

VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ

BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ
ÚSTAV FYZIKÁLNÍHO INŽENÝRSTVÍ

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING
INSTITUTE OF PHYSICAL ENGINEERING

NÁVRH NOSNÉ PLATFORMY PRO NÍZKOTEPLOTNÍ UHV STM MIKROSKOP

DESIGN OF THE SUPPORTING PLATFORM FOR LOW TEMPERATURE UHV STM
MICROSCOPE

DIPLOMOVÁ PRÁCE
DIPLOMA THESIS

AUTOR PRÁCE
AUTHOR

Bc. TOMÁŠ DAO

VEDOUCÍ PRÁCE
SUPERVISOR

Ing. MICHAL PAVERA

BRNO 2014

Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav fyzikálního inženýrství

Akademický rok: 2013/14

ZADÁNÍ DIPLOMOVÉ PRÁCE

student(ka): Bc. Tomáš Dao

který/která studuje v **magisterském studijním programu**

obor: **Fyzikální inženýrství a nanotechnologie (3901T043)**

Ředitel ústavu Vám v souladu se zákonem č.111/1998 o vysokých školách a se Studijním a zkušebním řádem VUT v Brně určuje následující téma diplomové práce:

Návrh nosné platformy pro nízkoteplotní UHV STM mikroskop

v anglickém jazyce:

Design of the supporting platform for low temperature UHV STM microscope

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Na Ústavu fyzikálního inženýrství se aktivně vyvíjí ultravakuový rastrovací tunelovací mikroskop (UHV STM), který bude provozován za velmi nízkých teplot (LT). Cílem této práce je navrhnout a realizovat tlumenou platformu STM mikroskopu. Práce bude vycházet ze současného návrhu platformy, který bude řešitelem rozvíjen a konstrukčně zdokonalen.

Cíle diplomové práce:

1. Prostudujte možnosti tlumení vibrací v UHV
2. Proveďte konstrukční návrh UHV tlumené platformy

Seznam odborné literatury:

MEYER, Ernst, Hans J HUG a Roland BENNEWITS. Scanning probe microscopy: the lab on a tip. Berlin: Springer, 2004, x, 210 s. ISBN 3-540-43180-2.

VŮJTEK, Milan, Roman KUBÍNEK a Miroslav MAŠLÁŇ. Nanoskopie. 1. vyd. V Olomouci: Univerzita Palackého, 2012, 122 s. ISBN 978-80-244-3102-4.

HARNA, Zdeněk. Přesná mechanika. 1. vyd. Brno: VUT, 1996, 148 s. ISBN 80-214-0794-8.

Vedoucí diplomové práce: Ing. Michal Pavera

Termín odevzdání diplomové práce je stanoven časovým plánem akademického roku 2013/14.

V Brně, dne 2.12.2013



prof. RNDr. Tomáš Šikola, CSc.
Ředitel ústavu

doc. Ing. Jaroslav Katolický, Ph.D.
Děkan

Abstrakt

Diplomová práce se zabývá konstrukcí antivibrační platformy pro nízkoteplotní rastrovací tunelový mikroskop STM pracující v podmínkách ultravysokého vakua (UHV). Chlazení mikroskopu je zajišťováno průtokovým heliovým kryostatem vyvinutým na Ústavu přístrojové techniky AV ČR.

Kromě obecných požadavků na konstrukci zařízení pro použití v ultravysokém vakuu jsou diskutovány různé způsoby izolace a tlumení vibrací v ultravakuu. Dále jsou diskutovány možnosti omezení přenosu vibrací mezi vakuovými zařízeními a vnějším okolím. Poznatky jsou následně aplikovány na návrh antivibrační mikroskopové platformy při zachování požadavků na dosažení nízkých teplot. Pro ověření návrhu je testován funkční model platformy a analyzovány systémy pro izolaci vibrací a jejich tlumení.

Klíčová slova

Mikroskop STM, izolace vibrací, ultravysoké vakuum, nízké teploty.

Summary

Diploma thesis deals with the design of a vibration isolated platform for low temperature scanning tunneling microscope working under ultra high vacuum (UHV STM). Cooling of the microscope is done by liquid helium using a flow cryostat designed in Institute of Scientific Instruments of the AS CR.

In the thesis, general requirements of designing of an ultra high vacuum compatible devices are discussed, as well as the ways of vibrational isolation and damping. Also some ways how to restrict the transfer of vibration between vacuum devices and surroundings are mentioned. This knowledge is then applied to the design of the antivibrational microscope platform compatible with low temperature usage.

For better understanding of vibrational transfer and damping, a real model of the designed platform is made and vibrational transfer characteristics are measured and compared with the theory.

Key words

STM microscope, vibrational isolation, ultra high vacuum, low temperatures.

Bibliografická citace

DAO, T. *Návrh nosné platformy pro nízkoteplotní UHV STM mikroskop*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014, 71 s. Vedoucí diplomové práce Ing. Michal Pavera.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pouze za odborného vedení Ing. Michala Pavery a veškeré podklady, ze kterých jsem čerpal, jsou uvedeny v seznamu použité literatury.

V Brně dne 30. května 2014

.....

Poděkování

Děkuji Ing. Michalu Paverovi za vedení a rady při tvorbě diplomové práce. Dále děkuji doc. Ing. Radku Kalouskovi, Ph.D. za pomoc s problematikou magnetického tlumení a prof. RNDr. Jiřímu Spoustovi, Ph.D. za korektury. Ing. Zdeňku Nováčkovi a Ing. Janu Neumanovi děkuji za podnětné rady a diskuse a děkuji také všem, kteří se jakkoli podíleli na tvorbě této práce. Zvláštní poděkování patří mé rodině za podporu a zázemí během celého studia.

Obsah

Úvod	3
1. Princip funkce STM.....	5
1.1. Schrödingerova rovnice a vlnová funkce.....	5
1.2. Tunelový jev	6
1.3. Konstrukce STM.....	9
2. Konstrukce v podmínkách UHV	11
2.1. Materiály pro použití v UHV	11
2.2. Požadavky na konstrukci zařízení do UHV	13
3. Přenosy a tlumení vibrací v mikroskopu STM	15
3.1. Omezení přenosu vibrací	15
3.2. Možnosti tlumení vibrací v UHV	22
4. Nosná platforma pro nízkoteplotní UHV STM mikroskop	24
4.1. Konstrukce UHV STM mikroskopu a jeho chlazení.....	24
4.2. Požadavky na návrh nosné platformy	26
4.3. Návrh nosné platformy	27
4.3.1. Systém izolace vibrací a jejich tlumení	28
4.3.2. Upevnění měřicí hlavy a radiačního štítu	28
4.3.3. Izolace vibrací vodičů a braidů.....	31
4.3.4. Návrh aretačního systému mikroskopu.....	32
4.3.5. Odhad tepelných toků	34
4.4. Spektrum vibrací v UHV komoře.....	38
4.5. Parametry systému trubkového tlumení	41
4.6. Testování modelu platformy mikroskopu.....	46
4.6.1. Přenosová funkce modelu platformy	47
4.6.2. Měření koeficientu tlumení modelu platformy.....	51
4.7. Konečná podoba nového návrhu platformy.....	53
4.8. Možnosti zlepšení konstrukce platformy	59
Závěr	63
Literatura	65
Seznam výkresů	69
Seznam příloh	71

Úvod

Rastrovací tunelový mikroskop STM (z angl. *Scanning Tunneling Microscope*) je důležitým nástrojem výzkumu v oblasti fyziky povrchů a tenkých vrstev. Umožňuje získat topografické i morfologické informace o povrchu zkoumaného vzorku v atomárním rozlišení. Nevýhodou je však omezení pouze na elektricky vodivé vzorky.

Objev rastrovací tunelové mikroskopie je připisován laureátům Nobelovy ceny Gerdu Binnigovi a Heinrichu Rohrerovi [1]. Základním principem funkce mikroskopu STM je tunelový jev. Kovový hrot sondy je přiveden do blízkosti povrchu vodivého vzorku. Dielektrická mezera mezi hrotem a vzorkem vytváří potenciálovou bariéru, kterou podle klasické fyziky elektrony nemohou překonat. Kvantová fyzika však ukazuje, že existuje nenulová pravděpodobnost průchodu elektronů touto bariérou. Tento efekt se označuje jako tunelový jev.

Elektrony procházející přes bariéru vytvářejí tunelový proud. Samotná pravděpodobnost tunelování elektronu exponenciálně závisí na šířce potenciálové bariéry a tedy na vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku. Této citlivosti využívají mikroskopy STM k dosažení atomárního rozlišení povrchu zkoumaného vzorku. Používají se dva módy. Při módu konstantní výšky rastruje hrot v rovině nad povrchem vzorku a tunelový proud se mění v závislosti na přibližování či oddalování povrchu podle jeho nerovností. Při módu konstantního proudu udržuje elektronika mikroskopu hrot v takové výšce nad povrchem, aby byl tunelový proud konstantní. Při rastrování tak hrot přímo kopíruje strukturu povrchu.

Vzhledem k vysoké citlivosti mikroskopu STM na vzdálenost hrotu od povrchu vzorku je pro dosažení atomárního rozlišení nutné omezit vibrace přenášené na mikroskop. Proto jsou mikroskopy vybaveny antivibračními systémy a tlumením.

Mikroskop STM může pracovat za atmosférického tlaku. Vzorky však často bývají vyráběny v podmínkách ultravysokého vakua a případné vystavení těchto vzorků atmosférickému tlaku může v některých případech znamenat zničení vzorku nebo ztrátu povrchové struktury či vlastností, které měly být předmětem zkoumání. Pro tyto účely bývají mikroskopy STM provozovány v podmínkách ultravysokého vakua. Studium některých termodynamických procesů či jevů zároveň vyžaduje použití mikroskopu při různých teplotách [2]. To znamená např. ochlazovat vzorek pomocí kapalného dusíku či helia a dosáhnout tak požadovaných nízkých teplot v řádu několika desítek Kelvinů. Požadavky na vakuovou kompatibilitu a teplotní variabilitu mikroskopu s sebou nesou množství omezení na konstrukci a použité materiály, což je nutno brát v potaz při návrhu těchto zařízení.

První kapitola předložené diplomové práce stručně pojednává o základech rastrovací tunelové mikroskopie. Je popsán princip funkce mikroskopu STM založený na tunelovém jevu a také stavba samotného mikroskopu.

Druhá kapitola se zabývá materiály a konstrukčními zásadami při navrhování zařízení do podmínek ultravysokého vakua.

Ve třetí kapitole je probírána problematika přenosu a tlumení vibrací, která je klíčová při dosahování atomárního rozlišení v mikroskopech STM. Výsledky z této kapitoly jsou následně použity k návrhu nosné platformy mikroskopu.

Poslední kapitola je věnována samotnému návrhu mikroskopové platformy. Diskutovány jsou různé požadavky na platformu včetně jejich řešení. Dále jsou analyzována měření přenosu vibrací a útlumu kmitání reálného modelu platformy. Výsledky jsou následně porovnány s teoretickými výpočty a použity k volbě optimálních parametrů skutečné platformy.

1. Princip funkce STM

Rastrovací tunelový mikroskop STM pracuje na základě kvantového efektu označovaného jako tunelový jev. Jeho objev lze připsat Friedrichu Hundovi [3]. Za zakladatele samotné rastrovací tunelové mikroskopie jsou však považováni Gerd Binnig a Heinrich Rohrer [1], kteří za svou práci získali roku 1986 Nobelovu cenu [4]. Dnes jsou mikroskopy STM běžnou součástí laboratoří pro studium povrchů a tenkých vrstev.

1.1. Schrödingerova rovnice a vlnová funkce

Začátek 20. století lze považovat za jeden z mezníků ve fyzice. Některé experimenty se nedařilo vysvětlit pomocí klasické fyziky a tak byly položeny základy kvantové mechaniky. Jedním z důležitých objevů byla částicová povaha světla [5], do té doby chápaného jako vlnění. Později se však také ukázalo, že toto tvrzení lze obrátit – tedy že se částice mohou chovat jako vlnění.

V roce 1924 přiřadil Louis de Broglie [6] volné částici funkci $\Psi(\vec{r}, t)$ ve tvaru rovinné monochromatické vlny

$$\Psi(\vec{r}, t) = A \exp[i(\vec{k} \cdot \vec{r} - \omega t)], \quad (1.1)$$

kde A je amplituda vlny, $\vec{k}$ vlnový vektor, $\vec{r}$ polohový vektor a ω úhlová frekvence. Následující experimenty prokázaly pravdivost tohoto předpokladu, když byla pozorována a objasněna difrakce elektronů [7]. Samotná funkce $\Psi(\vec{r}, t)$ nemá fyzikální význam, avšak čtverec její absolutní hodnoty $|\Psi|^2$ (tj. součin vlnové funkce a funkce k ní komplexně sdružené) udává hustotu pravděpodobnosti nalezení popisované částice v dané poloze a čase.

Obecně lze každé částici přiřadit tzv. vlnovou funkci $\Psi(\vec{r}, t)$, která je obecnou funkcí polohy a času a nemusí mít vůbec matematický tvar vlny. Pro volnou částici má vlnová funkce jednoduchý tvar (1.1), avšak nalezení vlnové funkce obecné částice bývá problematické. Je k tomu zapotřebí řešit tzv. Schrödingerovu rovnici [8]

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(\vec{r}, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \Delta \Psi(\vec{r}, t) + V(\vec{r}, t) \Psi(\vec{r}, t), \quad (1.2)$$

kde $\hbar$ je Planckova konstanta dělená 2π (tzv. redukovaná Planckova konstanta), Δ je Laplaceův operátor v kartézských souřadnicích a $V(\vec{r}, t)$ je potenciální energie částice v poloze $\vec{r} = (x, y, z)$ a čase t . Schrödingerova rovnice funguje podobně jako pohybová rovnice v kvantové mechanice. Nelze ji nijak dokázat a v analogii s Newtonovou pohybovou rovnicí v klasické mechanice ji tedy postulujeme.

Uvažujme dále Schrödingerovu rovnici pouze v jedné dimenzi. Pokud potenciál nezávisí na čase, lze Schrödingerovu rovnici (1.2) zjednodušit na tvar

$$i\hbar \frac{\partial \Psi(x, t)}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \frac{\partial^2 \Psi(x, t)}{\partial x^2} + V(x) \Psi(x, t). \quad (1.3)$$

Pomocí separace proměnných pak lze najít řešení rovnice (1.3) ve tvaru součinu dvou funkcí

$$\Psi(x, t) = \varphi(t) \psi(x). \quad (1.4)$$

Pak $\varphi(t)$ je řešením časové části Schrödingerovy rovnice (1.3), která má tvar

$$i\hbar \frac{d\varphi(t)}{dt} \frac{1}{\varphi(t)} = E, \quad (1.5)$$

a $\psi(x)$ je řešením bezčasové části Schrödingerovy rovnice (1.3), která má tvar

$$-\frac{\hbar^2}{2m} \frac{d^2\psi(x)}{dx^2} \frac{1}{\psi(x)} + V(x) = E, \quad (1.6)$$

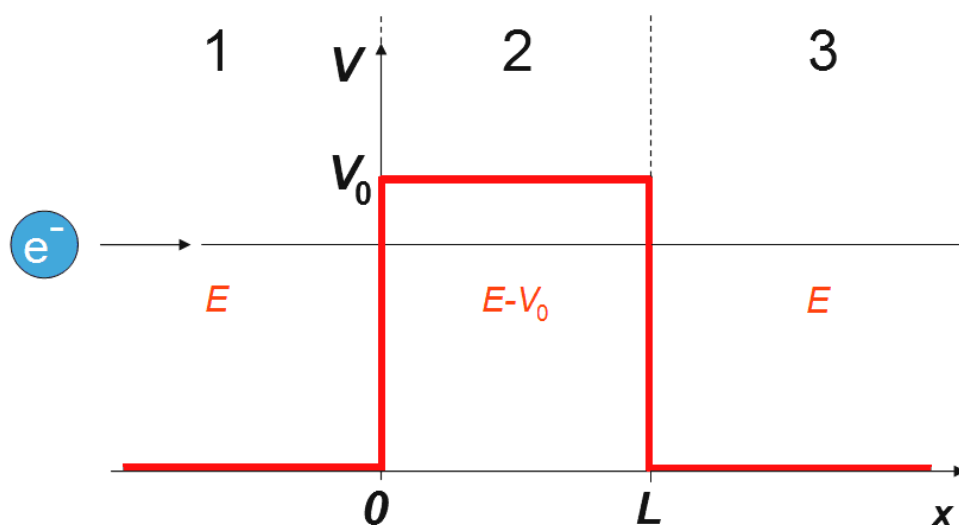
kde E je celková energie částice daná součtem potenciální energie V a kinetické energie T definované jako

$$T = \frac{p^2}{2m}, \quad (1.7)$$

kde p je hybnost částice.

1.2. Tunelový jev

Uvažujme nyní případ jednorozměrné potenciálové bariéry výšky V_0 a šířky L (obr. 1.1), na kterou dopadá zleva elektron s energií $E < V_0$ [8].



Obr. 1.1: Zobrazení situace pro popis tunelového jevu. Elektron o energii E dopadá na stacionární bariéru o výšce V_0 a šířce L .

Řešení časové části Schrödingerovy rovnice (1.5) má v oblastech 1, 2 a 3 na obrázku 1.1 všude stejný tvar

$$\varphi(t) = \exp(-i\omega t), \quad (1.8)$$

kde ω vyjadřuje úhlovou frekvenci ve tvaru

$$\omega = \frac{E}{\hbar}. \quad (1.9)$$

Řešení bezčasové části Schrödingerovy rovnice (1.6) pak zapíšeme ve tvaru

$$\psi(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx), \quad (1.10)$$

kde k je velikost vlnového vektoru definovaná vztahem

$$k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}. \quad (1.11)$$

V případě bariéry na obrázku 1.1 dostáváme postupně pro oblasti 1, 2 a 3 rovnice

$$\psi_1(x) = A \exp(ikx) + B \exp(-ikx), \text{ kde } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \quad (1.12)$$

$$\psi_2(x) = C \exp(-\alpha x) + D \exp(\alpha x), \text{ kde } \alpha = \frac{\sqrt{2m(V_0 - E)}}{\hbar}, \quad (1.13)$$

$$\psi_3(x) = F \exp(ikx) + G \exp(-ikx), \text{ kde } k = \frac{\sqrt{2mE}}{\hbar}, \quad (1.14)$$

kde pro větší přehlednost v případě oblasti 2 došlo k nahrazení ryze komplexní konstanty k reálnou konstantou α při současném odstranění komplexních jednotek z rovnice pro $\psi_2(x)$.

Je zřejmé, že harmonické funkce (1.12) a (1.14) v oblasti 1 a 3 tvoří podle rovnice (1.4) spolu s řešením časové části Schrödingerovy rovnice (1.8) rovinné vlny jdoucí směrem vpravo (členy s amplitudami A a F) a vlevo (členy s amplitudami B a G). V oblasti 2 jsou pak řešením dvě exponenciální funkce (1.13). Dále v oblasti 3 při současném zadání nemůže existovat vlna jdoucí vlevo, proto je konstanta G v rovnici (1.14) rovna nule.

Zajímá nás pravděpodobnost průchodu elektronu přes bariéru, tedy

$$P = \frac{|\Psi_3|^2}{|\Psi_{1+}|^2} = \frac{|F|^2}{|A|^2}, \quad (1.15)$$

kde $\Psi_{1+} = A \exp(ikx)$ značí pouze tu část funkce (1.12) charakterizující vlnu jdoucí vpravo (kladný směr osy x dle obrázku 1.1), tedy vlnu dopadající na bariéru.

K výpočtu konstant A , B , C , D a F v rovnicích (1.12) až (1.14) dále využijeme podmínek spojitosti vlnové funkce a jejích prvních derivací na rozhraní oblastí 1 a 2

$$\psi_1(0) = \psi_2(0), \quad (1.16)$$

$$\left. \frac{d\psi_1}{dx} \right|_0 = \left. \frac{d\psi_2}{dx} \right|_0. \quad (1.17)$$

Stejné podmínky platí i na rozhraní oblastí 2 a 3, tedy

$$\psi_2(L) = \psi_3(L), \quad (1.18)$$

$$\left. \frac{d\psi_2}{dx} \right|_L = \left. \frac{d\psi_3}{dx} \right|_L. \quad (1.19)$$

Dosazením rovnic (1.12) až (1.14) do hraničních podmínek (1.16) až (1.19) dostáváme pro rozhraní oblastí 1 a 2 (tj. pro levý okraj bariéry na obr. 1.1) rovnice

$$A + B = C + D, \quad (1.20)$$

$$ikA - ikB = -\alpha C + \alpha D \quad (1.21)$$

a pro rozhraní oblastí 2 a 3 (tj. pravý okraj bariéry na obr. 1.1) rovnice

$$C \exp(-\alpha L) + D \exp(\alpha L) = F \exp(ikL), \quad (1.22)$$

$$-\alpha C \exp(-\alpha L) + \alpha D \exp(\alpha L) = ikF \exp(ikL). \quad (1.23)$$

Řešením soustavy rovnic (1.20) až (1.23) získáme [8]

$$\frac{A}{F} = \frac{1}{2} \exp(ikL) \left[\left(1 - \frac{ik}{2\alpha} - \frac{\alpha}{2ik} \right) \exp(\alpha L) + \left(-1 + \frac{ik}{2\alpha} + \frac{\alpha}{2ik} \right) \exp(-\alpha L) \right]. \quad (1.24)$$

Uvažujeme-li, že výška potenciálové bariéry je větší než energie elektronu (tj. $\alpha > k$) a že je také „dostatečně široká“ (tj. $L \gg 1$), tedy $\exp(\alpha L) \gg \exp(-\alpha L)$, lze vztah (1.24) aproximovat výrazem

$$\frac{A}{F} = \frac{2ik - \alpha}{4ik} \exp[(\alpha + ik)L]. \quad (1.25)$$

Pro pravděpodobnost průchodu elektronu bariérou podle (1.15) pak dostáváme

$$P = \frac{F}{A} \frac{F^*}{A^*} = \frac{16}{4 + \left(\frac{\alpha}{k} \right)^2} \exp(-2\alpha L). \quad (1.26)$$

Z definice α (1.13) a k (1.11) plyne, že

$$\left(\frac{\alpha}{k} \right)^2 = \frac{V_0}{E} - 1, \quad (1.27)$$

a proto můžeme závislost koeficientu exponenciály ve vztahu (1.26) považovat za zanedbatelnou vzhledem ke koeficientu samotnému, takže ve výsledku vztah (1.26) aproximujeme jako

$$P \cong \exp(-2\alpha L). \quad (1.28)$$

Pravděpodobnost průniku elektronu potenciálovou bariérou je tedy exponenciálně závislá na šířce bariéry. Elektron tak může s nenulovou pravděpodobností překonat bariéru s vyšším potenciálem, než je jeho energie, což by podle klasické fyziky nemělo být možné. Kvantová fyzika však toto umožňuje.

1.3. Konstrukce STM

Jak bylo odvozeno v předchozí podkapitole, velikost tunelového proudu silně závisí na šířce potenciálové bariéry. Rastrovací tunelový mikroskop STM této závislosti využívá k dosažení atomárního rozlišení povrchové struktury vzorků.

Mikroskop STM se skládá z měřicí hlavy, ovládací elektroniky a počítače pro zpracování signálu. Měřicí hlava obsahuje držák vzorku, rastrovací hrot a soustavu motorů. Účelem motorů je zajistit přibližování a oddalování hrotu od vzorku a také samotné rastrování hrotem po povrchu vzorku.

Mikroskopy bývají zpravidla vybaveny dvěma typy motorů – pro hrubý a jemný posuv. Hrubý posuv slouží k makroskopickému přiblížení hrotu k povrchu vzorku či k výběru různých oblastí na vzorku pro podrobnější zkoumání. Jemný posuv pak zajišťuje přesné přiblížení hrotu ke vzorku a samotné rastrování, takže musí při pohybu dosahovat dostatečné přesnosti. Prakticky ve všech mikroskopech STM se k tomuto účelu používají piezoelektrické posuvy různých konstrukcí s přesností pohybu až 1 pm [9]. Typické piezoelektrické motory pro jemný posuv pak mohou mít rozsah pohybu v řádu 10 nm až 100 μm v závislosti na konstrukci a přiloženém napětí, které vzhledem k typické délkové deformaci v řádu $10^{-1} \text{ nm} \cdot \text{V}^{-1}$ může dosahovat stovek V [9]. Samotné rastrování může probíhat dvěma způsoby: motory pohybují hrotem nad nehybným vzorkem nebo pohybují celým vzorkem, zatímco hrot je nehybný.

Jako hrot mikroskopu STM může posloužit tenký vodivý drát s ostrou špičkou. Poloměr špičky však přímo ovlivňuje kvalitu zobrazení mikroskopem [10]. Proto se k výrobě hrotů často používá stříhání a leptání [11] či selektivní růst, např. Ag_2Ga [12]. Výsledkem mohou být hroty s poloměrem křivosti pouze několik desítek nanometrů.

V pracovním režimu mikroskopu je hrot ve vzdálenosti desetin nm od povrchu vzorku [9]. Dielektrická mezera mezi hrotem a vzorkem vytváří potenciálovou bariéru, přes kterou elektrony mohou tunelovat oběma směry. Pravděpodobnosti tunelování v obou směrech jsou stejné, a proto není detekován žádný tunelový proud mezi hrotem a vzorkem. Proto je mezi hrot a vzorek přivedeno tunelovací napětí. Tím převládne tunelování jedním směrem v souladu se směrem přiloženého napětí a podle velikosti tunelovacího napětí a tunelového proudu lze určit šířku bariéry. V závislosti na způsobu snímání pak existují dva pracovní módy mikroskopu (obr. 1.2):

- *Mód konstantního proudu*

Hrot rastruje po povrchu vzorku, přičemž elektronika pomocí zpětné vazby reguluje výšku hrotu tak, aby byl tunelový proud konstantní. Při rastrování tedy hrot kopíruje

nerovnosti povrchu a pro vytvoření obrazu stačí odečítat výšku hrotu podle napětí přivedeného na skener zpětnou vazbou. Tento způsob je pomalejší z důvodu omezení rychlosti zpětné vazby, ale umožňuje rastrování bez nebezpečí zničení hrotu.

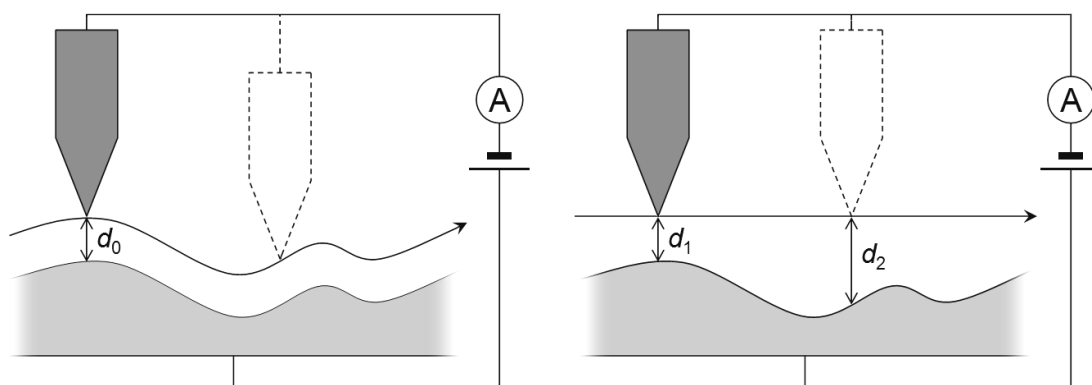
- *Mód konstantní výšky*

Hrot rastruje v rovině nad vzorkem, takže vzdálenost mezi hrotem a povrchem vzorku se mění podle povrchových nerovností. Počítač pak z tunelového proudu dopočítává šířky bariéry a tím vzdálenosti hrotu od povrchu vzorku, které přiřazuje souřadnicím na vzorku. Tento mód je rychlejší, a proto vhodný ke studiu dynamických procesů. Hrozí však riziko poškození hrotu při kontaktu s nerovností přesahující výšku nastavené hladiny, v níž hrot rastruje. Proto se v praxi nejprve provádí měření módem konstantního proudu a podle výsledků se případně zvolí bezpečná rastrovací oblast a výška pro mód konstantní výšky.

Nezávisle na pracovním módu musí být elektronika mikroskopu schopná detekovat velmi slabý tunelový proud (řádově nA [9]). Závislost hustoty tunelového proudu na šířce L mezery mezi hrotem a vzorkem je dána vztahem [13]

$$j = K \frac{U_T}{L} \exp(-2\alpha L), \quad (1.29)$$

kde U_T je tunelovací napětí přivedené mezi hrot a vzorek a typická hodnota konstanty K je $6,30 \cdot 10^4 \text{ C}^2 \cdot \text{s} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{m}^{-3}$. Exponenciální funkce ve vztahu (1.29) udává pravděpodobnost průniku jednoho elektronu potenciálovou bariérou (viz vztah (1.28)).



Obr. 1.2: Princip dvou pracovních módů mikroskopu STM. Vlevo mód konstantního proudu, vpravo mód konstantní výšky.

2. Konstrukce v podmínkách UHV

Ultravysoké vakuum (UHV – z angl. *Ultra High Vacuum*) nastává v případě rozsahu tlaků vzduchu mezi 10^{-6} a 10^{-10} Pa [14]. Takové podmínky kladou omezení na použité materiály i technologii výroby zařízení, která mají v UHV pracovat.

2.1. Materiály pro použití v UHV

Na materiály určené do podmínek UHV jsou kladeny především dva požadavky [14]:

- *Nízká desorpce plynů z materiálu*

Aby bylo možné dosáhnout ultravysokého vakua, veškeré použité materiály musí mít dostatečně nízký tlak nasycených par. V opačném případě jsou takové materiály při snižování tlaku zdrojem plynů, což zpomaluje rychlost čerpání vakuových komor či znemožňuje dosáhnout požadovaného tlaku. Materiály by také měly být co nejčistší a s minimálním množstvím plynů vázaných uvnitř materiálu.

