



**VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ**  
BRNO UNIVERSITY OF TECHNOLOGY



**FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ**  
**ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ**

FACULTY OF MECHANICAL ENGINEERING  
INSTITUTE OF MACHINE AND INDUSTRIAL DESIGN

# **KONSTRUKCE ZAŘÍZENÍ PRO BUZENÍ VIBRACÍ**

DESIGN OF EQUIPMENT FOR EXCITATION OF VIBRATIONS

**BAKALÁŘSKÁ PRÁCE**  
BACHELOR'S THESIS

**AUTOR PRÁCE**  
AUTHOR

**PAVEL ČÍPEK**

**VEDOUCÍ PRÁCE**  
SUPERVISOR

**ING. JOSEF FRÝZA**

BRNO 2014



Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství

Ústav konstruování

Akademický rok: 2013/14

## ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

student(ka): Pavel Čípek

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

obor: **Strojní inženýrství (2301R016)**

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 bakalářské práce:

### **Konstrukce zařízení pro buzení vibrací**

v anglickém jazyce:

### **Design of equipment for excitation of vibrations**

Stručná charakteristika problematiky úkolu:

Cílem práce je konstrukční návrh modulu pro buzení vibrací jako doplňku laboratorního zařízení. Součástí práce je také výběr vhodného pohonu. Modul má umožnit vratný pohyb zkušební vzorku s amplitudou pohybu 0,5 mm při frekvenci 10 Hz.

Cíle bakalářské práce:

Bakalářská práce musí obsahovat: (odpovídá názvům jednotlivých kapitol v práci)

1. Úvod
2. Přehled současného stavu poznání
3. Analýza problému a cíl práce
4. Návrh konstrukčních řešení
5. Výsledné konstrukční řešení
6. Diskuze
7. Závěr
8. Seznam použitých zdrojů

Forma práce: průvodní zpráva, výkres sestavení, digitální data

Typ práce: konstrukční; Účel práce: výzkum a vývoj

Rozsah práce: cca 27 000 znaků (15 - 20 stran textu bez obrázků).

Zásady pro vypracování práce:

[http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP\\_DP/Zasady\\_VSKP\\_2014.pdf](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/BP_DP/Zasady_VSKP_2014.pdf)

Šablona práce: [http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK\\_sablona\\_praci.zip](http://dokumenty.uk.fme.vutbr.cz/UK_sablona_praci.zip)

Seznam odborné literatury:

- [1] Brepta, R., Půst, L., Turek, F., Mechanické kmitání, Sobotáles, Praha, 1994.
- [2] Kratochvíl, C. a Slavík, J., Mechanika těles - dynamika, CERM, Brno, 2002.
- [3] I. BOLDEA, I.Syed A. Linear electric actuators and generators. Digitally printed first pbk. version. Cambridge: Cambridge University Press, 2005. ISBN 978-052-1020-329.
- [4] Piezoelectric ceramics: principles and applications. 2nd ed. Mackeyville, PA: APC International. ISBN 978-061-5565-033.
- [5] SHIGLEY, J. E, MISCHKE, Ch. R, BUDYNAS, R. G. KONSTRUOVÁNÍ STROJNÍCH SOUČÁSTÍ. VUTÍUM, 2008. 1300 s. ISBN 978-80-214-2629-0.

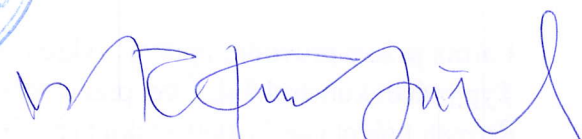
Vedoucí bakalářské práce: Ing. Josef Frýza

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

V Brně, dne 8.11.2013

  
\_\_\_\_\_  
prof. Ing. Martin Hartl, Ph.D.  
Ředitel ústavu



  
\_\_\_\_\_  
prof. RNDr. Miroslav Doupovec, CSc., dr. h. c.  
Děkan

## ABSTRAKT

Bakalářská práce se zabývá návrhem modulu pro buzení vibrací. Modul bude doplňkem laboratorního zařízení, optického tribometru. Tribometr simuluje styk dvou těles (ocelové kuličky a skleněného disku) za přítomnosti maziva a zkoumá velmi tenké mazací filmy mezi těmito tělesy. Nová verze optického tribometru tak umožní výzkum mazacího filmu za podmínek blízkých reálným kontaktům. Navržený mechanismus využívá excentr pro buzení vibrací ve směru osy rotace kuličky. Změna amplitudy je umožněna snadnou výměnou excentrického dílu mechanismu.

## KLÍČOVÁ SLOVA

Modul laboratorního zařízení, buzení vibrací, mechanismus excentru, tribologie.

## ABSTRACT

The bachelor thesis deals with the design of module for excitation of vibration. The module is a part of optical tribometer, a laboratory device. The tribometer simulates an interaction of two objects (steel ball and glass disc) in the presence of a lubricant. Very thin lubricating films between the objects are examined. The new version of the tribometer enables research of lubricating film in conditions close to real contacts. The designed module uses an eccentric mechanism for excitation of vibration in a direction of the axis ball rotation. Set up of amplitude is enabled by changing eccentric part of the mechanism.

## KEY WORDS

Module of laboratory device, excitation of vibration, eccentric mechanism, tribology.

## BIBLIOGRAFICKÁ CITACE

ČÍPEK, Pavel. *Konstrukce zařízení pro buzení vibrací*. Brno: Vysoké učení technické v Brně, Fakulta strojního inženýrství, 2014. 50 s. Vedoucí bakalářské práce Ing. Josef Frýza.

---



**ČESTNÉ PROHLÁŠENÍ**

Prohlašuji, že jsem tuto diplomovou práci vypracoval samostatně pod odborným vedením Ing. Josefa Frýzy s využitím informací a zdrojů, které cituji v seznamu použité literatury.

V Brně dne .....

.....  
Podpis



**PODĚKOVÁNÍ**

Tímto chci poděkovat vedoucímu práce, Ing. Josefu Frýzovi, za jeho vedení, odborné rady, postřehy a připomínky.

---

**OBSAH****OBSAH**

|                                                              |           |
|--------------------------------------------------------------|-----------|
| <b>ÚVOD.....</b>                                             | <b>11</b> |
| <b>1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ.....</b>               | <b>12</b> |
| 1.1 Tribologie.....                                          | 12        |
| 1.1.1 Profily stýkajících se povrchů.....                    | 12        |
| 1.1.2 Tření a mazání pohybujících se těles.....              | 13        |
| 1.2 Vibrace a jejich princip.....                            | 16        |
| 1.3 Mechanické kmitání.....                                  | 17        |
| 1.4 Zařízení pro buzení vibrací.....                         | 18        |
| 1.4.1 Pneumatické vibrátory.....                             | 18        |
| 1.4.2 Mechanické buzení vibrací.....                         | 21        |
| 1.4.3 Elektrodynamické buzení vibrací.....                   | 22        |
| 1.4.4 Hydraulické buzení vibrací.....                        | 23        |
| 1.4.5 Piezoelektrické buzení vibrací.....                    | 24        |
| <b>2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE.....</b>                   | <b>27</b> |
| 2.1 Tribometr.....                                           | 27        |
| 2.1.1 Konstrukce tribometru.....                             | 27        |
| 2.1.2 Dílčí cíle.....                                        | 29        |
| <b>3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ.....</b>                     | <b>30</b> |
| 3.1 Pohony.....                                              | 30        |
| 3.1.1 Pohon piezoelektrickým aktuátorem.....                 | 30        |
| 3.1.2 Pohon elektromagnetem.....                             | 30        |
| 3.1.3 Pohon excentrem.....                                   | 31        |
| 3.2 Upevnění kuličky na hřídel.....                          | 32        |
| 3.2.1 Upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky.....         | 32        |
| 3.2.2 Upevnění kuličky šroubem.....                          | 33        |
| 3.2.3 Upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky šroubem..... | 33        |
| 3.3 Přenos kmitavého pohybu na hřídel kuličky.....           | 34        |
| 3.3.1 Přenos kmitání pomocí ložiska.....                     | 34        |
| 3.3.2 Přenos kmitání pomocí odvalujícího se válečku.....     | 35        |
| <b>4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ.....</b>                    | <b>36</b> |
| 4.1 Pohon.....                                               | 38        |
| 4.2 Přenos kmitavého pohybu na hřídel kuličky.....           | 39        |
| 4.3 Upevnění kuličky na hřídel.....                          | 40        |
| 4.4 Výpočet tloušťky vratného plechu.....                    | 41        |
| <b>5 DISKUZE.....</b>                                        | <b>43</b> |
| <b>6 ZÁVĚR.....</b>                                          | <b>44</b> |
| <b>7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ.....</b>                        | <b>45</b> |
| <b>8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN.....</b>    | <b>47</b> |
| <b>9 SEZNAM OBRÁZKŮ.....</b>                                 | <b>48</b> |
| <b>10 SEZNAM TABULEK.....</b>                                | <b>49</b> |
| <b>11 SEZNAM PŘÍLOH.....</b>                                 | <b>50</b> |

---

## ÚVOD

Tribologie je věda zabývající se procesem styku dvou těles. Každý takový kontakt je doprovázen přídatnými odpory, které se nazývají tření. Tření je spojeno s opotřebením stýkajících se povrchů, vznikem tepla, a tudíž přeměnou mechanické energie v teplo. V praxi se tření zamezuje mazáním třecích povrchů, které tření značně zmenšuje. Úkolem maziva je vytvořit mezi povrchy mazací film zabraňující bezprostřední styk obou povrchů. Poznávání těchto třecích procesů má obrovský význam pro správný chod mechanických soustav [5]. Pro poznávání procesů probíhajících mezi kontaktními povrchy se provádí měření. Tato měření zkoumají tloušťku mazacího filmu mezi povrchy, teplotu maziva, viskozitu apod. Jedna z možných variant, jak je možné provádět tato měření, je pomocí tribometru, přesněji optického tribometru. Optický tribometr sestavený na ÚK VUT FSI v Brně umožňuje provádět měření velmi malých tlouštěk mazacích filmů mezi skleněným diskem a rotující kuličkou [25]. Toto zařízení umožňuje nasimulovat kontakty ve strojních uzlech. Ve strojních uzlech všech strojů obecně se ale vyskytují vibrace a chvění. Vibrace je ve většině případů nežádoucí jev, který negativně ovlivňuje životnost součástí. Při simulaci podmínek na optickém tribometru je tedy simulace zkreslená tím, že měření zanedbává možné chvění či vibrace. Proto je třeba navrhnout a zkonstruovat modul, který zahrne styk ocelové kuličky se skleněným diskem za přítomnosti vibrací. Takto inovované zařízení bude mít velký potenciál při výzkumu mazacích filmů. Při vhodné volbě maziva je možné omezit tření a tím zabránit zbytečně velkému opotřebením stýkajících se povrchů a ušetřit náklady za pohonné energie, které se v třecím procesu přeměňují v teplo. Inovované zařízení umožní simulaci podmínek velmi blízkých reálným podmínkám mezi mazanými styčnými povrchy, a tím posun v jejich výzkumu a vývoji vhodných mazacích prostředků, vhodné volbě materiálů nebo jejich povrchových úprav tak, aby ztráty způsobené třením mezi stýkajícími se povrchy byly co nejmenší.

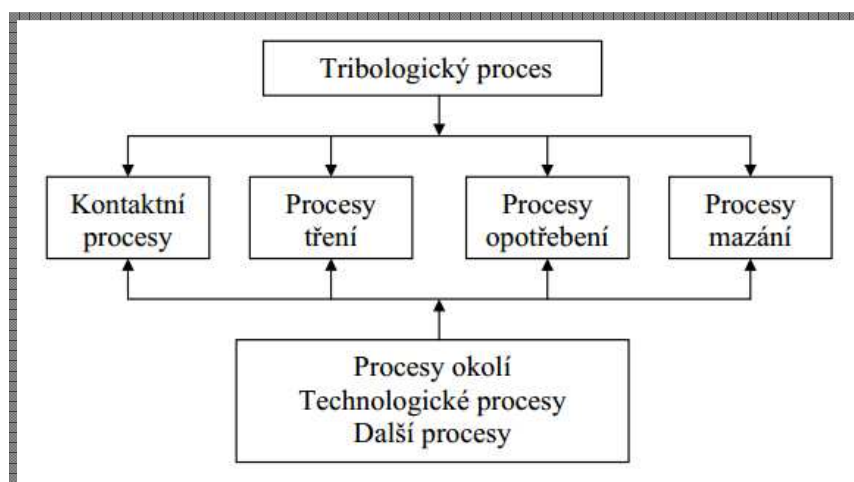
## 1 PŘEHLED SOUČASNÉHO STAVU POZNÁNÍ

### 1.1 Tribologie

Tribologie je vědní obor, který zkoumá chování dotýkajících se těles zpravidla při jejich vzájemném pohybu a za přítomnosti třetího tělesa (maziva) mezi povrchy těles [1]. Součástí tribologie je nauka o tření, mazání a opotřebení. Vzájemný pohyb můžeme obecně rozdělit do 4 skupin [2]:

- Pohyb kluzný
- Pohyb valivý
- Pohyb nárazový
- Pohyb kmitavý

Charakteristikou tribologického procesu jsou zejména interakce mezi třecími materiály, které se pohybují.

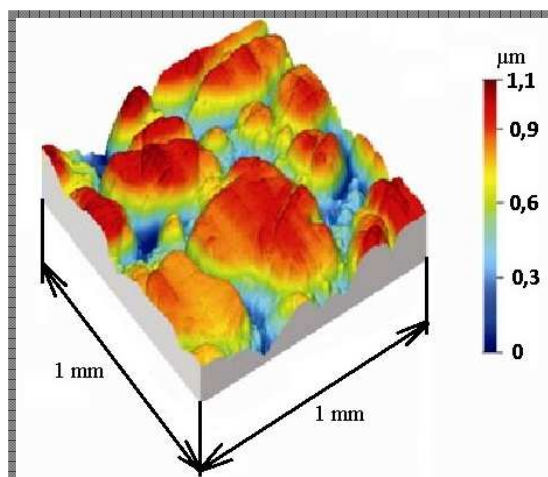


Obr. 1-1 Znárodnění tribologického procesu [1]

V úvahu musí být vzaty tvarové a rozměrové parametry, materiálové vlastnosti, ale i chemické složení stýkajících se materiálů [3].

#### 1.1.1 Profily stýkajících se povrchů

Plochy, které se stýkají, nejsou nikdy dokonale hladké a nemají dokonalý geometrický tvar. V důsledku těchto nerovnoměrností povrchů, které zprostředkovávají pohyb, se styk dvou ploch neodehrává na celé ploše, nýbrž pouze na výčnělcích povrchů [1]. Styková plocha je ve skutečnosti velice malá a tlaky působící mezi tělesy mohou dosahovat řádu GPa. Z důvodu malých ploch stačí pouze malé zatížení a vyvoláme v materiálu místní deformace povrchu [2].



Obr. 1-2 Znázornění nerovnosti povrchu [28]

### 1.1.2 Tření a mazání pohybujících se těles

1.1.2

Tření je proces vznikající při vzájemném pohybu dvou dotýkajících se těles. Je to odpor proti relativnímu pohybu dvou těles, který se uskutečňuje na přiléhajících plochách. Při tření vznikají ztráty energie v podobě přeměny energie na tepelnou energii, která se přenáší do případného maziva a vzájemně se pohybujících těles [1]. Úkolem mazání je snížit tření, opotřebení a ztráty energie, které se mohou projevovat zahříváním těles [4].

