

Návrh detekčního uzlu pro mikrovlnný mikroskop

Detection part of microwave
microscope

Roman Heinz

Diplomová práce
2005



Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Vložit oficiální zadání diplomové/bakalářské práce

Děkuji vedoucímu diplomové práce panu doc. RNDr. Vojtěchu Křesálkovi, CSc. za odborné vedení, rady a připomínky, které mi při řešení mé práce poskytoval.

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

Ve Zlíně, 24. 05. 2005

.....

jméno diplomanta

Abstrakt

Úkolem diplomové práce byla konstrukce a aplikace koaxiálního mikrovlnného rezonátoru. Bylo sestaveno měřicí pracoviště tlumící nežádoucí vibrace, stojan pro ukotvení rezonátoru a samotný rezonátor. Rezonátor se skládá z dutiny a centrálního konduktoru.

Pro zajištění pohybu snímaného objektu byly použity mikroposuvy M-110.1DG. K jejich pohybu bylo zapotřebí servokontroler Mercury C-862.10.

Měření byla prováděna kompaktním spektrálním analyzátozem Rohde&Schwarz FSH3. FSH3 má zabudovaný generátor signálu, za pomoci něhož byl buzen rezonátor. FSH3 spektrální analyzátor byl propojen optickým kabelem s počítačem, který sloužil ke sběru naměřených dat.

Po zkompletování všech výše jmenovaných prostředků byla provedena nejrozsáhlejší pokusná měření.

Abstract

Goal of this thesis was to create and apply the coaxial microwave resonator for scanning microscope using. There was built a measuring work place for dumping of vibrations, stable holding of the resonator and resonator itself. It is fundamental requires for reproducible measuring process. Resonator contains a cavity and a central conductor.

There were used micropositioning system M-110.1DG by PI to movement of the scanned object. These micropositioning system were equipped with a servocontroller Mercury C-862.10.

Measuring process was done by compact spectral analysator Rohde&Schwarz FSH3.

FSH3 contains a signal generator which is used to exciting of the coaxial resonator. FSH3 was connected via an optical channel to the computer which was used to controll of measuring instrument.

OBSAH

ÚVOD.....	6
1TEORETICKÁ ČÁST.....	7
1.1ÚVOD DO RASTROVACÍ SONDOVÉ MIKROSKOPIE.....	7
1.1.1Rastrovací optická mikroskopie [5].....	9
1.1.2Mikroskopie atomové síly [5].....	9
1.1.3Skenovací mikrovlnná mikroskopie.....	9
1.2KOAXIÁLNÍ REZONÁTOR.....	11
1.3POUŽITÁ ZAŘÍZENÍ.....	13
1.3.1Spektrální analyzátor FSH3 [10].....	13
1.3.2Mikro-poziční systémy firmy PI.....	18
2PRAKTICKÁ ČÁST.....	33
2.1KONSTRUKČNÍ PRVKY MĚŘICÍ SOUSTAVY.....	33
2.1.1Uspořádání mikroskopu.....	33
2.1.2Mikrovlnný rezonátor.....	35
2.1.3Posuvy při snímání.....	40
2.2TECHNOLOGIE MĚŘENÍ.....	42
2.2.1Podprogramy.....	43
2.2.2Sledování pozice.....	46
2.2.3Volba rychlosti a zrychlení.....	47
2.2.4Rozsah posuvů.....	48
2.3NAMĚŘENÁ DATA.....	49
2.3.1Pokusná měření.....	49
2.3.2Měření na vzorku se známou strukturou.....	52
3ZÁVĚR.....	65
SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....	67
SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK.....	68
SEZNAM OBRÁZKŮ.....	69
SEZNAM TABULEK.....	71

ÚVOD

Bezkontaktní zobrazovací techniky, pracující na principu různých interakcí s povrchem, umožňují pozorování reálného povrchu vzorku s rozlišením jednotlivých atomů. Tyto zobrazovací metody, nazývané se rastrovací sondová mikroskopie, jsou poměrně nové, ale za dobu své existence již vzniklo mnoho příbuzných technik. Jako například SNOM (rastrovací tunelová mikroskopie), AFM (mikroskopie atomových sil), v neposlední řadě také NSMM (skenovací mikrovlnná mikroskopie) a mnoho dalších.

Zejména skenovací mikrovlnná mikroskopie zaznamenala v poslední době nárůst. V několika posledních letech se několik týmů vědců a odborných pracovníků z různých koutů světa podílelo na rozvoji skenovací mikrovlnné mikroskopie. Tyto výzkumy vedly k mnoha posunům ve zdokonalování mikrovlnné mikroskopie.

Principem metody je sledování změny rezonančních křivek vysokofrekvenčního signálu (ten se pohybuje v řádech GHz) na základě měnícího se reliéfu povrchu snímaného objektu.

Náplní diplomové práce je sestavení měřícího pracoviště pro aplikaci mikrovlnné mikroskopie. Nejprve je nutné navrhnutí sestavení pracovní plochy, která by pohlcovala a tlumila nežádoucí vibrace, jež by mohly negativně ovlivnit výsledky měření. Poté navrhnutí a konstrukce koaxiálního rezonátoru s možností regulace vysunutí hrotu.

Pohyb snímaného objektu zajišťují mikroposuvy, které je nutné naprogramovat pro potřeby snímání. Výsledný signál je sledován spektrálním analyzátozem FSH3 od firmy Rohde&Schwarz.

Tato diplomová práce je týmovou prací, na níž jsem spolupracoval s Bc. Ondřejem Trochou. Úkolem kolegy Ondřeje Trochty je navrhnutí a naprogramování softwaru pro zpracování naměřených dat a následné zobrazení snímaného povrchu. Tímto bych mu chtěl poděkovat za příkladnou spolupráci na projektu aplikace skenovací mikrovlnné mikroskopie.

1 TEORETICKÁ ČÁST

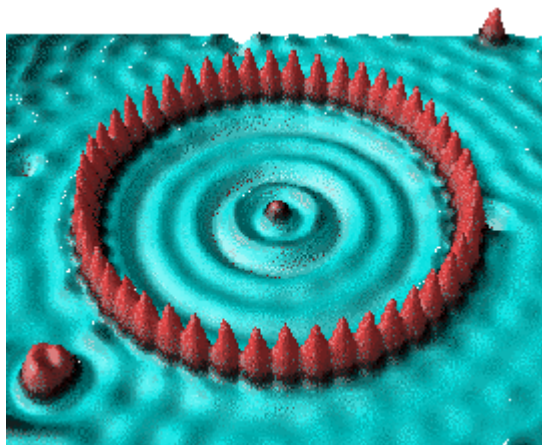
1.1 Úvod do rastrovací sondové mikroskopie

V roce 1981 byl vynalezen první rastrovací tunelový mikroskop, který umožnil pozorování reálného povrchu vzorku s rozlišením jednotlivých atomů. Jeho tvůrci, pánové G. Binning a H. Rohrer, za to brzy obdrželi Nobelovu cenu (1986).

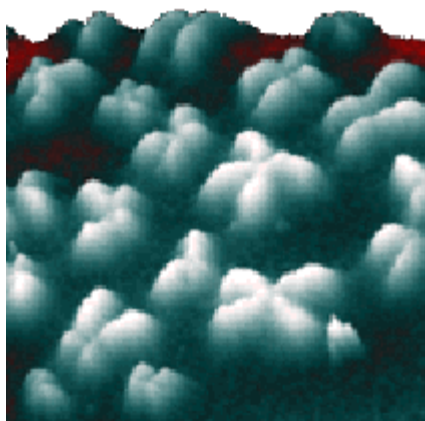
Od tohoto přístroje byla odvozena celá řada příbuzných technik využívajících různých interakcí s povrchem. Souhrnně se označují jako rastrovací sondová mikroskopie. Zde zejména vyniká mikroskopie atomových sil, která umožnila měření téměř všech i nevodivých materiálů.

Úspěch těchto technik spočívá v jejich široké použitelnosti. Umožňují nejen zobrazovat povrch materiálu, ale i měřit jeho vlastnosti na atomární úrovni a manipulovat s jednotlivými atomy. To vše navíc v různých prostředích - na vzduchu, ve speciální atmosféře, v kapalinách, ve vakuu a za nízkých i vysokých teplot (stovky stupňů Celsia chladu i tepla).

Staly se tak nepostradatelné v mnoha vědních oborech, od studia pevných látek po chemii a biologii. Jsou také inspirací pro umění, neboť odhalují krásy přírody a bohatost tvarů v mikroskopickém měřítku (obr.1 a 2).



Obr. 1. Stojatá elektronová vlna v kruhu atomů železa na povrchu mědi (STM)



Obr. 2. Lidské chromozomy (AFM)

Mikroskopických technik bylo od doby vynalezení prvního rastrovacího tunelového mikroskopu vyvinuto již mnoho. Za zmínku stojí hned několik, jako například [8] :

- Mikroskopie laterálních sil (LFM)
- Mikroskopie modulovaných sil (FMM)
- Mikroskopie magnetických sil (MFM)
- Mikroskopie elektrostatických sil (EFM)
- Skenovací teploměrná mikroskopie (SThM)
- Skenovací tunelová spektroskopie (STS)
- Skenovací tunelovací potenciometrie (STP)
- Mikroskopie balisticky emitovaných elektronů (BEEM)
- Skenovací kapacitní mikroskopie
- Tunelovací fotonová mikroskopie (PSTM)
- Mikroskopie blízkého optického pole (NFSOM)
- Rastrovací optická mikroskopie (SNOM)
- Skenovací mikrovlnná mikroskopie (NSMM)

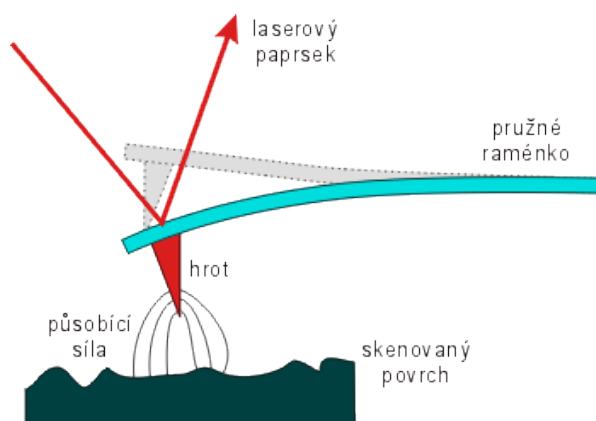
1.1.1 Rastrovací optická mikroskopie [5]

Rastrovací optická mikroskopie blízkého pole (SNOM) je poměrně nová metoda, která umožňuje zvýšení rozlišovací schopnosti spektroskopických metod. Ostrá sonda se pohybuje těsně nad povrchem vzorku (≈ 10 nm) a snímá spektroskopickou informaci ne z celého vzorku najednou, jak tomu bylo u mikroskopie vzdáleného pole, ale bod po bodu. Rozlišení SNOM je omezeno pouze poloměrem vrcholu sondy a vzdáleností sondy od povrchu vzorku. SNOM může pracovat, jak v transmisním tak i reflexním režimu snímání. Ostrá sonda může pracovat jako vysílač budícího záření tak i přijímač záření prošlého nebo odraženého od vzorku. Lze však rovněž osvětlovat celý povrch vzorku najednou a sonda má pak pouze funkci přijímače.

Rastrovací optickou mikroskopii blízkého pole lze využít nejen pro zvýšení rozlišení klasických optických metod. V ideálním případě lze získat spektroskopickou informaci pouze jedné molekuly, ale SNOM nachází rovněž široké praktické uplatnění, např. ve zvýšení hustoty uchovávání dat v optických záznamových médiích nebo v nanolitografii.

1.1.2 Mikroskopie atomové síly [5]

(AFM) je moderní experimentální metoda, umožňující snadnou charakterizaci povrchu pevných látek. Tato metoda využívá malé sondy, která v těsné blízkosti povrchu mapuje topografii vzorku. U mikroskopie atomové síly jsou k detekci vzdálenosti sondy od povrchu využity meziatomární síly, které způsobují nepatrné deformace držáku sondy. Pomocí optické detekce laserovým paprskem je pak vyhodnocována poloha této sondy a topografie povrchu je dále softwarově zpracovávána.



Obr. 3. Princip mikroskopie atomové síly

1.1.3 Skenovací mikrovlnná mikroskopie

Skenovací mikrovlnná mikroskopie se dá považovat za poměrně novou mikroskopickou metodu, která se teprve vyvíjí. Mikrovlnná mikroskopie je druh mikroskopie, která používá k vykreslení povrchu materiálu mikrovln. Médium pro přenos elektromagnetického signálu

je koaxiální mikrovlnný rezonátor. Uvnitř rezonátoru dochází ke generování a snímání vysokofrekvenčních signálů. K interakci mezi hrotem rezonátoru a vzorkem dochází na velmi malé vzdálenosti a to $0,1\ \mu\text{m}$ a méně. Rozlišovací schopnost se pohybuje v nanometrech. Mění se reliéf povrchu vzorku mění rezonanční frekvenci a faktor kvality rezonátoru. Na základě těchto změn je poté vykreslen povrch snímaného objektu.

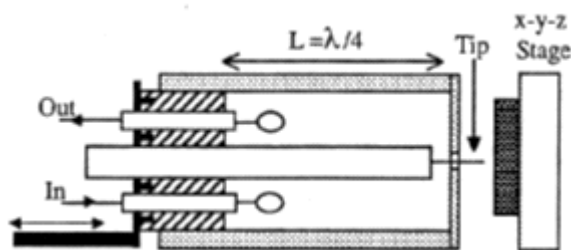
1.2 Koaxiální rezonátor

Koaxiální rezonátor od doby své první funkční verze v podstatě nezměnil nijak výrazně svoji podobu. Změny provedené na rezonátoru vedly ke zlepšení kvality snímání. Koaxiální rezonátor byl poprvé navržen před více jak deseti lety a od té doby se jím zabývalo hned několik laboratoří, které zavedly prvky ke zdokonalení rezonátoru.

Návrhů na vylepšení koaxiálního rezonátoru se za tu dobu až do dneška objevilo hned několik. Jedním z návrhů bylo ladění rezonátoru pomocí šroubu procházejícího dutinou. Dalším návrhem bylo zavedení teflonového obalu uvnitř dutiny pro dosažení ideálního poměru pro zvýšení faktoru kvality. A posledním známým vylepšením je ladící dutina.

Všechny výše zmiňované koaxiální rezonátory využívají dvou 50Ω koaxiálních kabelů vstupujících do rezonátoru. Na konci obou kabelů jsou udělány vazební smyčky. Jedna smyčka na kabelu jdoucím z generátoru signálu budí uvnitř rezonátoru magnetické pole a druhá ho přijímá a vede do spektrálního analyzátoru. Následně jsou pak sledovány změny signálu.

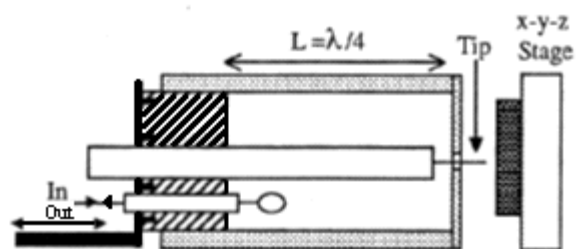
Námi zvolený koaxiální rezonátor byl sestaven dle návrhu konstrukce vědců ze Sogang Univerzity v Soulu a to především Jooyoung Kim, Myung Sik Kim, Kiejin Lee, Jaekwang Lee, Deokjoon Cha a Barry Friedman. [1] Chci podotknout, že my jsme z jejich návrhu jen vycházeli. Zapojení tohoto rezonátoru má dvě varianty a to zapojení s můstkem VSWR FSH-Z2 (dodávaného se spektrálním analyzátozem FSH3) nebo bez můstku.



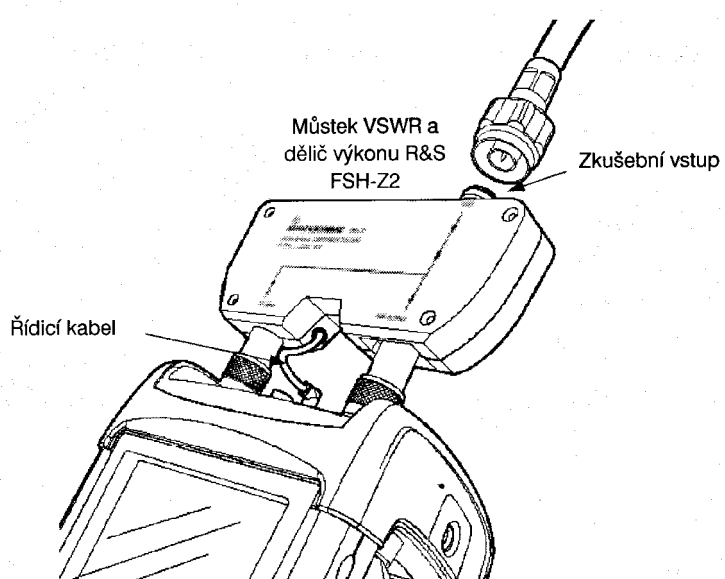
Obr. 4. Navržený rezonátor podle [1]

Na obrázku je znázorněn rezonátor s uzavřenou dutinou zapojený bez můstku. Jedná se o $\lambda/4$ koaxiální rezonátor, protože právě ve vzdálenosti $\lambda/4$ by mělo v uzavřené dutině docházet k rezonanci. Při našem měření s uzavřenou dutinou jsme však dospěli ke zjištění, že k žádné odezvě mezi vzorkem a rezonátorem nedochází. Poklop na spodní části rezonátoru jsme pokusně odejmuli a poté již se nám podařilo najít rezonanční křivku s odezvou na přiložený vzorek.

Druhou variantou je zapojení s můstkem VSWR FSH-Z2. Jde o měření ztrát odrazem. V tomto případě vstupuje do rezonátoru pouze jeden koaxiální kabel. Ten je přiváděn na vstup.



