

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA STROJNÍ

Studijní program: B 2341 Strojírenství
Studijní zaměření: Stavba energetických strojů a zařízení

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

**Setrvačné, útlumové a pružné vazební síly v trubkové řadě příčně
obtékané**

Autor: **Jan UHER**

Vedoucí práce: **prof. Ing. Jiří LINHART, CSc.**

Akademický rok 2012/2013

Prohlášení o autorství

Předkládám tímto k posouzení a obhajobě bakalářskou práci, zpracovanou na závěr studia na Fakultě strojní Západočeské univerzity v Plzni.

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně, s použitím odborné literatury a pramenů, uvedených v seznamu, který je součástí této bakalářské práce.

V Plzni dne:

.....
podpis autora

Poděkování

Tímto bych rád poděkovat prof. Ing. Jiřímu Linhartovi, Csc. za odborné vedení a konzultace při navrhování experimentálního zařízení a Ing. Jiřímu Hruškovi za pomoc při práci s vyhodnocovacím zařízením.

ANOTAČNÍ LIST BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

| | | | |
|----------------------|--|-------------------|---------------------------------|
| AUTOR | Příjmení Uher | Jméno Jan | |
| STUDIJNÍ OBOR | 2301R06-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“ | | |
| VEDOUcí PRÁCE | Příjmení (včetně titulů) prof. Ing. Linhart, CSc. | Jméno Jiří | |
| PRACOVIŠTĚ | ZČU - FST - KKE | | |
| DRUH PRÁCE | DIPLOMOVÁ | BAKALÁŘSKÁ | Nehodící se škrtněte |
| NÁZEV PRÁCE | Setrvačné, útlumové a pružné vazební síly v trubkové řadě příčně obtékané | | |

| | | | | | |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|
| FAKULTA | strojní | KATEDRA | KKE | ROK ODEVZD. | 2013 |
|----------------|---------|----------------|-----|--------------------|------|

POČET STRAN (A4 a ekvivalentů A4)

| | | | | | |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|
| CELKEM | 50 | TEXTOVÁ ČÁST | 32 | GRAFICKÁ ČÁST | 18 |
|---------------|----|---------------------|----|----------------------|----|

| | |
|--|---|
| STRUČNÝ POPIS (MAX 10 ŘÁDEK) ZAMĚŘENÍ, TÉMA, CÍL POZNATKY A PŘÍNOSY | Tato práce navazuje na dosavadní snahu o určení všech aerodynamických vazebních koeficientů v řadě maket simulujících trubkový kondenzátor. Cílem práce je vypracování metodiky měření, navržení experimentálního zařízení, provedení přípravného měření a realizace série měření při jednodimenzionálním buzení. |
| KLÍČOVÁ SLOVA ZPRAVIDLA JEDNOSLOVNÉ POJMY, KTERÉ VYSTIHUJÍ PODSTATU PRÁCE | vibrační uzel, řada trubek, kalibrace, vazební koeficienty, jednodimenzionální buzení, setrvačné síly, zpětnovazební smyčka |

SUMMARY OF BACHELOR SHEET

| | | | |
|--------------------------|--|-----------------|-----------------------------------|
| AUTHOR | Surname Uher | Name Jan | |
| FIELD OF STUDY | 2301R06-13 „Stavba energetických strojů a zařízení“ | | |
| SUPERVISOR | Surname (Inclusive of Degrees) prof. Ing. Linhart, CSc. | Name Jiří | |
| INSTITUTION | ZČU - FST - KKE | | |
| TYPE OF WORK | DIPLOMA | BACHELOR | Delete when not applicable |
| TITLE OF THE WORK | | | |

| | | | | | |
|----------------|------------------------|-------------------|--|---------------------|------|
| FACULTY | Mechanical Engineering | DEPARTMENT | Design of Power Machines and Equipment | SUBMITTED IN | 2013 |
|----------------|------------------------|-------------------|--|---------------------|------|

NUMBER OF PAGES (A4 and eq. A4)

| | | | | | |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|
| TOTALLY | 50 | TEXT PART | 32 | GRAPHICAL PART | 18 |
|----------------|----|------------------|----|-----------------------|----|

| | |
|---|---|
| BRIEF DESCRIPTION TOPIC, GOAL, RESULTS AND CONTRIBUTIONS | This thesis goes on an previous effort to define all of aerodynamic binding coefficients on cascade of dummies which simulates pipe condenser. Goal of thesis is to develop measurement procedure, design of experimental device, realize preparing measurement and couple of one-dimensional excitation measurements |
| KEY WORDS | vibration node, row of dummies, calibration, binding coefficients, one-dimensional excitation, inertia forces, feedback loop |

Obsah

| | |
|--|----|
| 1. Úvod..... | 7 |
| 2. Metodika měření aerodynamických sil | 8 |
| 2.1 Pohybová rovnice pro obtékané trubky | 8 |
| 2.2 Vazební koeficienty | 9 |
| 2.3 Neznámé setrvačné vazební koeficienty..... | 12 |
| 3. Popis experimentálního zařízení a jeho vývoje | 13 |
| 3.1 Nádoba | 13 |
| 3.2 Makety..... | 14 |
| 3.3 Vibrosystém | 14 |
| 3.4 Paralelogram..... | 15 |
| 3.5 Bezdotykové snímače výchylky | 16 |
| 3.6 Nastavitelná ramena | 17 |
| 3.7 Elektronické zapojení..... | 18 |
| 4. Měření | 20 |
| 4.1 Nastavení bezdotykových snímačů. | 20 |
| 4.2 Frekvenční charakteristika | 20 |
| 4.3 Cejchování sil elektrodynamických vibrátorů..... | 22 |
| 4.4 Měření při jednodimenzionálním buzení | 25 |
| 5. Výpočet vazebních koeficientů | 27 |
| 6. Závěr..... | 28 |
| 7. Seznam použitých zdrojů | 29 |
| 8. Přílohy | 30 |
| 8.1 Výkresová dokumentace | 30 |
| 8.2 Hodnoty frekvenčních charakteristik | 31 |

1. Úvod

V celém strojírenství a tedy i v energetickém odvětví je velmi důležité abychom byli schopni dimenzovat součásti jak z pevnostního hlediska, tak z hlediska časového. Přesným určením bezporuchové provozní doby můžeme naplánovat včasnou odstávku zařízení, při které se vymění dosluhující díly. Tím předejdeme haváriím způsobujícím rozsáhlé škody na zařízení a také snižují bezpečnost obsluhy. Typickým příkladem takového zařízení jsou trubkové kondenzátory, sloužící jako tepelné výměníky. Jako teplosměnná plocha zde slouží stěny kondenzátorových trubek, které jsou tedy silně namáhány jak teplem, tak mechanickými vibracemi.

Vibrace vznikají silovým působením trubky skrze okolní prostředí jak na sebe samu tak na ostatní trubky ve svazku. Mechanismy způsobující vibrace ve svazku nazýváme aerodynamickými a dělíme je na aeroelastické a na turbulentní. Aeroelastický mechanismus je třeba použít ve chvíli, kdy se trubka posune ze své původní pozice ve svazku. To změní tok proudu média v jejím okolí. Na jedné straně trubky roste tlak a na druhé straně roste rychlost. Celý proces vyvolá doplňkovou sílu, která způsobuje buď zvětšení, nebo zmenšení vychýlení trubky z původní pozice. Vzájemně se takto ovlivňují všechny trubky ve svazku. Případ zvětšování výchylky způsobuje harmonické kmitání s vysokou amplitudou. Tento stav je velmi nebezpečný pro životnost trubek.

Problematikou aeroelastických sil se v loňském roce zabýval kolega Jan Zajíc [III], který provedl sérii měření při jednodimenzionálním buzení na svazku maket kondenzátorových trubek umístěném v aerodynamickém tunelu. Zde mohl měřit v proudícím i neproudícím vzduchu, ve kterém jsou zjiřitelné útlumové a pružné účinky. Pro vyjádření všech setrvačných účinků je potřeba dalšího měření v prostředí s vyšší hustotou, ve kterém budou setrvačné síly výraznější a tedy i měřitelné. Jako nejdostupnější médium se nabízí voda.

Cílem práce je sestavení experimentálního zařízení sestávajícího z nádoby s vodou, ve které bude umístěna stejná řada trubkových maket, jaká byla použita při měření v aerodynamickém tunelu. Dvě z trubek v této řadě musejí být propojeny s jednodimenzionálními vibrouzly, zatímco ostatní budou pevně fixovány k nádobě. Při měření se jedním vibrouzlem rozkmitá první maketa na stálou maximální výchylku. První kmitající maketa skrze okolní prostředí dodá hybnost druhé maketě. Ta se ustálí do původní pozice pomocí druhého vibrouzlu. Pro udržení konstantní výchylky na první trubce i pro ustálení druhé se musí snímat poloha obou trubek pomocí bezdotykového indukčního snímače vzdálenosti. Toto měření se musí provést pro čtyři různé orientace buzení (XX,XY,YX,YY). Elektrický proud potřebný na ustálení trubky se přepočítá na sílu potřebnou pro ustálení, všechny zjištěné hodnoty se dosadí do pohybových rovnic pro vyjádření hledaných koeficientů setrvačnosti.

2. Metodika měření aerodynamických sil

Abychom byli schopni postavit experimentální zařízení, musíme se nejprve seznámit s používanou metodikou měření aerodynamických sil.

Metodika měření aeroelastických sil byla zpracována pomocí zprávy umístěné na internetových stránkách katedry konstruování energetických strojů a zařízení v sekci funkční vzorky pod názvem Zařízení pro experimentální vyšetření vazebních aerodynamických sil mezi trubkovými maketami v proudu vzduchu [I] a také pomocí textu Displacement mechanism forces in tube condenser [II].

2.1 Pohybová rovnice pro obtékané trubky

Při obtékání jsou trubky namáhány proměnnými silami vyvolanými rozvířením proudu od odtržení, turbulencí vstupního proudu a také pohybem samotných trubek. Pro řešení musíme znát složky síly závislé na zrychlení, rychlosti a posunutí trubek v obtékaném svazku. Pohybová rovnice pro obtékané trubky vypadá takto.

$$m_j \ddot{z} + b_j \dot{z} + k_j z + \frac{1}{4} \rho \pi D_j^2 \sum_{k=0}^N (m_{jk}^{zx} \ddot{x}_k + m_{jk}^{zy} \ddot{y}_k) + \frac{1}{2} \rho D_j w \sum_{k=0}^N (b_{jk}^{zx} \dot{x}_k + b_{jk}^{zy} \dot{y}_k) + \frac{1}{2} \rho w^2 \sum_{k=0}^N (k_{jk}^{zx} x + k_{jk}^{zy} y) + M F_j^z = T F_j^z + F_j^z \quad (1)$$

| | | | |
|-----|---|--|---|
| Kde | : | D_j | průměr j-té trubky |
| | | w | rychlost v nejužším místě mezi trubkami |
| | | ρ | hustota tekutiny |
| | | m_j, b_j, k_j | mechanická hmotnost, útlum a tuhost |
| | | $m_{jk}^{zx}, m_{jk}^{zy}, b_{jk}^{zx}, b_{jk}^{zy}, k_{jk}^{zx}, k_{jk}^{zy}$ | aerodynamické vazební koeficienty |

Pohybová rovnice obsahuje součet silových účinků ostatních trubek $k=1,2, \dots, N$, ale i účinků trubky ovlivněné na sebe samu s označením $k=0$ na ovlivněnou (j -tou) trubku pohybující se ve směru z . První tři členy rovnice (1) jsou mechanické setrvačná, útlumové a pružné síly. Další tři členy jsou aerodynamické síly setrvačné, útlumové a pružné. Sedmý člen je vazební mechanická síla, ta bude při měření odstraněna izolovanými závěsy budících a odezvoových maket. Na pravé straně je stochastická síla vyvolaná turbulencí, která je odstraněna protisilou generovanou elektrodynamickým vibrátorem. Poslední člen je vnější síla, tu získáme pomocí vibrátoru.

2.2 Vazební koeficienty

Při obtékání trubkové řady, kdy existuje vliv každé jedné trubky na všechny ostatní, vznikne teoreticky $12N^2$ vazebních koeficientů. Pro jejich řešení je potřeba stejné množství rovnic. Rozložením řady trubek na subsystémy po dvou vznikne jen 24 vazebních koeficientů pro každý subsystém. Budeme uvažovat dvě trubky, 0-tou a k-tou, obě vybavené 1D vibrátory. Pro které budou platit následující vztahy.

$$\begin{aligned} m_0 \ddot{z}_0 + b_0 \dot{z}_0 + k z_0 + \rho S m_{0k} \ddot{z}_k + \rho D w b_{0k} \dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{0k} z_k + \\ \rho S m_{00} \ddot{z}_0 + \rho D w b_{00} \dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{00} z_0 = F_0 \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} m_k \ddot{z}_k + b_k \dot{z}_k + k_k z_k + \rho S m_{k0} \ddot{z}_0 + \rho D w b_{k0} \dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{k0} z_0 + \\ \rho S m_{kk} \ddot{z}_k + \rho D w b_{kk} \dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{kk} z_k = F_k \end{aligned} \quad (3)$$

Provedeme dva případy měření. Nejdříve případ A, kdy vibruje 0-tá trubka a k-tá je držena v klidu silou v protifázi. Pro tento případ dostaneme rovnice (4) a (5).

$$m_0 \ddot{z}_0 + b_0 \dot{z}_0 + k_0 z_0 + \rho S m_{00} \ddot{z}_0 + \rho D w b_{00} \dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{00} z_0 = F_{00} \quad (4)$$

$$\rho S m_{k0} \ddot{z}_0 + \rho D w b_{k0} \dot{z}_0 + 1/2 \rho w^2 k_{k0} z_0 = F_{k0} \quad (5)$$

Analogicky pro případ B, uvedením k-té trubky do pohybu vzniknou rovnice (6) a (7).

$$\rho S m_{0k} \ddot{z}_k + \rho D w b_{0k} \dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{0k} z_k = F_{0k} \quad (6)$$

$$m_k \ddot{z}_k + b_k \dot{z}_k + k_k z_k + \rho S m_{kk} \ddot{z}_k + \rho D w b_{kk} \dot{z}_k + 1/2 \rho w^2 k_{kk} z_k = F_{kk} \quad (7)$$

Pro případ A i B vyjádříme výchylky a síly v komplexním tvaru. V případě A je základem výchylka 0-té trubky a k-tá trubka je fázově zpožděna o ϕ_k . Síla na 0-tou trubku je zpožděna o ϕ_{00} , a síla na k-tou trubku o ϕ_{k0} . Tím vzniknou vztahy (8). Stejně tak opět i pro případ B vzniknou vztahy (9).

$$\text{A: } z_0 = |z_0| e^{i\omega t}, \quad z_k = |z_k| e^{i(\omega t - \phi_k)} = 0, \quad F_{00} = |F_{00}| e^{i(\omega t - \Phi_{00})}, \quad F_{k0} = |F_{k0}| e^{i(\omega t - \Phi_{k0})} \quad (8)$$

$$\text{B: } z_k = |z_k| e^{i\omega t}, \quad z_0 = |z_0| e^{i(\omega t - \phi_0)} = 0, \quad F_{0k} = |F_{0k}| e^{i(\omega t - \Phi_{0k})}, \quad F_{kk} = |F_{kk}| e^{i(\omega t - \Phi_{kk})} \quad (9)$$

Dosazením těchto vztahů do rovnic (4) až (6) vzniknou rovnice (10) až (13).

$$-|MS_0| + i|MU_0| + |MP_0| - |AS_{00}| + i|AU_{00}| + |AP_{00}| = |F_{00}|e^{-i\Phi_{00}} \quad (10)$$

$$-|AS_{k0}| + i|AU_{k0}| + |AP_{k0}| = |F_{k0}|e^{-i\Phi_{k0}} \quad (11)$$

$$-|AS_{0k}| + i|AU_{0k}| + |AP_{0k}| = |F_{0k}|e^{-i\Phi_{0k}} \quad (12)$$

$$-|MS_k| + i|MU_k| + |MP_k| - |AS_{kk}| + i|AU_{kk}| + |AP_{kk}| = |F_{kk}|e^{-i\Phi_{kk}} \quad (13)$$

Porovnáním s předchozími vztahy teď můžeme vyjádřit moduly mechanických setrvačných, útlumových a pružných sil (14) a (15).

$$|MS_0| = \omega^2 m_0 |z_0| \quad |MU_0| = \omega b_0 |z_0| \quad |MP_0| = k_0 |z_0| \quad (14)$$

$$|MS_k| = \omega^2 m_k |z_k| \quad |MU_k| = \omega b_k |z_k| \quad |MP_k| = k_k |z_k| \quad (15)$$

Podobně moduly aerodynamických setrvačných, útlumových a pružných sil (16) až (19).

$$|AS_{00}| = \omega^2 \rho S m_{00} |z_0| \quad |AU_{00}| = \omega \rho D w b_{00} |z_0| \quad |AP_{00}| = 1/2 \rho w^2 k_{00} |z_0| \quad (16)$$

$$|AS_{k0}| = \omega^2 \rho S m_{k0} |z_0| \quad |AU_{k0}| = \omega \rho D w b_{k0} |z_0| \quad |AP_{k0}| = 1/2 \rho w^2 k_{k0} |z_0| \quad (17)$$

$$|AS_{0k}| = \omega^2 \rho S m_{0k} |z_k| \quad |AU_{0k}| = \omega \rho D w b_{0k} |z_k| \quad |AP_{0k}| = 1/2 \rho w^2 k_{0k} |z_k| \quad (18)$$

$$|AS_{kk}| = \omega^2 \rho S m_{kk} |z_k| \quad |AU_{kk}| = \omega \rho D w b_{kk} |z_k| \quad |AP_{kk}| = 1/2 \rho w^2 k_{kk} |z_k| \quad (19)$$

Mechanické síly, kterými se nezabýváme, eliminujeme tak, že provedeme měření nejprve v proudící tekutině a následně v neproudící. Obě při stejné frekvenci i amplitudě výchylek, což zaručí stejnou velikost mechanických sil. Následně provedeme rozdíl vzniklých rovnic, tím se vyruší mechanické síly a zůstanou nám aerodynamické.

Síly a fáze budeme značit při proudění indexem w :

$$|{}^w F_{00}| e^{-i {}^w \Phi_{00}} + |MS_0| + |AS_{00}| - i(|MU_0| + |AU_{00}|) - (|MP_0| + |AP_{00}|) = 0 \quad (20)$$

$$|{}^w F_{k0}| e^{-i {}^w \Phi_{k0}} + |AS_{k0}| - i|AU_{k0}| - |AP_{k0}| = 0 \quad (21)$$

$$|{}^w F_{0k}| e^{-i {}^w \Phi_{0k}} + |AS_{0k}| - i|AU_{0k}| - |AP_{0k}| = 0 \quad (22)$$

$$|{}^w F_{kk}| e^{-i {}^w \Phi_{kk}} + |MS_k| + |AS_{kk}| - i(|MU_k| + |AU_{kk}|) - (|MP_k| + |AP_{kk}|) = 0 \quad (23)$$

Síly a fáze budeme značit v klidu indexem 0:

$$\left| {}^0F_{00} \right| e^{-i {}^0\Phi_{00}} + |MS_0| + |AS_{00}| - i|MU_0| - |MP_0| = 0 \quad (24)$$

$$\left| {}^0F_{k0} \right| e^{-i {}^0\Phi_{k0}} + |AS_{k0}| = 0 \quad (25)$$

$$\left| {}^0F_{0k} \right| e^{-i {}^0\Phi_{0k}} + |AS_{0k}| = 0 \quad (26)$$

$$\left| {}^0F_{kk} \right| e^{-i {}^0\Phi_{kk}} + |MS_k| + |AS_{kk}| - i|MU_k| - |MP_k| = 0 \quad (27)$$

Z rovnic (25) a (26) můžeme z reálných složek získat moduly vazebních setrvačných sil $|AS_{k0}|$ a $|AS_{0k}|$. Pro získání zbylých modulů musíme provést rozdíl rovnic z různých stavů.

$$(20) - (24): \quad \left| {}^wF_{00} \right| e^{-i {}^w\Phi_{00}} - \left| {}^0F_{00} \right| e^{-i {}^0\Phi_{00}} - i|AU_{00}| - |AP_{00}| = 0 \quad (28)$$

$$(21) - (25): \quad \left| {}^wF_{k0} \right| e^{-i {}^w\Phi_{k0}} - \left| {}^0F_{k0} \right| e^{-i {}^0\Phi_{k0}} - i|AU_{k0}| - |AP_{k0}| = 0 \quad (29)$$

$$(22) - (26): \quad \left| {}^wF_{0k} \right| e^{-i {}^w\Phi_{0k}} - \left| {}^0F_{0k} \right| e^{-i {}^0\Phi_{0k}} - i|AU_{0k}| - |AP_{0k}| = 0 \quad (30)$$

$$(23) - (27): \quad \left| {}^wF_{kk} \right| e^{-i {}^w\Phi_{kk}} - \left| {}^0F_{kk} \right| e^{-i {}^0\Phi_{kk}} - i|AU_{kk}| - |AP_{kk}| = 0 \quad (31)$$

$$\text{Z reálné části (28):} \quad |AP_{00}| = \left| {}^wF_{00} \right| \cos {}^w\Phi_{00} - \left| {}^0F_{00} \right| \cos {}^0\Phi_{00} \quad (32)$$

$$\text{Z Imaginární části (28):} \quad |AU_{00}| = - \left| {}^kF_{00} \right| \sin {}^w\Phi_{00} + \left| {}^0F_{00} \right| \sin {}^0\Phi_{00} \quad (33)$$

$$\text{Z reálné části (25):} \quad |AS_{k0}| = - \left| {}^0F_{k0} \right| \cos {}^0\Phi_{k0} \quad (34)$$

