

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY

FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH TECHNOLOGIÍ ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNÍ PRACOVISTĚ PRO MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH ZÁVISLOSTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

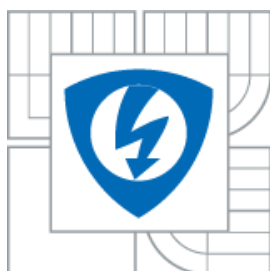
AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV RIŠKO

BRNO 2011



VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA ELEKTROTECHNIKY A KOMUNIKAČNÍCH
TECHNOLOGIÍ
ÚSTAV TELEKOMUNIKACÍ

FACULTY OF ELECTRICAL ENGINEERING AND COMMUNICATION
DEPARTMENT OF TELECOMMUNICATIONS

EXPERIMENTÁLNE PRACOVISTĚ PRO MĚŘENÍ TEPLOTNÍCH ZÁVISLOSTÍ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE
BACHELOR'S THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

MIROSLAV RIŠKO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

ING. JIŘÍ MAJZNER, PH.D.

BRNO 2011



**VYSOKÉ UČENÍ
TECHNICKÉ V BRNĚ**

**Fakulta elektrotechniky
a komunikačních technologií**

Ústav telekomunikací

Bakalářská práce

bakalářský studijní obor

Teleinformatika

Student: Miroslav Riško
Rocník: 3

ID: 115267
Akademický rok: 2010/2011

NÁZEV TÉMATU:

Experimentální pracoviště pro měření teplotních závislostí

POKYNY PRO VYPRACOVÁNÍ:

Cílem práce je navržení a realizace pracoviště, které bude sloužit pro měření nízkoteplotních elektrických a šumových charakteristik.

1. Navrhněte uspořádání pracoviště a zvolte vhodný způsob kontaktování měřených vzorků.
2. Použijte Matlab pro řízení procesu měření.
3. Realizujte měření teplotních závislostí elektrických a šumových charakteristik.

DOPORUČENÁ LITERATURA:

- [1] APC International, Ltd., Piezoelectric Ceramics: Principles and Applications, Mackeyville, PA., USA, 2002.
- [2] KOKTAVÝ, P. Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik, Skripta FEKT VUT v Brně. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 2006, 102 stran.
- [3] Keithley Instruments, Low Level Measurements, 4th Edition, 1992

Termín zadání: 7.2.2011

Termín odevzdání: 2.6.2011

Vedoucí práce: Ing. Jirí Majzner, Ph.D.

prof. Ing. Kamil Vrba, CSc.
Předseda oborové rady

UPOZORNĚNÍ:

Autor bakalářské práce nesmí při vytváření bakalářské práce porušit autorská práva třetích osob, zejména nesmí zasahovat nedovoleným způsobem do cizích autorských práv osobnostních a musí si být plně vědom následků porušení ustanovení § 11 a následujících autorského zákona č. 121/2000 Sb., včetně možných trestněprávních důsledků vyplývajících z ustanovení části druhé, hlavy VI. díl 4 Trestního zákoníku č.40/2009 Sb.

Abstrakt

Bakalárska práca s názvom „Experimentálne pracovisko pre meranie teplotných závislostí“ sa zaoberá sprevádzkovaním staršieho kryostatu pre účely merania elektrických a šumových charakteristík vzorky PZT keramiky a QCM senzorov v závislosti na teplote. Cieľom je zostaviť pracovisko a vybaviť ho dostupnými meracími prístrojmi. Pripraviť riadenie procesu merania a prakticky overiť jeho funkčnosť.

Abstract

The goal is to build an experimental setup for the measurements of temperature dependencies of the electrical and noise characteristics of PZT ceramic samples and QCM sensors. The functional older cryostat was used as central part and the experimental setup was completed using instruments for temperature and vacuum measurements and DC power supply. The software for the setup control was programmed in Matlab environment.

Kľúčové slova

PZT ,QCM, kryostat , šumové charakteristiky , tepelná závislosť

Key words

PZT , QCM , cryostat , noise characteristics , thermal dependence

BIBLIOGRAFICKÁ CITÁCIA

RIŠKO, M. Experimentálne pracovište pre měření teplotních závislostí. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta elektrotechniky a komunikačních technologií, 2011. 56 s. Vedoucí bakalářské práce: Ing. Jiří Majzner, Ph.D.

PREHLÁSENIE

Prehlasujem, že svoju bakalársku prácu na téma „Experimentálne pracovisko pre meranie teplotných závislostí“ som vypracoval samostatne pod vedením vedúceho semestrálnej práce a s použitím odbornej literatúry a ďalších informačných zdrojov, ktoré sú všetky citované v práci a uvedené v zozname literatúry na konci práce.

Ako autor uvedenej bakalárskej práce ďalej prehlasujem, že v súvislosti s vytvorením tejto bakalárskej práce som neporušil autorské práva tretích osôb, najmä som nezasiahol nedovoleným spôsobom do cudzích autorských práv osobnostných a som si plne vedomý následkov porušenia ustanovení § 11 a nasledujúcich autorského zákona č. 121/2000 Zb., vrátane možných trestnoprávných dôsledkov vyplývajúcich z ustanovení § 152 trestného zákona č. 140/1961 Zb.

V Brne dňa

.....
podpis autora

POĎAKOVANIE

Ďakujem vedúcemu bakalárskej práce Ing. Jiřimu Majznerovy. Ph.D. za príkladnú a veľmi užitočnú metodickú pomoc, námety a cenné rady pri spracovaní mojej bakalárskej práce.

V Brne dňa 29.5.2011

.....

podpis autora

Obsah

Úvod	9
1 Teoretický úvod	10
1.1 Šum	10
1.1.1 Tepelný šum	11
1.2 Piezoelektrický jav	12
1.3 Piezoelektrický snímač.....	12
1.4 QCM.....	13
1.4.1 Využitie QCM	14
1.5 RS 232	15
1.5.1 Baud	17
1.5.2 Asynchrónny prenos dát.....	18
1.5.3 Základné vlastnosti asynchrónného prenosu.....	18
1.6 GPIB IEEE-488	19
1.6.1 Adresácia	19
1.6.2 GPIB signály	20
1.6.3 Príklady použitia niektorých príkazov	23
1.7 Impedancia	24
1.7.1 Meranie impedancie.....	24
2 Popis experimentálneho pracoviska	25
2.1 Popis nameraných závislostí	26
2.2 Regulácia teploty	29
2.3 Zloženie pracoviska.....	32
2.3.1 Riadiaca jednotka	33

2.3.2	Zdroj elektrického prúdu a napätia.....	33
2.3.3	Teplomer	34
2.3.4	Výveva	37
2.3.5	Kryostat	37
2.3.6	Komora s meranou vzorkou.....	38
2.3.7	Zosilovač AM 22.....	40
2.3.8	Handyscope HS4	41
2.3.9	Zosilovač 3S SEDLAK PA15	42
2.3.10	HP 4285A	43
3	Softwarové vybavenie	44
4	Výsledné charakteristiky	44
5	Predpokladaný ďalší vývoj	47
6	Záver.....	48
7	Referencie	49
8	Zoznam obrázkov	52
9	Zoznam tabuliek.....	54
10	Zoznam skratiek a veličín	55

Úvod

Predložená bakalárska práca popisuje prácu na kryostate jednoduchej konštrukcie. Mechanická časť tohoto kryostatu bola konštruovaná pred viac ako 20 rokmi na Ústave fyziky Stavebnej fakulty VUT v Brne.

V súčasnej dobe je umiestnený na Ústave fyziky Fakulty elektrotechniky a komunikačných technológií. Cieľom bakalárskej práce bolo tento kryostat uviesť do chodu a overiť jeho schopnosti. Nízko teplotné merania majú veľký význam z hľadiska štúdia fyzikálnych javov v analyzovanom materiále alebo súčiastke.

Popisovaný kryostat by mal v budúcnosti slúžiť k meraniu teplotných závislostí šumových a elektrických parametrov vzoriek PZT keramiky a QCM senzorov.

V súčasnej dobe sa na UFYZ študujú vzorky QCM senzorov a vzorky PZT keramiky slúžiace na výrobu snímačov akustickej emisie. Pri vzorkách PZT keramiky sa sledujú závislosti výkonovej spektrálnej hustoty na teplote pre rozličné geometrické usporiadanie a pre rozdielne úrovne elektrického poľa, ktorými boli vzorky polarizované. Nameraná data sa analyzujú s cieľom optimalizovať pomer signálu od šumu výsledných snímačov akustickej emisie.

U QCM senzorov sa na UFYZ sleduje dlhodobá stabilita rezonančnej frekvencie. Pre správne pochopenie fyzikálnych javov prebiehajúcich v štruktúre QCM je nutné poznať vliv teploty na meranej závislosti. Teplotou je ovplyvnený kryštálový rezonátor aj aktívna vrstva sorbentu.

Prvý krok bolo zoznámenie sa s princípom fungovania uvedeného kryostatu. Druhý krok bolo jeho sprevádzkovanie (jeho kompletizácia a zapojenie všetkých potrebných súčiastok do funkčného celku). Po uvedení do chodu som overil jeho súčasné možnosti. Záverom mojej bakalárskej práce sú uvedené namerané charakteristiky výkonovej spektrálnej hustoty šumového napätia S_u a fázového posunu frekvencie v závislosti na teplote.

1 Teoretický úvod

V tejto časti práce sa budem venovať vysvetleniu pojmov ako napríklad: čo je to šum, jeho vlastnostiam a konkrétne vysvetleniu tepelného šumu, ktorý je dôležitý v mojej práci. Ďalej sa budem zaoberať problematikou PZT, vysvetlením piezoelektrického javu a tak isto tým, čo je to piezoelektrický snímač. V závere sa nachádza popis QCM senzorov.

1.1 Šum

Fyzikálne procesy prebiehajúce v prírode môžeme obecné klasifikovať na deterministické a náhodné (stochastické). Pre deterministické procesy platí, že v každom čase môžeme určiť hodnotu skúmanej veličiny. Náhodné procesy naopak nemôžeme popísať presnými matematickými modelmi. Z tohto dôvodu môžeme pri nich vysloviť, že sa určitá hodnota vyskytuje, len pri určitej pravdepodobnosti. [1]

V súvislosti s náhodnými procesmi v elektronike sa používa termín šum.

Základne typy šumu:

1. Tepelný šum
2. Výstrelový šum
3. Rozdeľovací šum
4. Generačne - rekombinačný šum
5. $1/f$ šum
6. Lavínový šum
7. RTS šum
8. Šum mikrop plazmy

Pri analýze náhodného procesu je potrebné určitým spôsobom získať experimentálne dáta. Skutočný náhodný proces je nutné vhodným spôsobom transformovať. K tomu sa obvykle využívajú lineárne systémy.

Ak existujú pre vstupné funkcie lineárneho systému $x(t)$ a aj pre výstupné funkcie lineárneho systému $y(t)$ Fourierové obrazy $X(f)$ a $Y(f)$, tak jeho výstupná funkcia $Y(f)$ je daná vzťahom

$$Y(f) = H(f) \cdot X(f) \quad (1.1)$$

Ak má vstupná funkcia spektrálnu hustotu $S_x(f)$ a výstupnú $S_y(f)$, potom pre výstup platí vzťah

$$S_y(f) = S_x(f)|H(f)|^2. \quad (1.2)$$

1.1.1 Tepelný šum

John Bertrand "Bert" Johnson (02. 10. 1887 - 27. 11. 1970) [2], elektrotechnik a fyzik narodený vo Švédsku neďaleko Göteborgu, emigroval v r. 1904 do Spojených štátov a začal pracovať na Univerzite v Yale. V roku 1928 v Bell Labs prvý krát zmeral tento typ šumu a na základe jeho popisu vysvetlil jeho závery Harry Nyquist.

Elektronický šum je vytvorený v dôsledku tepelnej aktivácie nosičov náboja v elektrickom vodiči v rovnováhe, čo sa deje bez ohľadu na akékoľvek použité napätie. [3]

Vo vodiči s odporom R , ktorý je v termodynamickej rovnováhe s okolím, vzniká v dôsledku náhodného tepelného pohybu nosičov náboja tepelný šum, ktorý sa na svorkách vodiča prejavuje šumovým napätím o výkonovej spektrálnej hustote.

$$S_u(f) = 4k_B T R \frac{hf}{k_B T} \left(e^{\frac{hf}{k_B T}} - 1 \right)^{-1} \quad (1.3)$$

k_BBoltzmannova konštanta [$1,38 \cdot 10^{-23}$ J / K]

hPlanckova konštanta [$6,626 \cdot 10^{-34}$ J.s]

Ttermodynamická teplota

V oblastiach z nižšou frekvenciou, kedy platí $hf \ll k_B T$ získame po rozvoji exponenciálnu funkciu v podobe mocnínovej radu vzťahov

$$S_u(f) = 4k_B T R \quad (1.4)$$

Obdobne výkonová spektrálna hustota prúdu je

$$S_i(f) = 4k_B T G \quad (1.5)$$

$$\text{kde} \quad G = \frac{1}{R} \quad (1.6)$$

Tepelný šum je tzv. biely (jeho výkon je rovnomerne rozložený medzi všetky frekvencie od 0 do ∞ Hz). [4]

1.2 Piezoelektrický jav

Piezoelektrický jav bol objavený bratmi Pierrom a Jacquesom Curieovcami v r. 1880 pri pokusoch s osovo nerovnomernými kryštálmi tzv. Seignettovej soli. [5]

Piezoelektrický jav spočíva v schopnosti niektorých kryštalických dielektrík, ktoré mechanickou deformáciou (namáhaním tlakom, ťahom, ohybom alebo krútením) elektricky polarizujú, čím na ich povrchu vznikne elektrický náboj.

Tento jav – tzv. priamy piezoelektrický jav, sprevádzaný vznikom piezoelektriny, sa vyskytuje len v kryštáloch s anizotropnými vlastnosťami, ktoré nemajú stred súmernosti (sú stredovo nesúmerné, acentrické). [6]

Takéto látky sa nazývajú piezoelektriky. Používajú sa napríklad na výrobu piezoelektrických meničov ako sú:

1. kremeň
2. turmalín
3. boritokremičitan
4. Al-Mg-Ca a početné keramické látky.

Elektrostrickciou sa nazýva nepriamy piezoelektrický jav – t.j. schopnosť deformácie (zmeny rozmerov alebo tvaru kryštálu) pôsobením vonkajšieho elektrického poľa E , pričom táto zmena rozmerov je priamo úmerná intenzite elektrického poľa.

1.3 Piezoelektrický snímač

Za posledných 50 rokov sa piezoelektrické senzory ukázali byť univerzálnymi nástrojmi na meranie rôznych procesov. Dnes sa používajú na stanovenie tlaku, zrýchlenia, napätia, taktiež sú účinné pri zabezpečovaní kvality riadenia procesov a vývoju v mnohých rôznych odvetviach.

Dve hlavné skupiny materiálov, ktoré sa používajú na piezoelektrické snímače: piezoelektrické keramiky a monokryštalové materiály. Keramické materiály (napr. PZT keramika) majú piezoelektrické konštanty (citlivosť), ktoré sú zhruba o dva rády vyššie ako u monokryštalických materiálov. Ďalšia výhoda PZT keramiky je jeho lacná výroba.