Obr. 5. Rezonátor s můstkem

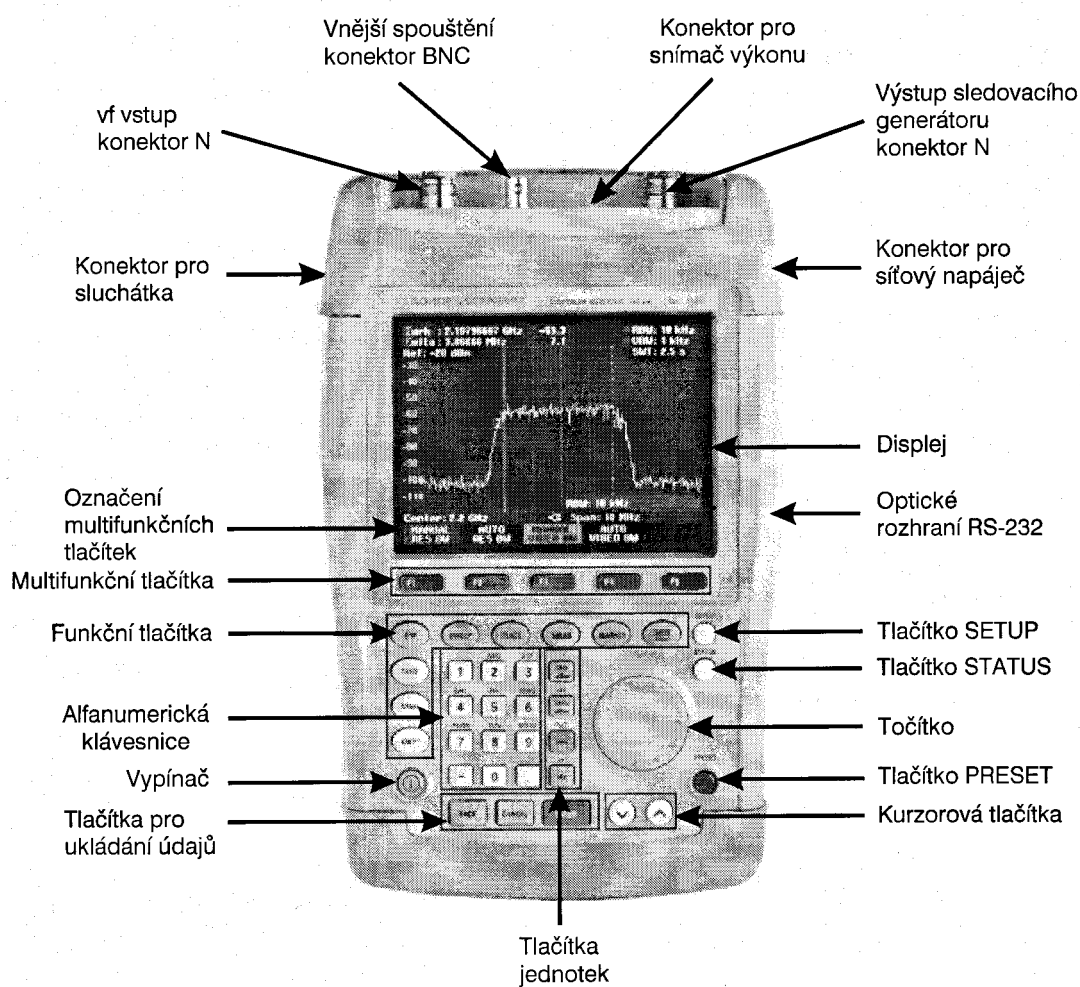


Obr. 6. Zapojení můstku na FSH3

1.3 Použité zařízení

1.3.1 Spektrální analyzátor FSH3 [10]

Ruční kompaktní spektrální analyzátor FSH3 od Rohde&Schwarz (typ: 1145.5850.13) byl navržen pro práci v laboratorních i externích podmínkách pro servis a údržbu vysokofrekvenčních zařízení.



Obr. 7. Přední panel spektrálního analyzátoru FSH3

Konektory spektrálního analyzátoru FSH3

- Vysokofrekvenční vstup (RF INPUT)

Slouží k připojení zkoušeného zařízení kabelem opatřeným konektorem typu N. Maximální povolený stálý výkon, který je možno přivést na vf vstup je 20 dBm (100mW).

- Vstup vnějšího spouštění (EXT TRIG)

Vnější signál, spouštějící měření, je možno připojit ke konektoru EXT TRIG, který je typu BNC. Úrovně spouštění odpovídají signálu TTL.

- Konektor vnějšího napájení
- Konektor pro sluchátka
- Optické rozhraní RS-232

Optické rozhraní RS-232 slouží k propojení analyzátoru s tiskárnou nebo počítačem. Spojení se provádí optickým kabelem R&S FSH-Z34

- Konektor pro snímač výkonu

Konektor je určen pro připojení snímače výkonu R&S FSH-Z1. Konektor je použit pro napájení snímače a přenos dat z rozhraní R&S FSH-Z1.

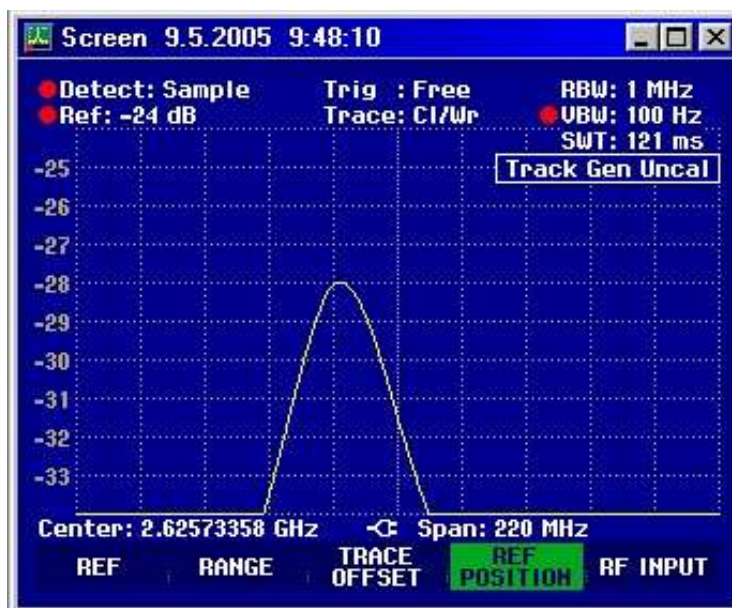
- Výstup sledovacího generátoru

Sledovací generátor se ke zkoušenému zařízení (DUT) připojuje přes konektor typu N. Jmenovitá výstupní úroveň je -20 dBm (100 μ W).

Funkce FSH3

Základní úlohou spektrálního analyzátoru je měření úrovně a frekvence sinusových signálů. Analyzátor zobrazuje frekvenční spektrum od 100 kHz do 3 GHz, což je maximální frekvenční rozsah (SPAN) přístroje. Pokud je potřeba provést podrobnější analýzu měřeného signálu, je třeba zmenšit frekvenční rozsah.

Analyzátor umožňuje zjišťovat úroveň signálu a jeho frekvenci prostřednictvím kurzorů umístěných na zobrazovaném průběhu. Hodnoty se zobrazují na displeji.



Obr. 8. Ukázka displeje spektrálního analyzátoru FSH3

Spektrální analyzátor FSH3 má hned několik funkcí:

- měření úrovně
- měření frekvence
- měření harmonických složek
- měření přenosu dvojbranových zařízení
- měření ztrát odrazem
- měření vzdálenosti poruch

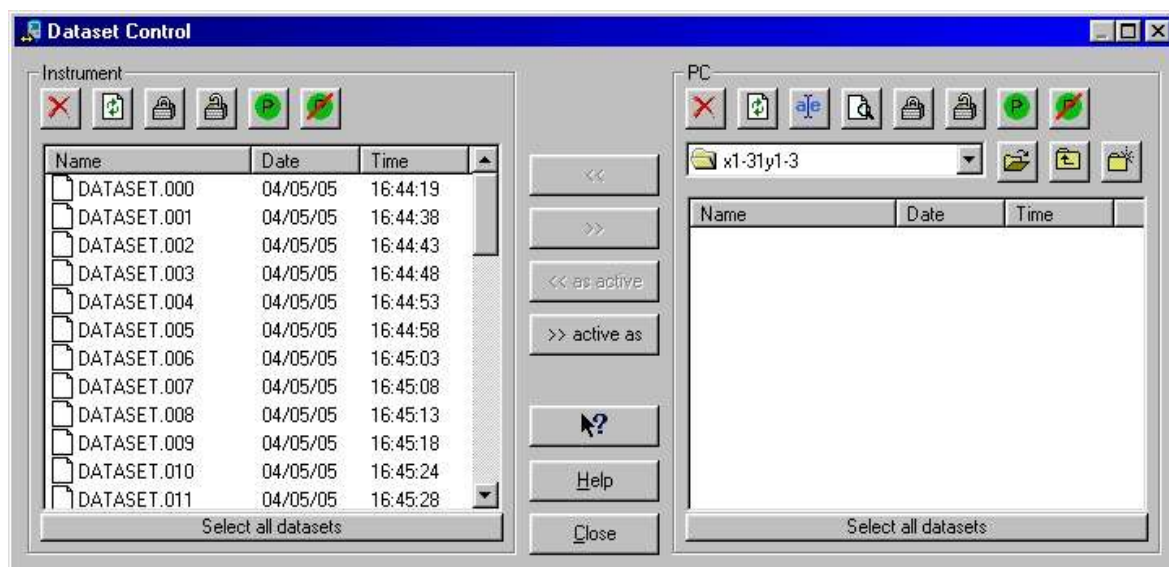
Frekvenční rozsah analyzátoru na ose x je od 10 kHz do 3 GHz a na ose y je rozlišovací schopnost zesílení od 1 dB do 10 dB. Amplituda má rozsah od 20 dB do -80 dB.

Uložení výsledků měření

Nastavení přístroje a výsledky měření je možné uložit do vnitřní paměti CMOS RAM. Výsledky a nastavení jsou vždy ukládány společně tak, že při vyvolání výsledků je analyzátor FSH3 nastaven stejným způsobem jako při původním měření. Analyzátor umožňuje uložit maximálně 100 měření. Uložená data lze kdykoli z paměti vyvolat a porovnat na displeji s aktuálním průběhem. Oba průběhy jsou od sebe barevně odlišeny.

Analyzátor umožňuje tisk zobrazených výsledků na tiskárně.

Naměřená data je možné přenést přes optické rozhraní RS-232 do počítače a tam je následně zpracovat. K tomuto účelu slouží software pro přenos dat FSH View. Po dobu přenosu dat je analyzátor FSH3 zablokovaný. V našem případě jsme možnosti přenášet data využívali hlavně z důvodu velkého množství naměřených dat a mnohonásobného naplnění paměti FSH3.



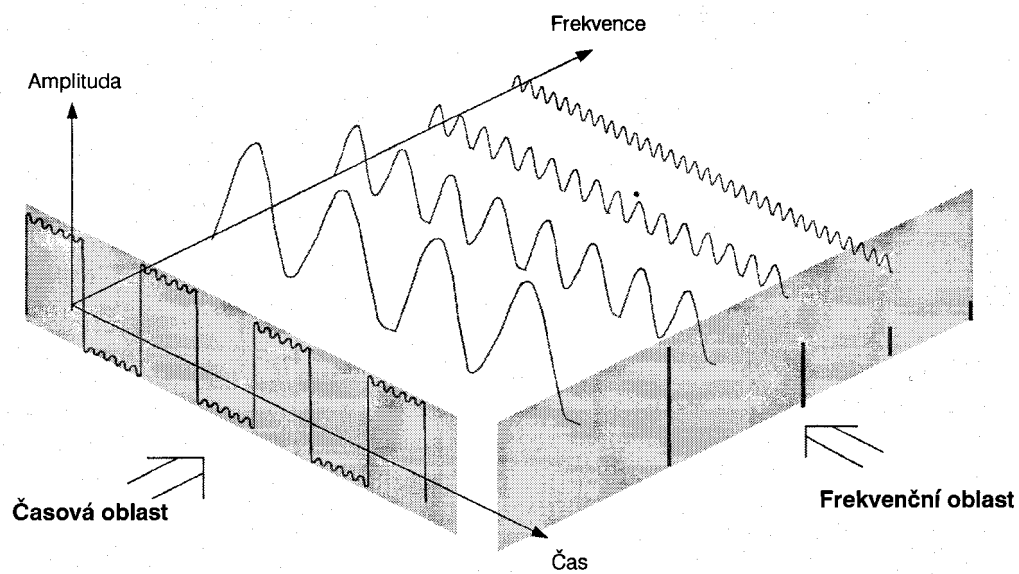
Obr. 9. Okno pro přenos dat z FSH3 do počítače

Jak pracuje spektrální analyzátor

Vysokofrekvenční signál může být analyzován v časové nebo frekvenční oblasti. V časové oblasti lze sledovat, jak se mění úroveň signálu v závislosti na čase, například na osciloskopu. Ve frekvenční oblasti se pro zobrazení frekvenčních složek signálu používá spektrální analyzátor.

Oba režimy jsou v podstatě rovnocenné, protože aplikací Fourierovy transformace obvykle převádí jakýkoliv signál na spektrální složky. V závislosti na charakteristikách signálu je však jedna metoda výhodnější pro měření než druhá. Pouhým pohledem na osciloskop lze například okamžitě určit, zda je tvar signálu sinusový, obdélníkový nebo pilový. Není však možné určit, zda se jedná o harmonický signál nebo zda obsahuje další frekvenční složky nízké úrovně. To umožňuje pouze spektrální analyzátor.

Následující obrázek ukazuje teoretický základ obou metod měření. V časové oblasti zobrazuje osciloskop část signálu, který je přibližně obdélníkový. Stejný signál, zobrazený spektrálním analyzátozem, má čárové spektrum, to znamená základní frekvenci a harmonické složky.



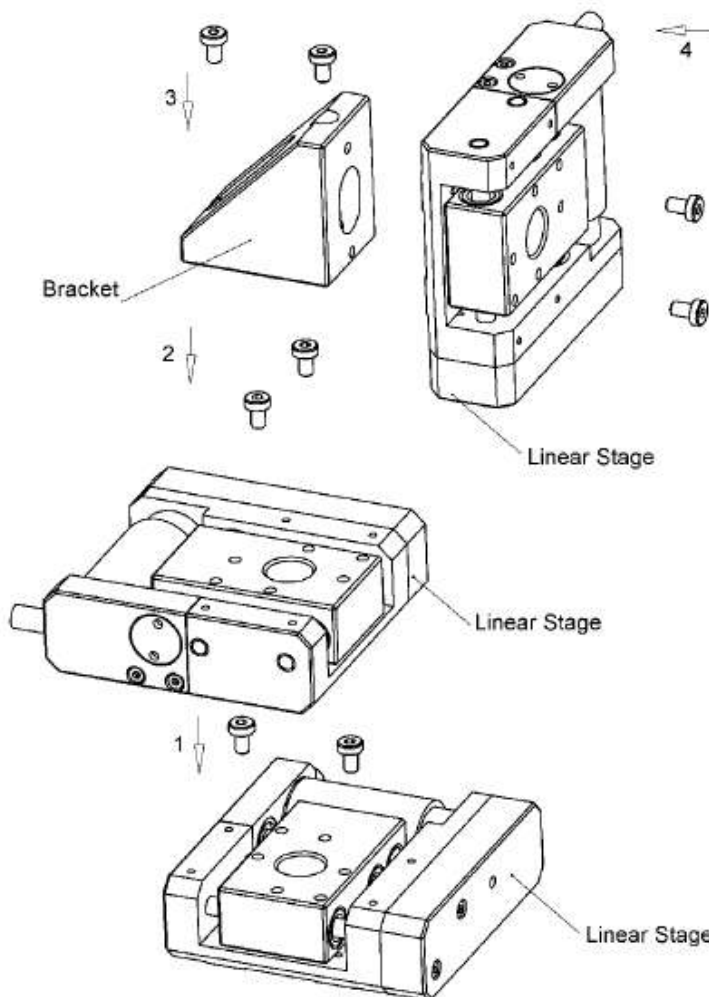
Obr. 10. Popis osciloskopu a spektrálního analyzátoru

1.3.2 Mikro-poziční systémy firmy PI

Mikroposuvy M-110.1DG[12]

Pro pohyby snímaného vzorku jsme použili mikroposuvy firmy PI, která se zabývá piezo a nano pozičními systémy. K dispozici nám byly poskytnuty mikroposuvy s rozpětím lineárního pohybu 5 mm. Jde o typ M-110.1DG, jenž má garantovanou rozlišovací schopnost $0,5 \mu\text{m}$. Nejmenší možný dosažený posuv je o $0,0058 \mu\text{m}$. Ovšem v případech kdy je vyslán požadavek na tento nejmenší možný posuv, musí brát uživatel v potaz poziční chybu pohybující se v řádech setin mikrometru. Proto je uváděna výrobcem garantovaná rozlišovací schopnost. Maximální rychlost mikroposuvu je 2 mm/sec .

Mikroposuvy lze k sobě jednoduše pospojovat a poskládat tak trojosý pohybový aparát.



Obr. 11.
Nákres
sestavy
trojosého
mikroposuvu

Na tyto mikroposuvy je pak ještě možné, pro docílení větší rozlišovací schopnosti, přiinstalovat nanoposuvy.

Obr. 12.
Sestava
trojosého
mikroposuvu
s trojosým
nanoposuvem

Aplikace:

- Metrologie
- Kontrola kvality
- Testovací vybavení
- Mikroobrábění

Pro řízení pohybů mikroposuvů je zapotřebí Mercury:DC-motor kontroleru. Ten je dodáván též firmou PI.

Mercury: DC-motor kontroler [11]

Mercury je miniaturizovaný servokontroler určený k řízení pohybů ve výzkumu a průmyslových aplikacích. Mercury poskytuje kompletní sestavu řídicího systému - samo řídicí systém pro menší motor typicky užívaný ve vysokopřesnostních pozičních systémech, který je velice kompaktní.