V tribologii můžeme režimy mazání (tření) rozdělit do 5 skupin:

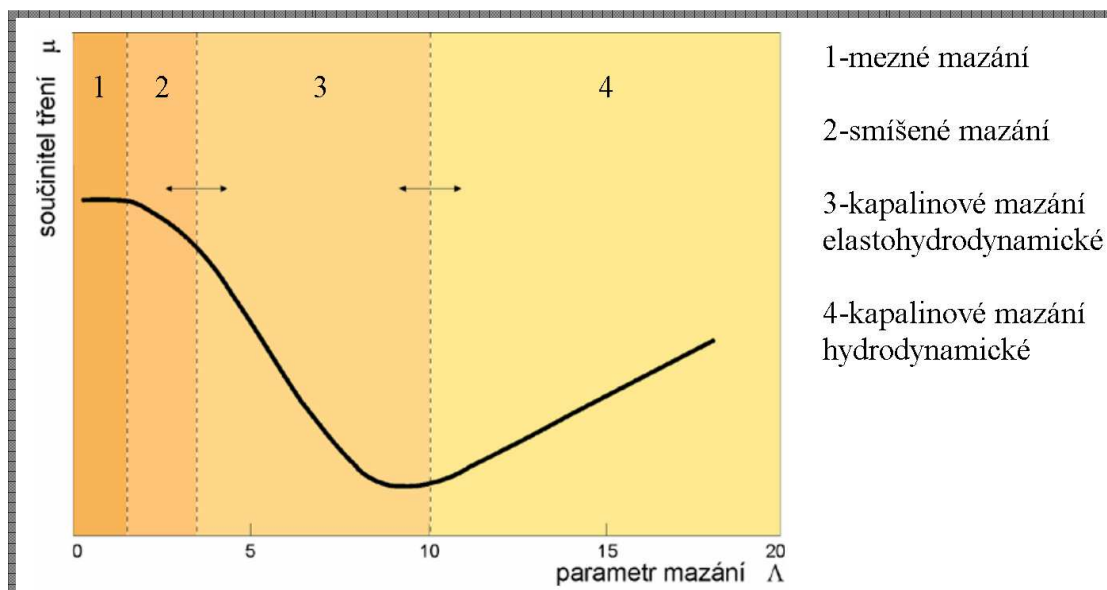
- Suché tření
- Mezní mazání
- Smíšené mazání
- Kapalinové mazání

O tom, jaké tření nastane při daných podmínkách, rozhoduje parametr mazání. Vyjadřuje závislost mezi tloušťkou mazacího filmu a drsností povrchu.

$$\Lambda = \frac{h_{min}}{R_{red}} = \frac{h_{min}}{\sqrt{R_{q1}^2 + R_{q2}^2}} \quad (1)$$

kde:

|           |               |                                                  |
|-----------|---------------|--------------------------------------------------|
| $\Lambda$ | -             | je parametr mazání                               |
| $h_{min}$ | $\mu\text{m}$ | minimální tloušťka mazacího filmu                |
| $R_{red}$ | $\mu\text{m}$ | redukovaná drsnost třecích povrchů               |
| $R_q$     | $\mu\text{m}$ | střední kvadratické drsnosti třecích povrchů [5] |



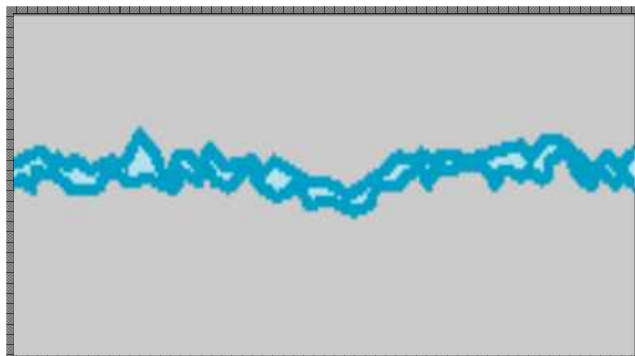
Obr. 1-3 Závislost parametru mazání a součinitele tření [5]

### Suché tření

Suché tření vzniká při vzájemném pohybu dvou těles bez přítomnosti maziva. Na problematiku suchého tření mohou být dva pohledy. Je možno suché tření brát jakožto deformační problematiku, nebo jako adhezní problematiku. Při deformačním pohledu na věc se více uplatňuje mechanika, při adhezním pohledu chemie [1]. V obou případech na proces tření působí teplota, vlastnosti materiálu, chemické složení, chemická reaktivita, apod. V praxi je snaha zamezit suchému tření. Vzniká velké opotřebení ploch a uvolňuje se velké množství tepla z důvodu velkých třecích ztrát [2], [4]. Při suchém tření existuje riziko (v závislosti na provozních podmínkách) vzniku adhezních spojů stýkajících se nerovností kontaktních ploch a tím zamezení jejich vzájemnému pohybu, tzv. zadření.

### Mezné mazání

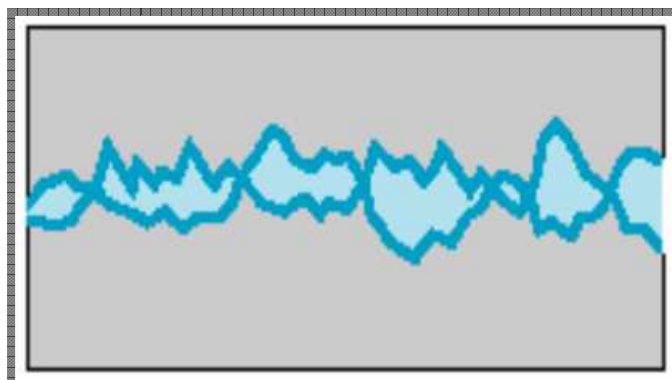
Mezné mazání nastává tehdy, když je mezi povrchy tenká vrstva kapaliny nebo plynu [5]. K meznému mazání může dojít i u mazaných povrchů, pokud není vrstva maziva dostatečně tlustá, nebo není dostačující přívod maziva. V tomto případě se k sobě povrchy přiblíží natolik, že mezi nimi je jen mezní vrstva maziva. V praxi mezné mazání vzniká v situacích, kdy jsou malé drsné povrchy zatěžovány velkými tlaky, nebo při malých smykových rychlostech [2]. Mezné mazání je založeno na chemické nebo fyzikální absorpci kapalin či plynů. Pro hodnocení mazacího filmu mezi povrchy je důležitá rychlost absorpce, pevnost molekul na povrchu, jejich koncentrace, vliv teploty, tlaku a vlastností stýkajících se materiálů. Mezné mazání má výrazně menší velikost třecích sil oproti suchému tření.



Obr. 1-4 Plochy, mezi nimiž probíhá mezní mazání [5]

### Smíšené mazání

Smíšené mazání je přechodné stádium mezi mazáním mezním a kapalinovým [4]. Tloušťka mazacího filmu v tomto případě není ještě dostatečně velká natolik, aby došlo k oddělení stýkajících se ploch mazacím filmem. Drsný povrch ploch, respektive jeho výčnělky, jsou vyšší než tloušťka mazacího filmu. Tedy styk se odehrává na výčnělcích drsného povrchu. Tento stav mazání významně ovlivňuje velikost zatížení, vzájemná rychlost ploch a viskozita mazacího prostředku [1]. Nemalou roli hraje i teplota maziva, která může způsobit porušení mazacího filmu.

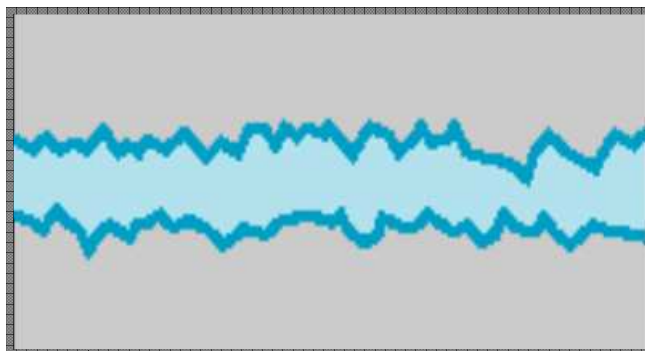


Obr. 1-5 Plochy, mezi nimiž probíhá smíšené mazání [5]

### Kapalinové mazání

Kapalinové mazání umožňuje dokonalé oddělení dvou po sobě se pohybujících ploch [1]. Mezi plochami se vytváří souvislý mazací film vyšší než nerovnosti obou povrchů. Tlakem v mazacím filmu se docílí vyrušení tlaků působících na mazané plochy [4]. Za běžných provozních podmínek velikosti třecích sil závisí převážně na vlastnostech maziva, tedy na velikosti vnitřních třecích sil (viskozitě maziva). Tento způsob mazání je z pohledu opotřebení nejefektivnější. Do kapalinového mazání se řadí hydrodynamické mazání a elastohydrodynamické mazání. Při hydrodynamickém mazání jsou dotýkající se povrchy odděleny poměrně tlustou mazací vrstvou a nedochází k jejich vzájemnému styku. Je třeba, aby byla zajištěna dostatečná dodávka maziva [4]. Při hydrodynamickém mazání nedochází k deformaci třecích povrchů a maximální tlaky v kontaktu se pohybují kolem 5 MPa [5]. Elastohydrodynamické mazání je režim, při kterém je mazivo vtahováno do mezery mezi třecí povrchy, např. mazání ozubených kol nebo valivých ložisek [4]. Dochází k deformaci třecích povrchů, a to řádově ve velikosti tloušťky

mazacího filmu. Maximální tlak v kontaktu se pohybuje v hodnotách  $0,5 \div 5$  GPa, tj. až 1000x větší tlak než u hydrodynamického mazání [5].

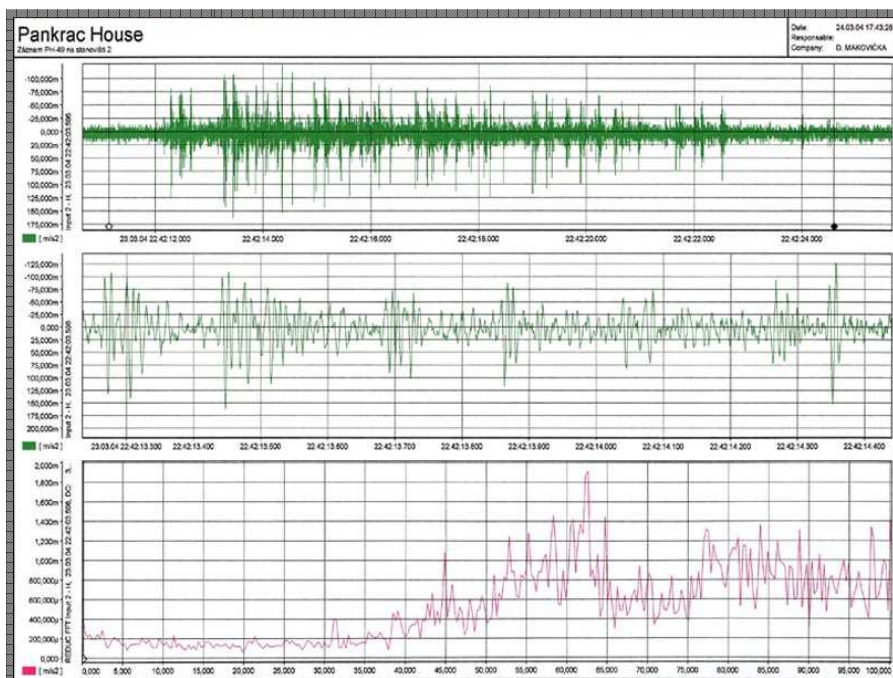


Obr. 1-6 Plochy, mezi nimiž probíhá kapalinové mazání [5]

## 1.2 Vibrace a jejich princip

1.2

Vibrace jsou mechanická kmitání. Vznikají kmitáním pružného tělesa, jehož jednotlivé body se snaží vrátit do rovnovážné polohy [6]. Dělíme je do dvou kategorií – na vibrace volné a nucené [7]. Vibrace vznikají téměř ve všech strojích. Většinou jsou nežádoucím jevem, ale jsou i případy, kdy jsou vibrace nepostradatelné pro správný chod zařízení nebo stroje. U hudebních nástrojů jsou vibrace nezbytné pro jejich činnost. Při potlačování vibrací se setkáváme s problémem, že je nelze odstranit úplně. Vznikají při pohybu nebo rotaci součástí, například při pohybu se třením, rotaci nevyvážené hřídele, záběru ozubených kol apod.



Obr. 1-7 Záznam o měření vibrací od metra v Praze [29]

### 1.3 Mechanické kmitání

1.3

---

Mechanické kmitání je zvláštní případ obecného mechanického pohybu hmotného bodu. V tomto případě se body kmitajícího tělesa pohybují jen v omezené oblasti okolo rovnovážné polohy. V této rovnovážné poloze na těleso nepůsobí žádná výsledná síla. Pokud se kmity pravidelně opakují, pak se jedná o periodické nebo harmonické kmitání. Bod konající tento pohyb se nazývá oscilátor. Veličiny charakterizující kmitavý pohyb jsou poloha, rychlost a zrychlení. V rovnovážné poloze je výchylka  $x = 0$ , v poloze nejvzdálenější od rovnovážné polohy je výchylka  $x$  maximální a nazýváme ji amplituda  $A$ . Když se těleso konající kmitavý pohyb vrátí po vykonání jednoho kmitu znovu do stejné polohy, uplynulou dobu tohoto jednoho kmitu nazýváme perioda a značíme ji  $T$ . Převrácenou hodnotou od periody získáme frekvenci, neboli kmitočet. Označujeme ji  $f$ . Frekvence tedy udává počet kmitů za sekundu. Její základní jednotkou je hertz označovaný  $Hz$ .

$$f = \frac{1}{T} [Hz] \quad (2)$$

kde:

|     |    |              |
|-----|----|--------------|
| $f$ | Hz | je frekvence |
| $T$ | s  | perioda      |

Další důležitou veličinou zaváděnou při periodických pohybech je úhlová frekvence. Úhlová frekvence je  $2\pi$  násobek frekvence.

$$\omega = 2\pi f = \frac{2\pi}{T} \left[ \frac{rad}{s} \right] \quad (3)$$

kde:

|     |    |              |
|-----|----|--------------|
| $f$ | Hz | je frekvence |
| $T$ | s  | perioda      |

V neposlední řadě je důležitou veličinou fáze  $\varphi$ , která určuje, v jaké poloze se kmitající bod právě nachází.

$$\varphi(t) = \omega t + \varphi_0 [rad] \quad (4)$$

kde:

|             |   |                                 |
|-------------|---|---------------------------------|
| $t$         | s | je doba trvání kmitavého pohybu |
| $\varphi_0$ | ° | počáteční fáze v čase $t = 0$   |

Pohyb vzniká vždy díky působící síle. Pokud na těleso působí jen direktní (elastická) síla, vzniká volné (netlumené) kmitání. U volného kmitání se amplituda s časem nemění, je konstantní. V případě, že na těleso působí kromě direktní síly ještě síla tlumící, pak se jedná o tlumené kmitání, kde amplituda s časem klesá. Další možností je, že na oscilátor působí nejen direktní a tlumící síla, ale i vnější budící síla. V tomto případě vzniká vynucené kmitání, jehož frekvence se v krátkém intervalu přizpůsobuje frekvenci budící síly [7].