Bohužiaľ, ich vysoká citlivosť je vždy v kombinácii s nedostatkom dlhodobej stability. Preto sú piezoelektrické keramiky veľmi často používané všade tam, kde požiadavky na presnosť merania nie sú príliš vysoké. Snímače vyrobené z monokryštalických materiálov (kremeň, turmalín a gálium fosfát) sú menej citlivé ale majú oveľa vyššiu dlhodobú stabilitu (pri opatrnej manipulácii). Navyše, niektoré z nich vykazujú vynikajúce teplotné správanie (najmä gálium fosfátu a turmalín). [7]

1.4 QCM

Z anglického Quartz Crystal Microbalance (quartz=kremeň crystal=kryštál microbalance=mikrováha). Je možné stretnúť sa s pomenovaním QMB, pre "Quartz MicroBalance". V elektrochémii, QCM je často nazývaný EQCM pre "Elektrochemické QCM".

Základom QCM je prevrátený piezoelektrický jav. Kremenné mikrováhy sa skladajú z dvoch kovových elektród naparených na výbrusu kremenného kryštálu (SiO_2) a vrstvy sorbentu. Elektródy môžu byť vyrobené z rôznych druhov kovu, najčastejšie sa používa zlato, pretože neoxiduje na vzduchu.

Pri výrobe elektródy sa najskôr na kremík naniesie vrstva chrómu. Až následne sa na chróm naniesie vrstva zlata. Nanosenie chrómu medzi vrstvy kremíka a zlata sa robí z dôvodu zvýšenia celkovej priľnavosti. Pretože, zlato samo o sebe má zlú priľnavosť na kremík ale dobrú na chróm. Naopak chróm má dobrú priľnavosť ako na zlato tak aj na kremík. [8]

Privedieme na elektródy striedavé elektrické pole, ktoré vyvolá v kryštály mechanické kmitanie a podľa typu a tvaru výbrusu má toto kmitanie vlastnú rezonančnú frekvenciu, ktorá je veľmi stabilná a citlivo reaguje na zmeny hmotnosti materiálu na elektrodách.

Pro kremenné mikrováhy sa štandardne používa tzv. AT rez (možno využiť aj BT), ktorý má sklon asi 35° meraný od osy Z.

Sauerbrey-ová rovnica (1.7) vypovedá o zmene veľkosti rezonančnej frekvencie v závislosti na zmene hmotnosti QCM. Pričom prírastok hmotnosť QCM by mal byť rovnomerne rozložený po celej ploche vrstvy elektródy. [9]

$$\Delta f = \frac{-2f_0^2 \Delta m}{A \sqrt{\rho_q \mu_q}} \quad (1.7)$$

Δf	.....	zmena frekvencie [Hz]
f_0	.....	frekvencia oscilátoru [Hz]
Δm	.....	zmena hmotnosti na povrchu kryštálu [g]
A	.....	plocha kryštálovej vrstvy [cm^2];
ρ_q	.....	hustota kremíkovej dosky [2.648 g.cm^3]
μ_q	.....	modul pružnosti dosky v šmyku [$2.947 \times 10^{11} \text{ g.cm}^{-2}$]

1.4.1 Využitie QCM

QCM senzory reagujú na zmenu svojej hmotnosti zmenou svojej vlastnej rezonančnej frekvencie. Ku zmene hmotnosti dochádza na elektródach, ktoré sú opatrené sorbentom. Tieto senzory sú schopné detekovať hmotnostné zmeny odpovedajúce hmotnosti jednej atomárnej vrstvy.

Vysoká citlivosť a monitorovanie v reálnom čase hromadných zmien na senzore kryštálu, robí QCM veľmi atraktívnou technikou pre širokú škálu žiadostí. [10]

Tu je pár príkladov využitia QCM: [11]

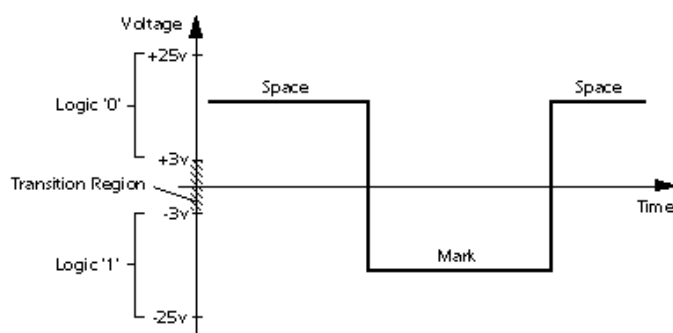
- 1 elektrochémia, interfázové procesy medzi plochami elektród
- 2 batérie
 - a) primárne a sekundárne články
 - b) procesy vybíjania elektród
- 3 biotechnológia
 - a) interakcia DNA a RNA
 - b) špeciálne rozpoznávanie proteínov
 - c) detekcia vírusov, baktérií, buniek cicavcov
 - d) odolnosť buniek, proteínov
- 4 senzory
 - a) tukové membrány
 - b) plynové senzory
 - c) imunosenzory
 - d) biosenzory
- 5 tenké vrstvy
 - a) polyelektrolytická absorpcia
 - b) absorbované monovrstvy
 - c) dvoj – vrstvy
- 6 povrchové aktívne látky
- 7 letecký a vesmírny priemysel
 - a) meranie rádioaktivity
 - b) detekcia mikrometeoritov
- 8 vývoj liekov
 - a) nanášanie a leptanie kvapalinou

1.5 RS 232

RS-232 je sériové rozhranie, ktoré je určené na prenos informácií do vzdialenosti 20 m. Napäťové úrovne (+15 až -15V) sú na to, aby nedochádzalo k rušeniu signálu okolitými vplyvmi k čomu mohlo dochádzať pri úrovniach 0V až 5V.

RS 232 používa dve napäťové úrovne. Logickú 1 a 0. Logická 1 je niekedy označovaná ako marking state alebo aj kľudový stav, Logická 0 sa nazýva space state.

Logická 1 je indikovaná zápornou úrovňou, zatiaľ čo logická 0 je prenášaná kladnou úrovňou napätia na výstupných vodičoch, vid obr.1.1 a povolené napäťové úrovne sú uvedené v tab.1.1.



Obr.1.1: Prenášané napäťové úrovne signálov

Tab.1.1: Prenášané napäťové úrovne signálov

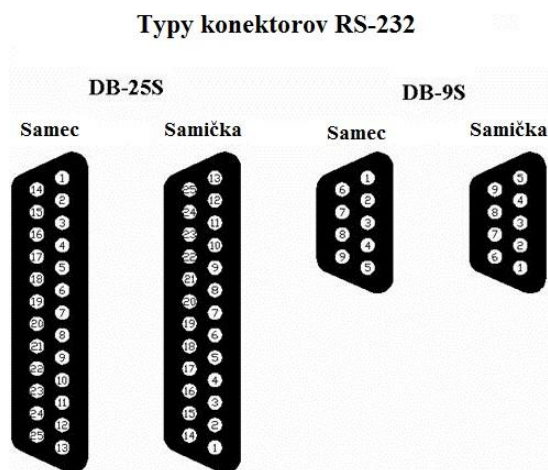
Dátové signály		
Úroveň	Vysielač	Prijímač
Log. L	od +5 V do +15 V	od +3 V do + 25 V
Log. H	od -5 V do -15 V	od -3 V do - 25 V
Nedefinované	Od -3 V do + 3 V	

Podľa štandardu RS-232 sú definované vzájomne sériovo komunikujúce zariadenia Data Terminal Equipment (DTE) v našom prípade počítač a Data Communications Equipment (DCE) je teplomer TM-2000 alebo zdroj MANSON SDP 2603.

Všetky DTE-DCE kable sú priame a vývody sú pripojené 1:1. DTE-DTE a DCE-DCE kable patria medzi krížené.

1. **DTE - DCE sa nazýva 'Straight Cable' (Priamy)**
2. **DTE - DTE sa nazýva 'Null-Modem'**
3. **DCE - DCE sa nazýva 'Tail Circuit'**

Pri starých typoch počítača sa cez sériový port pripájala myš, prípadne modem. Sériový port má 9-pinové a 25-pinové vyhotovenie, vid obr.1.2. Pre stroje na XT je typickejší 25-pinový konektor. Sériové porty sú na PC ako samec s kolíkmi. 25-pinový konektor je opačný k paralelnému portu má kolíky zo strany PC, preto si ich nemožno zameniť. Pre počítačové skrinky AT sa častejšie používa 9-pinový aj 25-pinový konektor súčasne a pri ATX sú príznačnejšie dva 9-pinové konektory. V súčasnosti sa cez sériový port pripájajú zariadenia ako modem, ploter, snímač čiarových kódov a pod. Základná charakteristika sériového portu sa nachádza v tab.1.2 a zapojenie jednotlivých pinov v tab.1.3 . [12 - 13]



Obr.1.2 : Znáozornenie typu konektorov RS-232

Tab.1.2: Charakterizovanie RS-232 konektoru.

Označenie portu	Najčastejšie COM1,COM2
Prenosová rýchlosť	9600 (baud)
Počet bitov	napr .8
Parita	`N` - žiadna parita
	`O` - nepárna
	`E` - párna parita
	`M` - paritný bit – vždy hodnota 1
	`S` - paritný bit – vždy hodnota 0
Stop bity	0=1 ; 1=1,5 ; 2=2
Hardwarové riadenie toku	zapnuté / vypnuté
Softwarové riadenie toku	zapnuté / vypnuté

Tab. 1.3: Zapojenie pinov pre 9 a 25 pinové konektory

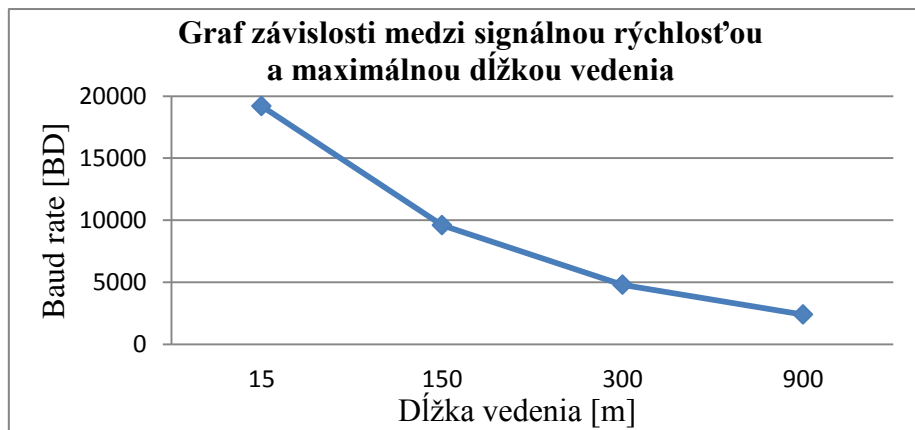
Vývod pre 9 pin konektor	Vývod pre 25 pin konektor	Vstup / Výstup	Označenie	Funkcia
3	2	Výstup	TxD (Transmitt Data)	Vyslané dáta
2	3	Vstup	RxD (Recieve Data)	Prijímané dáta
7	4	Výstup	RTS (Request To Send)	Požiadavka na vysielanie
8	5	Vstup	CTS (Clear To Send)	Pohotovosť na vysielanie
6	6	Vstup	DSR (Data Set Ready)	Pohotovosť DCE
5	7	-	GND (Ground)	Signálová zem
1	8	Vstup	DCD (Data Carrier Detector)	Detektor prijatého signálu
4	20	Výstup	DTR (Data Terminal Ready)	Pohotovosť DTE
9	22	Vstup	RI (Ring Indicator)	Indikátor volania

1.5.1 Baud

Jednotka signálnej rýchlosti (taktiež označujúce ako počet bitov za sekundu) predstavujúca počet zmien stavu prenosového média za 1 sekundu v modulovanom signále. V tab.1.4 je možné pozorovať závislosť medzi signálnou rýchlosťou a maximálnou dĺžkou vedenia a z nej plynúci graf, vid obr.1.3.

Tab.1.4 :Závislosť signálnej rýchlosti od max dĺžke vedenia

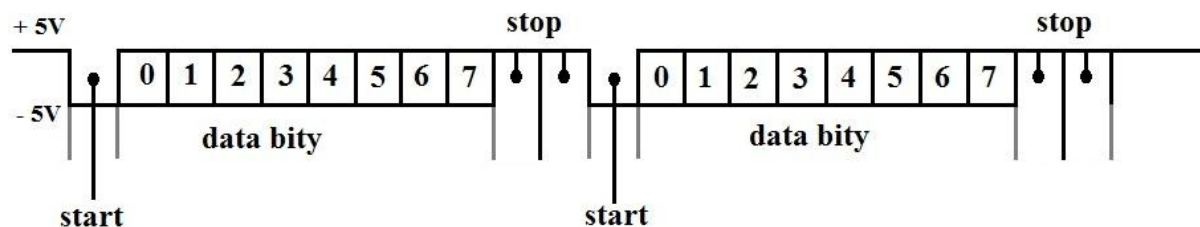
Baud rate [Bd]	Maximálna dĺžka vedenia [m]
19200	15
9600	150
4800	300
2400	900



Obr.1.3:Graf závislosti medzi signálnou rýchlosťou a maximálnou dĺžkou vedenia

1.5.2 Asynchrónny prenos dát

Asynchrónny prenos dát prenáša dáta v určitých sekvenciách, vid obr.1.4. Dáta sú prenášané presne danou rýchlosťou a začínajúce podľa štartovacej sekvencie, na ktorú sa synchronizujú všetky prijímacie zariadenia. Všetky strany obsahujú vlastný presný oscilátor, vďaka ktorému odrátajú dáta v presne definovaných intervaloch. Po ukončení sekvencie je ďalší príjem opäť synchronizovaný podľa štartovacej sekvencie.



Obr.1.4: Znáznornenie prenosu dát cez rozhranie RS 232

1.5.3 Základné vlastnosti asynchrónného prenosu

- Nevýhodné pre veľké objemy dát, ale vhodné pre dlhé vedenia, na ktorých by synchronizačný vodič spôsobil nezanedbateľné finančné náklady.
- Možno použiť pre komunikáciu medzi mnohými zariadeniami.
- Nutné definovať jednoznačne prenosovú rýchlosť, zmenu rýchlosti je potrebné ošetriť softwarovou sekvenciou, ktorá prinúti počítač zmeniť hardwarovo prenosovú rýchlosť.
- Celkom zložitá a drahá elektronika, nutné použiť kryštálové oscilátory.
- Až o 20% menšia prenosová rýchlosť užitočných dát pri rovnakej rýchlosti komunikácie, vzhľadom na potrebu štartovacích a paritných bitov.

Sériový port patrí medzi tzv. legacy porty (zastaralé) a je nahradený rýchlejšim USB.

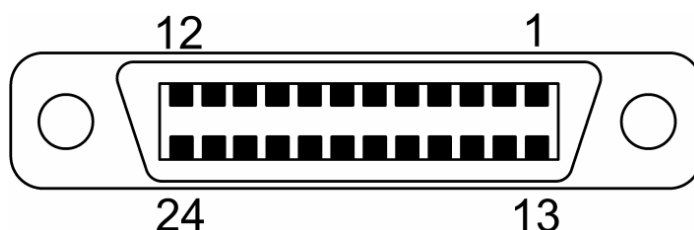
1.6 GPIB IEEE-488

Štandardné rozhranie pre prepojenie meracích prístrojov s počítačom pre účely automatizácie merania. Pôvodne vyvinutá v roku 1965 firmou Hewlett - Packard pre počítačom riadené meracie systémy nazvaná ako Hewlett Packard Interface Bus (HP-IB). Dnes je toto rozhranie štandardizované pod názvom IEEE 488.2. Informácie som čerpal z [14 - 18].