Mercury využívá zpětnovazební kvadratický enkodér signálu pro určení pozice. Závisějící na rozkladu enkodérové stupnice můžeme dosáhnout přesnosti pohybu až 0,05 mikrometru.

Mercury poskytuje PID servo-řízení pozice, rychlosti a zrychlení. Ačkoli každý parametr je programovatelný, každý lze také nastavit na určitou defaultní hodnotu po studeném startu.

Mercury je vybaven softwarem s vestavěnými příkazy a tahy, jež velmi usnadňují řízení motoru (pohyb posuvů na žádanou pozici) dle požadavků uživatele. Pokud není zvoleno zrychlení a rychlost, pak Mercury je řídí podle naposledy nejčastěji užívaných nastavení pro odpovídající parametry – to znamená, že není nutné nastavovat zrychlení a rychlost znovu pro každý pohyb.



Obr. 13. Mercury kontroler - srovnání velikosti s dolarovou a euro mincí

Elementy přední a zadní části Mercury

Obr. 14. Pohled na přední a zadní část Mercury

Tab. 1. Elementy přední části Mercury

Přední část		
RS-232 (in)	Sub-D 9(m)	sériový datový vstup
RS-232 (out)	Sub-D 9(f)	sériový datový výstup (spojení s dalším Mercury)
STA	LED červená/zelená	stav motoru: zelená: servomotor jede červená: servomotor nejede
ERR	LED červená/zelená	příkazová chyba: zelená: správný příkaz červená: chybný příkaz
ADDRESS	DIP	přepínače volby adresy

Tab. 2. Elementy zadní části Mercury

Zadní část		
12 až 15VDC	sudový konektor	Napájení
DIGITAL I/O		digitální vstup/výstup
MOTOR	Sub-D 15 (15)	přípojka motoru

Řízení více os

Mercury kontrolery můžou být zapojeny vzájemně do sítě. V řetězec přes RS 232 může být spolu spojeno až 16 Mercury kontrolerů. Při vytváření sítě se adresuje každý Mercury kontroler jednotlivě. Během komunikace s jedním kontrolerem je zastavena komunikace všech zbývajících kontrolerů v síti, ale není ukončen pohyb spojených os, servořízení a makro exekuce pokračuje. Komunikace s vybraným kontrolerem může být kdykoli přerušena a naopak zahájena komunikace s jiným kontrolerem.

Přepínání mezi kontrolery vyžaduje odeslání ASCII charakteru 0x01, který následuje vedle adresy. Tato sekvence je odkázána do kódu volby adresy. Každý kontroler porovnává poslaná čísla adres se svou vlastní adresou. Jestliže tam je kladná odezva, kontroler umožní vyložit příkaz a reagovat na něj a na následující přenosy příkazů. Jestliže je odezva záporná, dojde k nulové reakci a k ignorování následujících přenosů kromě kódu volby adresy.

Kontroler může pokračovat dále v interních makrooperacích, i když nejsou dále adresovány. Toto umožňuje u všech spojených kontrolerů provést jejich jednotlivé makro-příkazy současně. Není žádná přímá komunikace z kontroleru do kontroleru, pouze z kontroleru do PC. Hostitelský program musí uchopit volbu adresy a přesouvat posloupnost mezi různými kontrolery. Tento model komunikace nastavuje hranice interpolace a mnoho-osého řízení tak, že se podobá vykonávání podmíněného pohybu.

Nastavení DIP přepínače

Použití popisku na 8-bitovém přepínači „ADDRESS“.

Přepínač 1-4: adresování kontrolerů (0-15) viz tab. níže

Přepínač 5-6: přenosová rychlost

Přepínač 7-8: nepoužívány



Obr. 15. přepínač nahoře - ON
přepínač dole – OFF

Adresování přepínače 1-4 a nastavení přenosové rychlosti (přepínače 5 a 6)

Tab. 3. Nastavení přepínače Address

	NASTAVENÍ ADRESOVÁNÍ				PŘENOSOVÁ RYCHLOST 9600			
	Přep. 1	Přep. 2	Přep. 3	Přep. 4	Přep. 5	Přep. 6	Přep. 7	Přep. 8
Address 0	ON	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 1	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 2	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 3	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 4	ON	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 5	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 6	ON	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 7	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 8	OFF	ON	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 9	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 10	OFF	ON	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 11	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 12	OFF	OFF	ON	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 13	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 14	OFF	OFF	OFF	ON	OFF	OFF	OFF	OFF
Address 15	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF	OFF

Přenosová rychlost 19200 (nestandardní) může být nastavena když přepínač 5 bude nastaven na OFF a přepínač 6 na ON, ale my jsme měli přenosovou rychlost nastavenou standardní.

K řízení posuvů jsme použili jen dva servokontrolery a tudíž jsme se řídili při nastavení DIP přepínače dle prvních dvou řádků tabulky – address0 a address 1.

Typy příkazů

Pro programování Mercury kontroleru je dostupných přes 50 příkazů. Tyto příkazy slouží k nastavení parametrů, řízení pohybu a ke čtení hodnoty z kontroleru.

V rámci možností je struktura instrukcí navržena k minimalizaci námahy požadované k užití Mercury.

Příkazy mohou být rozděleny do následujících skupin:

- Základní příkazy Jedna funkce, vykonány okamžitě na začátku
- Jedno-charakterový příkaz Jeden charakter, okamžitě jsou hlášeny nebo prováděny
- Směs příkazů Více funkcí, provedeny jeden po druhém
- Macro příkazy Příkazy k vytvoření, úpravě nebo mazání makro posloupnosti příkazů

Základní příkazy:

Základní příkaz je zapsán okamžitě po načtení nového řádku (<CR>). Příkaz je opakován vždy na novém řádku (další <CR> - před nímž není žádný příkaz). Pro znovu zapsání <CR> na další řádek stačí klepnout jednoduše na klávesu <ENTER>.

Příklad:

MR2000 <CR>	Pohyb motoru o 2000 kroků do cílové polohy
MN <CR>	Nastavení motoru do pozice – ON
GH <CR>	Nastavení motoru do základní pozice (jdi domů)
TP <CR>	Zpráva pozice pro motor
MA20000 <CR>	Pošli motor do absolutní pozice 20 000

Oba, vrchní i spodní případ z níže uvedených příkladů charakteru, jsou platné a mezera je povolena.

TP <CR>:	Zprávy "P:+000000000"
tp <CR>	Zprávy "P:+000000000"

Jednocharakterové příkazy

Jedno-charakterové příkazy jsou hlavně výhodné, že mohou být použity během vykonávání makra nebo směs příkazů bez přerušení běhu posloupnosti.

Směs příkazů

Směs příkazů je řada základních příkazů oddělených od sebe čárkou. Tímto způsobem (níže uvedeným) je možné seřadit několik příkazů za sebe. Tento mnohonásobný příkaz bude potom vyřízen postupně – příkaz po příkazu jak jdou po sobě.

Skladba pro směs příkazů je:

CMD[n], CMD[n], ..., ..., <CR>

Příklady:

MR2000,WS100,MR-4300 <CR>

mr5000,ws100,wa500,ma12000,ws100,wa800,tp<cR>

MA3500, WS100,WA120,tp<CR>

Směs příkazů v následujícím příkladu instruuje motor k pohybu o 1 000 kroků v kladném směru, potom čekej v této pozici 500 milisekund, vrať se do originální pozice, čekej 1 vteřinu a potom opakuj postup 5-krát.

Příklad: "MR1000,WS100,WA500,MR-1000,WS100,WA1000,RP5" <CR>

Směs příkazů může obsahovat až 19 příkazů.

Makro příkazy

Makra můžou být pro programátora mocným nástrojem. Makro příkazy jsou základní příkazy nebo směs příkazů uskladených pod makro číslicí.

Více o makro příkazech v následující kapitole.

Zprávy

Některé příkazy Mercury kontroleru můžou poslat šňůru dat do hostujícího PC, např. to může být informace o pozici, parametru servo-řízení, pomoc nebo jinou informaci. Tyto příkazy, někdy nazývané zprávové příkazy, jsou snadno zapamatovatelné, protože obvykle začínají písmenem T (řici) nebo G (dostat). Například: TT (řici cíl), nebo GP (dostat proporciální složku).

Práce s makro příkazy

Jak již bylo zmíněno, jsou makro příkazy základní příkazy nebo směs příkazů uskladněných pod makro číslicí uvnitř Mercury kontroleru.

Definice makra

Vymezení makro příkazu:

vložení MD n (makrodefinice) příkazu jako první instrukce ve směsi příkazů. Zbývající příkaz nebo příkazy ve směsi příkazů jsou uskladněny v Mercury kontroleru pod makro číslicí n .

Příklad 1: MD1,MR5000 <CR>

Základní příkaz "MR5000" je uskladněný jako makro příkaz #1. Příkaz k pohybu je vyřízen až poté, kdy je vyřízen makro příkaz.

Příklad 2: MD3,MR1000,WS100,MR-1000,WS100,RP5 <CR>

Příkazem MD3 jsme šňůru příkazů "MR1000,WS100,MR-1000,WS100,RP5" označili jako makro #3.

Provedení (spouštění) makra

K provedení výše uvedeného makra můžeme použít také příkaz EM3. Na rozdíl od MD# příkazu, EM# příkaz může být použit kdekoli ve "směsi příkazů".

Zastavení makra

Makro příkazy se ukončí buď přirozeně, a to když jsou úplně vyřízeny nebo mohou být zastaveny, když kontroler obdrží nějaký charakter kromě jedno-charakterového příkazu, <CR>, nebo kód volby adresy.

Příklad 3:

Předpokládejme, že právě běží makro "MR500,WS200,RP10000" a nebude ukončeno až do doby kdy se 10 000-krát provede pohyb o 500 kroků. Jestliže chcete zastavit tuto posloupnost, stačí poslat charakter "x" bez <CR> a makro se zastaví.

Makro může znovu začít od "EM n " kde n je číslo makra.

Omezení

Na 32 makro posloupností a každá může mít až 16 “základních příkazů”, může být uskladněno ve flash paměti Mercury kontroleru. 31 makro posloupností (čísla 1-31) je dostupných pro hlavní použití. Makro #0 je speciální: je nazýváno “auto-start makro” a běží automaticky po studeném startu nebo resetu.

Software



Obr. 16. Zobrazí se po spuštění MMCRun.exe

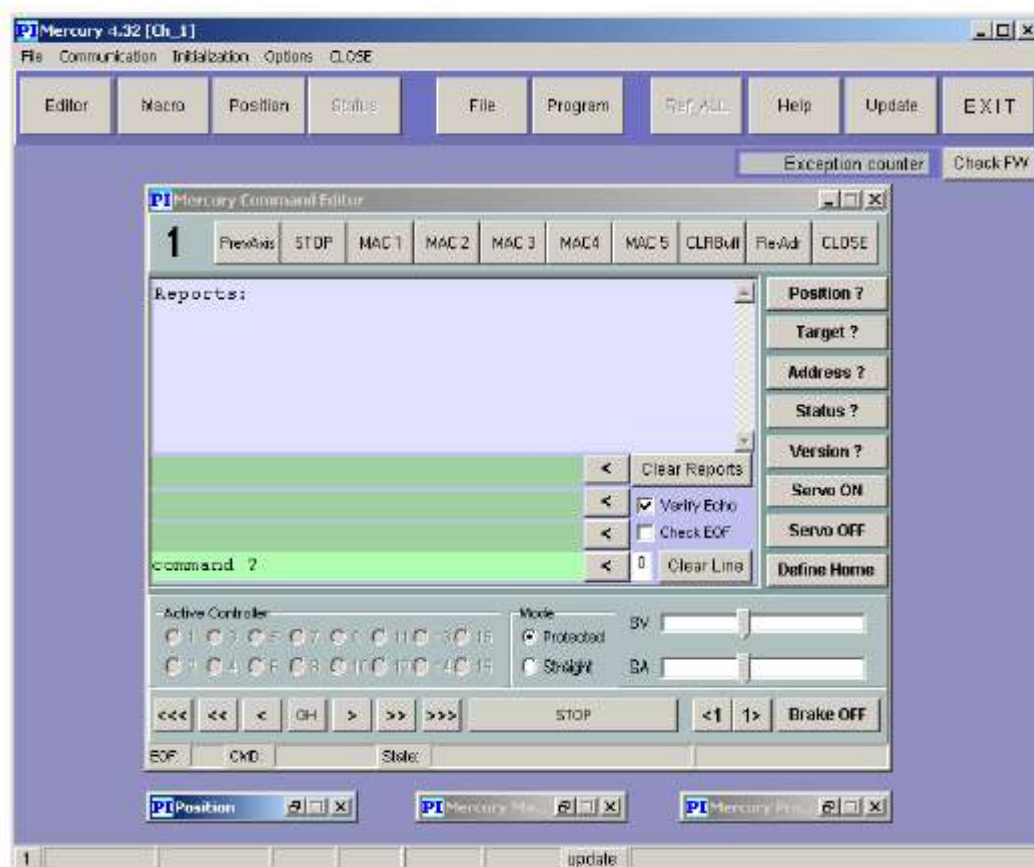
Software dodávaný k obsluze Mercury kontrolerů podporuje až 16 kontrolerů zapojených do řetězce RS-232 kabelem. Jestliže je zapojen pouze jeden Mercury kontroler, je vybrána konkrétní osa a číslo zařízení (číslo zařízení je od 1 do 16, zatímco fyzická adresa kontroleru od 0 do 15).

Jestliže je však spojeno více Mercury kontrolerů do sítě, pak je nutné vybrat jednu ze dvou sítí a to dle počtu zapojených Mercury kontrolerů, „1-4“ (jestliže počet zařízení je menší nebo stejný jak 4) nebo síť pro „1-16“ (je-li je počet Mercury kontrolerů větší jak 4).

Stisknutí tlačítka „START“ nás přepne do hlavní obrazovky.

Hlavní obrazovka

Hlavní obrazovka má velké pole, které slouží jako jakýsi psací stůl, na němž jsou umístěna okna podaplikací a tlačítka k otevření oken těchto podaplikací. Řízení aplikací tak je stále pod kontrolou.



Obr. 17. Hlavní obrazovka po spuštění

Nejdůležitější okno se otevírá příkazem „editor“ a okna „position“, „macro manager“ a „program editor“ se minimalizují. Pro použití nějakého zmenšeného okna (editor, macro, position...) stačí na něj jen klepnout.

Okno editor slouží jak k řízení pohybů, tak i k jejich sledování.

Editor okno je prostředkem pro centrální řízení podaplikací (provedených např. v okně macro manager či mercury file manager), jejich monitorování a popřípadě jejich dodatečnou úpravu.

Okno má část „reports“, jež zobrazuje uživateli požadované zprávy, a „command?“, za pomoci nichž je možné zadávat příkazy Mercury kontroleru.

Editor okno obsahuje též mnoho pomocných tlačítek pro usnadnění práce s Mercury kontrolerem.

Okno Position

Position okno ukazuje výsledky softwarové výzvy na pozici. Výzva pozice a poziční chyba může být zapnuta nebo vypnuta z kontroly odpovídajícími boxy. Jestliže je zaznačen i box SChar, pak výzvy na pozici pokračují i během makroexecuce. Position error ukazuje odchylku od zadané hodnoty a to buďto v kladném či záporném směru.

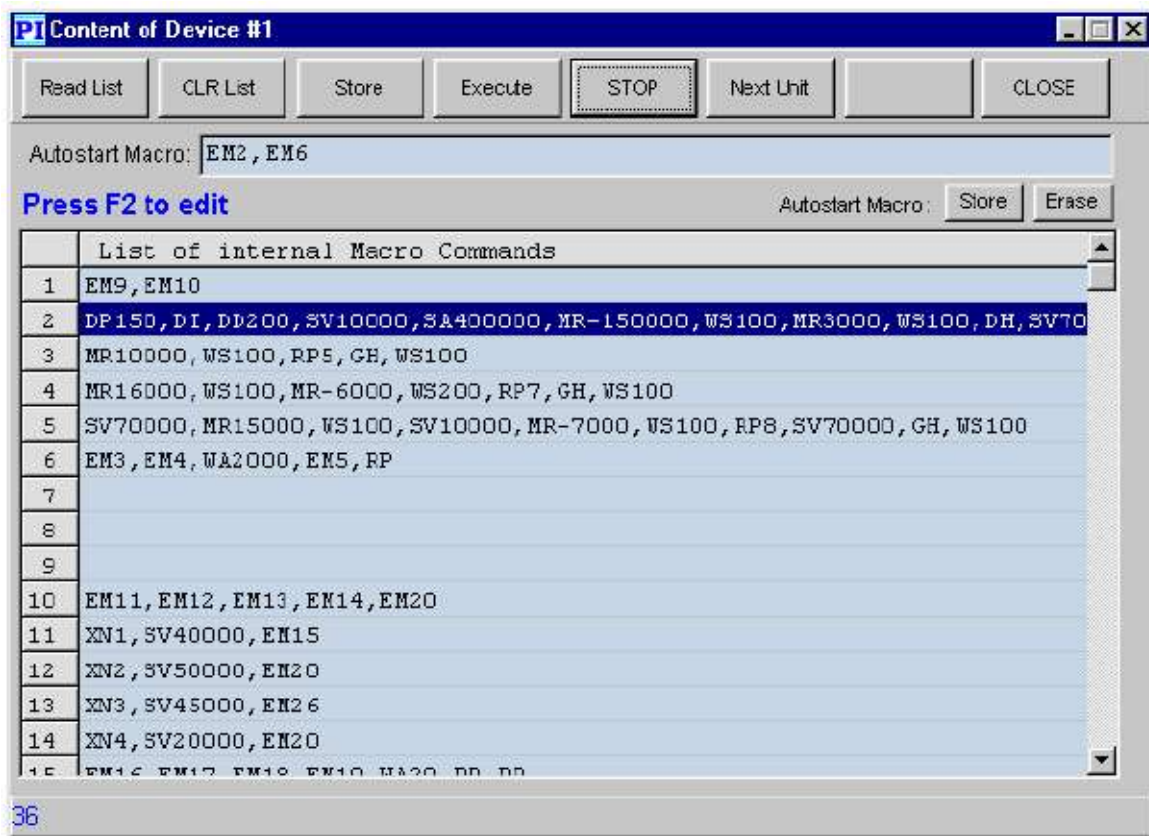


Obr. 18. Okno position

Macro manager

Macro manager umožňuje zobrazit okno pro úpravu makropříkazů. Posloupnost příkazů vytvořených v makro manageru je pak uskladněna v mercury kontroleru.

