

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

FAKULTA STROJNÍ



BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Školní demonstrátor podmínek mikrogravitace

2016

DANIEL SATKE



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

pro: **Daniel SATKE**

program: **B2342 - Teoretický základ strojního inženýrství**

obor: bez oboru

Název tématu: **Školní demonstrátor podmínek mikrogravitace**

Title: **School demonstrator of microgravity conditions**

Zásady pro vypracování:

Práce je zaměřena na konstrukčně jednoduchý, transportovatelný, mnohonásobně použitelný demonstrátor podmínek mili/mikrogravitace ("pádovou věž") pro středoškolské výukové experimenty. Předpokládaná doba trvání mikrogravitace je přes 0,5s.

1. Zpracujte rešerši volně přístupných návodů na realizaci školních experimentálních zařízení pro demonstraci podmínek mili/mikrogravitace do 1s trvání.
2. Navrhněte jednoduchou, transportovatelnou variantu takového zařízení s ohledem na možnost realizace různých výukových experimentů.
3. Realizujte hlavní část zařízení.

Rozsah grafických prací: dle pokynů vedoucího BP
Rozsah průvodní zprávy: 25 stran
Seznam odborné literatury: dle pokynů vedoucího BP
Vedoucí bakalářské práce: Mgr. Jaroslav Kousal, Ph.D.
Konzultant/i:

Datum zadání bakalářské práce: 25. 04. 2016
Datum odevzdání bakalářské práce: 08. 08. 2016

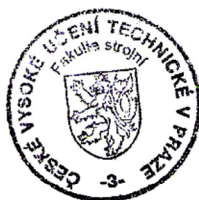
Neodevzdá-li student/ka bakalářskou práci v určeném termínu, tuto skutečnost předem písemně zdůvodnil a omluva byla děkanem uznána, stanoví děkan studentovi náhradní termín odevzdání bakalářské práce. Pokud se však student/ka řádně neomluvil/a nebo omluva nebyla děkanem uznána, může si student/ka zapsat bakalářskou práci podruhé.

Posluchač/ka bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

Zadání bakalářské práce převzal dne: 21.4.2016

.....*Daniel Šala*.....
student/ka

.....*Robert Theiner*.....
Ing. Robert Theiner, Ph.D.
vedoucí Ú 12 122



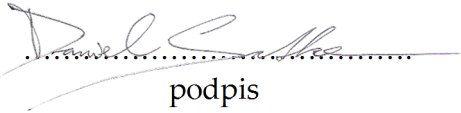
.....*Michael Valášek*.....
prof. Ing. Michael Valášek, DrSc.
děkan FS ČVUT v Praze

V Praze dne 04. 04. 2016

Prohlašuji, že jsem svou diplomovou (bakalářskou) práci vypracoval samostatně a použil jsem pouze podklady (literaturu, projekty, SW atd.) uvedené v příloženém seznamu.

Nemám závažný důvod proti užití tohoto školního díla ve smyslu § 60 Zákona č.121/2000 Sb., o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon).

V Praze dne 3. 8. 2016


.....
podpis

Tímto bych rád poděkoval vedoucímu bakalářské práce Mgr. Jaroslavu Kousalovi, Ph.D. za věcné připomínky a pomoc při návrhu pádové věže a Ing. Tomáši Čenskému, Ph.D. za pomoc při orientaci v dílně.