Z rovnic (26), (29), (30) a (31) dostaneme analogickým postupem další aerodynamické moduly $|AS_{0k}|$, $|AP_{k0}|$, $|AP_{0k}|$, $|AP_{kk}|$, $|AU_{k0}|$, $|AU_{0k}|$, $|AU_{kk}|$, každý z nich má čtyři varianty podle orientace buzení (XX,XY,YX,YY). Ze získaných modulů sil se zpětně pomocí vztahů (16) až (18) určí tekutinové vazební koeficienty.

$$m_{k0} = |AS_{k0}| / (\omega^2 \rho S |z_0|), \quad m_{0k} = |AS_{0k}| / (\omega^2 \rho S |z_k|) \quad (35)$$

$$b_{00}, b_{k0}, b_{0k}, b_{kk} = |AU| / (\omega \rho D w |z|) \quad (36)$$

$$k_{00}, k_{k0}, k_{0k}, k_{kk} = 2|AP| / (\rho w^2 |z|) \quad (37)$$

2.3 Neznámé setrvačné vazební koeficienty

Chybí nám moduly $|AS_{00}|, |AS_{kk}|$, ze kterých bychom vyjádřili aerodynamické hmotnostní koeficienty m_{00} a m_{kk} . Ke stanovení těchto koeficientů je vyžadováno doplňkové měření v klidném prostředí s výrazně odlišnou hustotou tekutiny a při stejné frekvenci a amplitudě jako ve vzduchu. Protože již byla provedena měření ve vzduchu, nabízí se použití vody nebo vakua. Z těchto možností volíme vodu z důvodu nižších nákladů na výrobu měřicího zařízení. Použijeme rovnice (24) a (27) pro neproudící vzduch a přidáme rovnice s indexem H pro vodu.

$$\left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + |MS_0| + |HS_{00}| - i|MU_0| - |MP_0| = 0 \quad (38)$$

$$\left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + |MS_k| + |HS_{kk}| - i|MU_k| - |MP_k| = 0 \quad (39)$$

Rozdílem rovnic pro vzduch a vodu získáme zbývající vazební koeficienty.

$$(24) - (38): \quad \left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} - \left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + |AS_{00}| - |HS_{00}| = 0 \quad (40)$$

$$(27) - (39): \quad \left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} - \left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + |AS_{kk}| - |HS_{kk}| = 0 \quad (41)$$

$$(40): \quad \left| {}^0 F_{00} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{00}} - \left| {}^H F_{00} \right| e^{-i {}^H \Phi_{00}} + \omega^2 \rho S m_{00} |z_0| - \omega^2 \rho_H S m_{00} |z_0| = 0 \quad (42)$$

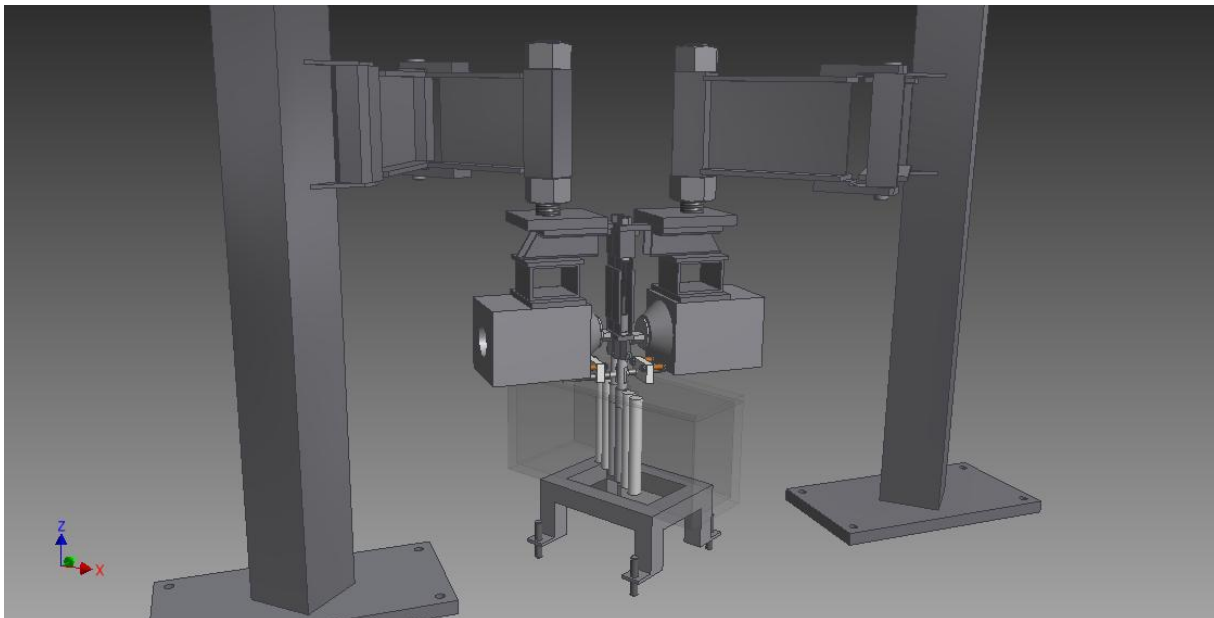
$$(41): \quad \left| {}^0 F_{kk} \right| e^{-i {}^0 \Phi_{kk}} - \left| {}^H F_{kk} \right| e^{-i {}^H \Phi_{kk}} + \omega^2 \rho S m_{kk} |z_k| - \omega^2 \rho_H S m_{kk} |z_k| = 0 \quad (43)$$

$$(42): \quad m_{00} = \frac{\left| {}^0 F_{00} \right| \cos {}^0 \Phi_{00} - \left| {}^H F_{00} \right| \cos {}^H \Phi_{00}}{\omega^2 S |z_0| (\rho_H - \rho)} \Rightarrow |AS_{00}| = \omega^2 \rho S m_{00} |z_0| \quad (44)$$

$$(43): \quad m_{kk} = \frac{\left| {}^0 F_{kk} \right| \cos {}^0 \Phi_{kk} - \left| {}^H F_{kk} \right| \cos {}^H \Phi_{kk}}{\omega^2 S |z_k| (\rho_H - \rho)} \Rightarrow |AS_{kk}| = \omega^2 \rho S m_{kk} |z_k| \quad (45)$$

3. Popis experimentálního zařízení a jeho vývoje

Naše měření má navázat na to již zmíněné, které bylo provedené v loňském roce. V něm byly definovány útlumové a pružné vazební koeficienty. Pro toto měření bylo nutno sestavit nové experimentální zařízení (viz. obrázek 1), ve kterém by se dalo pracovat se stejnou trubkovou řadou, jaká byla použita při měření v proudícím vzduchu. Podstatný rozdíl je umístění trubek do prostředí s vyšší hustotou oproti vzduchu. Zvolili jsme vodu a to pro její dostupnost a kvůli nižším nárokům na zabezpečení oproti oleji, který také připadal v úvahu. Makety trubek ponořené do vody musejí být zavěšeny na jednodimenzionálních vibrouzlech. K zajištění jednodimenzionálního buzení a nerotačního kmitání se síla z vibrouzlů do maket přenáší pomocí speciálně navrženého paralelogramu. Z důvodu nutnosti provedení osmi měření při čtyřech různých orientacích buzení je nutno zajistit polohovatelnost těchto budících systémů. Výchylky maket musejí být zaznamenávány pomocí bezdotykových snímačů výchylky. Nyní rozvedeme jednotlivé prvky zařízení a jejich funkci. Výkresy zmiňovaných prvků jsou v příloze.



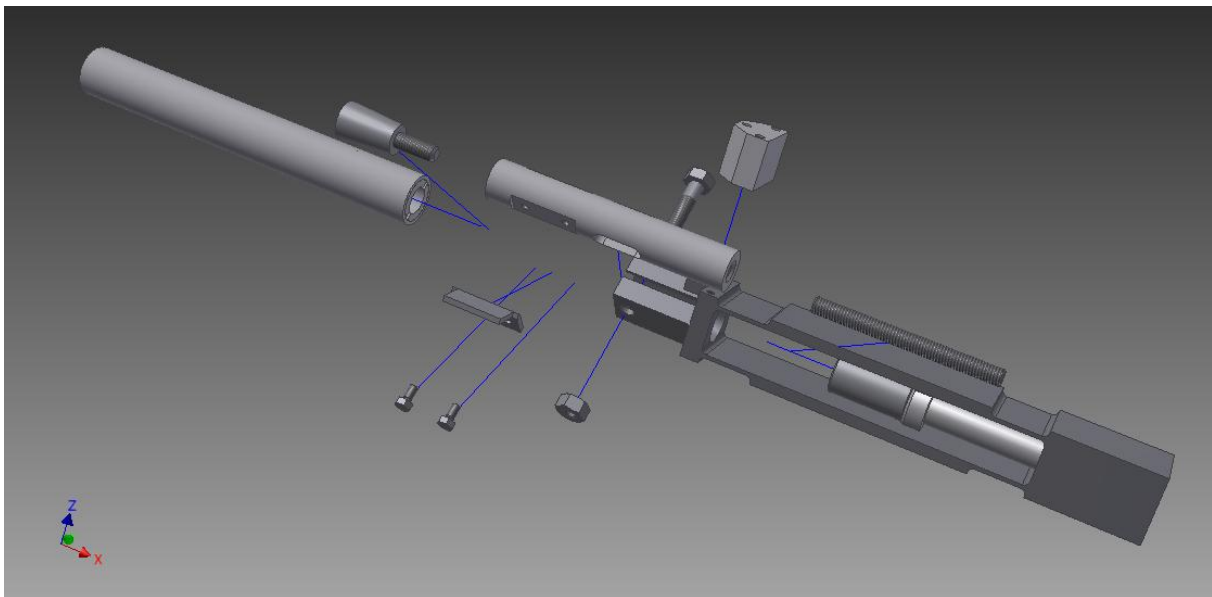
obrázek 1

3.1 Nádoba

Nádoba na vodu je převzatá ze staršího experimentu. Je vyrobena z plexisklových desek, které jsou staženy šrouby a spoje jsou vytmeleny, aby neprosakovali. Má lichoběžníkový půdorys, řada maket je v ní umístěna diagonálně. Výška vnitřního prostoru nádoby odpovídá délce maket. Pro snadné vypouštění vody je opatřena výpustnou hadicí s ventilem. Celá nádoba leží na naklopatelné stolici, díky které lze vyrovnat nerovnoběžnost os pevných a zavěšených maket. Naklápění stolice umožňují čtyři nohy vyrobené ze závitových tyčí.

3.2 Makety

Makety odpovídají svými vnějšími rozměry těm, které byly použity v aerodynamickém tunelu. To proto, abychom mohli naměřené hodnoty porovnat s již získanými hodnotami z aerodynamického tunelu. Při tvorbě parametrů trubkové řady bylo nutno dodržet poměr mezi roztečí os maket a jejich průměrem rovnající se hodnotě 1,4. Řada obsahuje šest maket, z nich jsou čtyři krajní pevně spojeny se dnem i víkem nádoby, aby pohybem nevyvolali aerodynamické síly v soustavě, které by ovlivnili dvě měřené prostřední makety. Prostřední makety jsou duté, vystružené ze slitiny hliníku a kvůli redukci hmotnosti mají směrem k volnému konci stupňovitě zmenšenou tloušťku stěny. Zavěšeným maketám je dodávána harmonická budící síla pomocí jednodimenzionálního elektrodynamického vibrosystému. Jednodimenzionální buzení je zajištěno pomocí paralelogramu, se kterým je maketa spojena pomocí hliníkové spojky (viz. obrázek 2). Do spojky je směrem z makety našroubován speciální šroub s kuželovou hlavou. Ten uvnitř makety rozevívá rozpěrné tělísko a vyvozený tlak drží stálou pozici makety vůči spojce. Opačný konec spojky je upevněn svěrným spojem v hlavě paralelogramu. Tlak pro sevření je vyvozen silou od šroubu s maticí.



obrázek 2

3.3 Vibrosystém

Harmonická budící síla pochází z elektromagnetického vibrátoru. Ten je složen z velké cívky, která je napájena pomocí zdroje stálého proudu a z malé cívky napájené z generátoru napětí. Generátor napětí má nastavitelnou frekvenci i napětí a signál z něj je cestou k malé cívkce zesílen zesilovačem. Vzniklé elektromagnetické pole rozkmitá malou cívku, která na své pozici uprostřed velké cívky drží díky připevnění k paralelogramu. Spolu s paralelogramem potom tvoří jednodimenzionální vibrosystém rozkmitávající maketu.

3.4 Paralelogram

Jde o důležitý prvek vibrosystému zajišťující nejen jeden směr kmitání maket ale také rovnoběžnost os maket při kmitání. Jedná se o součást sestávající ze základny, která je připevněna ke stojanu vibrátoru a planžet spojujících základnu s hlavou paralelogramu do které je upnutá spojka s maketou. Planžety paralelogramu jsou na svých koncích z vnější strany podfrézovány tak, aby měla součást tuhost zajišťující požadovanou amplitudu výchylky vibrosystému 0,18 [mm] při zatížení 5 [N]. Simulace zatížení v pevnostní analýze, provedené pomocí softwaru Inventor vypočetla kritické napětí na součásti. Podfrézování zužilo planžety natolik, že se hrozilo porušení paralelogramu při kmitání, které sice neprobíhá za velkých silových amplitud, ale četnost kmitů sníží statickou pevnost na pevnost trvalou. Proto byl zvolen materiál s youngovým modulem pružnosti rovným nebo vyšším hodnotě 2,15. Jedná se o nerezový materiál s vysokým, šestnácti procentním obsahem chromu. Jeho označení je 17 027.

Paralelogram byl vyroben na CNC frézce. Složitost součásti neumožňovala její výrobu na jedno upnutí. Největší vybrání uprostřed součásti bylo nutno provést s frézou malého poloměru, aby byl vytvořen navržený rádius v rozích vzniklého otvoru. Takto malá fréza neměla dostatečnou délku na průchod skrz celou šířku součásti, a proto se s ní ubral materiál do půlky součásti. Součást se následně obrátila ve svěráku a odfrézovala se druhá strana vybrání. Tímto postupem se pravděpodobně vlivem nepřesnosti svěráku a díky odtlačení frézy vytvořil podélný vrub, který byl tvořen posunutím dvou vytvořených stěn až o čtyři desetiny milimetru. Takovýto vrub je u cyklicky namáhané součásti nežádoucí.

V poslední fázi výroby byly jemnými brusnými tělísky ručně dobroušeny vnitřní strany planžet v místě podfrézování. Při broušení se odstranil vrub, který vznikl při výrobě. Broušením se také dosáhlo symetrické výchylky při zatížení paralelogramu v místě upnutí makety. To bylo provedeno tak, že se součást upnula do svěráku v horizontální poloze a hlava paralelogramu se zatížila závažím vyvolávajícím sílu 5 [N] ve zmíněném místě upnutí makety. Vzhledem k požadavku o vertikální posunutí $y=0,18$ [mm] v tomto místě znamenali jakékoliv drobné nepřesnosti součásti nesymetrickost posunu při zatěžování na opačnou stranu. Z předpokladu toho, že dolní planžeta je namáhána na tlak a horní na tah, kdy při namáhání na tlak je součást odolnější vůči posunutí. Při nedostatečném posunutí v daném směru se proto přednostně zabrousí planžeta namáhaná na tlak. Tento postup vedl k výrobě paralelogramů se symetrickou výchylkou. Tvar součásti zvláště tedy hloubka a délka podfrézování planžet byli určeny pomocí pevnostní analýzy v programu Inventor, kde byla celá součást namodelována. V softwaru bylo vytvořeno několik variant rozměrů podfrézování planžet a pro každý z nich se provedl výpočet posunutí pomocí softwaru. Následujícími výpočty jsem u každé varianty zjišťoval, zda je vhodná pro mé měření. Zde uvedu zvolené výpočty.

$$K = \frac{F}{y} = 27777,8 \left[\frac{N}{m} \right] \quad (46)$$

Kde: K tuhost součásti
 F zatěžující síla
 y posunutí od síly

$$f = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{K}{m_C + m_P}} \rightarrow m_C = \frac{K}{(2\pi f)^2} - m_P = 0,30977 \text{ [kg]} \quad (47)$$

Kde f vlastní frekvence (vypočtena v softwarové modální analýze $f=45\text{Hz}$)
 m_C celková hmotnost kmitající sestavy
 m_P přídavná hmotnost je (hmotnosti kapaliny vytlačené objemem trubky)

$$m'_Z = m_C + m_S = 0,0588 \text{ [kg]} \quad (48)$$

Kde m'_Z hmotnost závaží pro změnu frekvence
 m_S stávající hmotnost (hmotnost bez závaží)

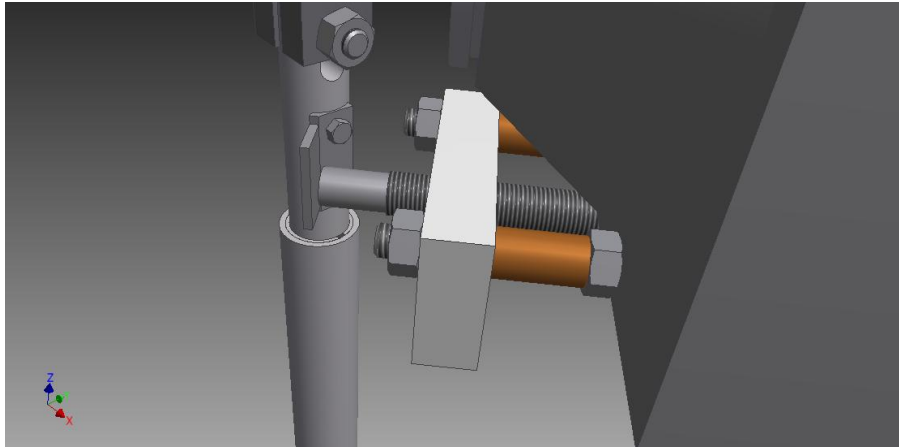
Hmotnost závaží ovlivňuje vlastní frekvenci soustav. Pro závaží bylo potřeba také vyšetřit, zda se těžiště hmoty kmitající části nachází na spodní straně vibrátoru, protože v opačném případě by se středisko kmitající hmoty nacházelo mezi planžetami paralelogramu a ten by neplnil správně svou funkci.

Vinnou omylu při tvorbě výrobního programu byla způsobena druhá výrobní vada. Na hlavě paralelogramu, do které se upíná spojka makety, byly navrženy tři díry. Z nich ta prostřední byla umístěna na vrcholu hrany čelisti, a proto bylo nutno ponechat v tomto místě materiál, o který by se opřela spojka paralelogramu s elektrickou cívkou vibrátoru. Toto uskupení děr však bylo vyrobeno na boční straně vibrátoru. Takovýto výrobek nebylo možné použít a museli se vyvrtat díry na správných pozicích. Problém byl s již zmiňovanou prostřední dírou, protože pro ni nebyla připravena rozšířená plocha pro dosednutí spojky. Musela se proto odfrézovat hrana čelisti do hloubky 1,5 [mm], a spojka mezi paralelogramem a cívkou musela být vyrobena nová. Nová spojka byla na pozici prostřední díry prodloužena o 1,5 [mm].

3.5 Bezdotykové snímače výchylky

Velikost okamžité výchylky kmitající makety je zjišťována pomocí bezdotykového snímače výchylky. Jedná se o indukční snímač, který reaguje na vzdálenost mezi drobnou elektrickou cívkou umístěnou v čelní části snímače, skrz kterou protéká proud a kovovou překážkou před čelem snímače. Změnou vzdálenosti se ovlivní magnetické pole cívky a tím se změní její napětí. Uprostřed těla snímače je elektronický obvod vytvářející lineární závislost mezi vzdáleností a napětím na výstupu snímače. Snímač je upevněn pomocí závitu k plastové destičce, která je pomocí dlouhých podložek, závitových tyčí a matic připevněna ke kovovému obalu zavěšeného vibrátoru. Snímající čelo míří na kovovou destičku připevněnou ke spojce makety. Největší výhodou tohoto uspořádání je ta, že během nastavování orientace 1D vibrosystémů se nemění vzdálenost mezi maketou, která je také připevněna k vibrátoru a

snímačem. Proto není nutno během měření opakovat pracovní nastavení vzdálenosti mezi snímačem a kovovou destičkou. Sestava jednoho snímače výchylky je vidět na obrázek 3.

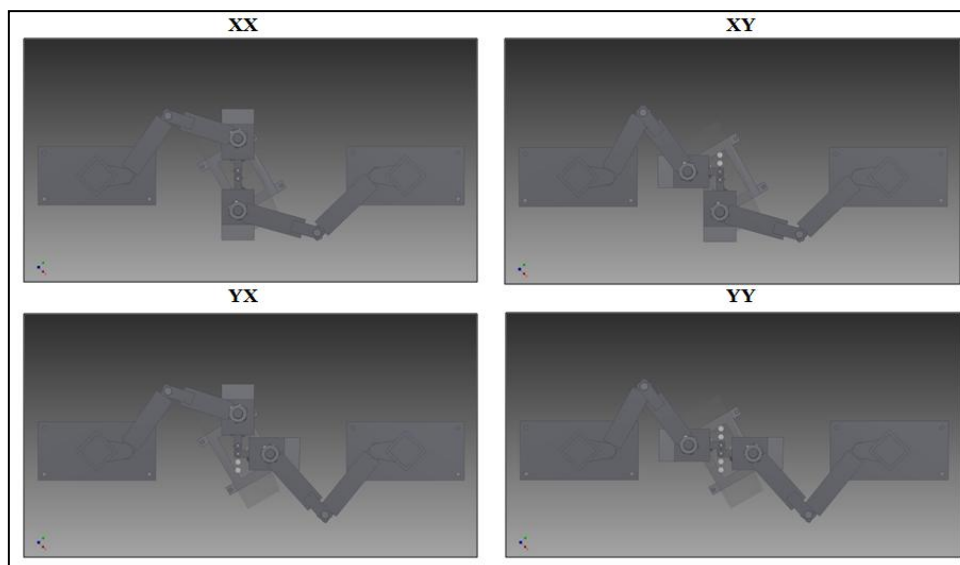


obrázek 3

3.6 Nastavitelná ramena

Pro získání všech variant sil působících mezi dvěma maketami je potřeba provést měření při čtyřech různých orientacích jednodimenzionálních vibrosystémů. Vibrosystémy tedy nemohou být zavěšeny na pevné nepohyblivé desce, která by zajistila zcela odlišnou vlastní frekvenci konstrukce a odstranila by možnost rušení během měření.