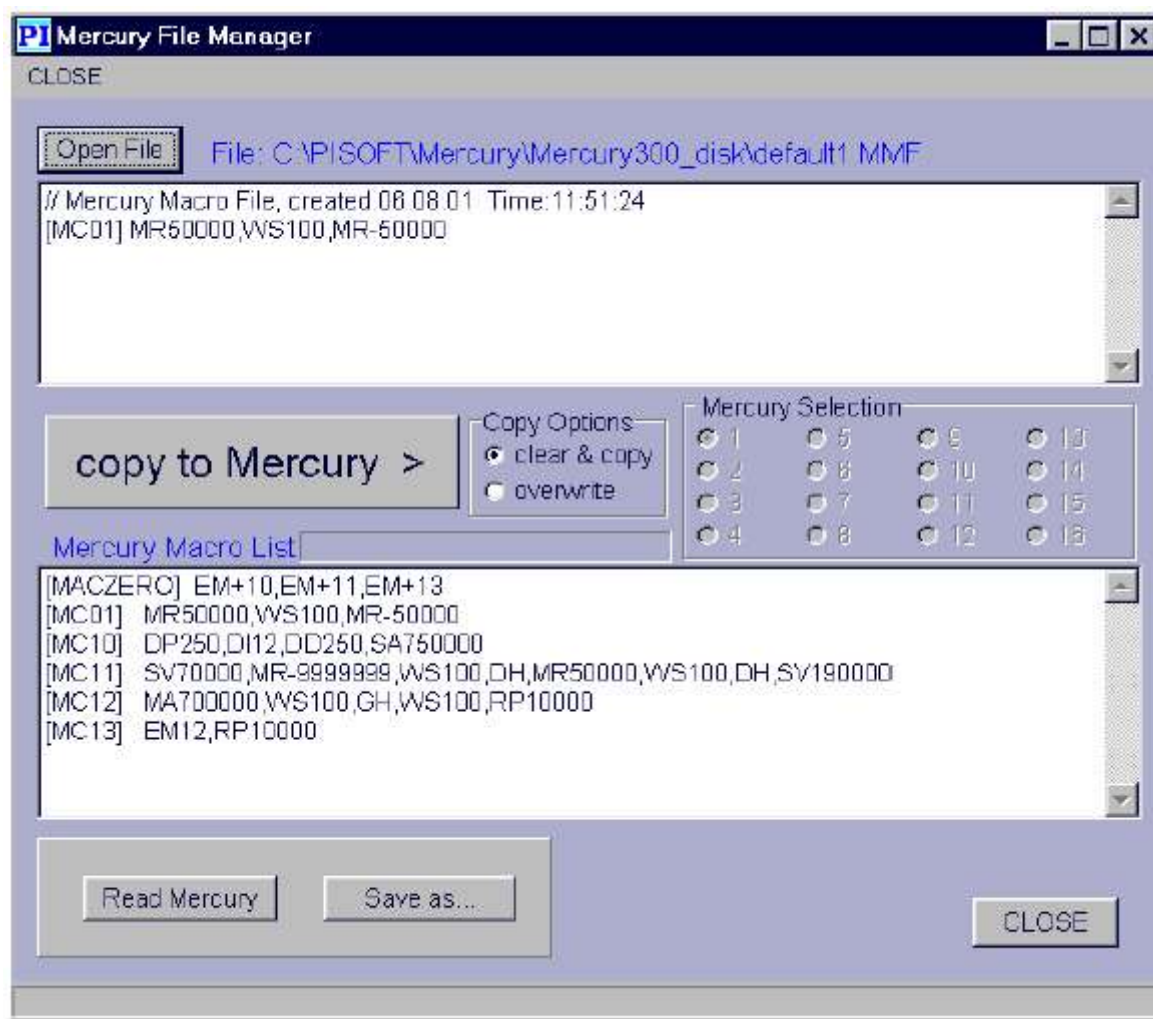
Každý jeden řádek je jedno makro. Existuje však možnost do jednoho makra vložit příkaz pro splnění několika jiných maker. Tlačítka ve vrchní části okna slouží k realizaci několika základních operací s vytvořenými makry.



Obr. 19. Okno macro manager

Mercury file manager

Mercury file manager se používá k downloadu, uploadu a kopírování makro posloupností mezi kontrolerem a hostitelským počítačem. V hostitelském počítači jsou posloupnosti uskladněny v souboru v ASCII formátu, takže každý textový editor, jako třeba notepad nebo word, může být použitý k editaci makro souboru.



Obr. 20. Okno macro file manager

Jeden soubor může obsahovat více jak jedno makro, číslo makra je zahrnuto v závorce před výrazem na začátku řádku.

Okno nám nabízí dvě základní funkce pro operaci se soubory – clear & copy a overwrite. Clear & copy a overwrite tlačítka ovlivňují způsob kopírování makra v pracovním listu na obrazovce do kontroleru po stlačení tlačítka „copy to mercury“.

Program editor

Program editor dovoluje vytvořit a řídit posloupnost příkazů, které jsou uskladněny v hostitelském PC.



Obr. 21. Okno program editor

Program editor umožňuje posloupnosti příkazů pro mnohonásobný mercury kontroler. Chod jednoho kontroleru může být koordinován s chodem dalších.

2 PRAKTICKÁ ČÁST

2.1 Konstrukční prvky měřicí soustavy

2.1.1 Uspořádání mikroskopu

Mikroskop se skládá z mechanické části – pracovní plochy k utlumení vibrací, polohovacího zařízení (umožňujícího pohyb ve dvou směrech), z rezonátoru (dutina s hrotem), stojanu a z elektrické části – zdroje signálu, sběru signálu a ovládání mikroposuvů. Generátorem i přijímačem signálu je v našem případě spektrální analyzátor Rohde&Schwarz FSH3. Důležitou vnější částí mikroskopu je vybavení, které by dle našich předpokladů mělo tlumit mechanické vibrace. Mikroskop může být dále vybaven dalším pomocným vybavením, jako je např. stíněná komora (slouží k ochraně před působením vnějších signálů).

Ochrana proti vibracím

Pro dosažení vysokého rozlišení je nutné zabezpečení proti vibracím. To je obvykle realizováno zavěšením na pružinách. Téměř anharmonického tlumení je možné dosáhnout indukcí vířivých proudů: pohybuje-li se plošný vodič (např. plátek mědi) v magnetickém poli, dojde k indukci proudu, který působí proti této změně. V našem konkrétním případě jsme k zabezpečení proti vibracím sestavili laboratorní plochu, která se skládá z bedýnky (z dubového dřeva – Obr. 22) naplněné šesticentimetrovou vrstvou jemných kamínků (existuje též možnost použít míčky ze stolního tenisu, jejichž výhodou je, že při manipulaci s nimi nedochází k uvolňování částic prachu, které mají velmi destruktivní následky pro laboratorní přístroje. Naopak jsou nevýhodou při snaze docílit ideálně rovného povrchu) a na nich posazenou leštěnou mramorovou deskou (Obr. 23). Předpokládáme, že sestava by měla zajistit útlum vibrací.



Obr. 22. Bedýnka s vnitřními rozměry 456 x 501 x 100 mm



Obr. 23. Mramorová deska o rozměrech 376 x 421 x 29 mm

2.1.2 Mikrovlnný rezonátor

Rezonátor se skládá ze dvou částí. První díl je dutina se třemi vstupními otvory (viz. obrázek 25) - pro kabel s cívkou generující signál o určité frekvenci, kabel zachycující signál a prostřední otvor je vstup pro centrální konduktor (je opatřen závitem).



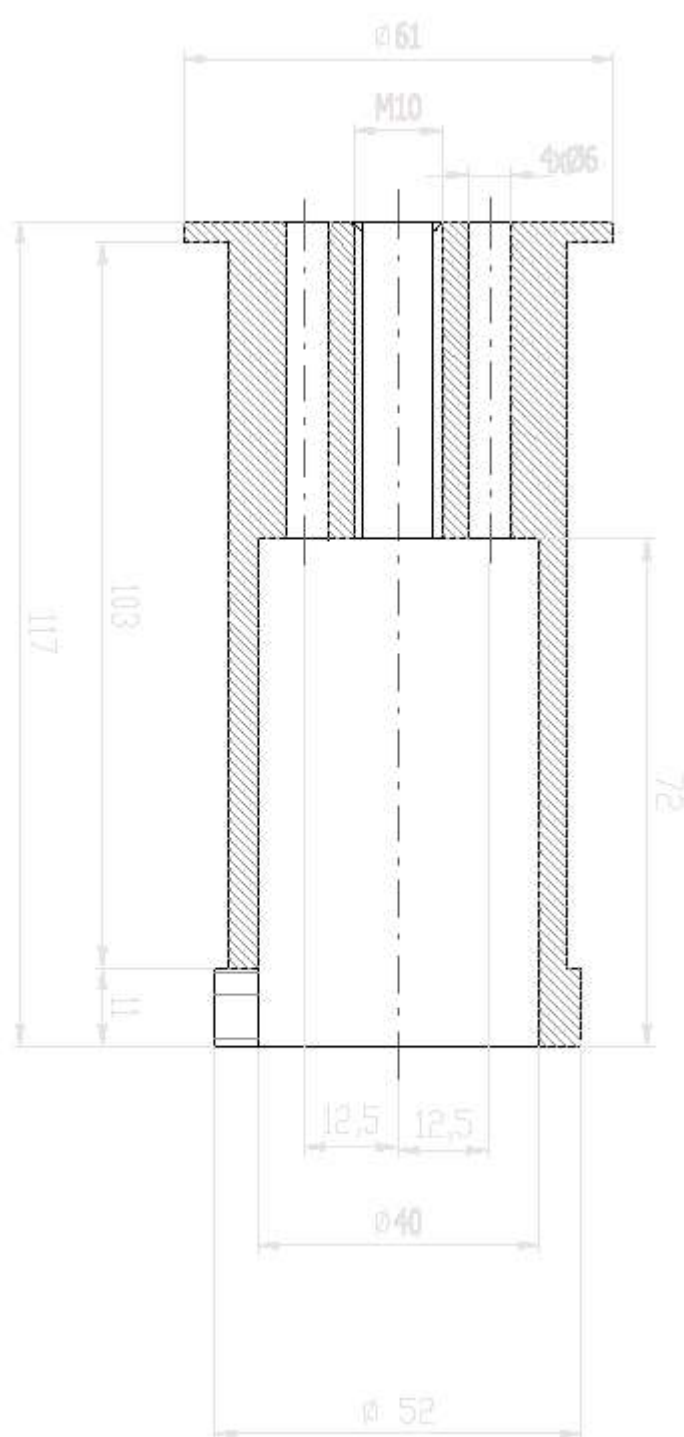
Obr. 24. Boční pohled na dutinu



Obr. 25. Pohled na dutinu z vrchu



Obr. 26. Pohled na dutinu ze spodu



Obr. 27. Rys dutiny

Dutina je konstruována z důvodu vodivosti z hliníku. Vnitřní část by měla být pro zvýšení elektrické vodivosti postříbřena.

Druhou částí, z níž je složen rezonátor, je centrální konduktor. Ten je prostředním otvorem dutiny vsunut do rezonátoru. Prochází celou délkou dutiny. Ve spodní části konduktoru je vyvrtán otvor pro vsunutí hrotu. Hroty jsou měnitelné. Ve vrchní části konduktoru je na povrchu vyřezán závit, jehož funkcí je naladění rezonátoru (nastavitelnost vysunutí hrotu) a docílení tak citlivější a kvalitnější rezonanční křivky.

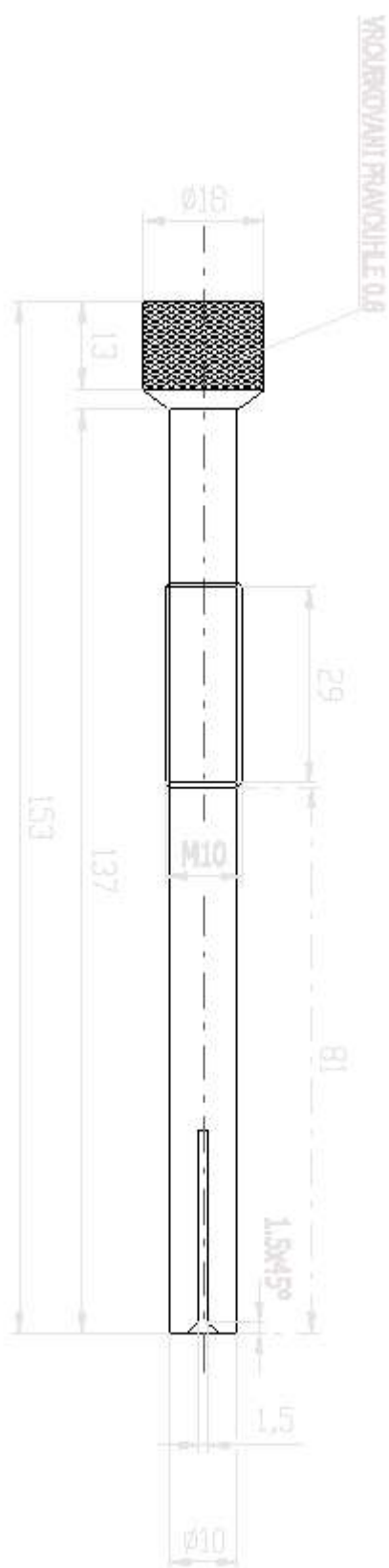


Obr. 28. Centrální konduktor s hrotem



Obr. 29. Otvor v konduktoru pro vložení hrotu

Centrální konduktor je vyroben z nerez oceli.



Obr. 30. Rys centrálního konduktoru

Vodič signálu a vazební smyčky

Do rezonátoru vstupují dva vodiče (koaxiální kabely). Jeden vede z generátoru a druhý jde do spektrálního analyzátoru. Tyto vodiče vedou vysokofrekvenční signál. Na konci obou kabelů jsou vytvořeny smyčky. Tyto smyčky jsou vodorovně s konduktorem a to z důvodu vytváření magnetického pole kolmo na vodič.

Velikost vazebních smyček je stejná. Na vodiči jdoucím z generátoru jsme však pro zvýšení buzení magnetického pole vytvořili místo smyčky malou cívku. Ta je poměrně malá, aby nedocházelo ke ztrátám signálu než projde celou smyčkou. Smyčka na kabelu jdoucím do spektrálního analyzátoru je stejné velikosti. Mohla by být větší, aby zachytila více energie elektromagnetického pole a zvýšila tak přesnost a kvalitu měřicího obvodu. S velikostí ovšem rostou i ztráty a proto jsme zvolili smyčku malé velikosti (stejně jako cívka na vodiči z generátoru), která se nakonec osvědčila.

Smyčky jsem se snažil umístit co možná nejbližší centrálnímu konduktoru. Čím blíže jsou smyčky ke konduktoru, tím lepší jsou vlastnosti celého rezonátoru.

Smyčky jsou konstruovány z měděného vodiče kabelu a spojeny s jeho zemněním. Smyčka je ještě uzemněna k rezonátoru.

Vazební smyčky kabelů by stejně jako dutina měly být postříbřeny pro zvýšení elektrické vodivosti.

Hrot

Hrot použitý pro mikrovlnnou mikroskopii by měl být co nejostřejší. S ostroty hrotu roste citlivost rezonátoru a tím i rozlišení mikroskopu. Nejideálnějším řešením by byl hrot o velikosti jednoho atomu. V našem případě bylo použito jehly, jejíž hrot byl ještě částečně přibroušen.

Kompletní sestava

Na následujícím obrázku je k vidění zkompletovaný ve stojanu uchycený rezonátor i s kabely. Pod rezonátorem jsou umístěné mikroposuvy. To vše je pak postaveno na antivibračním stolku složeném z bedýnky, písku a mramorové desky.

Během měření se ukázalo, že samotné mikroposuvy a zejména pak servomotory mikroposuvů mají také vliv na naměřenou rezonanční křivku. Při přiblížení hrotu rezonátoru k mikroposuvům byla na rezonanční křivce zřejmá její změna. Nejvíce se to pak projevilo na prvním snímaném objektu (části číslce 5). Při dalším skenování jsme pro eliminaci vlivu mikroposuvů na rezonanční křivku museli docílit oddálení snímaného objektu od nich. Oddálení jsme provedli podložením objektu, v našem případě pětikorunové mince, krabičkou od kinofilmu.



Obr. 31. Kompletní sestava

2.1.3 Posuvy při snímání

Rastrovací sondová mikroskopie je skupina metod založených na pohybu sondy v těsné blízkosti povrchu, obvykle několik málo nanometrů. Skenování povrchu objektu lze zajistit buďto pohybem sondy nebo pohybem vzorku. Velmi jemný pohyb sondy je prováděn pomocí piezokrystalu, který se prodlužuje a smršťuje podle přiloženého napětí. Pohyb snímaného objektu je zajištěn mikroposuvy, jak je to v našem případě.



Obr. 32. Mikroposuv v porovnání s baterií

Tyto mikroposuvy mají rozlišovací schopnost v setinách mikrometrů. Nami použité mikroposuvy měli rozpětí 5 mm a rozlišovací schopnost 0,05 μm . Používali jsme dva mikroposuvy, první sloužil pro posuv po ose x a druhý po ose y. K jejich řízení slouží již zmiňovaný Mercury servokontroler.