Obsah

1. Úvod	1
1.1. Prostředí mikrogravitace.....	1
1.2. Krátké porovnání konstrukce malých pádových věží.....	2
2. Návrh.....	3
2.1. Vliv odporu vzduchu.....	3
2.1.1. Určení Reynolsova čísla	3
2.1.2. Určení závislosti zrychlení na čase v prostředí.....	4
2.2. Minimální výška věže pro splnění zadání doby trvání mikrogravitace.....	8
3. Konstrukce	9
3.1. Rám pádové věže.....	11
3.2. Zdvihací mechanismus.....	13
3.3. Odjišťovací mechanismus	14
3.4. Doraz.....	15
3.5. Závažíčko	16
3.6. Experimentální zařízení.....	17
3.6.1. Rám.....	17
3.6.2. Technologické vybavení	18
3.6.3. Vyvažování	19
3.7. Dopadová plocha.....	19
4. Soupis polotovarů použitých při výrobě.....	20
5. Experimenty	22
5.1. Možnosti	22
5.2. Výsledky a jejich interpretace	22
5.2.1. Experiment s vodou v lahvi	23
5.2.2. Experiment s odpružením podložek a šroubu.....	25
6. Postup montáže, demontáže a opakovaných úkonů při provádění experimentů	26
7. Zjištěné nedostatky a náměty k vylepšení.....	28
7.1. Vylepšení kvality obrazového záznamu.....	28
7.2. Uzavření experimentálního zařízení	28
7.3. Univerzální úchyty na experimenty / jednoduchý odporový štít	28
7.4. Zajištění odjišťovacích vodičů.....	28

7.5. Vytahování experimentálního zařízení.....	28
7.6. Vylepšení akcelerometru	28
8. Fotodokumentace	29
9. Závěr	31
10. Přehled použité literatury	32

Seznam obrázků

Obrázek 1: Detail modelu horní části pádové věže s barevně odlišenými systémy

Obrázek 2: Model pádové věže s barevně odlišenými systémy

Obrázek 3: Znárodnění výškových konfigurací pádové věže

Obrázek 4: Schematické znárodnění univerzálnosti dlouhého lanka

Obrázek 5: Detail dlouhého lanka

Obrázek 6: Detail uchycení lanek na koncích HT trubek

Obrázek 7: Detail upevnění kladky v horním rohu pádové věže

Obrázek 8: Detail odjišťovacího systému

Obrázek 9: Detail systému dorazu

Obrázek 10: Detail systému závažíčka

Obrázek 11: Detail systému experimentálního zařízení

Obrázek 12: Detail uchycení experimentálního zařízení

Obrázek 13: $t = 0$ ms

Obrázek 14: $t = 155$ ms

Obrázek 15: $t = 340$ ms

Obrázek 16: $t = 385$ ms

Obrázek 17: $t = 535$ ms

Obrázek 18: $t = 0$ ms

Obrázek 19: $t = 185$ ms

Obrázek 20: $t = 275$ ms

Obrázek 21: $t = 445$ ms

Obrázek 22: $t = 505$ ms

Obrázek 23: $t = 655$ ms

Obrázek 24: $t = 735$ ms

Obrázek 25: $t = 825$ ms

Obrázek 26: Schéma značení trubek čísly

Obrázek 27: Střední varianta pádové věže

Obrázek 28: Nízká varianta pádové věže

Obrázek 29: Vysoká varianta pádové věže

Obrázek 30: Přehled všech dílů

Obrázek 31: Experimentální zařízení v pádu - nízká varianta

Obrázek 32: Detail dopadové plochy

Obrázek 33: Detail systémů uchycených na horní trubce – odjištěný stav

Obrázek 34: Detail horní části pádové věže

Seznam tabulek

Tabulka 1: Soupis polotovarů použitých při výrobě

Seznam grafů

Graf 1: Vliv odporu vzduchu na velikost zrychlení padajícího tělesa

Graf 2: Vliv odporu vzduchu na velikost zrychlení padajícího tělesa - detail do 1 s

Graf 3: Vliv odporu vzduchu na kvalitu mikrogravitace padajícího tělesa - detail do 1 s