Pro polohování byla použita masivní ocelová ramena, každé rameno se skládá ze dvou částí spojených čepem. Poloha natočení lze aretovat bočními šrouby tlačícími na čepy. Na jedné straně této sestavy je pomocí silného závitu upevněn vibrosystém a na druhém konci je sestava usazena na čepu přivařenému k nosnému sloupu. Oba dva tyto sloupy jsou zakotveny do podlahy pomocí čtyř závitových tyčí zafixovaných ve vyvrtaných dírách chemickou kotvou. Na obrázek 4 jsou vidět všechny varianty nastavení v půdorysu



obrázek 4

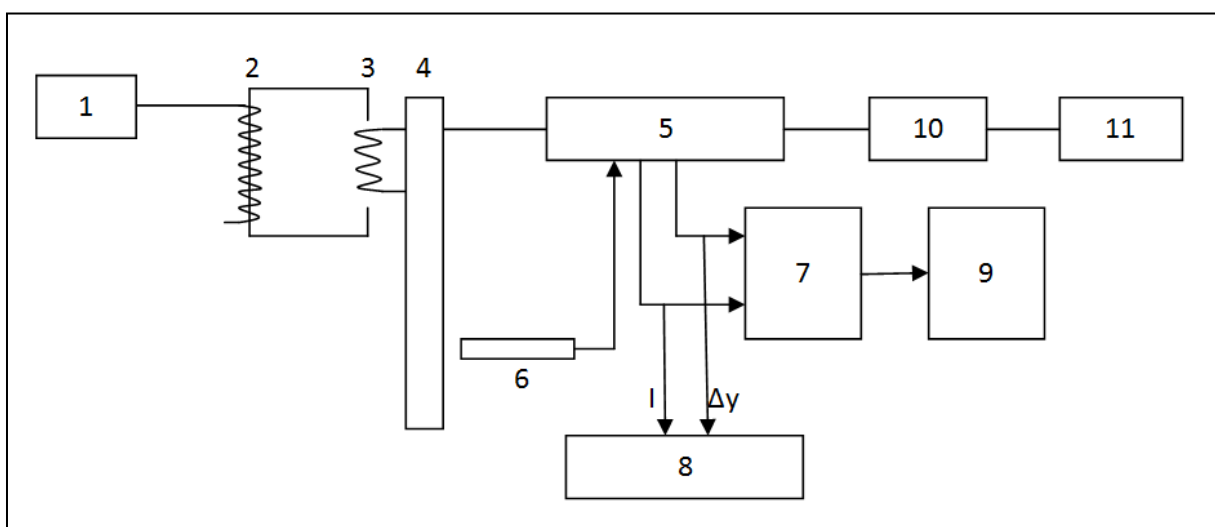
3.7 Elektronické zapojení

Použili jsme elektronické zařízení použité při měření na aerodynamickém tunelu. Při tomto měření se používali dvojdimenzionální vibrouzly. Výchylka se tedy musela měřit ve dvou směrech na každé pohyblivé maketě. Proto také byly použity čtyři snímače výchylky. Dvojdimenzionální vibrouzly jsou prostorově náročné, a proto museli být na aerodynamickém tunelu umístěny ze dvou stran měřicího prostoru, a to shora a zdola. V našem případě, jsme museli provést měření ve vodě, nemohli jsme proto umístit jeden z vibrouzlů pod nádobu, a nad nádobu se s obtížemi vešli pouze dva jednodimenzionální vibrouzly. V našem měření jsme proto použili jen polovinu napájecí a měřicí aparatury z původního měření.

Schéma na obrázek 5 s popisem v tabulka 1 ukazuje elektronické zapojení měřicího zařízení. Vibrátor je tvořen velkou cívkou napájenou ze zdroje stálého proudu. Ten udržuje konstantní proud i v době kdy je napětí na velké cívce ovlivněno změnou elektromagnetického pole.

Druhá část vibrátoru je malá cívka, ke které je připojena maketa trubky. Elektromagnetické pole mezi těmito cívkami vyvozuje sílu působící na maketu. Napájení malé cívky vyžadující harmonické napětí je realizováno složitěji. Harmonické napětí vzniká v generátoru s nastavitelnou frekvencí a napětím. Nastavení napětí však není dostatečně citlivé pro doladění požadované výchylky, a proto je za ním jemný potenciometr. Signál za těmito dvěma členy v není dostatečně silný a proto vstupuje do zesilovače, ze kterého je již napájena malá cívka vibrátoru.

Pro udržení konstantní výchylky je však nutno znát její okamžitou hodnotu. To zajišťuje bezdotykový snímač výchylky. Ten předává signál zpět do zesilovače, který obsahuje také regulátor. Z regulátoru jsou předávány informace o okamžitém proudu protékajícím malou cívkou a o okamžité výchylce o A/D převodníku, který posílá digitalizované informace do sběrnice PC. Pro rychlou kontrolu hodnot jsou oba signály jdoucí do A/D převodníku přivedeny i do osciloskopu.



obrázek 5

| | |
|----|---|
| 1 | Zdroj stálého proudu |
| 2 | Velká cívka elektromagnetického vibrátoru |
| 3 | Malá cívka elektromagnetického vibrátoru |
| 4 | Maketa trubky připevněná k malé cívce |
| 5 | Zesilovač s regulátorem |
| 6 | Bezdotykový snímač výchylky |
| 7 | A/D převodník |
| 8 | Kontrolní osciloskop |
| 9 | PC |
| 10 | Potenciometr pro jemné nastavení napájení |
| 11 | Generátor napětí |

tabulka 1

4. Měření

Na PC jsme data zpracovávali pomocí programu, který byl určen pro zmíněný experiment Jana Zajíce, který se zabýval aerodynamickými koeficienty na stejné trubkové řadě, ovšem umístěné v aerodynamickém tunelu. Tento program se jmenuje Visual basic. Vzhledem k použití jednodimenzionálního vibrouzlu namísto dvojdimenzionálního, který byl použit na aerodynamickém tunelu, bylo potřeba upravit systém načítání hodnot získaných ze zařízení do PC.

4.1 Nastavení bezdotykových snímačů.

Prvním krokem před jakýmkoliv měřením je nastavení odpovídající hodnoty napěťového výstupu bezdotykového snímače výchylky. Hodnota napěťového výstupu se mění s vzdáleností mezi čelem snímače a snímanou kovovou destičkou připevněnou na spojce makety. Nami nastavená hodnota má být na hodnotě 0 [V] s tolerancí 0,4 [V]. Přičemž přibližování k destičce vytváří kladné napětí a naopak oddalování destičky vytváří napětí záporné.

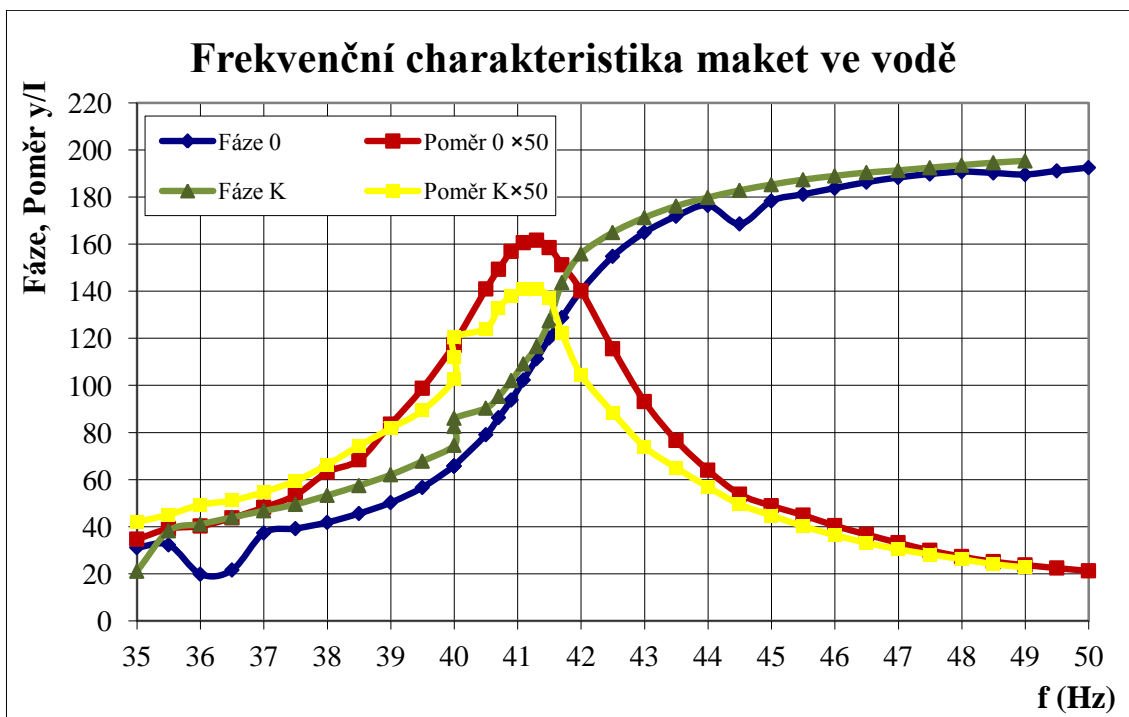
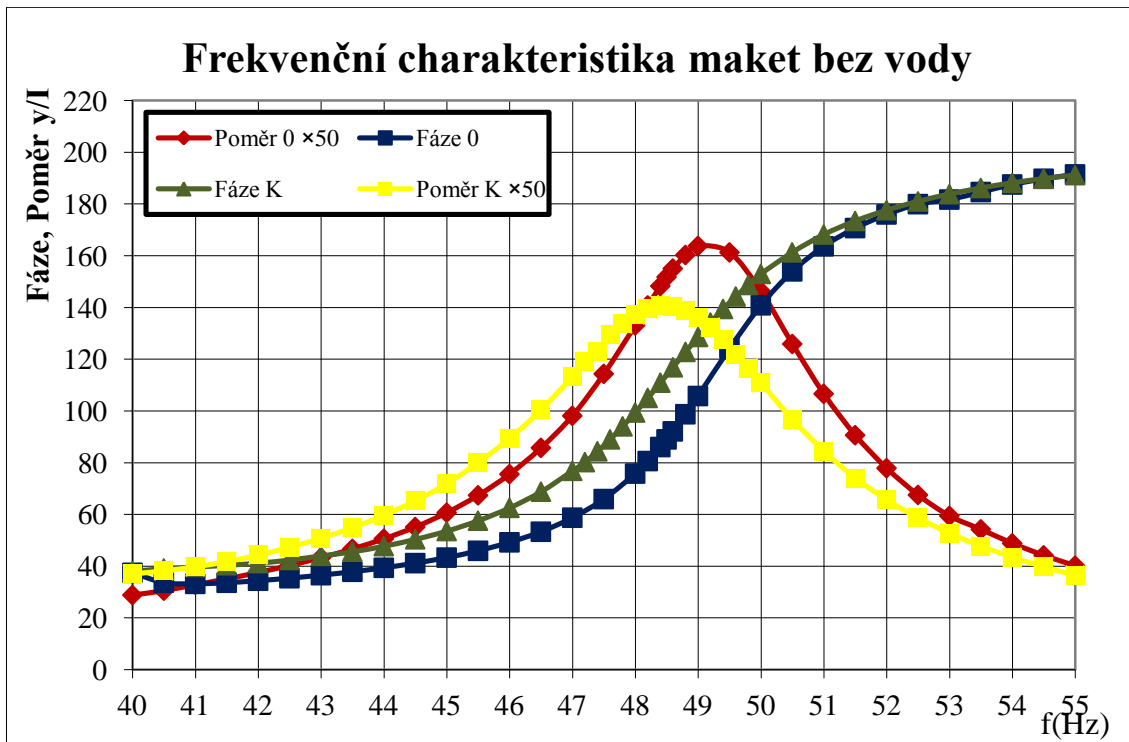
4.2 Frekvenční charakteristika

Na začátku měření je důležité zjistit chování kmitajícího systému v určitém spektru frekvencí. Toto chování nejlépe vystihuje frekvenční amplitudová charakteristika, která popisuje závislost fázového posunu mezi budícím proudem a výchylkou na frekvenci a také závislost amplitudy výchylky na frekvenci. Namísto vyjádření amplitudy pomocí čisté výchylky budeme používat více vypovídající poměr mezi výchylkou a proudem.

Frekvenční charakteristiku jsme sestavili tak, že jsme na generátoru harmonického signálu zvyšovali hodnotu frekvence, a pro každou z nich jsme se snažili ustálit maximální výchylku na hodnotu 0,4 [mm]. Ve chvíli kdy byla nastavená daná výchylka, jsme zaznamenali hodnotu fázového posunu a hodnotu poměru mezi výchylkou a proudem. Frekvenci jsme měnili s vzorkováním 0,5 [Hz] a v oblasti vlastní frekvence jsme zvolili jemnější vzorkování 0,2 [Hz]. Díky tomu jsme mohli přesněji vykreslit průběh na vrcholu křivky, který představuje vlastní frekvenci. Vlastní rezonanční frekvence je charakteristická fázovým posunem o devadesát stupňů a nejmenší potřebnou budící silou, pro nás tedy i proudem pro získání dané výchylky.

Frekvenční charakteristiky jsme provedli čtyři. Jednu pro každý vibrosystém ve vzduchu i vodě. V první charakteristice (graf 1) tedy vidíme charakteristiky vibrosystému 0-té a K-té makety v případě nádoby nenaplněné vodou. Je zde vidět odlišná pozice vrcholů křivek, která je důkazem odlišných vlastních frekvencí obou vibrosystémů. Tyto vlastní frekvence jsou však u sebe dostatečně blízko, abychom našli v jejich okolí dostatečně široké spektrum pro měření, ve kterém se nebude vyskytovat ani jedna vlastní frekvence. Další zajímavostí je nižší hodnota dosahované amplitudy na vibrosystému kmitajícím s K-tou maketou. Ta je způsobena vyšším mechanickým tlumením tohoto vibrosystému. Aby byl na grafu dostatečně znatelný rozsah hodnot fázového posunutí, tak jsme jejich hodnotu vynásobili padesáti.

Během měření na K-tém vibrosystému ve vzduchu došlo k jevu, kdy se sešla vlastní frekvence nastavitelného ramene, na kterém je zavěšen vibrátor s vlastní frekvencí vibrosystému. To se projevilo náhlým pádem hodnoty fázového posunu. Výsledky měření v tu chvíli nebyli použitelné. Bylo potřeba změnit frekvenci nastavitelného ramene. To se realizovalo umístěním hmoty v podobě plného ocelového kvádrů na nastavitelné rameno.



Hodnoty vlastních frekvencí jsou vidět v tabulka 2, kde je vidět, že vibrosystém s K-tou maketou má vždy nižší vlastní frekvenci a také, že ve vodním prostředí se projevila přídavná hmotnost vody, již zmíněná v rovnici (47). Ta se projevuje snížením vlastní frekvence.

| | Vlastní frekvence bez vody | Vlastní frekvence s vodou |
|-----------------------------|----------------------------|---------------------------|
| Vibrosystém s 0-tou maketou | 49,2 | 41,2 |
| Vibrosystém s K-tou maketou | 48,4 | 41,1 |

tabulka 2

4.3 Cejchování sil elektrodynamických vibrátorů

Soustava dílů zajišťující připojení makety k vibrátoru se při cejchování rozkmitá dvakrát. Poprvé s vlastní hmotností m a podruhé s hmotností zvýšenou o přídavné závaží Δm , které se našroubuje na připravenou závitovou tyč umístěnou v ose paralelogramu. V obou případech se regulátorem udržuje stejná frekvence, fáze a amplituda. Celkovou hmotnost vyjádříme rovnicí (49). Rovnice (50) a (51) jsou pohybovými rovnicemi

$$m_{\Delta} = m + \Delta m \quad (49)$$

$$(m_{\Delta} + \rho S m_{00}^{yy}) \ddot{y} + b \dot{y} + k y = F_{\Delta} \quad (50)$$

$$(m + \rho S m_{00}^{yy}) \ddot{y} + b \dot{y} + k y = F \quad (51)$$

Odečtením rovnic (50) a (51) a úpravou dostaneme (53).

$$(m_{\Delta} - m) \ddot{y} = F_{\Delta} - F \quad (52)$$

$$\Delta m \cdot \ddot{y} = F_{\Delta} - F \quad (53)$$

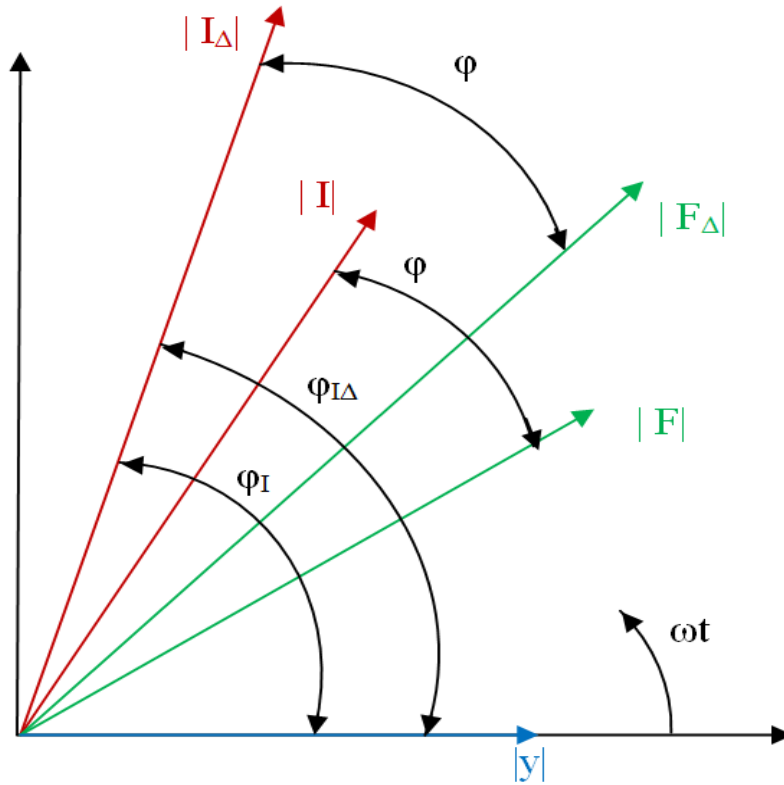
Proud I v elektrické cívce předchází sílu od vibrátoru F a tato síla předchází výchylku makety y . To vše je vidět na obrázek 6.

Při matematickém vyjádření fázového posunu je základem výchylka. Nyní vyjádříme nezatížený stav vibrace.

$$y = |y| e^{i\omega t} \quad (54)$$

$$I = |I| e^{i(\omega t + \varphi_I)} \quad (55)$$

$$F = |F| e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} = K |I| e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} \quad (56)$$



obrázek 6

Takto popsany stav změníme přidáním zátěže, která způsobí změnu výchylky při stejném napětí a frekvenci podržené generátorem. Potřebná zpětná regulace výchylky z nově vzniklé výchylky na původní $|y|$ je dosažena změnou proudu na $|I_{\Delta}|$ ten změní také sílu na $|F_{\Delta}|$. Hodnoty φ a ω předpokládáme stejné. Vzniká tedy stav se stejnou výchylkou ale změněnými parametry systému.

$$y = |y|e^{i\omega t} \quad (57)$$

$$I_{\Delta} = |I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta})} \quad (58)$$

$$F_{\Delta} = K|I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta} - \varphi)} \quad (59)$$

Cílem cejchování je stanovení konstanty K a fáze φ . Ty dostaneme dosazením (56), (57) a (59) do základního vztahu (53).

$$\Delta m|y|e^{i\omega t}(-\omega^2) = K|I_{\Delta}|e^{i(\omega t + \varphi_{I\Delta} - \varphi)} - K|I|e^{i(\omega t + \varphi_I - \varphi)} \quad (60)$$

Vztahy upravíme podle rovnic (62) a (63).

$$\Delta m|y|(-\omega^2) = K e^{-i\varphi} [|I_{\Delta}| e^{i\varphi_{I\Delta}} - |I| e^{i\varphi_I}] \quad \left| \cdot \frac{1}{K} e^{i\varphi} \frac{1}{\Delta m|y|(-\omega^2)} \right. \quad (61)$$

$$\frac{1}{K} e^{i\varphi} = - \frac{|I_{\Delta}| e^{i\varphi_{I\Delta}} - |I| e^{i\varphi_I}}{\Delta m|y|\omega^2} = \frac{|I| e^{i\varphi_I} - |I_{\Delta}| e^{i\varphi_{I\Delta}}}{\Delta m|y|\omega^2} \quad (62)$$

$$\frac{1}{K} (\cos \varphi + i \sin \varphi) = \frac{1}{\Delta m|y|\omega^2} [|I| (\cos \varphi_I + i \sin \varphi_I) - |I_{\Delta}| (\cos \varphi_{I\Delta} + i \sin \varphi_{I\Delta})] \quad (63)$$

Porovnáme reálné a imaginární části z rovnice (63) a zavedeme substituce A a B.

$$\text{Reálná část:} \quad \frac{1}{K} \cos \varphi = \frac{1}{\Delta m|y|\omega^2} [|I| \cos \varphi_I - |I_{\Delta}| \cos \varphi_{I\Delta}] = A \quad (64)$$

$$\text{Imaginární část:} \quad \frac{1}{K} \sin \varphi = \frac{1}{\Delta m|y|\omega^2} [|I| \sin \varphi_I - |I_{\Delta}| \sin \varphi_{I\Delta}] = B \quad (65)$$

Ze součtu jejich kvadrátů vypočteme cejchovní konstantu K a z podílu B/A fázi φ .

$$\frac{1}{K^2} = A^2 + B^2 \quad \Rightarrow \quad K = \pm \frac{1}{\sqrt{A^2 + B^2}} \quad (66)$$

$$\text{tg } \varphi = \frac{B}{A} \quad \Rightarrow \quad \varphi = \text{arctg } \frac{B}{A} \quad (67)$$

Při cejchování se projevuje vliv oteplení systému během měření, který způsobuje změnu stejnosměrného proudu procházejícího velkými cívkami vibrátorů. Kvůli těmto změnám je elektronická zpětnovazební smyčka vybavena stabilizátorem proudu, ten je umístěn v zesilovači.