1.6.1 Adresácia

Pripojené meracie zariadenia sa môžu pripájať do hviezdy alebo sériovo (sekvenčne), pričom je to obmedzené na maximálne 15 aktívnych zariadení. Pričom prenosová rýchlosť je 1 MB/s. Maximálna dĺžka kábla je 20m a max 4m pre samotný prístroj. Každé zariadenie má prinajmenšom jednu adresu poslucháča a jednu prijímača. Adresy zariadenia sú posielané aktívnym kontrolórom v adresovanom móde (ATN=1 a EOI = 0). Rozlišuje, kto je hovoriaci (Talk address) a kto je poslucháč (Listen address). Adresa na zariadení je väčšinou prednastavená výrobcom. Túto hodnotu je však možné meniť a to pomocou prepínača, umiestneného na panely príslušného prístroja. Adresa zariadenia môže byť z rozsahu 0-30 a je určená 5 bitmi. Bity s číslom 6 a 7 (DIO6-DIO7) slúžia na určenie, či zariadenie pracuje ako vysielateľ, alebo prijímač. 2 adresné kódy, zodpovedajúce adrese 31, sa používajú na oznámenie všetkým zariadeniam aby NEVYSIELALI (UNTALK) ("–") alebo NEPOČÚVALI (UNLISTEN) ("?“). Preto je ilegálne adresu 31 používať a rozsah adries je spolu 31 od 0 po 30. Adresa 21 je zvyčajne rezervovaná pre rozhranie počítača ako Vysielateľ/Poslucháč (neodporúča sa ju používať ako nástrojovú adresu). Adresa poslucháča a adresa prijímača majú nasledujúci tvar: poslucháč - X01LLLLL a vysielateľ – X10LLLLL.

Dáta sú vysielané v 1B súčasne po zbernici tvorenej normalizovaným káblom s 24 kolíkovým konektorom, vid obr.1.5 a popis jednotlivých pinov je v tab.1.5. Zbernica je tvorená 8-mymi dátovými vodičmi (DIO), 3-mi signálmi pre korešpondenčné riadenie prenosu (DAV, NRFD, NDAC) a 5 signálmi (IFC, ATN, SRQ, REN, EOI), ktoré riadia tok informácií po zbernici. GPIB používa zápornú logickú konvenciu TTL s aktívnym stavom logickej 1 pri 0V a pasívnym stavom logickej 0 pri +5V.



Obr.1.5: 24 pinový konektor GPIB

1.6.2 GPIB signály

GPIB rozhranie pozostáva zo 16 signálnych liniek a z 8 ground-return alebo shield-drain liniek. 16 signálnych liniek je zoskupených do ôsmich dátových liniek pre nadviazanie spojenia a piatich liniek pre riadenie rozhrania. Popis jednotlivých pinov je v tab.1.5.

Tab.1.5: Popis GPIB pinov

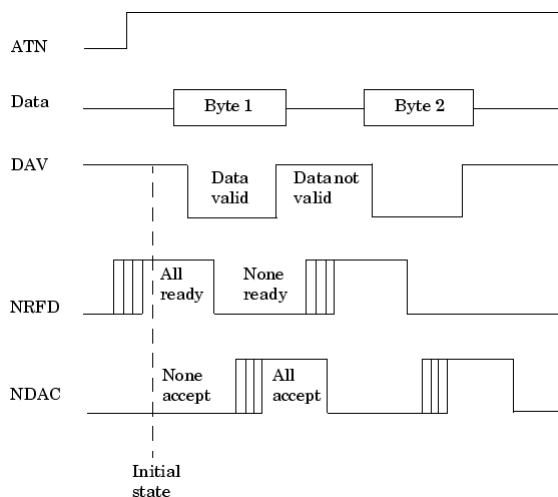
Pin č.	Dátová linka	Hanshaková linka	Riadiaca linka	Uzemnenie
1	DIO1			
2	DIO2			
3	DIO3			
4	DIO4			
5			REN	
6			EOI	
7		DAV		
8		NRFD		
9		NDAC		
10			IFC	
11			SRQ	
12			ATN	
13				GND
14	DIO5			
15	DIO6			
16	DIO7			
17	DIO8			
18				GND
19				GND
20				GND
21				GND
22				GND
23				GND
24				GND

a) Dátové linky

8 dátových liniek, DIO1-DIO8 (Data Input Output), vid tab.1.5, nesie obidve, dátové aj príkazové správy. Stav Attention (ATN) linky určuje, či informácia je dátová alebo príkazová. Všetky príkazy a väčšina dát používa 7-bitovú množinu ASCII kódov alebo ISO kódov, v ktorých 8 bit DIO8 sa buď nepoužíva, alebo je použitý pre paritu.

b) Nadviazanie spojenia – Handshake

3 linky asynchrónne kontrolujú prenos bajtov správy medzi zariadeniami, vid tab.1.5. Tento proces sa nazýva trojvodičové zabezpečenie nadviazania spojenia (3-wire interlocked handshake). Zaručuje, že bajty správy na dátových linkách sú posielané a prijímané bez prenosovej chyby, vid obr.1.6.



Obr.1.6: Znázornenie prenosu dát cez rozhranie GPIB

NRFD (Not Ready For Data)

Indikuje, kedy je zariadenie pripravené, respektíve nepripravené prijať bajty správy. Linka je riadená všetkými zariadeniami, keď prijíma príkazy. Linka je riadená poslucháčmi, keď prijíma dátové správy a hovorcami, keď umožňuje HS 488 protokol.

NDAC (Not Data Accepted)

Indikuje, kedy zariadenie akceptovalo, resp. neakceptovalo bajty správy. Linka je riadená všetkými zariadeniami, keď prijíma príkazy a poslucháčmi, keď prijíma dátové správy.

DAV (Data Valid)

Hovorí, kedy sú signály na dátových linkách trvalé (platné) a môžu byť bezpečne akceptovateľné zariadeniami. Radič riadi DAV, keď posiela príkazy a hovorca riadi DAV, keď posiela dátové správy.

c) Signály pre riadenie rozhrania

ATN (Attention)

Pozornosť - signál určuje význam slabiky DIO 1-8, vid tab.1.5. Radič nastaví ATN na true, keď používa stykové správy na poslanie príkazov (napr. príkaz alebo adresa jednotky) a nastaví ATN na false, keď hovorca môže poslať prístrojové správy (dáta). Signál umožňuje radiču rozlišovať medzi dátovými prenosmi a riadiacimi správami.

IFC (Interface Clear)

Nulovanie stykových obvodov: radič riadi IFC signál, aby inicioval zbernicu. Poskytuje funkciu reset.

REN (Remote Enable)

Prepnutie na diaľkové ovládanie: radič riadi REN signál, ktorý je použitý na umiestnenie riadenia v programovom móde, vzdialenom alebo lokálnom. Znemožňuje operácie front-panel zariadenia. Zariadenie je kontrolované radičom.

SRQ (Service Request)

Na notifikáciu radiča v prípade, že zariadenie potrebuje obsluhu sa používa žiadosť o obsluhu. Akékoľvek zariadenie môže riadiť signál SRQ, aby asynchrónna žiadosť bola obslúžená z radiča.

EOI (End or Identify)

Koniec alebo identifikácia: V zásade sa používa ako indikátor prerušenia pri dátovom prenose. EOI signál má dva účely : hovorca používa EOI signál, aby označil koniec reťazca správy a radič používa EOI signál, aby oznámil zariadeniam, aby určili svoju odpoveď (reakciu) v paralelnej výzve.

GBIP príkazy pre agilent 4285A môžeme rozdeliť na dva typy, vid tab.1.6.

Spoločné GPIB príkazy - definované v IEEE std. 488.2-1987 spoločné pre všetky GPIB zariadenia

TMLS príkazy -slúžiace na ovládanie všetkých 4285 funkcií

Tab.1.6 :Príkazy pre rozhranie GPIB

TMLS príkazy	DISPlay	TRIGer	APERture	MEMmory
	FREQuency	OUTPut	INITiate	CORRextion
	VOLTage	BIAS	FETCh?	COMParator
	CURRent	FUNCCtion	ABORt	Mass MEMory
	AMPLitude	LIST	FORMat	SYSTem
Spoločné príkazy	*CLS	*SRE	*DPC?	*TST?
	*ESE	*STB	*WAI?	*TGR
	*ESR	*IDN?	*RST	*LRN

1.6.3 Príklady použitia niektorých príkazov

```

PS = gpib('agilent',7,6) ;
fopen(PS);
fprintf(PS, '*RST\n') ;                               %resetovanie prístroja
fprintf(PS, 'INST:SEL OUTP1\n') ;                       %nastavenie výstupného kanálu
fprintf(PS, 'VOLT:RANG P35V\n') ;                       %rozsah nastavovaného napätia 35 V
fprintf(PS, 'VOLT 35.0\n') ;                             %nastavenie napätia na hodnotu 35 V
fprintf(PS, 'CURR 0.0\n') ;                             %nastavenie prúdu na hodnotu 0 A
fprintf(PS, 'OUTP:STATE 1\n') ;                         %zapojenie zdroja do obvodu

DAU = visa('agilent','USB0::2391::8199::MY49001292::0::INSTR') ;
fopen(DAU);
fprintf(DAU, '*RST\n') ;                               %resetovanie prístroja
fprintf(DAU, 'CONF:TEMP TC,T,(@113)\n') ;               %nastavenie kanálu 113 ako vstupu pre
termočlánok typu T
fprintf(DAU, 'ROUT:MON (@113)\n') ;                     %monitorovanie kanálu 113
fprintf(DAU, 'ROUT:MON:STAT ON\n') ;                   %spustenie monitorovania

```


1.7 Impedancia

Impedancia je dôležitým parametrom, ktorý slúži na charakterizovanie elektrických obvodov, súčiastok a materiálov použitých pri výrobe komponentov. Je to zjavný odpor elektrickej súčiastky a fázového posunu napätia oproti prúdu pri prechode harmonického striedavého elektrického prúdu.

Značka impedancie je Z a jednotka 1 ohm $[\Omega]$. Zapisuje sa pomocou komplexných čísiel.

$$Z = R + jX \quad (1.8)$$

Kde R je el. odpor, X je reaktancia prvku a j je komplexná jednotka. Impedancia sa dá počítať aj v polárnej podobe, kde $|Z|$ je veľkosť a φ je fáza.

$$Z = |Z| \cdot e^{j\varphi} \quad (1.9)$$

1.7.1 Meranie impedancie

Impedancia je komplexná veličina teda obsahuje reálnu a imaginárnu zložku. Veľa moderných meracích prístrojov meria impedanciu reálnej a imaginárnej časti impedančných vektorov a potom ich konvertuje do požadovaných parametrov.

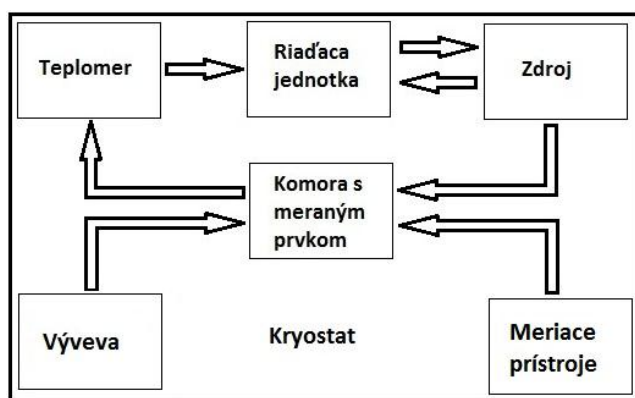
A to $|Z|$, θ , $|Y|$, R , X , G , B .

Pri meraní impedancie pomocou automatických meracích prístrojoch stačí pripojiť k meriacému zariadeniu neznámu zložku, obvod alebo materiál a výsledok sa zobrazí na displeji. Niekedy však prístroj zobrazí neočakávané výsledné hodnoty (príliš vysoké alebo príliš nízke). Jednou z možných príčin tohto problému je nesprávna meracia technika, alebo fyzické správanie neznámeho zariadenia.

Existuje veľa metód merania impedancie, z ktorých každá má svoje výhody a nevýhody. Pri výbere je vždy potrebné zvážiť faktory ako frekvencia, rozsah merania či náročnosť ovládania. V mojom prípade som použil pre meranie impedancie LCR meter od firmy HP 4285A. Ktorý pri meraní impedancií na vzorke si najskôr nastaví hodnotu amplitúdy napätia (U = konstanta počas celej doby merania) na určitej frekvencii a meria hodnotu amplitúdy prúdu. Následne z hodnôt prúdu a napätia vypočíta absolútnu zložku impedancie. Tieto merania sa stále dookola opakujú, pričom na LCR metri volíme stále iné hodnoty frekvencie. Okrem absolútnej časti impedancie LCR meter porovnáva fázový posun medzi prúdom a napätím na určitej frekvencii. Pokiaľ LCR meter pozná hodnoty absolútnej zložky impedancie a fázového posunu pri určitej frekvencii medzi prúdom a napätím, je schopný dopočítať parametre rôznych zložiek náhradného obvodu (R_S - C_S , R_P - C_P ...), ktoré budú mať rovnakú hodnotu impedancie ako meraná vzorka [18].

2 Popis experimentálneho pracoviska

Vytvoril som experimentálne pracovisko pre meranie teplotných závislostí. Jeho bloková schéma je na obr.2.1 a jeho fyzická podoba na obr.2.2. Daná meraná vzorka je vložená do komory. Komora tvorí viditeľnú časť kryostatu. Druhá časť je ponorená v tekutom dusíku, ktorý je uložený v devárke a slúži na schladenie celej sústavy. Komora je pripojená k výveve za pomoci ktorej je možné vysať z komory vzduch a tým vytvoriť vákuum. Teplotu sústavy budem merať pomocou teplomeru, ktorý bude odosielať dáta do riadiacej jednotky a tá v prípade veľkého poklesu teploty vyšle signál do zdroja na zvýšenie prúdu s pomocou ktorého môžem zvýšiť teplotu sústavy.



Obr.2.1: Blokové schéma



Obr.2.2: Fyzická podoba

Po teoretickom navrhnutí sústavy som začal s jej praktickým prevedením . Na začiatku som musel prispôbiť komoru podľa typov meraných vzoriek.

Po úspešnej úprave komory som začal pripájať potrebné zariadenia pre správne fungovanie sústavy. Ako prvé som sa rozhodol pripojiť riadiaci počítač so zdrojom .

Mnou zvolený zdroj MANSO SP2603 sa pripája k počítaču pomocou sériového rozhrania RS 232. Pomocou softwaru priloženého k zdroju, som bol schopný vytvoriť komunikáciu s počítačom. Na základe znalosti o protokole datovej komunikácií na zdroji, som napísal program v prostredí MATLAB. Tento program mi dovoľuje ovládať zdroj aj na diaľku pomocou počítača.

Po úspešnom prepojení zdroja s počítačom, rozhodol som sa pripojiť k sústave teplomer. Ako teplomer som si zvolil teplomer TM-2000. Ten sa štandardne pripája k počítaču cez sériové rozhranie RS 232 .