Graf 4: Záznam zrychlení experimentálního zařízení

Seznam použitých programů

Microsoft Office Word 2016

Microsoft Office Excel 2016

MatLab R2015b

SolidWorks 2016

Microsoft Paint

GIMP 2

Avidemux 2.6

Vývojové prostředí Arduino 1.6.6

Anotace

Předmětem bakalářské práce je návrh a konstrukce jednoduché, přenosné a levné pádové věže pro demonstrační účely s dobou trvání mikrogravitace do 1 s. Inspirace byla čerpána z již existujících malých pádových věží. Výsledkem je pádová věž o třech výškových konfiguracích a s dobou trvání mikrogravitace od přibližně 500 ms do 850 ms a její kvalitou do 0,1 g. Navrhnutá konstrukce z HT trubek se i přes svoji nižší tuhost osvědčila. Při pádech z větších výšek se odpor vzduchu stává již nezanedbatelným, a proto je tato věž vhodná především k demonstračním účelům. Konstrukce je z běžně dostupných materiálů a je snadno realizovatelná za několik tisíc Kč.

Klíčová slova

Pádová věž, Mikrogravitace, Výuka a popularizace vědy

Abstract

Subject of this bachelor thesis is a design and construction of simple, portable and cheap drop tower for demonstrational purposes with a duration of microgravity up to 1 s. As an inspiration served already existing small drop towers. Result is a drop tower with three height configurations and duration of microgravity from approximately 500 ms to 850 ms and its quality up to 0,1 g. Designed structure from HT pipes despite its lower stiffness proved successful. During drops from greater heights is the aerodynamic drag becoming not negligible and therefore is this drop tower suitable mainly for demonstrational purposes. Structure is made out of commonly available materials and is easily feasible for several thousand CZK.

Key words

Drop tower, Microgravity, Teaching and popularization of science

1. Úvod

1.1. Prostředí mikrogravitace

Mikrogravitace je prostředí s velmi malou působností tíže, přibližně milionkrát nebo vícekrát menší, než to, jaké na nás působí na povrchu Země. V prostředí mikrogravitace pak na těleso nepůsobí zrychlení nebo opět jen velmi malé, úměrné kvalitě mikrogravitace.

Obecně lze prostředí, kde působí mikrogravitace vytvořit dvěma základními metodami. První z nich je cestovat do hlubin vesmíru, kde gravitační pole blízkých objektů bude zanedbatelné, to co je pro nás zanedbatelné si sami určíme. Tento způsob je však mimo schopnosti lidstva, alespoň zatím. Druhou metodou je pak volný pád, ten může trvat od zlomků sekundy až po měsíce či roky, což platí např. pro objekty na oběžné dráze Země. Na Zemi se volný pád většinou provádí v pádových věžích nebo v šachtách v zemi. I přesto, že čas pádu v pádové věži se na Zemi pohybuje maximálně v řádu jednotek sekund (nejdelší čas byl zatím dosažen v německém ZARMu, a to 9.3 sekund s použitím katapultu [1]), lze i přesto pozorovat většinu fyzikálních jevů tak, jak by probíhaly např. na orbitě Země, ale za cenu mnohem menších nákladů (doprava 1 kg na LEO se řádově pohybuje v tisících USD) a možnosti experimentální zařízení změnit či opravit v mnohem kratší době. [2]

Při použití vyšších pádových věží je pro dosažení vysoké kvality mikrogravitace nejčastěji buď ve věži snížena tlak [1] [3] a experimentální zařízení padá ve vakuu nebrzděno odporem vzduchu nebo se použije tzv. odporový štít [4], kdy tento štít padá ve vzduchu a působí na něj odpor vzduchu a uvnitř tohoto štítu padá ve vakuu experimentální zařízení. Oba přístupy lze i kombinovat (vakuový odporový štít). [5] Odporový štít přitom musí být vhodně dimenzovaný, aby nedošlo ke kontaktu experimentálního zařízení a štítu ještě před odpadem. V případě velmi malých pádových věží se dá pro některé aplikace odpor vzduchu zanedbat, jelikož odpor vzduchu není tak velký. [6]

Kromě dvou výše zmíněných nejpoužívanějších metod, se dá volný pád v prostředí atmosféry simulovat i řízeným urychlováním experimentálního zařízení a tím kompenzací odporové síly vzduchu. To se může provést systémem na principu uchycení do kolejnic a urychlováním v pádové věži nebo šachtě, nebo např. dronem urychlujícím experimentální zařízení ve volné atmosféře. Hlavním technickým limitem tohoto řešení je vzrůstající rychlost experimentálního zařízení, např. po 10 s by jeho rychlost měla být 353 km/h. Tato metoda také nemůže dosahovat kvality mikrogravitace pádu ve vakuu.