Cejchovat budeme pouze ve vodě a při frekvenci 44 [Hz], jde o frekvenci, která ve frekvenční charakteristice vykazuje dobrou stabilitu. Proto jsme se rozhodli tuto frekvenci využít pro měření. Výše uvedené vztahy jsou zabudovány do programu vytvořeného v prostředí Visual Basic. S tímto programem jsme získali celkem čtyři dvojice cejchovních konstanty K a φ . Program byl napsán pro dvojdimenzionální vibrosystém. My tedy použijeme dvě dvojice cejchovních konstant. Pro každý vibrosystém máme konstanty ve směru x a y. Konstanty jsou uvedeny v tabulka 3. V tabulce vidíme, že hodnoty ve vibrosystémech 0 i K jsou v obou směrech podobné. To je způsobeno kmitáním pouze v jednom směru.

Tabulka cejchovních konstant

| | Konstanta K | Fáze φ |
|-------------------------------------|-------------|----------------|
| Hodnoty pro 0-tý vibrosystém směr x | 6,234 | 20,934 |
| Hodnoty pro 0-tý vibrosystém směr y | 6,422 | 20,084 |
| Hodnoty pro K-tý vibrosystém směr x | 5,689 | 21 |
| Hodnoty pro K-tý vibrosystém směr y | 5,657 | 21 |

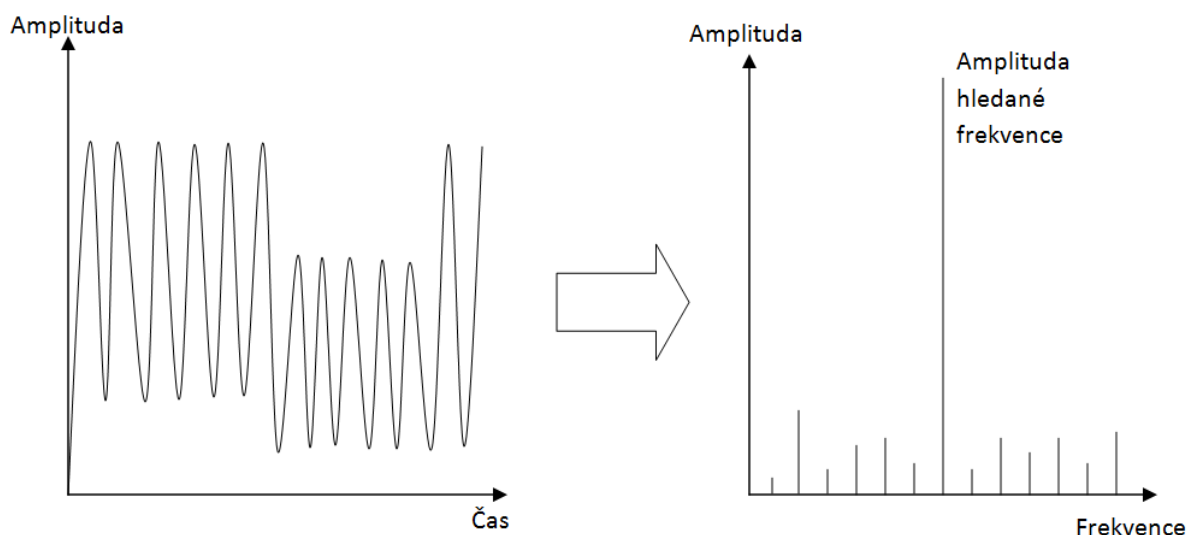
tabulka 3

4.4 Měření při jednodimenzionálním buzení

Měření samotné sestává ze tří základních kroků provedených dvakrát pro každou orientaci vibrosystému (XX,XY,YX,YY). Jednou pro buzení 0-té makety a podruhé pro buzení K-té makety. Tyto tři základní kroky jsou nejprve opětovné nastavení napětí na malé cívce, potom měření s použitím fourierovy transformace a nakonec výpočet aerodynamických setrvačných sil ze získaných rovnic.

Před každým měřením FFT (Fast Fourier Transformation neboli Rychlá Fourierova Transformace) je potřeba nastavit přesně amplitudu výchylky budící makety. To provedeme v kartě cejchování převzatého programu. Nastavujeme napájecí napětí pomocí generátoru harmonického signálu a jemného potenciometru dokud nám program neukáže námi používanou výchylku 0,4 mm.

Poté přepneme v programu do karty měření. Zde nastavíme novou řádku pro zápis, do ní zaznameneáme měřenou orientaci vibrosystémů a to, která maketa je buzená. Spuštěním měření se programem automaticky provede FFT. FFT vytvoří 32768 naměřených vzorků s vzorkovací frekvencí 2048. Obě tyto čísla jsou mocniny 2, to umožňuje použití FFT, která pracuje jen s 16369 vzorky a druhou polovinu vytvoří zrcadlením. Pomocí FFT přejdeme z amplitudového do frekvenčního prostoru, podobně jako je naznačeno na obrázek 7. Tím získáme ze signálu kombinujícího mnoho malých amplitud vzniklých chvěním všech částí měřícího zařízení právě tu hledanou amplitudu buzené makety. Poté program sestaví pohybovou rovnici popisující aktuální stav měřených maket. Každé takové měření se uloží v již popsané řádce.



obrázek 7

Vždy po provedení měření pro obě varianty buzení při dané orientaci vibrosystémů přepneme do karty výpočet, kde zadáme hodnoty cejchů a čísla řádků ve kterých jsme provedli fourierovu transformaci a sestavení příslušné pohybové rovnice. Použitím vztahů (25) a (26) program vyjádří hledané aerodynamické setrvačné síly. Námi naměřené hodnoty jsou vypsány v tabulka 4.

Tabulka aerodynamických setrvačných sil

| | |
|----------------|------------|
| $ AS_{XX 0K} $ | 0,2442 [N] |
| $ AS_{XX K0} $ | 0,1263 [N] |
| $ AS_{XY 0K} $ | 0,0788 [N] |
| $ AS_{XY K0} $ | 0,0746 [N] |
| $ AS_{YX 0K} $ | 0,0394 [N] |
| $ AS_{YX K0} $ | 0,0892 [N] |
| $ AS_{YY0K} $ | 0,0502 [N] |
| $ AS_{YY K0} $ | 0,0257 [N] |

tabulka 4

5. Výpočet vazebních koeficientů

Vazební koeficienty ze získaných aerodynamických setrvačných sil jsme vypočetli pomocí vztahů (35).

$$m_{XX\ 0K} = \frac{|AS_{XX\ 0K}|}{\omega^2 \rho S} = \frac{0,2442}{258,867^2 * 1000 * 0,15708} = 0,028999$$

$$\omega = 2\pi f_v = 2 * \pi * 41,2 = 258,867 \text{ [Hz]}$$

$$S = \frac{\pi D^2}{4} = \frac{\pi * 0,02^2}{4} = 3,14159 * 10^{-4} \text{ [m}^2\text{]}$$

Kde: ω úhlová frekvence
 ρ hustota vody (1000 kg/m³)
 f_v vlastní frekvence systému ve vodě (41,2 Hz)
 D průměr makety trubky (0,02 m)

Vypočtené vazební koeficienty jsou vidět v tabulka 5.

Tabulka aerodynamických setrvačných vazebních koeficientů

| | |
|--------------------------------|-----------------|
| $m_{XX\ 0K}$ | 0,028999 |
| $m_{XX\ K0}$ | 0,014998 |
| $m_{XY\ 0K}$ | 0,009357 |
| $m_{XY\ K0}$ | 0,008858 |
| $m_{YX\ 0K}$ | 0,004787 |
| $m_{YX\ K0}$ | 0,010592 |
| $m_{YY\ 0K}$ | 0,005961 |
| $m_{YY\ K0}$ | 0,003052 |

tabulka 5

V kapitole 2.3 metodiky měření aerodynamických sil jsme vyjádřili výpočty vazebních koeficientů popisujících působení maket na sebe samu. Indexově jsme varianty označovali jako 00 a KK. Pro získání těchto vazebních koeficientů se předpokládala dvojice měření ve vzduchu a ve vodě. Pro měření ve vzduchu však byli setrvačné vazební síly tak nevýrazné, že jsme nebyli schopni je zaznamenat pomocí dostupného vybavení. Jako možná alternativa pro získání setrvačných koeficientů 00 a KK se jeví provedení dvou měření ve vodě a v technickém lihu. Právě líh by mohl mít dostatečnou hustotu, abychom mohli naměřit setrvačné síly a současně by měl nižší hustotu oproti vodě, potom bychom mohli provést potřebné rozdíly rovnic viz. vztahy (40) a (41).

6. Závěr

V práci byla zpracována metodika měření aerodynamických vazebních koeficientů. Na základě metodiky byly určeny základní vlastnosti zařízení, na kterém by bylo možno provést měření, při kterém lze získat síly potřebné k výpočtu aerodynamických setrvačných vazebních koeficientů.

Toto zařízení bylo sestaveno částečně z již existujících dílů, přičemž některé z nich byly dle nutnosti upraveny a z nových dílů, které bylo potřeba vyrobit. Pro celé zařízení byl nakreslen výkres sestavy a dále také výkresy upravovaných i nových dílů. Nejpracnější byl návrh paralelogramu, který svými vlastnostmi rozhodoval o proveditelnosti měření. Výroba nových dílů byla velmi časově náročná a způsobila časové zpoždění celé práce. Z výrobního hlediska byl nejnáročnější opět paralelogram. Tento díl má velmi složitý tvar a navíc musel být vyroben z pevného materiálu a s vysokou přesností. I přes chybu ve výrobě, jejíž oprava také výrazně prodloužila čas potřebný na stavbu zařízení, se při měření kvalita provedení tohoto dílu ukázala jako výborná. Správný návrh a výroba způsobila úsporu času při nastavování měřicího zařízení.

Po sestavení zařízení a jeho propojení s elektronickými prvky se vytvořili frekvenční charakteristiky. Již tyto charakteristiky, mající předpokládaný tvar napovídali o použitelnosti zařízení pro hodnověrné měření. Z charakteristik se určili vlastní frekvence kmitajících systémů a vybrala se frekvence vhodná pro vlastní měření. Před měřením se vypočetli cejchovní konstanty určujících závislost proudu na výchylce.

Vlastním měřením jsme získali aerodynamické setrvačné síly, které jsme přepočtli na koeficienty. Výsledné setrvačné koeficienty vycházeli pro nastavení orientací XY, YX, YY v rozsahu hodnot 0,003 až 0,01, zatímco ve směru XX, kde dochází k působení výchylek přímo proti sobě, vycházeli hodnoty podle předpokladu vyšší. A to v rozsahu od 0,015 do 0,028. Z těchto výsledků bylo možné z důvodu charakteru jednodimenzionálního měření porovnat s odbornou literaturou pouze setrvačný koeficient s orientací XX, který byl ve zdrojích [IV] a [V] vypočten a odměřen na hodnotu 0,282. Naše výsledky jsou tedy desetkrát nižší. Důvod tohoto rozdílu se nám nepodařilo nalézt.

Stále je potřeba naměřit síly s indexováním 00 a KK, pro které je potřeba další měření v prostředí s jinou dostatečně vysokou hustotou.

7. Seznam použitých zdrojů

- [I] www.kke.zcu.cz/_files/veda_a_vyzkum/funkcni_vzorky/vzorek_004.doc: *Zařízení pro experimentální vyšetření vazebních aerodynamických sil mezi trubkovými maketami v proudu vzduchu*

- [II] KOKEISL M., LINHART J.: *Displacement mechanism forces in tube bundle. Sborník: 16. Světový kongres IMEKO 2000, Austrian Society for Measurement and Automation Wien, 9/2000, str. 119-125*

- [III] ZAJÍC J.: *Aerodynamické vazební síly na příčně obtékanou trubkovou řadu. 2012*

- [IV] CHEN S.S., ZHU S., JENDRZEJCZYK J. A.: *Fluid damping and fluid stiffness of a tube row in crossflow. Flow Induced Vibration PVP-Vol.273, ASME 1994*

- [V] CHEN S.S.: *Vibration of nuclear fuel bundles 1975*

8. Přílohy

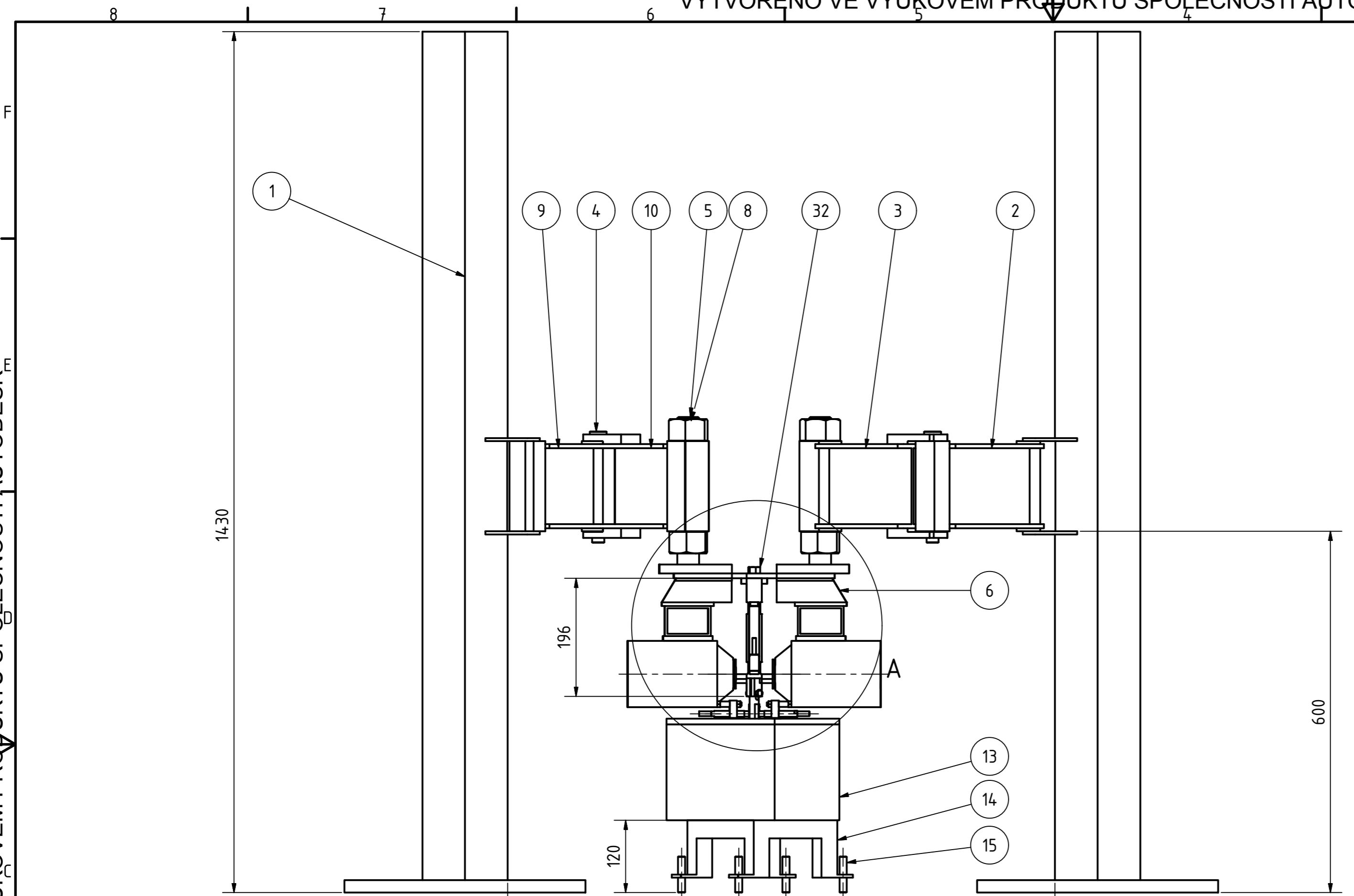
8.1 Výkresová dokumentace

- Sestava experimentálního zařízení s kusovníkem
- Sloup
- Rameno 1.1
- Rameno 1.2
- Rameno 2.1
- Rameno 2.2
- Čep
- Konzole rameno vibrátor
- Stojan vibrátoru
- Paralelogram
- Maketa
- Spojka maketa-paralelogram
- Spojka cívka-paralelogram
- Šroub maketa
- Rozpěrné tělísko
- Stojan snímače výchylky
- Snímaná destička
- Stolice