- *Mechanická stálost za zvýšených teplot při zachování nízké desorpce*

Vakuové komory mohou být v případě vypékání zahřívány až na teplotu 300 °C. Použité materiály tak musí být vůči této teplotě natolik odolné, aby si zachovaly mechanické vlastnosti na požadované úrovni. Některá zařízení provozovaná v podmínkách UHV se také mohou silně zahřívat a dosahovat vysokých teplot. Desorpce použitých materiálů či jejich složek pak nesmí překročit požadovanou mez ani při těchto vysokých teplotách.

Volbu vakuových materiálů je dále třeba podřídit případným požadavkům na jejich elektrické či magnetické vlastnosti. Pro konstrukci ultravakuových zařízení a prvků se užívá celá řada materiálů. Jde převážně o kovy, sklo, keramické materiály a některé polymery. Vybrané konstrukční materiály jsou uvedeny v tabulce 2.1.

<i>kovy</i>	<i>polymery</i>	<i>keramické materiály</i>	<i>ostatní</i>
nerezová ocel	Kapton ®	Macor ®	sklo
měď (bez kyslíkatá)	Viton ®	nitrid boru	safír
hliník a jeho slitiny	PEEK	alumina	křemen
titan	teflon		
wolfram			
tantal			
molybden			
zlato			
stříbro			
platina			

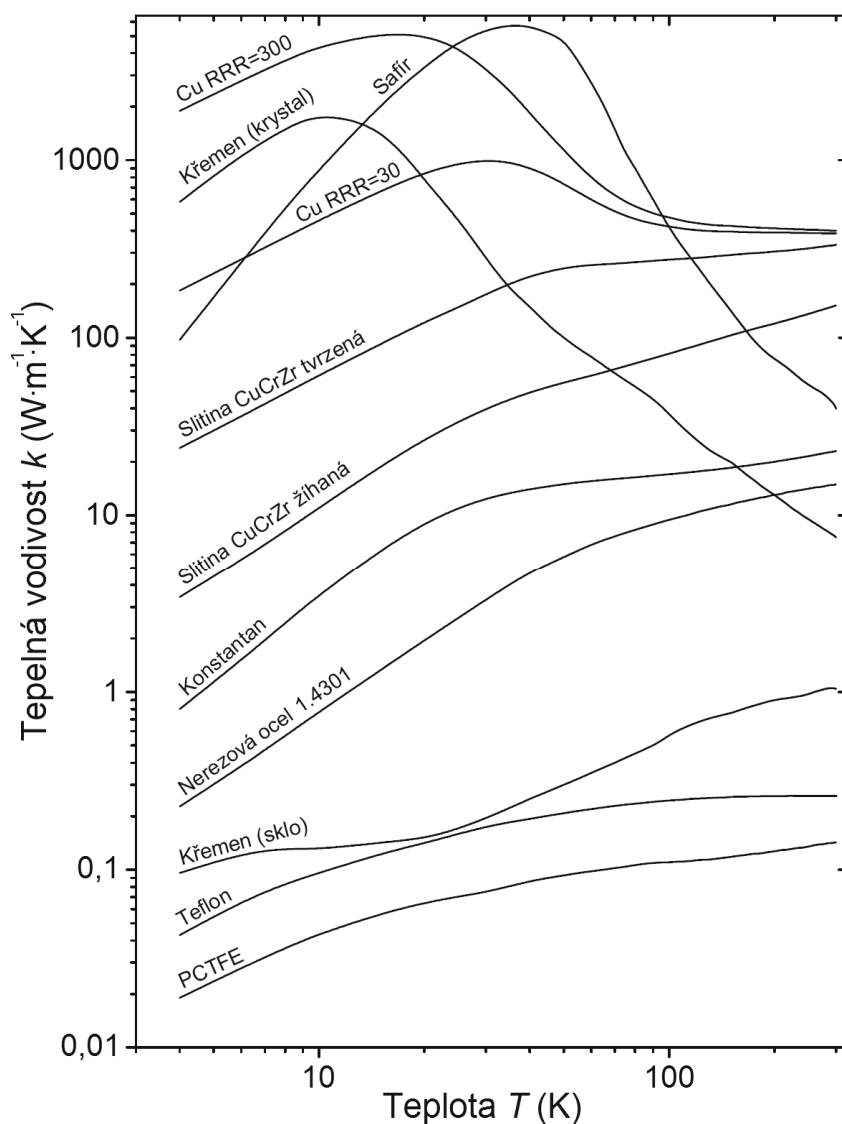
Tab. 2.1: Vybrané konstrukční materiály používané v podmínkách UHV [14] [15].

Nejvýznamnějším materiálem jsou nerezové oceli s různými legujícími prvky. Výhodou nerezových ocelí jsou jejich mechanické vlastnosti a stabilita. Bývají z nich zhotoveny samotné vakuové systémy i součásti zařízení pracujících uvnitř vakuových komor.

Dalším častým materiálem je bezkyslíkatá měď pro svou vysokou elektrickou [16] a tepelnou vodivost (obr. 2.1). Wolfram, tantal a molybden jsou díky velmi vysokým teplotám tání [16] vhodné pro teplotně odolné prvky, vlákna elektronových zdrojů apod. Kovy obecně obsahují velké množství plynů a pro podmínky UHV musejí být odplyňovány ohřevem ve vakuu či je nutné používat speciální výrobní operace, např. tavení ve vakuu [14].

Z polymerů je hojně využíván Kapton [17] pro elektrické izolace vodičů a součástí. Elastomer Viton [18] lze použít jako pružicí element nebo pro výrobu těsnění spojů vakuových systémů s nižšími tlaky.

Macor [19] je keramický materiál odolávající teplotě až 1000 °C, který lze obrábět běžnými postupy používanými při obrábění kovů. Umožňuje tak snadno vytvářet různé tvarově složité prvky přesných rozměrů, např. elektrické izolátory.



Obr. 2.1: Závislost tepelné vodivosti na teplotě pro několik běžných kryogenických materiálů. Převzato z [22].

Tvrdá skla mají dobré vakuové vlastnosti (malá desorpce, nízký tlak nasycených par) a pro svou průhlednost jsou nejčastěji používána jako součást průhledů do vakuových komor. Lze je také užít jako elektrické izolátory.

V případě kryogenických ultravakuových zařízení je třeba užívat materiály s vhodnými vlastnostmi v oblastech nízkých teplot. Jde především o tepelnou vodivost daných materiálů, kterou požadujeme buď co nejvyšší (pro tepelné výměníky, chladiče apod.), nebo co nejnižší (např. pro tepelné izolace).

Na obrázku 2.1 jsou uvedeny tepelné vodivosti několika běžně používaných kryogenických materiálů v závislosti na teplotě. Je patrné, že při nízkých teplotách se výsledné vlastnosti mohou lišit i v rámci jednoho materiálu v závislosti na jeho čistotě, chemickém složení nebo tepelném zpracování. Např. pro měď s hodnotou $RRR = 300$ je tepelná vodivost o řád vyšší než v případě mědi s hodnotou $RRR = 30$, přičemž hodnota RRR (z angl. *Residual Resistivity Ratio*) je definována jako poměr měrného elektrického odporu materiálu při teplotě 293 K a 4,2 K [20].

Podobně tepelné zpracování materiálu může vést k řádově odlišným vlastnostem. Například u slitiny mědi CuCrZr [21] obsahující chrom a zirkon lze žháním dosáhnout snížení tepelné vodivosti přibližně o řád (obr. 2.1).

2.2. Požadavky na konstrukci zařízení do UHV

Kromě správné volby materiálů je třeba pro použití v ultravysokém vakuu dodržovat i jisté konstrukční zásady pro navrhovaná zařízení.

Vakuové systémy bývají dvojího typu – skleněné a kovové [23]. Skleněné systémy se používají pro jednoduchá zařízení. Výhodou skla je snadné odplynění, odolnost proti olejovým parám a velmi vysoká vakuová těsnost. Nevýhodou je křehkost materiálu, nemožnost tvorby složitých soustav a obtížné dodatečné úpravy již hotových vakuových systémů.

Kovové vakuové systémy jsou používány všude, kde je třeba vytvářet složité soustavy vzájemně spojených komor s nutností upravovat či doplňovat komponenty. Lze je vyrábět s velkou přesností, ale nelze je tak snadno odplyňovat jako skleněné.

Kromě těsnosti vakuových systémů je nutné zajistit, aby vlivem atmosférického tlaku působícího na stěny vakuových komor nedošlo ke ztrátě jejich tvaru. Dále musí být konstrukce vakuových zařízení přizpůsobena problémům, které přímo souvisejí s nízkým tlakem a jeho vytvářením. Mimo vhodné materiály jsou to především virtuální netěsnosti a absence přenosu tepla prouděním.

- *Virtuální netěsnosti*

Kromě uvolňování plynů přímo z materiálů nebo desorpcí částic ze stěn vakuového systému jde především o postupné unikání plynu z uzavřených dutin. Dochází k prodloužení čerpacího času nebo ke zhoršení dosažitelného tlaku, což jsou stejné projevy, jakými se vyznačují netěsnosti vakuového systému. Je tedy nutné vyhnout se při návrhu zařízení neodvzdušněným prostorům, mezi které nejčastěji patří slepé otvory pro šrouby. V případech, kdy je to možné, je výhodné využít průchozí otvory. Pokud průchozí otvor není konstrukčně možný, používají se duté šrouby s průchozím otvorem podél osy, případně s částečně zabroušeným závitem. U konstrukcí ochranných krytů, radiačních štítů a jiných podobně uzavřených součástí je nutné pamatovat na dostatečné

množství otvorů pro rychlé čerpání plynu. Zároveň však musí být zachována funkčnost součástí.

- *Absence přenosu tepla prouděním (konvekci)*

Přenos tepla prouděním je v důsledku nízkého tlaku v podmínkách UHV prakticky zanedbatelný. To však činí nemalé problémy v případě nutnosti chladit zahřívající se součásti přístrojů pracujících ve vakuu. Obtíže působí i zahřívání samotných elektrických vodičů, na kterých se kvůli odporu disipuje část přenášeného výkonu. Případné přehřátí vodiče a následné roztavení izolace může vést k nárůstu desorpce z izolačního materiálu, nemluvě o možnosti zkratování či přerušení vodičů.

V případě dosahování nízkých teplot však může být toto naopak výhodou, kdy při návrhu kryogenických systémů do UHV stačí uvažovat pouze tepelné toky způsobené vedením (kondukcí) a zářením (radiací).

Dále je třeba při konstrukcích samotných vakuových komor a jejich soustav dbát na účinné čerpání plynu z komor. Veškerá potrubí vedoucí k vývěvám by měla být co nejkratší, co nejširší a bez ostrých kolen či ohybů.

Spojování materiálů musí vyhovovat požadovanému stupni vakua. Pro nerozebíratelné spoje se užívá svařování elektronovým svazkem nebo obloukem v ochranné atmosféře [14]. Pájení je možné tvrdými pájkami jako stříbrem, zlatem nebo slitinami mědi.

V případě zařízení pracujících při proměnné teplotě musí být dále pamatováno na rozdílné tepelné roztažnosti různých materiálů. Svěrné či tvarové spoje se mohou vlivem teplotních změn uvolnit.

Součásti určené do podmínek UHV musejí být také před použitím řádně očištěny. Především jde o odstranění zbytků olejů a maziv (např. po obrábění) kvůli jejich nízkému tlaku nasycených par. Různé materiály se čistí různě a je třeba zvolit vhodný postup.

U všech materiálů je důležitá kvalita povrchu vakuových komponent vzhledem k adsorpci a desorpci plynů. Povrchy by měly být hladké, bez pórů a trhlin [14]. Pro zpracování a dosažení požadované jakosti povrchu se používá pískování, kuličkování, mechanické nebo elektrochemické leštění [24].

3. Přenosy a tlumení vibrací v mikroskopu STM

Pro dosažení atomárního rozlišení je v případě mikroskopu STM třeba detekovat změny vzdálenosti hrotu od vzorku v řádu 10 až 100 pm [25]. Případné vibrace s amplitudou srovnatelnou či větší než tyto změny by značně zhoršily kvalitu obrazu, případně by mohly zcela znemožnit dosažení požadovaného rozlišení. Při návrhu mikroskopu je proto důležité porozumět problematice vibrací v UHV komorách a co nejvíce omezit jejich přenos na mikroskop.

Většina konstrukcí mikroskopů STM je citlivá především na vibrace ve vertikálním směru [25], zatímco horizontální vibrace či rotační kmity mají menší význam. Je to dáno především tím, že většina vibrací se na komoru přenáší z podlahy laboratoře, která kmitá převážně ve vertikálním směru [26].

Amplitudy vibrací podlahy v typické laboratoři bývají v řádu μm [25] a spektrum obsahuje frekvence v širokém rozsahu. Mezi hlavní zdroje vibrací [26] patří chvění budov (15-25 Hz), pracující stroje (10-100 Hz) a chůze po podlaze (1-3 Hz). Zvláštním zdrojem vibrací pak jsou přírodní elektrické vodiče a v případě mikroskopů pracujících na vzduchu také vibrace vyvolané akusticky.

Předmětem zájmu u běžných zařízení bývají většinou vibrace v rozmezí od 1 Hz do 500 Hz [27]. Pro frekvence nižší než 1 Hz se totiž většina přístrojů chová jako pevná monolitická tělesa a vliv vibrací je minimální, zatímco vysoké frekvence (nad 500 Hz) zase mívají velmi malé amplitudy. V případě mikroskopu STM je však nutné i tyto malé amplitudy brát při návrhu zařízení v úvahu.

3.1. Omezení přenosu vibrací

Vibrace jsou v případě mikroskopu STM klíčovým problémem při snaze dosáhnout co největšího rozlišení a čistoty signálu.

Přenos vibrací z jednoho předmětu na druhý je vlastně případem nuceného kmitání, kdy zdroj vibrací kmitá na určité frekvenci a tyto vibrace se přes vazby přenášejí na kmitající předmět. Uvažujme nyní zjednodušenou sestavu mikroskopu tak, jak je znázorněna na obrázku 3.1. Držák vzorku je spojen s držákem hrotu přes pružinu a lineární viskózní tlumicí člen. Obdobným způsobem je držák hrotu spojen se základnou mikroskopu. Pro zjednodušení dále uvažujeme, že držák hrotu, vzorku i základna mikroskopu jsou dokonale tuhá tělesa.

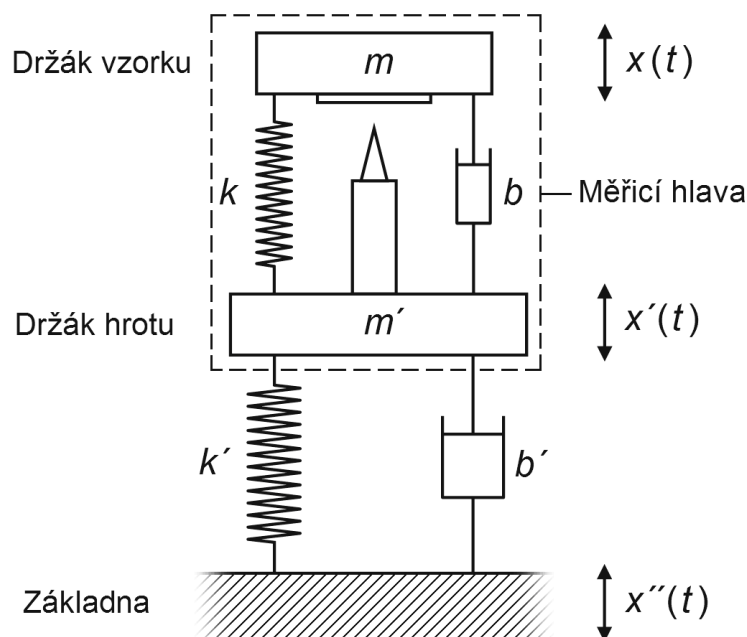
Řešení přenosu vibrací mikroskopové sestavy na obrázku 3.1 rozdělíme do dvou samostatně řešených částí:

- 1) Soustava držák vzorku – držák hrotu.

Situaci lze v souhlasu s obrázkem 3.1 popsat pohybovou rovnicí [28]

$$m\ddot{x} + b(\dot{x} - \dot{x}') + k(x - x') = 0, \quad (3.1)$$

kde x je výchylka držáku vzorku o hmotnosti m , k je tuhost pružiny, b koeficient tlumení viskózního tlumicího členu a x' je výchylka držáku hrotu.



Obr. 3.1: Schéma sestavy mikroskopu pro odvození přenosové funkce.

Dále použijeme vztah pro vlastní úhlovou frekvenci pružiny

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} \quad (3.2)$$

a se substitucí

$$\gamma = \frac{b}{2m} \quad (3.3)$$

přepíšeme vztah (3.1) do tvaru

$$\ddot{x} + 2\gamma(\dot{x} - \dot{x}') + \omega_0^2(x - x') = 0. \quad (3.4)$$

Dále předpokládejme, že držák hrotu kmitá harmonicky s amplitudou x'_0 , tedy $x'(t) = x'_0 \exp(i\omega t)$, a budí tak kmitu držáku vzorku. Ty jsou v ustáleném stavu rovněž harmonické a lze je popsat jako $x(t) = x_0 \exp(i\omega t)$, kde x_0 je komplexní amplituda kmitů držáku vzorku. S využitím těchto funkcí a jejich dosazením do rovnice (3.4) lze získat vztah pro komplexní amplitudu kmitů držáku vzorku

$$x_0 = \frac{x'_0}{A^2 + B^2} \left[(A\omega_0^2 + B^2) + i(AB - B\omega_0^2) \right], \quad (3.5)$$

kde členy A a B jsou substituce

$$A = (\omega_0^2 - \omega^2), \quad (3.6)$$

$$B = 2\gamma\omega. \quad (3.7)$$

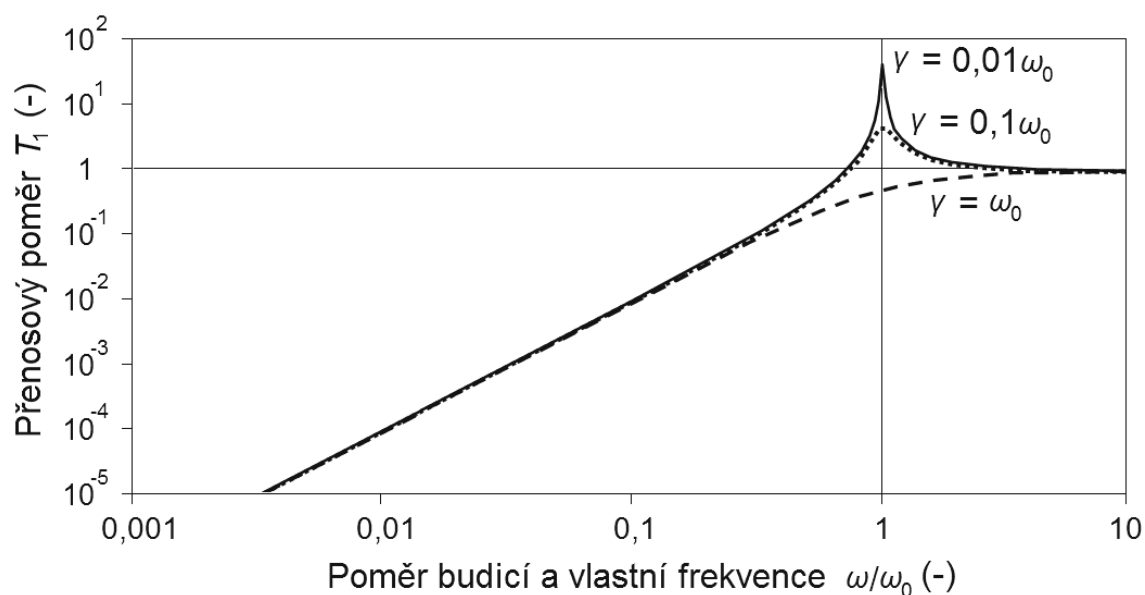
Z hlediska funkčnosti mikroskopu je kritický relativní pohyb vzorku vůči hrotu. Pro získání přenosového poměru, tedy poměru relativní vzdálenosti hrotu od vzorku vůči amplitudě vibrací držáku hrotu při dané budicí frekvenci, lze psát vztah

$$T_1(\omega) = \left| \frac{x_0 - x'_0}{x'_0} \right|. \quad (3.8)$$

Po dosazení za amplitudu kmitání držáku vzorku (3.5) a s využitím substitucí (3.6) a (3.7) je výsledná přenosová funkce soustavy držák vzorku – držák hrotu popsána vztahem

$$T_1(\omega) = \frac{\omega^2}{\sqrt{(\omega_0^2 - \omega^2)^2 + 4\gamma^2\omega^2}}. \quad (3.9)$$

Průběh přenosové funkce $T_1(\omega)$ podle rovnice (3.9) je zobrazen na obrázku 3.2. Funkce dosahuje maxima v případě, že se budicí frekvence rovná vlastní frekvenci soustavy dané její hmotností a tuhostí vazby. Pro budicí frekvence větší než vlastní frekvence se přenosový poměr blíží jedničce, pro nižší frekvence klesá.



Obr. 3.2: Příklady přenosových funkcí T_1 podle rovnice (3.9) mezi držákem vzorku a držákem hrotu pro různé hodnoty tlumení.

2) Soustava držák hrotu – základna.

Situace je obdobná jako v předchozím případě. Podle obrázku 3.1 můžeme soustavu popsat pohybovou rovnicí [28]

$$m\ddot{x}' + b'(\dot{x}' - \dot{x}'') + k'(x' - x'') = 0, \quad (3.10)$$

kde x' je výchylka držáku hrotu o hmotnosti m' , k' je tuhost pružiny, b' konstanta tlumení viskózního tlumicího členu a x'' je výchylka základny. Opět zavedeme vztah pro vlastní úhlovou frekvenci pružiny

$$\omega'_0 = \sqrt{\frac{k'}{m'}} \quad (3.11)$$

a se substitucí

$$\gamma' = \frac{b'}{2m'} \quad (3.12)$$

přepíšeme rovnici (3.10) do tvaru

$$\ddot{x}' + 2\gamma'(\dot{x}' - \dot{x}'') + \omega'^2_0(x' - x'') = 0, \quad (3.13)$$

který je formálně stejný jako rovnice (3.4) v předchozím případě. Opět předpokládáme harmonické kmity základny $x''(t) = x''_0 \exp(i\omega t)$ s amplitudou x''_0 , které v ustáleném stavu budí rovněž harmonické kmity držáku hrotu $x'(t) = x'_0 \exp(i\omega t)$ s komplexní amplitudou x'_0 . Stejným postupem jako v předchozím případě dostáváme analogicky vztah pro komplexní amplitudu kmitání držáku hrotu

$$x'_0 = \frac{x''_0}{A^2 + B^2} \left[(A\omega'^2_0 + B^2) + i(AB - B\omega'^2_0) \right], \quad (3.14)$$

kde členy A a B jsou substituce

$$A = (\omega'^2_0 - \omega^2), \quad (3.15)$$

$$B = 2\gamma'\omega. \quad (3.16)$$

Pro přenos vibrací ze základny na držák hrotu je nyní důležitá pouze samotná amplituda vibrací držáku hrotu, protože ta vytváří buzení vibrací soustavy probírané v předchozím případě (tedy soustavy držák vzorku – držák hrotu). Proto přenosový poměr zapíšeme ve tvaru

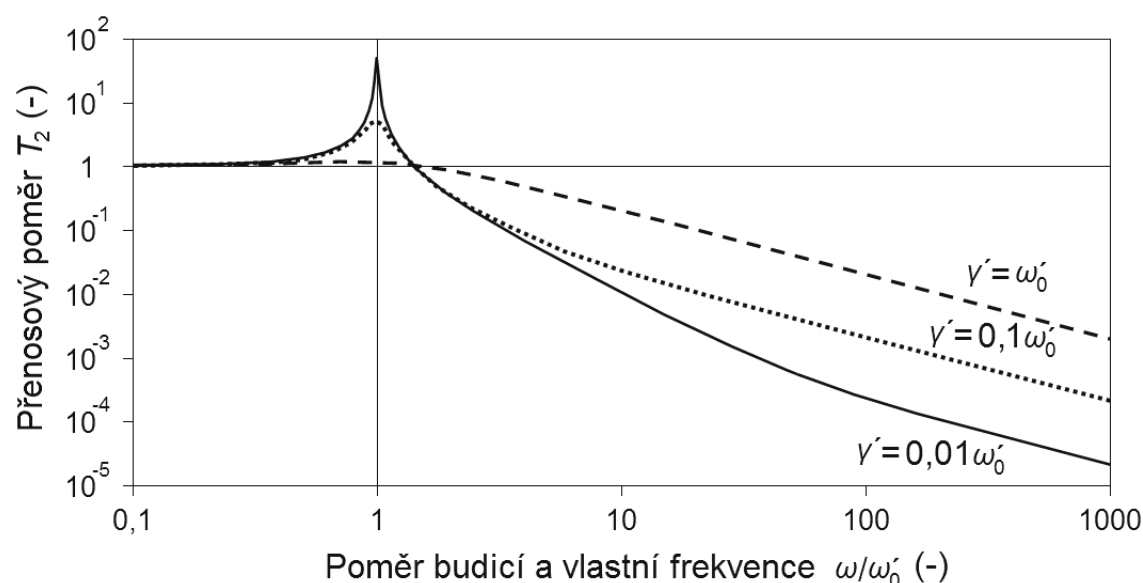
$$T_2(\omega) = \left| \frac{x'_0}{x''_0} \right|, \quad (3.17)$$

kdy po dosazení rovnice (3.14) a substitucí (3.15) a (3.16) dostáváme pro soustavu držák hrotu – základna výslednou přenosovou funkci

$$T_2(\omega) = \frac{\sqrt{\omega'^4_0 + 4\gamma'^2\omega^2}}{\sqrt{(\omega'^2_0 - \omega^2)^2 + 4\gamma'^2\omega^2}}. \quad (3.18)$$

Přenosová funkce $T_2(\omega)$ (obr. 3.3) podle rovnice (3.18) vykazuje opačný charakter než funkce $T_1(\omega)$ (obr. 3.2). Opět dosahuje maxima, když se budicí frekvence rovná vlastní

frekvenci soustavy, ale blíží se jedničce pro frekvence nižší. Pro budicí frekvence vyšší než vlastní frekvence naopak klesá a hodnoty přenosových poměrů pak závisí na tlumení soustavy.



Obr. 3.3: Příklady přenosových funkcí T_2 podle rovnice (3.18) mezi základnou a držákem hrotu pro různé hodnoty tlumení.

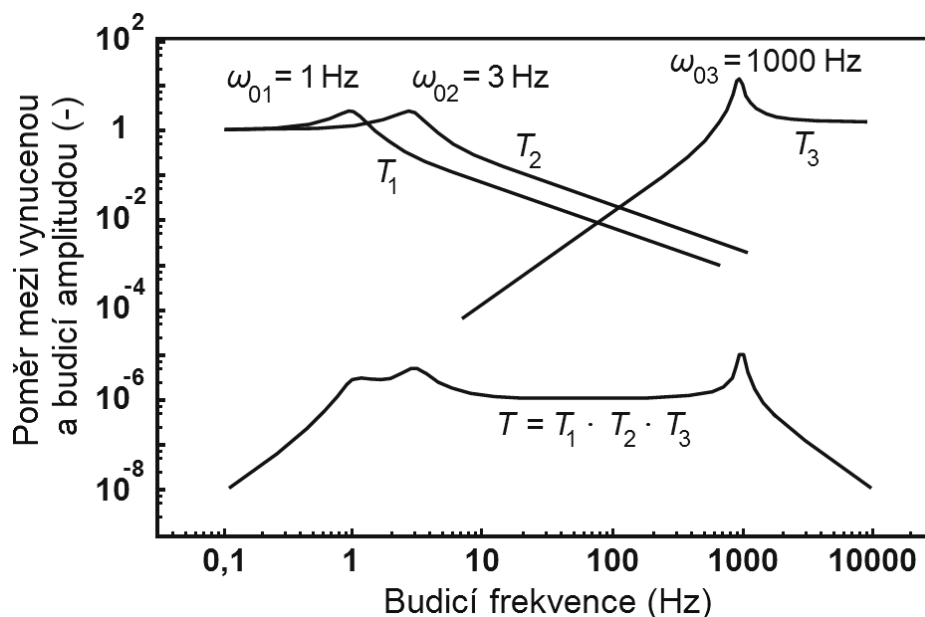
Výsledná přenosová funkce sestavy mikroskopu je pak dána součinem přenosových funkcí T_1 a T_2 spočtených výše. Výsledná přenosová funkce T pak vyjadřuje poměr relativní vzdálenosti hrotu od vzorku a amplitudy vibrací základny mikroskopu pro různé budicí frekvence (obr. 3.4).

Ve většině případů se při konstrukci mikroskopů STM používá nejméně dvoustupňové izolace vibrací, kdy jeden stupeň izoluje nízké a druhý vysoké frekvence. Jednoduchým řešením stupně pro nízké frekvence je tuhé spojení držáku hrotu s držákem vzorku, což lze konstrukčně realizovat uzavřením obou částí do pevného tělesa, tzv. měřicí hlavy. Druhý stupeň pro vysoké frekvence pak nejčastěji spočívá v měkkém upevnění celé měřicí hlavy k základně. Tím je zajištěno, že se vlastní frekvence obou soustav značně liší.