Možností, jak dvojnásobně prodloužit dobu pádu, je katapultování experimentu směrem vzhůru, proti směru gravitačního zrychlení. Tato řešení je použito např. v německém ZARMu k dosažení časů blízkých 10 sekundám. [7]

1.2. Krátké porovnání konstrukce malých pádových věží

Malé pádové věže s dobou trvání mikrogravitace do 1 s obvykle nevyužívají odporový štít, jejich rámy jsou většinou tuhé [8], postavené z kovu a proto statické či velmi obtížně přenositelné. Jako odjištění často slouží elektromagnetický mechanismus či jednoduché mechanické řešení na způsob západky na branku [9]. Pádové věže s dobou pádu přes 1 s už obvykle používají odporový štít (např. 1,5 s demonstrátor v ESTEC/ESA [10]).

Malé i čistě demonstrační pádové věže však mají význam jak pro výuku a základní seznámení širší veřejnosti se specifiky mikrogravitace [11], tak pro základní přípravu budoucích odborníků na kosmickou techniku [12].

2. Návrh

Návrh pádové věže, ověření teoretických předpokladů.

2.1. Vliv odporu vzduchu

Byl určen vliv odporu prostředí na zrychlení a z těchto výsledků byla zvážena nutnost použití odporového štítu a vybrán tvar experimentálního zařízení. Všechny konstanty v této kapitole vychází z [13].

2.1.1. Určení Reynoldsova čísla

Reynoldsovo číslo se určí ze vztahu:

$$Re = \frac{vL}{\nu},$$

kde v je rychlost pohybu objektu, L charakteristický rozměr a ν kinematická viskozita tekutiny.

Rychlost padajícího tělesa v se bude měnit v čase, od 0 až po cca $8,6 \frac{m}{s}$ (při nejvyšší konfiguraci – výška 4 m) a s tím se bude měnit charakteristika obtékání tělesa vzduchem z laminárního obtékání na turbulentní.

Určení přechodu obtékání z laminárního na turbulentní, předpokládáme přechod z laminárního do turbulentního proudění kolem $Re = 10000$. Po dosazení tedy:

$$v = \frac{\nu Re}{L} = \frac{1,514 \times 10^{-5} \times 10000}{0,35} = 0,43 \frac{m}{s}$$

Charakteristický rozměr L , pro krychli/kvadr $L_k = 0,35 \text{ m}$ (délka strany podstavy), pro válec $L_v = 0,4 \text{ m}$ (průměr podstavy), oba rozměry jsou skoro stejné, proto byl při výpočtu použit jen jeden. Kinematická viskozita vzduchu při 20°C $\nu = 1,514 \times 10^{-5} \frac{m^2}{s}$.

Padající experimentální zařízení tedy přejde z laminárního do turbulentního proudění již v samotném počátku pádu, to je dáno především velmi malou kinematickou viskozitou vzduchu. Při dalších výpočtech budeme předpokládat, že na padající těleso působí po celou dobu pádu jen odporová síla podle Newtonova odporového zákona, viz dále.

2.1.2. Určení závislosti zrychlení na čase v prostředí

Pro odporovou sílu při turbulentním proudění platí Newtonův zákon odporu:

$$F_o = \frac{C_x \rho v^2 S}{2},$$

kde C_x je součinitel odporu, ρ hustota obtékající tekutiny, v rychlost pohybu tělesa a S plocha průřezu tělesa.