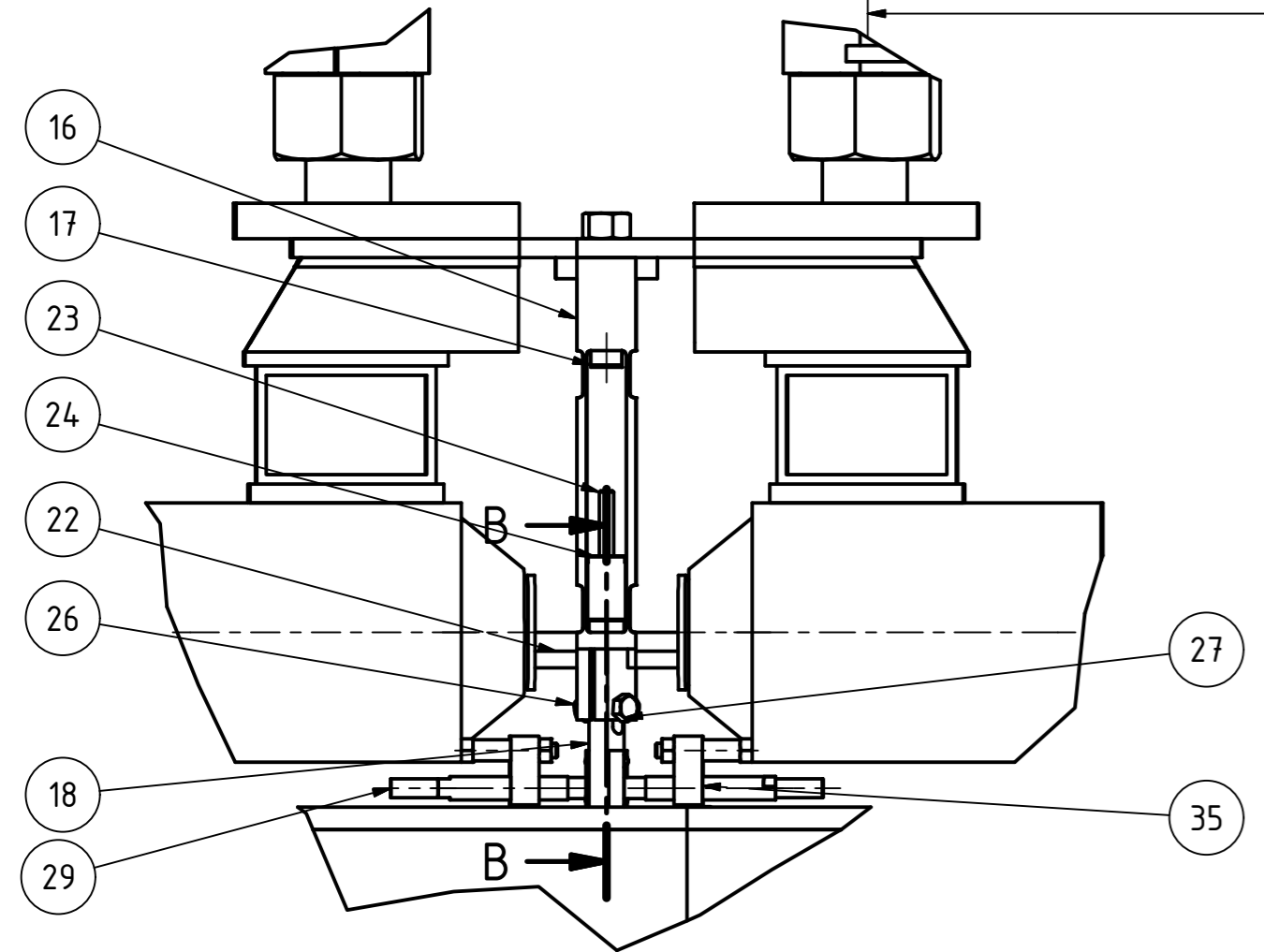
8.2 Hodnoty frekvenčních charakteristik

| Hodnoty frekvenční charakteristiky bez vody | | | | | | | | | | | |
|---|-------|------------|---------|----------|-----------|-----------------------------|-------|------------|---------|----------|-----------|
| Charakteristika 0-té makety | | | | | | Charakteristika K-té makety | | | | | |
| f(proudu) | Proud | f(amplit.) | Amplit. | Fáze | Poměr I/A | f(proudu) | Proud | f(amplit.) | Amplit. | Fáze | Poměr I/A |
| 40,000 | 0,693 | 40,001 | 0,400 | 37,457 | 0,577 | 40,000 | 0,548 | 40,002 | 0,405 | 38,056 | 0,740 |
| 40,500 | 0,659 | 40,500 | 0,402 | 33,634 | 0,611 | 40,499 | 0,523 | 40,502 | 0,400 | 39,090 | 0,765 |
| 41,000 | 0,613 | 41,002 | 0,403 | 33,186 | 0,657 | 41,000 | 0,500 | 41,000 | 0,398 | 39,737 | 0,796 |
| 41,500 | 0,571 | 41,500 | 0,401 | 33,617 | 0,702 | 41,500 | 0,478 | 41,499 | 0,399 | 40,392 | 0,836 |
| 42,000 | 0,535 | 42,000 | 0,402 | 34,405 | 0,752 | 42,000 | 0,450 | 42,000 | 0,400 | 41,215 | 0,887 |
| 42,499 | 0,497 | 42,499 | 0,401 | 35,376 | 0,806 | 42,499 | 0,421 | 42,500 | 0,399 | 42,423 | 0,947 |
| 43,000 | 0,465 | 43,001 | 0,403 | 36,544 | 0,866 | 42,999 | 0,392 | 43,002 | 0,399 | 44,022 | 1,017 |
| 43,500 | 0,430 | 43,500 | 0,402 | 37,854 | 0,934 | 43,500 | 0,365 | 43,499 | 0,400 | 45,613 | 1,098 |
| 44,000 | 0,394 | 43,995 | 0,399 | 39,396 | 1,012 | 44,000 | 0,336 | 43,998 | 0,400 | 47,763 | 1,193 |
| 44,500 | 0,363 | 44,499 | 0,401 | 41,193 | 1,103 | 44,500 | 0,307 | 44,500 | 0,400 | 50,404 | 1,306 |
| 45,000 | 0,332 | 44,999 | 0,403 | 43,336 | 1,214 | 45,001 | 0,281 | 45,002 | 0,404 | 53,602 | 1,438 |
| 45,500 | 0,300 | 45,499 | 0,404 | 45,966 | 1,348 | 45,499 | 0,250 | 45,502 | 0,401 | 57,595 | 1,602 |
| 46,000 | 0,266 | 46,000 | 0,403 | 49,236 | 1,512 | 46,000 | 0,225 | 46,000 | 0,401 | 62,579 | 1,788 |
| 46,500 | 0,235 | 46,501 | 0,402 | 53,331 | 1,715 | 46,501 | 0,201 | 46,502 | 0,403 | 68,812 | 2,010 |
| 47,000 | 0,205 | 47,000 | 0,403 | 58,762 | 1,963 | 47,000 | 0,177 | 46,998 | 0,402 | 76,880 | 2,267 |
| 47,500 | 0,176 | 47,500 | 0,403 | 65,961 | 2,287 | 47,200 | 0,168 | 47,200 | 0,401 | 80,244 | 2,384 |
| 48,000 | 0,152 | 47,999 | 0,403 | 75,810 | 2,662 | 47,399 | 0,163 | 47,402 | 0,400 | 84,425 | 2,458 |
| 48,200 | 0,142 | 48,199 | 0,400 | 80,646 | 2,816 | 47,600 | 0,156 | 47,599 | 0,403 | 89,032 | 2,588 |
| 48,400 | 0,135 | 48,399 | 0,401 | 86,070 | 2,966 | 47,800 | 0,150 | 47,800 | 0,402 | 94,061 | 2,674 |
| 48,500 | 0,132 | 48,500 | 0,401 | 89,029 | 3,036 | 48,000 | 0,147 | 48,001 | 0,404 | 99,421 | 2,743 |
| 48,599 | 0,129 | 48,599 | 0,401 | 92,125 | 3,101 | 48,200 | 0,145 | 48,199 | 0,403 | 105,059 | 2,789 |
| 48,799 | 0,126 | 48,800 | 0,403 | 98,749 | 3,206 | 48,401 | 0,143 | 48,402 | 0,401 | 110,945 | 2,814 |
| 48,999 | 0,122 | 49,001 | 0,401 | 105,790 | 3,276 | 48,600 | 0,143 | 48,601 | 0,402 | 116,909 | 2,809 |
| 49,501 | 0,125 | 49,498 | 0,402 | 124,213 | 3,226 | 48,801 | 0,145 | 48,803 | 0,402 | 122,844 | 2,779 |
| 50,000 | 0,137 | 49,999 | 0,399 | 140,861 | 2,925 | 49,001 | 0,148 | 49,003 | 0,403 | 128,624 | 2,722 |
| 50,500 | 0,159 | 50,501 | 0,399 | 153,981 | 2,518 | 49,198 | 0,151 | 49,200 | 0,401 | 134,167 | 2,648 |
| 50,999 | 0,187 | 51,000 | 0,399 | 163,655 | 2,133 | 49,399 | 0,157 | 49,399 | 0,401 | 139,450 | 2,555 |
| 51,500 | 0,220 | 51,498 | 0,399 | 170,716 | 1,813 | 49,600 | 0,165 | 49,599 | 0,402 | 144,252 | 2,434 |
| 52,000 | 0,257 | 52,001 | 0,401 | 175,982 | 1,558 | 49,800 | 0,173 | 49,802 | 0,404 | 148,716 | 2,332 |
| 52,500 | 0,295 | 52,500 | 0,399 | 179,965 | 1,351 | 50,000 | 0,181 | 49,999 | 0,402 | 152,989 | 2,217 |
| 53,000 | 0,337 | 53,000 | 0,401 | -178,262 | 1,189 | 50,498 | 0,208 | 50,498 | 0,403 | 161,316 | 1,936 |
| 53,500 | 0,369 | 53,496 | 0,401 | -175,368 | 1,085 | 51,001 | 0,239 | 50,999 | 0,404 | 168,216 | 1,690 |
| 54,000 | 0,409 | 54,000 | 0,400 | -172,453 | 0,977 | 51,500 | 0,270 | 51,499 | 0,400 | 173,442 | 1,482 |
| 54,500 | 0,452 | 54,500 | 0,399 | -170,239 | 0,884 | 52,000 | 0,306 | 52,000 | 0,402 | 177,620 | 1,314 |
| 55,000 | 0,497 | 55,002 | 0,400 | -168,551 | 0,804 | 52,501 | 0,345 | 52,500 | 0,405 | -178,987 | 1,173 |
| | | | | | | 53,000 | 0,379 | 53,000 | 0,401 | -176,166 | 1,056 |
| | | | | | | 53,500 | 0,418 | 53,499 | 0,399 | -173,811 | 0,956 |
| | | | | | | 54,000 | 0,459 | 54,001 | 0,399 | -171,817 | 0,870 |
| | | | | | | 54,500 | 0,504 | 54,498 | 0,401 | -170,193 | 0,796 |
| | | | | | | 55,000 | 0,549 | 55,000 | 0,401 | -168,831 | 0,731 |

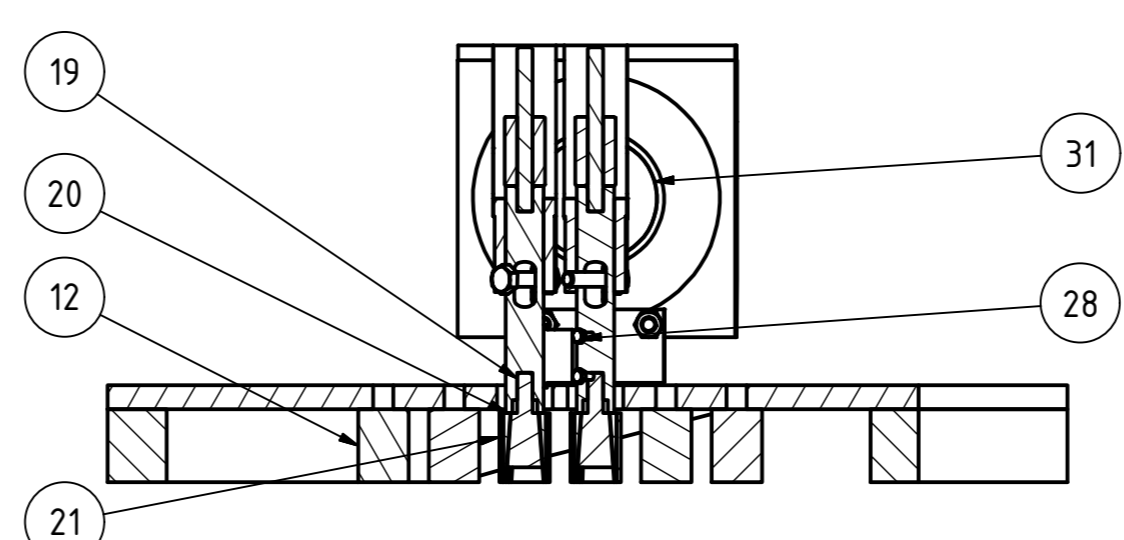
| Hodnoty frekvenční charakteristiky s vodou | | | | | | | | | | | |
|--|-------|------------|---------|----------|-----------|-----------------------------|-------|------------|---------|----------|-----------|
| Charakteristika 0-té makety | | | | | | Charakteristika K-té makety | | | | | |
| f(proudu) | Proud | f(amplit.) | Amplit. | Fáze | Poměr I/A | f(proudu) | Proud | f(amplit.) | Amplit. | Fáze | Poměr I/A |
| 35,000 | 0,563 | 35,003 | 0,391 | 31,095 | 0,694 | 35,000 | 0,476 | 37,120 | 0,400 | 21,061 | 0,840 |
| 35,500 | 0,522 | 35,501 | 0,409 | 32,252 | 0,784 | 35,500 | 0,452 | 35,502 | 0,408 | 38,234 | 0,902 |
| 36,000 | 0,493 | 38,119 | 0,397 | 19,800 | 0,806 | 36,000 | 0,416 | 36,001 | 0,409 | 41,044 | 0,985 |
| 36,500 | 0,451 | 38,585 | 0,395 | 21,586 | 0,875 | 36,500 | 0,389 | 36,496 | 0,397 | 43,958 | 1,022 |
| 37,000 | 0,425 | 37,000 | 0,409 | 37,305 | 0,964 | 37,000 | 0,360 | 37,000 | 0,394 | 46,737 | 1,094 |
| 37,500 | 0,371 | 37,499 | 0,396 | 39,166 | 1,069 | 37,500 | 0,336 | 37,500 | 0,399 | 49,454 | 1,189 |
| 38,000 | 0,310 | 37,999 | 0,392 | 41,791 | 1,264 | 38,001 | 0,305 | 38,000 | 0,405 | 53,283 | 1,326 |
| 38,501 | 0,292 | 38,498 | 0,399 | 45,577 | 1,369 | 38,501 | 0,274 | 38,501 | 0,407 | 57,437 | 1,487 |
| 39,000 | 0,245 | 39,002 | 0,409 | 50,211 | 1,671 | 39,000 | 0,244 | 39,000 | 0,399 | 62,051 | 1,636 |
| 39,500 | 0,204 | 39,498 | 0,403 | 56,649 | 1,976 | 39,500 | 0,226 | 39,500 | 0,404 | 67,806 | 1,787 |
| 40,000 | 0,168 | 39,997 | 0,394 | 65,707 | 2,341 | 40,001 | 0,199 | 39,995 | 0,408 | 74,552 | 2,052 |
| 40,000 | 0,168 | 39,997 | 0,394 | 65,707 | 2,341 | 40,499 | 0,179 | 40,498 | 0,400 | 82,559 | 2,239 |
| 40,000 | 0,170 | 39,996 | 0,401 | 65,833 | 2,350 | 40,701 | 0,169 | 40,699 | 0,407 | 86,064 | 2,408 |
| 40,501 | 0,142 | 40,500 | 0,400 | 79,055 | 2,820 | 40,902 | 0,163 | 40,902 | 0,405 | 90,338 | 2,483 |
| 40,701 | 0,136 | 40,697 | 0,406 | 86,337 | 2,987 | 41,096 | 0,150 | 41,102 | 0,400 | 95,340 | 2,658 |
| 40,900 | 0,129 | 40,901 | 0,404 | 93,806 | 3,139 | 41,299 | 0,148 | 41,299 | 0,409 | 102,057 | 2,762 |
| 41,092 | 0,125 | 41,099 | 0,403 | 102,278 | 3,213 | 41,502 | 0,144 | 41,505 | 0,404 | 109,116 | 2,816 |
| 41,301 | 0,124 | 41,301 | 0,399 | 111,312 | 3,234 | 41,701 | 0,142 | 41,700 | 0,402 | 116,516 | 2,819 |
| 41,500 | 0,127 | 41,498 | 0,402 | 120,178 | 3,171 | 41,996 | 0,147 | 41,997 | 0,404 | 127,442 | 2,745 |
| 41,699 | 0,132 | 41,699 | 0,400 | 128,806 | 3,025 | 42,500 | 0,167 | 42,500 | 0,407 | 143,642 | 2,444 |
| 42,000 | 0,141 | 41,999 | 0,395 | 140,233 | 2,804 | 42,997 | 0,191 | 42,995 | 0,399 | 155,880 | 2,090 |
| 42,499 | 0,173 | 42,502 | 0,399 | 154,818 | 2,312 | 43,500 | 0,229 | 43,498 | 0,406 | 164,949 | 1,768 |
| 42,999 | 0,215 | 43,000 | 0,401 | 164,951 | 1,863 | 44,000 | 0,268 | 43,997 | 0,396 | 171,278 | 1,477 |
| 43,499 | 0,264 | 43,499 | 0,404 | 171,870 | 1,533 | 44,501 | 0,313 | 44,503 | 0,406 | 176,175 | 1,299 |
| 43,999 | 0,317 | 43,998 | 0,406 | 176,479 | 1,280 | 45,000 | 0,358 | 44,999 | 0,407 | 179,815 | 1,137 |
| 44,500 | 0,380 | 46,573 | 0,409 | 168,611 | 1,076 | 45,500 | 0,405 | 45,504 | 0,401 | -177,151 | 0,989 |
| 45,000 | 0,407 | 45,000 | 0,398 | 178,341 | 0,978 | 46,001 | 0,449 | 45,997 | 0,402 | -174,712 | 0,894 |
| 45,501 | 0,441 | 45,501 | 0,396 | -178,810 | 0,898 | 46,500 | 0,504 | 46,503 | 0,405 | -172,616 | 0,803 |
| 45,999 | 0,490 | 45,994 | 0,397 | -176,222 | 0,809 | 46,995 | 0,557 | 47,002 | 0,405 | -171,018 | 0,727 |
| 46,500 | 0,541 | 46,499 | 0,397 | -173,670 | 0,734 | 47,500 | 0,614 | 47,501 | 0,406 | -169,592 | 0,662 |
| 46,999 | 0,598 | 46,998 | 0,397 | -171,692 | 0,664 | 48,001 | 0,655 | 48,003 | 0,398 | -168,683 | 0,607 |
| 47,499 | 0,664 | 47,498 | 0,398 | -170,193 | 0,599 | 48,500 | 0,708 | 48,494 | 0,399 | -167,529 | 0,563 |
| 48,000 | 0,726 | 47,997 | 0,397 | -169,206 | 0,546 | 49,000 | 0,764 | 48,997 | 0,399 | -166,442 | 0,523 |
| 48,500 | 0,792 | 48,499 | 0,398 | -169,747 | 0,503 | 49,500 | 0,833 | 49,499 | 0,400 | -165,405 | 0,480 |
| 49,000 | 0,838 | 49,001 | 0,398 | -170,415 | 0,475 | 49,999 | 0,890 | 50,000 | 0,403 | -164,641 | 0,453 |
| 49,500 | 0,900 | 49,497 | 0,405 | -168,870 | 0,449 | | | | | | |
| 50,000 | 0,936 | 50,002 | 0,397 | -167,479 | 0,425 | | | | | | |



A (1 : 3)

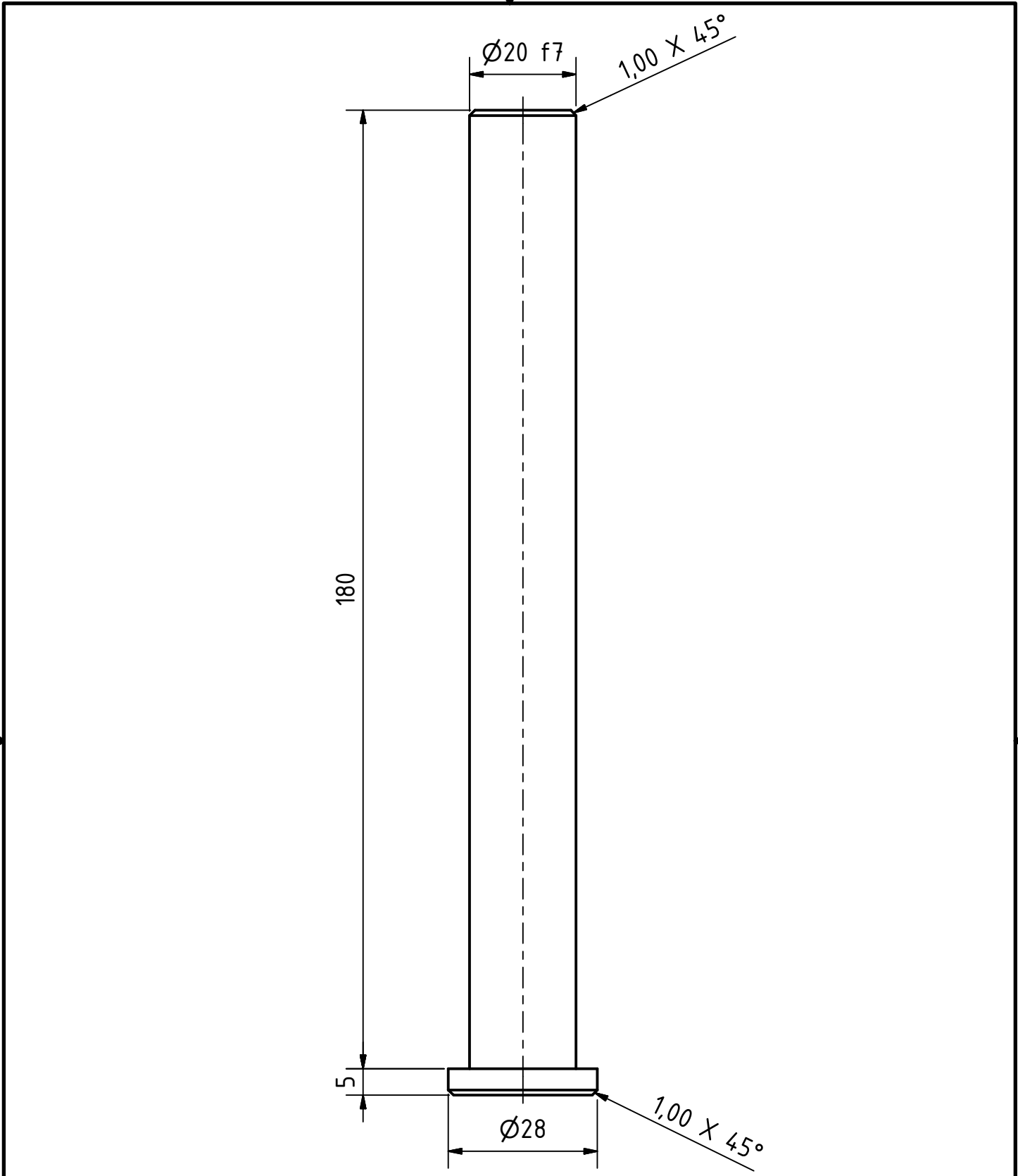


B-B (1 : 3)



| | | KUSOVNÍK | |
|--------|----|------------------------------|--|
| POZICE | KS | NÁZEV SOUČÁSTI | |
| 1 | 2 | Sloup | |
| 2 | 1 | Rameno 1.1 | |
| 3 | 1 | Rameno 1.2 | |
| 4 | 2 | Čep | |
| 5 | 2 | Konzole rameno-vibrátor | |
| 6 | 2 | Stojan vibrátoru | |
| 7 | 2 | Vibrátor | |
| 8 | 4 | Matice M36 x 4 | |
| 9 | 1 | Rameno 2.1 | |
| 10 | 1 | Rameno 2.2 | |
| 11 | 1 | Víko | |
| 12 | 4 | Pevná maketa | |
| 13 | 1 | Nádoba | |
| 14 | 1 | Stolice | |
| 15 | 4 | Závitová noha | |
| 16 | 2 | Paralelogram | |
| 17 | 2 | Šroub paralelogramu | |
| 18 | 2 | Spojka maketa-paralelogram | |
| 19 | 2 | Šroub maketa | |
| 20 | 2 | Rozpěrné tělísko | |
| 21 | 2 | Maketa | |
| 22 | 2 | Spojka cívka-paralelogram | |
| 23 | 2 | Závitová tyč | |
| 24 | 2 | Závaží | |
| 25 | 2 | Snímaná destička | |
| 26 | 10 | Matice M6 x 1 | |
| 27 | 2 | Šroub M6 x 1 x 25 | |
| 28 | 4 | Šroub M3 x 0,5 x 6 | |
| 29 | 2 | Snímač výchylky | |
| 31 | 2 | Malá cívka | |
| 32 | 2 | Matice M12 x 1,75 | |
| 33 | 4 | Závitová tyč stojanu snímače | |
| 34 | 4 | Trubička stojanu snímače | |
| 35 | 2 | Stojan snímče výchylky | |

| | | | | | |
|-------------------------|--|--------------|--|----------|----|
| | | Datum | | Jméno | |
| | | 22.6.2013 | | Jan Uher | |
| | | Zkontrolován | | | |
| | | Norma | | | |
| Experimentální zařízení | | | | | |
| | | | | | 1 |
| | | | | | A2 |