### 1.4 Zařízení pro buzení vibrací

Způsobů jak budit vibrace je poměrně mnoho. V první řadě se dají dělit podle principu, na kterém fungují [8]:

- Pneumatické vibrátory
- Elektrické vibrátory
- Hydraulické vibrátory
- Mechanické vibrátory
- Piezoelektrické vibrátory

V druhé řadě můžeme vibrační zařízení dělit podle výstupních parametrů, zejména podle druhu signálu, který produkují:

- Sinusový (oscilátory)
- Náhodný (generátory náhodného šumu)
- Přechodný (zařízení generuje údery (pulzy) pomocí kladívka)
- Periodický (zařízení generuje určitý frekvenční obsah)

#### 1.4.1 Pneumatické vibrátory

Pneumatická vibrační zařízení se většinou používají k uvolňování a k přepravě sypkých materiálů z násypků různých tvarů nebo také jako zdroj vibrační energie [9]. Jsou to převážně bezúdržbová zařízení a mají možnost regulace výchylky vstupním tlakem [14].

##### Pneumatické pístové vibrátory

Lineární pístové pneumatické vibrátory jsou vhodné pro zhutňování, oddělování a dopravu velkých množství tuhých materiálů. S těmito zařízeními bylo dosaženo dobrých výsledků při vyprazdňování nádob apod. Vibrace těchto pístových vibrátorů vznikají pohybem pístu. Mají široký rozsah frekvencí chvění pomocí změny tlaku vzduchu. Upevněním závaží na píst můžeme regulovat amplitudu ve velkém rozsahu. Frekvence se pohybuje od 28 Hz do 60 Hz a síla od 10 N do 2150 N [9], [10].



Obr. 1-8 Pneumatické pístové vibrátory [10]

### **Pneumatické válečkové vibrátory**

Válečkové pístové vibrátory jsou charakteristické limitací nebo snížením třecích sil např. u dopravníků s korýtkovým pásem za provozu. Používají se pro zhutňování, oklepávání apod. Tyto vibrátory nejsou citlivé na vlastní rezonanční frekvenci. Frekvence se ohybuje od 110 Hz do 490 Hz a síla od 1800 N do 7800 N [9], [11].



Obr. 1-9 Pneumatické válečkové vibrátory [11]

### **Pneumatické turbínové vibrátory**

Tato technologie buzení vibrací využívá kombinaci vysokých frekvencí s velkými odstředivými silami. Turbínové pneumatické vibrátory se nemusejí mazat, ale potřebují filtrovaný přísun stlačeného vzduchu. Používají se pro vibrační stoly nebo jako pohon u dopravních skluzavek. Frekvence se pohybují od 140 Hz do 700 Hz a síla od 1100 N do 7500 N [9], [12], [16].



Obr. 1-10 Pneumatický turbínový vibrátor [12]

### **Pneumatické kuličkové vibrátory**

Vibrace vznikají rotující kuličkou, která je poháněna proudem stlačeného vzduchu. Frekvence lze regulovat vstupním tlakem. Výhodou je, že není vyžadována žádná údržba. Používají se v oblasti dopravy prášků pro podporu pohybu na nakloněných rovinách. Rozsah frekvencí od 160 Hz do 580 Hz a síla o rozsahu od 130 N do 4100 N [8], [9], [13].



Obr. 1-11 Pneumatický kuličkový vibrátor [13]

### **Pneumatické úderové vibrátory**

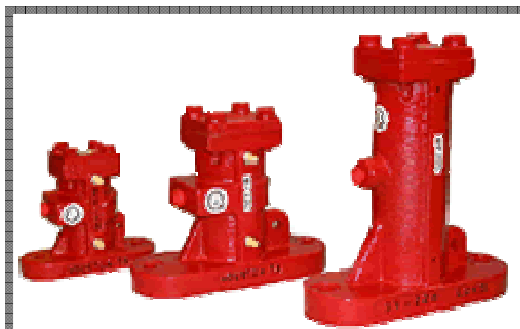
Úderové pneumatické vibrátory vytvářejí velkou nárazovou sílu s menší frekvencí. Jsou vhodné pro střešení a rozbíjení hrud u násypek a pro usnadnění potrubní dopravy. Nemají třeba mazání. Frekvence se pohybuje od 20 Hz do 75 Hz a síla od 290 N do 32 500 N [9], [15].



Obr. 1-12 Pneumatické úderové vibrátory [15]

### **Pneumatické lineární vibrátory**

Tento typ vibrátorů vytváří sinusový průběh vibrací. Vibrace vznikají volným vratným pohybem pístu na vzduchovém polštáři. Můžeme libovolně regulovat amplitudu i frekvenci za chodu zařízení. Další výhodou je provoz bez potřeby mazání, nízká hlučnost a malá spotřeba vzduchu. Provozní teploty se pohybují od - 20 °C do 130 °C [9], [16].



Obr. 1-13 Pneumatické lineární vibrátory [16]

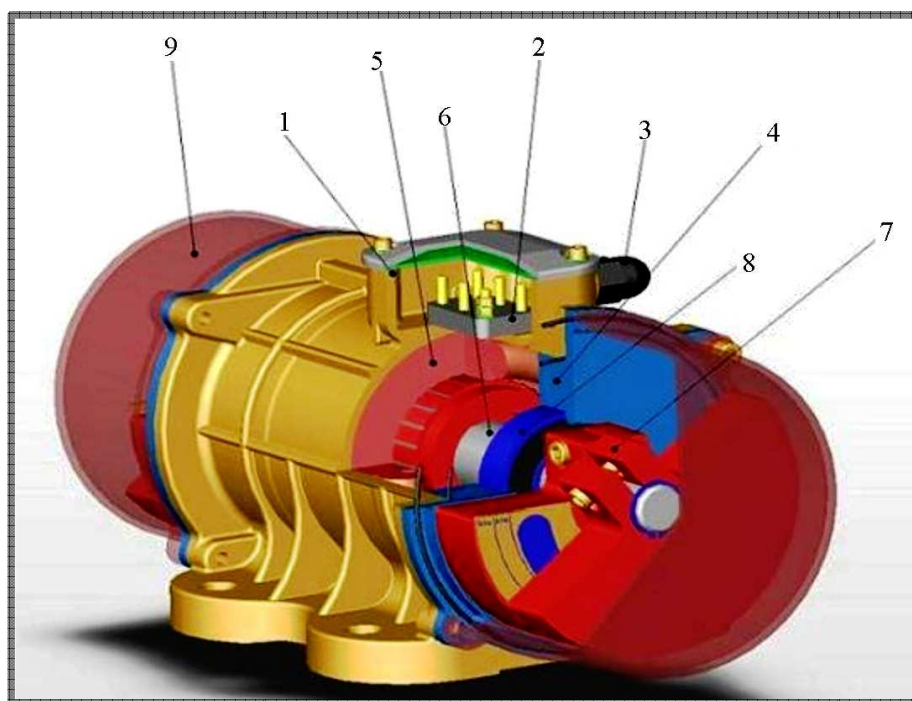
### 1.4.2 Mechanické buzení vibrací

Vibrátory založené na principu buzení vibrací mechanicky se dělí do dvou skupin. Buď můžeme získat vibrace upevněním nevývahy na hřídel motoru, nebo pomocí excentru.

Průmyslové využití mechanických budičů vibrací je velmi obsáhlé. Kromě již zmiňovaného využití v technice přepravy sypaných materiálů se například uplatňují i při diagnostice strojních součástí, kde se sleduje jejich odezva (útlum, vlastní frekvence) na buzení vibrací [8], [9], [10], [14].

#### Buzení vibrací pomocí nevývahy

Tyto vibrátory jsou například určeny pro dopravníky, vibrační stoly, střešení, hutnění, ale i k simulaci strojního prostředí s vibracemi při zkouškách. Základní konstrukce elektrického vibrátoru se skládá z elektromotoru a závaží, jehož rotací vznikají vibrace. Další důležitou částí jsou ložiska, která jsou u standardních vibrátorů kuličková a u vyšších výkonů vysokozátěžové a vysokorychlostní. Vibrátor je popsán na Obr. 1-14. Parametrické rozsahy jsou uvedeny v tabulce 1-1 [9].



Obr. 1-14 Schéma mechanického vibrátoru [9].

Tab. 1-1 Parametry mechanických vibrátorů s nevývahou

| Počet pólů [-] | Počet fází [-] | Otáčky [ $\text{min}^{-1}$ ] | Výkon [kW]  | Úderná síla [N] |
|----------------|----------------|------------------------------|-------------|-----------------|
| 2              | 1              | 3 000 – 3 600                | 0,08 – 0,28 | 660 – 3 230     |
| 2              | 3              | 3 000 – 3 600                | 0,08 – 10   | 660 – 93 750    |
| 4              | 3              | 1 500 – 1 800                | 0,04 – 9,4  | 270 – 106 430   |
| 6              | 3              | 1 000 – 1 200                | 0,12 – 10   | 530 – 132 460   |
| 8              | 3              | 750 – 900                    | 0,23 – 7,5  | 1 050 – 99 520  |

**Buzení vibrací pomocí excentru**

Tento způsob má nevýhodu v tom, že nelze měnit amplitudu za běhu stroje. Jeho konstrukce se podobá klikové hřídeli jen s tím rozdílem, že místo kliky je na klikové hřídeli umístěn excentr, který budí vibrace [8]. Jen postupným natáčením tohoto excentru můžeme řídit amplitudu. Tuto technologii využívají například vibrační desky pro udusávání zeminy či asfaltu. Kromě elektromotorů se jako pohonu excentru využívají i spalovací motory [18].



Obr. 1-15 Vibrační deska HP-C80T Honda GX160 [18]

**1.4.3 Elektrodynamické buzení vibrací**

1.4.3

Elektrodynamická vibrační zařízení slouží většinou k simulaci dopravních prostředí pro zkoušky, mechanických otřesů apod. Měří se základní dynamické veličiny, jako je síla, rychlost a zrychlení. Tento vibrační systém umí simulovat širokou škálu podmínek a jejich výzkumem můžeme zlepšit kvalitu mnoha výrobků. Můžeme přesně nastavit reálné podmínky vibrujícího prostředí, například v automobilech, letadlech apod. Celé zařízení se skládá ze tří částí, a to ze šejkru, zesilovače a řídicí skříně. Zařízení obsahuje otočnou cívku s pružinami umístěnou v magnetickém poli. Pohyb, a tedy i vibrace, vznikají působícími silami magnetického pole na vodiče cívky. Pokud se cívka začne pohybovat a je připojena na konstrukci zařízení, zařízení začne vibrovat. Řídicí skříně lze regulovat frekvenci a amplitudu nezávisle na sobě [8], [19].



Obr. 1-16 Vibrační zařízení pro měření v dynamických podmínkách od firmy DynamicSolution [19]

#### 1.4.4 Hydraulické buzení vibrací

1.4.4

Zdrojem energie u hydraulických vibračních zařízení je tlaková síla v kapalinách. Jako kapalina se většinou používá olej. Stroj se skládá z několika základních částí, a to zdroj tlaku, napáječ, který připojuje motor k hydraulickému rozvodu, hydromotor, který ovládá servoventily a akumulátor tlakové energie, který pokrývá špičkové odběry tlaku. Výhodou hydraulických budičů vibrací je, že i při malých rozměrech můžeme vyvodit velké síly, můžeme vyvodit statické zatížení, ale i libovolné budící signály, jak harmonické, jednorázové, náhodné, tak i reálné. Velkou výhodou je možnost velkých zdvihů, rychlostí a možnost jak rotačních, tak i přímočarých provedení. Nevýhodou může být nutnost zdroje tlakové energie, neekologický dopad na znečištění, obtížná manipulace i montáž, potřeba velkých tlaků a vysoká cena. Hydraulické vibrátory se tedy využívají například při bourání betonu, při udusávání zeminy či jiných materiálů, při usnadňování průchodu zeminy potrubím nebo dopravníkem a má široké využití u stavební techniky [8], [12], [14].



Obr. 1-17 Hydraulický vibrátor typu HF - 800 [12]



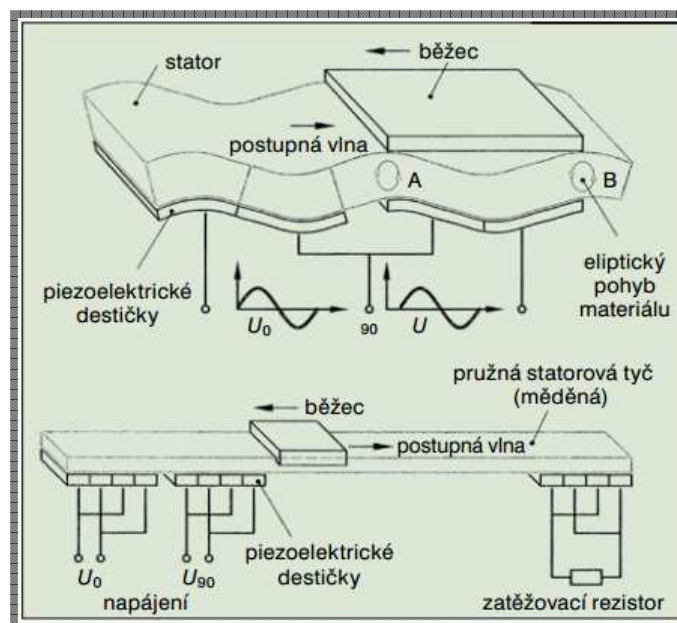
**Obr. 1-18** Hydraulické kladivo FINE 6BL, provozní tlak 90 – 130 bar, frekvence 7,5 – 15Hz, energie úderu 850 J, hmotnost 350 kg [20]

#### 1.4.5 Piezoelektrické buzení vibrací

1.4.5

---

Piezoelektrické motory mají řadu výhodných vlastností pro malé konstrukce. Přes své malé rozměry dokáží vyvinout síly v desítkách kN. Jsou vhodné pro pohon menších robotických zařízení či polohování laboratorních stolů, které vyžadují přesnou regulaci. Princip samotného piezoelektrického jevu spočívá v tom, že v nesymetrických krystalech křemíku nastává deformace, která vyvolá uvnitř elektrickou polarizaci. Tento jev je vratný, tudíž při přivedení napětí vzniknou uvnitř krystalu deformace. Pokud vhodně zkombinujeme vlastní kmity a přívod elektrické energie, vznikne stojaté vlnění. Pokud se jedná o lineární variantu piezoelektrického motoru, pohyblivou částí motoru je běžec, který se posouvá po statorové tyči. Stator se skládá z měděného pásu, k němuž jsou připevněny piezoelektrické destičky. V krystalech probíhá přeměna elektrické energie na mechanickou. Ve statorové tyči vzniknou deformace, poté kmity a postupná vlna, která se šíří po tyči. V důsledku vlny a tření se pohybuje běžec po statorové tyči. Piezoelektrické destičky jsou buzeny ultrazvukovým zdrojem o frekvenci  $f = 30 - 50$  kHz. Z tohoto důvodu jsou někdy tyto motory nazývány ultrazvukové. Pro regulaci piezoelektrických motorů se používá fuzzy logika. Vyjadřuje vlastnosti objektu hodnotami 0 – 1 [21].