Poznámka:

Pojem zvětšení nemá v sondové mikroskopii smysl. Obraz je totiž vytvářen na základě elektromechanické interakce sondy se vzorkem. Skutečné rozměry je třeba kalibrovat.

Měření probíhá tak, že sonda sleduje profil konstantní interakce pomocí zpětné vazby. Lze měřit na vzduchu, ve vakuu i v kapalinách. Předměty zkoumání jsou velmi různorodé. Sahají od kovů a polovodičů přes molekuly a polymery až po živé buňky.

2.2 Technologie měření

Pro co nejpřesnější měření vzorků bylo zapotřebí mikroposuvů.



Obr. 33. Posuvy po ose x a y

Tyto mikroposuvy bylo nutno naprogramovat.

Pro práci s mikroposuvy jsou 2 možnosti řízení:

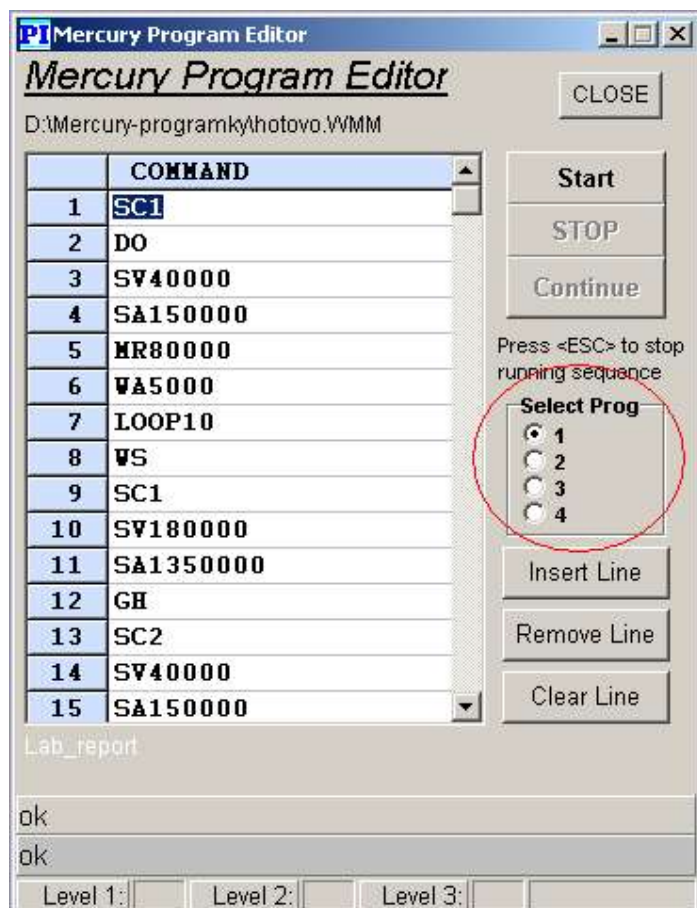
- macro manager
- mercury program editor

Macro manager nebyl pro námi zvolené operace prováděné s mikroposuvy nejvhodnější. Bylo by totiž zapotřebí daleko většího zásahu uživatele při práci s nimi. Macro manager umožňuje totiž vytvořit jen makra pracující jedno po druhém a operace s mikroposuvy by se tak stala neúměrně rozkrokována.

Pro námi vykonávanou práci jsem tedy zvolil dle mého zjištění mnohem, na nutnost vnějších zásahů, ekonomičtější cestu a tou je mercury program editor. Ten umožňuje koordinaci pohybů obou námi užívaných posuvů (pohyb po ose x i po ose y současně).

Volba podprogramu

Každý program se může skládat ze čtyř podprogramů. Mezi těmito podprogramy se uživatel přepne jedním klepnutím na číslo odpovídající žádanému podprogramu.

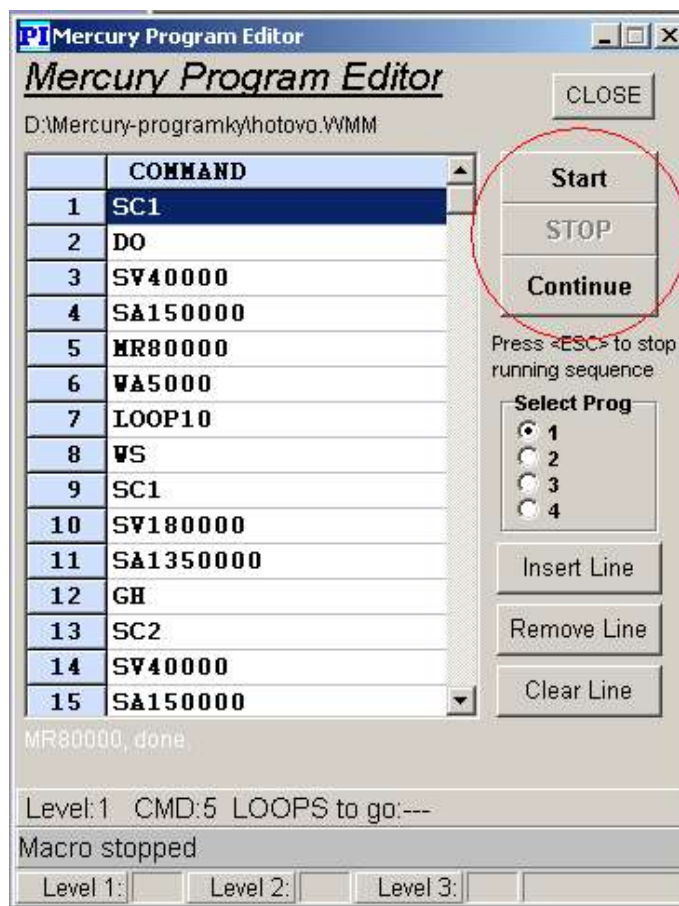


Obr. 34. Přepínání mezi podprogramy

Před tím než je uveden v činnost nový podprogram, je nutné běh předcházejícího podprogramu ukončit.

Přerušení běhu podprogramu

Bude-li zapotřebí přerušit chod snímání objektu a následně po nějaké nespécifikované době opět ve snímání pokračovat, stačí pouze stisknout tlačítko stop. Dojde tak k přerušení chodu podprogramu bez toho, aniž by došlo ke ztrátě informace o pozici. Jednoduše pak k dokončení běhu podprogramu a pokračování snímání z pozice, kde byla přerušena, stačí klepnutí na tlačítko continue.

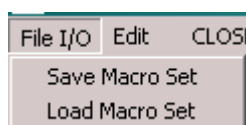


Obr. 35. Přerušení běhu podprogramu

Nastane-li například situace, kdy by mohlo dojít k poškození, ať už posuvů či jiných přístrojů během chodu podprogramu, je k dispozici možnost rychlého ukončení činnosti podprogramu a to stisknutím klávesy escape. Dojde však k nenávratnému ukončení podprogramu, v němž se nedá pokračovat.

Načtení podprogramu

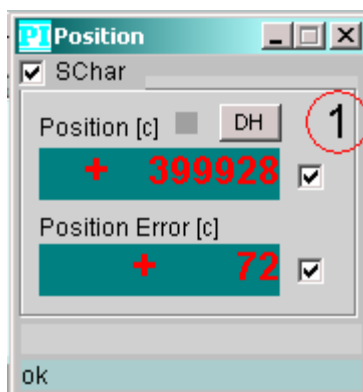
Podprogramy se ukládají do paměti hostitelského počítače. Ty pak je možné kdykoli vyvolat a to prostřednictvím nabídky „load macro set“. V případě změny v podprogramu pak i tuto změnu uložit prostřednictvím položky „save macro set“.



Obr. 36. Načtení makra

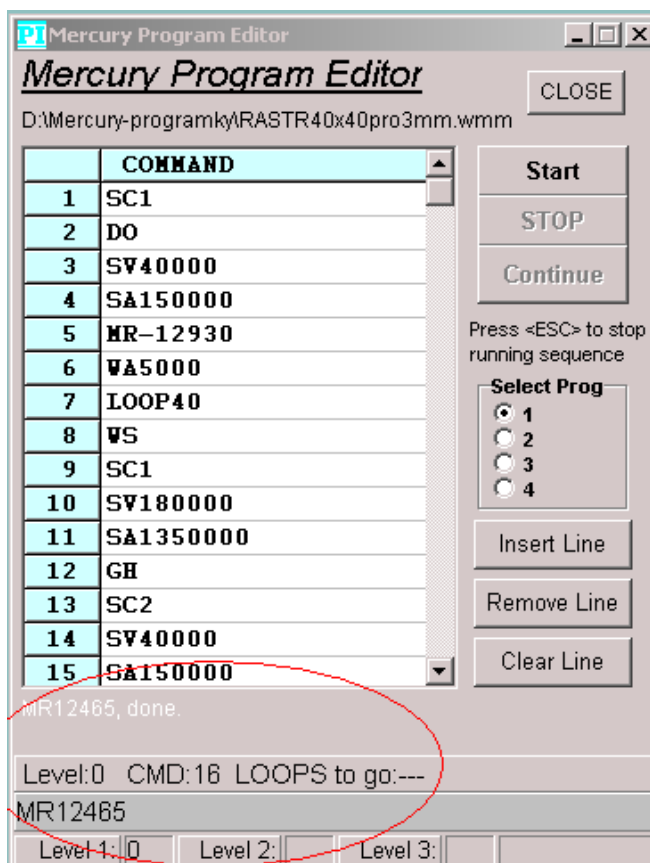
2.2.2 Sledování pozice

Aktuální pozici včetně poziční chyby sledujeme během chodu podprogramu v okně position. V okně position je možné také vyčíst číslo aktivního posuvu.



Obr. 37. Číslo posuvu konajícího pohybu

Ve spodní části okna mercury program editor se nachází stavový řádek, který informuje uživatele o právě vykonaném příkazu a stavu jeho vykonání (MR12465,done). Dále lze ze stavového řádku vyčíst číslo smyčky (LOOPS to go), jež se právě vykonává.



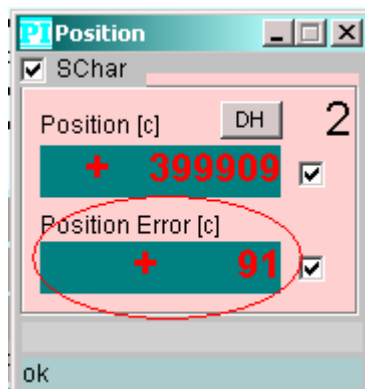
Obr. 38. Stavový řádek

2.2.3 Volba rychlosti a zrychlení

Jelikož jde o mikroposuvy, pak zde velkou roli hraje sledování poziční chyby. Poziční chyba nám ukazuje odchylku od žádané hodnoty pozice a větší poziční chyba může záporně ovlivnit kvalitu výsledného obrázku.

Velikost poziční chyby je ovlivněna hned několika aspekty, jako třeba rychlost a zrychlení posuvů a otřesy. Je tedy velmi důležité, jak zvolíme rychlost a zrychlení posuvů. Čím

menší chceme provést posuv, tím menší bychom měli volit hodnoty rychlosti a zrychlení. Poziční chyba může nabýt hodnoty například až 150, což pak hodně zneprůsňuje měření, máme-li provést posuv třeba jen o 1000 kroků. To se dá eliminovat snížením zrychlení a především rychlosti. Doba měření se sice poněkud protáhne, ale o to bude naměřený obrázek přesnější. Méně pak záleží na rychlosti u posuvů, kdy popojíždíme například o 250 000 kroků. Při takových hodnotách je pak poziční chyba například o hodnotě 100 celkem zanedbatelná.



Obr. 39. Poziční chyba

Proto je i rozdíl při volbě rychlosti v podprogramech pro různé operace. V části podprogramu 1, kdy posuv provádí posun jen o určitý úsek, je volena rychlost menší a v části podprogramu, která přikazuje posuvům návrat domů, je zvolena rychlost mnohonásobně větší.

2.2.4 Rozsah posuvů

Námi používané posuvy mají výrobcem garantované rozpětí 5 mm a rozlišovací schopnost 0,05 μm . Jejich rozpětí je však různé. Okno position, ukazující velikost posuvu, zobrazuje u jednoho posuvu maximální rozpětí přibližně 863 000 kroků a u druhého rozpětí nižší a to asi 831 000 kroků (rozpětí nelze nikdy stanovit zcela přesně, protože se mění v řádech stovek kroků – ovšem tyto změny rozpětí dají v našem makroměřítku rozdíl jen asi setiny mikrometru). Kroky jsou jednotky, ve kterých ukazuje absolvovanou vzdálenost mikroposuvu okno position. Vezmeme-li si, že 863 000 kroků odpovídá 5 mm, pak vypočtená velikost jednoho kroku je přibližně 0,0058 μm .

Z tohoto zjištěného rozpětí se pak v závislosti na rastru snímaného objektu vypočítává o kolik kroků popojede posuv. Chceme-li například, aby na ose x vykonal posuv deset zastavení (pro skenování objektu v deseti bodech na ose x), pak celkové rozpětí posuvu (863 000 kroků) podělíme deseti (bereme-li, že snímaný objekt není menší než rozpětí posuvu) a vyjde nám vzdálenost, jež má posuv urazit k místu dalšího zastavení, 86 300 kroků.

2.3 Naměřená data

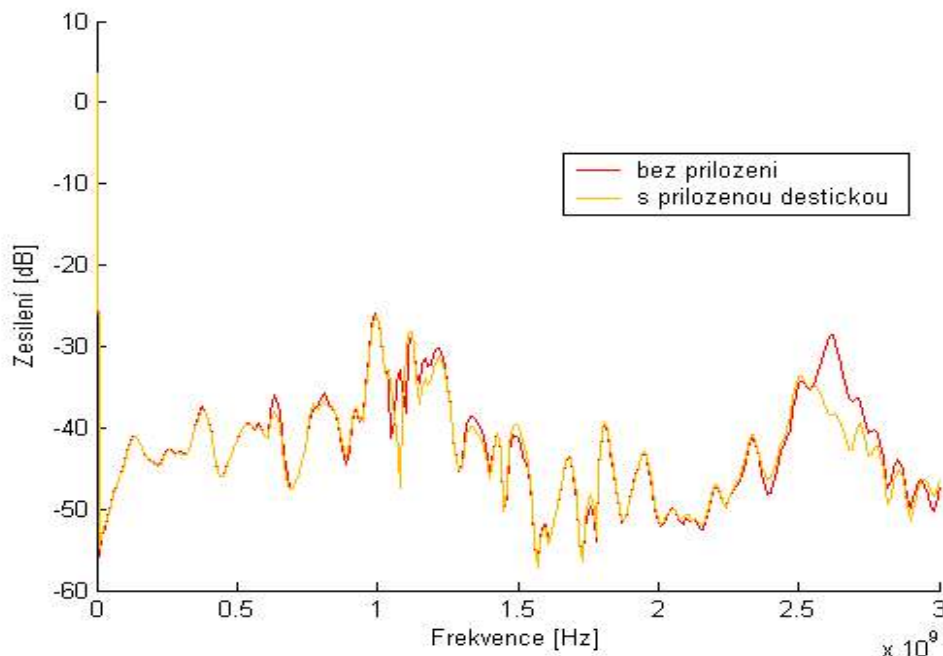
2.3.1 Pokusná měření

Prvními měřeními jsme se snažili najít ideální nastavení koaxiálního mikrovlnného rezonátoru. Nejprve jsme provedli pokusná měření, jejichž účelem bylo najít rezonanční křivku rezonátoru. Po nalezení této rezonanční křivky jsme provedli měření, na nichž jsme sledovali změnu maximální frekvence píku a změnu zesílení v závislosti na vzdálenosti přiloženého vzorku od hrotu rezonátoru.

Dalším měřením jsme zjišťovali závislost kvality rezonanční křivky na vysunutí hrotu rezonátoru.

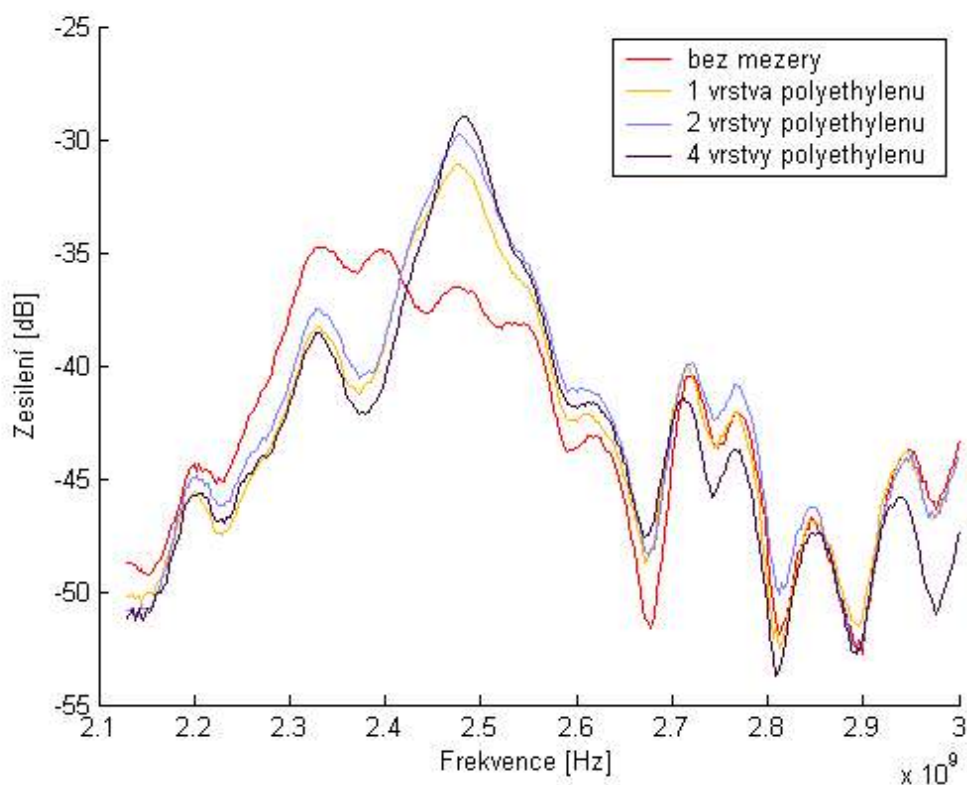
První pokusná měření

Po zkompletování mikrovlnného koaxiálního rezonátoru jsme provedli první měření, kdy jsme pouze hledali rezonanční křivku. Po nalezení jsme porovnali tuto rezonanční křivku s její změnou, která nastala, když jsme se ke hrotu rezonátoru přiblížili měděnou destičkou. Sledovali jsme celé spektrum od 0 do 3 GHz. Na obrázku je změna patrná nejvíce na frekvenci okolo 2,6 GHz. Tam jsme tedy našli požadovanou rezonanční křivku.