Pevnost konstrukce měřicí hlavy zajišťuje vysokou tuhost vazby mezi hrotem a vzorkem. Typická měřicí hlava pak má rezonanční frekvenci v řádu kHz, zatímco její měkké uložení naopak v jednotkách Hz [9]. Protože přenosová funkce T_1 zmenšuje amplitudy vibrací nízkých frekvencí (obr. 3.2) a přenosová funkce T_2 vysokých frekvencí (obr. 3.3), výsledná přenosová funkce daná jejich součinem může dosahovat nízkého přenosového poměru v širokém rozsahu budicích frekvencí (obr. 3.4).

Reálné systémy bývají značně složitější než modelový harmonický oscilátor. Ve výsledku tak mohou vykazovat množství vlastních frekvencí. Proto bývá analytický výpočet přenosových funkcí téměř nemožný. Místo toho se využívá numerických simulací počítačových modelů v programech k tomu určených, např. [29].

Z výše probírané problematiky je zřejmé, že nejdůležitějšími prvky v přenosu vibrací jsou vazby mezi zdrojem vibrací a buzeným předmětem. Vlastní frekvence a tlumení těchto vazeb přímo ovlivňují výslednou přenosovou charakteristiku dané sestavy.



Obr. 3.4: Příklad přenosových funkcí dvojitého uložení měřicí hlavy T_1 a T_2 s vlastními frekvencemi ω_{01} a ω_{02} v kombinaci s přenosovou funkcí samotné měřicí hlavy T_3 s vlastní frekvencí ω_{03} . Výsledná přenosová funkce soustavy T je dána jejich součinem. Převzato z [9].

Jak již bylo zmíněno, nízké frekvence mají menší význam a lze je potlačit užitím konstrukce vysoké tuhosti. Pro izolaci vysokých frekvencí se pak používají speciální prvky. Většinou jde o [27]:

- *Vinuté pružiny*

Nejčastěji ocelové tažné a tlačné pružiny jsou často používány pro velmi nízkou cenu a jednoduchou konstrukci. Jejich pohyb však prakticky není tlumen. Pro vysoké frekvence se navíc pružiny začínají chovat jako vlnovody [25] a nemohou být již považovány za nehmotné. Velmi vysoké frekvence se také mohou šířit přímo přes drát vinutí.

Pro závaží o hmotnosti m zavěšené v klidu na nehmotné pružině bez předpětí v tíhovém poli země platí vztah

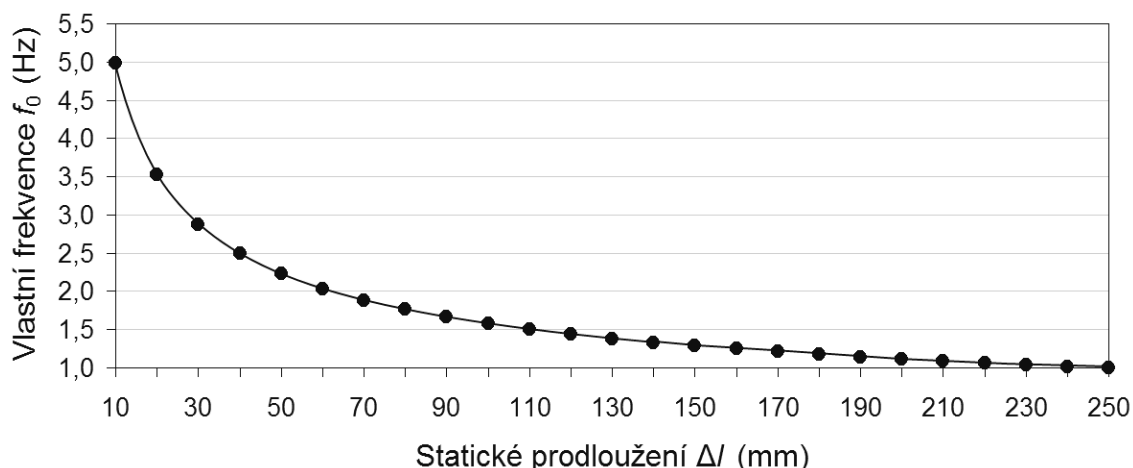
$$mg = k\Delta l, \quad (3.19)$$

kde g je tíhové zrychlení, k tuhost pružiny a Δl statické prodloužení pružiny z nezatíženého stavu. Vlastní úhlovou frekvenci pružiny pak lze vyjádřit vztahem

$$\omega_0 = \sqrt{\frac{k}{m}} = \sqrt{\frac{g}{\Delta l}}, \quad (3.20)$$

který lze pro vyjádření frekvence v Hz přepsat na tvar

$$f_0 = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{g}{\Delta l}}. \quad (3.21)$$



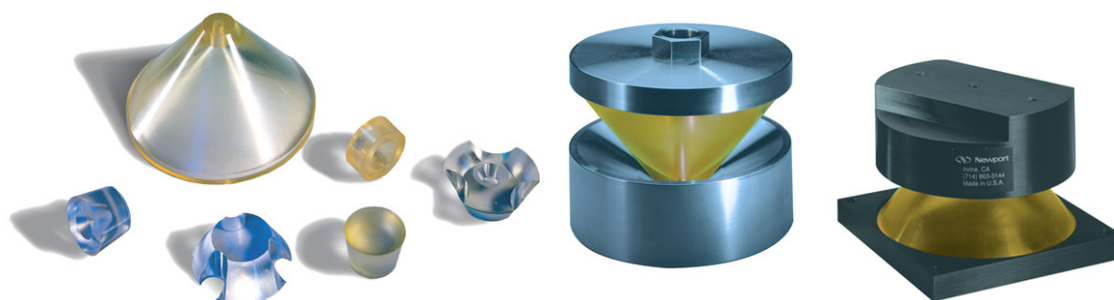
Obr. 3.5: Závislost vlastní frekvence nehmotné pružiny na statickém prodloužení z nezatíženého stavu podle vztahu (3.22).

Závislost vlastní frekvence pružiny dle (3.21) je znázorněna na obrázku 3.5. Je patrné, že odmocnina ve vztahu (3.21) je nepříjemná z toho důvodu, že při čtyřnásobném zvětšení statického prodloužení Δl klesne vlastní frekvence pouze dvojnásobně. To působí obtíže při dosahování co nejnižší vlastní frekvence při zachování „rozumné“ délky pružin vzhledem k zástavbovému prostoru pro mikroskop.

- *Pružné prvky z elastomerů*

Jde většinou o různě tvarované bloky z elastomerů či pryže (obr. 3.6), které jsou namáhány tlakem či střihem [27]. Mají nezanedbatelný stupeň vnitřního tlumení kmitů a vysoké frekvence tlumí lépe než ocelové pružiny. Nelze u nich však naopak dosáhnout nízkých rezonančních frekvencí. Velkou výhodou je jednoduchost uložení a možnost vytvářet pružné prvky různých tvarů a velikostí.

Pro izolaci vibrací samotné komory lze užít různé elastomerové nohy rámců držících komoru. Podmínky UHV však kladou na materiály vysoké nároky a tak je použití pružných materiálů uvnitř vakuových komor omezeno. Nejčastějším materiálem je Viton [18]. Užívá se mimo jiné na těsnicí kroužky pro vakuové příruby, ale také často jako vakuově kompatibilní izolátor vibrací. Takové izolační systémy se skládají z různého počtu kovových desek rozdílných hmotností, které jsou navzájem v kontaktu přes pružné vitonové prvky. Výhodou je opět jednoduchá konstrukce a spolehlivost.



Obr. 3.6: Příklady různě tvarovaných prvků z pružných materiálů pro izolaci vibrací. Převzato z [30].

- *Pneumatické pružiny*

Využívají stlačitelnosti plynů. V základu je lze rozdělit na dva druhy: vzduchové vaky (obr. 3.7) a pneumatické válce [27]. Vaky z pružných materiálů jednoduše uzavírají vzduch uvnitř sebe, zatímco válce jsou pevné schránky s pístem opatřeným pružným těsněním. Vyznačují se především velmi dobrou izolací vysokých frekvencí. Ty se mohou přenášet pouze přes materiál pneumatického měchu či válce. Zanedbatelná hmotnost pružného média (vzduchu) znamená minimální přenos energie vlněním.

Pneumatické pružiny jsou často vybaveny systémy pro ovládání tlaku. Lze tak udržet stabilní pracovní polohu pneumatické pružiny či ji nastavovat s přesností i jednotek μm [27]. Nevýhodou pneumatických systémů je jejich velký zástavbový prostor, složitá konstrukce a vysoká cena.



Obr. 3.7: Příklady pneumatických pružin ve formě vzduchových vaků pro antivibrační uložení stolů či přístrojů. Převzato z [31].

3.2. Možnosti tlumení vibrací v UHV

Omezit přenos vibrací je tedy primárním cílem. Pokud se však již nějaké vibrace přenesou, je třeba je účinně utlumit. Většina kmitavých systémů pracujících při atmosférickém tlaku je silně tlumena právě díky okolnímu vzduchu. Jak však bylo zmíněno v kapitole 2., v podmínkách UHV je hustota reziduálních částic tak malá, že lze odpor vzduchu prakticky zanedbat. Vzniká tak otázka, jak tlumit kmitavý pohyb právě v podmínkách vakua.

Uvažujeme-li, že daný objekt (tlumič) působí silou proti pohybu tělesa (kyvadla), lze tlumicí systémy obecně rozdělit na aktivní a pasivní [32]:

- *Pasivní tlumení*

Velikost a směr tlumicí síly se mění pouze v závislosti na relativním pohybu kyvadla vůči tlumiči. Typickým příkladem je kyvadlo pracující za atmosférického tlaku, kde je odporová síla vzduchu působící proti pohybu kyvadla dána relativní rychlostí pohybu kyvadla vůči okolnímu vzduchu.

V podmínkách UHV se pro pasivní tlumení nejčastěji využívá magnetické tlumení za pomoci vířivých proudů [32]. Tlumicí síla vzniká při vzájemném relativním pohybu magnetu vůči vysoce vodivým kovovým elementům, přičemž jsou ve vodivých elementech indukovány vířivé proudy.

Oproti aktivnímu tlumení má pasivní tlumení výhodu v jednoduchosti a spolehlivosti. Protože však tlumení vzniká jako reakce na pohyb, tlumení je větší pro větší rychlost relativního pohybu a s klesající rychlostí se jeho účinnost snižuje.

- *Aktivní tlumení*

Velikost a směr síly jsou nezávislé na relativním pohybu kyvadla vůči tlumiči. Tyto síly jsou zpravidla vytvářeny počítačem ovládanými manipulátory či motory. V praxi se vyskytují buď jako součást pneumatických systémů a nebo jako samostatné piezoelektrické elementy (obr. 3.8). Výhodou je, že tlumení může mít v principu konstantní účinnost až do velmi nízkých amplitud, protože na rozdíl od pasivního tlumení vzniká nezávisle a tedy nemusí být úměrné pohybu kyvadla. Nevýhodou je však vysoká cena a složitost soustav pro aktivní tlumení.



Obr. 3.8: Tlumené nosné podstavce s řídicí jednotkou jako příklad piezoelektrického systému aktivního tlumení vibrací. Převzato z [33].

V rámci návrhu zařízení je třeba volit způsoby izolace vibrací a jejich tlumení dle příslušných požadavků. Ty mohou být kladeny na účinnost tlumení, zástavbový prostor tlumících elementů či jejich cenu. V případě určení do ultravysokého vakua je navíc třeba dodržet požadavky na použité materiály a technologie výroby (viz kapitola 2.).

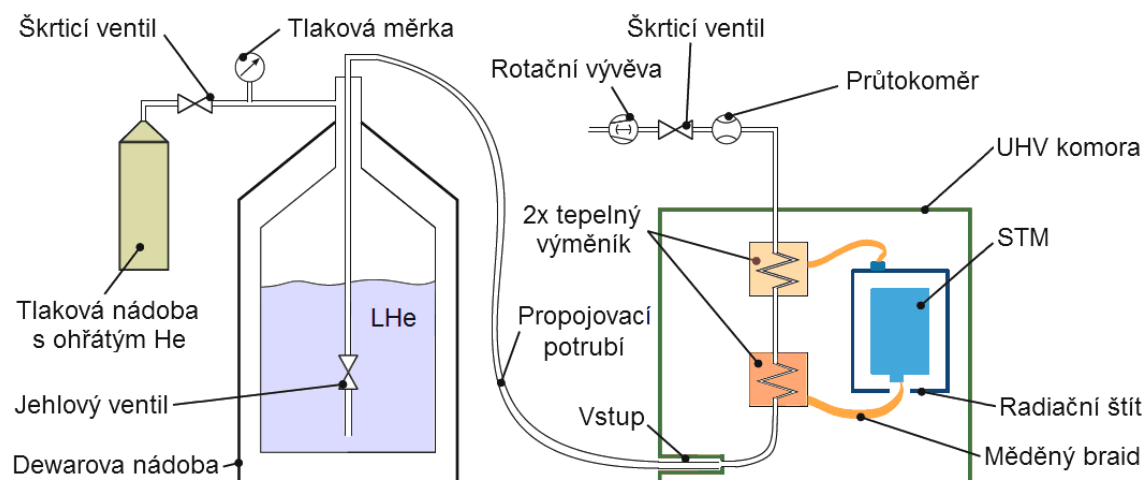
4. Nosná platforma pro nízkoteplotní UHV STM mikroskop

Na Ústavu fyzikálního inženýrství byl používán UHV mikroskop atomárních sil AFM (z angl. *Atomic Force Microscopy*) [34]. Pro potřeby jiných experimentů má být tento mikroskop nahrazen UHV mikroskopem STM pracujícím při nízkých teplotách. Cílem je dosáhnout s novým mikroskopem stabilního atomárního rozlišení při pracovní teplotě 25 K.

4.1. Konstrukce UHV STM mikroskopu a jeho chlazení

Nový nízkoteplotní mikroskop STM má pracovat v podmínkách UHV při teplotách kolem 25 K. Pro dosažení tak nízkých teplot byl navržen [22] systém průtokového chlazení kapalným heliem (obr. 4.1). Jeho princip je následující: kapalně helium z tlakové Dewarovy nádoby je přivedeno přívodním potrubím ke vstupu do kryostatu. Zde potrubí přechází do tenké kapiláry, kterou je helium přivedeno až ke dvěma sériově zapojeným tepelným výměníkům. První (primární) tepelný výměník s nižší teplotou slouží k chlazení vzorku, zatímco druhý (sekundární) výměník s vyšší teplotou chladí radiační štít kolem mikroskopu. Ohřáté helium opouštějící výměníky odchází tenkostěnnou trubkou a je dodatečně využito k chlazení radiačního štítu kolem vstupu helia do kryostatu. Průtok helia je regulován ventily na tlakové nádobě a na výstupu z kryostatu.

Samotné chlazení probíhá propojením požadovaných částí mikroskopu s tepelnými výměníky kryostatu. Propojení je realizováno pomocí svazků tenkých měděných drátů (tzv. *braidů*). Tyto braidy jsou voleny tak, aby byl zajištěn potřebný tepelný tok mezi chlazenými částmi a výměníky. Každý ze dvou tepelných výměníků byl navržen pro maximální zátěž 0,5 W [22].

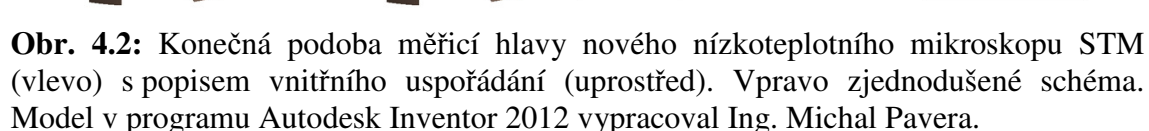


Obr. 4.1: Schematické znázornění průtokového chlazení UHV STM mikroskopu kapalným heliem. Převzato z [22].

Konečná podoba měřicí hlavy je zobrazená na obrázku 4.2. Spočívá v uzavření hrotu, trubkového skeneru i piezoelektrických motorů do tuhého tělesa kuželovitého tvaru. Tento tvar je výhodný z hlediska izolace vibrací kvůli vysoké tuhosti a tedy vysoké vlastní frekvenci [35]. Jako materiál pro výrobu těla měřicí hlavy byla zvolena slitina mědi CuCrZr [21], která sice dosahuje nižší tepelné vodivosti než čistá měď (viz obr. 2.1), ale vyznačuje se lepšími mechanickými vlastnostmi a obrobitelností než UHV kompatibilní bezkyslíkatá měď [36].

Table 1

Variable	Mean	SD	Min	Max
Age	60.78	9.25	40	80
Gender	1.00	0.00	1	1
Marital status	1.00	0.00	1	1
Education level	1.00	0.00	1	1
Income	1.00	0.00	1	1
Health status	1.00	0.00	1	1
Living arrangement	1.00	0.00	1	1
Employment status	1.00	0.00	1	1
Religious belief	1.00	0.00	1	1
Social support	1.00	0.00	1	1
Mental health	1.00	0.00	1	1
Physical health	1.00	0.00	1	1
Cognitive function	1.00	0.00	1	1
Emotional well-being	1.00	0.00	1	1
Quality of life	1.00	0.00	1	1
Life satisfaction	1.00	0.00	1	1
Overall health	1.00	0.00	1	1



Uspořádání měřicí hlavy se vzorkem nahoře a hrotem dole bylo zvoleno kvůli uspořádání vakuové komory určené pro provoz nového mikroskopu STM (viz podkapitola 4.2.). Veškeré motory zajišťující hrubý posuv byly dále umístěny na stranu hrotu, aby byl zajištěn především dobrý tepelný kontakt mezi vzorkem a chlazenou

měřicí hlavou. Pro hrubý posuv byl zvolen komerční piezoelektrický posuv Attocube pro nízké teploty [37], jemný posuv spolu s rastrováním zajišťoval trubkový skener.

4.2. Požadavky na návrh nosné platformy

Na návrh platformy pro nový nízkoteplotní mikroskop STM bylo od začátku kladeno několik požadavků přímo podmiňujících funkčnost mikroskopu:

- *Izolace vibrací*

Klíčovým požadavkem byla izolace vibrací přenášených mezi vakuovou komorou a měřicí hlavou mikroskopu, neboť tyto přímo ovlivňují použitelnost mikroskopu. Protože vakuová komora, v níž měl být mikroskop STM provozován, nebyla vybavena žádným systémem vnějšího tlumení v podobě pryžových či pneumatických podstavců (viz podkapitola 2.1.), veškerá izolace vibrací musela být navržena jako součást mikroskopu STM tak, aby účinně fungovala uvnitř komory v podmínkách UHV.

Uvažujeme-li amplitudy vibrací komory v řádu μm a chceme-li detekovat výchylky v řádu 10 až 100 pm [25], musí antivibrační systém ve zvoleném rozsahu frekvencí dosahovat přenosového poměru mezi 10^{-4} a 10^{-5} (viz podkapitola 3.1.). Mikroskopová platforma tedy byla navrhována tak, aby se její přenosová funkce blížila tomuto rozsahu.

- *Tepelná izolace chlazených částí mikroskopu*

Aby mohl mikroskop STM pracovat při požadované nízké teplotě, návrh platformy se musel podřídit požadavkům na tepelnou izolaci chlazených částí, zejména měřicí hlavy, od zbytku mikroskopu na pokojové teplotě.

- *Aretovatelná pozice pro zakládání vzorků*

Pro bezpečné vkládání a výměnu vzorků či hrotů v mikroskopu bylo třeba navrhnout platformu tak, aby umožňovala aretaci polohy pohyblivých částí mikroskopu zvnějšku komory. V opačném případě by při manipulaci se vzorkem hrozilo nebezpečí poškození měřicí hlavy, ostatních součástí mikroskopu či vzorku samotného.

- *Závaží pro izolaci vibrací vodičů a braidů*

Vibrace se na mikroskop přenášejí nejen přes samotné uchycení mikroskopu, ale také přes připojené elektrické vodiče a zejména pak přes chladicí braidy vedoucí od tepelných výměníků kryostatu. Vření kapalného helia uvnitř kryostatu působí jako zdroj vibrací širokého frekvenčního rozsahu, přičemž tyto vibrace nelze nijak eliminovat. Pro jejich izolaci bylo požadováno, aby součástí mikroskopu STM bylo závaží zavěšené na pružinách. Připojením braidů a vodičů k odpruženému závaží by pak díky velké hmotnosti závaží v porovnání s hmotností vodičů a braidů došlo ke zmenšení amplitudy jejich vibrací na únosnou míru.

Samotné závaží bylo nutné zahrnout mezi součásti chlazené druhým výměníkem podobně jako radiační štít, aby závaží odebíralo teplo elektrickým vodičům před jejich vstupem do mikroskopu. To vyžadovalo zajistit tepelně vodivé připojení vodičů k závaží a naopak tepelně nevodivé připojení chladnějších braidů od prvního výměníku. V opačném případě by jimi bylo závaží ochlazováno na úkor měřicí hlavy.

- *Radiační štít*

Nový návrh nosné platformy musel zachovat původní koncepci chlazeného radiačního štítu chránícího mikroskop proti dopadajícímu záření z okolí na pokojové teplotě. K tomu bylo třeba zajistit tepelně izolované upevnění štítu. Nutnost měnit vzorky a hroty mikroskopu dále vyžadovala, aby byl pro tyto operace v radiačním štítu otvor potřebné velikosti. Tímto otvorem by ale záření dopadalo přímo na nejchladnější části mikroskopu. Proto musela konstrukce radiačního štítu umožnit tento otvor zavírat a otvírat pomocí manipulátoru umístěného ve vakuové komoře.

Konstrukce platformy se dále musela podřídít několika rozměrovým omezením z důvodu nutnosti použít k provozu nového mikroskopu STM stávající vakuové komory včetně jejího celkového uspořádání:

- *Maximální průměr mikroskopu*

Nový mikroskop STM měl být po vzoru předchozího mikroskopu AFM připojen ke dnu vakuové komory přes standardní vakuovou přírubu DN160CF [38]. Bylo tedy nutné, aby mikroskop v horizontálním směru nepřesáhl průměr 146 mm, což byla hodnota průměru otvoru ve dnu UHV komory.

- *Maximální výška mikroskopu na ose uvnitř komory*

Vakuová komora určená k provozu nového mikroskopu STM byla v rámci hlavního systému pro přepravu vzorků vybavena manipulátorem, jímž se vzorky dopravovaly z centrální komory vakuového systému. Mikroskop tak nesměl na svislé ose uvnitř komory překročit maximální výšku 283 mm, aby umožnil manipulátoru plnit jeho funkci.

- *Maximální celková výška mikroskopu včetně příslušenství*

Aby bylo možné celý mikroskop STM složit mimo komoru a poté jej ke komoře jen připojit, nesměla celková výška mikroskopu včetně příruby a kryostatu překročit hodnotu 660 mm. Právě taková vertikální rozteč totiž byla mezi nosníky v rámu podpírajícím komoru. Pozornost musela být věnována také celkovému uspořádání příruby a jejích součástí, aby po montáži nedošlo ke kolizi s rámem komory.

- *Otvor pro vkládání vzorků do mikroskopu na dosah postranního manipulátoru*

Pro dopravení paletky se vzorkem do mikroskopu bylo nutné přemístit vzorek z hlavního manipulátoru pomocí menšího postranního manipulátor typu wobble stick [39]. Tento manipulátor však disponoval pouze omezeným dosahem, a proto bylo důležité navrhnout polohu nového mikroskopu vůči tomuto manipulátoru tak, aby byl vstup mikroskopu pro manipulátor dostupný a aby mikroskop zároveň nepřekážel manipulátoru v jeho funkci.

4.3. Návrh nosné platformy

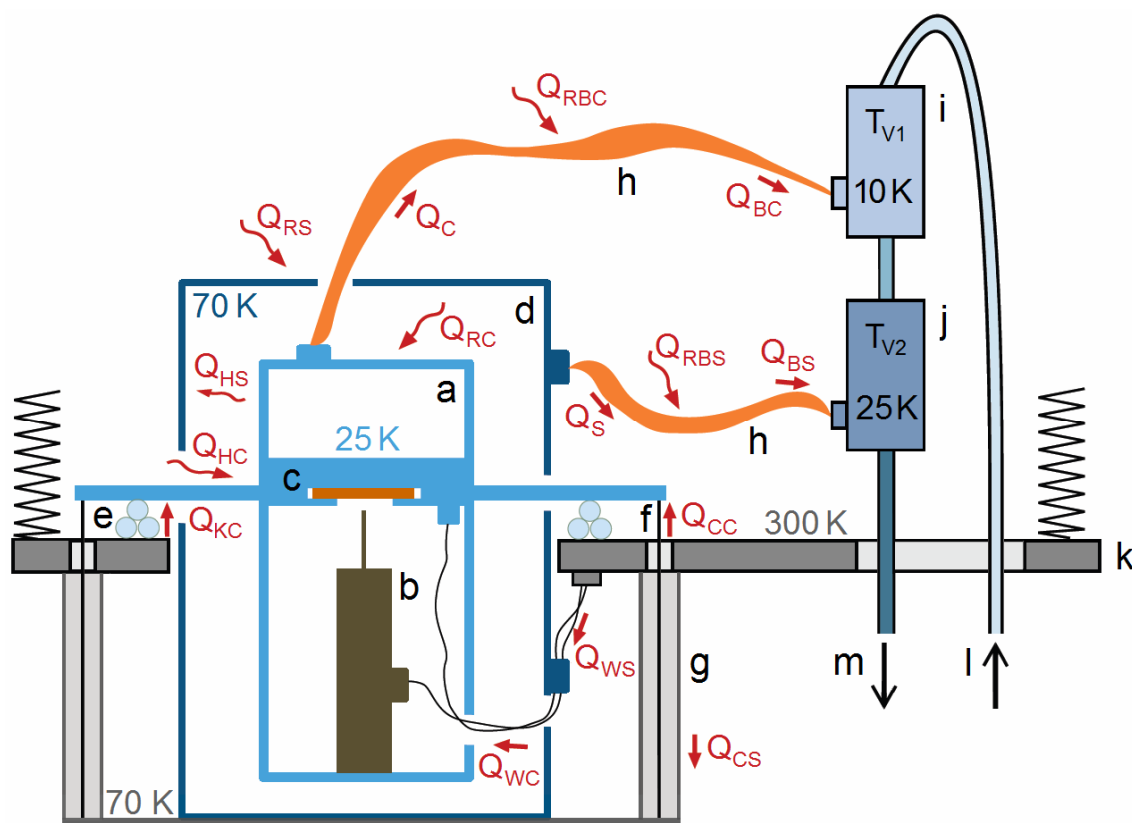
Celý návrh nosné platformy byl prováděn v programu Autodesk Inventor Professional 2011 [40]. Návrh musel splňovat řadu požadavků jak na vakuově kompatibilní materiály, tak na samotnou konstrukci (viz podkapitola 4.2.). Důraz byl kladen především na zachování požadavků tepelné izolace chlazených částí.

4.3.1. Systém izolace vibrací a jejich tlumení

Na základě zkušeností s předchozím mikroskopem AFM bylo rozhodnuto, že nová platforma mikroskopu STM bude využívat systému izolace vibrací pomocí nosných ocelových pružin, přičemž kmity platformy budou tlumeny magneticky pomocí vířivých proudů. Návrh nosné platformy tak byl podřízen nutnosti zavěsit platformu na nosné pružiny a vybavit ji prvky pro magnetické tlumení. Systém izolace vibrací je probíráán v samostatné podkapitole 4.5.

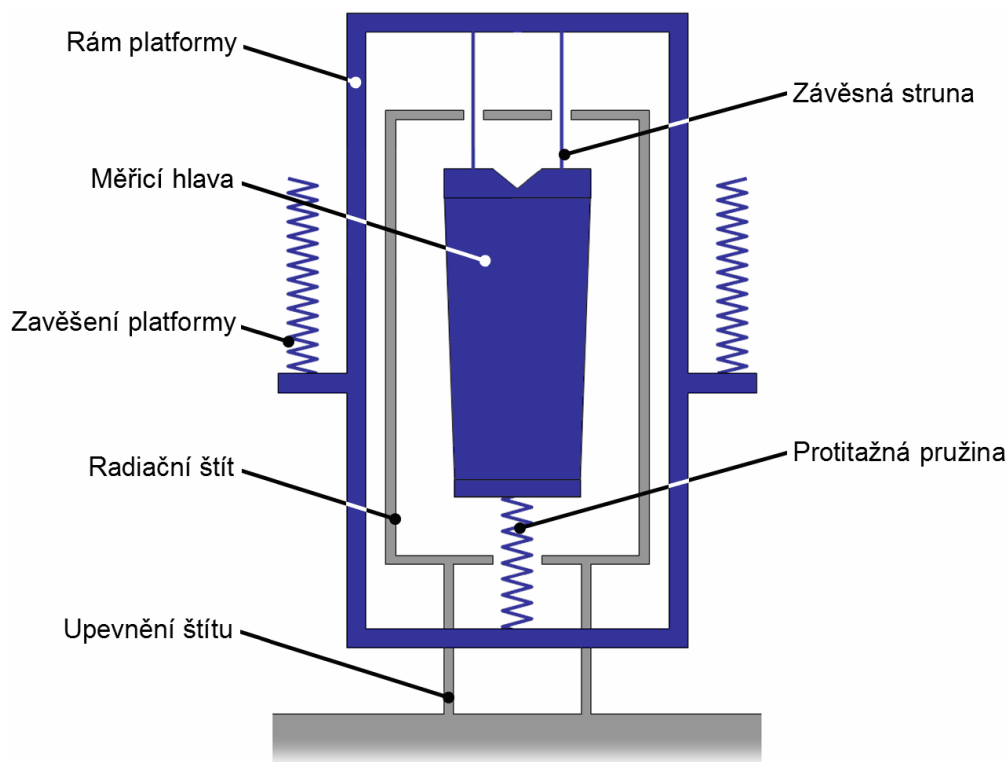
4.3.2. Upevnění měřicí hlavy a radiačního štítu

První krokem návrhu platformy bylo vyřešit tepelně izolované připojení mikroskopu k platformě. Původní návrh spojený s koncepcí chlazení [22] (obr. 4.3) k tomuto účelu využíval uložení na pyramidových kuličkových podpěrách [41]. Předností tohoto řešení byla malá tepelná vodivost, vysoká nosnost a malý zástavbový prostor. Nevýhodou pak tvořila závislost tepelné vodivosti na zatížení a také nutnost využít dodatečného předpětí či zamezení pohybu ve zbylých směrech, jelikož systém kuličkových podpěr dokázal účinně přenášet zatížení pouze v jednom směru. V původním návrhu toto zajišťovaly nerezové struny vedené skrz tenkostěnné nerezové trubky.