V našom prípade toto rozhranie už bolo obsadené zdrojom . Preto som využili redukciu RS 232 – USB . Na meranie teploty sústavy využívam termočlánok typu T. Teplomer

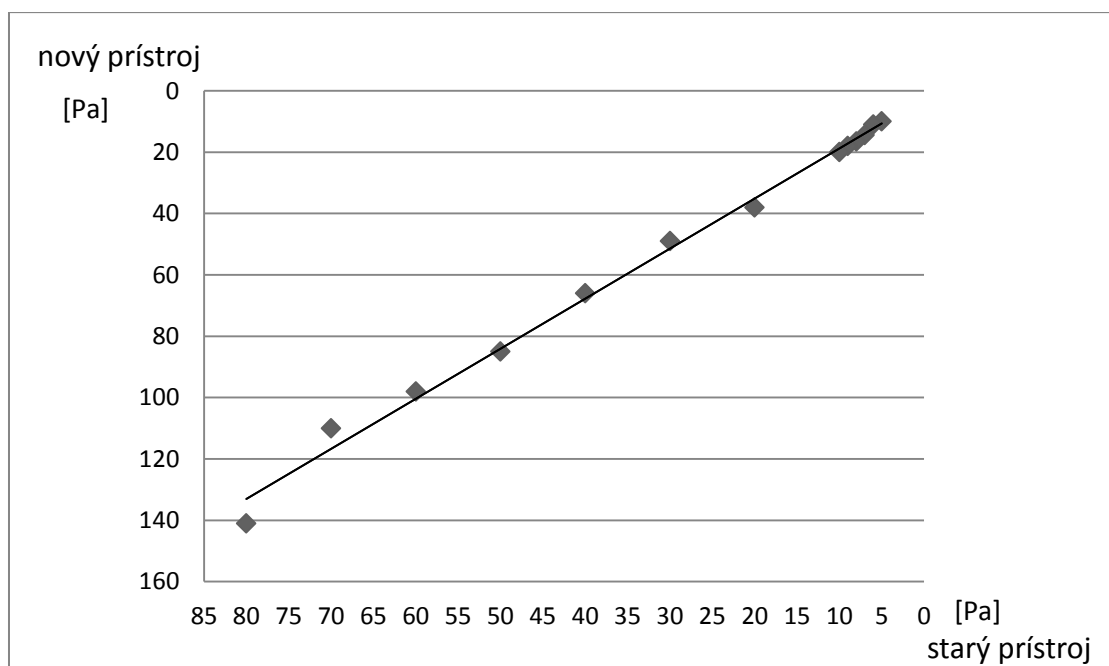
v pravidelných intervaloch vysiela 16 B dát. Zo znalosti získaných z datasheetu som bol schopný tieto dáta dešifrovať. Vytvoril som program opäť v prostredí MATLAB. Tento program je schopný tieto dáta zachytávať a dešifrovať a v neposlednej rade zobrazovať do grafov.

2.1 Popis nameraných závislostí

Po úspešnom prepojení riadiaceho počítača s teplomerom a zdrojom som sa presunul k zvyšku sústavy. Prepojil som komoru (zatiaľ bez vzorky) s vývevou bez devárky a otestoval som funkčnosť vytvorenia vákua. To sa mi podarilo. Avšak používam starý prístroj na meranie vákua DS 102 a bolo potrebné otestovať jeho presnosť. Preto som pripojil k sústave novší prístroj VARIAN MULTI-GAUGE CONTROLLER a výsledky som porovnal. Namerané hodnoty sú v tab. 2.1 a z nej plynúci graf, vid obr.2.3.

Tab.2.1: Porovnanie starého a nového prístroja na meranie vákua

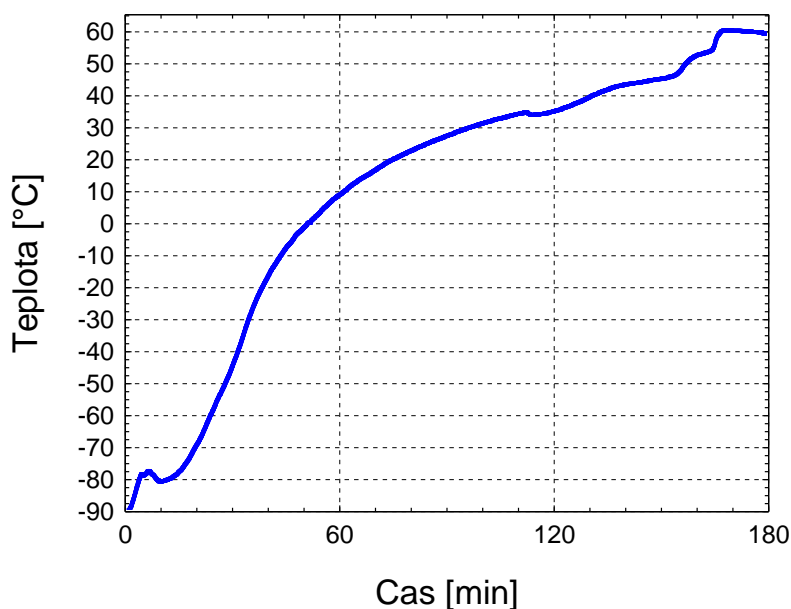
Hodnoty namerané v Pa													
Starý prístroj	5	6	7	8	9	10	20	30	40	50	60	70	80
Nový prístroj	10	11	14,5	16,5	18	20	38	49	66	85	98	110	141



Obr.2.3 : Graf porovnávajúci hodnoty vákua pri rozličných prístrojov

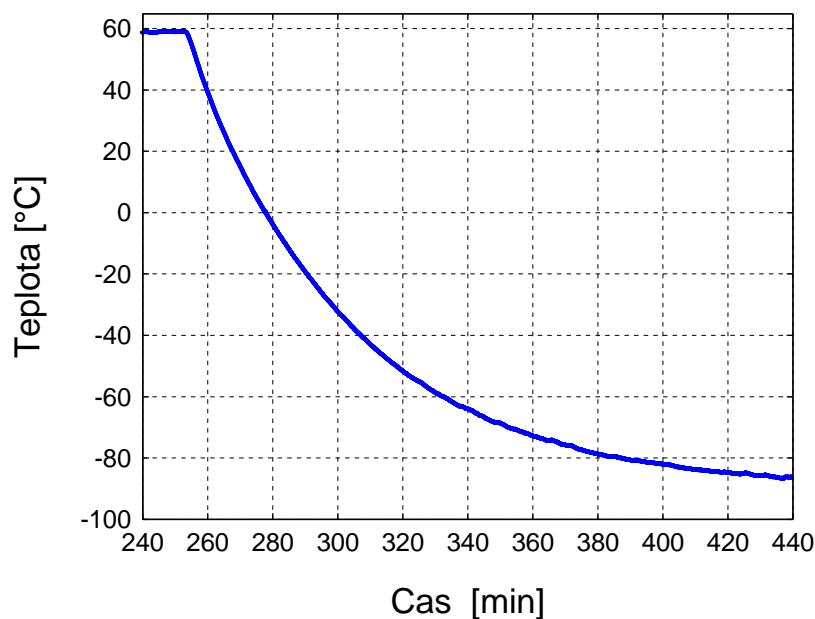
Po tomto meraní som vložil do komory vzorku a spustil som ďalšie merania. Na obr.2.4 je zobrazené, ako sa mení teplota komory vzorky v čase od chvíle, keď je v ustálenom stave na

najnižšej teplote (-90°C). V tomto momente bol pripojený zdroj energie k výhrevnej špirále ($I=1\text{A}$). V čase od 0 minút do 20 minút, je evidentný extrém na krivke a od 120-tej minúty tiež nie je priebeh teploty v čase podľa očakávania. Tieto výkyvy boli spôsobené výpadkami v komunikácii zo zdrojom MANSO SDP2603, v ďalšej časti práce som ho vymenil za Agilent E3649A.



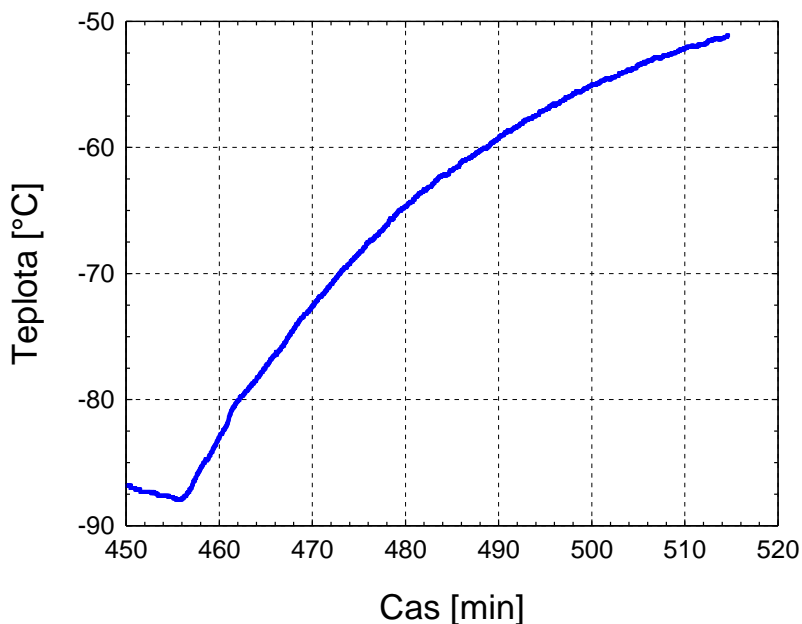
Obr.2.4 : Graf závislostí teploty na čase po zapnutí výhrevnej špirály

Po ustálení teploty (obr.2.4) na 60°C som odpojil zdroj od výhrevnej špirály až do okamžiku ustálenia teploty na najnižšej úrovni. Tento priebeh závislosti teploty komory vzorky na čase je na obr.2.5. Počas tohto merania bola výveva zapnutá a tlak v komore 1 Pa.



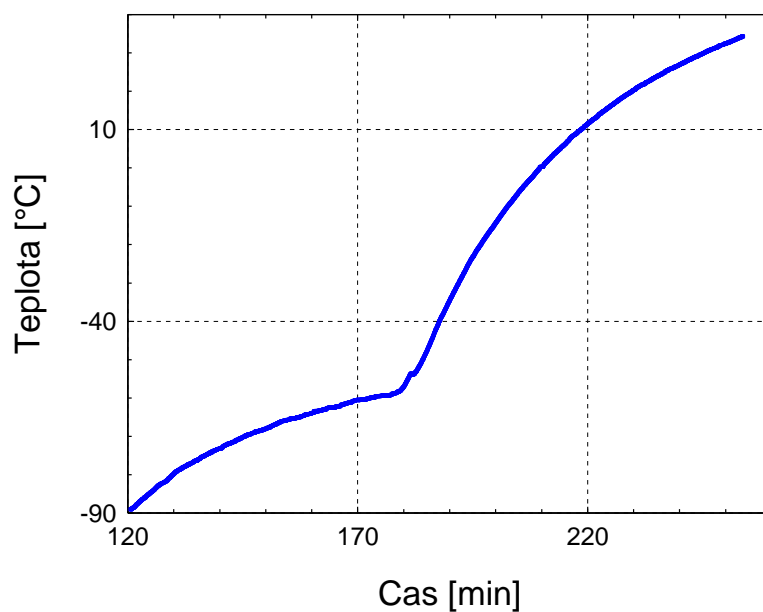
Obr.2.5 : Graf závislostí teploty na čase po vypnutí výhrevnej špirály

Priebeh závislosti teploty komory vzorky na čase od chvíle, keď bola v rovnovážnom stave pri najnižšej dosiahnutej teplote vypnutá výveva (456 min.). Na nasledujúcom grafe, vid obr.2.6, je evidentný nárast teploty v komore vzorky v čase, v dôsledku zvyšujúceho sa tlaku v komore vzorky. Dôvodom bola zmena veľkosti prestupu tepla z okolia do komory vzorku.



Obr.2.6 : Graf závislostí teploty na čase po vypnutí vývevy

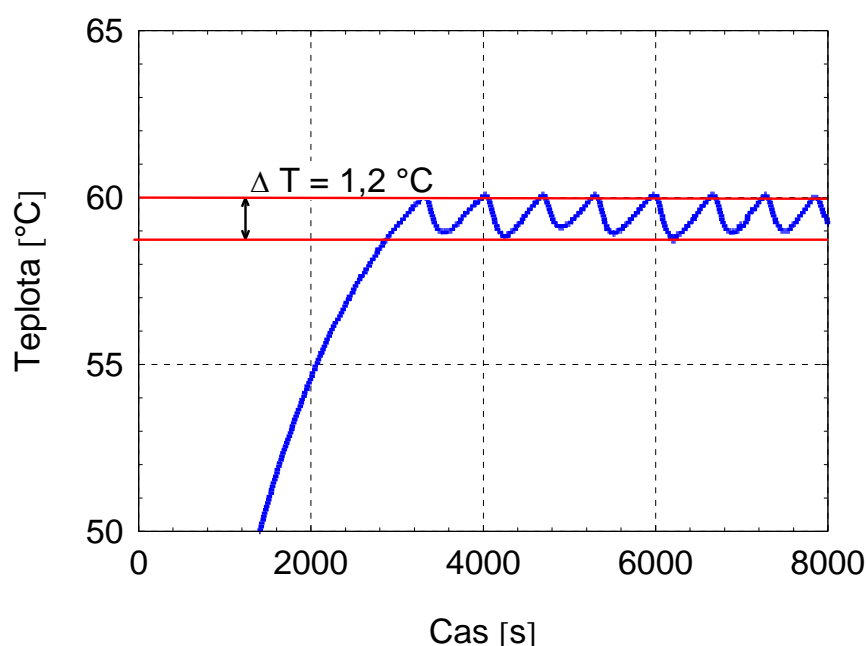
Z ďalšieho pokusu je evidentný nárast teploty v prípade, keď sme na zdroj pripojili výhrevnú špirálu s prúdom 500 mA a od 185-tej minúty som zvýšil prúd do topnej špirály na 1A. Je možné pozorovať zmenu rýchlosti nárastu teploty pri tejto zmene, vid obr.2.7.