Obr. 1-19 Schéma lineárního piezomotoru ve dvoufázové úpravě [21]

V minulosti se tato metoda příliš nepoužívala, ale v současnosti už je poměrně rozšířená. Výrobky se většinou dodávají ze zahraničí. V praxi se vyrábějí 2 základní typy piezoelektrických motorů. Existují piezoelektrické motory komínkové a proužkové. Motory komínkové mívají menší zdvih a velkou sílu. Dělí se do dvou základních kategorií, a to na diskrétní a co-firedové. Motory proužkové mají velký zdvih a limitovanou sílu. Ostatní modely piezoelektrických motorů na trhu se z těchto dvou základních typů odvíjí. Vyrábějí se lineární motory (často nazývané jako aktuátory), rotační motory, posuvné stoly, motory s přepákováním pro větší zdvih, apod. Zdvih se pohybuje od několika mikrometrů až po několik desítek milimetrů a jejich síla od několika až po stovky newtonů. Komínkové piezoelektrické motory mají sílu mezi 10 N a 30 000 N. Síla závisí na velikosti vysunutí motoru. Při nulovém vysunutí je síla maximální a při maximálním vysunutí je síla téměř nulová. Velikost vysunutí se pohybuje od 10  $\mu\text{m}$  do 200  $\mu\text{m}$ . Řídícím ukazatelem u těchto piezoaktuátorů je tedy jejich tuhost (tj. podíl působící síly a okamžité deformace – vysunutí), která se pohybuje v rozmezí od 0,1 do 100 N/ $\mu\text{m}$  [21], [22], [23].



Obr. 1-20 Piezoelektrické motory komínkové, model P-212 až P-216, zdvih od 15  $\mu\text{m}$  do 180  $\mu\text{m}$ , síla 500 N až 3500 N [23]

Piezoelektrické motory s přepákováním se vyrábějí oproti komínkovým motorům s velkým zdvihem  $80\text{ }\mu\text{m}$  až  $2000\text{ }\mu\text{m}$ . Síla je tudíž menší než u komínkových motorů a pohybuje se od  $50\text{ N}$  do  $1800\text{ N}$ . Tuhost těchto systémů je řádově nižší než u čistě komínkových piezoaktuátorů [24].



**Obr. 1-21** Piezoelektrický motor s přepákováním, model FPA-0500E-P-1036-150-SS-1M. Zdvih od  $500\text{ }\mu\text{m}$  a síla  $360\text{ N}$  [24]

V nabídkách se vyskytují i motory s rotačním pohybem. Jsou složeny ze dvou desek, mezi kterými je umístěný piezoelektrický motor. Mají možnost se natáčet o určitý úhel. Rozsah úhlů se pohybuje od  $5^\circ$  do  $60^\circ$ . Jsou vyráběny s maximální možnou zátěží od  $5\text{ kg}$  do  $1000\text{ kg}$ .

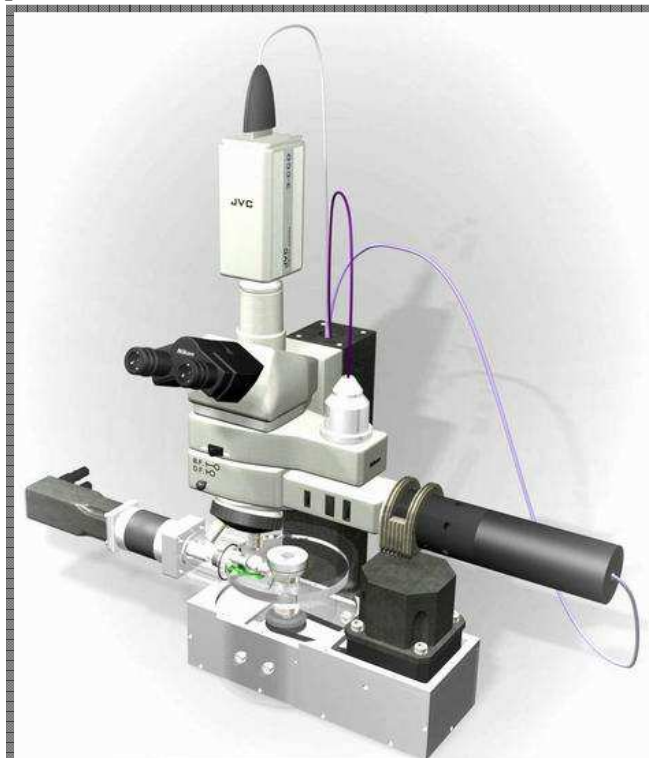


**Obr. 1-22** Piezoelektrický motor s rotačním pohybem, model H-840 6-Axis Hexapod. Možné natočení  $60^\circ$  a maximální zatížení  $30\text{ kg}$  [23]

## 2 ANALÝZA PROBLÉMU A CÍL PRÁCE

### 2.1 Tribometr

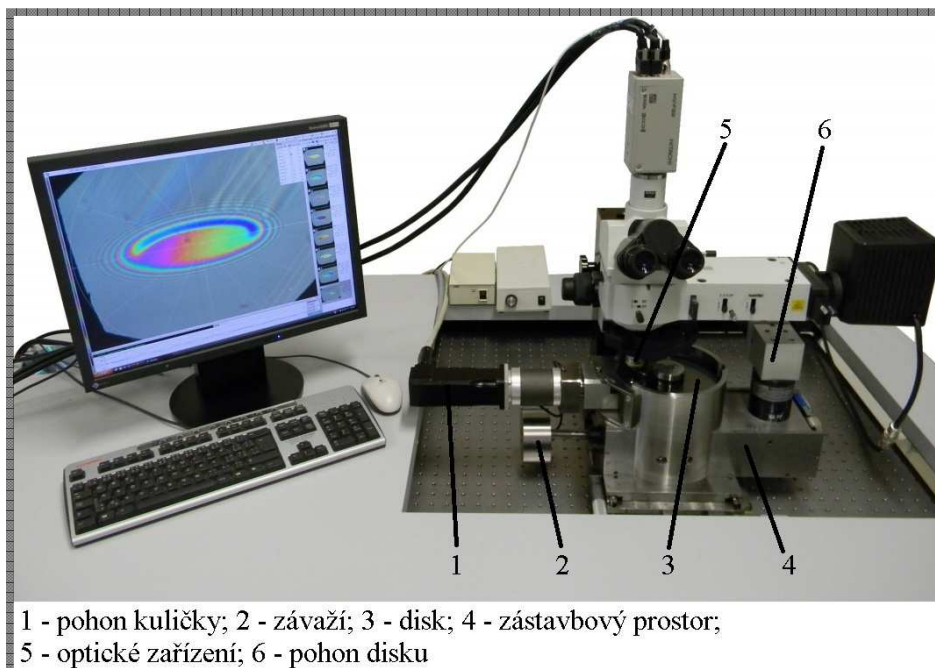
Tribometr je zařízení, na kterém se provádějí tribologické zkoušky. Je to zařízení, které simuluje reálné podmínky vzájemného styku dvou těles. Mohou být simulovány například podmínky pro ložiska, to je styk kuličky nebo válečku s plochou. Při simulaci podmínek je zařízení schopno měřit tloušťku mazacího filmu mezi kuličkou či válečkem s odrazivým povrchem (zpravidla z ložiskové oceli) a transparentním (skleněným či safírovým) diskem při různých tlacích, teplotách a rychlostech [25].



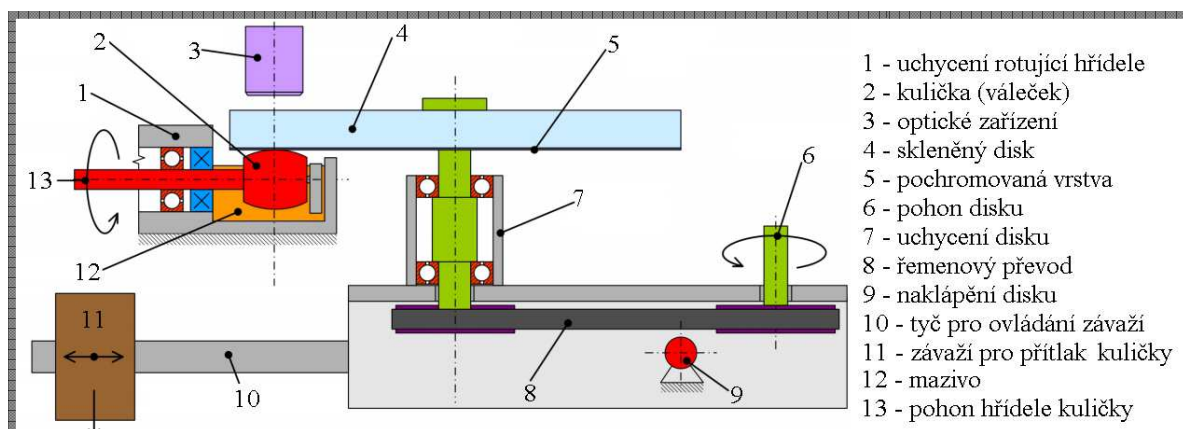
Obr. 2-1 Tribometr pro měření tenkých mazacích filmů na Ústavu konstruování VUT Brno [25]

#### 2.1.1 Konstrukce tribometru

Na Ústavu konstruování je zkonstruován tribometr, jehož konstrukce obsahuje několik nezávislých pohonů. Jeden pohon je pro rotaci kuličky (válečku) a druhý pro rotaci disku. Pohon disku je zkonstruován pomocí řemenového převodu, který je umístěn v zástavbovém prostoru viz Obr. 2-3. Hřídel, na které rotuje disk, se může naklápět a díky tomu lze kuličku na disk přitlačit. Přítlak kuličky je zkonstruován pomocí závaží, které je upevněno na páce k hřídeli disku. Konstrukce dále obsahuje optické zařízení, vysokorychlostní kameru, kterou lze sledovat probíhající kontakt mezi kuličkou a diskem. Kamera je připojena k počítači, kde se ukládají a vyhodnocují snímky [26].



Obr. 2-2 Popis částí tribometru [26]



Obr. 2-3 Popis částí tribometru [26]

V současné době je na Ústavu konstruování zkonstruováno tribologické zařízení (tzv. tribometr, popsáno výše), který v laboratorních podmínkách realizuje kontakt dvou těles a na základě výsledků z měření se snaží objasnit procesy probíhající v reálných kontaktech. V reálných kontaktech strojních součástí jsou ale přítomny vibrace, které mohou tyto procesy zásadně ovlivňovat. Proto je potřebné toto zařízení doplnit o modul pro buzení vibrací. Modul bude obsahovat dva pohony. Jeden stávající pro rotaci kuličky a druhý pro buzení vibrací. Oba pohony budou ovládány nezávisle na sobě.

Cílem práce je konstrukční návrh modulu pro buzení vibrací jako doplňku laboratorního zařízení. Modul má umožnit vratný pohyb zkušební vzorku ve směru osy jeho rotace. Je požadována amplituda pohybu 0,5 mm při frekvenci pohybu alespoň 10 Hz.

### 2.1.2 Dílčí cíle

2.1.2

---

Během experimentů na optickém tribometru dochází k opotřebení kontaktních těles. Proto by bylo vhodné, z pohledu finančních nákladů na prováděná měření, zefektivnit využitelnost plochy povrchů těles možností nastavení poloměru dráhy dotyku kuličky na disku, popř. takovým upevněním kuličky na hřídeli, které by umožnilo změnu její kontaktní dráhy.

Celá konstrukce požadovaného modulu pro realizaci vibračního pohybu má několik jednotlivých cílů, které vedou ke kompletnímu řešení:

- Volba pohonu pro buzení vibrací zkušebního vzorku
- Konstrukce upevnění kuličky na hřídeli
- Konstrukce přenosu vibračního pohybu na rotující hřídel
- Možnost nastavení poloměru dráhy styku kuličky na disku

### 3 NÁVRH KONSTRUKČNÍCH ŘEŠENÍ

Požadavkem výstupního návrhu je konstrukční řešení modulu, který bude budit vibrace kuličky se současným rotačním pohybem. Dalším požadavkem je možnost nastavení poloměru dráhy dotyku kuličky na disku. Z analýzy problému a dostupných prostředků, které by mohly splňovat požadavky, vychází několik reálných jednotlivých dílčích řešení.

#### 3.1 Pohony

Z analýzy možných principů buzení vibrací bylo vybráno několik možností. Hlavním kritériem výběru je velikost možné amplitudy a velikost síly při určitém zdvihu. Je třeba držet rezervu, jak u maximální amplitudy, tak i u zdvihu. Po vyhodnocení těchto kritérií byly vybrány tyto metody budičů:

- Buzení pomocí piezoelektrického aktuátoru
- Buzení pomocí elektromagnetu
- Buzení pomocí vačkového mechanismu.

##### 3.1.1 Pohon piezoelektrickým aktuátorem

U piezoelektrických aktuátorů je hlavním kritériem výběru velikost vyvinuté síly a velikost zdvihu. V tomto konstrukčním řešení pohonu by byl použit piezoelektrický motor komínkový, který umožňuje lineární pohyb. Výhodou tohoto řešení je možnost řízení průběhu vysunutí aktuátoru, velikosti amplitudy a frekvence kmitání. Další výhodou piezoelektrických motorů jsou malé rozměry a z toho plynoucí malé nároky na místo v zástavbovém prostoru. Nevýhodou je cena, která se pohybuje v desítkách tisíc korun. Nejvhodnějším piezoelektrickým aktuátorem by byl P-602.800 od firmy PI. Maximální výsuv je 1 mm, síla až 400 N, možná frekvence je 150 Hz a řídicí napětí je - 20 V až 120 V. Tento produkt má cenu přibližně 80 000 Kč. Pro extrémně vysokou cenu je tato varianta vyřazena.