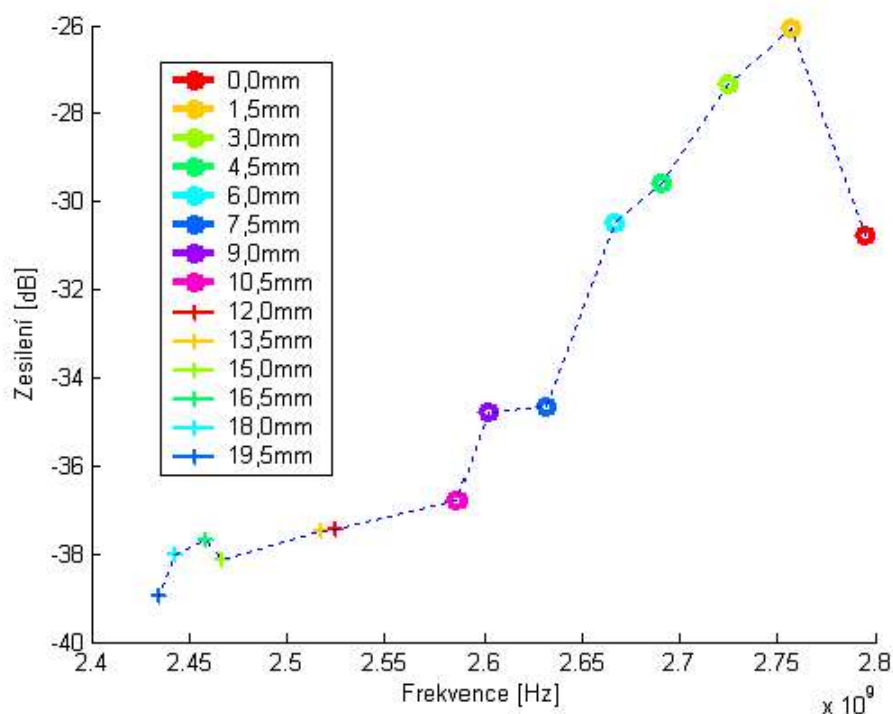


Obr. 40. Graf odezvy rezonátoru na měděnou destičku

Dalším měřením jsme sledovali změnu maximální frekvence píku a zesílení v závislosti na měnící se mezeře mezi hrotem a přiloženým vzorkem. Tímto vzorkem byla měděná destička. Vzdálenost vzorku od hrotu jsme regulovali vložením různého počtu vrstev polyethylenu mezi měděnou destičku a hrot rezonátoru. Se zvětšující se mezerou mezi hrotem a vzorkem docházelo k růstu zesílení signálu.



Obr. 41. Grafy závislosti rez. křivky na vzdálenosti vzorku od hrotu

Vysunutí hrotu rezonátoru

Obr. 42. Závislost zesílení a frekvence na vysunutí hrotu

Jelikož je na centrálním konduktoru vyřezán závit, měli jsme možnost manipulovat s vysunutím hrotu rezonátoru. Proto jsme provedli pokusná měření s vysunutím hrotu, abychom se dozvěděli v jakých oblastech se bude pohybovat rezonanční křivka pro různé vysunutí. Postupovali jsme při vysunování po krocích o velikosti 1,5 mm. V místě, kde bylo vysunutí nulové, je evidentní výrazně odlišné pole zobrazení rezonanční křivky proti vysunutí 1,5 mm. Již však po sebemenších vysunutích je patrná tendence (maximální frekvence píku a jeho zesílení), jakým směrem se bude křivka ubírat. Z grafu lze vyčíst, že zesílení signálu s délkou vysunutého hrotu klesá, stejně jako klesá maximální frekvence píku. Lze tedy usuzovat z naměřených hodnot, že pro následující měření povrchů je nejlepším řešením co nejmenší vysunutí hrotu. Pro měření různých částí mince jsme vysunuli hrot do vzdálenosti 1,5 mm.

2.3.2 Měření na vzorku se známou strukturou

V našich měřeních jsme se zaměřili na minci s nominální hodnotou pět Korun českých, protože je nám dobře znám reliéf jejího povrchu. Sledovali jsme závislost frekvence a útlumu signálu na měnící se vzdálenosti hrotu rezonátoru od povrchu mince. Vzdálenost se měnila s tím, jak se měnil reliéf povrchu mince.

Co se týče velikosti snímaného objektu postupovali jsme při měření sestupně. Při měřeních jsme začínali většími objekty a hrubšími rastry a postupně jsme si vybírali menší objekty a jemnější rastry. Prvním z námi snímaných objektů byla část číslice „5“. Po celkem úspěšném naskenování tohoto objektu jsme se pokusili nasnímat písmeno „K“, které mělo oproti předchozímu snímanému objektu o dvě pětiny menší rozměr. Písmeno K jsme naskenovali pro porovnání dvěma různými rastry. Domnívající se, že i druhé měření poměrně úspěšně proběhlo, zkusili jsme skenovat ještě menší objekt. Jednalo se o číslici „4“ v letopočtu na zadní straně mince. Při snímání jsme oproti předcházejícím měřením použili mnohem jemnější rastr, ale zde jsme po vykreslení obrázku narazili na spoustu aspektů, jež nám znemožňují úspěšné provedení měření na tak malých objektech. Podrobnosti k jednotlivým měřením se dočtete v následujících podkapitolách.



Obr. 43. Celkový pohled na snímanou minci

Doba potřebná pro vykreslení objektu

Proces vedoucí k vykreslení výsledného obrázku, není nikterak jednoduchý a je poměrně časově náročný.

První, poté co si zvolíme cíl snímání, je zapotřebí skenovaný objekt očistit od nežádoucích nečistot, mastných a vodních filmů. Ty by totiž mohly negativně ovlivnit proces snímání a znehodnotit tak výsledky.

Dalším velmi důležitým krokem, jak jsme při následujících měřeních zjistili, bylo přesné nastavení mince pod rezonátorem. Ať už šlo o nastavení mince na ose x , y či ose z . U snímaných objektů větších rozměrů (část číslice 5 nebo písmeno K) ještě bylo v našich silách minci srovnat pod hrotem rezonátoru do patřičné polohy. Při pokusu srovnat minci pro naskenování číslice 4 v letopočtu mince, jež je mnohem menších rozměrů, se to stalo neřešitelným problémem. I přesto jsme se o to v rámci našich sil a možností pokusili. Skenované objekty se totiž nachází v těsné blízkosti pod rezonátorem (nachází se v jeho stínu) a není možné lidským zrakem zaznamenat jeho přesnou polohu.

Jedním z mých návrhů pro řešení problému srovnání vzorku pod hrotem rezonátoru by byl proces několika operací s objektem: Skenovaný objekt by se umístil pod rezonátor jen přibližně místem, které má být skenováno. Pak by se provedlo oskenování hrubším rastrem (například 20×20) a obrázek by se vykreslil v počítači. Z obrázku by se pak vypočítaly souřadnice námi požadovaného objektu. Souřadnice by se pak přenesly na posuvy a těmi by se nad požadované místo najelo. Jedná se jen o návrh, který není ověřený praxí a nedá se tudíž říci, je-li vůbec realizovatelný. Jeho účelnost by se musela ověřit další sérií pokusů a bádání. Dalším poměrně zásadním problémem při srovnávání objektu pod hrotem rezonátoru se stalo nastavení mince do absolutní roviny. I sebemenší úhel vychýlení objektu z absolutní roviny vůči rezonátoru zásadním způsobem znehodnocuje výsledky měření. Objekty se tak stávají téměř neměřitelnými. Tenhle problém by vyřešil posuv po ose z . Posuv by vyrovnával během skenování nerovnost přiloženého objektu.

Krokem číslo tři je pak samotné skenování objektu. Po nastartování běhu mikroposuvů jsme při jednotlivých zastávkách posuvu (na námi zvoleném místě k oskenování) provedli uložení dat, popisujících naměřenou rezonanční křivku (každou rezonanční křivku popisuje 310 bodů), do paměti spektrálního analyzátoru. Do paměti spektrálního analyzátoru FSH3 je však možné uložit jen sto souborů (sto rezonančních křivek).

Dalším krokem bylo tedy přenášení naměřených dat ze spektrálního analyzátoru do počítače. Přenos probíhal přes optický kabel. Přenos musel být prováděn vždy po naměření a uložení 84 rezonančních křivek (při rastru 21×21 po naměření čtyř os x). Samotný

přenos dat trval přibližně čtyři až pět minut podle množství přenášených dat. Tyto přenosy pak museli být při rastru 21×21 provedeny celkem šestkrát. Skenovali jsme-li objekt rastrem 41×41 (což činilo 1681 naměřených rezonančních křivek), pak jsme přenos dat v konečném součtu provedli jednadvacetkrát. Během přenosu dat spektrální analyzátor FSH3 znemožňoval měření a muselo se čekat na ukončení tohoto procesu. Při přenosu nesmí být vytížen procesor počítače, docházelo k chybám přenosu dat.

Po naměření a překopírování souborů z FSH3 probíhalo již samotné zpracování naměřených dat v počítači. Tuhle operaci s daty prováděl můj kolega spolupracující se mnou na daném projektu. Tenhle krok byl též hodně časově náročný. S využitím počítačové techniky, jež nám byla po dobu aktivit prováděných na diplomové práci poskytnuta, se doba potřebná pro zpracování dat pohybovala podle počtu zpracovávaných dat v řádech desítek minut.

V navazujících diplomových pracích by se dalo zamýšlet nad problematikou urychlení procesu skenování a vykreslení povrchu objektu.

Část číslice 5

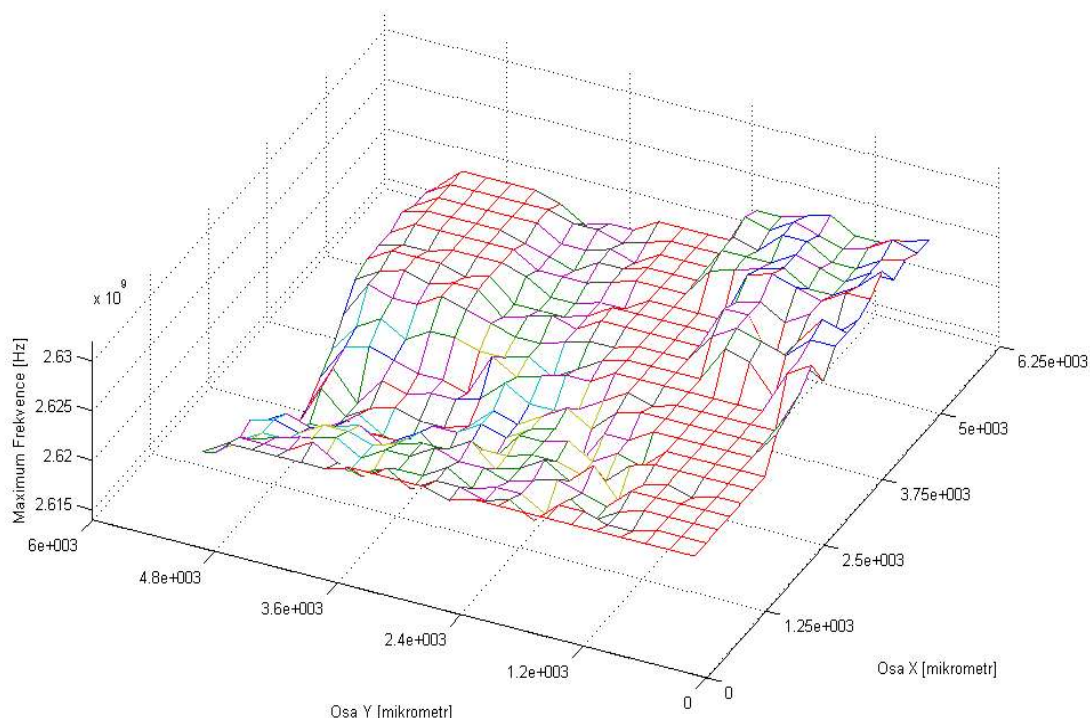
První pokusné snímání konkrétního objektu proběhlo na části číslice „5“.



Obr. 44. Makrofotografie části číslice 5

Při snímání jsme využili celkového rozsahu mikroposuvů. Snímaná plocha měla tudíž rozměry 5×5 mm. Pro snímání jsme si zvolili rastr 21×21 snímaných bodů. Celkový počet nasnímaných bodů tak činil 441. Vzdálenost mezi skenovanými body byla pro posuv na ose x $0,25$ mm a pro posuv na ose y $0,24$ mm. Naskenování tohoto objektu, od doby kdy jsme vložili a srovnali minci pod rezonátorem až po samotné vykreslení povrchu, trvalo přibližně tři hodiny.

Obrazy nasnímané oblasti jsou v síťovém zobrazení.



Obr. 45. Pohled číslo 1 na část čísla 5

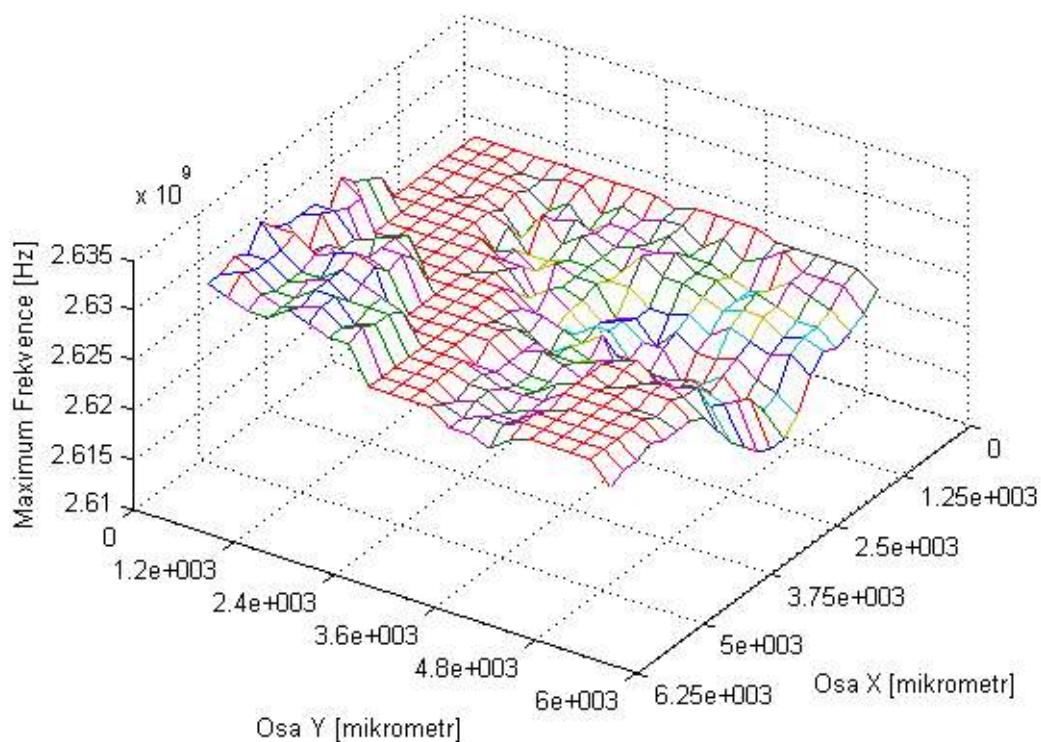
Pohled číslo 1:

Na obrázku je možné vidět z jiného úhlu pohledu, než z jakého je k dispozici na fotografii, naskenovaná část číslice 5. K vykreslení byla použita metoda sledování maximální frekvence píku. Obrázek byl vykreslen, vzhledem ke zřetelnějšímu rozpoznání objektu, obráceně. To znamená, že vystouplé části na minci jsou na obrázku propadlé.

Na obrázku je naprosto zřetelný náklon mince. V pravém vrchním rohu obrázku nám díky tomu vznikl jakýsi kopcovitý útvar, který se na minci vůbec nevyskytuje. Ten byl způsoben tím, že mince nebyla v absolutní rovině a kopcovitý útvar je místo, kde byl hrot v největší vzdálenosti od mince. Náklon mince též způsobil, že frekvenční maxima byla nad různými částmi vyražené číslice pět různá a tudíž i hloubka vyražené číslice se jeví na obrázku poněkud rozdílně.

Pohled číslo 2:

Na dalším obrázku je celkem zřetelný oblouk vyskytující se ve skenované části číslice 5.



Obr. 46. Pohled číslo 2 na část čísla 5

Písmeno K

Po naskenování části číslice 5 jsme se pokusili oskenovat písmeno K, nacházející se na přední straně v těsné blízkosti číslice 5.