Obr.2.7 : Graf závislostí teploty na čase po zmene veľkosti prúdu

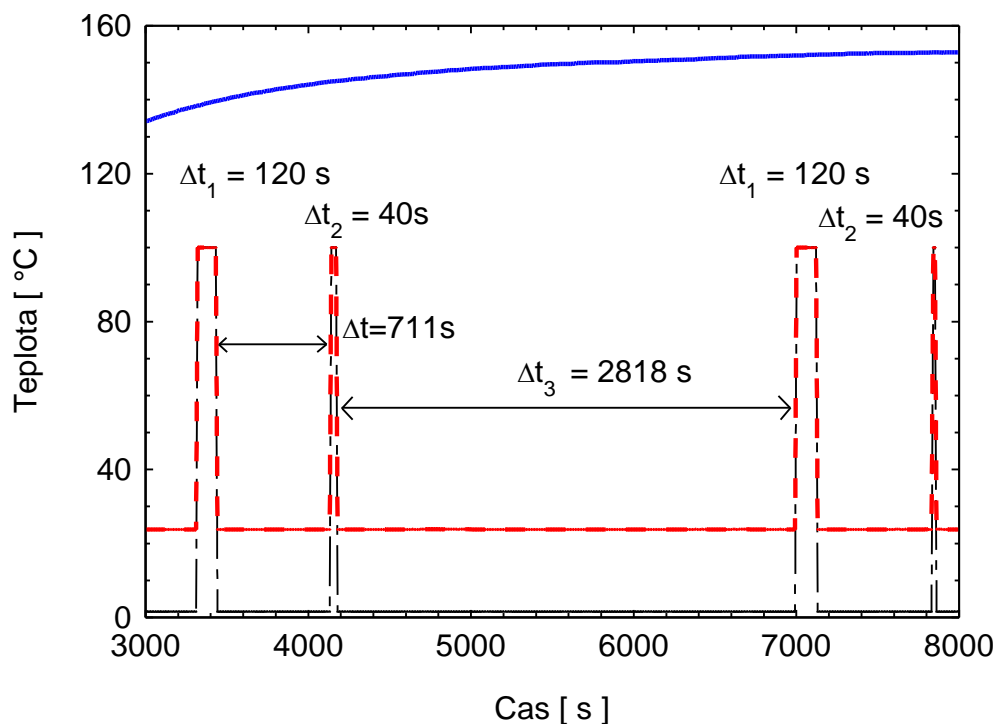
2.2 Regulácia teploty

Aplikáciu pre riadenie teploty v kryostatu som naprogramoval pomocou Matlabu. Najskôr bola teplota riadená pomocou dvojstavového regulátora. Ako náhle teplota klesla pod nastavenú hodnotu, výhrevnou špirálou tiekol prúd o veľkosti 1A. Ak bola teplota vyššia ako požadovaná, bol zdroj prúdu od výhrevnej špirály odpojený. Ako vyzerá regulácia teploty nastavená na hodnotu 60°C pomocou dvojstavový regulátoru je vidieť na obr.2.8, z ktorého je evidentné, že teplota je udržiavaná v rozmedzí 59°C až 60°C. Zvlnenie teploty ΔT je možné vylepšiť voľbou prúdu do výhrevnej špirály.



Obr.2.8 : Graf znázorňujúci činnosť dvojstavového regulátoru

Z dôvodu, že zdroj Manson SDP 2603 vykazoval pravidelné výpadky v komunikácii, musel som ho vymeniť za zdroj Agilent E3649A. Tento nový zdroj je ovládaný pomocou zbernice GPIB (IEEE488). U starého zdroja sa pravidelne opakovali dva výpadky a to každých 2818 s, čo je približne 50 minút. Prvý výpadok bol vždy dlhší a trval 120s, druhý 40 s. Časový odstup medzi týmito výpadkami bol 717s, čo je približne 12 min. Ukážka výpadkov sú znázornené na obr.2.9, kde modrá čiara predstavuje práve meranú charakteristiku, čierna veľkosť prúdu pretekajúceho obvodom a červená veľkosť napätia v obvode.

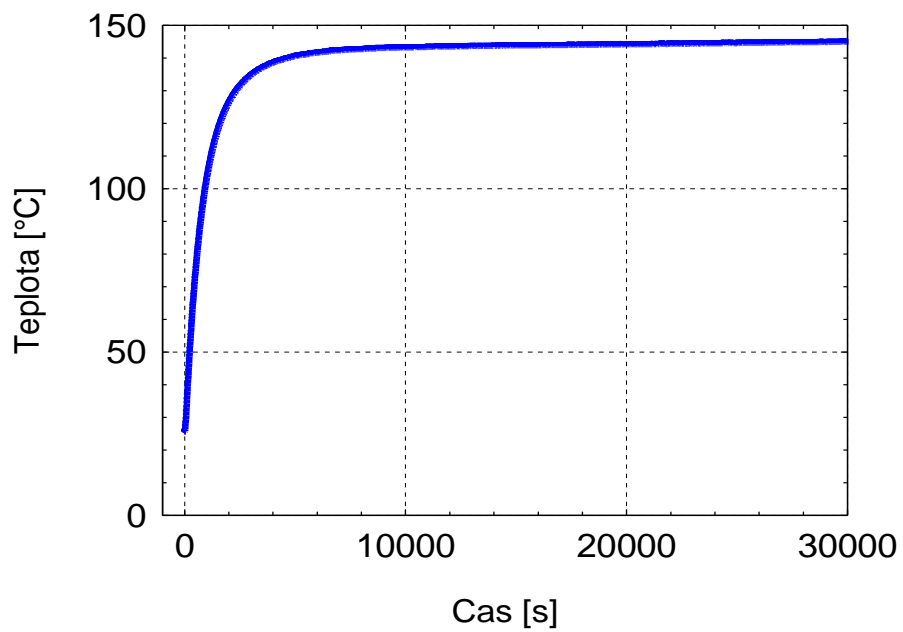


Obr.2.9: Zobrazenie chybej komunikácie zdroja Manson SDP 2603

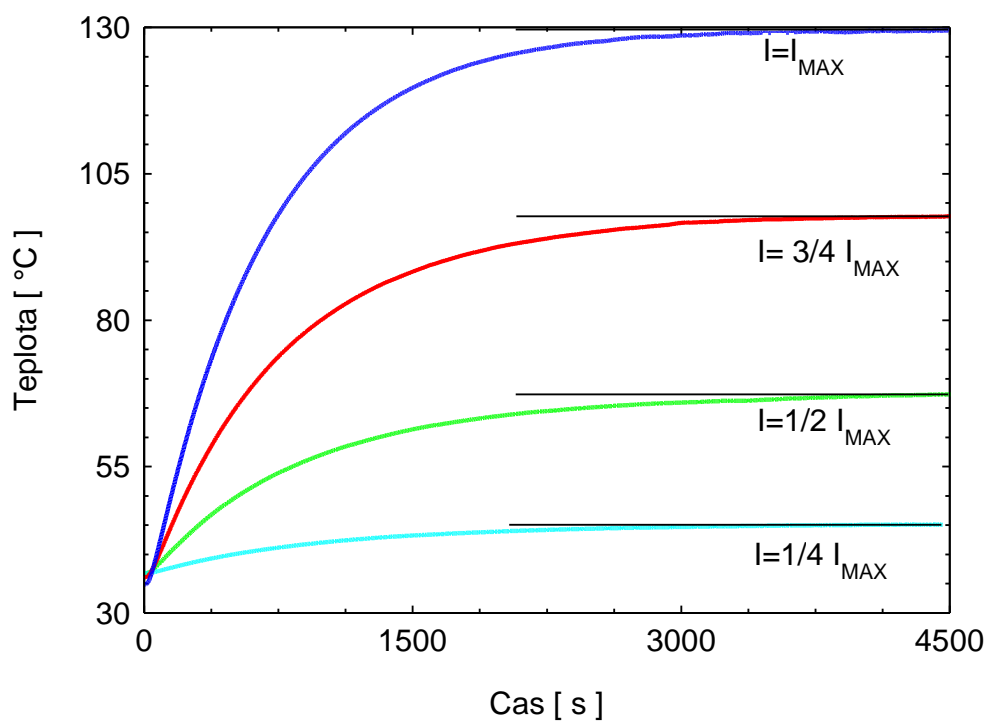
Aby bola dosiahnutá kvalitnejšia regulácia teploty, bolo nutné naprogramovať PSD regulátor a na základe prechodovej charakteristiky nastaviť jeho parametre. Prechodová charakteristika (odozva na jednotkový skok riadiacej veličiny) je na obr.2.10 a na obr.2.11 je možné vidieť chovanie sústavy pri rôznom nastavení prúdu, kde $I_{MAX}=1,4$ A je maximálna veľkosť prúdu, ktorou môžeme sústavu zohrievať. Pre výpočet riadiacej veličiny som zvolil prírastkový algoritmus [19], kde je zmena veľkosti riadiacej veličiny Δu daná rovnicou (2.1):

$$\Delta u(kT_{vz}) = k_R \left\{ \left[e(kT_{vz}) - e[(k-1)T_{vz}] \right] + \frac{T_{vz}}{T_I} e(kT) + \frac{T_D}{T_{vz}} \left\{ e(kT_{vz}) - 2e[(k-1)T_{vz}] + e[(k-2)T_{vz}] \right\} \right\} \quad (2.1)$$

kde k je okamžik vzorkovania, T_{vz} je vzorkovacia perióda, e je regulačná odchýlka, k_R , T_I a T_D sú parametre regulátora [19]. Z rovnice (2.1) je evidentné, že pre potrebu výpočtu zmeny riadiacej veličiny je potrebné poznať aktuálnu, minulú a predminulú veľkosť regulačnej odchýlky e . Vzorkovaciu periódu T_{vz} som zvolil 40s.

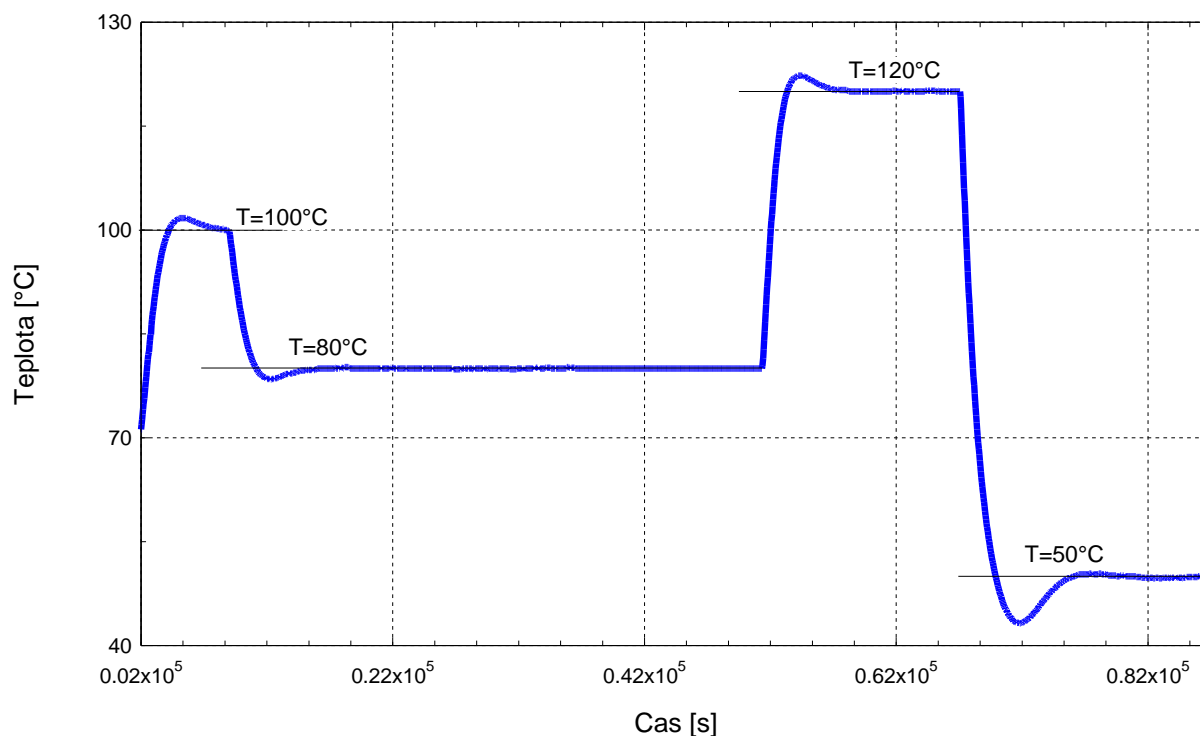


Obr.2.10: Prechodová charakteristika regulovanej sústavy



Obr.2.11: Regulovaná sústava pri rôznom nastavení prúdu I

Po nastavení parametrov regulátora, som opäť spravil skúšobné merania a ich výsledky sú zobrazené na obr.2.12. Regulátor postupne nastavoval teploty v kryostatu 100°C, 80°C, 120°C a 50°C.



Obr.2.12 : Graf znázorňujúci činnosť PSD regulátoru

PSD regulátor dokáže udržiavať teplotu omnoho presnejšie ako dvojstavový regulátor. S aktuálne nastavenými parametrami regulátora sa čas potrebný k ustáleniu teploty pohybuje okolo 2 hodín pri rozkmitě $\Delta T < 0.2^{\circ}\text{C}$.

2.3 Zloženie pracoviska

- Riadiaca jednotka
- Zdroj elektrického prúdu a napätia
- Teplomer
- Výveva
- Kryostat
- Komora s meraným prvkom
- Meracie zariadenia

2.3.1 Riadiaca jednotka

Ako riadiacu jednotku využívame počítač so softwarovým vybavením, ktorý nám dovoľuje riadiť naše pracovisko. K počítaču sme pripojili cez sériové rozhranie (RS 232) zdroj elektrického prúdu a napätia a cez rozhranie USB teplomer. V systéme MATLAB sme naprogramovali program, s ktorým môžeme merať aktuálnu teplotu a zároveň regulovať zdroj elektrického prúdu a napätia.

2.3.2 Zdroj elektrického prúdu a napätia

Používame typ MANSION SDP 2603 obr.2.13 ktorý sme prepojili s počítačom pomocou sériového rozhrania RS 232. Pri tomto prepojení je komunikácia obojsmerná, čo znamená, že môžeme prijímať dáta odoslané zo zdroja a tak isto môžeme vysielat' príkazy s riadiaceho počítača smerom do zdroja.



Obr.2.13 : Zdroj MANSION SDP 2603

Toto som využil pri vytvorení programu v prostredí MATLAB. Za pomoci programu môžem nastaviť príslušné požadované napätie a prúd na diaľku. Základné príkazy pri ovládaní zdroja cez riadiaci počítač sú v tab.2.2. Pri zvyšovaní prúdu budem môcť zohrievať komoru a tým regulovať sústavu. Základné charakteristické vlastnosti zdroja nájdeme v tab.2.3. [20]

Tab.2.2: Základné príkazy pre ovládanie zdroja MANSION SDP 2603

SESS <address> <CR>	Prepne zdroj do módu kedy je ho možné ovládať na diaľku
ENDS <address> <CR>	Vypne zdroj z módu kedy je ho možné ovládať na diaľku
VOLT <address> voltage {000-XXX} <CR>	Nastavenie hodnoty napätia
CURR <address> current {000-XXX} <CR>	Nastavenie hodnoty prúdu

Tab.2.3: Základne parametre zdroja MANSOON SDP 2603

	Výstupné napätie	Menovitý výstupný prúd	Zát'azová regulácia
MANSOON SDP 2603	1 – 60 V	0 - 3,3 A	150 mV

Zdroj Agilent E3649A, vid obr.2.14, využívam pri PSD regulátore z dôvodu výpadkov komunikácie zdroja MANSOON SDP 2603 s počítačom. Na prepojenie zdroja s počítačom som využil zbernicu GPIB. Pomocou tejto zbernice je komunikácia tiež obojstranná. Pri tomto zdroji je maximálny výkon 100 W, ktoré je rozdelený v dvoch zvoliteľných výstupoch. Prvý má rozsah napätia od 0 do 35V pri prúde 1,4A. U druhého je nastavené napätie 60V pri prúde 0,8A.