Při pádu v gravitačním poli země platí, že výsledná síla F je rovna síle gravitační F_G a síle odporové F_o podle vztahu:

$$F = F_G - F_o$$

Z druhého Newtonova zákona:

$$m \frac{dv}{dt} = mg - \frac{C_x \rho v^2 S}{2}$$

$$\frac{dv}{dt} = g - \frac{C_x \rho S}{2m} v^2$$

$$\int \frac{1}{g - \frac{C_x \rho S}{2m} v^2} dv = \int dt$$

Integrací dostáváme:

$$t = \sqrt{\frac{2m}{C_x \rho S g}} \tanh^{-1} \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S}{2m g}} v \right) + c$$

Vyjádřením v z předešlé rovnice pak:

$$v = \sqrt{\frac{2m g}{C_x \rho S}} \tanh \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} (t + c) \right)$$

Určení konstanty c z počáteční podmínky, že v čase $t_0 = 0$ se $v_0 = 0$:

$$0 = \sqrt{\frac{2m g}{C_x \rho S}} \tanh \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} (0 + c) \right)$$

$$\tanh \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} (0 + c) \right) = 0$$

$$\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} (0 + c) = 0$$

$$c = 0$$

Dostáváme tedy:

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho S}} \tanh\left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} t\right)$$

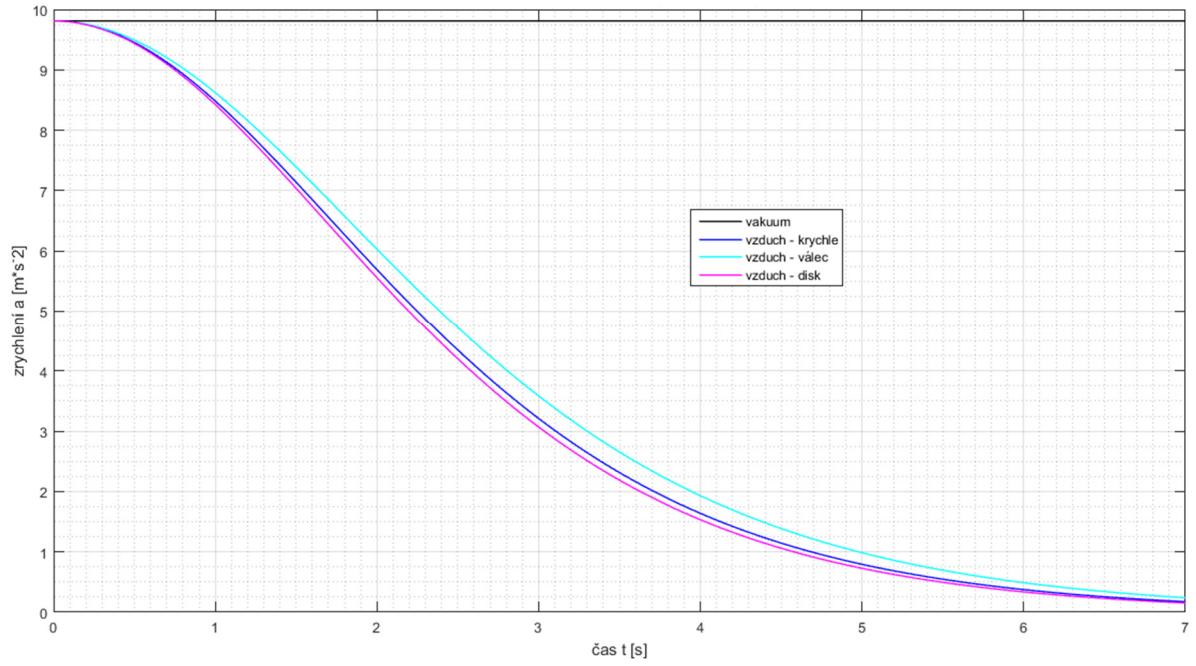
Po dosazení do rovnice $ma = mg - \frac{C_x \rho v^2 S}{2}$ a úpravě dostáváme vztah pro zrychlení v prostředí:

$$a = g \left[1 - \tanh^2\left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} t\right) \right]$$