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK



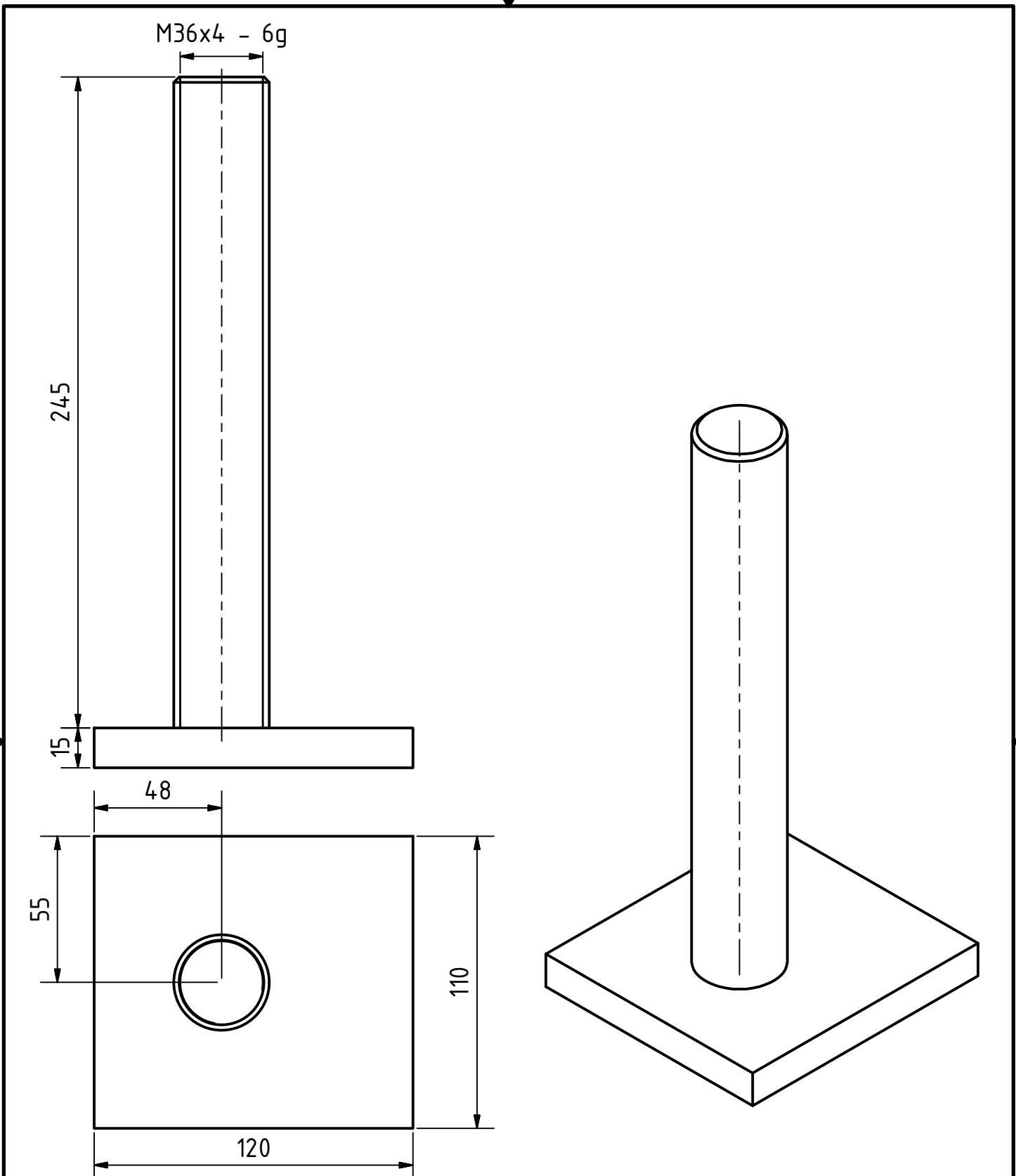
| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|--------------|-----------|----------|-----|----|---|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Čep | | |
| | | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | | |
| | | | Zkontrolován | | | | | |
| | | | Norma | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | 1 |
| | | | | | | | A4 | |





VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

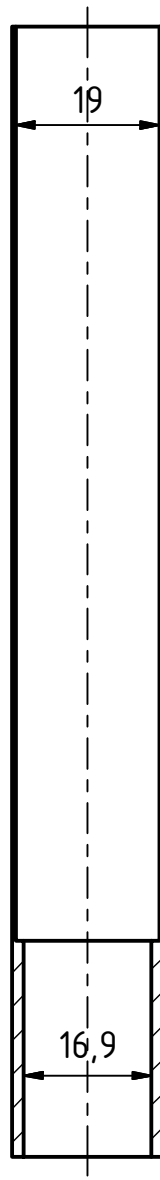
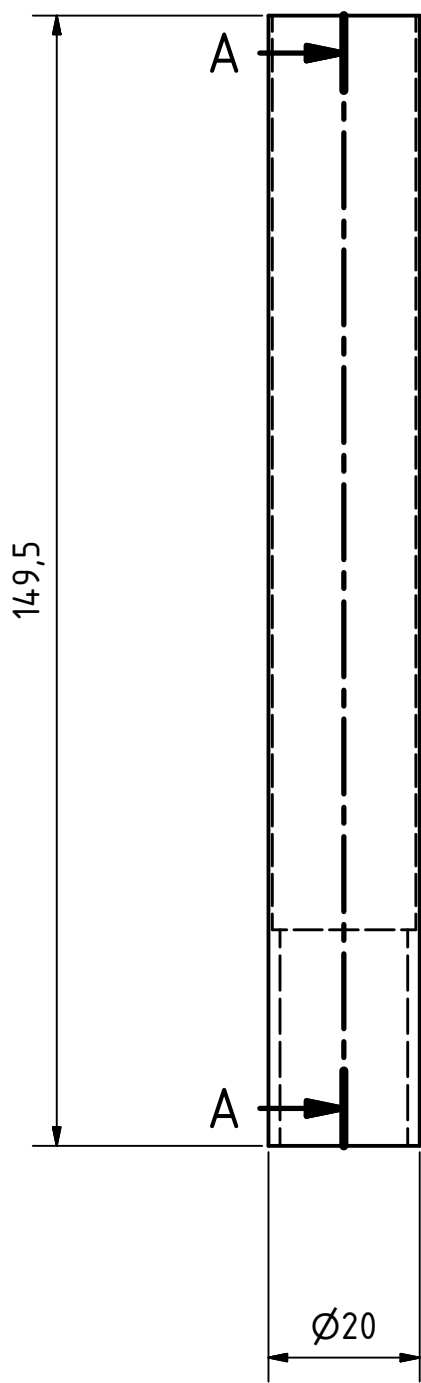


| | | | | | | | |
|------|-------|-------|--------------|-----------|----------|-------------------------|----|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Konzole rameno-vibrátor | |
| | | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | |
| | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | 1 |
| | | | | | | | A4 |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | |





A-A (1 : 1)



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

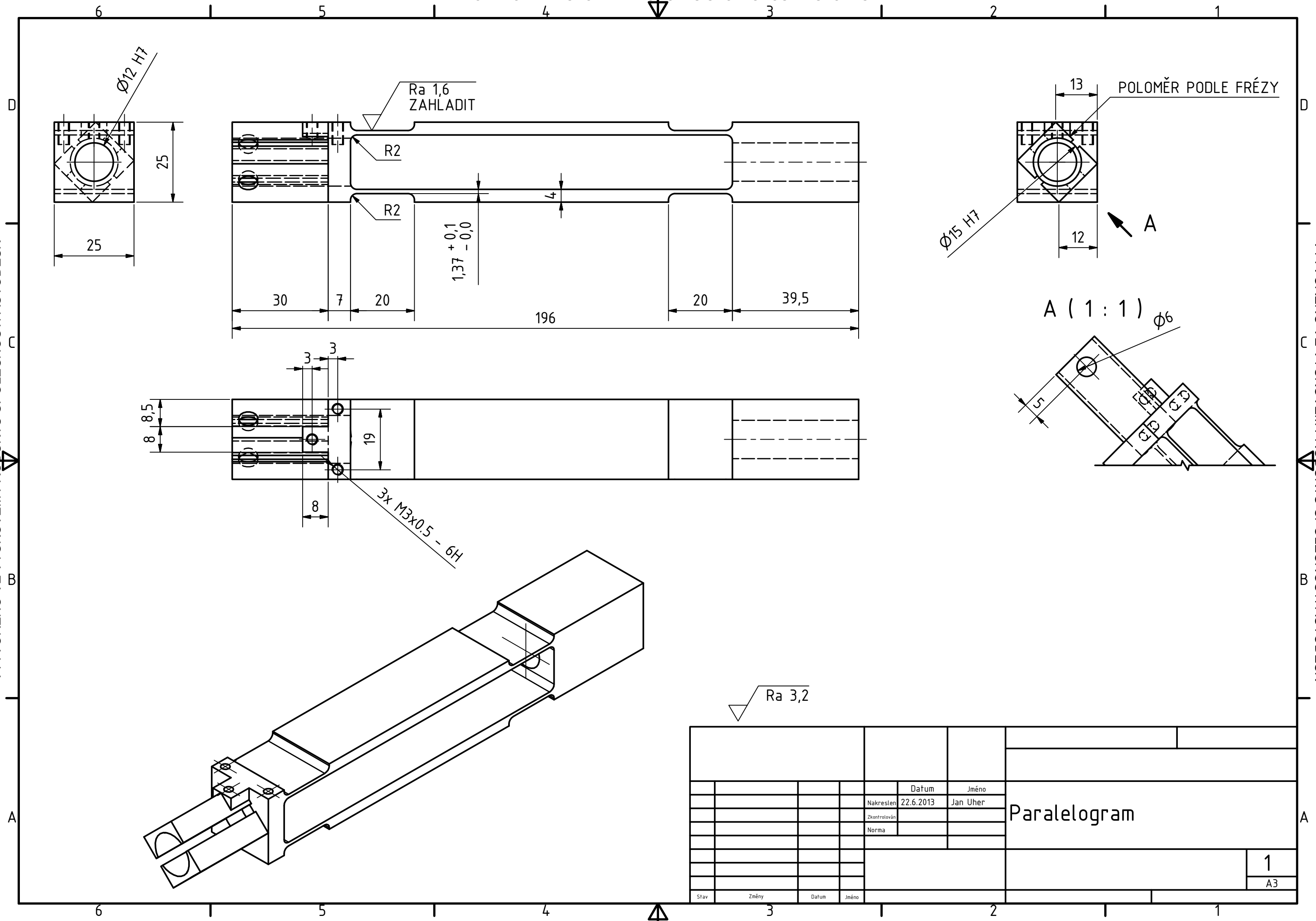


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK



| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|--------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Maketa | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |





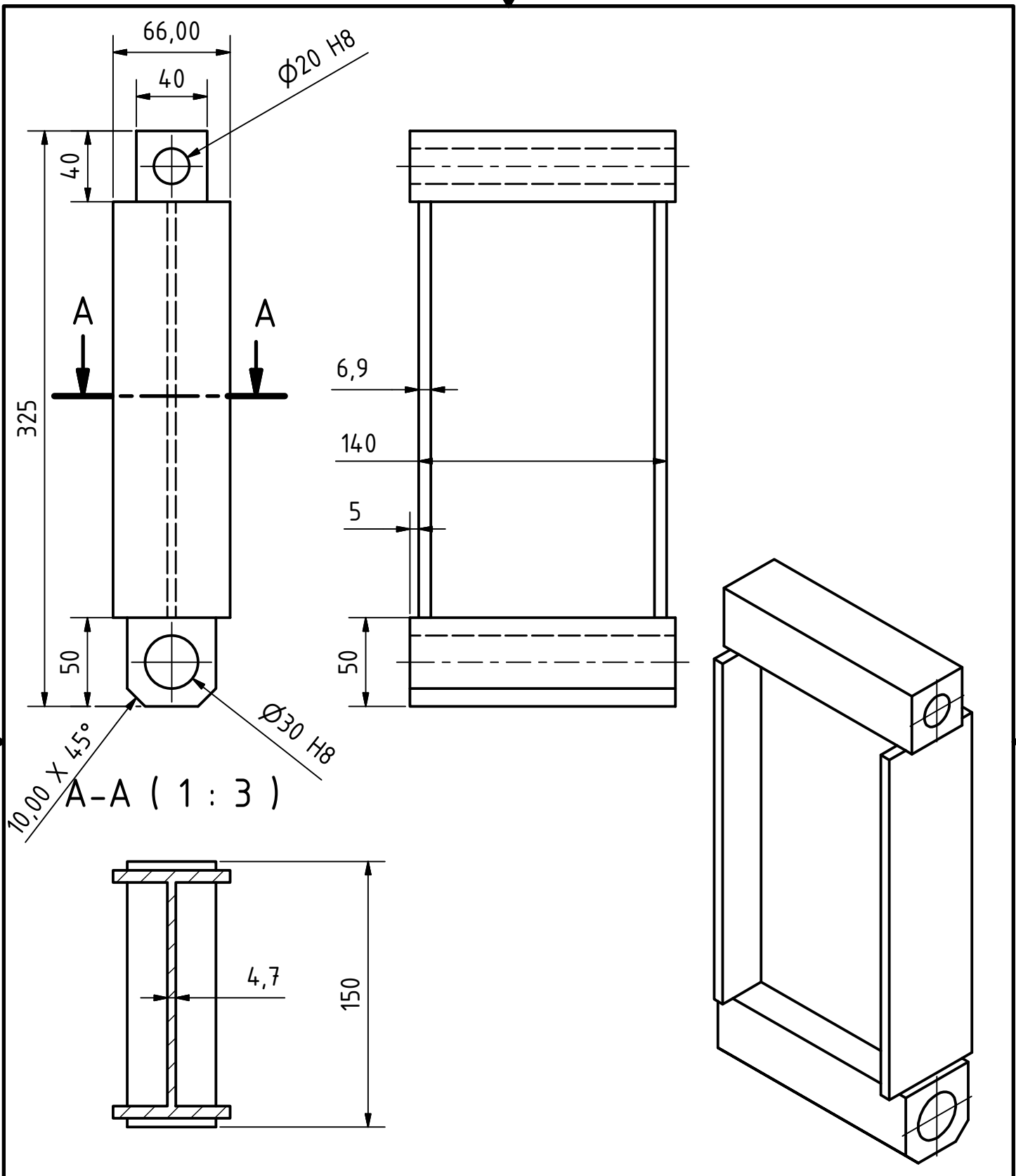
VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|--------------|-----------|----------|--|--|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | Datum | Jméno | | | | | |
| | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | | | |
| | | Zkontrolován | | | | | | |
| | | Norma | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |

Paralelogram

1
A3

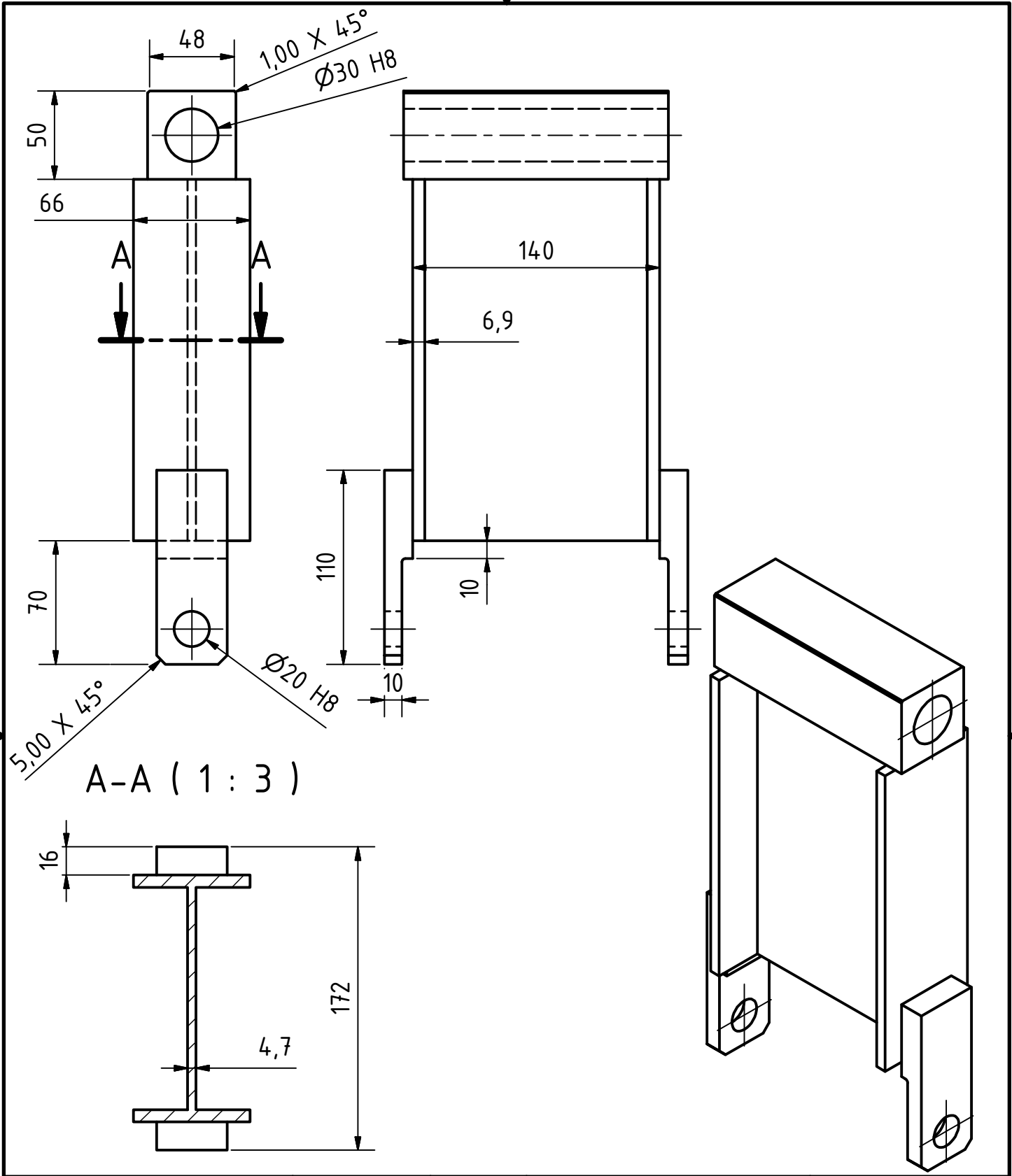


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|------------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Rameno 1.1 | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |



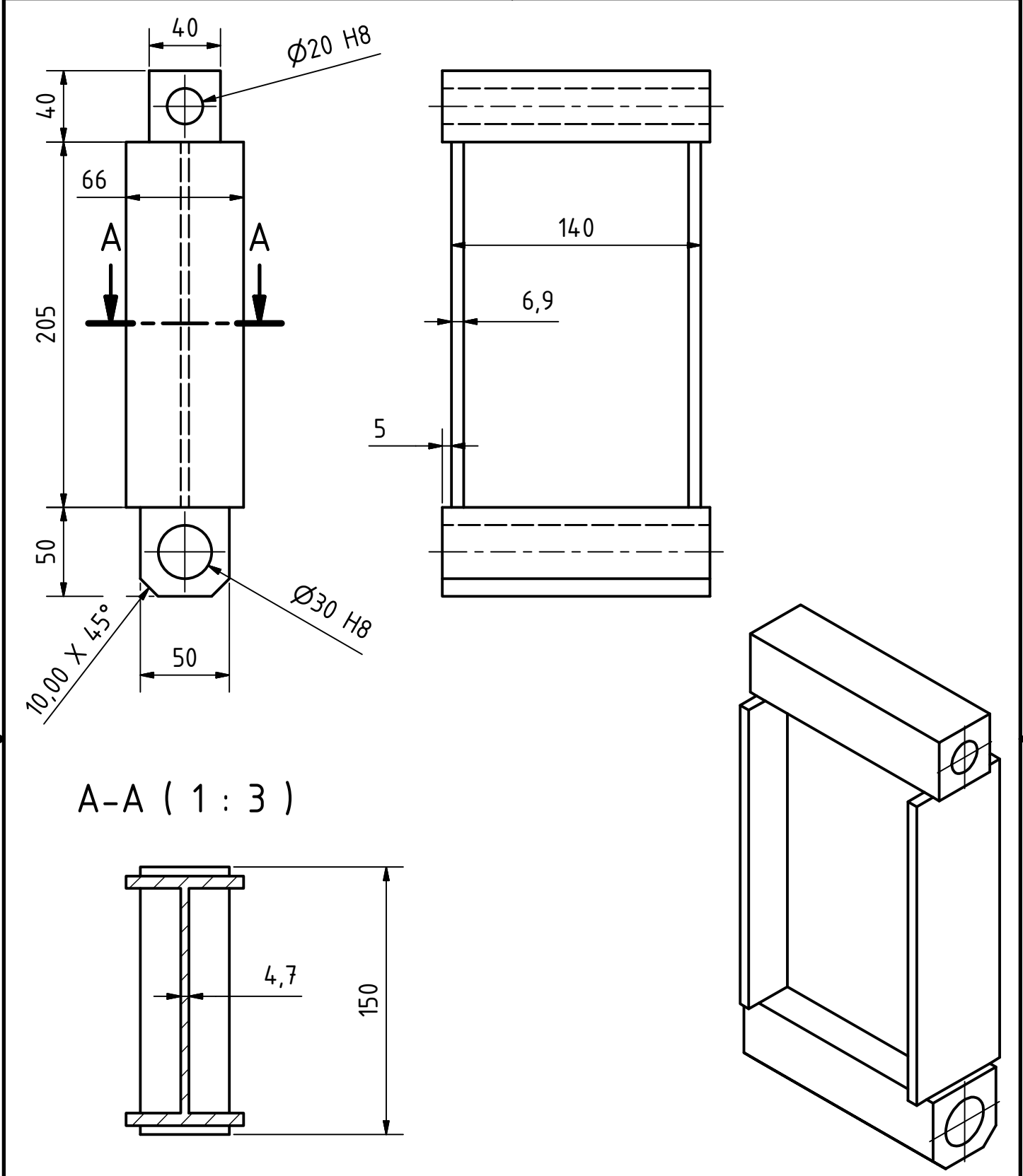


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|--------------|-----------|----------|------------|--|--|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Rameno 1.2 | | |
| | | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | | |
| | | | Zkontrolován | | | | | |
| | | | Norma | | | | | |
| | | | | | | 1 | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |