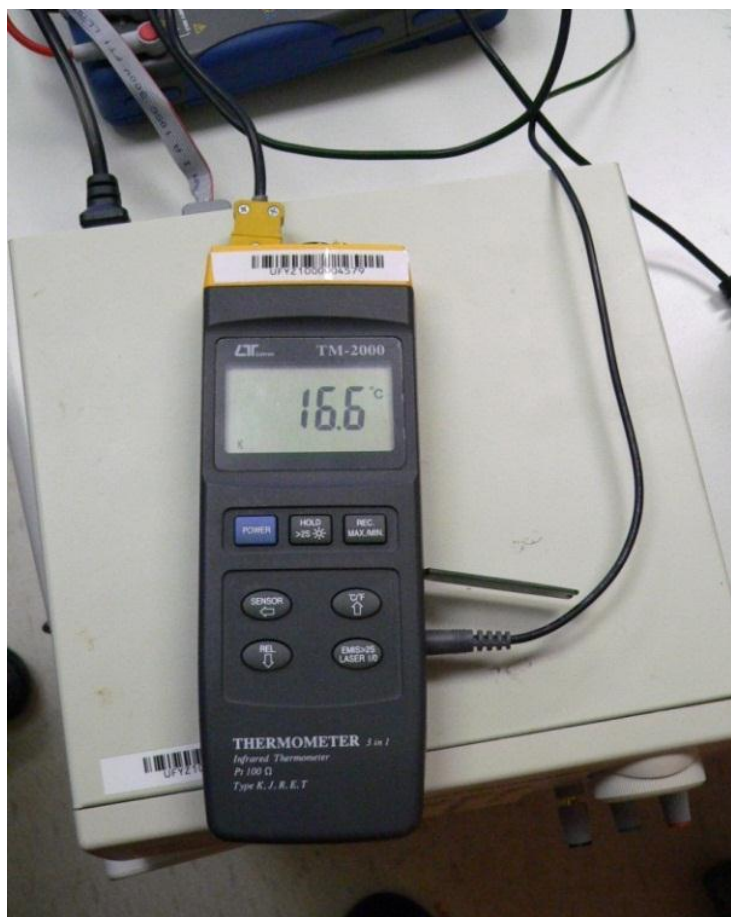
Obr.2.14 : Zdroj Agilent E3649a

Program pre komunikáciu zo zdrojom som opäť napísal v prostredí MATLAB. Môžem v ňom nastavovať parametre prúdu aj napätia cez počítač, časť programu je v kapitole 1.6.3, kde je ukážka nastavenia prúdu aj napätia .

2.3.3 Teplomer

Zvolil som si teplomer TM-2000, vid obr.2.15, ktorý je schopný okrem iných používať termočlánok typu T a ten ja využívam pri meraniach v nízkych teplotách.

Jeho presnosť merania je na 0,1 °C od -50.1 do -200 °C $\pm(0.2\% + 1^{\circ}\text{C})$. Prehľad základných parametrov je v tab.2.4 .



Obr.2.15: Teploměr TM-2000

Tab.2.4: Přehľad základných parametrov teplomera TM-2000

Typ senzoru	Infračervený
	Platinový Pt 100 Ω
	Termočlánok <ul style="list-style-type: none"> • Typu K • Typu J • Typu T • Typu E • Typu R
Funkcie	$^{\circ}\text{C}$, $^{\circ}\text{F}$
	Podržanie dát
	Pamäť (Max , Min)

K počítaču sa pripája pomocou sériového rozhrania RS 232 v našom prípade však tento port na počítači už je obsadený zdrojom, tak som musel využiť redukciu RS 232 – USB .

V nepravidelných intervaloch získavam 16 B dáta z teplomeru, vďaka ktorým dokážem zistiť aktuálnu teplotu. V tab.2.5 je popísaný význam jednotlivých bajtov.

Tab.2.5: Význam jednotlivých bajtov

Číslo Bajtu	Význam
D0	Ukončovací znak 0Dh
D1 – D8	ASCII reprezentácia tepoloty, D1=LSD , D2=MSD Např: "00001234"
D9	Desatinná čiarka(DČ), pozícia sprava doľava 0 = No DČ , 1 = 1 DČ , 2 = 2 DČ , 3 = 3 DČ
D10	Polarita 0 = Kladná 1 = Záporná
D11 – D12	Informácie o použitej jednotke
	°C = 01 °F = 02
D13	"1"
D14	"4"
D15	Štartovací znak 02h

2.3.4 Výveva

Vývevu typu DS 102 obr. 2.10 (od spoločnosti Varian) využívam na vytvorenie vákua v komore s meraným prvkom. Základné parametre vývevy sú v tab.2.6. [21]



Obr.2.16: Výveva DS 102

Tab.2.6: Parametre vývevy pri 60 Hz

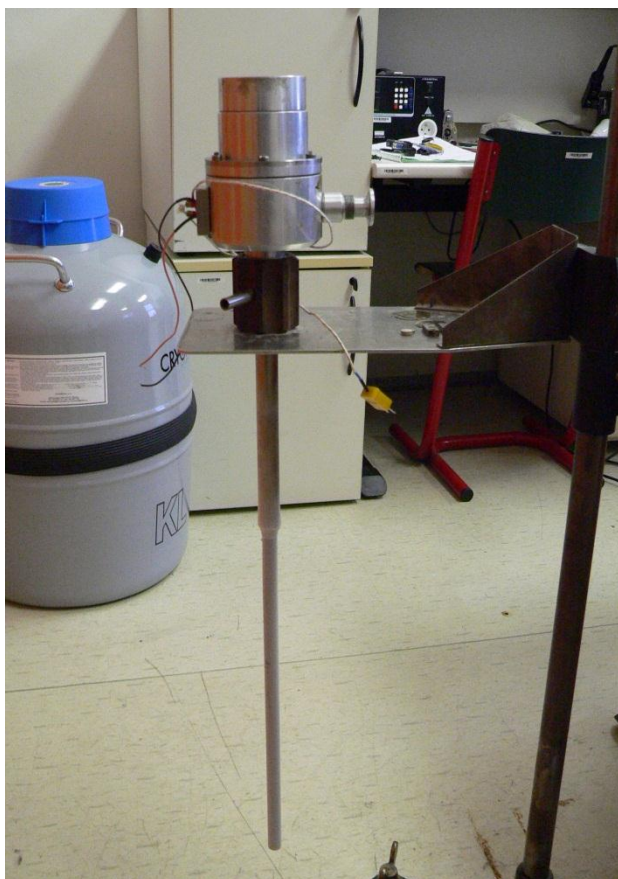
Parameter	Hodnota
Vzduchový výtlak	114 l /min
Pumpovacia rýchlosť	3,5 cfm
Výkon motora	0.55 kW
Menovité otáčky	1800 rpm

2.3.5 Kryostat

Kryostat obr.2.17 je tvorený z 2 časti :

- Komora s meranou vzorkou obr.2.18
- Ponorná tyč

Ponorná tyč sa vkladá do dévarky, v ktorej sa nachádza tekutý dusík . Ten celú sústavu po celý čas trvania ponorenia tyče chladí. Túto teplotu sledujeme pomoc termočlánku, ktorý sa nachádza v komore s meranou vzorkou a odosiela dáta do riadiaceho počítača.



Obr.2.17: Kryostat



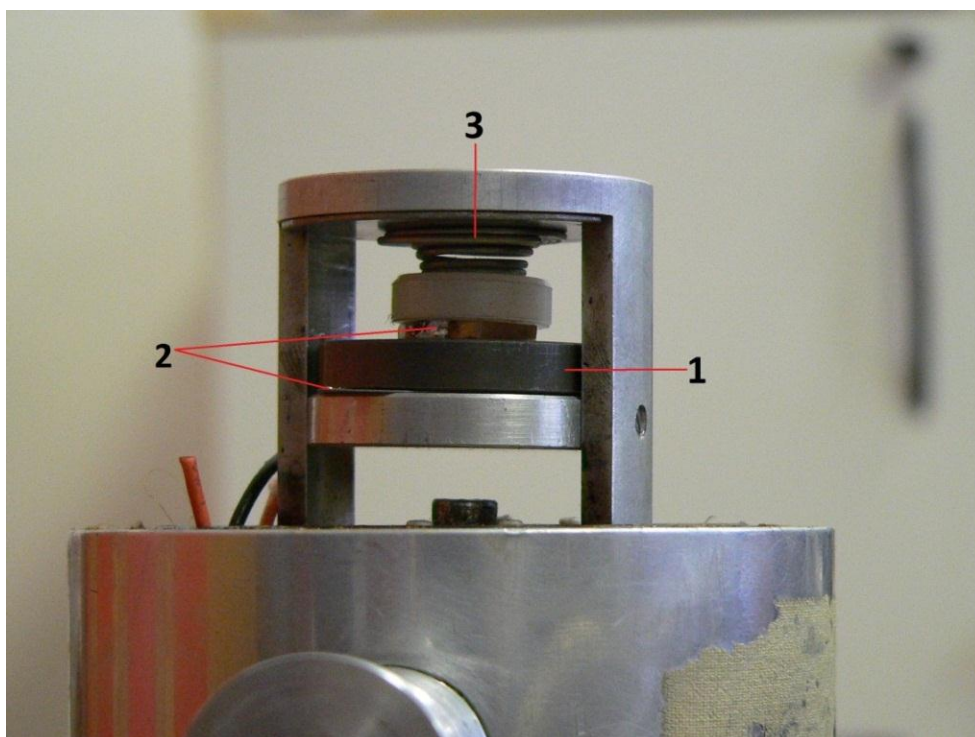
Obr.2.18: Komora s meranou vzorkou

2.3.6 Komora s meranou vzorkou

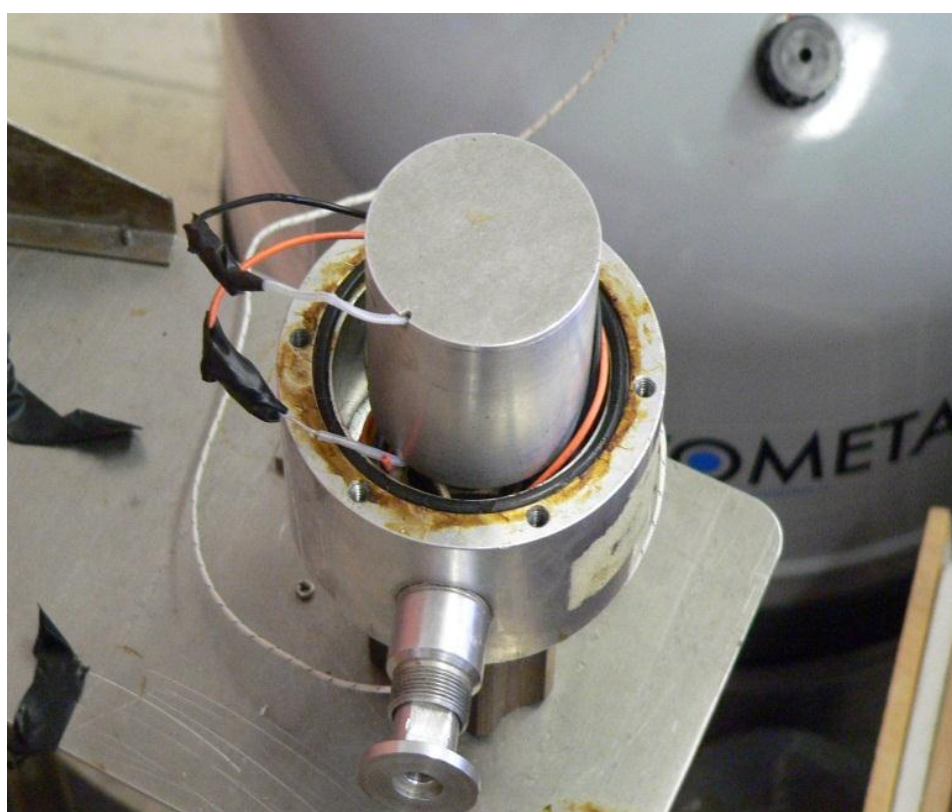
Na obr.2.19 je detailný záber kontaktovania vzorky PZT keramiky. Číslo 1 na obrázku znázorňuje vzorku PZT keramiky, ktoré je tvaru valca s priemerom 4 cm a hrúbkou 0.5 cm. PZT keramika je obklopená striebornými elektródami, ktoré sú na obrázku znázornené číslom 2 a obopínajú vzorku z oboch strán.

Vzorka je k elektródam stlačená pružinou viditeľnou na obrázku pod číslom 3. Okolo komory s meranou vzorkou sa nachádza „kryt“ obr.2.20 v ktorom je umiestnená výhrevná špirála.

Touto špirálou sme schopný zohriať celú sústavu na nami požadovanú teplotu.



Obr. 2.19: Kontaktovanie vzorky PZT keramiky



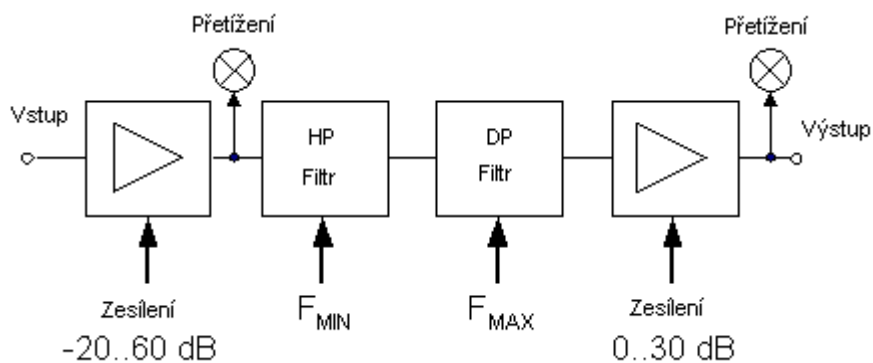
Obr.2.20: Komora s meranou vzorkou a krytom

2.3.7 Zosilovač AM 22

Jedná sa o tzv. Selektrívny nízkošumový zosilovač, ktorý je predovšetkým určený pre meranie šumových charakteristik. Zosilovač je rozdelený na dve časti (predzosilovač a výstupný zosilovač), tvorený hornými a dolnými filtrami. Jeho fyzická podoba obr.2.21 a blokové schéma je na obr.2.22.



Obr.2.21: Zosilovač AM 22



Obr.2.22. Blokové schéma zosilovača AM 22

Prebudenie oboch zosilovačov je signalizované LED diódou. Pri meraní je potrebné na základe meniaceho pomeru signál/šum meniť aj zosilnenie oboch stupňov zosilovača. Vzhľadom k indikácii prebudenia je možné dosiahnuť nastavenia optimálneho zosilnenia.

Vstavané filtre slúžia k obmedzeniu prenášanej šírky frekvenčného pásma. Tieto filtre sú potrebné k odstráneniu frekvencií mimo oblasti pozorovania, teda k potlačeniu rušivých signálov. Taktiež sa osadzujú vysoko selektívne filtre, ktoré potláčajú frekvencie odvodené od frekvencie siete el. rozvodov (50 Hz, 100 Hz,...). Výber prenášaného frekvenčného pásma je dôležitý aj pre neskoršie digitálne spracovanie signálu pomocou diskretnéj Fourierovej transformácie.

2.3.8 Handyscope HS4

Vyrobené firmou TiePie engineering. Je prenosný a kompaktný štvorkanálový digitálny osciloskop, vid obr.2.23, využívajúci pripojenie k PC. Jeho vzorkovacia rýchlosť je do 50 MS/s pri bitovom rozlíšení 12 až 16 bitov so 128 vzorkami na kanál, vid tab.2.7. [22]



Obr.2.23: Handyscope HS4

Handyscope môžeme pripojiť k počítaču pomocou USB bez externého napájania. Je označený ako „Plug in and Measure („Pripoj a meraj“).