Obr. 4.3: Schéma konstrukce a tepelných toků původního návrhu mikroskopu STM: (a) chlazená měřicí hlava mikroskopu, (b) trubkový skener, (c) držák vzorků, (d) radiační štít, (e) kuličkové podpěry, (f) nerezové struny, (g) tenkostěnné nerezové trubky, (h) měděné braidy, (i) první tepelný výměník, (j) druhý tepelný výměník, (k) odpružená a magneticky tlumená platforma, (l) vstup helia, (m) výstup helia. Převzato z [22].

Nový návrh uložení mikroskopu (obr. 4.4) naproti tomu využívá pouze dvojice nerezových strun k zavěšení měřicí hlavy na rám platformy a jedné nerezové pružiny vytvářející přídatnou protitažnou sílu. Toto řešení navíc vyžaduje pouze tři otvory v radiačním štítu, který by měl v ideálním případě chránit celý povrch chlazené měřicí hlavy před zářením dopadajícím z okolí na pokojové teplotě.



Obr. 4.4: Schéma připojení měřicí hlavy mikroskopu k rámu nové platformy.

Nerezová ocel má nízkou tepelnou vodivost (viz podkapitola 2.1.) a vysokou pevnost v tahu. Při dostatečné délce struny v porovnání s jejím průměrem tak lze dosáhnout pevného spojení s nízkým tepelným tokem. Dvojice strun na obrázku 4.4 byla navržena proto, aby dokázala kompenzovat i momenty sil, které mohou na měřicí hlavu působit například z důvodu vybuzení torzních kmitů.

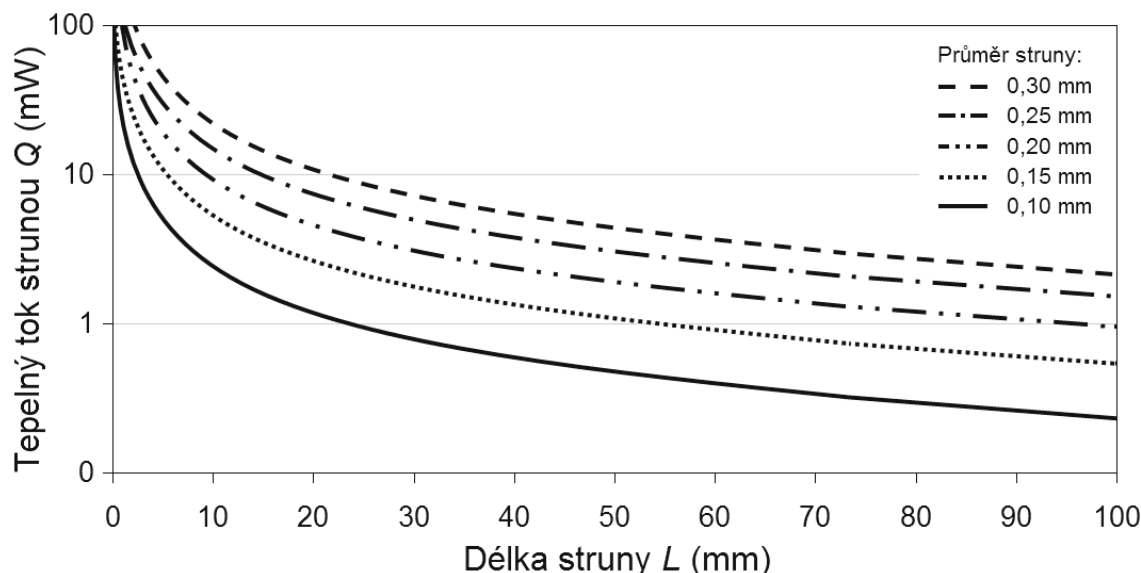
Tepelný tok strunou konstantního průřezu lze vypočítat dle rovnice [22]

$$Q = \frac{S}{L} \int_{T_1}^{T_2} k(T) dT, \quad (4.1)$$

kde S je obsah průřezu struny, L délka struny, T_1 a T_2 termodynamické teploty ukotvení obou konců struny a k je teplotně závislý koeficient tepelné vodivosti daného materiálu.

Na obrázku 4.5 jsou uvedeny orientační hodnoty tepelných toků pro několik uvažovaných rozměrů strun pro zavěšení měřicí hlavy. Při výpočtech bylo předpokládáno ukotvení na měřicí hlavě s teplotou 25 K a na rámu platformy na pokojové teplotě 300 K. Pro integrál tepelné vodivosti byla použita charakteristika průběhu tepelné vodivosti nerezové oceli 1.4301 z obrázku 2.1.

Z obrázku 4.5 je patrné, že již při poměrně malých délkách strun jsou tepelné vodivosti pro uvedené průměry strun v řádu jednotek mW. Vzhledem k tomu, že tepelný tok kuličkovými podpěrami byl v původním návrhu odhadnut na 57 mW [22], je nově navržený způsob uchycení mikroskopu výhodnější z hlediska tepelných ztrát. Tepelný tok přes protitažnou pružinu lze vůči strunám zanedbat z důvodu nepoměrně větší délky vinutí ku průměru pružinového drátu.



Obr. 4.5: Průběhy tepelných toků podle rovnice (4.1) pro různé tloušťky a délky nerezových strun při teplotním rozdílu $\Delta T = (300 \text{ K} - 25 \text{ K}) = 275 \text{ K}$. (Pozn.: pro výpočty byl použit průběh koeficientu tepelné vodivosti nerezové oceli 1.4301 z obrázku 2.1).

Jako kompromis mezi nosností a tepelnou vodivostí byly zvoleny struny o průměru 0,2 mm. K určení maximální zátěžné síly jedné struny lze použít vztah [42]

$$F = R_{p0,2} S, \quad (4.2)$$

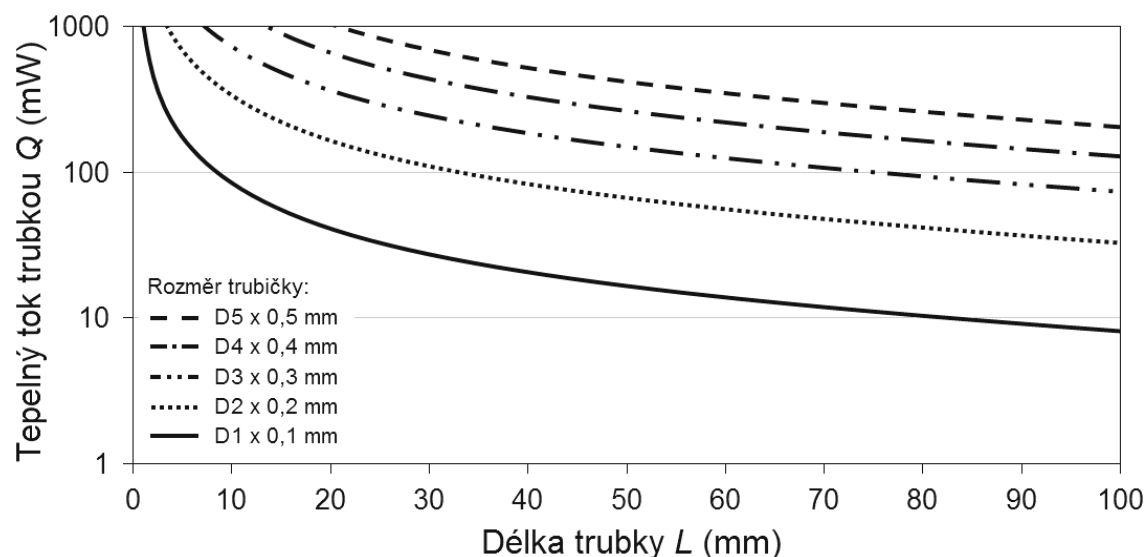
kde S je obsah průřezu struny a $R_{p0,2}$ je smluvní mez kluzu. Ta je definována jako napětí při tahovém namáhání, při němž dojde k plastické deformaci 0,2 % původní délky [42]. S použitím hodnoty $R_{p0,2} = 210 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-2}$ pro nerezovou ocel 1.4301 [43] a při zvoleném průměru struny 0,2 mm vychází maximální dovolené zatížení $F = 6,9 \text{ N}$. Dvě struny lze tedy zatížit silou 13,8 N, čemuž odpovídá zavěšení tělesa o hmotnosti přibližně 1,38 kg. Předpokládaná hmotnost měřicí hlavy 450 g (viz podkapitola 4.1.) spolu s tahem zvolené pružiny 2,27 N (viz výkresová dokumentace) vytváří výsledné zatížení strun silou 6,8 N. Navržené struny tedy mají dostatečnou pevnost v tahu.

V původním návrhu mikroskopu byl radiační štít pevně spojen s měřicí hlavou mikroskopu (viz obr. 4.3). V novém návrhu (obr. 4.4) je však uvažován jako samostatná součást pevně připojená k základně mikroskopu. Toto řešení zjednodušuje konstrukci platformy a umožňuje využít štít jako pomocné základny pro aretaci mikroskopu (podkapitola 4.3.4.).

Tepelně izolované upevnění štítu k základně mikroskopu je realizováno pomocí tenkostěnných trubek z nerezové oceli, které nabízí vysokou pevnost a při dostatečné

délce také nízkou tepelnou vodivost (obr 4.6). Pro výpočet tepelného toku nerezovou trubicou lze použít vztah (4.1) jako v případě strun, pouze obsah průřezu struny S je nahrazen obsahem mezikruží průřezu trubky. Uvažované teploty ukotvení trubek byly 300 K na straně základny mikroskopu, resp. 70 K na straně radiačního štítu.

Jako kompromis mezi tuhostí a tepelnou vodivostí byly nakonec zvoleny trubky v podobě dutých injekčních jehel z nerezové oceli, protože rozměrové řady běžných komerčně dostupných trubek neobsahovaly vhodnou kombinaci průměru a tloušťky stěny. Vnější průměr vybraných jehel činí 2 mm a tloušťka stěny 0,2 mm.



Obr. 4.6: Hodnoty tepelných toků podle (4.1) pro nerezové trubky různých rozměrů při teplotním rozdílu $\Delta T = (300 \text{ K} - 70 \text{ K}) = 230 \text{ K}$. (Pozn.: pro výpočty byl použit průběh koeficientu tepelné vodivosti nerezové oceli 1.4301 z obrázku 2.1).

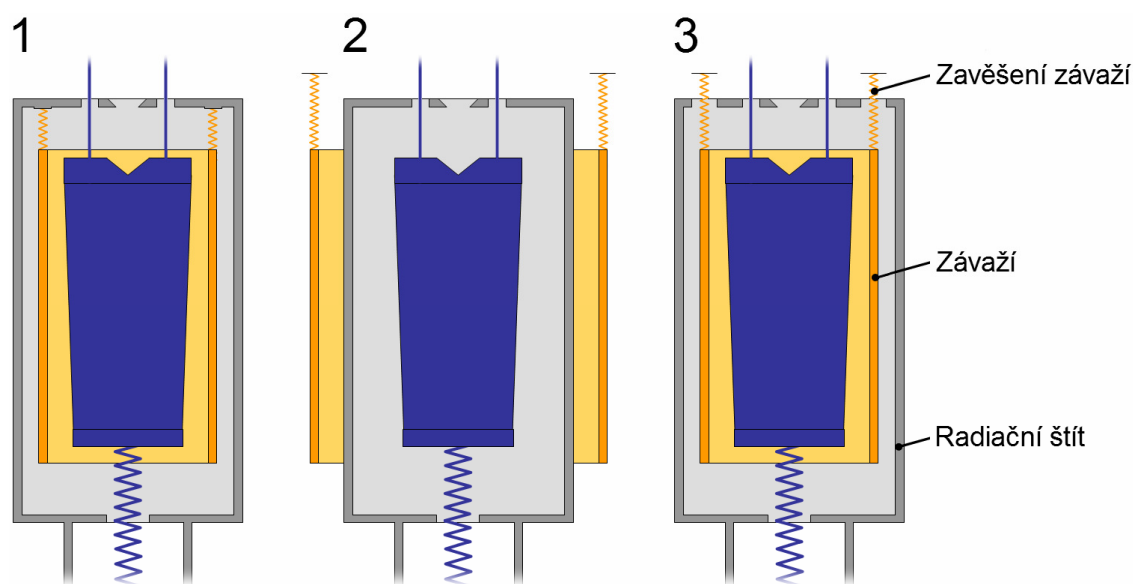
4.3.3. Izolace vibrační vodičů a braidů

Součástí nového návrhu platformy je odpružené závaží připojené k vodičům a braidům kvůli tlumení jejich vibrací. Rotačně symetrická konstrukce závaží umožňuje maximální využití prostoru kolem válcovité měřicí hlavy a radiačního štítu.

Umístění závaží na pružinách bylo diskutováno v několika možnostech (obr. 4.7). První verze měla výhodu v malém zástavbovém prostoru, ale z hlediska montáže bylo řešení příliš složité. V omezeném prostoru radiačního štítu navíc nebylo možné najít takový způsob zavěšení závaží, který by umožnil přesné nastavení jeho polohy.

Druhá verze nabízela nejsnadnější montáž a dostatek prostoru pro různá řešení uchycení pružin. Celé závaží by však bylo vystaveno záření z okolí. Problematická by také byla aretace závaží spolu s ostatními pohyblivými součástmi mikroskopu.

Jako konečné řešení byl nakonec přijat návrh umístit závaží do prostoru mezi radiační štít a měřicí hlavu, ale aby bylo uchycení pružin realizováno mimo štít. Jak je patrné z obrázku 4.7, pružiny v tomto případě procházejí skrz otvory ve štítu podobně jako nosné struny měřicí hlavy. Závaží je tak chráněno před zářením a uchycení pružin mimo štít poskytuje dostatek prostoru pro nastavování polohy závaží. Tato varianta uchycení také umožnila navrhnout jednoduchý a efektivní systém aretace mikroskopu spolu s řešením problému pomalého chlazení závaží (podkapitola 4.3.4.).



Obr. 4.7: Různé uvažované varianty umístění závaží pro izolaci vibrací vodičů a braidů: (1) závaží uvnitř štítu zavěšené na štítu, (2) závaží vně štítu zavěšené nezávisle, (3) závaží uvnitř štítu zavěšené nezávisle (přijatý návrh).

4.3.4. Návrh aretačního systému mikroskopu

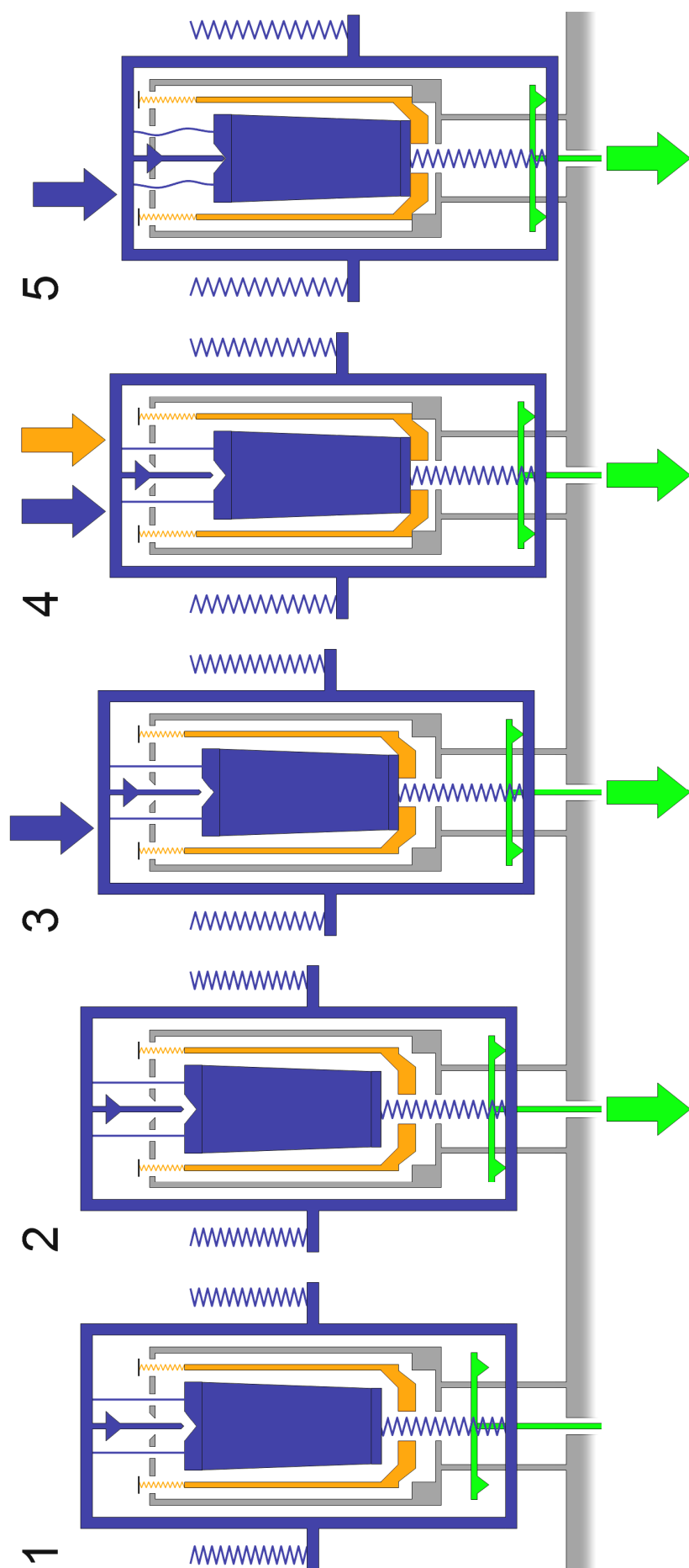
Z důvodu jednoduchosti konstrukce bylo výhodné navrhnout systém aretace mikroskopu tak, aby ji bylo možné provádět manuálně zvnějšku UHV komory pomocí manipulátoru připojeného ke komoře. Při aretaci měly být fixovány polohy všech pohyblivých součástí mikroskopu včetně závaží. Aretovaná poloha měla sloužit především pro bezpečnou manipulaci se vzorkem či s držákem hrotů, aniž by došlo k poškození pohyblivých částí mikroskopu.

Vzhledem k navrženému způsobu uchycení měřicí hlavy na rám platformy bylo výhodné navrhnout aretaci tak, aby nerezové struny na horní straně měřicí hlavy nebyly při manipulaci se vzorkem namáhány kolmo k jejich podélné ose. Mohlo by pak snadno dojít k překročení meze kluzu strun a tím k jejich nežádoucí trvalé deformaci.

Aretační systém popsany na obrázku 4.8 byl navržen na základě všech výše zmíněných požadavků tak, aby jej bylo možné ovládat pomocí jednoduchého lineárního vakuového posuvu. Důraz byl kladen především na to, aby byla měřicí hlava v aretované poloze upevněna z horní i dolní strany a nerezové struny nebyly namáhány. K tomu byl využit pevný radiální štít, který posloužil jako základna.

Horní část rámu platformy je vybavena hrotem s kuželovým osazením. Při aretaci, kdy je rám platformy stahován dolů za spodní část, se hrot opře o jamku v horní části měřicí hlavy a kuželové osazení zapadne do otvoru v radiálním štítu. Tím je poloha měřicí hlavy zafixována vůči pevnému štítu.

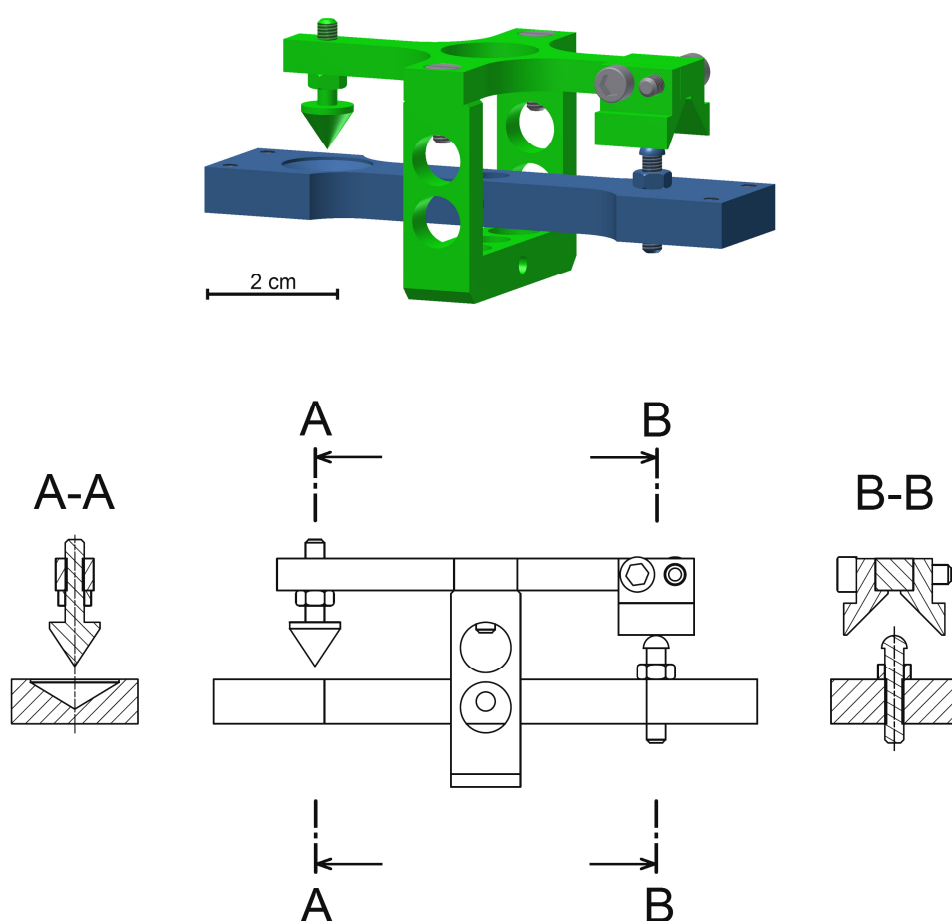
Výsledná aretovaná poloha (obr. 4.8) navíc nabízí dostatečný kontakt mezi závažím, měřicí hlavou a dnem štítu, což řeší problém pomalého chlazení samotného závaží. V aretované poloze je teplo ze závaží odebráno jak kontaktem s chlazeným štítem, tak přímo s chlazenou měřicí hlavou. Tím odpadla nutnost přivést k závaží silné braidy od druhého výměníku. V pracovním režimu, kdy je závaží tepelně izolováno od okolí díky nosným pružinám, by již silné braidy byly zbytečné.



Obr. 4.8: Schematické znázornění aretace mikroskopu. Postup: (1) výchozí pracovní poloha, (2) aretační posuv (zelená) klesá, zachytává rám platformy (modrá) a stahuje jej dolů, (3) rám dosahuje takové polohy, kdy měřicí hlava dosedá na osazení radiálního štítu (oranžová), (4) aretační posuv pokračuje v klesání, dokud se horní hrot rámu platformy neopře o měřicí hlavu a o víko radiálního štítu. V této poloze nejsou nerezové struny zatížené a závaží je přes měřicí hlavu přitlačováno na dno štítu pomocí horního hrotu rámu a dolní protitažné pružiny.

Konec lineárního posuvu určeného k aretaci byl vybaven konstrukcí pro správné zachycení rámu platformy (obr. 4.9). Konstrukce byla navržena tak, aby při zachycení nedocházelo k naklonění celé platformy a aby byla platforma při opakované aretaci vždy zachycena stejně definovaným způsobem.

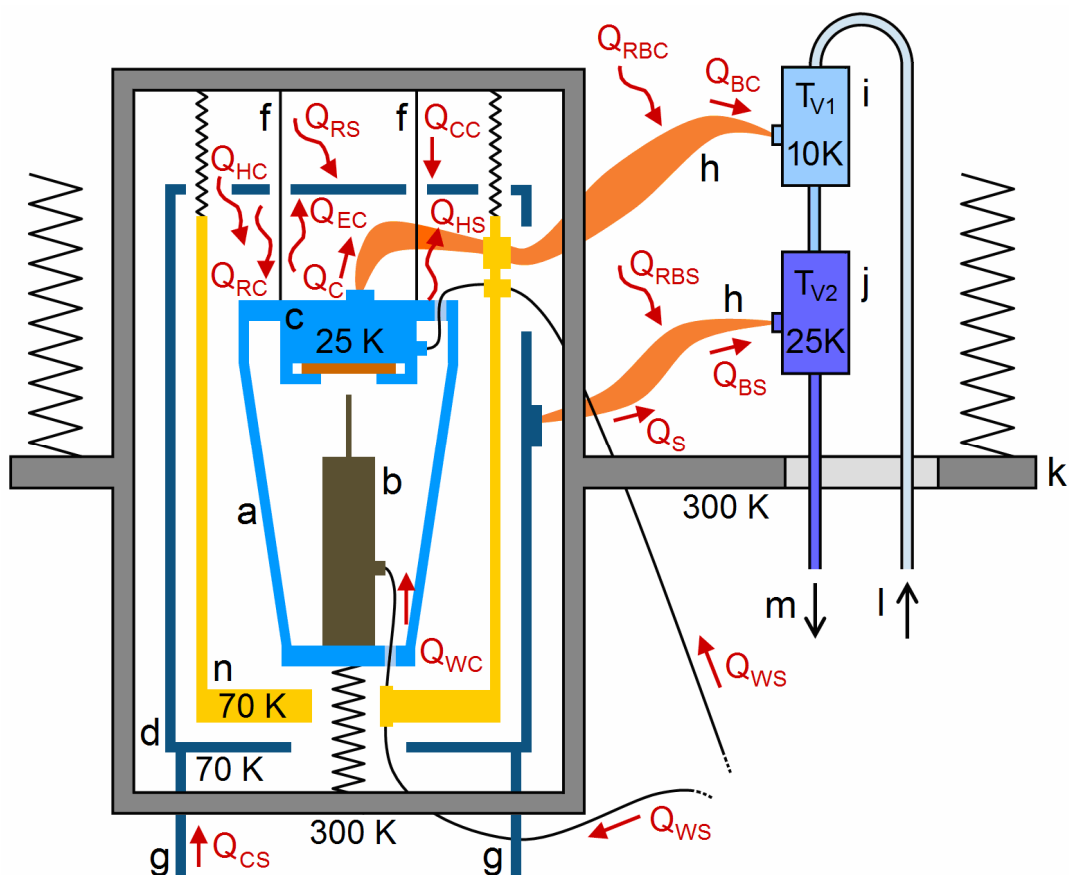
Konstrukce využívá dvou vedení pro zajištění staticky určité vazby [44]. Jedno rameno s hrotem dosedajícím do kuželového zhloubení dolní části rámu platformy odebrává tři stupně volnosti. Druhé rameno dosedá stříškovitou drážkou na kulový čep rámu platformy a odebrává tak další dva stupně volnosti. Poslední stupeň volnosti odebrán není, protože stabilní polohu vymezuje rovnovážný stav nosných pružin platformy, které zároveň zajišťují korektnost vazeb.



Obr. 4.9: Návrh staticky určité konstrukce v programu Autodesk Inventor 2011 pro zachycení rámu platformy lineárním manipulátorem připojeným k vakuové komoře.

4.3.5. Odhad tepelných toků

Pro zjištění, zda tepelné ztráty nového návrhu platformy nepřekračují celkový tepelný výkon kryostatu 1 W, byly určeny tepelné toky jednotlivými prvky mikroskopu (obr. 4.10). Ty byly v tabulkách 4.1 a 4.2 porovnány s původním návrhem konstrukce platformy (viz obr. 4.3). Hodnoty tepelných toků nerezových strun a trubek pro novou platformu byly spočteny vztahem 4.1, u ostatních prvků byly hodnoty dopočítány na základě použitých vztahů a vstupních hodnot původního návrhu [22].



Obr. 4.10: Schéma konstrukce a tepelných toků nového návrhu platformy mikroskopu STM: (a) chlazená měřicí hlava mikroskopu, (b) trubkový skener, (c) držák vzorků, (d) radiační štít, (f) nerezové struny, (g) tenkostěnné nerezové trubky, (h) měděné braidy, (i) první tepelný výměník, (j) druhý tepelný výměník, (k) odpružená a magneticky tlumená platforma, (l) vstup helia, (m) výstup helia, (n) závaží.

Jako materiál pro radiační štít i závaží byla navržena bezkyslíkatá měď. Pro účely výpočtů v tabulkách 4.1 a 4.2 však byly použity parametry materiálů původního návrhu platformy [22]. Porovnávané tepelné toky jsou:

- *Záření na měřicí hlavu z radiačního štítu (Q_{RC} , Q_{EC})*

Záření dopadající na měřicí hlavu z radiačního štítu je uvedeno v tabulce 4.1 jako Q_{RC} , v případě v tabulky 4.2 jde o emisi záření ze štítu Q_{EC} . Vzhledem k zanedbatelné hodnotě byla převzata původní hodnota tepelného toku bez přepočtení podle podoby nového návrhu.