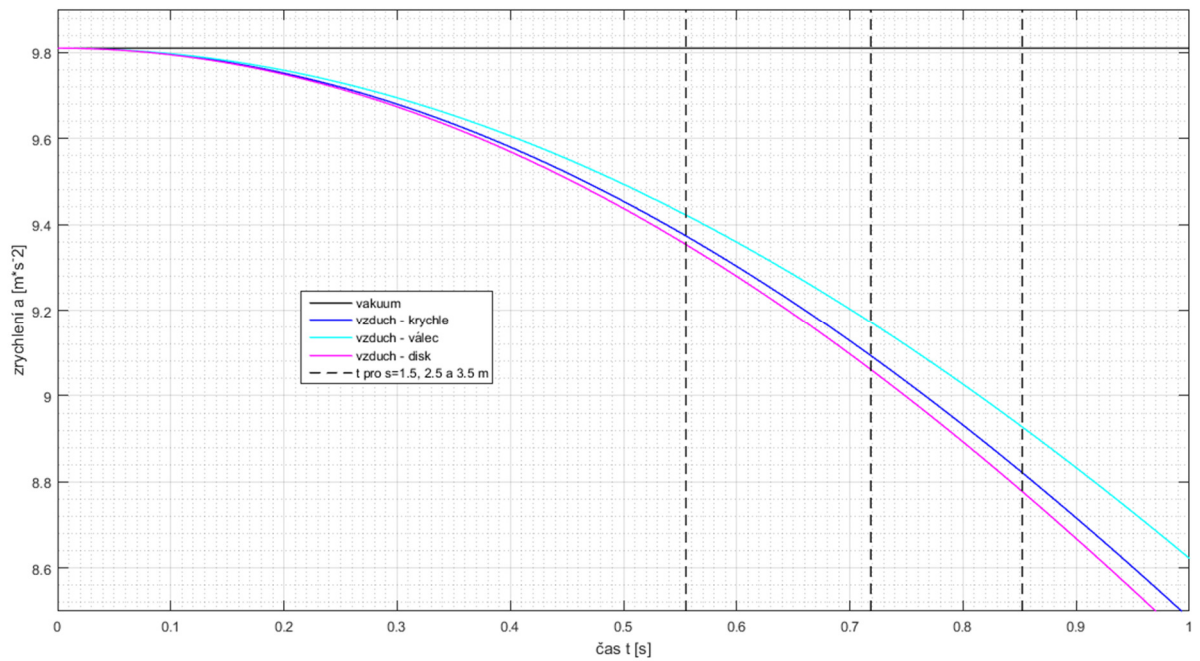
Tato závislost je graficky znázorněna na grafech 1 a 2 pro tři různé profily – krychli, válec (obtékaný v podélné ose) a disk, pro srovnání je vykreslena i ideální situace bez odporu vzduchu. Za konstanty byly dosazeny následující hodnoty:

- Gravitační zrychlení $g = 9,81 \frac{m}{s^2}$
- Hustota suchého vzduchu ρ při $20^\circ C$: $\rho = 1,204 \frac{kg}{m^3}$
- Dynamická viskozita η vzduchu při $20^\circ C$: $\eta = 1,8 Pas$
- Hmotnost m , zvoleno: $m = 5 kg$
- Plocha průřezu S , zvoleno: $S = 0,12 m^2$
- Součinitel odporu C_x , pro krychli $C_{xk} = 1,05$ pro $Re \geq 10^4$
, pro válec $l/D = 1$ $C_{xv} = 0,93$ pro $Re \geq 10^5$
, pro disk $C_{xd} = 1,1$ pro $Re \geq 10^3$