“Plug in“ = pripojené jedným káblom

“Measure“ = čítanie SET súborov a meranie môže začať

Keďže pri HS4 máme 4 možnosti pripojenia rôznych meracích prístrojov, takmer každý merací problém môže byť vyriešený. Už pri pripojení k PC máme veľa možností k meraniu, ktoré sú normálne možné len s použitím viacerých prístrojov.

Tab.2.7: Rozsah rozlíšenia u Handyscopu HS4

Bitové rozlíšenie	Signál/šumový pomer	Level	Max. vzorkovacia frekvencia	Percentuálna časť
12	72 dB	4096	50 MHz	0, 024%
14	84 dB	16384	3, 125 MHz	0, 0061%
16	96 dB	65536	195, 3125 KHz	0, 0015 %

2.3.9 Zosilovač 3S SEDLAK PA15

Tento nízkošumový predzosilovač, vid obr.2.24, slúži k zosilneniu signálu. Má len veľmi malý vlastný šum a dostatočne veľkú šírku pásma zosilených signálov. Navyše je umiestnený v stienenej krabici čo najbližšie ku zdroju meraného signálu aby bolo pôsobenie šumu čo najviac obmedzené. Technické parametre zosilovača sú v tab.2.8. [23]



Obr.2.24: Zosilovač PA15

Tab.2.8: Technické parametre zosilovača PA15

Technické parametre	
Vstupná impedancia	$2 \cdot 10 \text{ M}\Omega / 40 \text{ pF}$
Výstupná impedancia	$50 \text{ }\Omega$
Zosilenie	40 / 0 / 20 dB
Šírka pásma (-3dB)	od 3 Hz do 1 MHz
Šumové napätie	$< 2 \text{ nV} / \text{Hz}$

2.3.10 HP 4285A

Na meranie impedancie a fázového posunu som použil LCR meter HP 4285, vid obr.2.25. Jeho základne špecifikácie sú v tab.2.9. Prístroj ovládam pomocou programu napísaného v prostredí MATLAB. Prehľad niektorých možných príkazov použiteľných pre tento prístroj sú v tab. 1.6 v kapitole 1.6.2. [16]



Obr.2.25: LCR meter HP 4285A

Tab.2.9: Základne špecifikácie HP 4285A

Frekvenčný rozsah	75 kHz – 30 MHz (krok po 100 Hz)
Základná presnosť	0,1%
Rýchlosť merania	30 ms/meranie
Možné merané parametre	$|Z|$, R, X, $|Y|$, G, B, C, L, D, Q

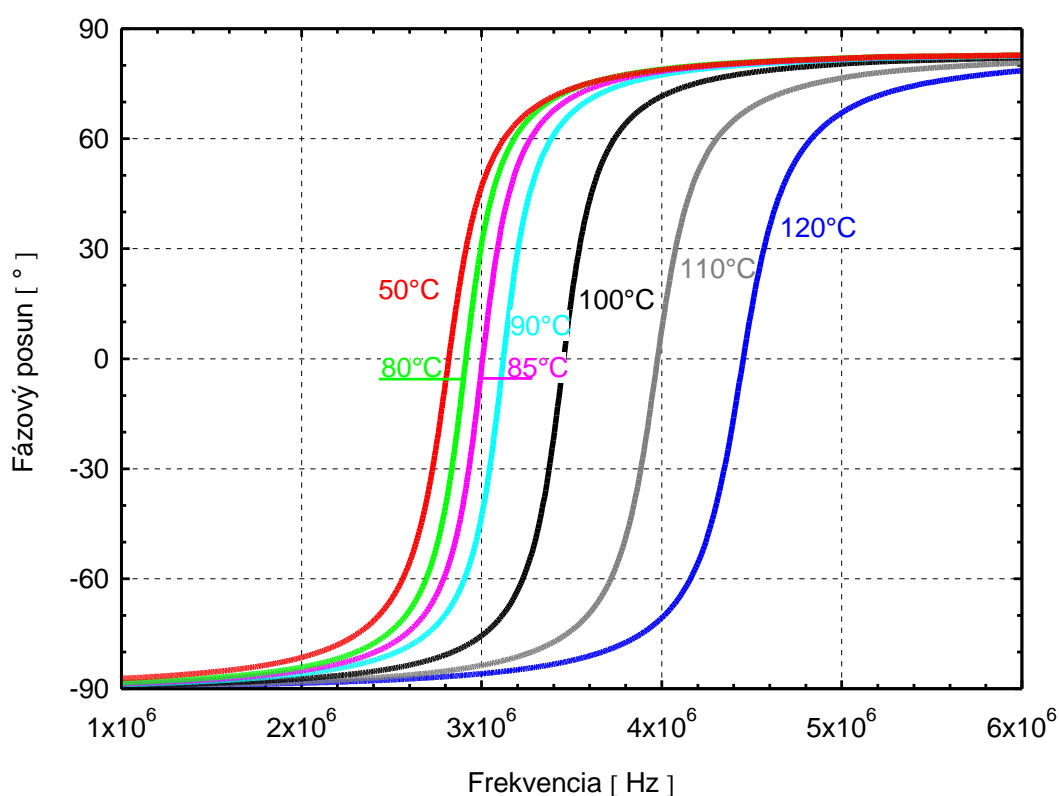
3 Softwarové vybavenie

Celý proces riadenia je realizovaný pomocou programu MATLAB. V súčasnej dobe regulujem teplotu pomocou PSD regulátora, pomocou ktorého som zmeral výsledne charakteristiky.

Programy vytvorené v rámci práce sú k dispozícii na priloženom CD.

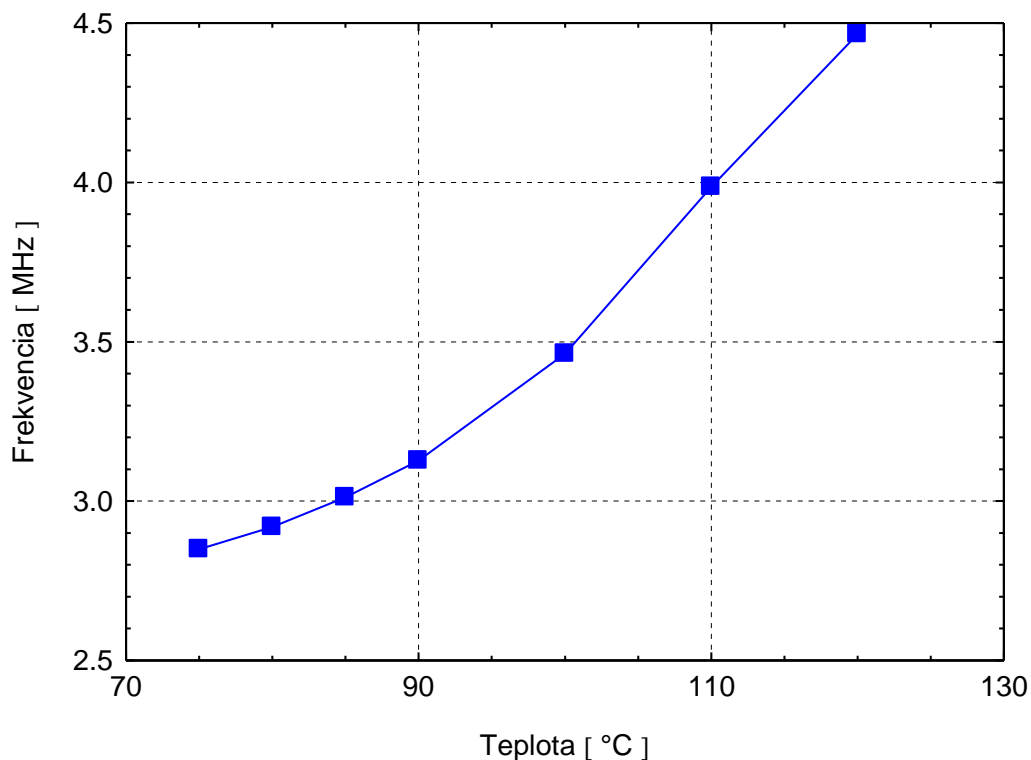
4 Výsledné charakteristiky

Impedačné a fázové charakteristiky meraného vzorku som zmeral v závislosti na teplote. Na obr.4.1 je možné vidieť zmenu fázového posunu medzi prúdom a napätím v závislosti na frekvencii pri rôznych teplotách.



Obr.4.1 : Graf znázorňujúci zmenu fázového posunu v závislosti na frekvencii

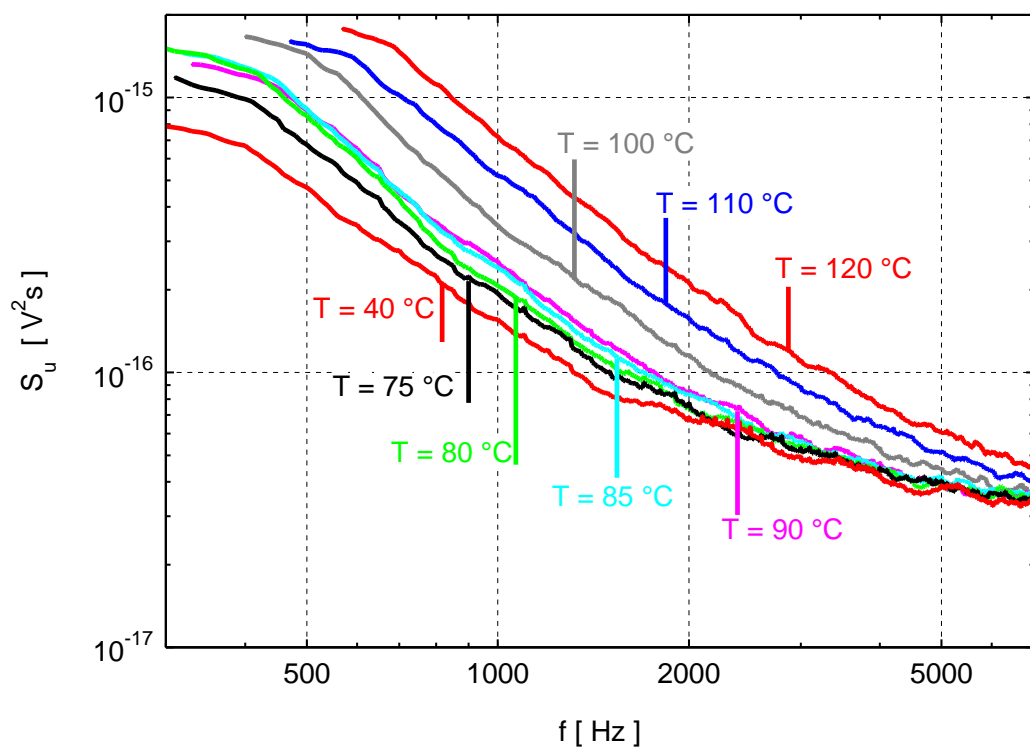
Z každej charakteristiky som následne stanovil frekvenciu pri ktorej je nulový fázový posun medzi prúdom a napätím a hodnoty som vyniesol do grafu, vid obr.4.2. Z grafu vyplýva, že so zvyšujúcou teplotou sa zvyšuje frekvencia v okamžiku, keď je nulový fázový posun medzi prúdom a napätím.



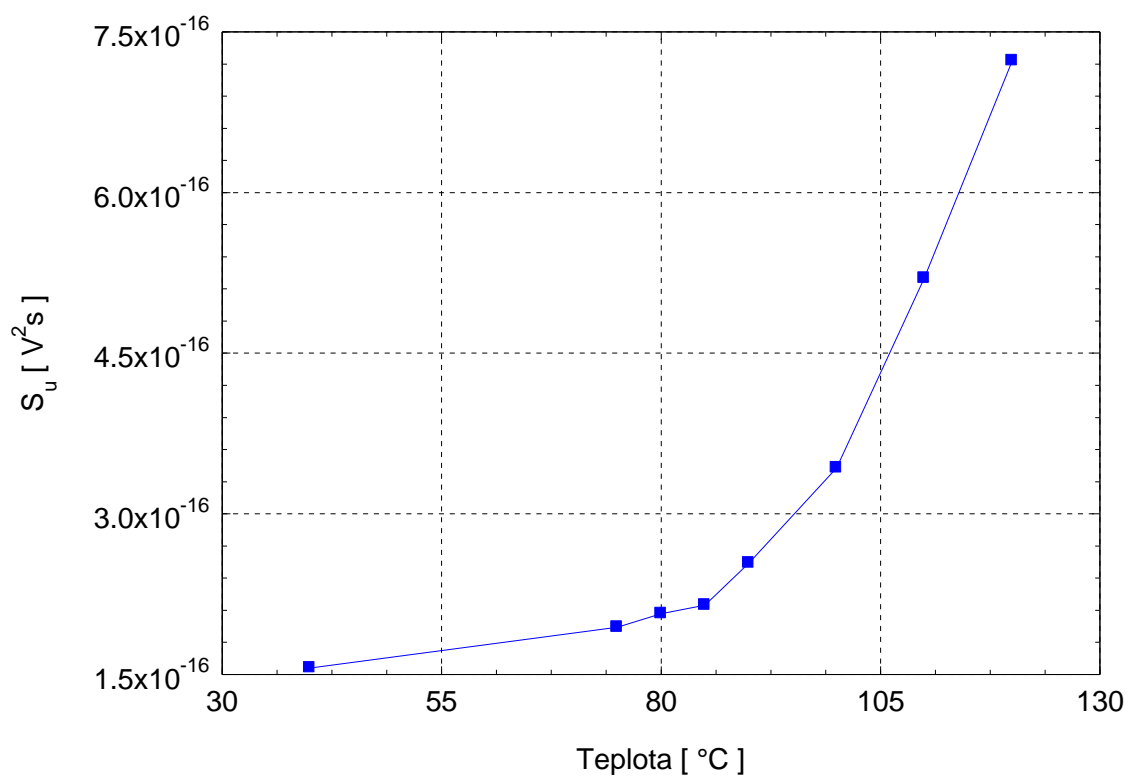
Obr.4.2: Graf znázorňujúci zmenu frekvencií na teplote

Nakoniec som meral šumové charakteristiky meraného vzorku v závislosti na teplote. Meral som zmenu výkonovej spektrálnej hustoty v závislosti na frekvencii pri rôznych teplotách, vid obr.4.3.

Následne som si z každej zmeranej charakteristiky odčítal hodnotu výkonovej spektrálnej hustoty na frekvencii 1 kHz a hodnoty vyniesol do grafu, vid obr.4.4. Z grafu vyplýva, že so zvyšujúcou teplotou sa zvyšuje hodnota výkonovej spektrálnej hustoty pri frekvencii 1 kHz.



Obr.4.3: Graf znázorňujúci zmenu výkonovej spektrálnej hustoty v závislosti na frekvencií



Obr.4.4: Graf znázorňujúci zmenu výkonovej spektrálnej hustoty na teplote

5 Predpokladaný ďalší vývoj

V súčasnej dobe je kryostat sprevádzkovaný a je zrejmé, že nebude problém ho začať používať. Je pripravený kontaktný systém. Vzhľadom k veľkej tepelnej kapacite systému kryostatu sú všetky zmeny teploty (spôsobené buď ochladením od kvapalného dusíka alebo ohriatím od výhrevnej špirály) veľmi pomalé a je nutné používať PSD regulátor. Súčasný navrhnutý a zostrojený PSD regulátor reguluje teplotu veľmi pomaly. Preto v ďalšej práci by sa mali nastaviť parametre regulátora tak, aby doba regulácia bola čo najnižšia.