##### 3.1.2 Pohon elektromagnetem

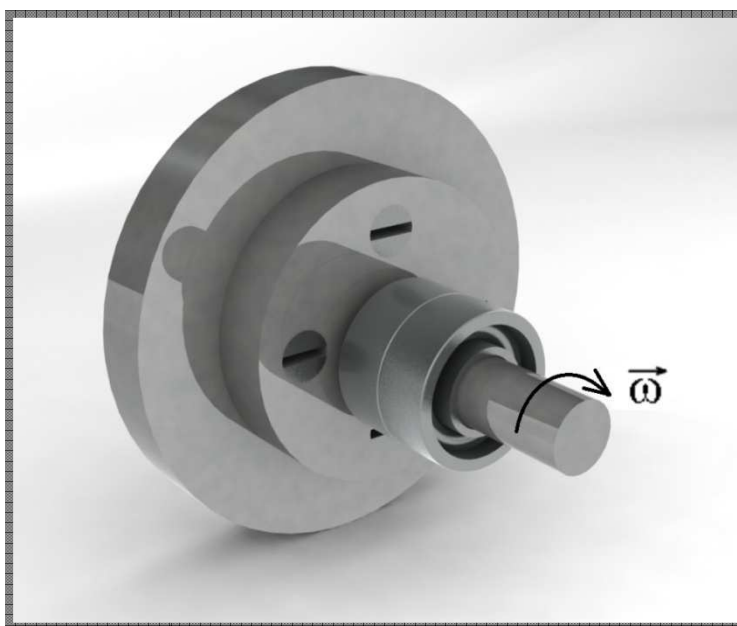
3.1.2

---

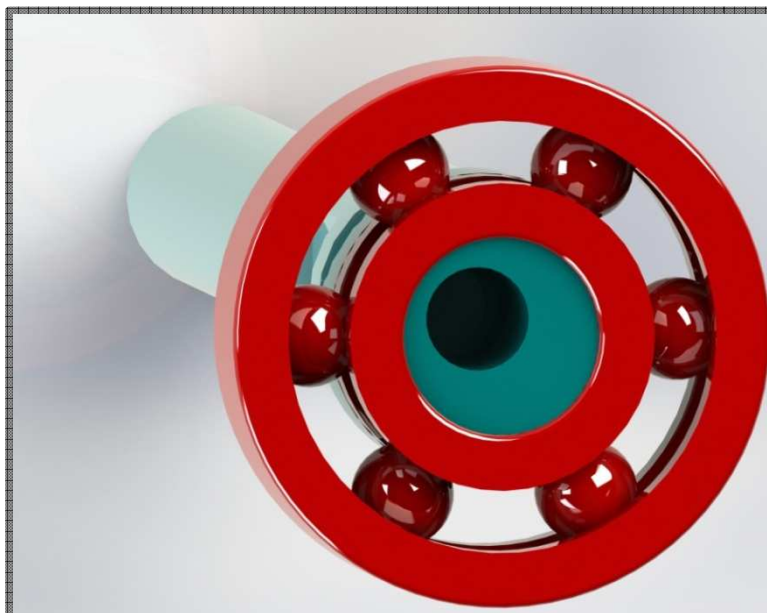
Toto konstrukční řešení pohonu zahrnuje jeden nebo dva elektromagnety. V případě jednoho elektromagnetu by tento byl umístěn jen z jedné strany a vratný pohyb by byl uskutečněn pomocí zpětné pružiny. Při konstrukčním řešení s dvěma elektromagnety by se i vratný pohyb uskutečňoval elektromagnetem. Elektromagnety lze řídit přerušovaným pouštěním napětí, čímž lze docílit přesného nastavení inverzního chodu dvou elektromagnetů, kdy je jeden sepnut a druhý vypnut a opačně. Výhodou elektromagnetů je cena, která se pohybuje řádově ve stovkách nebo tisících korun. Další výhodou je velikost potřebného napětí, které bývá ve většině případů 12 V nebo 24 V. Výhodou tohoto konstrukčního řešení je také přenos kmitavého pohybu na rotující hřídel bez dotyku součástí elektromagnetu a rotující hřídele, což toto řešení značně usnadňuje. Ovládací elektromagnety nejsou stavěny na časté spínání. Frekvence spínání se pohybují maximálně okolo 4 Hz. Nevýhodou je, že při častém spínání elektromagnetů dochází k teplotnímu ovlivnění velikosti požadované amplitudy i rychlosti pohybu (a tím i konečné frekvence). Tudíž je z použitelných návrhů vyřazen.

### 3.1.3 Pohon excentrem

Buzení vibrací pomocí excentru přináší větší náročnost konstrukce na umístění motoru, který bude excentr pohánět. Na zástavbovou desku by byl umístěn motor, hřídel přenášející krouticí moment z motoru na excentr, vedení hřídele a upevnění motoru. Soustava pak bude náročná na rozměry a hmotnost. Z hlediska cenové dostupnosti dílů je toto řešení ale několikanásobně levnější oproti řešení piezoelektrickým motorem. Konstrukce by obsahovala mechanický převod rotačního pohybu z excentru na vibrační pohyb hřídele. Výhodou je nenáročná výroba jednotlivých součástí a tudíž i cenová dostupnost. Řízení frekvence kmitání by bylo uskutečňováno regulací otáček poháněcího motoru excentru. Nevýhodou je, že nelze měnit amplitudu za chodu stroje. Váčkový (excentrický) mechanismus by se skládal ze dvou kotoučů nastavitelných vůči sobě. Amplitudu je pak možno nastavit např. vzájemným pootočením kotoučů na jinou polohu a tím změnit excentricitu viz Obr. 3-1. Alternativou by bylo vyměnit dva kotouče pouze za jeden excentrický, který by byl přitažen k hnací hřídeli jedním šroubem. Výhodou by byla jednodušší rozebiratelnost mechanismu. Velkou nevýhodou je tření a s ním spojené opotřebení mezi kotoučem a unašečem a proto byla vyvinuta ještě jedna varianta, ve které nahradíme kotouč radiálním kuličkovým ložiskem. Ložisko by bylo nasazeno na excentrickém náboji, který udává velikost amplitudy vratného pohybu. Výhodou je to, že odpadá tření mezi kotoučem a unašečem, neboť vnější kroužek ložiska se o unašeč pouze opírá.



Obr. 3-1 Schéma excentrického mechanismu složeného ze dvou kotoučů



Obr. 3-2 Schéma excentrického náboje pro ložisko

### 3.2 Upevnění kuličky na hřídel

3.2

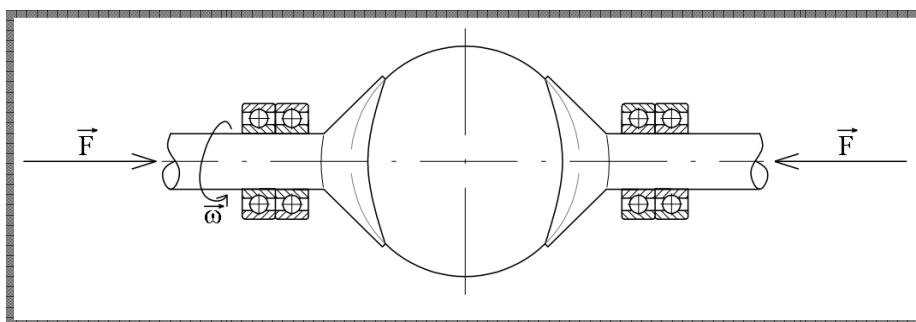
Požadavkem upevnění je přenos krouticího momentu z hřídele na kuličku. U tohoto problému byla stanovena tři řešení:

- Upevnění pomocí dvou kuželových svorek
- Upevnění šroubem
- Upevnění pomocí dvou kuželových svorek a šroubem

#### 3.2.1 Upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky

3.2.1

Uchycení kuličky mezi dvě kuželové svorky využívá současná konstrukce optického tribometru. Tato konstrukce umožňuje její přesné vystředění vzhledem k ose rotace hřídele. Použití dvojice kuželových svorek je výhodné z pohledu efektivního využití celého povrchu kuličky, protože po uvolnění kuličky z kuželových svorek je možné kuličku pootočit na novou kontaktní dráhu. Záporem této alternativy je obtížné konstrukční řešení pro dosažení potřebné přítláčné síly k přenosu krouticího momentu při současném kmitání. Při každém kmitu by byla kulička uvolňována, což by v krajním případě znamenalo ztrátu rotačního pohybu na kuličce. Celá soustava svorek a ložisek musí být upevněna v rámu, se kterým by muselo být kmitáno jako s celkem. Tudíž nevýhodou je velká hmotnost kmitající soustavy.



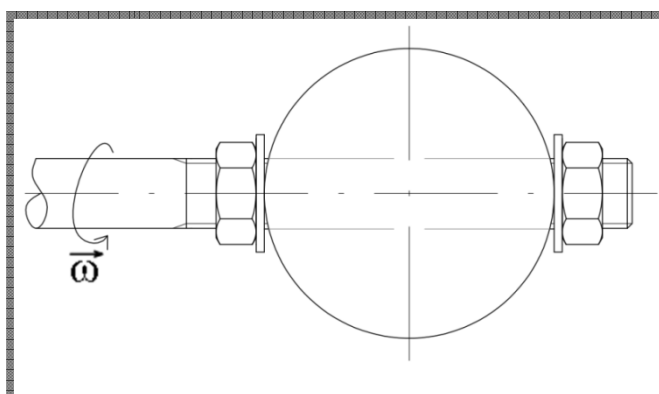
Obr. 3-3 Schéma upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky

Alternativou by bylo kuličku ke svorkám přilepit. Zde se ale vyskytuje nebezpečí jejího uvolnění při působících vibracích a nebezpečí obtížné až nemožné demontáže při použití nevhodného lepidla. Výhodou je opět využitelnost celého povrchu kuličky. Další výhodou je menší hmotnost a nepotřebnost přítláčné síly pro přenos krouticího momentu.

### 3.2.2 Upevnění kuličky šroubem

3.2.2

V ose kuličky by byl vyvrtán otvor a kulička by byla uchycena mezi dvě matice. Problémem tohoto upevnění je, že není možné vyvrtat otvor přesně v ose kuličky. Kulička by byla uchycena excentricky a došlo by k nežádoucímu obvodovému házení, které ve výsledku může negativně ovlivňovat kontaktní podmínky a tím i celé měření. Z důvodu negativních dopadů na měření byla tato varianta zavržena.

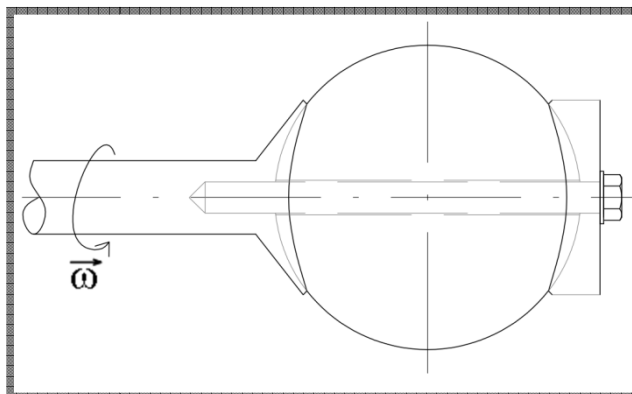


Obr. 3-4 Schéma upevnění kuličky šroubem

### 3.2.3 Upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky šroubem

3.2.3

V kuličce by byl zhotoven otvor o několik desetin milimetru větší než procházející šroub a z obou stran kuličky by byly vloženy podložky, které by měly tvar kuželového otvoru. Ze strany konce hřídele by pak bylo rovné čelo, přes které by byl dotažen šroub. Tímto způsobem by byla potlačena možnost vzniku házení z důvodu excentrického uložení kuličky. Výhodou tohoto uchycení je zaručený stisk kuličky, tedy zaručený přenos krouticího momentu z hřídele na kuličku i při kmitání. Nevýhodou je, že není možno kuličku pootočit a tak využít více drah na jejím povrchu pro kontakt s diskem.



Obr. 3-5 Schéma upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky šroubem

### 3.3 Přenos kmitavého pohybu na hřídel kuličky

3.3

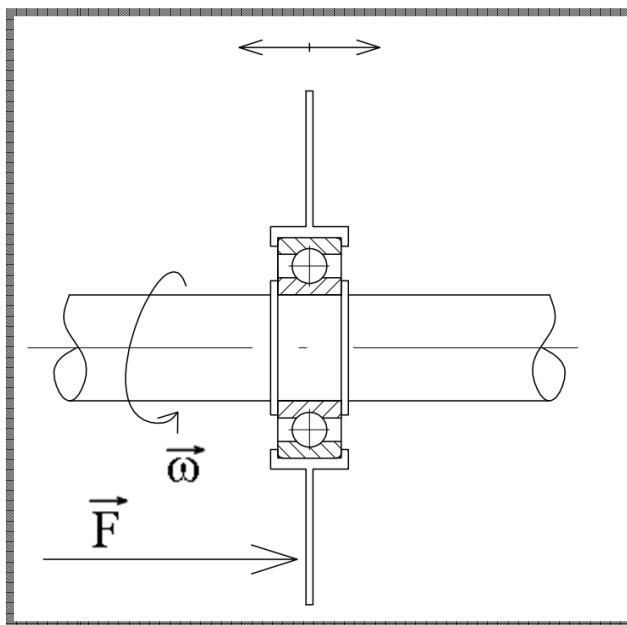
Dalším problémem konečného konstrukčního řešení je způsob přenosu lineárního vratného pohybu z budiče vibrací na rotující hřídel pohonu kuličky. V tomto případě se nabízejí dvě varianty:

- Pomocí ložiska
- Pomocí odvalujícího se válečku

#### 3.3.1 Přenos kmitání pomocí ložiska

3.3.1

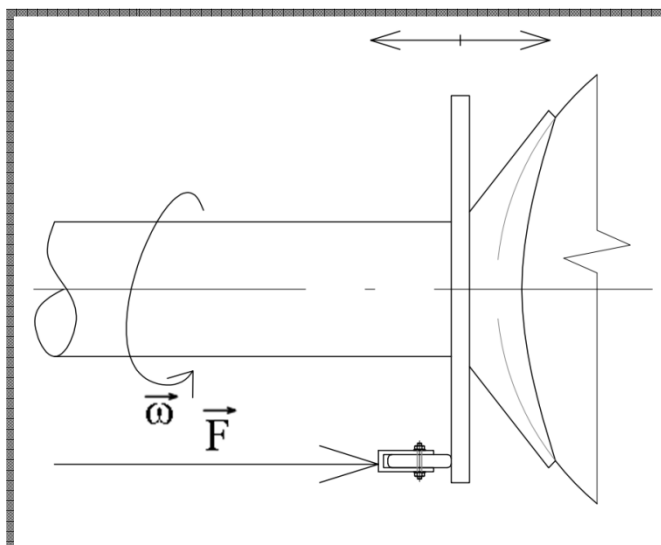
Toto řešení uvažuje ložisko nasazené na rotující hřídel, kde by vnitřní kroužek byl pevně spojen s hřídelí a na vnější kroužek by byl pevně připojen disk, který by byl v klidu. Na disk by působil daný budič vibrací a ložisko by přenášelo axiálním zatížením kmitavý pohyb na rotující hřídel. Nevýhodou je axiální zatížení ložiska, ale naopak výhodou je, že vnější disk by nerotoval a přenos kmitavého pohybu na něj by byl jednoduchý. Vratný pohyb by byl realizován pomocí pružiny, nebo flexibilním členem (tj. např. návratem elasticky deformovaného plechu do výchozí polohy). Velkou nevýhodou jsou axiální vůle v ložisku. Při působení na jeho vnější kroužek by se nejdříve vymezily axiální vůle a až potom by se pohyb přenesl na vnitřní kroužek a hřídel. Při používání se ložisko opotřebovává a vůle se zvětšují. Tato situace by značně zkreslovala fakta prováděného měření, a proto byla navržena další upravená varianta tohoto řešení, která uvažuje dvě ložiska vůči sobě rozepřená, čímž by se potlačily axiální vůle.



Obr. 3-6 Schéma přenosu kmitání pomocí jednoho ložiska

**3.3.2 Přenos kmitání pomocí odvalujícího se válečku**

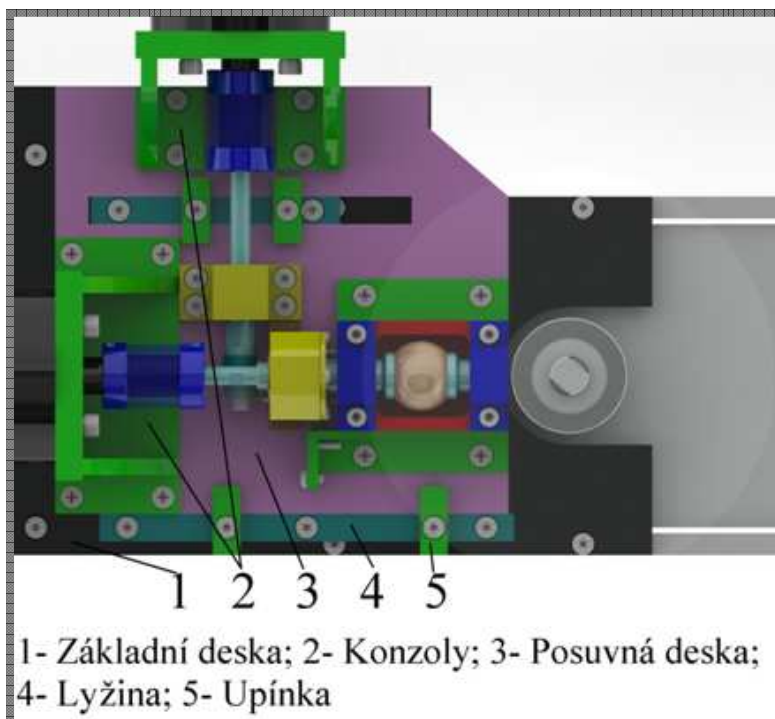
Řešení pomocí odvalujícího se válečku uvažuje pevně připevněný disk na rotující hřídel a váleček upevněný v rámu odvalující se po rotujícím kotouči. Pomocí tlaku na váleček by byl kotouč současně s kuličkou vychylován z rovnovážné polohy. Nevýhodou tohoto řešení je mechanický dotyk se smýkáním mezi malým válečkem a rotujícím kotoučem, z čehož plynou velké kontaktní tlaky a opotřebení kotouče a válečku, popř. potřeba mazání.