- *Záření na měřicí hlavu z teploty 300 K skrz otvory v radiačním štítu (Q_{HC} , Q_{HS})*

Pro výpočet tepelného toku záření proniklého otvory ve štítu byla v případě původního návrhu platformy použita rovnice [22]

$$Q_{21} = \sigma S (T_2^4 - T_1^4), \quad (4.3)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, T_1 a T_2 teploty povrchů a S plocha otvoru, jímž záření z jednoho povrchu dopadá na druhý. Dále bylo uvažováno, že se celkový radiační tok absorbuje na štítu a na měřicí hlavě v poměru 1:1. V původním návrhu

obsahoval štít otvory o celkové ploše $5,7 \text{ cm}^2$. Nový návrh štítu obsahuje otvory o celkové ploše 6 cm^2 . Otvory zakryté závažím nebyly uvažovány, protože jimi prošlé záření nedopadá na měřicí hlavu. Výsledný radiační tok byl tedy v souladu s rovnicí (4.3) přepočítán.

- *Vedení tepla nerezovými strunami (Q_{CC})*

V původním návrhu platformy byly použity celkem tři nerezové struny délky 90 mm a průměru 0,2 mm, které tvořily předpětí pro kuličkové podpěry. V novém návrhu jsou použity pouze dvě nosné struny délky 50 mm a průměru 0,2 mm pro měřicí hlavu. Výpočet byl proveden podle rovnice (4.1). Záření dopadlé na struny z okolí o teplotě 300 K bylo vzhledem k malé ploše strun zanedbáno.

- *Vedení tepla kuličkovými podpěrami (Q_{KC})*

Nový návrh platformy neobsahuje žádné kuličkové podpěry, tento tepelný tok tedy nebyl uvažován.

- *Vedení tepla elektrickými vodiči (Q_{WC} , Q_{WS})*

Pro porovnání původního a nového návrhu platformy byly uvažovány stejné vodiče a tedy stejné hodnoty tepelných toků. Hodnoty jsou pouze orientační a závisí na finální volbě vodičů, jejich délce a množství [22].

- *Záření dopadající na štít z teploty 300 K (Q_{RS})*

Vakuová komora obklopující mikroskop má teplotu 300 K a záření dopadající na radiační štít je tak důležitým tokem. Vzhledem k velké ploše povrchu komory, z níž záření dopadá na mikroskop, byl k výpočtu hodnoty v původním návrhu [22] použit vztah pro případ jednoho tělesa obklopeného druhým

$$Q_{21} = \sigma E_{21} S_1 (T_2^4 - T_1^4), \quad (4.4)$$

kde σ je Stefanova-Boltzmannova konstanta, E_{21} koeficient vzájemné emisivity, T_1 a T_2 teploty povrchů a S_1 plocha tělesa obklopeného druhým.

V původním návrhu byla uvažována celková plocha štítu 220 cm^2 . V novém návrhu plocha štítu vzrostla na 321 cm^2 , čímž v souladu s rovnicí (4.4) úměrně vzrostl i tepelný tok. Otvory kryté závažím byly uvažovány jako součást štítu, neboť jimi záření nedopadá na měřicí hlavu.

- *Vedení nerezovými trubkami (Q_{CS})*

Pro zachování dostatečné tuhosti konstrukce jsou k upevnění radiačního štítu v novém návrhu použity celkem čtyři trubky vnějšího průměru 2 mm a tloušťky stěny 0,2 mm. Každá trubka je na obou koncích opatřena objímkou umožňující montáž k radiačnímu štítu a k základně. Délka trubky mezi objímkami je 33 mm. K výpočtu tepelného toku dle rovnice (4.1) byly použity teploty ukotvení konců trubek 300 K na straně základny mikroskopu a 70 K na straně radiačního štítu. Ve výpočtu nebylo uvažováno záření dopadající na trubky z okolního prostředí o teplotě 300 K.

- *Záření dopadající na braidy (Q_{RBC} , Q_{RBS})*

Stejně jako v případě elektrických vodičů bylo uvažováno použití stejných braidů jako v původním návrhu platformy. Hodnoty tepelných toků z původního návrhu tedy byly převzaty beze změny.

Označení	Popis	Tepelný tok [mW]	
		Původní	Nový
Q_{RC}	Záření dopadající ze štítu	0,1	0,1
Q_{HC}	Záření dopadající skrz otvory v radiačním štítu	131	138
Q_{CC}	Vedení nerezovými strunami	5	3,8
Q_{KC}	3x kuličkové podpěry	57	0
Q_{WC}	Vedení elektrickými vodiči od radiačního štítu	67	67
Q_C	Celková tepelná zátěž měřicí hlavy STM	260	209
Q_{RBC}	Záření dopadající na braidy	19	19
Q_{BC}	Celková zátěž 1. tepelného výměníku	279	228
	Odhad spotřeby kapalného helia pro 5 K rozdíl teplot na vstupu a výstupu z 1. výměníku [$l \cdot \text{hod}^{-1}$]	0,33	0,27

Tab. 4.1: Porovnání spočtených tepelných toků na měřicí hlavu v případě původního návrhu platformy [22] (obr. 4.3) s výpočtem tepelných toků nového návrhu platformy (obr. 4.10).

Označení	Popis	Tepelný tok [mW]	
		Původní	Nový
Q_{EC}	Záření emitované měřicí hlavou	-0,1	-0,1
Q_{HS}	Záření otvory v radiačním štítu odražené od hlavy	131	138
Q_{CC}	Vedení nerezovými strunami	-5	0
Q_{WC}	Vedení elektrickými vodiči od měřicí hlavy	-67	-67
Q_{WS}	Vedení elektrickými vodiči z teploty 300 K	172	172
Q_{RS}	Záření dopadající na radiační štít z teploty 300 K	50	72
Q_{CS}	Vedení nerezovými trubkami	299	396
Q_S	Celková zátěž radiačního štítu	580	728
Q_{RBS}	Záření dopadající na braidy	19	19
Q_{BS}	Celková zátěž 2. tepelného výměníku	599	730
	Odhad spotřeby kapalného helia pro 15 K rozdíl teplot na vstupu a výstupu z 2. výměníku [$l \cdot \text{hod}^{-1}$]	0,25	0,30

Tab. 4.2: Porovnání spočtených tepelných toků na radiační štít v případě původního návrhu platformy [22] (obr. 4.3) s výpočtem tepelných toků nového návrhu platformy (obr. 4.10).

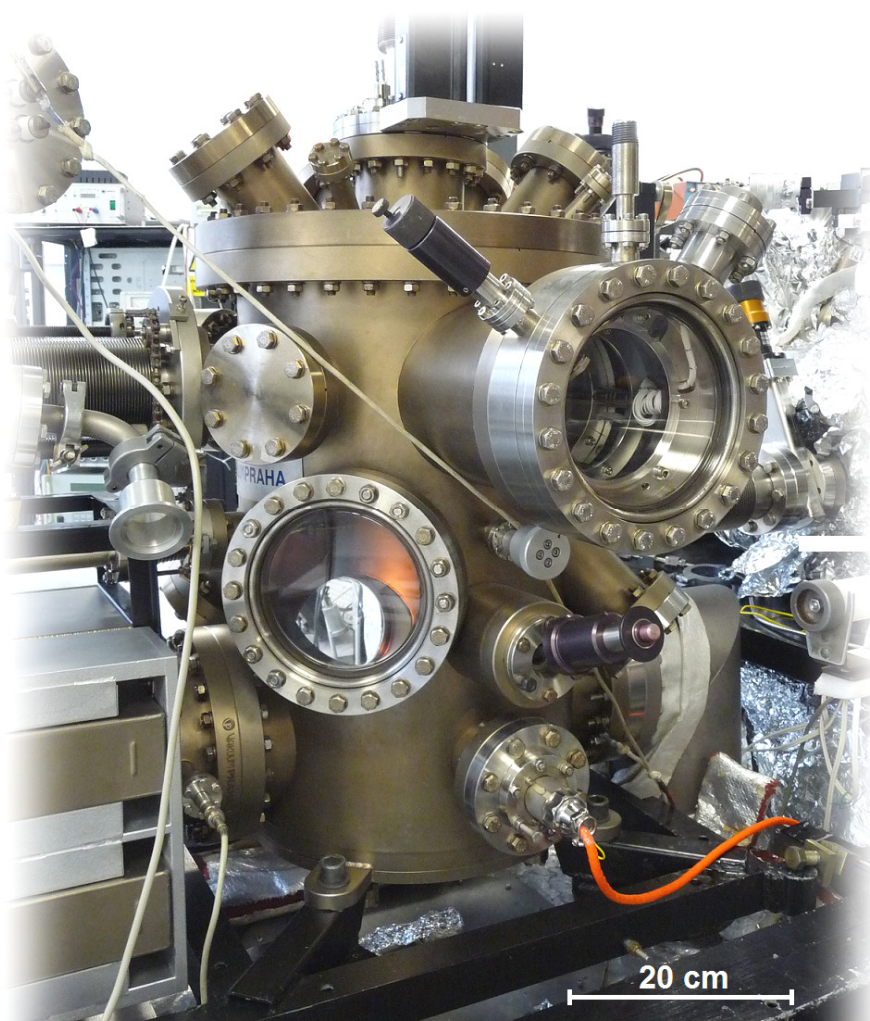
Z hodnot v tabulkách 4.1 a 4.2 je patrné, že nový návrh nepřekračuje maximální zatížení tepelných výměníků. Celková tepelná zátěž chlazených částí vzrostla v případě nového návrhu platformy z původních 878 mW na 958 mW. To vedlo k mírnému zvýšení odhadů spotřeby kapalného helia. Hodnoty spotřeby byly odhadnuty přepočtem původních hodnot přímo úměrně změně zátěže výměníků. Na druhou stranu nový návrh umožňuje efektivnější chlazení radiačního štítu v případě chlazení v aretované poloze,

kdy je štít se závažím chlazen jak druhým výměníkem, tak prvním výměníkem díky kontaktu s měřicí hlavou.

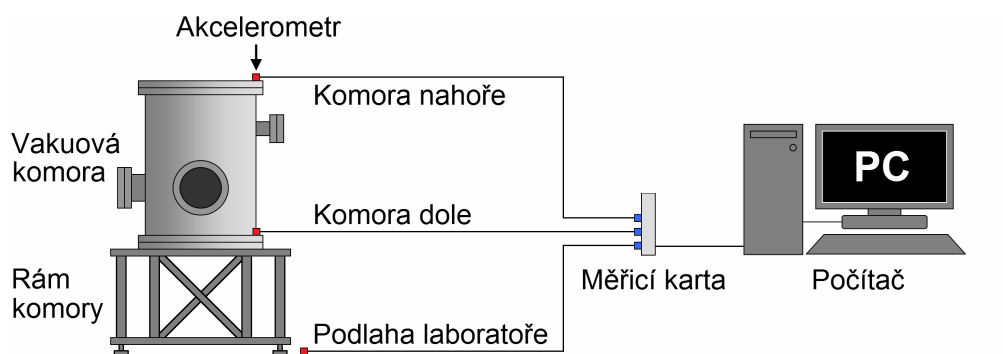
4.4. Spektrum vibrací v UHV komoře

Aby mohl být navržen systém uložení mikroskopu účinně izolující vibrace, bylo změřeno spektrum vibrací vakuové komory (obr. 4.11) v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství, do níž má být umístěn nový mikroskop STM. K tomuto účelu posloužila sestava zobrazená na obrázku 4.12.

Detekci vibrací zajišťovala dvojice piezoelektrických akcelerometrů Brüel & Kjær 4507 [45] (obr. 4.13). Pro připevnění akcelerometrů k měřené ploše se využívalo lepení včelím voskem. Dvojice snímačů byla užita proto, aby mohly být porovnány signály mezi různými částmi komory a také mezi komorou a podlahou v laboratoři. Dva snímače také umožnily provést společnou kalibraci, kdy po přilepení k sobě dávaly stejné výstupní hodnoty.



Obr. 4.11: Vakuová komora v laboratořích Ústavu fyzikálního inženýrství FSI VUT v Brně, do které má být nový mikroskop STM umístěn.



Obr. 4.12: Schéma měřicí sestavy pro analýzu spektra vibrací vakuové komory.

	Frekvenční rozsah	0,3 – 6000 Hz
	Citlivost	100 mV·g ⁻¹
	Teplotní rozsah	-54 až 121 °C
	Šum v dané frekvenční oblasti (RMS)	± 0,35 mg
	Maximální měřitelná hodnota (pík)	70 g
	Maximální rázová hodnota (± pík)	5000 g
	Hmotnost	4,8 g
	Rezonanční frekvence	18 kHz

Obr. 4.13: Piezoelektrický akcelerometr Brüel & Kjær 4507 použitý pro měření spektra vibrací UHV komory a jeho parametry uváděné výrobcem. Symbol g značí tíhové zrychlení. Převzato z [45].

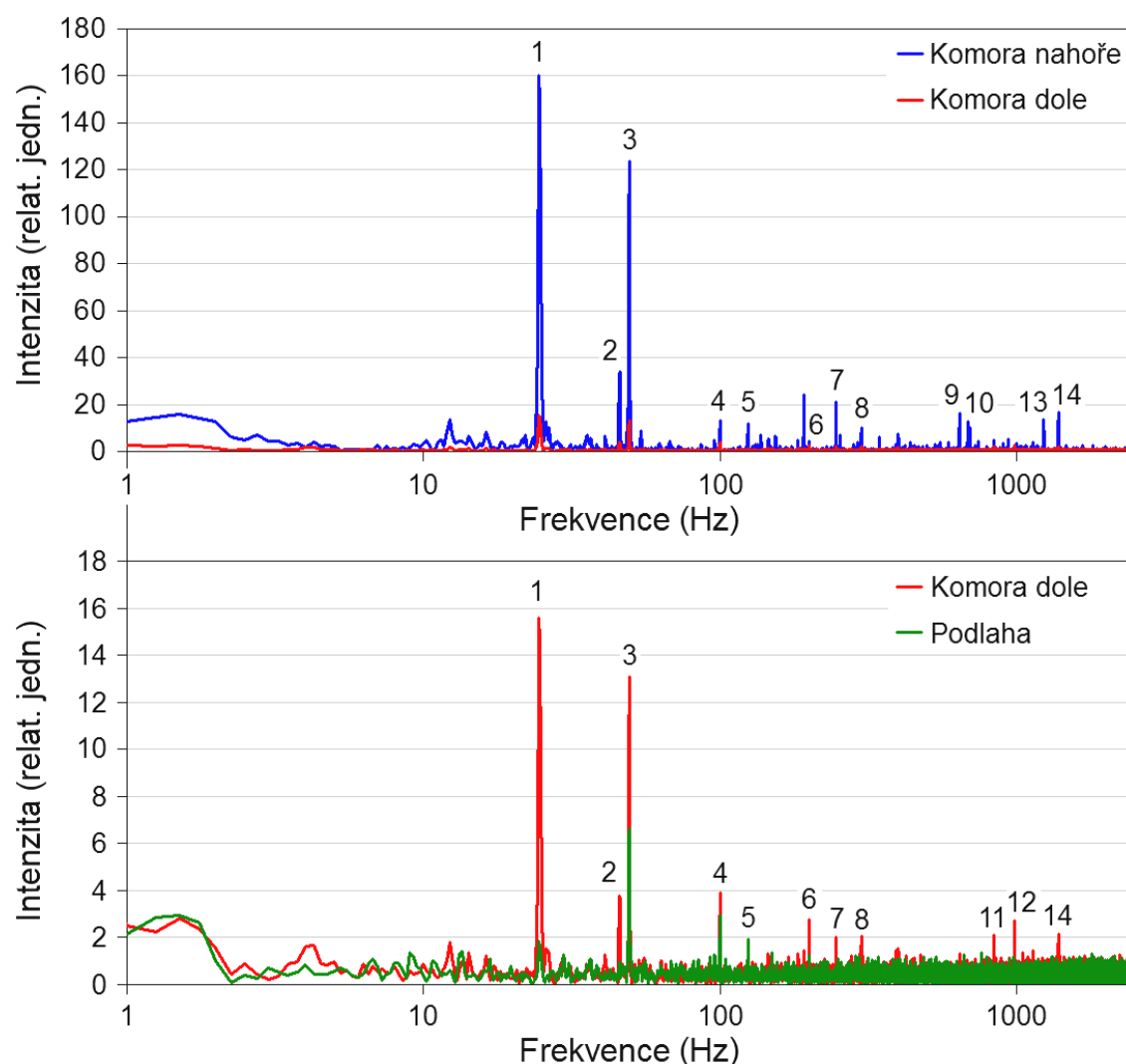
Pro samotném měření byl vytvořen měřicí program v prostředí LabVIEW [46], který sloužil k odečítání signálů z akcelerometrů a k provádění jejich Fourierovy analýzy. Připojení akcelerometrů k počítači bylo realizováno prostřednictvím měřicí karty NI USB-9233 [47] umožňující odečítat signály z více akcelerometrů současně. Pomocí programu byly vždy pět sekund snímány signály akcelerometrů a poté program zobrazil jejich frekvenční spektrum (obr. 4.14), které následně umožnil exportovat ve formátu datového souboru.

Ze spekter na obrázku 4.14 je patrné poměrné zastoupení různých frekvencí vibrací v měřeném rozsahu. Navíc lze vypořizovat, že některé píky odpovídají frekvencím se společným násobkem (viz tab. 4.3).

Celkově byla měřena spektra vibrací na třech místech: na horním víku komory, na dolním víku komory a na podlaze pod komorou. Pro návrh platformy mikroskopu je však nejdůležitější právě spektrum spodního víka komory, protože k němu má být připojena příruba s mikroskopem.

Ze spektra spodní části komory na obrázku 4.14 je vidět, že nejvíce zastoupené jsou frekvence 24,50 Hz a 49,50 Hz (viz tab. 4.3). To ukazuje na nejčastější frekvence vibrací vyvolané chodem strojů napájených ze sítě střídavým napětím o frekvenci 50 Hz. Dále lze nalézt přibližně celočíselné násobky těchto frekvencí, konkrétně píky 4 až 8, jejichž amplitudy jsou však již menší.

Obrázek 4.14 dále ukazuje, že spektrum horní části komory má přibližně o řád větší intenzitu než spodní část, zatímco většina píků zůstala zachována, což poukazuje na rozdíl v amplitudě vibrací. Při volbě umístění mikroskopu v komoře je tedy vhodné zvážit, k jaké části komory mají být komponenty připevněny.



Obr. 4.14: Spektra vibrací UHV komory a podlahy v laboratoři měřená sestavou z obrázku 4.12. První graf porovnání spektra vibrací horního a dolního víka komory, druhý graf porovnává spektra vibrací spodního víka se spektrem podlahy pod komorou.

Pík	Frekvence [Hz]
1	24,50
2	45,75
3	49,50
4	100,00
5	124,50
6	200,00
7	246,00
8	300,00
9	642,50
10	688,00
11	842,25
12	988,25
13	1239,00
14	1386,50

Tab. 4.3: Seznam píků vyznačených v obrázku 4.14 s příslušnými hodnotami frekvencí.

Z obrázku 4.14 je vidět, že zatímco spektrum spodní části komory obsahuje množství ostrých píků až do stovek Hz, spektrum podlahy pod komorou postrádá vysokofrekvenční píky. Za významné lze považovat jen píky 3 a 4 (tj. 49,50 Hz a 100,00 Hz), případně ještě 1 a 5 (24,50 Hz a 124,50 Hz). Lze tedy předpokládat, že samotný rám, na kterém komora stojí, způsobuje zesilování některých frekvenčních složek vibrací podlahy a ty se pak přenáší na samotnou komoru.

Z výsledků měření vibrací komory lze usoudit, že připojení mikroskopu ke dnu komory je z hlediska vibrací výhodnější než připojení mikroskopu k víku komory, protože vibrace víka dosahují přibližně o řád větší amplitudy než vibrace dna komory. V případě zavěšení platformy na pružiny k hornímu víku tak sice lze dosáhnout velkého prodloužení pružin a tím nízké rezonanční frekvence, ale tuto výhodu může převážít fakt, že se přes pružiny mohou přenášet vibrace větších amplitud.

Naopak konstrukce připojená ke dnu komory musí být navržena dostatečně vysoká právě kvůli potřebě zavěšení na dlouhé pružiny. Takové konstrukce pak ale nemusí být dostatečně tuhá a může opět zesilovat některé frekvence vibrací spodního víka komory.

4.5. Parametry systému trubkového tlumení

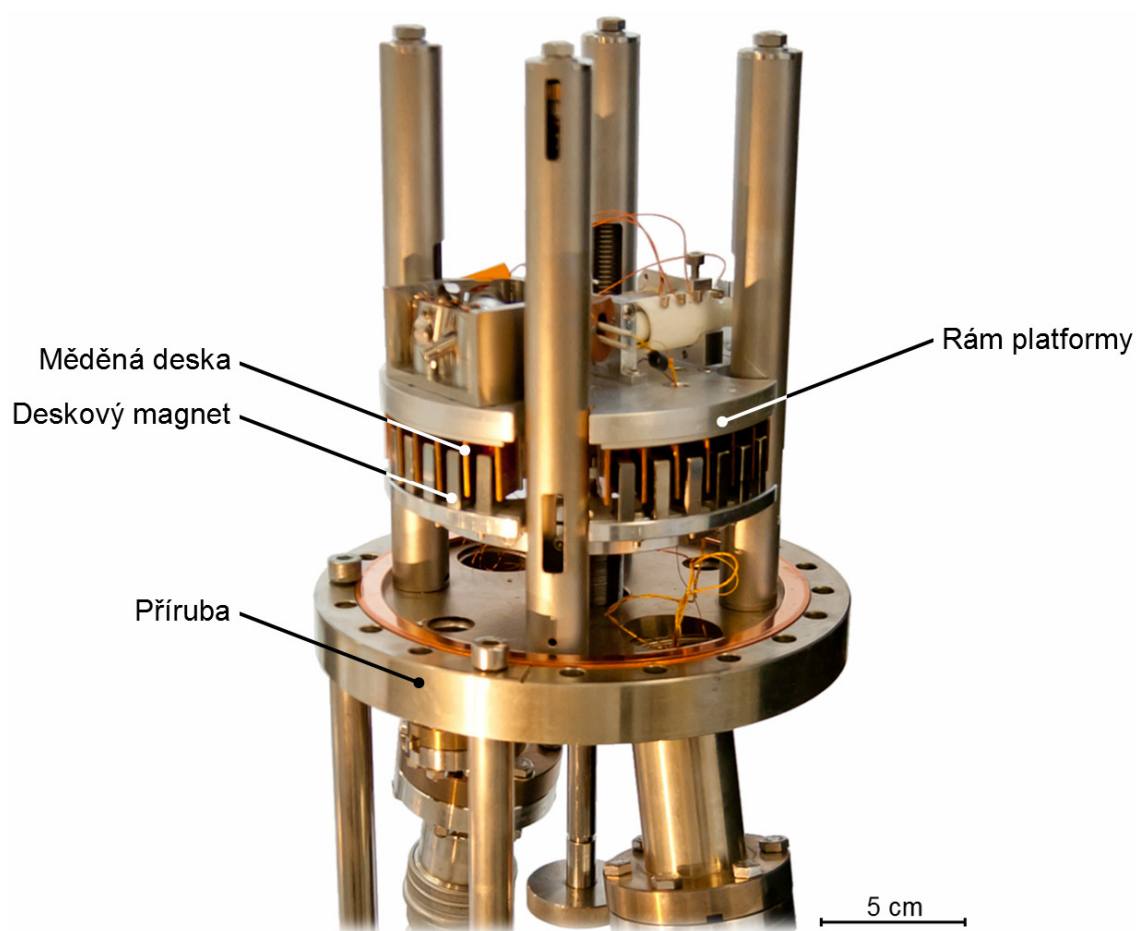
Vakuová komora pro nový mikroskop STM byla původně vybavena mikroskopem AFM (obr. 4.15), který využíval magnetického tlumení kmitů odpružené platformy pomocí vířivých proudů [34]. Systém byl podobný jako v případě komerčně vyráběných mikroskopů společnosti Omicron [48]. Ten spočívá v sérii měděných desek usazených po obvodu platformy do tvaru hřebene, který zapadá do druhého hřebene z deskových magnetů pevně ukotvených k základně. Při kmitání platformy tak dochází k relativnímu pohybu desek kolem magnetů a vzniká tlumicí síla působící vždy proti pohybu platformy.

Předchozí mikroskop AFM byl vybaven hřebenem s celkem 24 tlumicími segmenty. Parametry použité konstrukce hřebenového systému tlumení jsou uvedeny v tabulce 4.4. Ve výsledku tak systém dosahoval hodnoty koeficientu tlumení $b = 0,13 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ [34].

Systém hřebenového tlumení trpěl kromě malé účinnosti nevýhodou v podobě náročnosti na výrobu, montáž i nastavení polohy desek a magnetů. Pro nový mikroskop STM byl proto navržen způsob jiný. Ten spočívá v systému měděných trubek připevněných k platformě mikroskopu. K základně mikroskopu jsou dále připevněny tyčinky s válcovými magnety na koncích, přičemž každá tyčinka prochází jednou trubkou na platformě. Při kmitání platformy ve vertikálním směru tak dochází k pohybu trubek podél os tyčinek s magnety, čímž opět vzniká tlumicí síla. Tento způsob tlumení byl shledán jednodušší z hlediska výroby i následné montáže.

Jeden element trubkového systému tlumení lze popsat modelem magnetického dipólu pohybujícího se uvnitř nekonečně dlouhé kovové trubky (stejnou problematikou se zabývá i [49]). Z výpočtů, které provedl R. Kalousek, Ph.D., plyne pro sílu působící na válcový magnet pohybující se souose uvnitř kovové trubky vztah

$$F_z = -\frac{135\mu_0^2\mu^2\sigma v_z}{3072R^4}, \quad (4.5)$$



Obr. 4.15: Fotografie předchozího mikroskopu AFM s hřebenovým systémem magnetického tlumení [34].

Deskové magnety:

$B =$	0,0062 T	magnetická indukce mezi deskovými magnety
$d =$	5 mm	šířka mezery mezi magnety

Kovové desky:

$N =$	24	počet segmentů (desek) v hřebenu
$h =$	17 mm	výška měděné desky
$l =$	10 mm	šířka měděné desky
$t =$	1,5 mm	tloušťka měděné desky
$\sigma =$	$56,2 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	vodivost trubky (měď)

Výsledné tlumení:

$b =$	0,13 $\text{N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	koeficient tlumení systému 24 segmentů
-------	--	---

Tab. 4.4: Parametry hřebenového systému tlumení použitého v předchozím mikroskopu AFM. Převzato z [34].

kde μ_0 je permeabilita prostředí mezi magnetem a trubkou, σ vodivost materiálu trubky, t tloušťka stěny trubky, v_z relativní rychlost magnetu vůči trubce ve směru podél její osy

a R vnitřní poloměr trubky (viz obr. 4.16). Velikost magnetického dipólového momentu μ válcového magnetu lze vyjádřit vztahem

$$\mu \cong \frac{2\pi B_{\text{exp}}}{\mu_0} \left[\left(\frac{h}{2} \right)^2 + \rho^2 \right]^{\frac{3}{2}}, \quad (4.6)$$

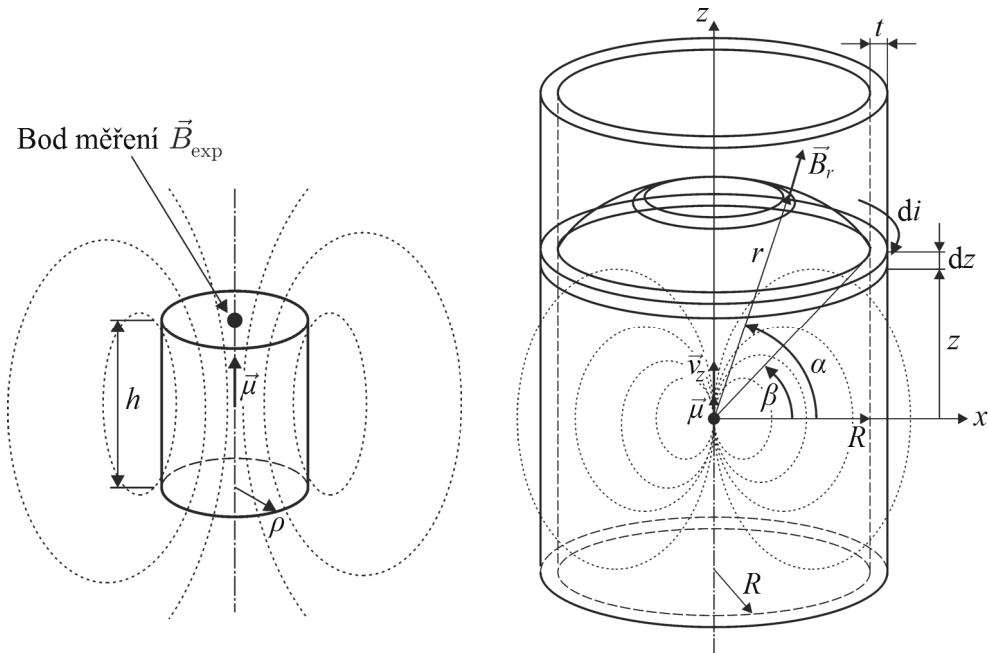
kde B_{exp} je experimentálně určená velikost magnetické indukce ve středu podstavy magnetu, h je výška magnetu a ρ poloměr magnetu (viz obr. 4.16). Vztah (4.5) platí v aproximaci pro nekonečně dlouhou trubku. V případě reálné trubky požadujeme splnění podmínky

$$L > 6R, \quad (4.7)$$

kdy lze trubku považovat za nekonečně dlouhou v případě bodového dipólu v jejím středu.