Následne by malo byť vyskúšané znížiť úroveň vakuu v komore ešte viac, ako dokáže momentálna výveva a skúsiť dosiahnuť ešte menšie teploty na vzorke.

6 Záver

Výsledkom mojej bakalárskej práce je funkčný kryostat. Kryostat je tvorený riadiacim počítačom, zdrojom elektrického prúdu a napätia, teplomerom, rotačnou vývevou, vakuometrom, LCR metrom, zosilovačom, osciloskopom, devárkou s kvapalným dusíkom a komorou s meranou vzorkou.

Riadiaci počítač je vybavený softwarom MATLAB, v ktorom som napísal všetky programy a podprogramy slúžiace na vyhodnocovanie a meranie požadovaných charakteristík. Ukážku z napísaných programov je možné vidieť v kapitole 1.6.3.

Komora s meranou vzorkou je vybavená elektródami, do ktorých je možné vložiť vzorku PZT keramiky rôznych rozmerov tak, aby bola v celom teplotnom rozsahu merania spoľahlivo kontaktovaná.

Cez riadiaci počítač je možné ovládať zdroj elektrického prúdu a napätia slúžiaci na výhrev sústavy, merať aktuálnu teplotu v komore so vzorkou a hlavne merať impedačné, fázové a šumové charakteristiky v závislosti na teplote. Pomocou vakuometra je možné sledovať úroveň vákua v komore s meranou vzorkou.

V kapitole 4 je možné vydiť v jednotlivých grafoch výsledné namerané charakteristiky. Z obr. 4.2 vypláva, že so zvyšujúcou teplotou sa zvyšuje frekvencia v okamžiku, keď je nulový fázový posun medzi prúdom a napätím. Obr. 4.4 vypovedá o zväčšovaní výkonovej spektrálnej hustoty pri frekvencii 1 kHz so zvyšujúcou sa teplotou.

Spôsob regulácie teploty v kryostate je realizovaný pomocou PSD regulátorom. Regulácia teploty je síce pomalá, ale na druhej strane to má aj výhodu. Vzorka pri pomalej regulácii je v termodynamickú rovnováhu.

Rozsah teplôt, ktoré je možné v kryostate nastaviť pomocou PSD regulátora je daná skutočnosťou, že pre chladenie je použitý kvapalný dusík a na výhrev zdroj elektrického prúdu a napätia, na ktorom môžeme nastaviť maximálny prúd 1,4A pri napätí 35V. Ďalej veľkosťou úrovne vákua, geometrickým usporiadaním kryostatu a maximálnym výkonom výhrevnej špirály.

7 Referencie

- [1] GRMELA, Lubomír. *Stochastické jevy v polovodičích*. Brno, 1985. 48 s. Pisomná práce k odborné kandidátské zkoušce. VUT.
- [2] ABBOTT, Derek, et al. Simple Derivation of the Thermal Noise Formula Using Window-Limited Fourier Transforms and Other Conundrums. *Transaction on Education* [online]. [cit. 2010-12-11]. Dostupný z WWW: <http://www.eleceng.adelaide.edu.au/Personal/dabbott/publications/EDU_abbott1996.pdf>. ISSN 0018-9359.
- [3] *What is Johnson noise? - Johnson Noise* [online]. 2007 [cit. 2010-12-11]. Johnson Noise. Dostupné z WWW: <<http://yalelab.wikidot.com/theory>>.
- [4] KOKTAVÝ, Pavel. *Nedestruktivní diagnostika a fyzika dielektrik*: skript. Brno: FEKT VUT v Brně 2006. 102 s.
- [5] *Techmania - Edutorium* [online]. 2007 [cit. 2010-12-11]. Piezoelektrický jev. Dostupné z WWW: <<http://www.techmania.cz/edutorium/clanky.php?key=28>>.
- [6] KAZELLE, Jiří. *Elektrotechnické materiály a výrobní procesy*: skript. Brno: FEKT VUT 273 s.
- [7] *PIEZOCRYST: Advanced Sensorics GmbH – Piezoelectric Sensors* [online]. 2005 [cit. 2010-12-11]. Piezoelectric Sensors. Dostupné z WWW: <http://www.piezocryst.com/piezoelectric_sensors.php>.
- [8] REED, Christopher. *Qcmfaq - Chris Reed* [online]. 2009 [cit. 2010-12-12]. QCM mini-FAQ. Dostupné z WWW: <<http://sites.google.com/site/christopher3reed/qcmfaq>>.
- [9] *Sauerbrey equation / Ask.com Encyclopedia* [online]. 2010 [cit. 2010-12-12]. Sauerbrey equation. Dostupné z WWW: <http://www.ask.com/wiki/Sauerbrey_equation>.
- [10] *What is a Quartz Crystal Microbalance - QCM* [online]. 2010 [cit. 2010-12-12]. What is a Quartz Crystal Microbalance - QCM. Dostupné z WWW: <<http://www.pharmaceutical-int.com/article/quartz-crystal-microbalance-qcm.html>>.
- [11] SVOBODA, Vít. *Studium elektrochemické inzerce kationtů do oxidů přechodových kovů* [online]. Brno : VUT, 2009. 105 s. Dizertační práce. VUT v Brně , FEKT. Dostupné z WWW: <https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=22997>.

[12] LAJMON, Jakub. *RS-232 / 8bitu.cz* [online]. 2006 [cit. 2011-04-23]. RS-232. Dostupné z WWW: <<http://www.8bitu.cz/clanek/rs-232/>>.

[13] *Hw.cz* [online]. 2005 [cit. 2011-04-23]. HW server představuje - Sériová linka RS-232 | HW.cz. Dostupné z WWW: <<http://hw.cz/rs-232#konvertory>>.

[14] MADOŠ, Branislav. *Periférne Zariadenia a Styk s Prostredím* [online]. 2005 [cit. 2011-04-23]. General Purpose Interface Bus (GPIB). Dostupné z WWW: <<https://hornad.fei.tuke.sk/predmety/pzasp/?id=2380>>.

[15] ŠALIGA, Ján. *IEEE488 GPIB* [online]. 2003 [cit. 2011-04-23]. Prezentácia. Technická univerzita v Košiciach. Dostupné z WWW: <http://www.kemt.fei.tuke.sk/predmety/KEMT435_ACR/_materialy/Prednasky/GPIB.pdf>.

[16] *Operation manual - Agilent 4285* [online]. Japonsko : Agilent Technologies, 2000 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/04285-90010.pdf>>.

[17] *Tutorial Description of the Hewlett-Packard Interface Bus*, Hewlett-Packard [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://www.bitsavers.org/pdf/hp/hpib/TutorialDescrOfHPIB.pdf>>.

[18] *Agilent Impedance Measurement Handbook* [online]. USA : Agilent Technologies, 2009 [cit. 2011-04-23]. Dostupné z WWW: <<http://cp.literature.agilent.com/litweb/pdf/5950-3000.pdf>>.

[19] BALÁTĚ, Jaroslav. *Automatické Řízení*. Praha : BEN - technická literatura, 2003. 663 s. ISBN 80-7300-020-2.

[20] *Remote programming switching mode DC regulated Power Supplies*, 2009. 39s [cit. 2011-04-29].

[21] *New DS 102 Rotary Vane Vacuum Pump* [online]: VARIAN, [cit. 2011-05-29]. Dostupné z WWW: <http://www.idealvac.com/files/brochures/Varian_DS102VanePump.pdf>.

[22] ŠOPÍK, Martin. *ZPRACOVÁNÍ SIGNÁLŮ ELEKTROMAGNETICKÉ A AKUSTICKÉ EMISE PŘI MECHANICKÉM ZATĚŽOVÁNÍ PEVNÝCH LÁTEK* [online]. Brno : VUT, 2008. 80 s. Diplomová práce. VUT. Dostupné z WWW: <http://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=7527>.

[23] *USB Oscilloscope - Handyscope HS4* : Description [online]. TiePie engineering, 2008
[cit. 2011-05-29]. Dostupný z WWW:
<[http://www.tiepie.com/uk/products/External_Instruments/USB_Oscilloscope/
Handyscope_HS4.html](http://www.tiepie.com/uk/products/External_Instruments/USB_Oscilloscope/Handyscope_HS4.html)>

8 Zoznam obrázkov

Obr.1.1: Prenášané napät'ové úrovne signálov	15
Obr.1.2 : Znázornenie typu konektorov RS-232	16
Obr.1.3:Graf závislosti medzi signálnou rýchlosťou a maximálnou dĺžkou vedenia	18
Obr.1.4: Znázornenie prenosu dát cez rozhranie RS 232	18
Obr.1.5: 24 pinový konektor GPIB	19
Obr.1.6: Znázornenie prenosu dát cez rozhranie GPIB	21
Obr.2.1: Blokové schéma	25
Obr.2.2: Fyzická podoba	25
Obr.2.3 : Graf porovnávajúci hodnoty vákua pri rozličných prístrojoch	26
Obr.2.4 : Graf závislostí teploty na čase po zapnutí výhrevnej špirály	27
Obr.2.5 : Graf závislostí teploty na čase po vypnutí výhrevnej špirály	27
Obr.2.6 : Graf závislostí teploty na čase po vypnutí vývevy	28
Obr.2.7 : Graf závislostí teploty na čase po zmene veľkosti prúdu	28
Obr.2.8 : Graf znázorňujúci činnosť dvojstavového regulátoru	29
Obr.2.9: Zobrazenie chybanej komunikácie zdroja Manson SDP 2603	30
Obr.2.10: Prechodová charakteristika regulovanej sústavy	31
Obr.2.11: Regulovaná sústava pri rôznom nastavení prúdu I	31
Obr.2.12 : Graf znázorňujúci činnosť PSD regulátoru	32
Obr.2.13 : Zdroj MANSON SDP 2603	33
Obr.2.14 : Zdroj Agilent E3649A	34
Obr.2.15: Teplomer TM-2000	35

Obr.2.16: Výveva DS 102	37
Obr.2.17: Kryostat	38
Obr.2.18: Komora s meranou vzorkou	38
Obr.2.19: Kontaktovanie vzorky PZT keramiky	39
Obr.2.20: Komora s meranou vzorkou a krytom	39
Obr.2.21: Zosilovač AM 22	40
Obr.2.22. Blokové schéma zosilovača AM 22	40
Obr.2.23: Handyscope HS4	41
Obr.2.24: Zosilovač PA15	42
Obr.2.25: LCR meter HP 4285A	43
Obr.4.1 : Graf znázorňujúci zmenu fázového posunu v závislosti na frekvencií	44
Obr.4.2: Graf znázorňujúci zmenu frekvencií na teplote	45
Obr.4.3: Graf znázorňujúci zmenu výkonovej spektrálnej hustoty v závislosti na frekvencií	46
Obr.4.4: Graf znázorňujúci zmenu výkonovej spektrálnej hustoty na teplote	46

9 Zoznam tabuliek

Tab. 1.1: Prenášané napäťové úrovne signálov	15
Tab. 1.2: Charakterizovanie RS-232 konektoru.	16
Tab. 1.3: Zapojenie pinov pre 9 a 25 pinové konektory	17
Tab.1.4 :Závislosť signálnej rýchlosti od max dĺžke vedenia	17
Tab.1.5: Popis GBIP pinov	20
Tab.1.6 :Príkazy pre rozhranie GPIB	23
Tab.2.1: Porovnanie starého a nového prístroja na meranie vákua	26
Tab.2.2: Základné príkazy pre ovládanie zdroja MANSO S2603	33
Tab.2.3: Základne parametre zdroja MANSO S2603	34
Tab.2.4: Prehľad základných parametrov teplomera TM-2000	35
Tab.2.5: Význam jednotlivých bajtov	36
Tab.2.6: Parametre vývevy pri 60 Hz	37
Tab.2.7: Rozsah rozlíšenia u Handyscopu HS4	41
Tab.2.8: Technické parametre zosilovača PA15	42
Tab.2.9: Základne špecifikácie HP 4285A	43

10 Zoznam skratiek a veličín

ASCII	American Standard Code for Information Interchange
AT	Advanced Technology
ATN	Attention
ATX	Advanced Technology Extended
C	kondezátor
Cfm	Cubic feet per minute
COM	Serial port
CTS	Clear To Send
D	detektor
DAV	Data Valid
DCD	Data Carrier Detector
DCE	Data Communications Equipment
DIO 1-8	Data Input Output
DSR	Data Set Ready
DTE	Data Terminal Equipment
DTR	Data Terminal Ready
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers
IFC	Interface Clear
ISO	International Organization for Standardization
EOI	End or Identify
EQCM	Elektrochemické QCM
GPIB	General Purpose Interface Bus
GND	Ground
HP-IB	Hewlett Packard Interface Bus
L	cievka
NBS	Národný výbor štandardov v USA
NDAC	Not Data Accepted
NRFD	Not Ready For Data
PSD	Proportional – sum - derivative
PZT	Plumbum – Zirconate - Titanate
QCM	Quartz Crystal Microbalance
QMB	Quartz MicroBalance
R	rezistor
RI	Ring Indicator
REN	Remote Enable
Rpm	Revolutions per minute
RS 232	Recommended Standard 232
RTS	Request To Send
RxD	Recieve Data
SRQ	Service Request

TxD	Transmitt Data
USB	Universal Serial Bus
XT	X-tended Technology

A	plocha kryštálovej vrstvy	[cm^2]
B	magnetická indukcia	[T]
E	elektrické pole	[V.m^{-1}]
e	regulačná odchýlka	[-]
f_0	frekvencia oscilátoru	[Hz]
$H(f)$	Váhová funkcia	[-]
h	Planckova konštanta	[J.s]
G	elektrická vodivosť	[S]
I	prúd	[A]
j	komplexná jednotka	[-]
k	okamžik vzorkovania	[-]
k_B	Boltzmannova konštanta	[J / K]
k_r	parametre regulátoru	[-]
R	odpor vodiča	[Ω]
$S_i(f)$	výkonová spektrálna hustota prúdu	[$\text{A}^2.\text{s}$]
$S_u(f)$	výkonová spektrálna hustota napätia	[$\text{V}^2.\text{s}$]
T	termodynamická teplota	[K]
T_I	parametre regulátoru	[-]
T_D	parametre regulátoru	[-]
T_{vz}	vzorkovacia perióda	[Hz]
Y	admittancia	[S]
$Y(f)$	Fourierové obrazy vstupné funkcie	[-]
$y(t)$	výstupné funkcie lineárneho systému	[-]
Z	impedancia	[Ω]
X	reaktancia prvku	[Ω]
$X(f)$	Fourierové obrazy vstupné funkcie	[-]
$x(t)$	vstupné funkcie lineárneho systému	[-]
Δf	zmena frekvencie	[Hz]
Δm	zmena hmotnosti na povrchu kryštálu	[g]
ΔT	zmena termodynamickej teploty	[K]
Δt	zmena času	[s]
Δu	zmena veľkosti riadiacej veličiny	[-]
Φ	fáza	[$^\circ$]
ρ_q	hustota kremíkovej dosky	[g.cm^3]
μ_q	modul pružnosti dosky v šmyku	[g.cm^{-2}]