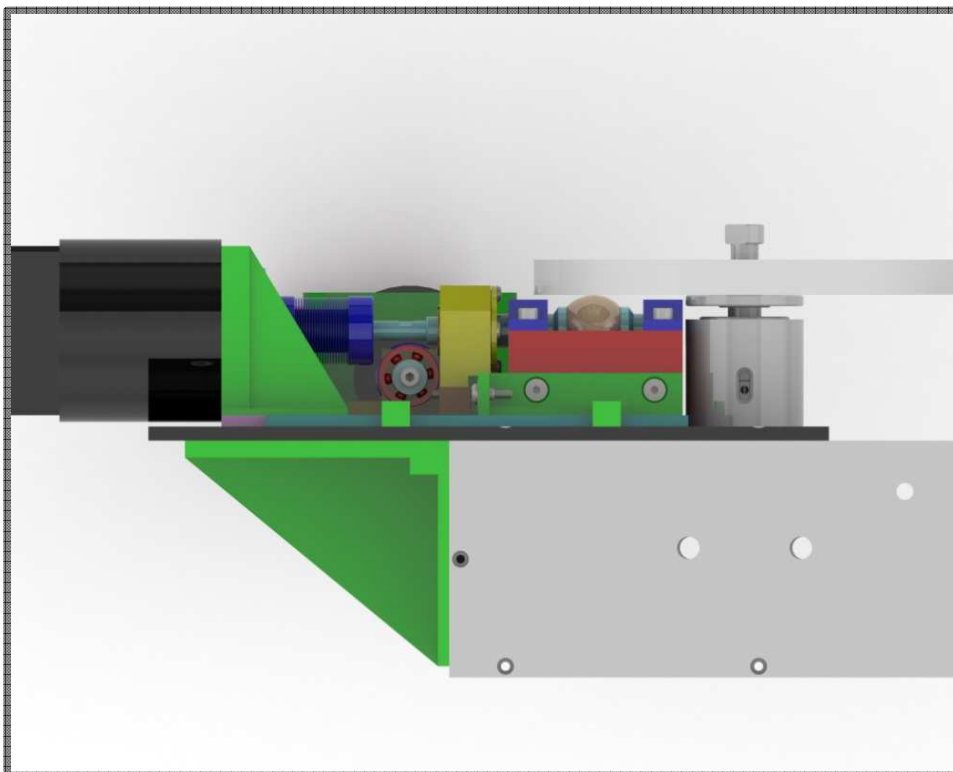
Obr. 3-7 Schéma přenosu kmitání pomocí ložiska

#### 4 VÝSLEDNÉ KONSTRUKČNÍ ŘEŠENÍ

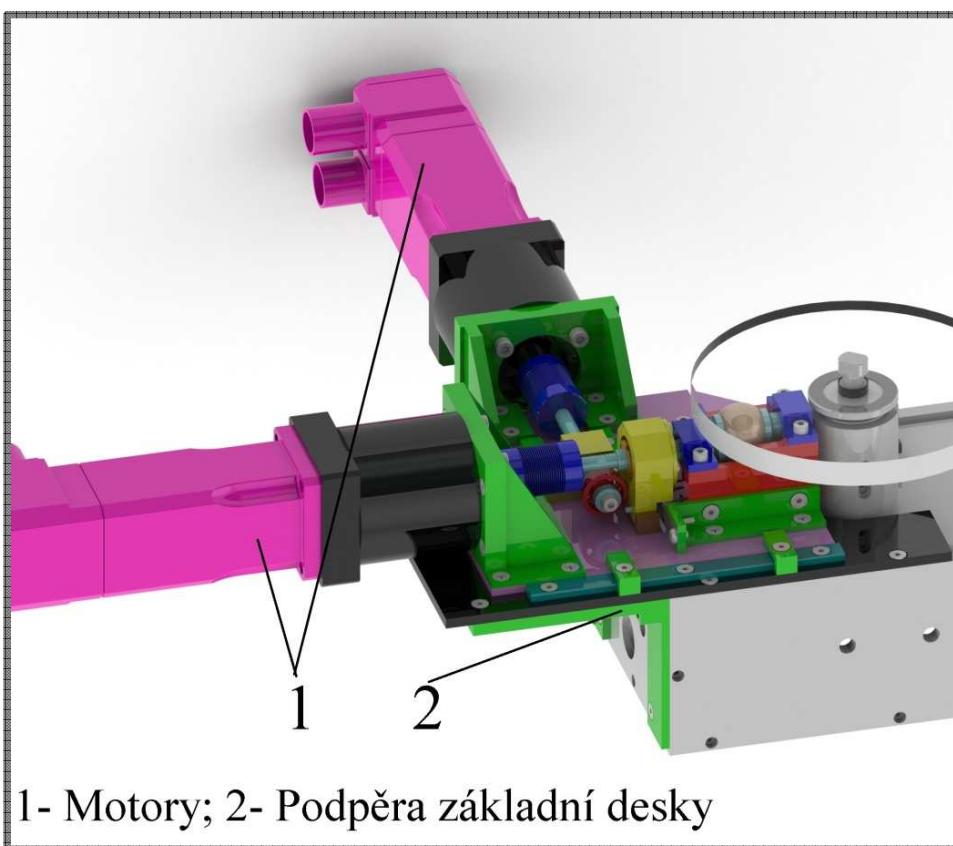
Po vyhodnocení výše uvedených možných variant konstrukčního řešení bylo vybráno cenově nejdostupnější a nejvýhodnější řešení. Celý modul je umístěn na desce, kterou je možno posouvat mezi ližinami po základní desce (viz Obr. 4-1). Celé soustrojí se posune do určité polohy a zajistí upínkami. Nastavení této polohy stanovuje poloměr kontaktní dráhy disku s kuličkou a umožňuje tak efektivní využití plochy disku. Základní deska je pevně spojena se stávající konstrukcí optického tribometru. Část základní desky je podepřena výztuhou s žebry, jak je zřejmé z Obr. 4-2 a Obr. 4-3. Tato konstrukce je nezbytná s ohledem na velkou váhu motorů a možný průhyb desky, který by způsobil nepřesnost výsledků celého prováděného měření. Motory jsou na desku připevněny pomocí konzol. Obě konzoly jsou složeny z několika k sobě sešroubovaných dílů pro usnadnění výroby a snížení výrobní ceny. Obě konzoly jsou přišroubovány k posuvné desce. Celý modul je možno odmontovat tak, že odmontujeme disk, upínky, a 7 šroubů, které spojují základní desku s horní deskou stávající měřicí stanice. Potom je možno celý modul ze zařízení odejmout. Změna amplitudy kmitání je umožněna výměnou excentrického náboje (viz Obr. 4-4). Budou vyrobeny 3 náboje a to s excentricitou 0,5 mm, 0,3 mm a 0,1 mm, čímž bude stanovena celková výchylka kuličky 1 mm, 0,6 mm a 0,2 mm. Výměna proběhne tak, že se odmontuje šroub, který spojuje excentr s hřídelí a odejme se celý excentrický náboj i s ložiskem. Místo něj se namontuje jiný náboj s ložiskem a přitáhne stejným šroubem a podložkou. Aby nedošlo k odtažení náboje od hřídele, musí se motor otáčet doleva, aby se při běhu šroub dotahoval. Výměna kuličky je možná vymontováním šroubu procházejícím přes kuličku a následným vyjmutím kuličky. Všechny díly modulu jsou vyrobeny z nerezové oceli. Nerez je nutná, protože zařízení je umístěno v laboratoři. Na obou hřídelích jsou vyfrézovány drážky pro klíč, aby bylo možno dostatečně přitáhnout šroub procházející kuličkou a šroub upevňující excentrický náboj ložiska.



Obr. 4-1 Půdorys modulu



Obr. 4-2 Bokový modul

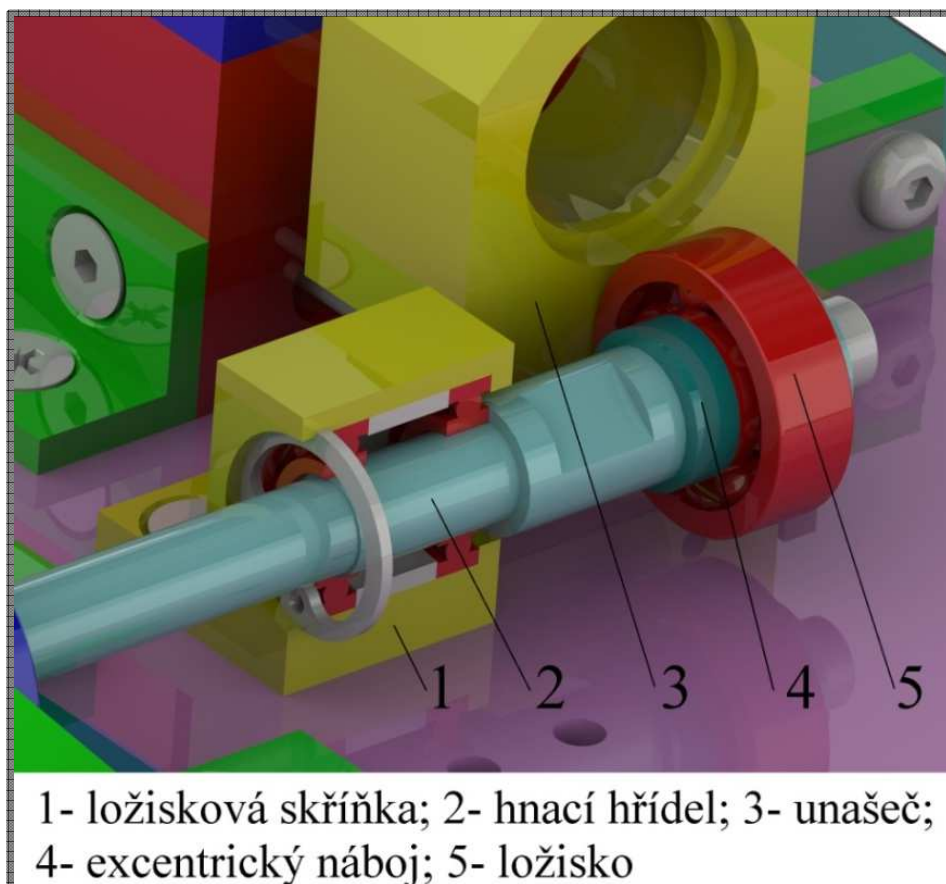


1- Motory; 2- Podpěra základní desky

Obr. 4-3 Izometrický pohled modulu

#### 4.1 Pohon a buzení vibrací

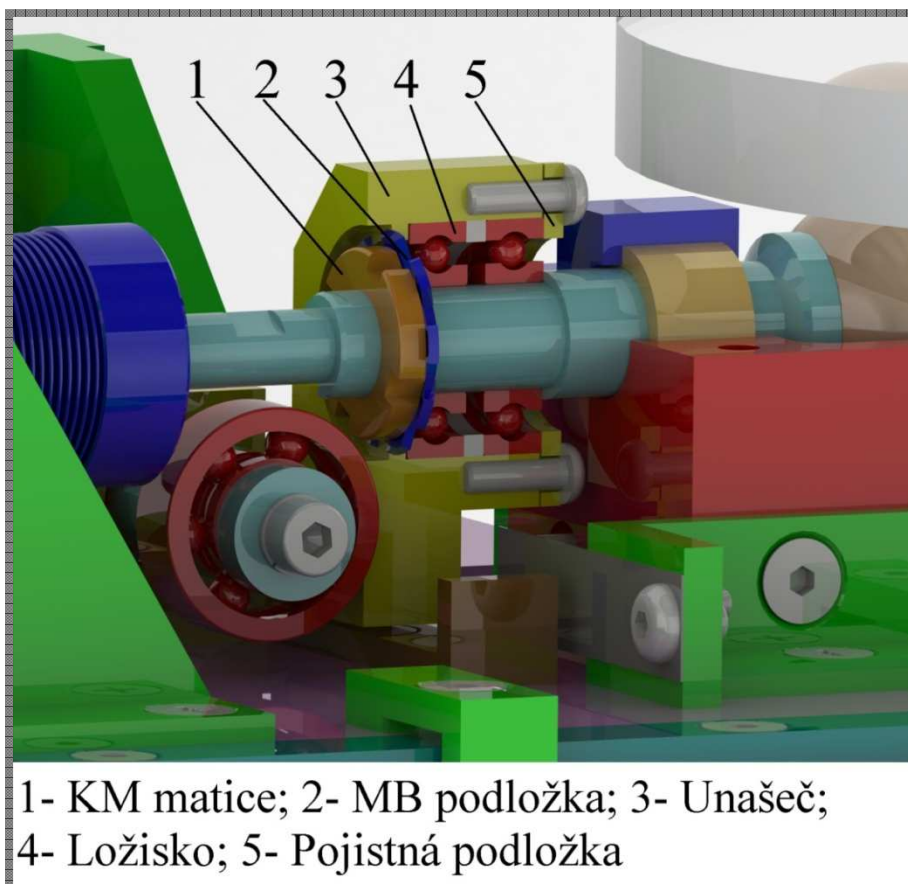
Buzení vibrací je řešeno pomocí mechanismu s excentrem. Mechanismus je složen z náboje pro ložisko, ložiska a podložky s upevňovacím šroubem, viz Obr. 4-4. Náboj pro ložisko má excentricky umístěný otvor, přes který je upevněn k hřídeli, a tudíž bude při rotaci tvořit potřebnou amplitudu pohybu. Šroub prochází excentrickým dílem s vůlí. Přesná radiální poloha dílu je vymezena tak, že excentrický náboj má na straně styku s hřídelí vyrobené zahlbouní, do kterého se nasune hřídel při montáži, a tak se vzniklé vůle vymezí. Ložisko je upevněno na náboji tak, že na jedné straně bude opřeno o osazení a z druhé strany přitlačeno proti osazení podložkou, kterou bude přitlačovat výše zmíněný šroub. Při rotaci hřídele bude rotovat pouze vnitřní kroužek ložiska a vnější kroužek bude opřen o unašeč, který přeneseme pohyb přes ložiska na hřídel kuličky. Hřídel s excentrem je uložena letmo ve dvou ložiscích a připojena vlnovcovou spojkou k motoru, kterým je hřídel poháněna. Tato dvě ložiska jsou usazena v ložiskovém domku tak, že z jedné strany domku bude osazení. Na osazení bude dosedat první ložisko, mezi prvním a druhým ložiskem bude distanční kroužek a nakonec druhé ložisko zajištěno proti axiálnímu posunutí pojistným kroužkem. Na hřídeli je vyrobeno osazení, které přesně určí místo styku ložiska excentru s unašecím mechanismem. Excentr bude poháněn přesným krokovým motorem o maximálních otáčkách  $2500 \text{ min}^{-1}$ . Tudíž rozsah frekvence vratného pohybu kuličky je od 0 do 41,7 Hz. Použitý motor je již součástí vybavení laboratoří Ústavu konstruování a není jej potřeba dokoupit.