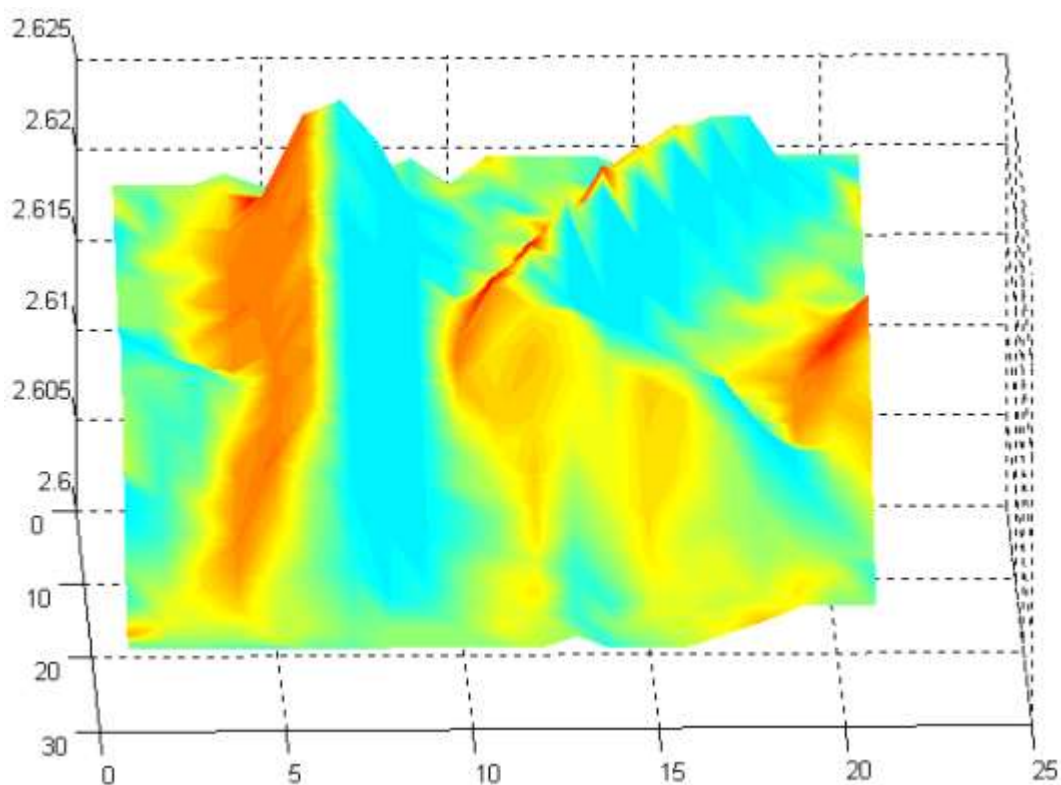
Obr. 47. Celkový pohled na minci s písmenem K



Obr. 48. Detailní fotografie písmene K

Snímané písmeno K mělo menší rozměry. Vytipovali jsme si tedy snímanou plochu o rozměrech zhruba 3 x 3 mm. Na fotografii je vidět, že ve snímaném poli (napravo od písmene K) byla i část písmene „č“ a nalevo od písmene K i špička listu.

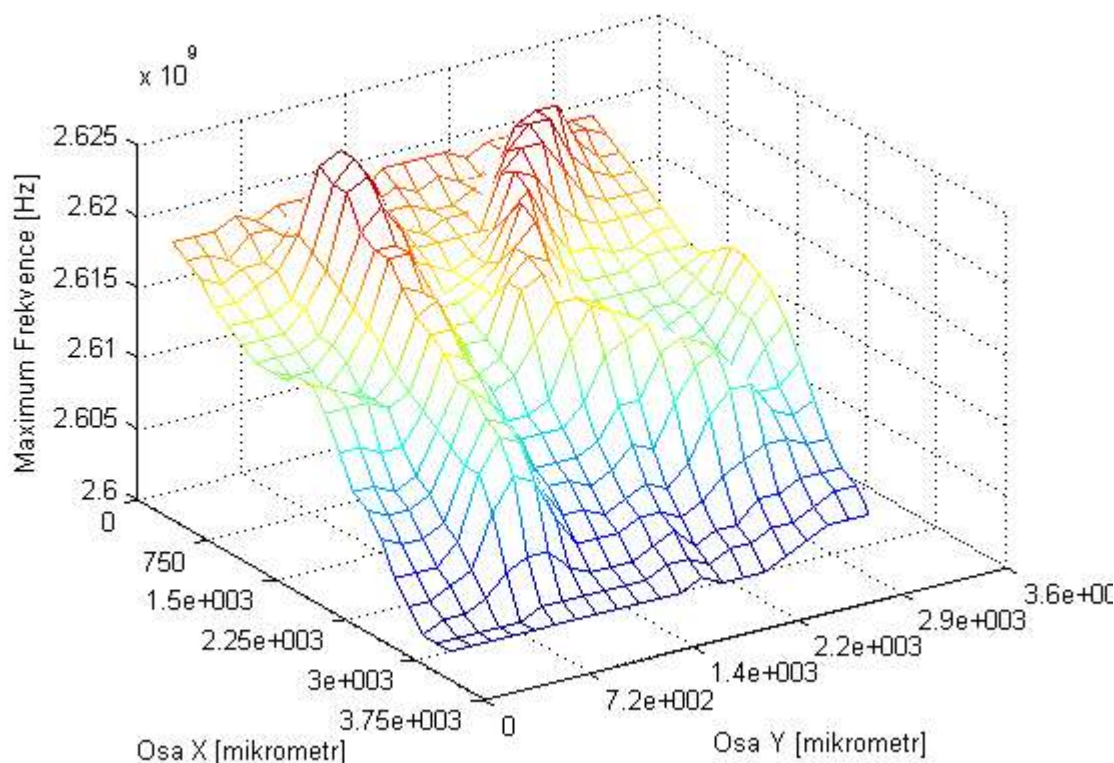
Pro snímání jsme si zvolili opět rastr 21 x 21 s celkovým počtem snímaných bodů 441. Celkový posuv po ose x činil již zmiňované 3 mm se vzdáleností mezi snímanými body 0,15 mm. Pro posuv po ose y pak celková vzdálenost byla 2,888 mm a vzdálenost mezi skenovanými místy byla 0,144 mm. Čas potřebný k naskenování písmene K byl téměř totožný se skenováním části číslice 5 a pohyboval se kolem tří hodin.



Obr. 49. Pohled číslo 1 na písmeno K

Pohled číslo 1:

Obrázek je vykreslen metodou přechodu barev podle odlesku (jako kdyby zleva osvětlovalo slunce písmeno K). Na obrázku je celkem jasně patrné písmeno K. Po jeho pravé straně pak je viditelné zaoblení sousedícího písmene „č“.



Obr. 50. Pohled číslo 2 na písmeno K

Pohled číslo 2:

Na obrázku 2 je pak i jasně patrný objekt vlevo od písmene K. Při pohledu na celou minci je zřejmé, že jde o špičku listu. Obrázek je vykreslen podle výšky.

Písmeno K s částí písmene Č

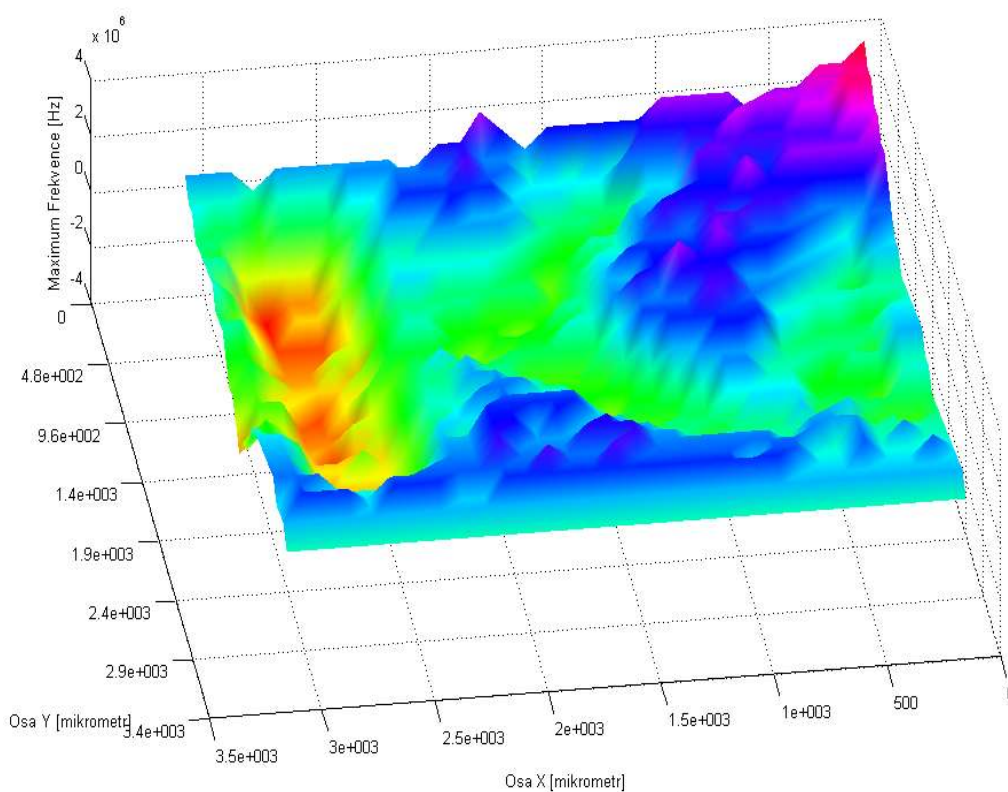
Pro porovnání kvality výsledného obrázku jsme písmeno K naskenovali s mnohem jemnějším rastrem. Zvolili jsme si rastr 31 x 31 snímaných bodů. Celkový počet bodů se tak z předchozích 441 zvýšil na 961. Opět jsme snímali plochu o rozměrech 3 x 2,888 mm. Vzdálenost mezi snímanými body na ose x byla 100 μm a na ose y 96,3 μm .

Snímali jsme plochu, na které je celé písmeno K a část písmene Č. Při pohledu na výsledný obrázek je po porovnání s předchozím nasnímaným písmenem K vidět, že v případě písmene K snímaného rastrem 21 x 21 je reliéf oproti rastru 31 x 31 mnohem hrubší.



Obr. 51. Celkový obraz mince s písmenem K a částí písmene Č

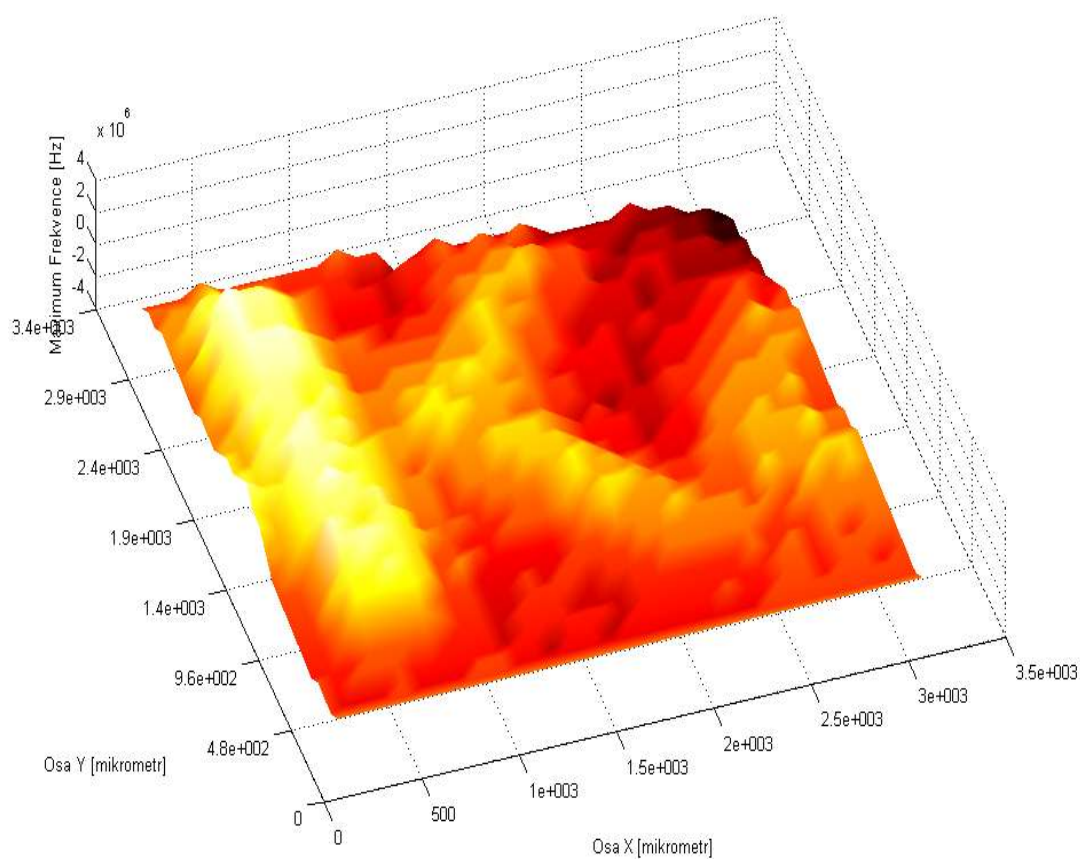
Obr. 52. Detailní foto oblasti KČ



Obr. 53. Pohled číslo 1 na KČ

Pohled číslo 1:

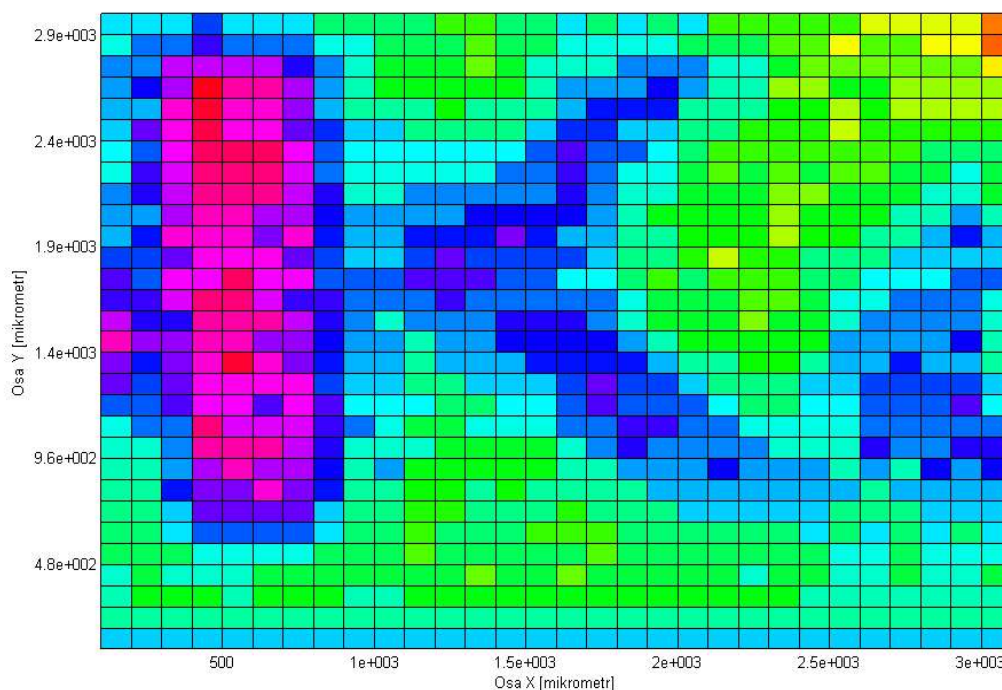
Při pohledu na obrázek číslo 1 je opět jasně patrný náklon mince. V pravém horním rohu se opět vyskytuje jakýsi kopcovitý útvar, který značí část mince, jež byla nejdále od hrotu rezonátoru. Naopak na nožičce písmene K (zabarvená do červena) je místo, v němž se nacházela mince k hrotu nejbližší. Nejdůležitější je ovšem poměrně lehce čitelné vykreslení písmene K a části písmene Č. Obrázek je vykreslen podle výšky metodou přechodu barev.



Obr. 54. Pohled číslo 2 na Kč

Pohled číslo 2:

Na tomto obrázku je Kč vykresleno obráceně jak na předchozím. I zde je písmeno K jasně čitelné.



Obr. 55. Pohled číslo 3 na Kč

Pohled číslo 3:

Na obrázku číslo 3 je pohled na reliéf povrchu mince z vrchu. Jedná se o plošné zobrazení. Zde není pochyb o vykresleném písmenu K a části písmene č, nad nímž je i rozpoznatelná část háčku. I při tomto pohledu je zachycen náklon mince, který je patrný na nožičce písmene K a v pravém horním rohu obrázku.

Číslice 4 v letopočtu

Po úspěšném nasnímání písmene K jsme se rozhodli zkusit oskenovat ještě menší objekt. Byli jsme si však vědomi, že se pohybujeme již na pokraji našich možností a že to bude hodně složité. Hlavními faktory negativně se podílejících na našem výsledném obrázku byly: již výše zmiňovaná nemožnost nastavit minci pod hrotem rezonátoru do potřebné polohy, náklon mince, nízká ostrost hrotu a vzdálenost hrotu od mince, kterou se nám bez použití posuvu po ose nepodařilo nikdy nastavit do ideální vzdálenosti (ideální vzdálenost hrotu od mince je přibližně 0,1 mikrometru).

Jak je i vidět z detailního obrázku číslice 4, je i kvalita ražby číslice mnohem horší vzhledem k její velikosti.