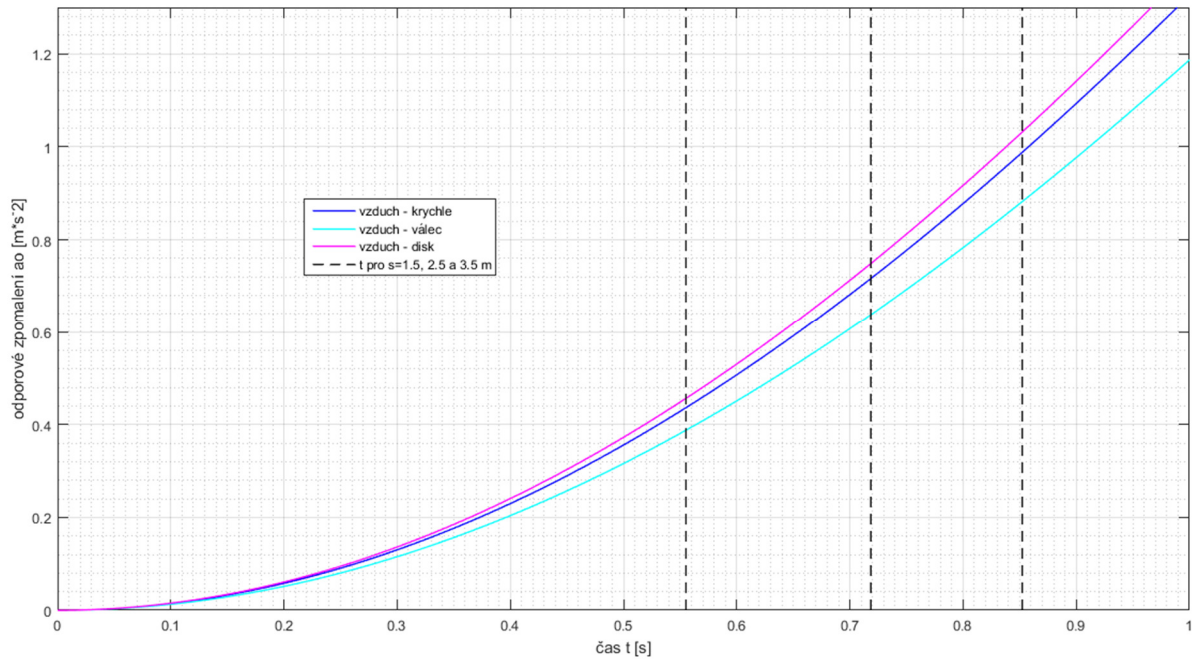
(součinitel odporu C_x je v tomto případě považován za konstantu, ale jeho hodnota je závislá na Reynoldsově čísle Re , tedy na rychlosti v , za konstantu ho můžeme považovat proto, že hodnotu $Re = 10^4$ překročí ve velmi malém čase a nepřesnost můžeme zanedbat)



Graf 1: Vliv odporu vzduchu na velikost zrychlení padajícího tělesa



Graf 2: Vliv odporu vzduchu na velikost zrychlení padajícího tělesa - detail do 1 s



Graf 3: Vliv odporu vzduchu na kvalitu mikrogravitace padajícího tělesa - detail do 1 s

Z grafů 1-3 je vidět, že rozdíl v odporu krychle oproti válci je zanedbatelný v porovnání s rozdílem vzniklým zpomalením odporem vzduchu a proto byl zvolen krychlový či hranolový tvar experimentálního zařízení, který je výhodnější z hlediska vnitřního uspořádání techniky v experimentálním zařízení.

Vliv odporu vzduchu se s časem zvyšuje podle funkce hyperbolický tangens na druhou, na počátku je zpomalení odporem prostředí jen velmi malé a roste až po přibližně 0,44; 0,72 a $1 \frac{m}{s^2}$ v případě 1,5; 2,5 a 3,5 metrového pádu pro krychlové či hranolové experimentální zařízení. Kvalita mikrogravitace je tedy při nepoužití odporového štítu v řádu 0,1 g, což je pro naše experimenty dostačující hodnota.