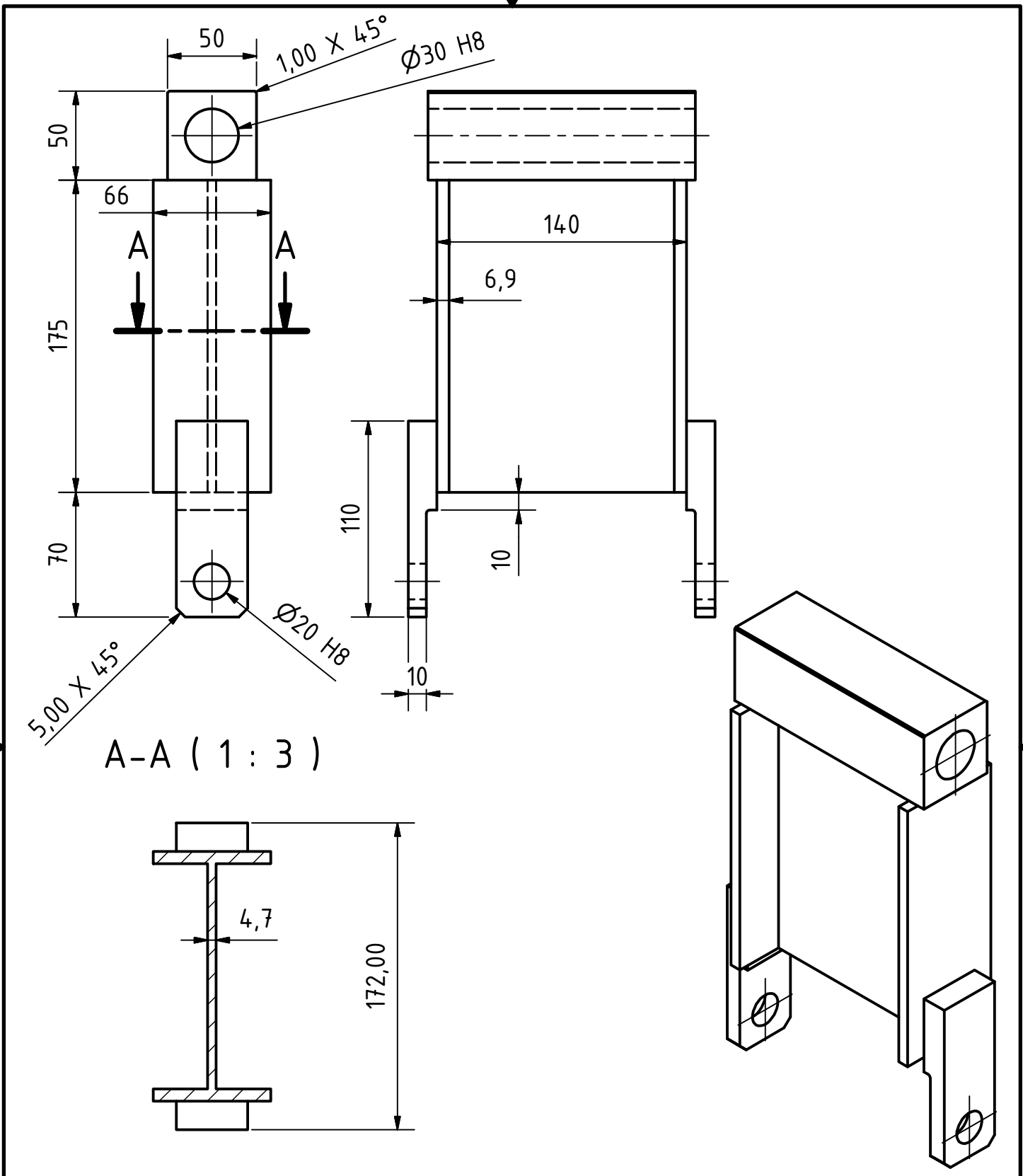


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK



| | | | | | | | |
|------|-------|-------|--------------|-----------|----------|------------|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Rameno 2.1 | |
| | | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | |
| | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | Norma | | | | |
| | | | | | | 1 A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | |

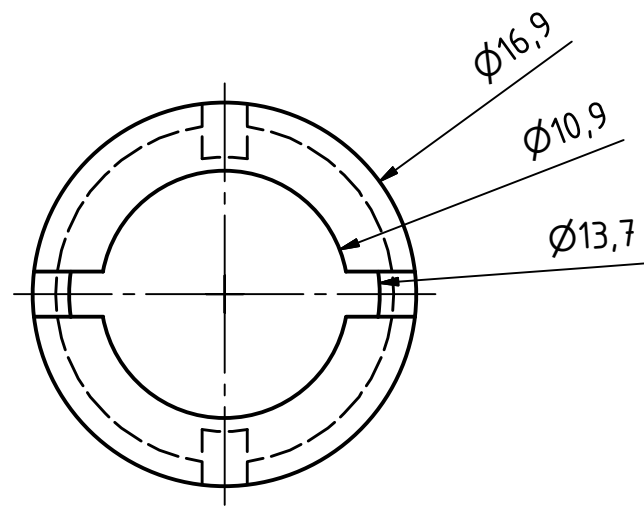
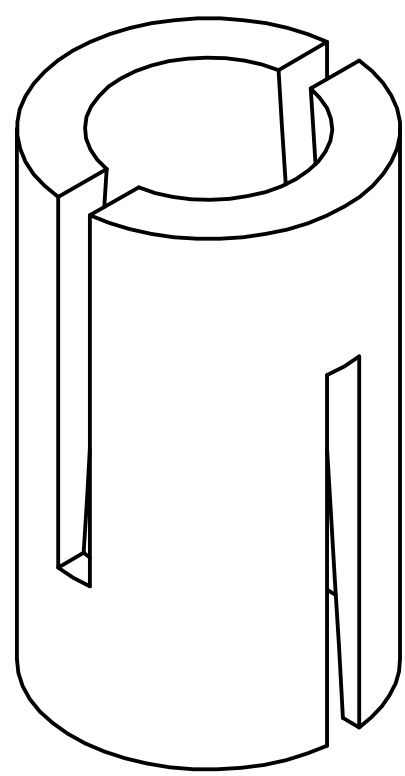
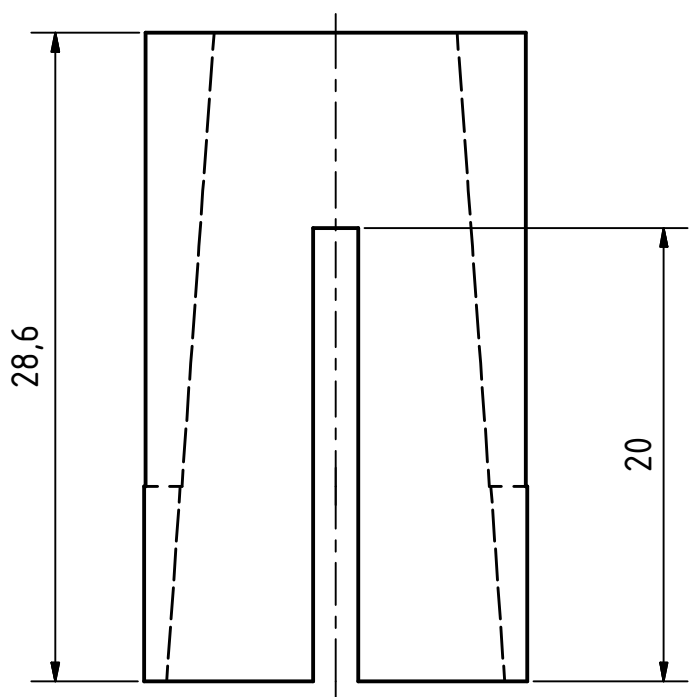


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | |
|------|-------|-------|---------------------|--|------------|--|
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | Datum | | Jméno | |
| | | | Nakreslen 22.6.2013 | | Jan Uher | |
| | | | Zkontrolován | | | |
| | | | Norma | | | |
| | | | | | Rameno 2.2 | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | | |
| | | | | | 1 | |
| | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | |



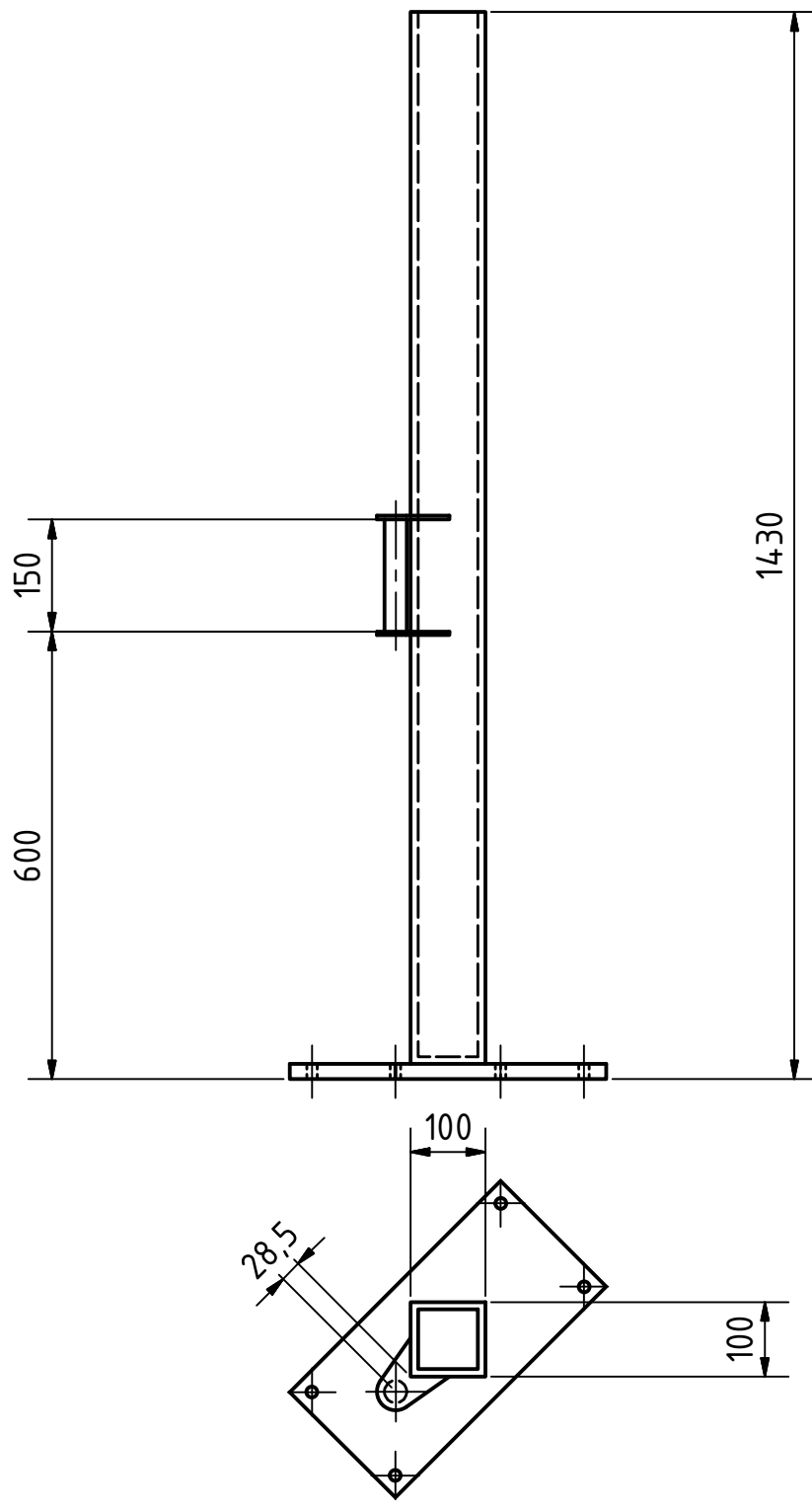


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

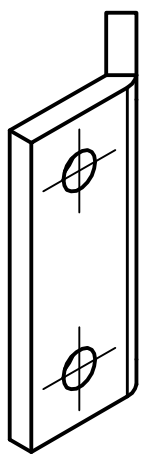
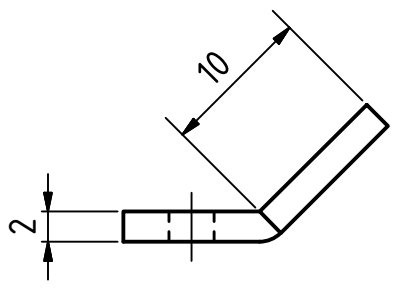
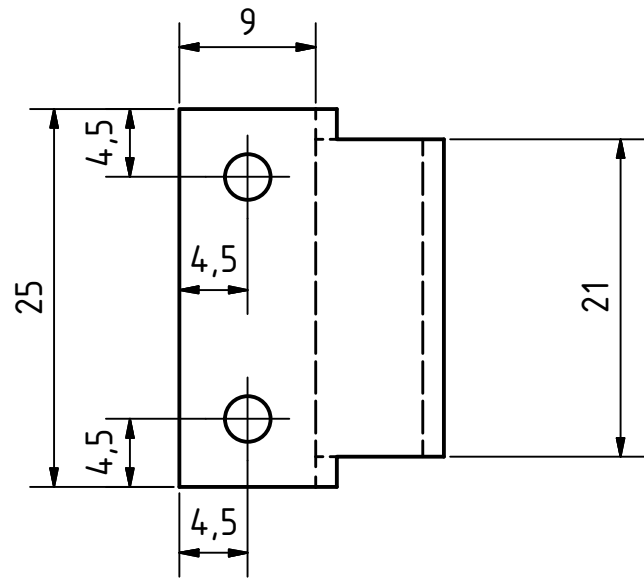
VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|------------------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Rozpěrné tělísko | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |





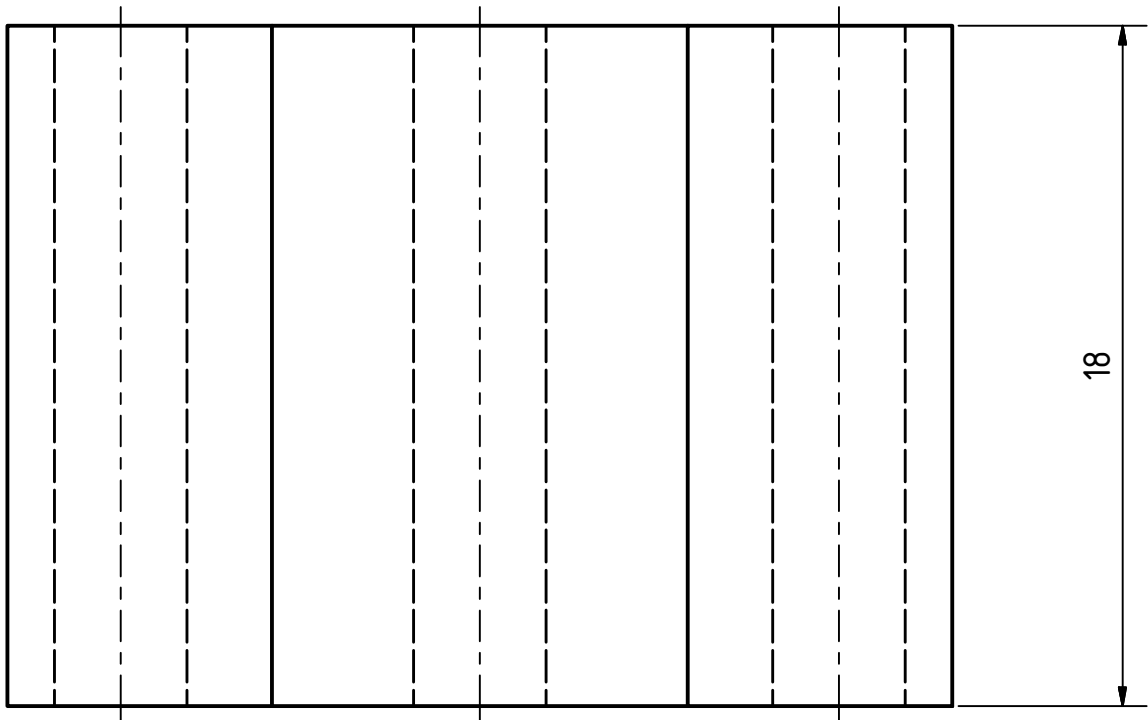
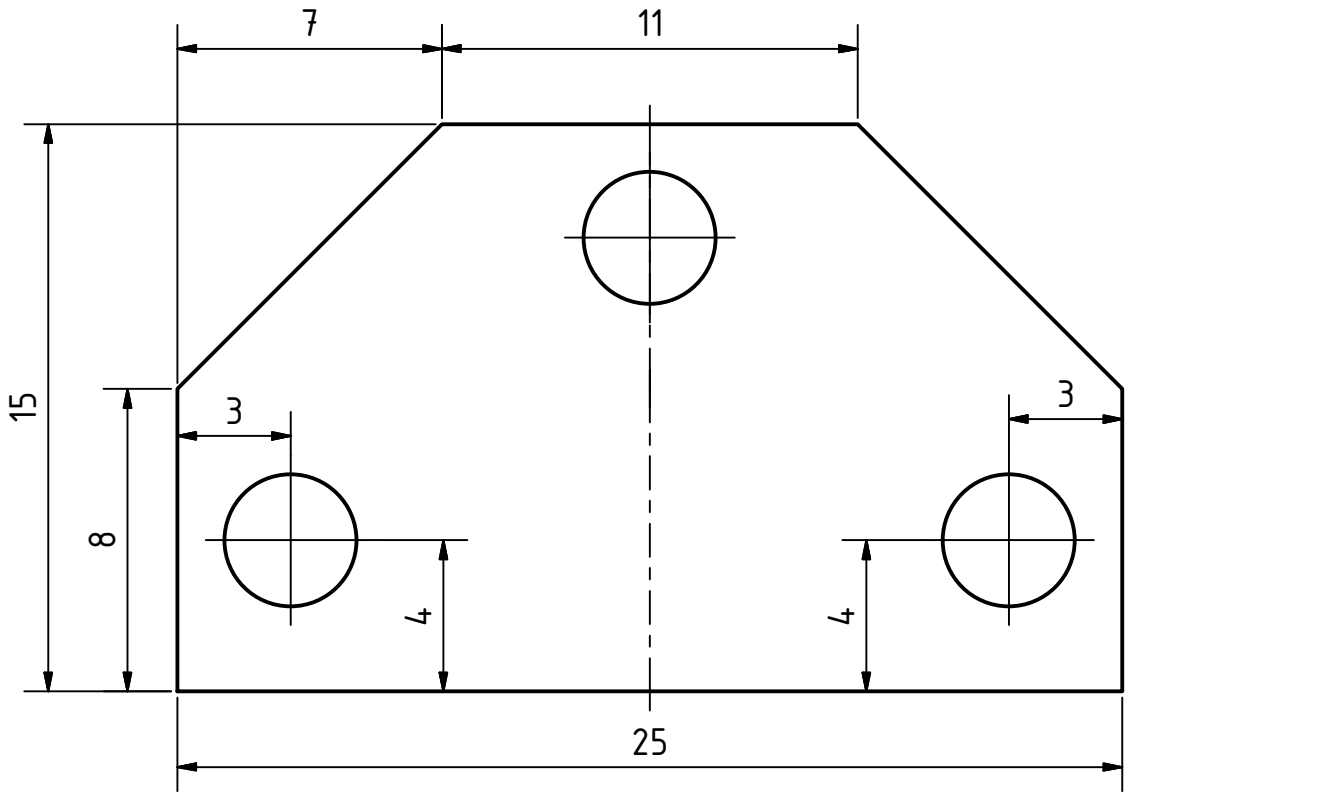
| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|-------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Sloup | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