Obr. 4-4 Schéma excentrického mechanismu

## 4.2 Přenos kmitavého pohybu na hřídel kuličky

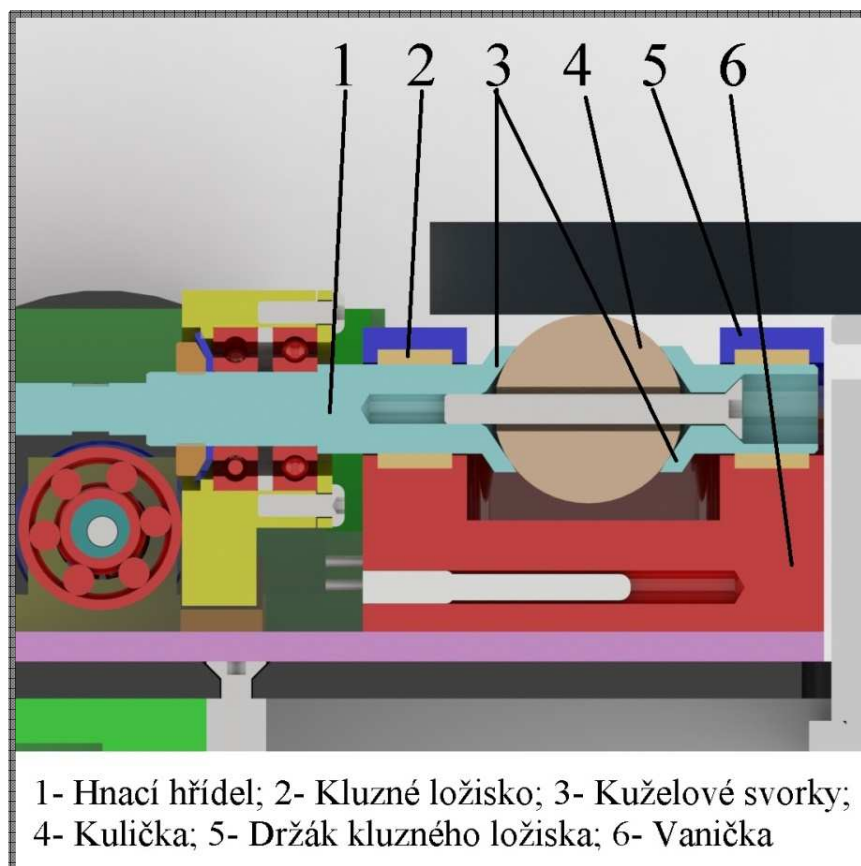
Pro umožnění axiálního pohybu hřídele kuličky je hřídel propojena s motorem přes vlnovcovou spojku. Ta pokryje axiální i radiální výchylky při dostatečné torzní tuhosti pro přenos kroutícího momentu. Přenesení vibrací z excentru na hřídel kuličky je řešeno pomocí unašeče s ložisky. Ložiska umístěná v unašeči jsou vůči sobě rozepřena distančním kroužkem a přitažena z druhé strany KM maticí a MB podložkou. Konstrukce je tedy následující: na jedné straně unašeče je osazení, o které se opře vnější kroužek prvního ložiska, mezi ložisky distanční kroužek a druhé ložisko je zajištěné podložkou přišroubovanou čtyřmi šrouby M3. Otvor pro ložiska v unašeči je o 0,2 mm menší než celková délka ložisek včetně distančního kroužku, tudíž při přitažení šroubů na jistící podložce se vymezí případné vůle. Tento unašeč je celý nasunut na hřídel kuličky, která je opatřena osazením. Na osazení hřídele dosedne vnitřní kroužek druhého ložiska a z druhé strany se vnitřní kroužek prvního ložiska zajistí KM maticí a MB podložkou. Ložiska jsou rozepřena mezi osazením a zajištěním a tím budou vymezeny veškeré axiální vůle. Při zvětšení vůlí opotřebením se zajištění pouze dotáhne a tím se vůle opět eliminují. Stálý přítlak mezi excentrem a unašečem, a tím i vratný pohyb kuličky, je vyřešen pomocí flexibilního prvku – vratného plechu. Plech se opírá o unašeč z opačné strany než excentr, který vyvoluje elastickou deformaci plechu odpovídající velikosti zdvihu. Počáteční předpětí vratného plechu je možné nastavit stavěcím šroubem. Tato konstrukce je zobrazena na Obr. 4-5.



Obr. 4-5 Schéma unašeče

### 4.3 Upevnění kuličky na hřídel

Upevnění kuličky je řešeno kombinací dvou kuželových svorek a šroubu. Bude tedy zajištěna souosost kuličky a hřídele a tím potlačeno případné obvodové házení. Šroub procházející kuličkou je velikosti M4 a délky 40 mm. Je to nejdelší varianta tohoto šroubu a přesto není dostatečně dlouhý, aby prošel kuželovou svorkou přes kuličku až do hřídele. Tento problém byl vyřešen zapuštěním šroubu do kuželové svorky. Hřídel i s kuličkou je uložen v kluzných ložiscích, která umožní kmitavý a rotační pohyb současně. Kluzná ložiska byla vybrána na základě otáček hnacího motoru a tedy kluzné rychlosti. Původně měla být plastová, ale ukázalo se, že nevyhovují z hlediska kluzné rychlosti, proto byla zvolena mosazná ložiska od firmy KAJO metal s. r. o. [27]. Na obou stranách kuličky jsou stejná ložiska o průměru vnitřním 12 mm a vnějším 16 mm. Část kuličky je ponořena do maziva nalitého ve vaničce, ve kterém se kulička bude brodit a tím přenášet mazivo do místa styku se skleněným diskem. Kluzná ložiska jsou uložena ve stěnách vaničky. Polovina pouzdra je uložena ve stěně vaničky a druhá v držáku, který pouzdro zároveň zajistí vůči případnému pootočení. Uložení ložisek je opatřeno osazením na obou stranách, čímž je zajištěna eliminace jakéhokoli axiálního posuvu ložiska. Vanička je přimontována dvěma držáky na spodní desku a je osazena topnými tělesy pro nahřívání oleje a teploměrem. Levý držák je doplněn o nastavbu pro vratný plech. Plech dává unašeči potřebné zrychlení pro vratný pohyb. Pro výpočet rozměrů vratného plechu je třeba znát hmotnost součástí, kterými se bude pohybovat. Proto je výpočet proveden až na konec. Celý mechanismus je zobrazen na Obr. 4-6.



Obr. 4-6 Schéma upevnění kuličky

#### 4.4 Výpočet tloušťky vratného plechu

Pro zpětný pohyb unašeče se správným zrychlením a pro zamezení odskoku unašeče od excentru musí být navržen vratný plech o vhodných rozměrech.

- Maximální otáčky motoru

$$n = 2500 [\text{min}^{-1}] = 41,67 [\text{s}^{-1}] \quad (5)$$

kde:

$n$        $\text{s}^{-1}$       jsou otáčky

- Hmotnost částí, se kterými se bude pohybovat

$$m = 0,3 [\text{kg}] \quad (6)$$

kde:

$m$        $\text{kg}$       je hmotnost

- Výpočet úhlové frekvence

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot n = 2 \cdot \pi \cdot 41,67 = 261,80 [\text{s}^{-1}] \quad (7)$$

kde:

$\omega$        $\text{s}^{-1}$       je úhlová frekvence

$n$        $\text{s}^{-1}$       otáčky

- Výpočet maximálního zrychlení pohybových hmot od excentru

$$a = e \cdot \omega^2 = 0,5 \cdot 10^{-4} \cdot 261,80^2 = 34,27 [\text{m} \cdot \text{s}^{-2}] \quad (8)$$

kde:

$a$        $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$       je zrychlení

$e$        $\text{m}$       excentricita

$\omega$        $\text{s}^{-1}$       úhlová frekvence

- Výpočet maximální setrvačné síly

$$F = m \cdot a = 0,3 \cdot 34,27 = 10,28 [\text{N}] \quad (9)$$

kde:

$F$        $\text{N}$       je setrvačná síla

$m$        $\text{kg}$       hmotnost

$a$        $\text{m} \cdot \text{s}^{-2}$       zrychlení

- Určení délky, šířky a průhybu plechu

$$l = 17 [\text{mm}]; b = 10 [\text{mm}]; y_b = 1 [\text{mm}] \quad (10)$$

kde:

$l$        $\text{mm}$       je délka

$b$        $\text{mm}$       šířka

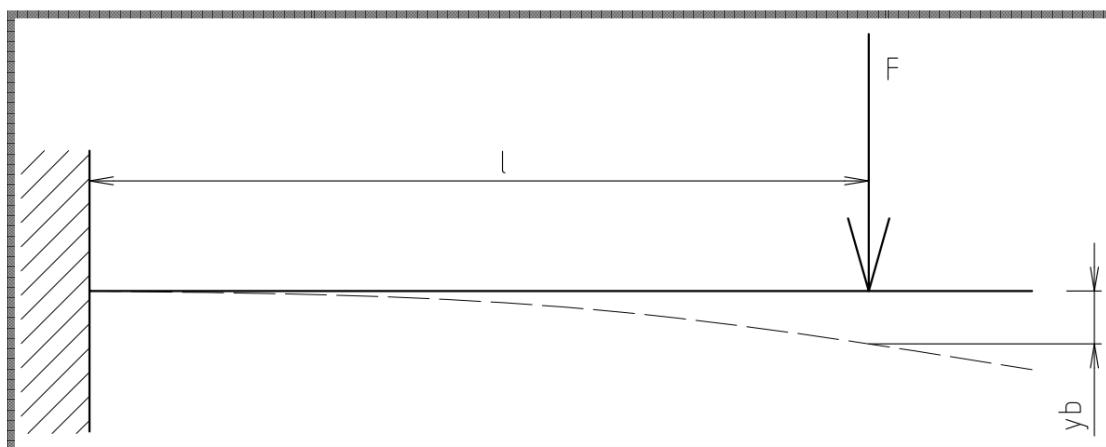
$y_b$        $\text{mm}$       průhyb

- Výpočet tloušťky plechu

$$h = \sqrt[3]{\frac{F \cdot l^3 \cdot 12}{24 \cdot E \cdot b \cdot y_b}} = \sqrt[3]{\frac{10,28 \cdot 17^3 \cdot 12}{24 \cdot 2,1 \cdot 10^5 \cdot 10 \cdot 1}} = 0,23 \text{ [mm]} \Rightarrow h = 0,3 \text{ [mm]} \quad (11)$$

kde:

|       |     |                         |
|-------|-----|-------------------------|
| $h$   | mm  | je tloušťka             |
| $F$   | N   | síla                    |
| $l$   | mm  | délka                   |
| $E$   | MPa | Youngův modul pružnosti |
| $b$   | mm  | šířka                   |
| $y_b$ | mm  | průhyb                  |



Obr. 4-7 Schéma průhybu plechu

Tloušťka plechu je zvolena 0,3 mm, protože při výpočtu byly zanedbány pasivní odpory v kluzných ložiscích a přítlačná síla při maximálním zrychlení setrvačných hmot by pro vypočtenou tloušťku plechu byla teoreticky nulová. Plech udělí unašeči sílu tak velkou, aby se vrátil se stejným zrychlením jako excentr a nedošlo k jeho odskoku. Konstrukce počítá jen se silou od vratného plechu, který poskytne veškeré potřebné síly pro správný chod. Vlnovcová spojka bude svou silou při natažení pomáhat plechu při zpětném pohybu. Se silou od vlnovcové spojky nebylo počítáno, protože tato síla byla vyčleněna jako rezerva pro bezproblémový chod. Na obou stranách se plech opírá o stavěcí šrouby pro možnost předeprnutí. Tímto způsobem je možno nastavovat sílu, která bude na unašeč působit. Síla je napočítána pro náboj ložiska s excentricitou 0,5 mm. Když proběhne výměna za náboj s menší excentricitou, pak bude potřebná přítlačná síla nižší, což ale nezpůsobí žádné problémy v chodu mechanismu.

---

## 5 DISKUZE

Výsledné konstrukční řešení bylo navrženo na základě zhodnocení nejvhodnější metody pro buzení vibrací a finančních nákladů. Zadána byla amplituda a frekvence kmitání a oba požadované parametry byly dodrženy. Excentrický mechanismus je tvořen excentrickým nábojem a na něj nasazeným ložiskem. Ložisko přenáší kmitání na unašeč. V unašeči jsou umístěna dvě rozepřená ložiska tak, aby byly vymezeny vůle. Potenciální problém by mohl nastat z důvodu, že tato dvě ložiska jsou kuličková radiální a přenáší prakticky čistě axiální zatížení. Pokud by se tato ložiska opotřebovala, je možné je vyměnit. Jsou to ložiska kuličková radiální od výrobce SKF typ 618/8 a jejich cena je 250 Kč. Unašeč však nepřenáší velká zatížení, tudíž by nemělo být zapotřebí tato ložiska často měnit. Konstrukce obsahuje dva poměrně těžké motory, které mohou svou vahou ovlivňovat celé měření. Konstrukce je proto vybavena podpěrou, která toto zatížení zbavuje nežádoucích účinků. Tato podpěra se skládá ze dvou desek sešroubovaných k sobě dvěma žebry a spojovacím článkem. V prvotním návrhu bylo uvažováno i třetí žebro, díky kterému by se váha motorů rozložila dokonale po celé ploše této podpěry. Z důvodu nutnosti přístupu pod podpěru k ovládání odlehčovacího mechanismu tribometru bylo ale nutné třetí žebro odstranit a nahradit pouhým spojovacím článkem. Toto řešení by mohlo být potenciálním problémem, ale rozmístění motorů bylo takové, že by třetí žebro bylo umístěno na okraji podpěry a motory by zatěžovaly druhou stranu podpěry, tedy by se zatížení rozložilo na dvě zbývající žebra. Síla potřebná k vrácení unašeče s hřídelí kuličky byla napočítána bez vlnovcové spojky. Pokud by spojka použita nebyla, síla by byla dostatečná i bez ní. Vlnovcová spojka bude poskytovat rezervní sílu při vrácení unašeče. Větší síla není problémem, který by měl způsobovat nepřesnost měření, nebo jakékoli komplikace při chodu. Síla je vypočtena pro excentr s excentricitou 0,5 mm a pro menší excentricity bude síla ještě více předimenzovaná, což opět není problémem. Hřídele, jak kuličky, tak i excentru, mají přípojovací rozměr do vlnovcové spojky menší než vlnovcová spojka. V případě hřídele kuličky je průměr hřídele 7 mm a průměr díry u spojky 8 mm. Tato vůle se odstraní dotažením dvou šroubů, které obsahuje vlnovcová spojka. Vznikne tak odchýlení od osy hřídele, ale vlnovcová spojka je pružná jak ve směru radiálním tak i axiálním, tudíž toto vyosení bude kompenzováno spojkou. Pokud by vzniklo házení v důsledku této odchylky hřídele a spojky, pak je možné kompenzovat vůli mezi hřídelí a spojkou vložením plechu, který tuto mezeru vyplní, a až přes něj se přitáhnou šrouby na vlnovcové spoje. U hřídele excentru je průměr díry opět 8 mm a průměr hřídele 7,5 mm. Vůle je poloviční než u hřídele kuličky. Případné komplikace způsobené házením je možno vyřešit stejným způsobem jako u hřídele kuličky. Tento zmenšený průměr na hřídelích je nutný z důvodu nasazování ložisek. Celá hřídel kuličky je uložena ve dvou kluzných ložiscích, která jsou výrobou určena pro rotační pohyb. Toto konstrukční řešení však počítá s kombinací rotačního a kmitavého pohybu, který neodpovídá specifikaci těchto ložisek. Ložiska byla zvolena mosazná s větší únosností než plastová ložiska. Zatížení těchto ložisek je malé, proto by tato ložiska měla bez problému vydržet kombinaci rotačního a kmitavého pohybu, a to z důvodu jejich předimenzování. Pokud by se ložiska opotřebovala, je možné je vyměnit. Cena jednoho ložiska je 80 Kč. Celá konstrukce bude při chodu vibrovat. Mohl by nastat problém samovolného povolování šroubů. Pokud by se tento problém opakoval, je možné jej vyřešit přilepením šroubu do závitu. Celkové náklady materiálu vyjma motorů činí přibližně 4000 Kč.

