnice:

$$m_{rel.} = f_{rel.} / -0,0566$$

kde: $m_{rel.}$ - výsledná naměřená hmotnost prachových částic [ng]

$f_{rel.}$ - vypočtená relativní rezonanční frekvence krystalu [Hz]

V prostředí Microsoft Excel zanešte do grafu hodnoty relativní hmotnosti v závislosti na čase. Vypočítejte chybu měření hmotnosti a frekvence. V závěru popište průběh měření a zhodnoťte, kterými vnějšími vlivy byl experiment ovlivněn.

Příklad výpočtu:

Vypočítejte si skutečnou hodnotu absolutní frekvence. Použijete tedy teplotní korekci resp. hodnoty příslušných směrnic. Pro měření do 26 °C to je směrnice -0,61 Hz/°C.

Výpočet skutečné frekvence

$$f_{skut.} = f_{abs.} - 0,61 \text{ Hz} / ^\circ\text{C} \cdot (26 - T)$$

Naměřenou první hodnotu absolutní frekvence si zvolte za offset frekvence.

Výpočet relativní frekvence

$$f_{rel.} = f_{skut.} - offset$$

Nyní z relativní frekvence si vypočítejte relativní hmotnost dle následujícího vztahu:

Výpočet relativní hmotnosti

$$m_{rel.} = f_{rel.} / -0,0566$$

Vypočtené a naměřené hodnoty vyneste do grafu. Výsledky konzultujte s vyučujícím. Pokuste se určit co nejpřesněji, v jakém bodě došlo k rapidnímu poklesu či nárůstu rezonanční frekvence krystalu na základě vnějších vlivů (pohyb s boxem, manipulace se sondou či pohyb v laboratoři). Diskutujte, jaké další možné vlivy mohou působit na změnu rezonanční frekvence (tlak, vlhkost apod.) a co se děje s hromadícím se prachem na ploše krystalu (hromadění, pohyb nebo úbytek prachových částic).