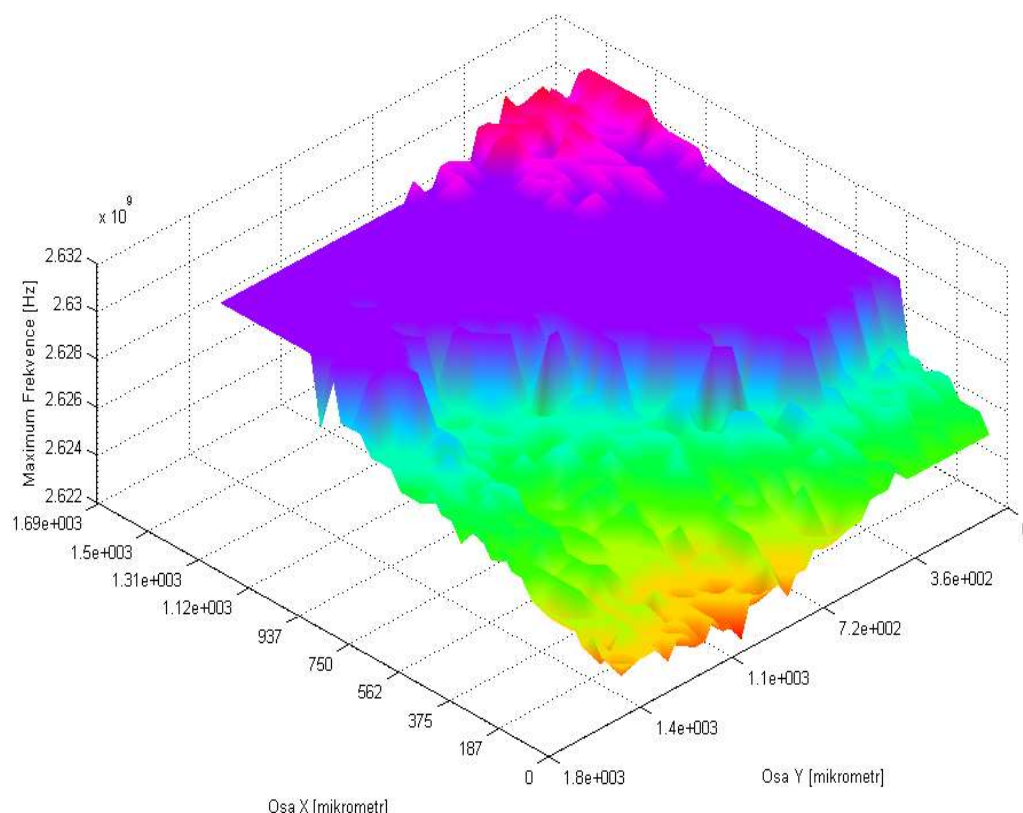


Obr. 56. Obraz mince s číslicí 4



Obr. 57. Detail číslice 4

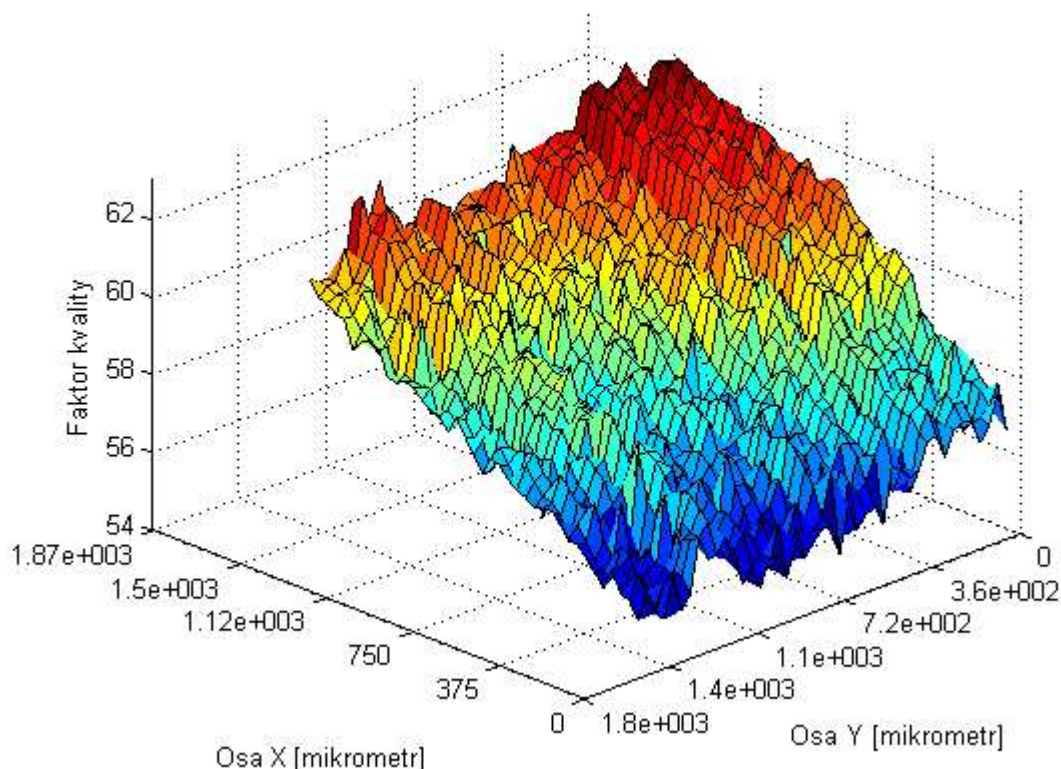
Nyní jsme skenovali oblast o rozměrech pouze přibližně 1,5 x 1,5 mm. Rastr námi zvolený pro snímání byl mnohem jemnější s ohledem na to, že přechody mezi písmenem 4 a okolní plochou nejsou tak výrazné. Zvolený rastr byl 41 x 41. Počet snímaných bodů tak již nabýval hodnoty 1681. Což samozřejmě mnohem protáhlo dobu měření. Ta činila přes 6 hodin. Pohyb posuvu po ose x byl 1,5 mm s délkou jednoho meziposuvu 37,5 μm . Posuv po ose y činil 1,444 mm o vzdálenosti mezi jednotlivými meziposuvy 36,1 μm .



Obr. 58. Pohled číslo 1 na číslici 4

Pohled číslo 1:

Z obrázku číslo jedna je opět naprosto patrný náklon mince, kde růžová část značí místo s největším odchýlením mince od hrotu rezonátoru a ve spodní části obrázku je pak zřejmé největší přiklonění mince ke hrotu (načervenalá část). Co však ale hlavně vyplývá z obrázku je, že jsme se minuli číslice 4 a naskenovali jen nějakou její část. Dalo by se spekulovat, že zelená část obrázku je nějaká nespecifikovatelná část čísla 4, ale to lze opravdu jen spekulovat a spekulace ve vědním oboru nemají své místo.



Obr. 59. Pohled číslo 2 na číslici 4

Pohled číslo 2:

Tento obrázek jen ukazuje náklon mince. Jde totiž o vykreslení podle výšky. Kdyby byl náklon nulový, měli bychom však i při tomto vykreslení nalézt část číslice 4, zde však nenajdeme ani její náznak.

Oba dva předchozí obrázky nám jen potvrzují nepřesnost nastavení mince pod rezonátorem.

Zhodnocení

Po sérii těchto skenování různých částí mince s nominální hodnotou 5 Korun českých lze vyvodit hned několik závěrů. Nejlepšími vykresleními byly obrázky písmene K s částí písmene Č. Byl to objekt přijatelné velikosti, na něhož jsme zvolili poměrně jemný rastr. Za použití ještě jemnějšího rastru bychom docílili ještě přesnějšího vykreslení reliéfu povrchu. O to jsme se pokusili u číslice 4. Ta byla již ovšem natolik malých rozměrů, že nám činilo značné potíže číslici vůbec zaměřit. Proto by se měla navazující diplomová práce zaměřit na tuhle problematiku.

3 ZÁVĚR

Bylo sestaveno kompletní pracoviště pro aplikaci mikrovlnné mikroskopie. Nejprve byla navržena a sestavena pracovní plocha, která dle našich předpokladů má pohlcovat nežádoucí vibrace, jež by mohly v negativním smyslu ovlivnit výsledky měření. Plocha se skládala z dubové bedýnky naplněné jemnými kamínky a na nich osazené mramorové desky. Na desce byl pak postaven stojan, v němž byl uchycen rezonátor.

Koaxiální rezonátor tvořila dutina z hliníku a centrální konduktor z nerez oceli. Na centrálním konduktoru byl vyřezán závit pro potřeby vyladění vysunutí hrotu z rezonátoru. Do rezonátoru vstupovaly dva koaxiální kabely, které byly propojeny se spektrálním analyzátozem FSH3. Na těchto kabelech byly uvnitř rezonátoru vytvořeny vazební smyčky. Na jednom z kabelů byl uvnitř rezonátoru generován signál a druhý tento signál pohlcoval a posílal na vyhodnocení zpět do spektrálního analyzátoru FSH3.

Rezonátor byl pevně uchycen ve stojanu a naopak vzorek byl umístěn na mikroposuvech M-110.1DG řízených servokontrolery Mercury C-862.10. Byly použity posuvy s rozlišením 0,05 μm a rozsahem 5 mm.

Servokontrolery pro řízení posuvů byly naprogramovány. Pro naprogramování byl použit standardně dodávaný software Mercury program editor. Programy řídily současně pohyb po ose x a y.

Spektrální analyzátor FSH3 byl pro naše potřeby upgradeován nejnovějším originálním firmwarem od výrobce Rohde&Schwarz. Spektrální analyzátor FSH3 byl propojen s počítačem přes optické rozhraní RS-232, které sloužilo pro přenos a sběr dat a jejich následné vyhodnocení. K tomuto účelu byl v počítači nainstalován software FSH View.

Po zkompletování celé sestavy bylo provedeno mnoho měření a pokusů pro správné naladění rezonátoru. Provedli jsme měření pro různá vysunutí hrotu, abychom zjistili v jakém případě má rezonanční křivka lepší tvar a lepší odezvu. Poté, kdy se nám podařilo nalezení "ideálního" nastavení rezonátoru a celého obvodu, jsme provedli první pokusná měření na konkrétních známých vzorcích.

Měřeními se nám podařilo vykreslit strukturu povrchu několika objektů. Tím prvním vykresleným objektem se stala část číslice 5 na pětikorunové minci, dále pak písmeno K. Písmeno K bylo vykresleno různými rastry.

Provedli jsme ověření použití mikrovlnného rezonátoru v laboratorních podmínkách. Na vývoji koaxiálního rezonátoru by se mělo ovšem pokračovat s návazností na námi

dosažené výsledky a zjištění. Aby bylo možno vykreslovat třeba i mikropovrchy, je k tomu zapotřebí ještě mnohá vylepšení. Doporučoval bych se zaměřit především na následující body:

- Zajištění ostřejšího hrotu (tím by se zvýšilo rozlišení).
- Postříbření vnitřních stěn rezonátoru a smyček pro zvýšení kvality rezonátoru.
- Pořízení stíněné komory na celou měřicí soustavu, aby se zabránilo nežádoucím vnějším vlivům na kvalitu získaného signálu.
- Pořízení třetího posuvu (posuv po ose z), kterým by se eliminoval náklon snímaného objektu vůči rezonátoru, což by hodně zkvalitnilo výsledný obrázek.

SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] Kim J., Kim M.S., Lee J., Cha D., Friedman B.: Development of nearfield scanning microwave microscope using a tunable resonance cavity for high resolution, *Measurement science and Technology* 14 (2003), 7-12
- [2] Imtiaz A., Anlage S.M.: A novel STM-assisted microwave microscope with capacitance and loss imaging capability, *Ultramicroscopy* 94(2003), 209-216
- [3] Fraden J.: *Handbook of Modern Sensors* 2nd edition, AIP Press Springer 1996
- Staelin D.H., Morgenthaler A.W., Kong J.A.: *Electromagnetic Waves*, Prentice Hall 1994
- meteorologický institut: atomic force microscope [online]. [cit. 2002-11-13], www.cmi.cz
- vá mikroskopie pro biology: skenování elektronový mikroskop [online]. [cit. 2001], www.paru.cas.cz
- ti: malování atomy [online]. [cit. 2003-11-21], www.21stoleti.cz
- Kulhánek Petr: Pikoškály aneb jak uvidět atom [online]. [cit. 2004-7-5], www.aldebaran.cz/bulletin
- onstrukce koaxiálního rezonátoru a jeho aplikace. Zlín, 2004.
- lský manuál. Praha, 2004.
- motor controller user manual. Praha, 2004.
- n stages user manual. Praha, 2004.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

STM.....	Rastrovací tunelová mikroskopie
AFM.....	Mikroskopie atomových sil
LFM.....	Mikroskopie laterálních sil
FMM.....	Mikroskopie modulovaných sil
MFM.....	Mikroskopie magnetických sil
EFM.....	Mikroskopie elektrostatických sil
SNOM.....	Rastrovací optická mikroskopie
SThM.....	Skenování teplotní mikroskopie
STS.....	Skenování tunelování mikroskopie
STP.....	Skenování tunelování potenciometru
BEEM.....	Mikroskopie balistických emitovaných elektronů
PSTM.....	Tunelování fotonová mikroskopie
NFSOM.....	Mikroskopie blízkého optického pole
NSMM.....	Skenování mikrovlnná mikroskopie

SEZNAM OBRÁZKŮ

OBR. 1. STOJATÁ ELEKTRONOVÁ VLNA V KRUHU ATOMŮ ŽELEZA NA POVRCHU MĚDI (STM).....	7
OBR. 2. LIDSKÉ CHROMOZOMY (AFM).....	8
OBR. 3. PRINCIP MIKROSKOPIE ATOMOVÉ SÍLY.....	9
OBR. 4. NAVRŽENÝ REZONÁTOR PODLE [1].....	11
OBR. 5. REZONÁTOR S MŮSTKEM	12
OBR. 6. ZAPOJENÍ MŮSTKU NA FSH3.....	12
OBR. 7. PŘEDNÍ PANEL SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU FSH3.....	13
OBR. 8. UKÁZKA DISPLEJE SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU FSH3.....	15
OBR. 9. OKNO PRO PŘENOS DAT Z FSH3 DO POČÍTAČE.....	16
OBR. 10. POPIS OSCILOSKOPU A SPEKTRÁLNÍHO ANALYZÁTORU.....	17
OBR. 11. NÁKRES SESTAVY TROJOSÉHO MIKROPOSUVU.....	18
OBR. 12. SESTAVA TROJOSÉHO MIKROPOSUVU S TROJOSÝM NANOPOSUVEM..	18
OBR. 13. MERCURY KONTROLER - SROVNÁNÍ VELIKOSTI S DOLAROVOU A EURO MINCÍ.....	20
OBR. 14. POHLED NA PŘEDNÍ A ZADNÍ ČÁST MERCURY.....	21
OBR. 15. PŘEPÍNAČ NAHOŘE - ON.....	22
OBR. 16. ZOBRAZÍ SE PO SPUŠTĚNÍ MMCRUN.EXE.....	27
OBR. 17. HLAVNÍ OBRAZOVKA PO SPUŠTĚNÍ	28
OBR. 18. OKNO POSITION.....	29
OBR. 19. OKNO MACRO MANAGER.....	30
OBR. 20. OKNO MACRO FILE MANAGER	31
OBR. 21. OKNO PROGRAM EDITOR.....	32
OBR. 22. BEDÝNKA S VNITŘNÍMI ROZMĚRY 456 X 501 X 100 MM.....	34
OBR. 23. MRAMOROVÁ DESKA O ROZMĚRECH 376 X 421 X 29 MM.....	34
OBR. 24. BOČNÍ POHLED NA DUTINU.....	35
OBR. 25. POHLED NA DUTINU Z VRCHU.....	35
OBR. 26. POHLED NA DUTINU ZE SPODU.....	35
OBR. 27. RYS DUTINY.....	36
OBR. 28. CENTRÁLNÍ KONDUKTOR S HROTEM.....	37
OBR. 29. OTVOR V KONDUKTORU PRO VLOŽENÍ HROTU.....	37
OBR. 30. RYS CENTRÁLNÍHO KONDUKTORU.....	38
OBR. 31. KOMPLETNÍ SESTAVA.....	40
OBR. 32. MIKROPOSUV V POROVNÁNÍ S BATERIÍ.....	41
OBR. 33. POSUVY PO OSE X A Y.....	42
OBR. 34. PŘEPÍNÁNÍ MEZI PODPROGRAMY.....	45

OBR. 35. PŘERUŠENÍ BĚHU PODPROGRAMU.....	46
OBR. 36. NAČTENÍ MAKRA.....	46
OBR. 37. ČÍSLO POSUVU KONAJÍCÍHO POHYB	47
OBR. 38. STAVOVÝ ŘÁDEK.....	47
OBR. 39. POZIČNÍ CHYBA.....	48
OBR. 40. GRAF ODEZVY REZONÁTORU NA MĚDĚNOU DESTIČKU.....	49
OBR. 41. GRAFY ZÁVISLOSTI REZ. KŘIVKY NA VZDÁLENOSTI VZORKU OD HROTU	50
OBR. 42. ZÁVISLOST ZESÍLENÍ A FREKVENCE NA VYSUNUTÍ HROTU.....	51
OBR. 43. CELKOVÝ POHLED NA SNÍMANOU MINCI.....	52
OBR. 44. MAKROFOTOGRAFIE ČÁSTI ČÍSLICE 5.....	54
OBR. 45. POHLED ČÍSLO 1 NA ČÁST ČÍSLA 5.....	55
OBR. 46. POHLED ČÍSLO 2 NA ČÁST ČÍSLA 5.....	56
OBR. 47. CELKOVÝ POHLED NA MINCI S PÍSMENEM K.....	56
OBR. 48. DETAILNÍ FOTOGRAFIE PÍSMENE K.....	57
OBR. 49. POHLED ČÍSLO 1 NA PÍSMENO K.....	57
OBR. 50. POHLED ČÍSLO 2 NA PÍSMENO K.....	58
OBR. 51. CELKOVÝ OBRAZ MINCE S PÍSMENEM K A ČÁSTÍ PÍSMENE Č.....	59
OBR. 52. DETAILNÍ FOTOGRAFIE OBLASTI KČ.....	59
OBR. 53. POHLED ČÍSLO 1 NA KČ.....	59
OBR. 54. POHLED ČÍSLO 2 NA KČ.....	60
OBR. 55. POHLED ČÍSLO 3 NA KČ.....	61
OBR. 56. OBRAZ MINCE S ČÍSLICÍ 4.....	62
OBR. 57. DETAIL ČÍSLICE 4.....	62
OBR. 58. POHLED ČÍSLO 1 NA ČÍSLICI 4.....	63
OBR. 59. POHLED ČÍSLO 2 NA ČÍSLICI 4.....	64

SEZNAM TABULEK