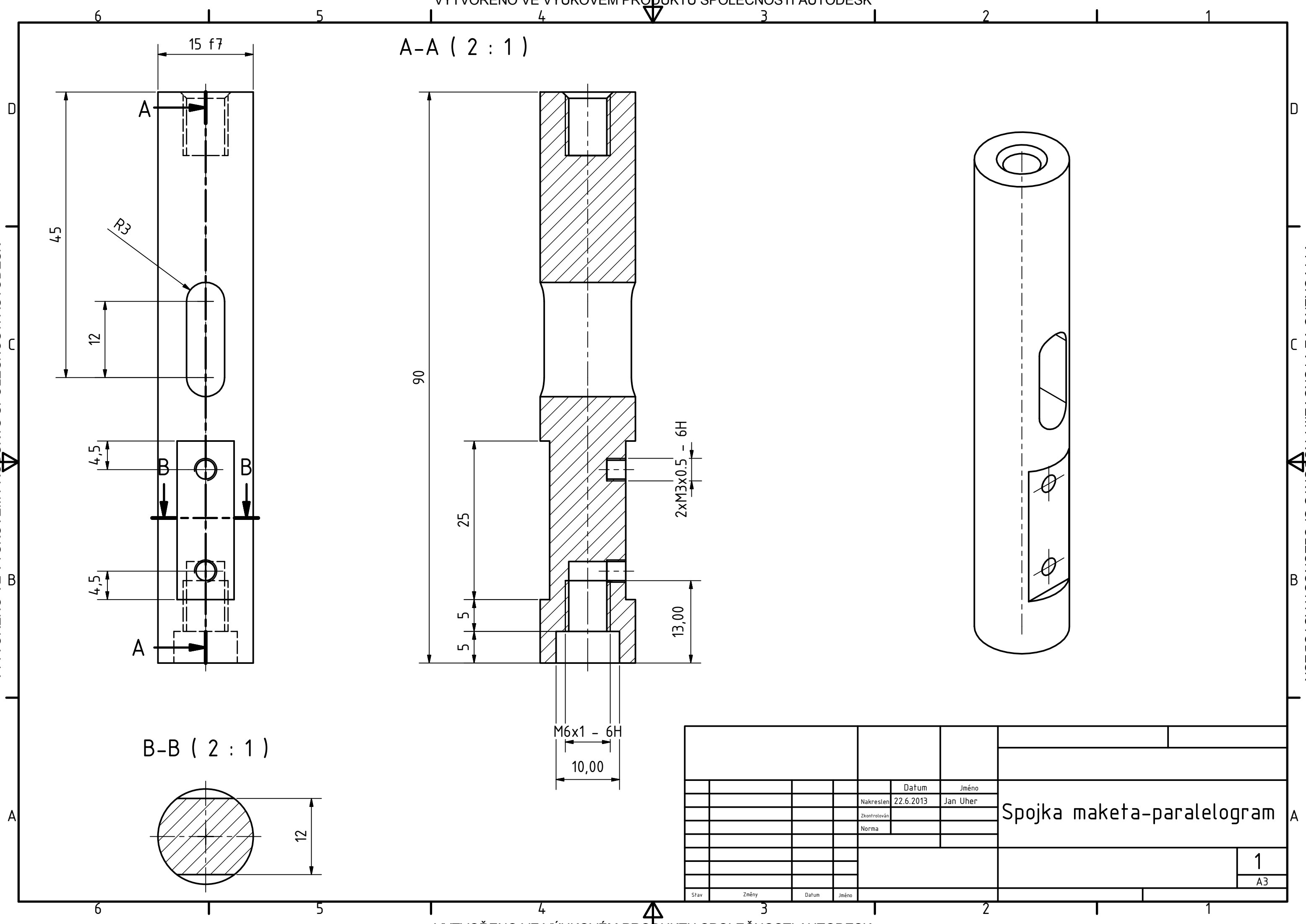
| | | | | | | | |
|------|-------|-------|--------------|-----------|----------|------------------|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Snímaná destička | |
| | | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | |
| | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | |



| | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|---------------------|--|---------------------------|--|
| | | | | | | | |
| | | | | | | | |
| | | | | Datum | | Jméno | |
| | | | | Nakreslen 22.6.2013 | | Jan Uher | |
| | | | | Zkontrolován | | | |
| | | | | Norma | | | |
| | | | | | | Spojka cívka-paralelogram | |
| | | | | | | | |
| | | | | | | 1 | |
| | | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | |

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

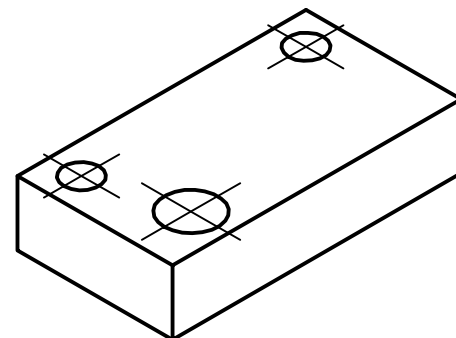
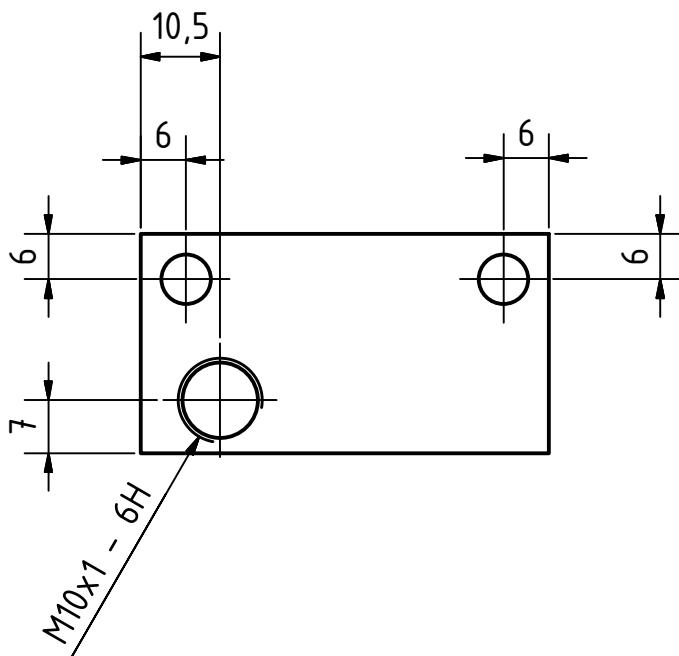
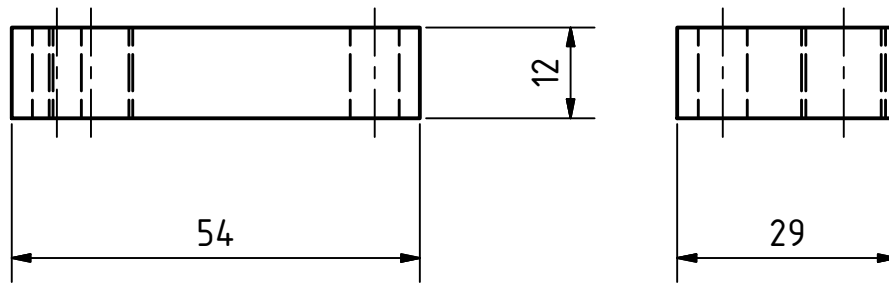


A-A (2 : 1)

B-B (2 : 1)

| | | | | | | | | |
|------|-------|--------------|-----------|----------------------------|--|--|--|----------|
| | | | | | | | | |
| | | Datum | Jméno | Spojka maketa-paralelogram | | | | |
| | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | | | Jan Uher |
| | | Zkontrolován | | | | | | |
| | | Norma | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |

1
A3



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|------------------------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Stojan snímče výchytky | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |

6 5 4 3 2 1

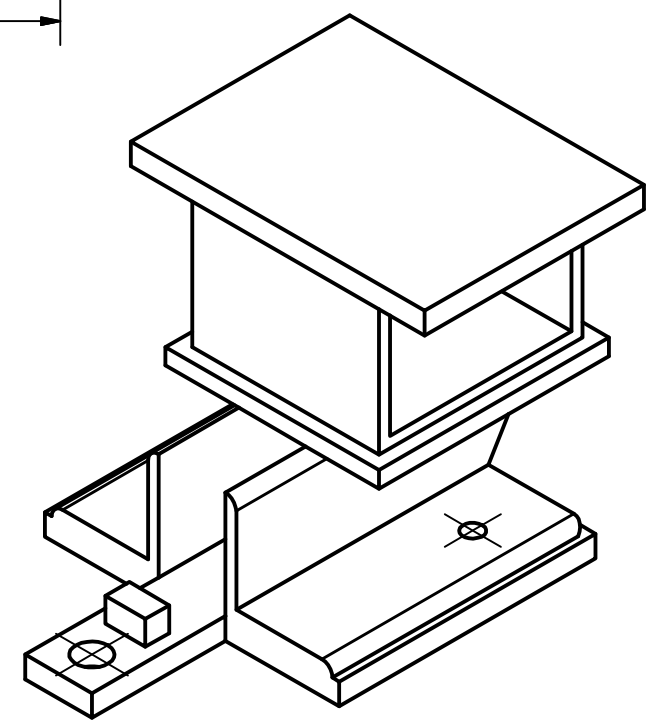
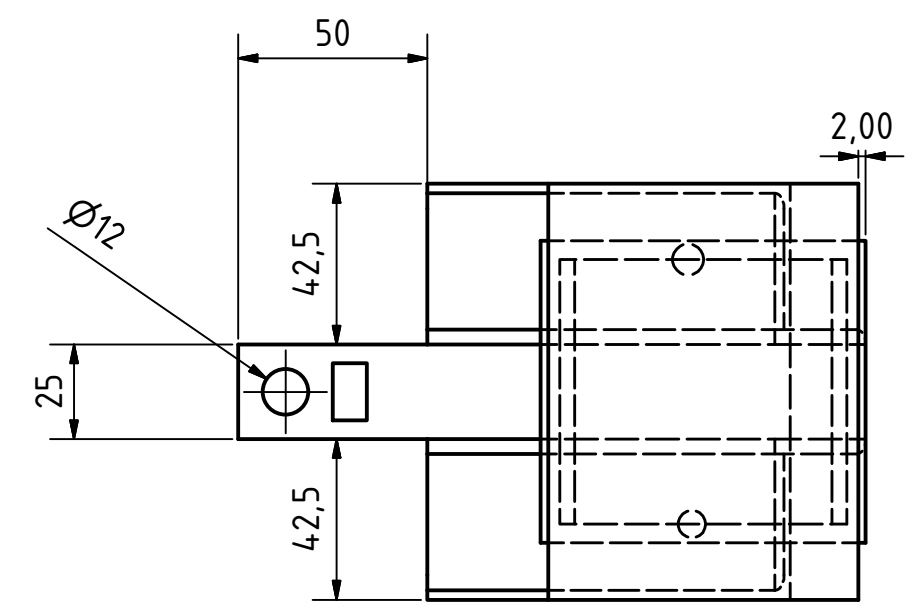
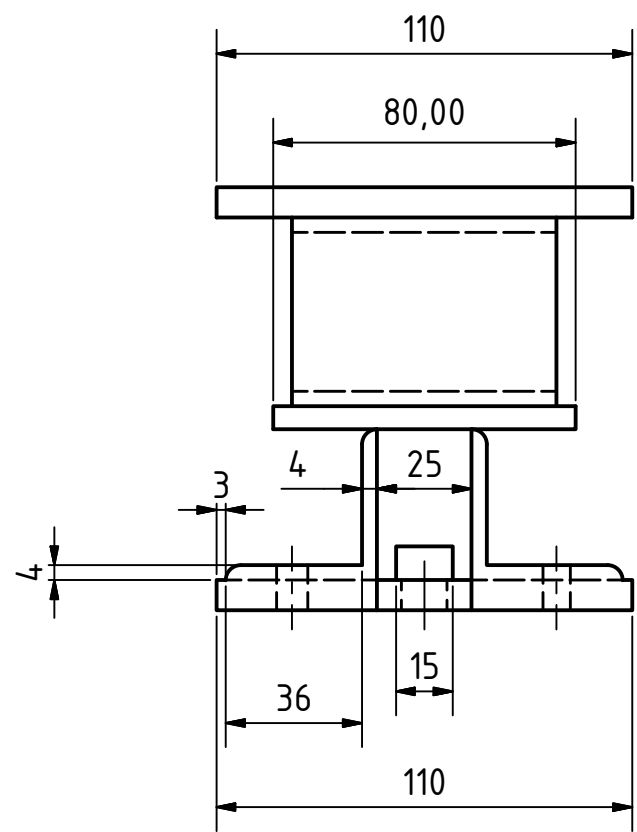
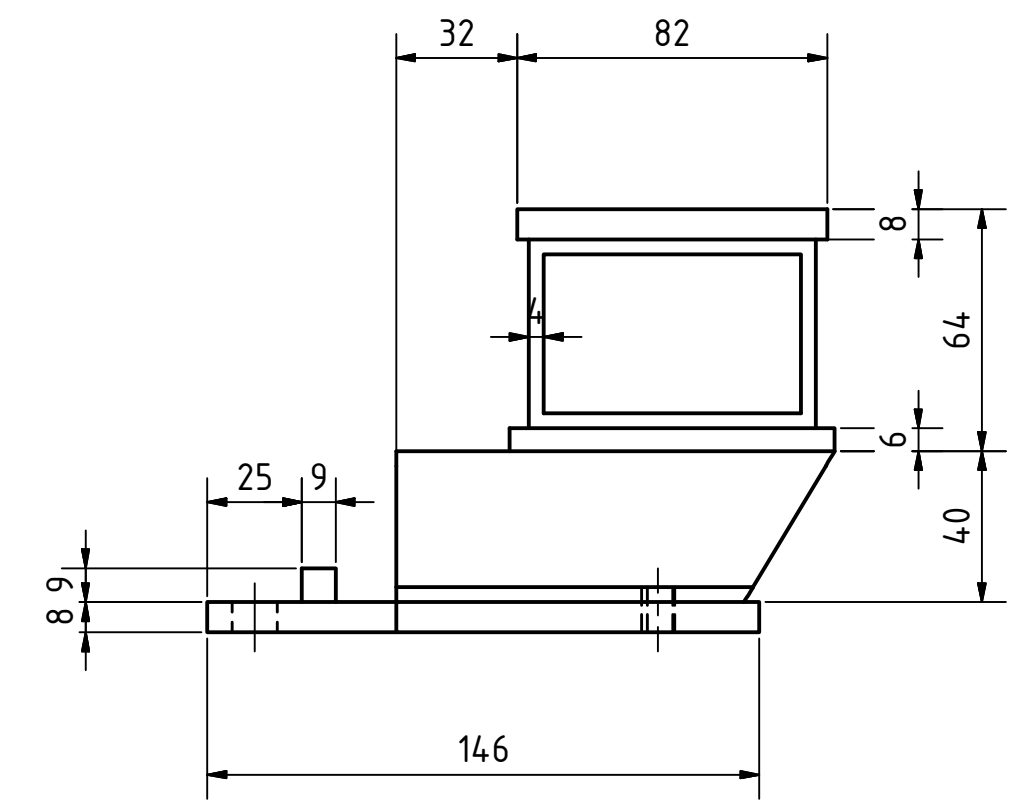
D

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

B

A

6 5 4 3 2 1



VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

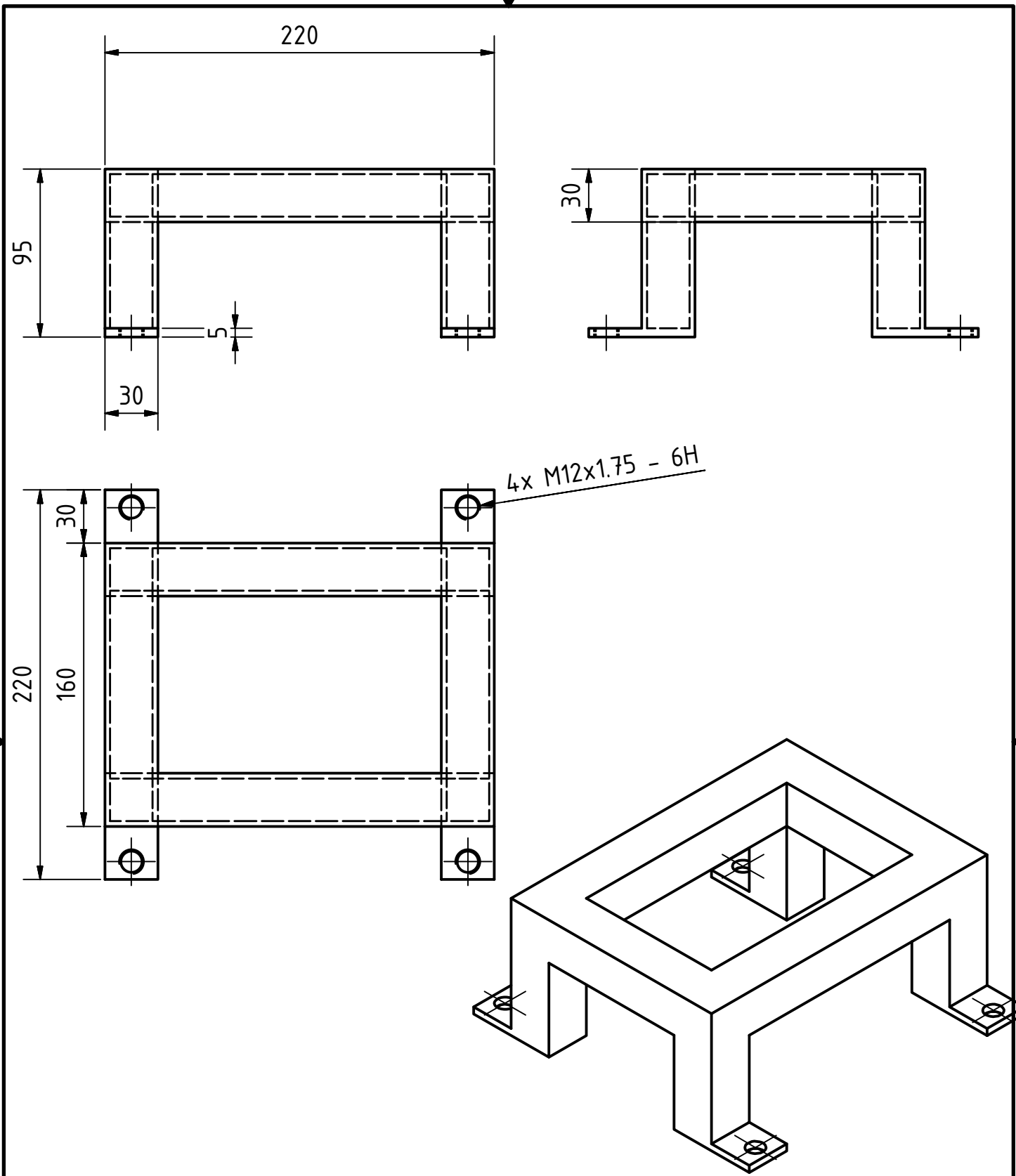
B

A

6 5 4 3 2 1

| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|------------------|--|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Stojan vibrátoru | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |

1
A3

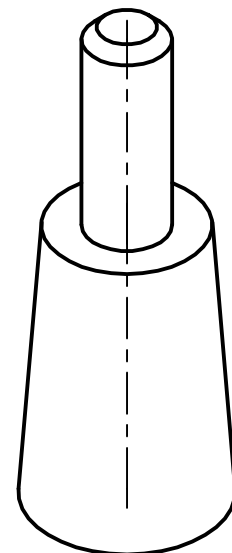
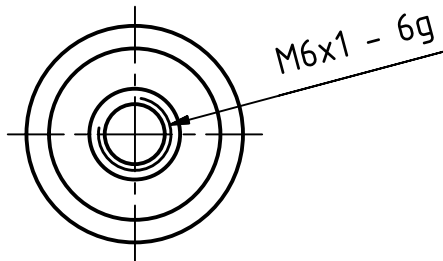
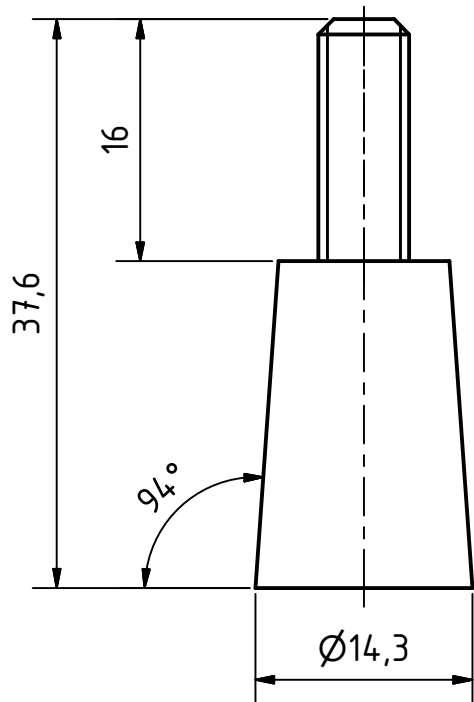


VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

VYTVOŘENO VE VÝUKOVÉM PRODUKTU SPOLEČNOSTI AUTODESK

| | | | | | | | | |
|------|-------|--------------|-----------|----------|---------|--|--|----|
| | | | | | | | | |
| | | | Datum | Jméno | Stolice | | | |
| | | Nakreslen | 22.6.2013 | Jan Uher | | | | |
| | | Zkontrolován | | | | | | |
| | | Norma | | | | | | |
| | | | | | | | | 1 |
| | | | | | | | | A4 |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |





| | | | | | | | | |
|------|-------|-------|-------|--------------|-----------|--------------|----|----------|
| | | | | | | | | |
| | | | | | | | | |
| | | | | Datum | Jméno | Šroub maketa | | |
| | | | | Nakreslen | 22.6.2013 | | | Jan Uher |
| | | | | Zkontrolován | | | | |
| | | | | Norma | | | | |
| | | | | | | | 1 | |
| | | | | | | | A4 | |
| Stav | Změny | Datum | Jméno | | | | | |