## 6 ZÁVĚR

Práce byla zaměřena na návrh a konstrukci zařízení, které bude budit vibrace rotující kuličky. Celý modul byl navržen podle zadání pro frekvenci 10 Hz. Tento cíl byl splněn. Motor, který hřídel excentru pohání, je napojen na měnič umožňující plynulou změnu otáček, takže frekvence kmitání je možno plynule měnit od 0 do 41,7 Hz. Síla pro vracení celého mechanismu je spočítána na nejvyšší hodnoty, tudíž je zaručena funkčnost při všech frekvencích. Dalším požadavkem zadání byla amplituda 0,1 mm. Tento cíl byl také splněn. Modul má také možnost tří různých excentrických nábojů, které umožní amplitudu 0,5 mm, 0,3 mm a 0,1 mm. Pro změnu amplitudy je třeba daný excentrický náboj za klidu stroje vyměnit. Není možné měnit amplitudu za chodu stroje. Kmitavý pohyb kličky je realizován pomocí excentrického mechanismu, který se skládá z náboje s excentricky umístěnou dírou, na náboji nasazeným ložiskem a celek je stažen šroubem s podložkou. Ložisko je opřeno o unašeč, ve kterém jsou dvě ložiska, přenášející vratný pohyb z excentru na hřídel kuličky. Upevnění kuličky je realizováno kuželovými svorkami staženými šroubem. Celek čítá 58 dílů, z nichž 21 dílů je normalizovaných. Zbylé díly budou vyrobeny převážně z plechu nebo z plochých tyčí. Výrobní výkresy těchto dílů jsou přiloženy k práci. Celý navržený modul bude vyroben z nerezové oceli, kvůli jeho umístění v laboratoři. Tribometr rozšířený o tento vibrační modul otevře novou cestu ke zkoumání průběhu mazání při styku dvou těles v simulaci reálnějších podmínek.

---

## 7 SEZNAM POUŽITÝCH ZDROJŮ

- [1] TU V LIBERCI. 5. Tribologie [skripta]. [cit. 2012-05-23]. Dostupné z: [http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud\\_materialy/ttv/tribologie.pdf](http://www.ksp.tul.cz/cz/kpt/obsah/vyuka/stud_materialy/ttv/tribologie.pdf)
- [2] MAREK, V. – HELEBRANT, F. : Tribotechnická diagnostika: In. Mezinárodní vědecká konference TD 2000 – DIAGON 2000, VUT v Brně, FT Zlín 2000, s. 207 – 211, ISBN 80 – 214 – 1578 - 9
- [3] SKF, Společnost. Tribologie: Příběh pohybu. *Tribologie: Příběh pohybu* [online]. 2013, 25.10.2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://ng.skf.com/cz/news-and-media/news-search/2013-10-25-tribology-a-moving-story.html>
- [4] SHIGLEY, Joseph E., Charles R. MISCHKE a Richard G. BUDYNAS. *Konstruování strojních součástí*. Brno: VUTUM, 2010. ISBN 978-80-214-2629-0.
- [5] Tribologické aspekty kontaktních povrchů. In: Ústav konstruování [online]. 2005, 2008 [cit. 2012-05-24]. Dostupné z: <http://old.uk.fme.vutbr.cz/kestazeni/prednaska2.pdf>
- [6] Vibrace. [online]. 1998 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.bozpinfo.cz/priloha/vibrace.pdf>
- [7] SCHAUER, Pavel. *Mechanické kmity* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka\\_schauer/mechanicke\\_kmity.pdf](http://fyzika.fce.vutbr.cz/doc/vyuka_schauer/mechanicke_kmity.pdf)
- [8] PAZDERA, Pavel. *Mechanický excitátor pro modální analýzu* [online]. Brno, 2007 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=305](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=305). Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce doc. Ing. IVAN MAZŮREK, CSc.
- [9] HAS CZ A.S. *Průmyslové vibrátory* [online]. 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.prumyslove-vibratory.cz/>
- [10] WEBAC VIBRO S.R.O. *Webacvibro* [online]. 2010 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.webac-vibro.com/>
- [11] ME SYSTEMS S. R. O. *ME Systems* [online]. 2001 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://mesystems.cz/>
- [12] VIBCO VIBRATORS. *Vibco* [online]. 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.vibco.com/>
- [13] PNEUMATICKÉ VÁLCE SPOL. S R.O. *Stránský a Petržík* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://stranskyapetrzik.cz/>
- [14] KATEDRA ČÁSTÍ A MECHANISMŮ STROJŮ, TUL. *Budiče*. Liberec, 2012. Dostupné z: [http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p2\\_budice.pdf](http://www.kst.tul.cz/podklady/experimentalnimetody/prednasky/p2_budice.pdf)
- [15] HINDON CORPORATION. *Hindon* [online]. 2011 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.hindon.com/>
- [16] HOUSTON VIBRATOR, Ltd. *Houston vibrator* [online]. 2013 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.houstonvibrator.com/>
- [17] MARTIN ENGINEERING. *Martin eng* [online]. 2009 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.martin-eng.com/>

- [18] PEDDY GROUP S.R.O. *Peddy* [online]. 2009 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.peddy.cz/>
- [19] DYNAMIC SOLUTIONS LLC. *Dynsolusa* [online]. 2003 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.dynsolusa.com/>
- [20] KOHUT TRINEC S.R.O. *Kohut* [online]. 2009 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.kohut.eu/>
- [21] ČERNÝ, Václav. II. Piezoelektrické motory: Regulace a řízení. *Piezoelektrické motory* [online]. 2004, č. 1 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.odbornecasopisy.cz/download/el010408.pdf>
- [22] APC INTERNATIONAL, Ltd. *Americanpiezo* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/>
- [23] PHYSIK INSTRUMENTE (PI) GMBH & CO.KG. *Physik instrumente* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: APC INTERNATIONAL, Ltd. *Americanpiezo* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <https://www.americanpiezo.com/>
- [24] DYNAMIC STRUCTURES & MATERIALS, LLC. *Dynamicstructures* [online]. 2014 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.dynamic-structures.com/>
- [25] Tribologie: Vybavení. ÚSTAV KONSTRUOVÁNÍ FAKULTA STROJNÍHO INŽENÝRSTVÍ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V BRNĚ. *Vysoké učení technické: Ústav konstruování* [online]. 2012 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: [http://uk.fme.vutbr.cz/www\\_uk/texty/vyzkum\\_tribologie/vybaveni/](http://uk.fme.vutbr.cz/www_uk/texty/vyzkum_tribologie/vybaveni/)
- [26] OMASTA, Milan a Jan MEDLÍK. *Optický tribometr pro studium mazaného kontaktu s různou orientací vektorů rychlost* [online]. Brno, 2010 [cit. 2014-05-17]. Apollo ID: 24637. Dostupné z: [http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz\\_soubor.php?id=1239](http://dl.uk.fme.vutbr.cz/zobraz_soubor.php?id=1239). Experimentální studium. Vysoké učení technické v Brně.
- [27] KAJO METAL S.R.O. *KAJO metal* [online]. 2001 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.kajometal.sk/>
- [28] NOVÁK, Zdeněk. Standardní prostorové hodnocení textury povrchu. In: *MM průmyslové spektrum* [online]. 2012 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.mmspektrum.com/clanek/standardni-prostorove-hodnoceni-textury-povrchu.html>
- [29] D. MAKOVÍČKA. *Makovička* [online]. 2009 [cit. 2014-05-17]. Dostupné z: <http://www.makovicka.cz/phprs/photos/2004ps01-p5.jpg>

---

## 8 SEZNAM POUŽITÝCH ZKRATEK, SYMBOLŮ A VELIČIN

**Zkratka**

ÚK

VUT

FSI

**Význam**

- Ústav konstruování

- Vysoké učení technické

- Fakulta strojního inženýrství

**Symbol** $\Lambda$  $h_{\min}$  $R_{\text{red}}$  $R_q$  $f$  $T$  $\omega$  $t$  $\varphi$  $n$  $m$  $a$  $e$  $F$  $l$  $b$  $y_b$  $h$  $E$ **Jednotka**

[-]

[ $\mu\text{m}$ ][ $\mu\text{m}$ ][ $\mu\text{m}$ ]

[Hz]

[s]

[ $\text{s}^{-1}$ ]

[s]

[ $^\circ$ ][ $\text{s}^{-1}$ ]

[kg]

[ $\text{m}\cdot\text{s}^{-2}$ ]

[m]

[N]

[mm]

[mm]

[mm]

[mm]

[MPa]

**Popis**

- parametr mazání

- minimální tloušťka mazacího filmu

- redukováná drsnost třecích povrchů

- střední kvadratická drsnost třecích povrchů

- frekvence

- perioda

- úhlová frekvence

- čas

- počáteční fáze

- otáčky motoru

- hmotnost pohyblivých součástí

- zrychlení unašeče

- excentricita náboje

- síla vratného plechu

- délka vratného plechu

- šířka vratného plechu

- průhyb vratného plechu

- tloušťka vratného plechu

- Youngův modul pružnosti

## 9 SEZNAM OBRÁZKŮ

|                                                                                                                                                  |    |
|--------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Obr. 1-1</b> Znázornění tribologického procesu [1] .....                                                                                      | 12 |
| <b>Obr. 1-2</b> Znázornění nerovnosti povrchu [28] .....                                                                                         | 13 |
| <b>Obr. 1-3</b> Závislost parametru mazání a součinitele tření [5] .....                                                                         | 14 |
| <b>Obr. 1-4</b> Plochy, mezi nimiž probíhá mezní mazání [5] .....                                                                                | 15 |
| <b>Obr. 1-5</b> Plochy, mezi nimiž probíhá smíšené mazání [5].....                                                                               | 15 |
| <b>Obr. 1-6</b> Plochy, mezi nimiž probíhá kapalinové mazání [5].....                                                                            | 16 |
| <b>Obr. 1-7</b> Záznam o měření vibrací od metra v Praze [29] .....                                                                              | 16 |
| <b>Obr. 1-8</b> Pneumatické pístové vibrátory [10] .....                                                                                         | 18 |
| <b>Obr. 1-9</b> Pneumatické válečkové vibrátory [11].....                                                                                        | 19 |
| <b>Obr. 1-10</b> Pneumatický turbínový vibrátor [12] .....                                                                                       | 19 |
| <b>Obr. 1-11</b> Pneumatický kuličkový vibrátor [13].....                                                                                        | 20 |
| <b>Obr. 1-12</b> Pneumatické úderové vibrátory [15] .....                                                                                        | 20 |
| <b>Obr. 1-13</b> Pneumatické lineární vibrátory [16].....                                                                                        | 20 |
| <b>Obr. 1-14</b> Schéma mechanického vibrátoru [9]. 1 .....                                                                                      | 21 |
| <b>Obr. 1-15</b> Vibrační deska HP-C80T Honda GX160 [18] .....                                                                                   | 22 |
| <b>Obr. 1-16</b> Vibrační zařízení pro měření v dynamických podmínkách od firmy DynamicSolution [19].....                                        | 23 |
| <b>Obr. 1-17</b> Hydraulický vibrátor typu HF - 800 [12] .....                                                                                   | 23 |
| <b>Obr. 1-18</b> Hydraulické kladivo FINE 6BL, provozní tlak 90 – 130 bar, frekvence 7,5 – 15Hz, energie úderu 850 J, hmotnost 350 kg [20].....  | 24 |
| <b>Obr. 1-19</b> Schéma lineárního piezomotoru ve dvoufázové úpravě [21].....                                                                    | 25 |
| <b>Obr. 1-20</b> Piezoelektrické motory komínkové, model P-212 až P-216, zdvih od 15 µm až 180 µm, síla 500 N až 3500 N [23] .....               | 25 |
| <b>Obr. 1-21</b> Piezoelektrický motor s přepákováním, model FPA-0500E-P-1036-150-SS-1M. Zdvih od 500 µm a síla 360 N [24] .....                 | 26 |
| <b>Obr. 1-22</b> Piezoelektrický motor s rotačním pohybem, model H-840 6-Axis Hexapod. Možné natočení 60 ° a maximální zatížení 30 kg [23] ..... | 26 |
| <b>Obr. 2-1</b> Tribometr pro měření tenkých mazacích filmů na Ústavu konstruování VUT Brno [25].....                                            | 27 |
| <b>Obr. 2-2</b> Popis částí tribometru [26] .....                                                                                                | 28 |
| <b>Obr. 2-3</b> Popis částí tribometru [26] .....                                                                                                | 28 |
| <b>Obr. 3-1</b> Schéma excentrického mechanismu složeného ze dvou kotoučů .....                                                                  | 31 |
| <b>Obr. 3-2</b> Schéma excentrického náboje pro ložisko .....                                                                                    | 32 |
| <b>Obr. 3-3</b> Schéma upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky .....                                                                           | 32 |
| <b>Obr. 3-4</b> Schéma upevnění kuličky šroubem .....                                                                                            | 33 |
| <b>Obr. 3-5</b> Schéma upevnění kuličky mezi dvě kuželové svorky šroubem .....                                                                   | 33 |
| <b>Obr. 3-6</b> Schéma přenosu kmitání pomocí jednoho ložiska .....                                                                              | 34 |
| <b>Obr. 3-7</b> Schéma přenosu kmitání pomocí ložiska .....                                                                                      | 35 |
| <b>Obr. 4-1</b> Půdorys modulu.....                                                                                                              | 36 |
| <b>Obr. 4-2</b> Bokorys modulu .....                                                                                                             | 37 |
| <b>Obr. 4-3</b> Izometrický pohled modulu.....                                                                                                   | 37 |
| <b>Obr. 4-4</b> Schéma excentrického mechanismu.....                                                                                             | 38 |
| <b>Obr. 4-5</b> Schéma unašeče.....                                                                                                              | 39 |
| <b>Obr. 4-6</b> Schéma upevnění kuličky.....                                                                                                     | 40 |
| <b>Obr. 4-7</b> Schéma průhybu plechu .....                                                                                                      | 42 |

---

## 10 SEZNAM TABULEK

|                                                                   |    |
|-------------------------------------------------------------------|----|
| <b>Tab. 1-1</b> Parametry mechanických vibrátorů s nevývahou..... | 21 |
|-------------------------------------------------------------------|----|

## **11 SEZNAM PŘÍLOH**

---

**Příloha 1**      Výkresová dokumentace.