Ze vztahu (4.5) tedy plyne, že koeficient tlumení b pro systém jednoho válcového magnetu uvnitř válcové trubky lze v souladu s rovnicí (3.1) definovat jako

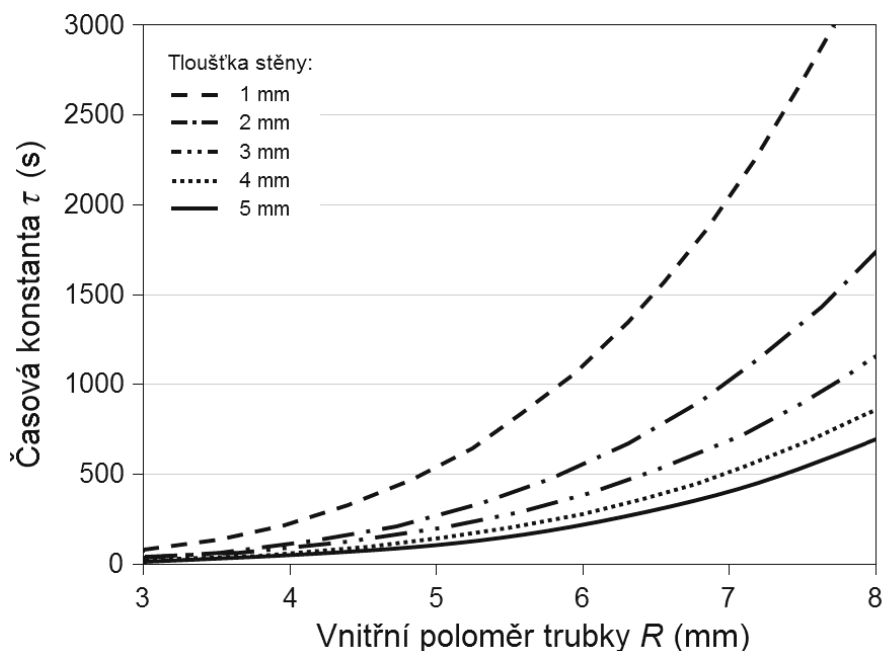
$$b = \frac{135\mu_0^2 \mu^2 \sigma}{3072R^4}. \quad (4.8)$$



Obr. 4.16: Znázornění situace pro výpočet tlumicího účinku systému válcového magnetu pohybujícího se souose ve středu kovové trubky podél její osy. Obrázek vypracoval R. Kalousek, Ph.D.

Trubkový systém tlumení kmitů platformy se značně liší od zmiňovaného hřebenového systému původního mikroskopu AFM. Z tohoto důvodu není možné provést jednoduché porovnání, protože účinnost tlumení v obou případech silně závisí na zvolených parametrech.

K získání náhledu na závislost doby útlumu pro různé parametry tlumení (obr. 4.17) bylo třeba zvolit některé parametry jako fixní. V tomto případě byly vybrány pevné parametry magnetů a některé parametry trubek (tab. 4.5).



Obr. 4.17: Závislost časové konstanty τ pro tlumení jednou trubkou s jedním válcovým magnetem. Parametry použité k výpočtům jsou uvedeny v tabulce 4.5. Doby útlumu byly určeny na základě koeficientu tlumení dle vztahu (4.8).

Válcový magnet:

$B_{\text{exp}} =$	0,452 T	magnetická indukce ve středu podstavy magnetu
$h =$	3 mm	výška magnetu
$\rho =$	1,5 mm	poloměr magnetu
$\mu =$	0,106 A·m ²	magnetický dipólový moment magnetu (dle (4.5))

Kruhová trubka:

$\sigma =$	$59,6 \cdot 10^6 \Omega^{-1} \cdot \text{m}^{-1}$	vodivost trubky (měď)
------------	---	-----------------------

Další parametry:

$g =$	$9,81 \text{ m} \cdot \text{s}^{-2}$	tíhové zrychlení
$\mu_0 =$	$1,26 \cdot 10^{-6} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$	permeabilita vakua

Tab. 4.5: Parametry trubkového tlumení použité k výpočtu křivek na obrázku 4.17.

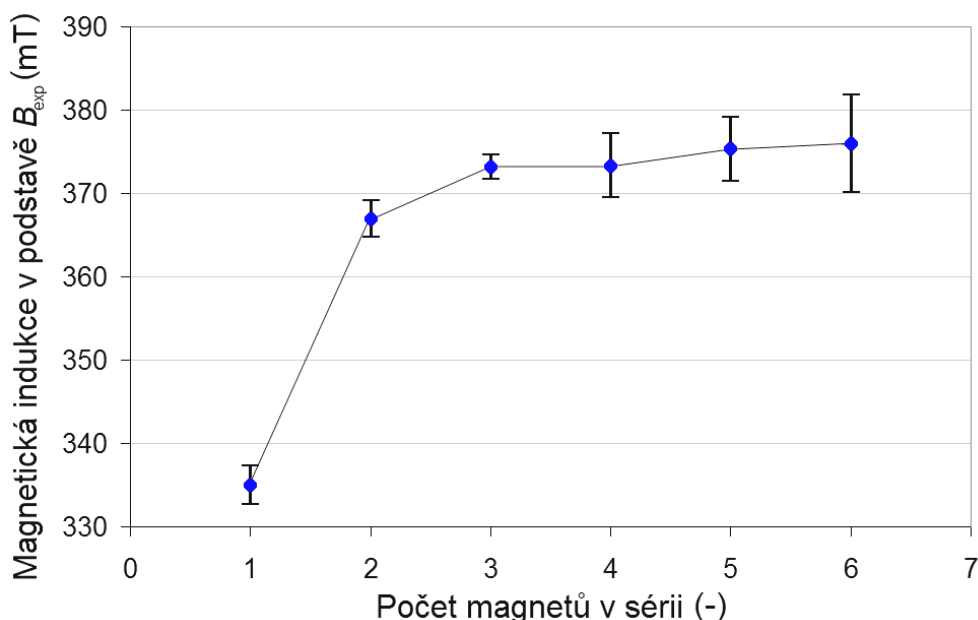
Obrázek 4.17 zobrazuje závislost časové konstanty tlumení na vnitřním poloměru trubky a tloušťce její stěny. Časová konstanta τ je definována jako doba, po které amplituda tlumeného kmitání klesne na $1/e$ násobek počáteční hodnoty. Z obrázku je vidět silná závislost na obou parametrech, tedy jak na tloušťce stěny trubky, tak na jejím vnitřním poloměru.

Vzhledem k rozměrovým řadám komerčně vyráběných trubek byly nakonec pro systém tlumení zvoleny trubky vnějšího průměru 12 mm a tloušťky stěny 1 mm jako kompromis mezi účinností tlumení, hmotností a potřebným zástavbovým prostorem.

Pro použití v navrhované platformě byly dále vybrány válcové magnety průměru 3 mm a výšky 3 mm [50] z materiálu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$. Ten je díky pracovnímu rozsahu teplot od $-40\text{ }^{\circ}\text{C}$ do $350\text{ }^{\circ}\text{C}$ [51] vhodný i pro podmínky vypěkaných vakuových komor.

Zvolený průměr magnetů 3 mm v kombinaci s vnitřním průměrem tlumicích trubek 10 mm zajišťuje vůli 3,5 mm mezi magnetem a stěnou trubky. Tato vůle byla z hlediska konstrukce platformy prohlášena za dostatečnou a ověřena na modelu platformy (viz podkapitola 4.6.).

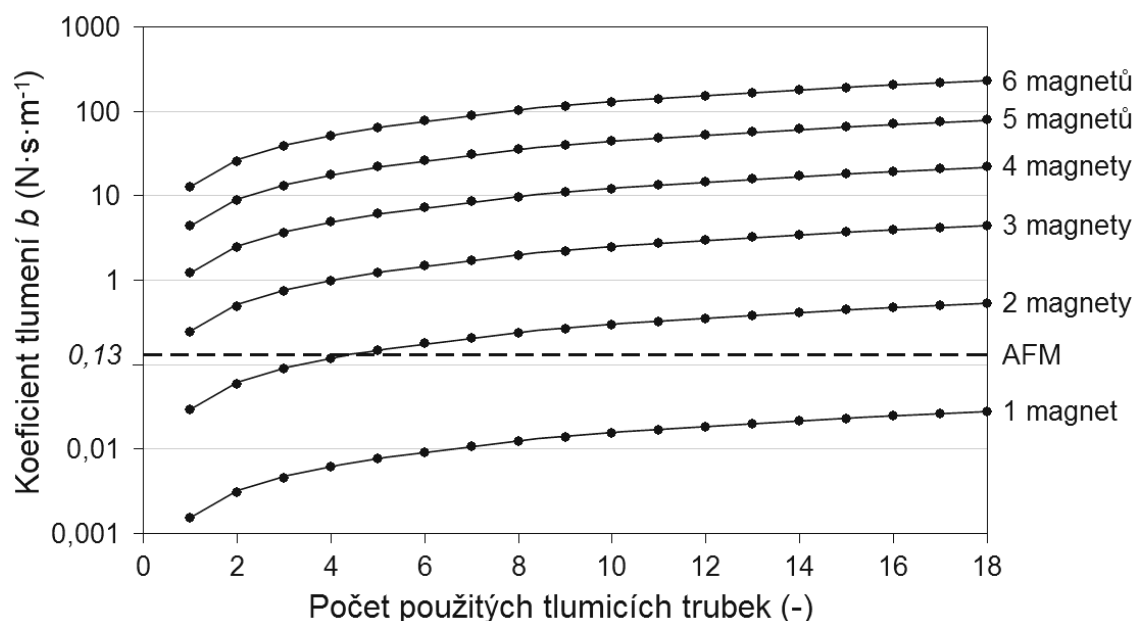
Ze vztahů (4.6) a (4.8) plyne kvadratická závislost koeficientu tlumení na magnetické indukci ve středu podstavy magnetu B_{exp} . Proto byla tato hodnota experimentálně změřena Teslametrem pro různé počty výše zmiňovaných magnetů (obr. 4.18).



Obr. 4.18: Porovnání magnetické indukce naměřené ve středu podstavy různého počtu sériově spojených válcových magnetů $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ určených pro použití v trubkovém systému tlumení mikroskopu STM.

Výsledky na obrázku 4.18 ukazují, že s rostoucím počtem sériově spojených válcových magnetů nejprve roste i magnetická indukce ve středu podstavy, ale pak dosahuje jisté saturace. Je tedy vhodné použít jen takové množství magnetů, aby jejich celková výška nebyla zbytečně velká, neboť v tom případě je třeba volit i delší tlumicí trubky, aby bylo co nejlépe využito magnetické pole magnetů (viz podkapitola 4.6.2.).

Obrázek 4.19 ukazuje teoretickou závislost výsledného koeficientu tlumení trubkového systému mikroskopu STM. Porovnány jsou různé kombinace počtu výše zmiňovaných tlumicích trubek a magnetů použitých v každé z nich. V porovnání s koeficientem tlumení celého hřebenového systému z předchozího mikroskopu AFM lze tedy teoreticky dosáhnout většího tlumení již v případě použití jediné trubky se třemi magnety uvnitř.



Obr. 4.19: Porovnání teoretického koeficientu tlumení pro různé kombinace počtu válcových magnetů průměru 3 mm a výšky 3 mm z materiálu $\text{Sm}_2\text{Co}_{17}$ a zvolených měděných trubek vnějšího průměru 12 mm a tloušťky stěny 1 mm. Vyznačena je hodnota koeficientu tlumení hřebenového systému předchozího mikroskopu AFM (viz tab. 4.4).

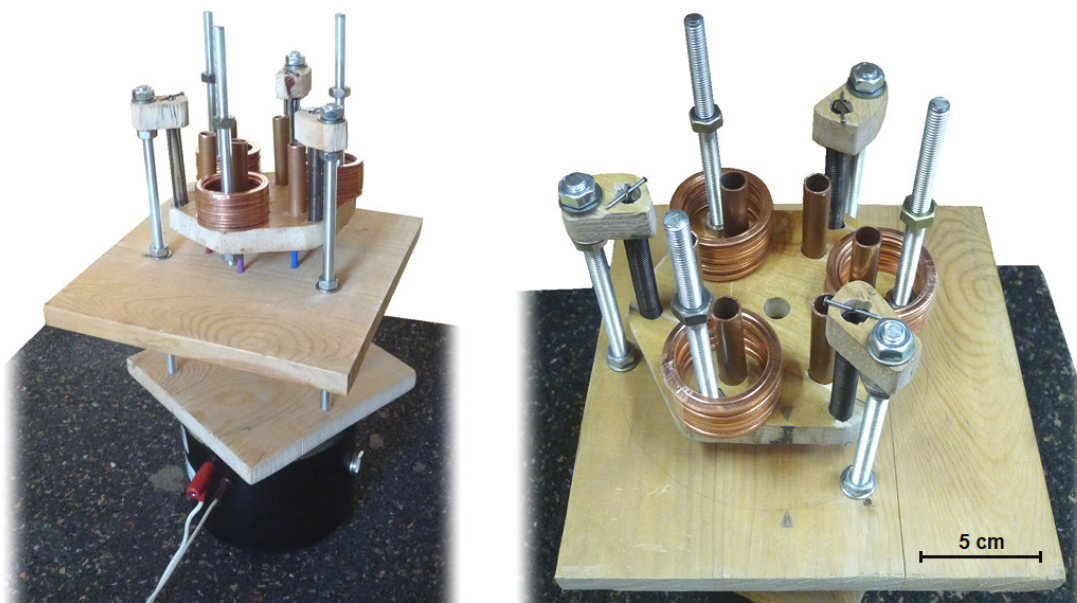
4.6. Testování modelu platformy mikroskopu

Pro ověření teorie přenosu vibrací a nového systému trubkového tlumení byl postaven zjednodušený model navrhované mikroskopové platformy (obr. 4.20). Model byl vybaven tlumicím systémem měděných trubek a magnetů, který měl být později použit na skutečném mikroskopu.

Model se skládal z dřevěné základny se třemi sloupy ze závitových tyčí. Ke sloupům byly přes dřevěné objímky připojeny tři tažné pružiny nesoucí samotnou platformu vybavenou symetricky rozmístěnými tlumicími trubkami. Magnety na plastových držácích byly upevněny do základny modelu a pro zatížení platformy posloužila série měděných kroužků rozmístěných tak, aby byla platforma správně vyvážená.

Model platformy nemohl být vytvořen s přesnými parametry skutečného návrhu platformy, protože v době měření ještě nebyla známa její finální podoba stejně jako celková hmotnost či další parametry. Také válcové magnety použité k tlumení byly jiné, ale dodržely průměr 3 mm zvolený pro konstrukci skutečné platformy.

Tlumicí trubky použité na modelu měly rozměr zvolených trubek pro skutečnou platformu – vnější průměr 12 mm a tloušťku stěny 1 mm. Spolu s průměrem magnetů tak bylo možné otestovat na modelu platformy také vliv mezi magnety a trubkami. Šířka mezery 3,5 mm mezi magnety a stěnou tlumicích trubek byla pro správnou funkci modelu platformy dostatečná. Lze tedy usuzovat, že bude dostatečná i v případě skutečné platformy. Parametry modelu jsou uvedeny v tabulce 4.6.



Obr. 4.20: Model navrhované mikroskopové platformy pro testování izolace vibrací a systému trubkového tlumení.

Model platformy:

$B_{\text{exp}} =$	0,452 T	magnetická indukce ve středu podstavy magnetu
$h =$	6 mm	výška magnetu
$\rho =$	2 mm	poloměr magnetu
$m =$	809 g	hmotnost zavěšené platformy
$k =$	67 N·m ⁻¹	tuhost jedné pružiny (použity celkem 3 pružiny)
$\omega_0 =$	15,77 rad·s ⁻¹	vlastní úhlová frekvence odpružené platformy
$f_0 =$	2,51 Hz	vlastní frekvence odpružené platformy

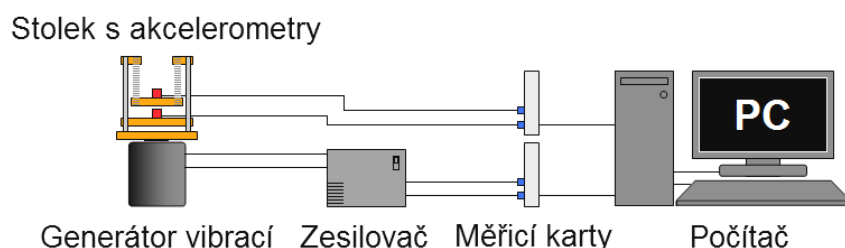
Tab. 4.6: Parametry modelu platformy z obrázku 4.20 určeného k testování izolace vibrací a systému trubkového tlumení.

4.6.1. Přenosová funkce modelu platformy

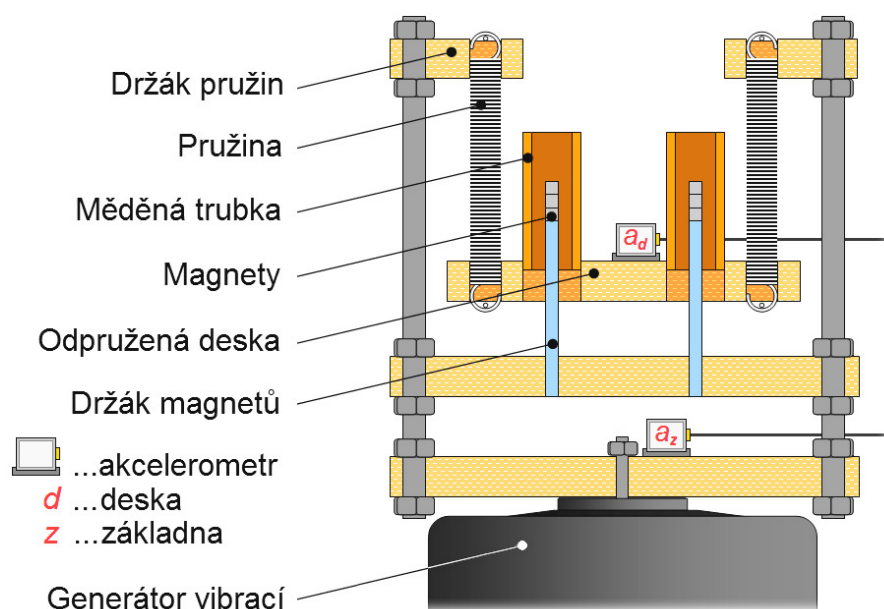
Pro ověření přenosové charakteristiky zavěšení platformy probírané v podkapitole 3.1. bylo provedeno měření přenosu vibrací ze základny modelu na samotnou platformu. Snímání vibrací probíhalo podobně jako v případě měření spektra vakuové komory v podkapitole 4.4. pomocí dvojice akcelerometrů připojených k počítači přes měřicí kartu (obr. 4.21). Pro definované buzení vibrací byl model platformy připevněn ke generátoru vibrací Brüel & Kjær 4809 [52] (obr. 4.22). Ten umožňoval vytvářet harmonické kmity s maximální silou až 45 N a amplitudou výchylky až 4 mm (obr. 4.23). Generátor byl přes zesilovač připojen k počítači.

Pro analýzu vibrací modelu platformy byl opět sestaven měřicí program v prostředí LabVIEW. Program ovládal generátor vibrací a také zaznamenával signál obou akcelerometrů, z nichž jeden byl umístěn na spoji generátoru s modelem co nejbližší k ose a druhý na odpružené platformě.

Detekce přenosu vibrací probíhala následovně: program nastavil budicí frekvenci a generátor vibrací začal kmitat. Po vyčkání předem zadané relaxační doby na ustálení nucených kmitů (řádově desítky sekund) program určil podíl signálů z obou akcelerometrů a přešel na vyšší hodnotu budicí frekvence, kdy se celý proces zopakoval. Takto byl měřen přenosový poměr pro diskrétní hodnoty frekvencí v rozsahu od 1 Hz do 750 Hz (obr. 4.24), přičemž do 10 Hz probíhalo měření s krokem 0,5 Hz, pro vyšší frekvence pak s krokem 5 Hz.



Obr. 4.21: Schéma měřicí sestavy pro analýzu vibrací modelu platformy.



Obr. 4.22: Schéma modelu platformy s umístěním akcelerometrů.

 10 cm	Frekvenční rozsah	10 Hz – 20 kHz
	Maximální síla v amplitudě výchylky	45 N
	Maximální vstupní proud	5 A
	Maximální výchylka (max – min)	8 mm
	První axiální rezonance	20 kHz
	Napájení	Zesilovač 2718

Obr. 4.23: Generátor vibrací Brüel & Kjær 4809 použitý pro buzení vibrací modelu platformy a jeho parametry uváděné výrobcem. Převzato z [52].

K určení přenosové poměru pro každou budicí frekvenci byl použit podíl středních kvadratických průměrů signálů z obou akcelerometrů, neboť v případě přímého poměru okamžitých hodnot by byl výsledek ovlivněn vzájemným fázovým posunem signálů z obou akcelerometrů.

Pro měření přenosové funkce mezi základnou a platformou dle rovnice (3.17) není nutné převádět měřené signály zrychlení na výchylku, protože v případě ustáleného kmitání jsou frekvence buzení a kmitání platformy totožné. Pro amplitudu zrychlení harmonického kmitání s úhlovou frekvencí ω a amplitudou x_0 platí

$$a_0 = -\omega^2 x_0. \quad (4.9)$$

S využitím rovnice (4.9) lze upravit vztah (3.17) pro poměr velikostí amplitud budicího a vybuzeného kmitání na tvar

$$T_2(\omega) = \frac{\left| \frac{x'_0}{x''_0} \right|}{\left| \frac{-\frac{a'_0}{\omega^2}}{-\frac{a''_0}{\omega^2}} \right|} = \frac{\left| \frac{a'_0}{a''_0} \right|}{\left| \frac{\omega^2}{\omega^2} \right|}. \quad (4.10)$$

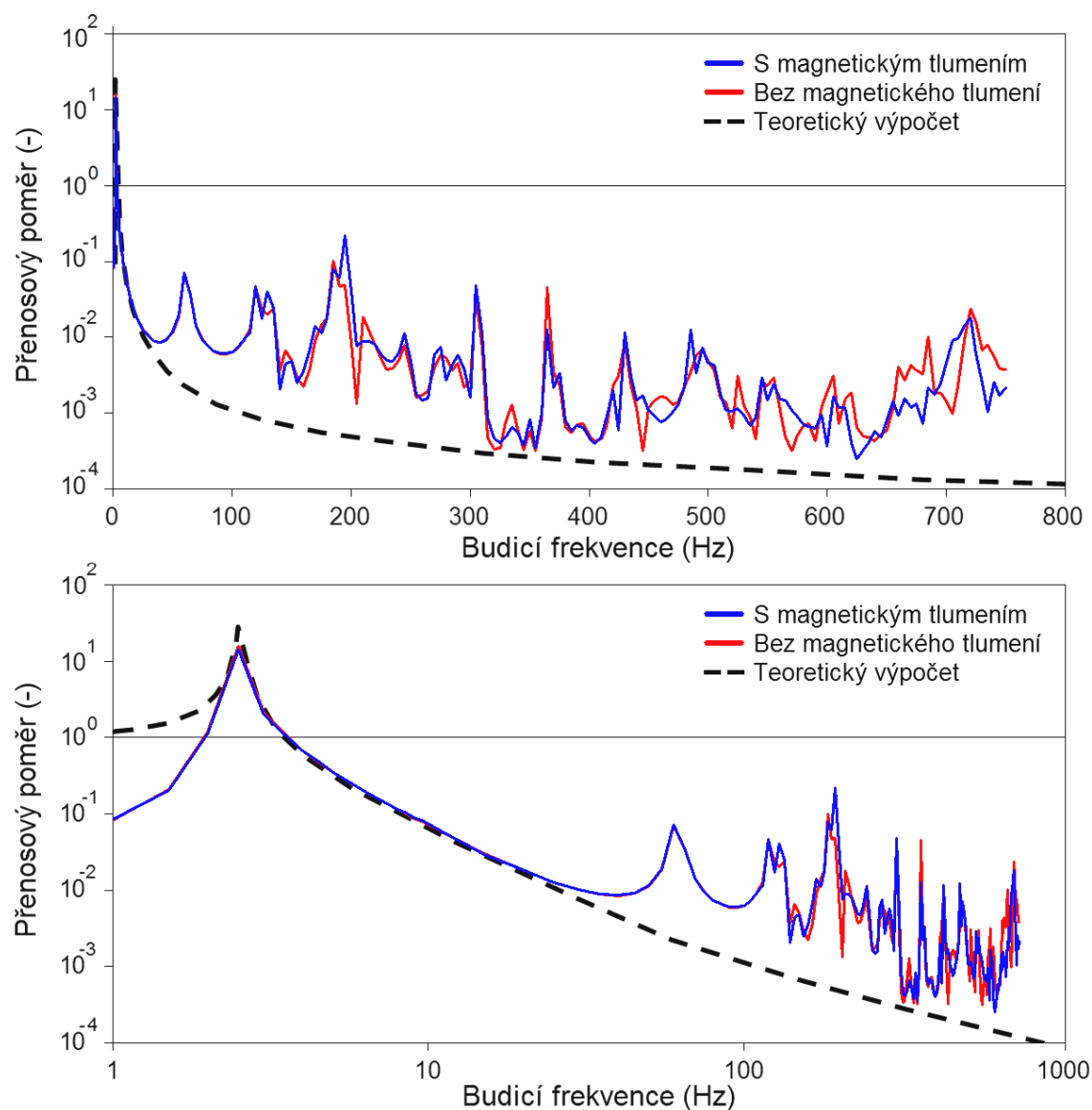
Výpočet přenosového poměru je tedy možný přímo z měřených zrychlení.

Ačkoli výrobce použitého generátoru vibrací deklaroval rozsah použitelných frekvencí od 10 Hz, pro potřeby měření byly použity i nižší frekvence, neboť generátor je dokázal budit. Průběh kmitů s takto nízkou frekvencí už sice nebyl harmonický, přesto se však povedlo naměřit maximum přenosové funkce odpovídající buzení vibrací na vlastní frekvenci modelu platformy.

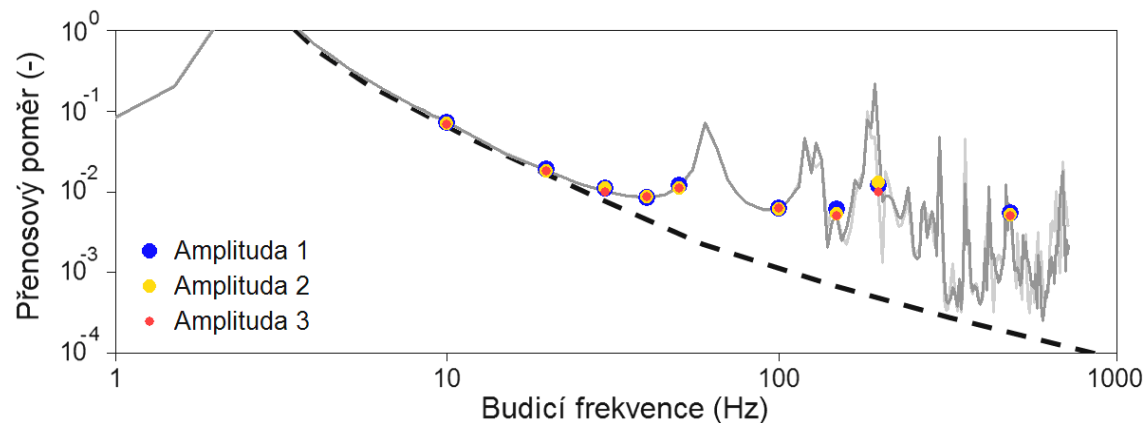
Na obrázku 4.24 je naměřený průběh přenosové funkce. Je vidět, že přenosový poměr pro frekvenci 2,5 Hz dosáhl hodnoty větší než 1. To bylo očekáváno, neboť kombinací hmotnosti modelu platformy a tuhosti použitých pružin měla vlastní frekvence modelu platformy právě hodnotu 2,5 Hz (viz tab. 4.6). Při buzení touto frekvencí tak docházelo k zesilování amplitudy, což bylo možné zřetelně pozorovat okem přímo během měření. V případě frekvencí dostatečně odlišných od vlastní frekvence však již byl tento poměr menší než jedna.

Naměřená přenosová funkce neměla příliš hladký průběh a obsahovala množství píků v celém rozsahu frekvencí. Důvodem byla zřejmě nízká tuhost celé konstrukce modelu kvůli použitým materiálům. Dřevěná deska použitá jako základna mohla při vhodných frekvencích buzení kmitat na složitých módech [53], což se mohlo projevit na výsledném průběhu přenosového poměru. Stejně tak závitové tyče, na nichž byl model platformy zavěšen, mohly při vhodných frekvencích zesilovat kmity základny. Celkově však pro frekvence dostatečně rozdílné od vlastní frekvence modelu dosahoval přenosový poměr hodnot v rozsahu 10^{-1} a 10^{-4} a blížil se teoreticky spočtenému průběhu přenosové funkce podle rovnice (3.18). Měření přenosové funkce bylo provedeno jak s využitím tlumicího magnetického systému, tak bez použití magnetů. Rozdíly mezi oběma přenosovými křivkami však byly zanedbatelné.

Aby bylo vyloučeno, že různé amplitudy výchylky buzení způsobují různé přenosové poměry pro dané frekvence, bylo kromě průběhu přenosové funkce na obrázku 4.24 naměřeno také několik přenosových poměrů pro různé diskrétní hodnoty amplitud vibrací generátoru (obr. 4.25). V souladu se vztahem (3.19) však vycházel ve všech případech přenosový poměr prakticky stejný nezávisle na amplitudě výchylky buzení.



Obr. 4.24: Naměřená přenosová funkce modelu platformy s použitím magnetického tlumení a bez něj: nahoře s lineární stupnicí na vodorovné ose, dole s logaritmickou. Zobrazen je i teoretický průběh dle vztahu (3.18) na základě parametrů z tabulky 4.6.



Obr. 4.25: Měření přenosového poměru při různých amplitudách výchylky buzení pro diskrétní hodnoty budící frekvence. Porovnáno s obrázkem 4.24.

4.6.2. Měření koeficientu tlumení modelu platformy

V rámci ověření teorie magnetického tlumení byla dále na modelu platformy provedena měření koeficientu tlumení kmitání při vybuzení jednoho pulzu. Měření probíhala následovně: program vybudil elektrickým pulzem jeden závit generátoru vibrací, čímž bylo vybuzeno kmitání odpružené platformy. Po vyčkání předem zadané relaxační doby na ustálení nucených kmitů (řádově jednotky sekund) program spustil záznam signálu z akcelerometru umístěného na platformě. Po uplynutí 40 sekund program snímání zastavil a data uložil. Následně mohly být změněny parametry tlumení jako počet magnetů či množství použitých tlumicích trubek. Takto bylo postupně proměřeno několik konfigurací tlumení modelu platformy.

Pro určení koeficientu tlumení bylo třeba naměřená data vhodně zpracovat. Měření probíhalo na vzduchu, takže kromě magnetického tlumení docházelo také k tlumení odporem vzduchu. Při zpracovávání naměřených dat byla použita pohybová rovnice tlumeného harmonického oscilátoru

$$\ddot{x} + \omega_0^2 x + \gamma \dot{x} + \alpha \dot{x}^2 \operatorname{sgn}(\dot{x}) = 0, \quad (4.11)$$

kde α je koeficient odporu vzduchu úměrného druhé mocnině rychlosti pohybu platformy a zbylé symboly mají stejný význam jako v podkapitole 3.1. Podle parametrů modelu v tabulce 4.6 byly provedeny numerické simulace rovnice (4.11) Eulerovou metodou [54]. Proložení naměřených průběhů zrychlení platformy numerickými simulacemi pak byly určeny hodnoty koeficientů útlumu vzduchu a magnetů.

Průběhy naměřených dat neodpovídaly úplně přesně numerickým řešením dle rovnice (4.11). Důvodem byl zřejmě fakt, že kabel vedoucí k akcelerometru na kmitající desce platformy způsoboval svým pohybem a kmitáním další tlumení a nestabilitu v pohybech platformy. Jiný způsob měření se však nepovedlo realizovat.

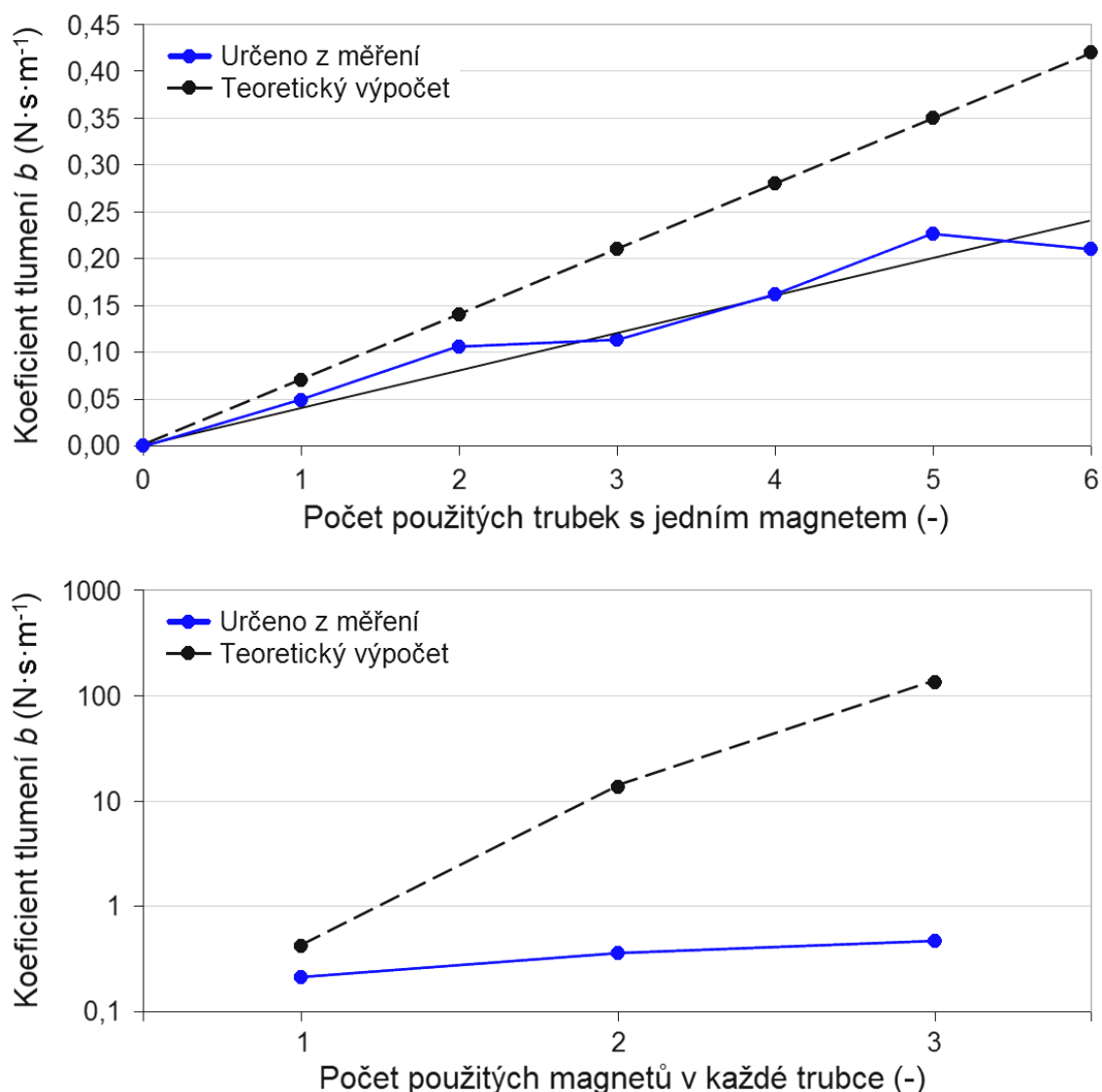
Naměřené průběhy zrychlení dále vykazovaly slabou modulaci harmonickým signálem s nižší frekvencí, než byla vlastní frekvence platformy. To bylo pravděpodobně způsobeno složením kmitů platformy v měřeném vertikálním směru s kmity v horizontálním směru, jejichž vzniku nebylo možné zabránit. Tyto skutečnosti snižovaly přesnost proložení naměřených dat teoretickou simulací.

Obrázek 4.26 ukazuje závislost koeficientu tlumení modelu měřeného při různých konfiguracích magnetického tlumení. V prvním případě bylo měřeno tlumení jedním magnetem pro různý počet použitých trubek. V druhém případě bylo k tlumení využito všech šest trubek, ale vždy s různým počtem magnetů.

Z obrázku je vidět, že v případě tlumení jedním magnetem splňuje koeficient tlumení lineární závislost na počtu použitých trubek, protože každá trubka vytváří nezávisle stejnou tlumicí sílu. Výsledná tlumicí síla je pak součtem všech těchto sil. Směrnice naměřené závislosti je však menší než podle teoretického výpočtu. Důvodem mohla být nižší vodivost mědi použitých trubek než hodnota použitá v případě výpočtu. Měření skutečné vodivosti použitých trubek provedeno nebylo.

Tlumení také mohlo být menší z důvodu konečné délky trubky, která sice splňovala podmínku (4.7), ale vzhledem k nezanedbatelnému rozměru magnetu uvnitř nebyla dostatečná. Tlumení každé trubky tak bylo menší a tedy i výsledná směrnice naměřené závislosti.

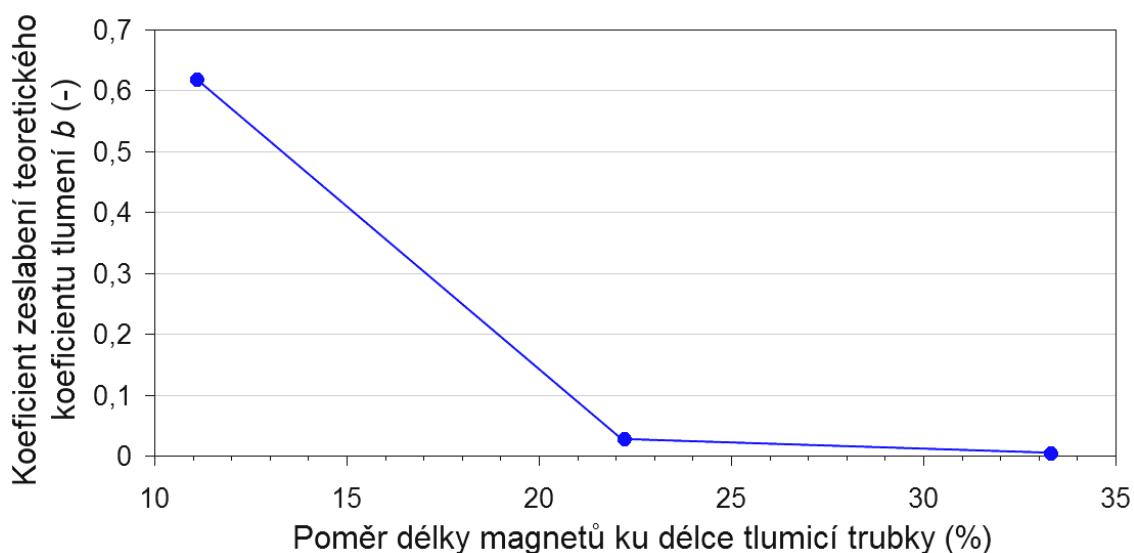
V druhém případě obrázku 4.26 bylo měřeno tlumení soustavy šesti trubek při použití různého počtu magnetů. Použito bylo tlumení jedním, dvěma a třemi magnety v každé ze šesti trubek a ve všech případech byl naměřený koeficient tlumení menší než podle teoretického výpočtu. Zde zřejmě převládl faktor malé délky použitých trubek.



Obr. 4.26: Porovnání teoreticky spočtených koeficientů tlumení modelu platformy dle rovnice (4.8) a hodnot určených z naměřených průběhů kmitání. Naměřená data v horním obrázku byla proložena přímkou procházející počátkem souřadnicové soustavy.

Při délce použitých trubek 54 mm a výšce jednoho magnetu 6 mm velká část magnetického pole uniká otvory na koncích trubek a nepřispívá k vytvoření magnetické síly. Skutečný koeficient tlumení je pak nižší než v případě teoretického výpočtu, což se projevilo v naměřených hodnotách na obrázku 4.26. Tento jev měl větší význam v případě série tří magnetů, kdy jejich výška 18 mm tvořila již 33% délky trubek. Proto je v tomto případě největší rozdíl mezi teorií a experimentem.

Z výsledků měření lze usoudit, že koeficient tlumení závisí kromě parametrů uvedených v rovnici (4.8) také na poměru výšky magnetů vůči délce trubek. Podle údajů z obrázku 4.26 byly určeny poměry mezi teoretickým a naměřeným koeficientem tlumení v závislosti na poměru výšky magnetu vůči trubce (obr. 4.27). Dle tohoto poměru je možné odhadnout skutečnou hodnotu koeficientu tlumení reálného systému. Pro přesnější průběh by však bylo třeba provést více měření s jemnějším krokem. Provedení takového měření by ale bylo náročné vzhledem k nutnosti použití mnoha magnetů s malou výškou nebo mnoha trubek s různými délkami.



Obr. 4.27: Poměr hodnot z obrázku 4.26 mezi naměřeným koeficientem tlumení modelu a jeho teoreticky spočtenou hodnotou.

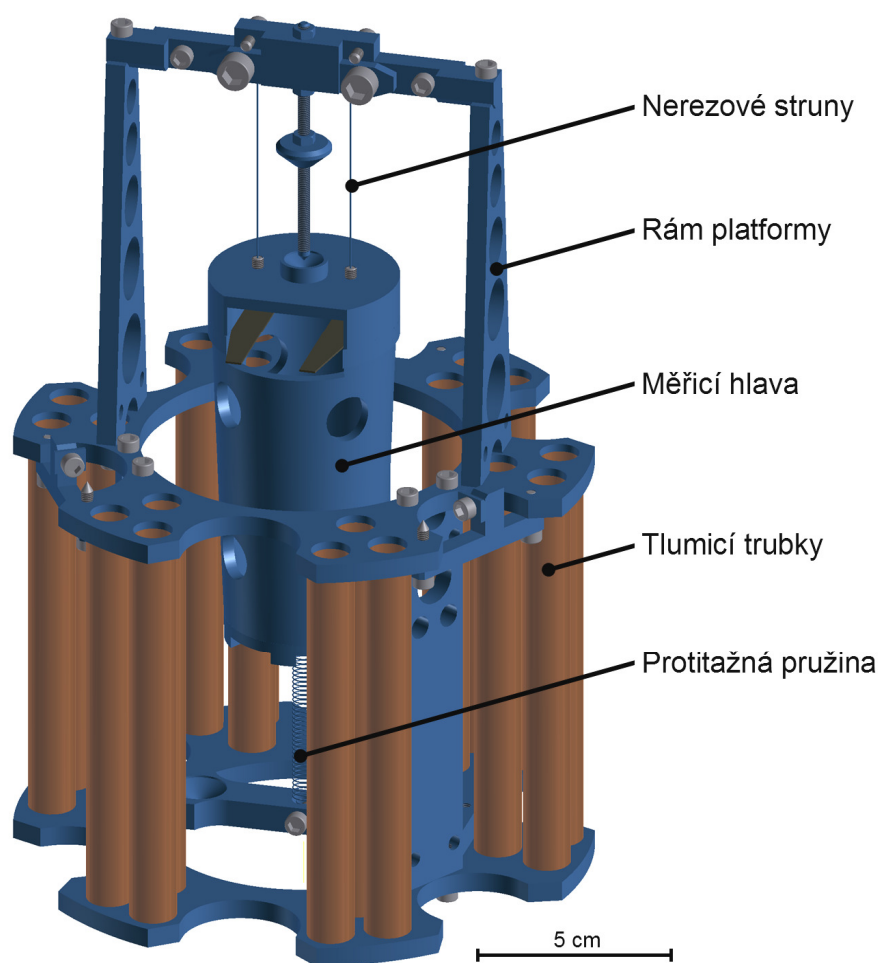
4.7. Konečná podoba nového návrhu platformy

Na základě všech poznatků zmíněných v předcházejících kapitolách byla v programu Autodesk Inventor Professional 2011 navržena konečná podoba mikroskopové platformy (obr. 4.28). Platforma obsahuje měřicí hlavu zavěšenou na rámu pomocí nerezových strun, přičemž protitah zajišťuje pružina upevněná ke dnu měřicí hlavy (viz podkapitola 4.3.2.).

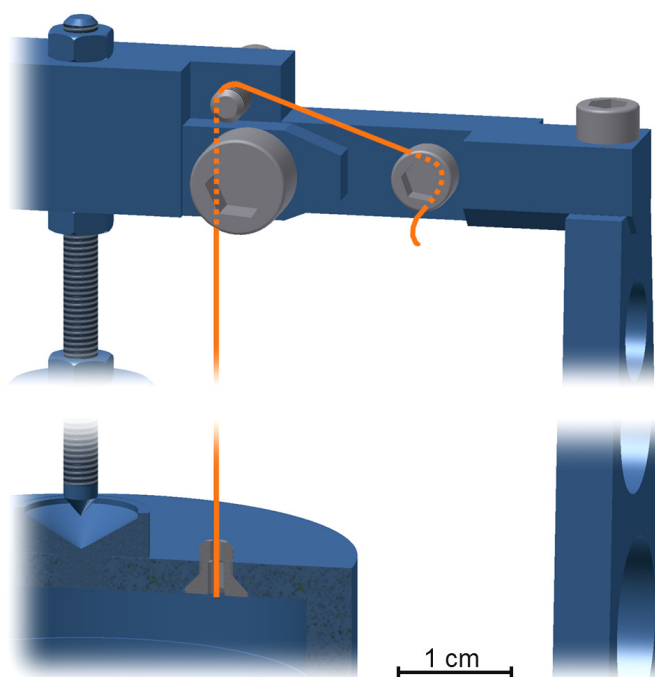
Vzhledem k zavěšení měřicí hlavy na strunách průměru 0,2 mm (viz podkapitola 4.3.5.) bylo třeba upevnit struny na obou koncích tak, aby nedošlo ke ztenčení struny a nehrozilo riziko jejího utržení v oslabeném místě. Z toho důvodu jsou struny na jednom konci umístěny do axiálních otvorů ve šroubech M3 a následně zapájeny UHV kompatibilní stříbrnou pájkou, popř. vlepeny UHV kompatibilním epoxidovým lepidlem. Na straně rámu platformy pak bylo navrženo uchycení pod speciální podložku a šroub tak, aby byla zajištěna pevnost spojení a jednoduchá montáž (obr. 4.29).

Platforma dále obsahuje sadu 18 měděných trubek z bezkyslíkaté mědi jako součást magnetického tlumicího systému vířivých proudů (viz podkapitola 4.5.). Přesná poloha trubek je zajištěna jejich upevněním mezi dvě talířovité desky rámu platformy.

Délka použitých trubek 100 mm byla zvolena v rámci maximálního využití prostoru tak, aby vyhovovala podmínce (4.7). Při použití pěti magnetů v každé trubce a s využitím všech trubek by dle rovnice (4.8) měl systém teoreticky dosahovat výsledného koeficientu tlumení $79 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$ (viz obr. 4.19). Jak však bylo zjištěno v podkapitole 4.6.2. při analýze tlumení modelu platformy, teoretický koeficient tlumení je ovlivňován poměrem délky použitých magnetů a trubek. V případě pěti magnetů výšky 3 mm v trubce délky 100 mm tvoří magnety 15 % délky trubek. V souladu s obrázkem 4.26 tak lze očekávat skutečný koeficient tlumení asi 0,4 krát menší. Přesnou hodnotu nelze určit, protože by bylo nutné znát přesnější závislost z obrázku 4.26 a také přesnější hodnotu vodivosti použitých trubek. Jako odhad je však tato hodnota dostačující.



Obr. 4.28: Model konečného návrhu nové mikroskopové platformy.



Obr. 4.29: Detail uchycení nerezových strun k měřicí hlavě a k rámu platformy.

Všechny pohyblivé části platformy byly navrženy tak, aby vůle mezi nimi a pevnými částmi mikroskopu přesahovala 3,5 mm. Důvodem bylo maximální využití vůle mezi magnety a stěnami tlumicích trubek, která u zvolené konfiguraci činila právě 3,5 mm (viz podkapitola 4.5.).

Důležitým požadavkem na platformu mikroskopu byla nutnost udržet těžiště platformy pod úrovní závěsů nosných pružin. V opačném případě by platforma byla nestabilní. Dále bylo třeba udržet těžiště co nejblíže k ose platformy. Proto je platforma navržena převážně jako rotačně symetrická a s tlumicími trubkami co nejnižší na rámu platformy. Dle počítačového modelu by tak těžiště mělo ve výsledku ležet 34 mm pod rovinou uchycení nosných pružin a nemělo by být vychýleno od svislé osy mikroskopu o víc než 0,2 mm.

Počítačový model platformy dosahuje celkové teoretické hmotnosti 2,0 kg. Údaj byl určen na základě modelových hustot materiálů přímo z databáze programu Autodesk Inventor. Skutečná hmotnost vyrobené platformy stejně jako poloha těžiště závisí na reálně použitých materiálech. Jsou však očekávány pouze malé rozdíly, které by neměly mít na funkčnost platformy zásadní vliv. Výsledné parametry návrhu platformy jsou uvedeny v tabulce 4.7.

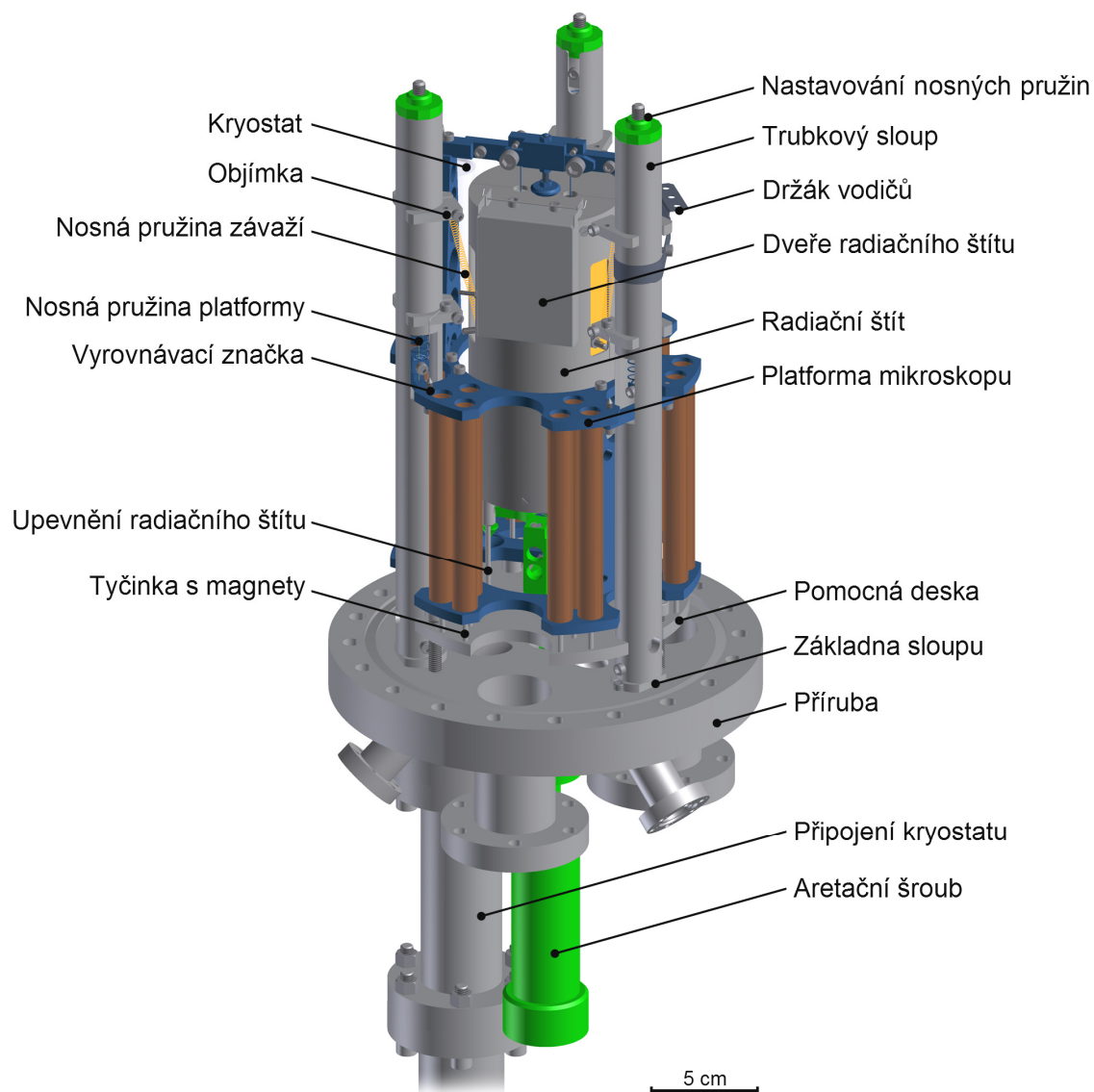
Nový návrh platformy:

$B_{\text{exp}} =$	$(375 \pm 4) \text{ mT}$	magnetická indukce ve středu podstavy magnetů (série 5 válcových magnetů)
$h =$	15 mm	výška série 5 válcových magnetů
$\rho =$	1,5 mm	poloměr série 5 válcových magnetů
$m =$	2000 g	hmotnost zavěšené platformy (počítačový model)
$k =$	$0,09 \text{ N} \cdot \text{mm}^{-1}$	tuhost jedné pružiny (použity celkem 3 pružiny)
$N =$	18	počet použitých tlumicích trubek
$R =$	5 mm	vnitřní poloměr tlumicích trubek
$t =$	1 mm	tloušťka stěny tlumicích trubek
$L =$	100 mm	délka tlumicích trubek
$f =$	1,9 Hz	vlastní frekvence zavěšené platformy (výpočet)
$b =$	$79 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	teoretický výsledný koeficient tlumení
$b^* \approx$	$32 \text{ N} \cdot \text{s} \cdot \text{m}^{-1}$	odhad výsledného koeficientu tlumení po uvážení vlivu konečné délky tlumicích trubek

Tab. 4.7: Parametry konečného návrhu mikroskopové platformy z obrázku 4.28.

Obrázek 4.30 ukazuje celou sestavu mikroskopu včetně platformy zavěšené na třech pružinách uvnitř trubkových sloupů. Pro připevnění sloupů k vakuové přírubě jsou navrženy základny dostatečné výšky, aby byla zaručena kolmost sloupů vůči rovině příruby.

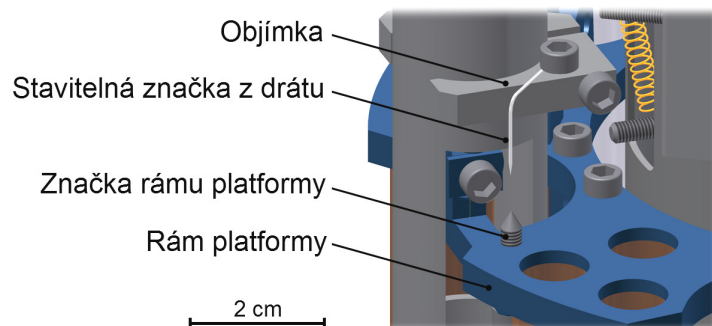
Uchycení nosných pružin platformy uvnitř sloupů je přizpůsobeno obyčejným okům tažných pružin s ohledem na možnost jednoduché výměny pružin za jiné v případě velké odchylky skutečné hmotnosti platformy od teoretického výpočtu. Jemné nastavování konečné polohy pružin pomocí šroubů na vrcholech trubkových sloupů je navrženo tak, aby toto mohlo být po instalaci mikroskopu do komory prováděno přímo rukou. Tím se předešlo nutnosti použití klíče v omezeném prostoru vakuové komory.



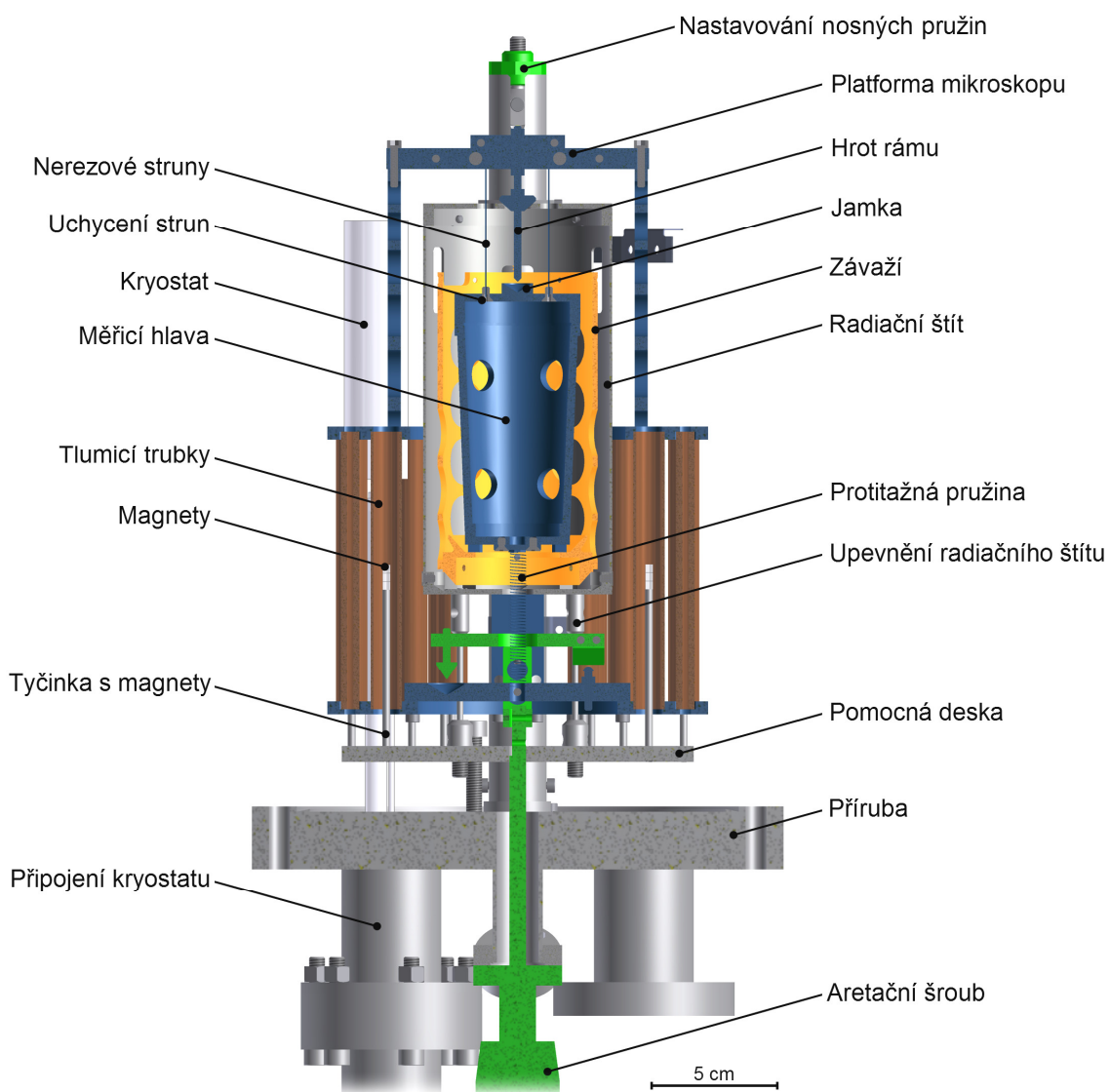
Obr. 4.30: Model celé sestavy mikroskopové platformy včetně periferií a příruby pro připojení k vakuové komoře. Detail vyrovnávací značky je na obr. 4.31.

Aby bylo možné sestavit celý mikroskop vně komory a pak jej ke komoře jednoduše připojit, byl rám platformy vybaven značkami pro určení správné polohy platformy vůči pevnému částem mikroskopu (obr. 4.31). Každá značka se skládá z hrotu na rámu platformy a z objímky vybavené měkkým nerezovým drátem. Značky umožňují nastavit rovnovážnou polohu vně komory pouhým ohybem drátu tak, aby se jeho konec nacházel proti hrotu v rámu platformy. Po připojení ke komoře značky poskytují kontrolu, zda nedošlo k vychýlení či naklonění platformy. Celkově byla platforma vybavena třemi značkami – dvěma vpředu a jednou vzadu vzhledem k průhledům na vakuové komoře.

Z důvodu montáže bylo dále nutné navrhnout konstrukci víka štítu z více dílů. Měděné víko měřicí hlavy bylo také dodatečně vybaveno ocelovou jamkou pro hrot rámu platformy, aby se při aretaci nepoškodilo (obr. 4.32).



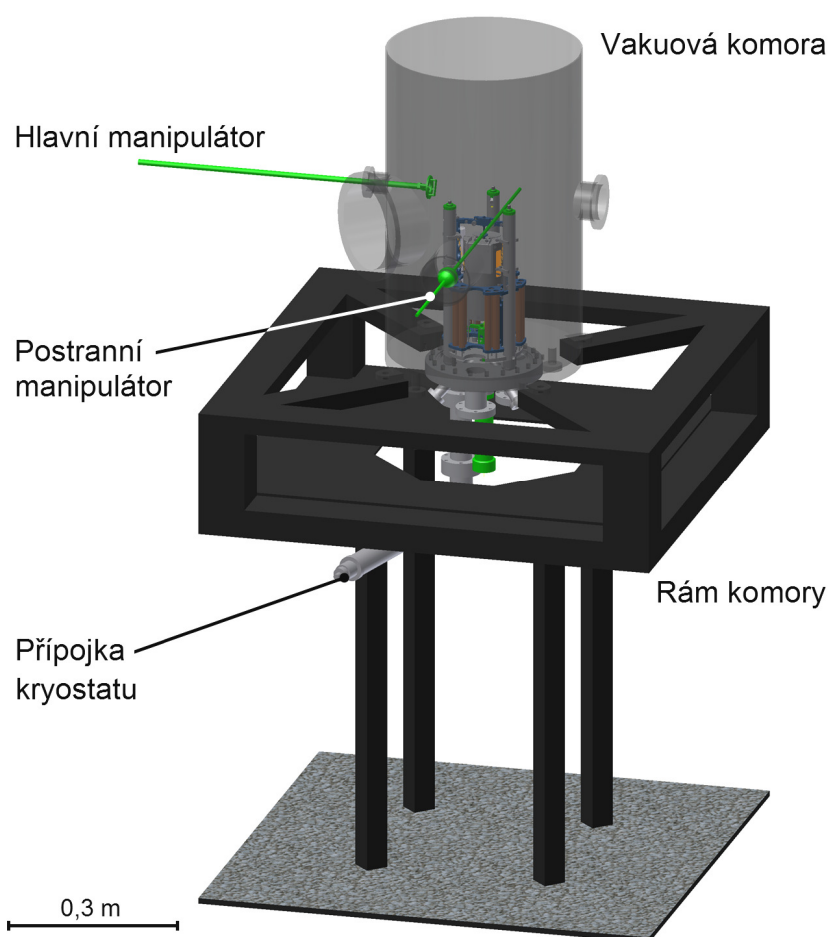
Obr. 4.31: Detail vyrovnávací značky z obrázku 4.30 pro nastavení a kontrolu správné polohy platformy.



Obr. 4.32: Řez modelem celé sestavy mikroskopové platformy z obrázku 4.30.

Z obrázku 4.32 je dále patrné množství otvorů v závaží pro tlumení vibrací vodičů a braidů. Důvodem bylo odlehčení závaží, aby nebyla chlazena zbytečně velká hmotnost, což by prodlužovalo dobu potřebnou pro dosažení pracovní teploty. Druhým důvodem bylo navrhnout závaží tak, aby se jeho těžiště opět nacházelo pod úrovní závěsů pružin a aby leželo na společné ose štítu a měřicí hlavy. V opačném případě by se po zavěšení mohlo závaží naklonit a následný kontakt s radiačním štítem či měřicí hlavou by způsoboval nežádoucí přenosy tepla a vibrací. Otvory v závaží vyvážily nesymetrii způsobenou otvorem potřebným pro vkládání vzorků do mikroskopu. Zároveň byly rozmístěny tak, aby se nenacházely v zákrytu s otvory v radiačním štítu, tedy aby záření z komory nedopadalo přímo na měřicí hlavu.

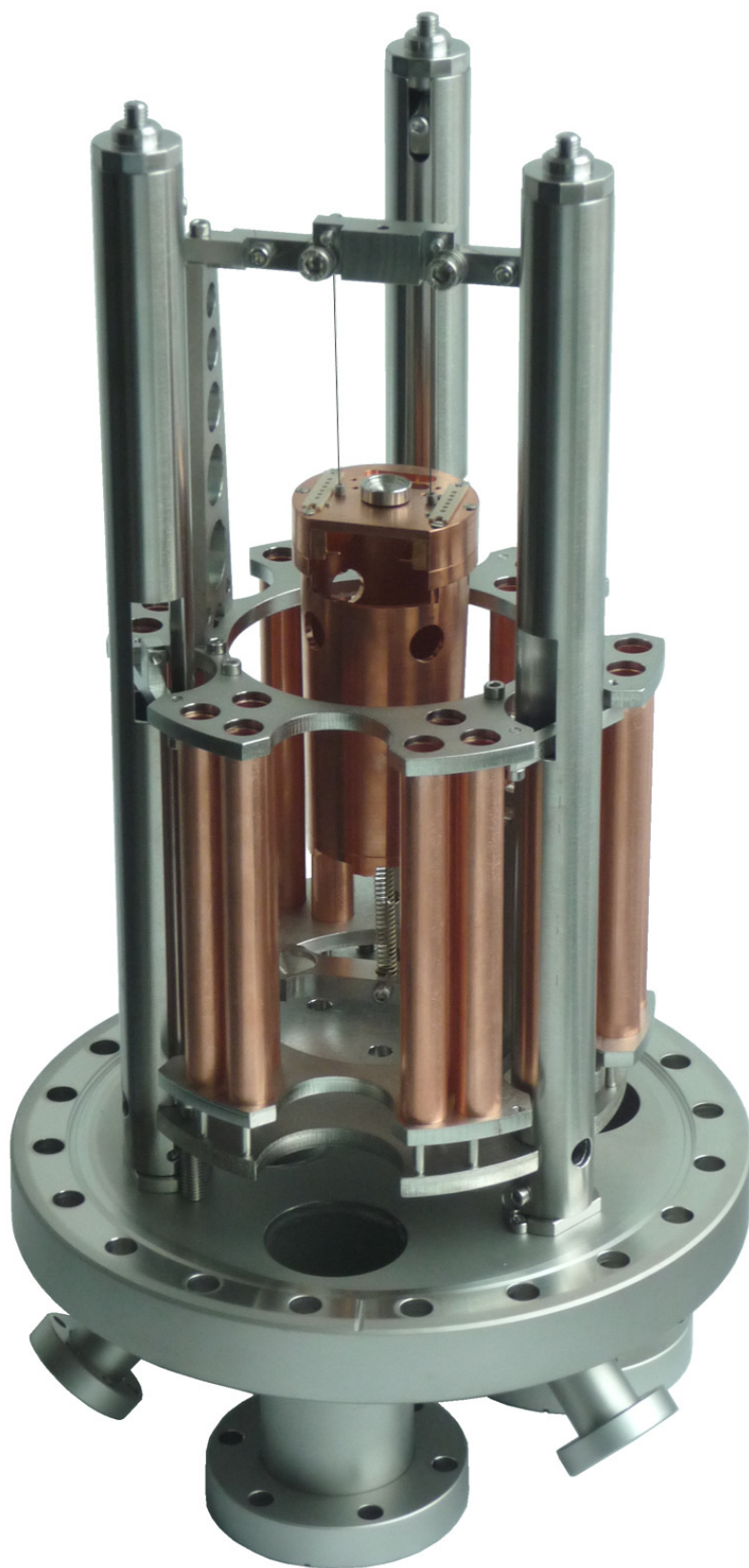
Pro optimalizaci návrhu platformy a kvůli dodržení rozměrových omezení (viz podkapitola 4.2.) byl také vytvořen zjednodušený model vakuové komory a jejího nosného rámu (obr. 4.33). Přizpůsobením počítačového modelu platformy prostoru a uspořádání virtuální komory tak bylo možné předejít případným nedopatřením, která by mohla po výrobě znemožnit připojení mikroskopu ke skutečné komoře.



Obr. 4.33: Model mikroskopu umístěný ve virtuální komoře s nosným rámem.

Do odevzdání této práce se podařilo dokončit výrobu pouze některých součástí platformy. Přesto byly tyto hotové díly úspěšně sestaveny (obr. 4.34), čímž byla otestována funkčnost některých navržených konstrukčních řešení i zvolených

rozměrových tolerancí ve výkresové dokumentaci. Sestavení celé platformy, její testování ani uvedení mikroskopu do provozu však již není součástí této práce.



Obr. 4.34: Částečně sestavená platforma s připojenou měřicí hlavou

4.8. Možnosti zlepšení konstrukce platformy

Výše popisovaná platforma nového mikroskopu STM byla navrhována s cílem splnit veškeré požadavky (viz podkapitola 4.2.) při zachování vyrobiteľnosti a sestavitelnosti. Přesto se na návrhu platformy vyskytlo několik prvků, jejichž parametry nebyly navrženy optimálně:

- *Odvod tepla dveří radiačního štítu*

Dveře radiačního štítu jsou podobně jako samotný štít navrženy z plechu bezkyslíkaté mědi tloušťky 1 mm, což zaručuje dostatečnou tuhost a zároveň dobrou tepelnou vodivost a nízkou hmotnost nutnou k rychlému ochlazení na požadovanou teplotu. Není však zcela vyřešeno tepelně vodivé spojení mezi dveřmi a štítem tak, aby se teplo z dveří odvádělo dostatečně efektivně. Současný návrh zahrnuje připojení dveří přes pant tvořený čepem z nerezového drátu. Pro tepelně vodivé spojení by však bylo třeba navíc spojit dveře se štítem např. pomocí měděných vodičů, případně přivést další braidy z tepelného výměníku ke dveřím a chladit je přímo. V současném návrhu však dveře udržuje v otevřené poloze jejich vlastní hmotnost, což by v případě připojení braidů nemuselo vlivem jejich tuhosti a hmotnosti stačit. Řešením by mohlo být přidání malé pružiny mezi dveře a víko štítu tak, aby pomáhala udržet dveře v otevřeném stavu.

- *Nízká tuhost trubkových sloupů*

Trubkové sloupy nesoucí platformu dosahují ve finálním návrhu délky 277 mm, přičemž volná délka (od pevné základny trubek) je 209 mm. Podobně jako v případě vibrací vakuové komory by tak horní konce trubek mohly při určitých frekvencích kmitat s řádově většími amplitudami oproti vibracím základny. Problém by mohlo vyřešit vzájemné propojení všech tří sloupů pomocnou konstrukcí, čímž by se zvýšila celková tuhost systému. Konstrukce by však nesměla omezit prostor pro manipulaci se vzorky ani možnost plného otevření dveří štítu.

- *Tlumení kmitů závaží*

Pro tlumení kmitů závaží vyvolaných vibracemi vodičů a braidů by bylo vhodné vybavit závaží tlumícím systémem podobně jako v případě platformy. Omezený prostor kolem závaží a jeho rozměry samotné ale velmi komplikují jakýkoli návrh. Možností je zabudovat tenké válcové magnety přímo do obvodu pláště závaží a tlumit tak jeho kmity vířivými proudy vznikajícími v radiačním štítu či měřicí hlavě. Toto řešení je snadné a lze jej dodatečně aplikovat na již hotové zařízení. Problémem by však mohlo být zahřívání štítu a měřicí hlavy právě procházejícími vířivými proudy. Z tohoto hlediska by tento způsob tlumení vyžadoval hlubší analýzu.

- *Detekce vychýlení závaží*

Jak bylo zmíněno v podkapitole 4.7., pro detekci vychýlení z rovnovážné polohy je platforma vybavena třemi nastavitelnými značkami. V případě závaží uzavřeného v radiačním štítu se však žádné mechanické značení polohy navrhnout nepodařilo. Polohu závaží tak nelze po zavření radiačního štítu nijak kontrolovat. Jedinou možností nabízí detekce proudu při zkratování, tj. při kontaktu závaží se stěnou štítu či s měřicí hlavou. K tomu účelu by ale bylo nutné izolovat závaží od okolí nejen tepelně pomocí pružin, ale i elektricky. Současný návrh toto řešení nezahrnuje a spoléhá na správné nastavení polohy závaží při montáži ještě před samotným připojením mikroskopu k vakuové komoře. V případě potřeby je však možné dodatečně upravit objímky trubkových sloupů pro úchyt pružin závaží tak, aby byly od sloupů elektricky

izolovány. Podobně pak musí být elektricky izolováno přichycení vodičů a braidů k závaží.

- *Tepelné vedení aretačního hrotu při chlazení v aretované poloze*

Při chlazení měřicí hlavy v aretované poloze, jak bylo popsáno v podkapitole 4.3.4., by mohlo dojít k velkému přenosu tepla způsobeném kontaktem aretačního hrotu rámu platformy s radiačním štítem a jamkou v samotné měřicí hlavě. Odhadnout tepelný tok není snadné z důvodu neurčitosti v kontaktních plochách.

Dalším problémem by mohlo být chlazení samotného závaží. Jak bylo zmíněno v podkapitole 4.3.4., konstrukce platformy sice umožňuje efektivně chladit závaží v aretované poloze, ale v případě pracovního režimu již závaží chlazeno není. Otázkou tedy je, jakou část braidů z druhého výměníku připojit k samotnému závaží. Výhodou je dobrá tepelná izolace závaží od rámu mikroskopu díky dlouhému vinutí pružin a stejně tak izolace od záření z okolí díky radiačnímu štítu. Pro udržení nízké teploty po prochlazení závaží v aretované poloze by tedy mohla stačit jen relativně malá část výkonu druhého výměníku. Je však třeba provést hlubší analýzu tepelných toků a na jejím základě zvolit vhodné braidy pro optimální využití výkonu tepelných výměníků.

Závěr

V diplomové práci byla diskutována problematika konstrukce zařízení do podmínek ultravysokého vakua. Kromě vhodných materiálů byly rovněž probírány obecné konstrukční zásady, které vyžaduje použití ve vakuových systémech.

Dále byla diskutována problematika přenosu vibrací a jejich tlumení v podmínkách ultravysokého vakua. Byly uvedeny způsoby omezení přenosu vibrací z vakuové komory na zařízení uvnitř a zejména pak omezení přenosu vibrací z vakuové komory na měřicí hlavu nízkoteplotního rastrovacího tunelového mikroskopu STM.

Hlavní část diplomové práce byla věnována návrhu nosné platformy právě pro nízkoteplotní ultravakuový mikroskop STM. Návrh platformy byl podřízen především požadavkům na antivibrační uložení měřicí hlavy mikroskopu a tepelnou izolaci chlazených součástí, aby bylo umožněno dosažení atomárního rozlišení a pracovní teploty 25 K pomocí průtokového heliového kryostatu.

Pro účinný návrh izolace vibrací bylo změřeno spektrum vibrací vakuové komory, do které měl být mikroskop po výrobě umístěn. S pomocí akcelerometrů a měřicího programu v prostředí LabVIEW bylo zjištěno, že nejvíce zastoupené frekvence vibrací dané komory jsou 25 Hz a 50 Hz. Měření také ukázalo, jak se liší amplitudy vibrací v rámci samotné vakuové komory. Víko komory vykazovalo o řád vyšší amplitudu vibrací než dno komory, a to zase mělo řádově vyšší amplitudu, než byla amplituda vibrací podlahy v laboratoři. V souvislosti s výsledky pak byly diskutovány možnosti návrhu platformy a připojení celého mikroskopu ke komoře v rámci dodržení požadavků na konstrukci a dosažení co nejlepších parametrů.

Samotný návrh platformy pro mikroskop byl prováděn v programu Autodesk Inventor 2011. Konečný návrh byl analyzován z hlediska tepelných toků, aby bylo zajištěno, že nepřekročí celkový výkon tepelných výměníků kryostatu. Dále byla platforma vybavena systémem magnetického tlumení vířivými proudy v podobě měděných trubek s magnety uvnitř. Konstrukce platformy také umožňovala manuální aretaci všech pohyblivých součástí mikroskopu pomocí lineárního manipulátoru zevnějšku vakuové komory.

Dále byl vytvořen reálný model navrhované mikroskopové platformy opatřený již zmiňovaným magnetickým tlumením vířivými proudy. Na modelu byly proměřeny přenosové charakteristiky pružinového zavěšení platformy a ty porovnány s teorií přenosu vibrací. Naměřen byl také útlum kmitání platformy vybuzeného jedním základem základny a to pro různé konfigurace prvků magnetického tlumení. Naměřené charakteristiky vykazovaly značně menší hodnoty koeficientu tlumení, než udávala teorie. Ukázalo se, že kromě parametrů samotných magnetů a trubek výsledné tlumení silně závisí na poměru délky trubek vůči výšce magnetů.

Veškeré poznatky získané z měření vibrací vakuové komory i testování modelu platformy byly uplatněny při samotném návrhu platformy. Pro finální podobu platformy mikroskopu byla vypracována kompletní výrobní dokumentace všech součástí a ty byly dány do výroby.

Do odevzdání této práce byla dokončena výroba pouze některých součástí platformy a příslušenství. To umožnilo platformu částečně sestavit a otestovat tak funkčnost některých navržených konstrukčních řešení. Již však nebylo provedeno testování kompletní platformy ani uvedení celého mikroskopu STM do provozu.

Literatura

- [1] BINNIG, G., H. ROHRER, CH. GERBER and E. WEIBEL. *Surface Studies by Scanning Tunneling Microscopy*. Physical Review Letters, 1982, vol 49, issue 1.
- [2] SUGIMOTO, A., R. UKITA and T. EKINO. *Nano-scale stripe structures on FeTe observed by low-temperature STM/STS*. Physics Procedia, 2013, vol 45.
- [3] GÜNTER, N. and A. HAIBEL. *Zero time space : how quantum tunneling broke the light speed barrier*. Weinheim: Wiley-VCH, 2008, 150 p.
- [4] *The Nobel Prize in Physics 1986* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1986/
- [5] *The Nobel Prize in Physics 1921* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1921/index.html
- [6] BEISER, A. *Úvod do moderní fyziky*. Praha: Academia, 1975, 628 s.
- [7] *The Nobel Prize in Physics 1937* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/1937/
- [8] KALOUSEK, R. *In situ monitorování povrchů pevných látek modifikovaných iontovými svazky metodou SFM/STM v podmínkách ultravakua*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojího inženýrství, 1996, 76 s. Diplomová práce.
- [9] MEYER, E., H. HUG and R. BENEWITZ. *Scanning Probe Microscopy: The Lab on a Tip*. Berlin: Springer, 2003, 210 p. ISBN 3-540-43180-2.
- [10] FRANK, L. a J. KRÁL. *Metody analýzy povrchů: iontové, sondové a speciální metody*. Praha: Academia, 2002, 489 s. ISBN 80-200-0594-3.
- [11] EKVALL, I., E. WAHLSTRÖM, D. CLAEISSON, H. OLIN and E. OLSSON. *Preparation and characterization of electrochemically etched W tips for STM*. Measurement Science and Technology, 1999, vol. 10. Dostupné také z: <http://iopscience.iop.org/0957-0233/10/1/006>
- [12] *Ultra sharp STM probe* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://nauganeedles.com/products-USSTM-W500-Cr>
- [13] LÜTH, H. *Surfaces and Interfaces of Solid*. 2nd ed. Berlin: Springer Verlag Berlin Heidelberg, 1993, 487 p.
- [14] GROSZKOWSKI, J. *Technika vysokého vakua*. Praha: Nakladatelství technické literatury, 1981, 440 s.
- [15] *LIGO vacuum compatible material list* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.ligo.caltech.edu/docs/E/E960050-B/E960050-B.pdf>

- [16] MIKULČÁK, J. et. al. *Matematické, fyzikální a chemické tabulky pro střední školy*. 3. vyd. Praha: Prometheus, 2005, 206 s. ISBN 80-85849-84-4.
- [17] *DuPont: Kapton polyimide film* [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Kapton/en_US/tech_info/
- [18] *DuPont: Viton Product Data Sheets* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www2.dupont.com/Plastics/en_US/pfo/viton_product_data.html
- [19] *Macor brochure* [online]. [cit. 2014-05-13]. Dostupné z: <http://www.corning.com/docs/specialtymaterials/pisheets/Macor.pdf>
- [20] APOLLONIO, A., et. al. *Measurement of the Residual Resistivity Ratio of the Bus Bars Copper Stabilizer of the 13 kA Circuits of the LHC*. 2012. Dostupné také z: <http://accelconf.web.cern.ch/accelconf/IPAC2012/papers/thppd031.pdf>
- [21] *Luvata: CuCrZr material data sheet* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.luvata.com/Documents/Special%20Products/Alloy%20data%20sheets/Chromium%20Zirconium%20Copper_ENG.pdf
- [22] VOŇKA, J. *Design and verification of low temperature part of UHV – STM microscope*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2013, 63 s. Diplomová práce.
- [23] SÍTKO, V. *Vakuová technika*. Praha: Státní nakladatelství technické literatury, 1966, 216 s.
- [24] O'HANLON, J. F. *A user's guide to vacuum technology*. 3rd ed. Hoboken: Wiley-Interscience, 2003, 516 p. ISBN 0-471-27052-0.
- [25] SCHMID, M. and P. VARGA. *Analysis of vibration-isolating systems for scanning tunneling microscopes*. Ultramicroscopy, 1992.
- [26] VŮJTEK, M., R. KUBÍNEK a M. MAŠLÁŇ. *Nanoskopie*. Olomouc: Univerzita Palackého, 2012, 122 s. ISBN 978-80-244-3102-4.
- [27] CRAWFORD, R. W. *Vibration isolation of large masses and vacuum chambers*. Optical Telescope Technology, 1970. Dostupné také z: <http://ntrs.nasa.gov/search.jsp?R=19700027360>
- [28] NEKULA, J. *Návrh rastrovacího tunelovacího mikroskopu STM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2004, 59 s. Diplomová práce.
- [29] TICKOO, S. *Ansys Workbench 14.0 for Engineers and Designers*. Dreamtech press, 2014, 412 p. ISBN 978-93-500-4674-6.
- [30] *Newport: constant natural frequency elastomeric vibration isolators* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <https://www.newport.com/Elastomeric-Vibration-Isolators,-Constant-Natural-Frequency-NewDamp-Series/139784/1033/info.aspx>

- [31] *Thorlabs: passive benchtop isolation systems* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.thorlabs.com/newgrouppage9.cfm?objectgroup_id=1129
- [32] CHIKKAMARANAHALLI, S. B., R. R. VALLANCE, B. N. DAMAZO and R. M. SILVER. *Damping mechanisms for precision applications in UHV environment*. Pittsburgh: American Society for Precision Engineering, 2006.
- [33] *Accurion Vario Series* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www accurion.com/active-vibration-isolation-products/vario-series>
- [34] LOPOUR, F. *Návrh zařízení pro sledování povrchů pevných látek v podmínkách ultravakua metodou STM/SFM*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 1997, 54 s. Diplomová práce.
- [35] AST, CH., M. ASSIG, A. AST and K. KERN. *Design criteria for scanning tunneling microscopes to reduce the response to external mechanical disturbances*. Review of Scientific Instruments, 2008, vol. 79.
- [36] *Luvata: Cu-OF material data sheet* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.luvata.com/Documents/Special%20Products/Alloy%20data%20sheet s/Oxygen-Free%20Copper_OF-OK_ENG.pdf
- [37] *Attocube: linear positioners for low temperatures* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.attocube.com/nanoPOSITIONING/linear.html>
- [38] *Lewvac: CF vacuum flange catalogue* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.lewvac.co.uk/index_files/section%203.1.pdf
- [39] *Wobble sticks* [online]. [cit. 2014-05-09]. Dostupné z: <http://www.vgscienta.com/productlist.aspx?MID=376>
- [40] WAGUESPACK, C. and T. TREMBLAY. *Mastering Autodesk Inventor and Autodesk Inventor LT 2011*. Sybex, 2010, 936 p. ISBN 978-04-708-8287-0.
- [41] VOŇKA, J. *Materials and their application in low temperature parts of STM microscope*. Brno: Brno University of Technology, Faculty of Mechanical Engineering, 2011, 39 p. Bachelor's thesis.
- [42] SHIGLEY, J. E., CH. R. MISCHKE, R. G. BUDYNAS, M. HARTL a M. VLK. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTIUUM, 2010, 1159 s. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [43] *Nerezová ocel 1.4301* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://inoxspol.cz/index.php?act=a&cat=4&art=16>
- [44] HARNA, Z. *Přesná mechanika*. 1. vyd. Brno: Vysoké učení technické v Brně, 1996, 148 s. ISBN 80-214-0794-8.

- [45] *Brüel & Kjær Piezoelectric accelerometer 4507* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/transducers/vibration/accelerometers/accelerometers/4507?tab=specifications>
- [46] TRAVIS, J. and J. KRING. *Labview for Everyone: Graphical Programming Made Easy and Fun*. 3rd ed. New Jersey: Prentice Hall, 2006, 1032 s.
- [47] *National Instruments USB-9233* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://sine.ni.com/nips/cds/view/p/lang/cs/nid/202100>
- [48] *Omicron: Room Temperature SPM* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.omicron.de/en/products/room-temperature-spm-stm>
- [49] DONOSO, G., C. L. LADERA and P. MARTÍN: *Magnet fall inside a conductive pipe: motion and the role of the pipe wall thickness*. *Europeana Journal of Physics*, 2009, vol. 30, issue 4.
- [50] *Selos: SmCo disk* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.magnety.eu/smco-disk-anizotrop/>
- [51] *Elobau magnets* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: http://www.elobau.com/Magnets/uncoded/SEKO_Magnets/0,0,0,292,72.html
- [52] *Brüel & Kjær Measurement Exciter Type 4809* [online]. [cit. 2014-04-22]. Dostupné z: <http://www.bksv.com/Products/shakers-excitters/excitters/small-exciter-type-4809?tab=overview>
- [53] WALLER, M. D. *Chladni figures: a study in symmetry*. London: G. Bell, 1961.
- [54] ČERMÁK, L. *Numerické metody pro řešení diferenciálních rovnic*. Brno: Litera Brno, 2013, 81 s. ISBN 978-80-903586-7-6.

Seznam výkresů

ČÍSLO	VÝKRES / SOUČÁST		
1	STM DESKA SPODNÍ	29	STM ŠTÍT JEHLA
2	STM DESKA ZÁVĚSNÁ	30	STM SLOUP
3	STM HORNÍ MOST	31	STM SLOUP ŠROUB
4	STM HORNÍ NOSNÍK	32	STM SLOUP MATICE
5	STM PODLOŽKA STRUN	33	STM SLOUP ZÁKLADNA
6	STM DOLNÍ MOST	34	STM ZÁVAŽÍ PLÁŠŤ
7	STM DOLNÍ NOSNÍK	35	STM ZÁVAŽÍ DNO
8	STM ZÁVĚS PRUŽINY	36	STM SLOUP OBJÍMKA 1
9	STM ÚCHYT STRUNY	37	STM SLOUP OBJÍMKA 2
10	STM TLUMENÍ TRUBKA	38	STM SLOUP DRŽÁK
11	STM ZNAČKA	39	STM DESKA PODPŮRNÁ
12	STM ARETACE HROT 2	40	STM PŘÍRUBA
13	STM ARETACE JAMKA	41	STM TLUMENÍ TYČINKA
14	STM ARETACE KUŽEL	-	STM ZÁVAŽÍ ROZVIN
15	STM ARETACE HROT 1	-	STM ŠTÍT ROZVIN
16	STM ARETACE MOST	-	STM SEST. ŠTÍT
17	STM ARETACE KŘÍŽ	-	STM SEST. NOHA
18	STM ARETACE VEDENÍ	-	STM SEST. ZÁVAŽÍ
19	STM ARETACE HROT 3	-	STM SEST. ARETACE
20	STM ŠTÍT PLÁŠŤ	-	STM SEST. PLATFORMA
21	STM ŠTÍT VÍKO 1	-	STM SEST. MIKROSKOP
22	STM ŠTÍT VÍKO 2		
23	STM ŠTÍT PANT		
24	STM ŠTÍT DVEŘE		
25	STM ŠTÍT DNO		
26	STM ŠTÍT ČEP		
27	STM ŠTÍT NOHA 1		
28	STM ŠTÍT NOHA 2		

Seznam příloh

Příloha na CD-ROM:

- *Výkresová dokumentace ve formátu PDF*
- *Modely součástí a sestav ve formátu STP*
- *Modely součástí a sestav programu Autodesk Inventor Professional 2011*