2.2. Minimální výška věže pro splnění zadání doby trvání mikrogravitace

Integrací vztahu

$$v = \sqrt{\frac{2mg}{C_x \rho S}} \tanh \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} t \right)$$

podle času dostáváme vztah pro dráhu v závislosti na čase:

$$s = \frac{2m}{C_x \rho S} \ln \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{C_x \rho S g}{2m}} t \right) \right]$$

po dosazení konstant (podle hodnot zmíněných výše) a $t = t_{min} = 0,5$ s:

$$s = \frac{2 \times 5}{1.07 \times 1.204 \times 0.12} \ln \left[\cosh \left(\sqrt{\frac{1.07 \times 1.204 \times 0.12 \times 9.81}{2 \times 5}} 0.5 \right) \right]$$

dostáváme minimální výšku volného pádu, tj. přibližnou minimální výšku pádové věže:

$$\mathbf{s_{min} = 1,22 \text{ m}}$$

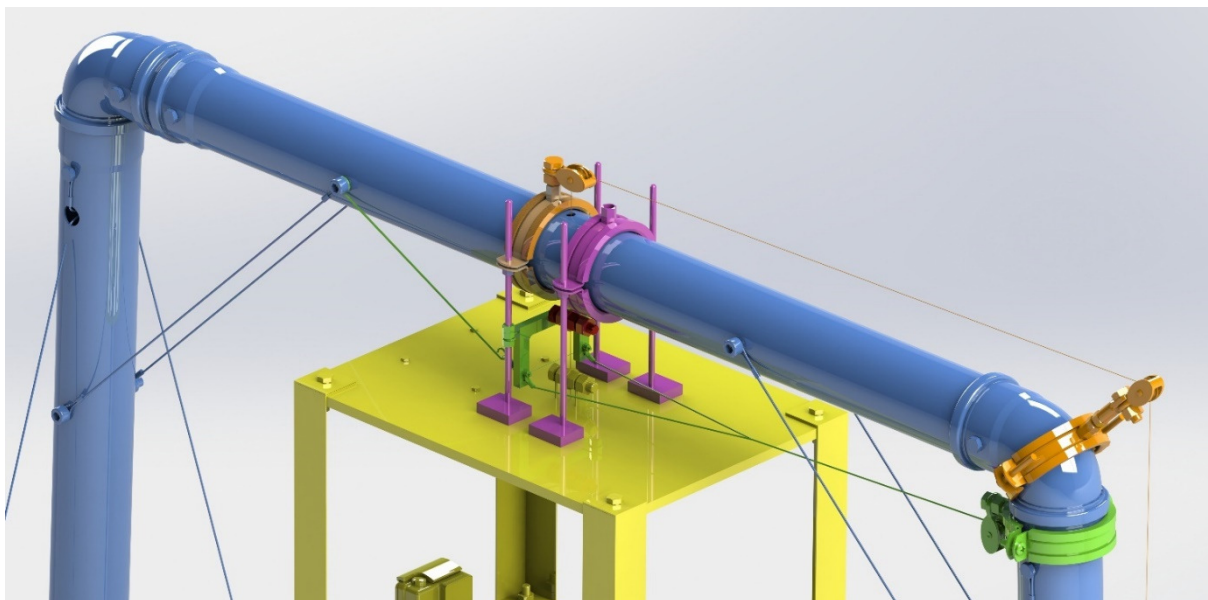
3. Konstrukce

Při konstrukci pádové věže byl brán zřetel především na funkčnost, nízkou cenu a přenosnost či skladnost. Výsledkem je pádová věž s variabilní výškou po cca 2, 3 a 4 m, výška pádu experimentálního zařízení je pak o cca 0,5 m menší, díky jeho vlastní výšce a výšce dopadové plochy. Dosahovaná kvalita mikrogravitace je přitom na úrovni 0,1 g. Celková cena všech komponentů se pohybuje v řádech tisíců Kč, mezi nejdražší položky patří kamera a samotný rám pádové věže. Díky vhodně zvoleným rozměrům trubek rámu by se celá pádová věž vešla do krabice o rozměrech 1200 x 500 x 500 mm.

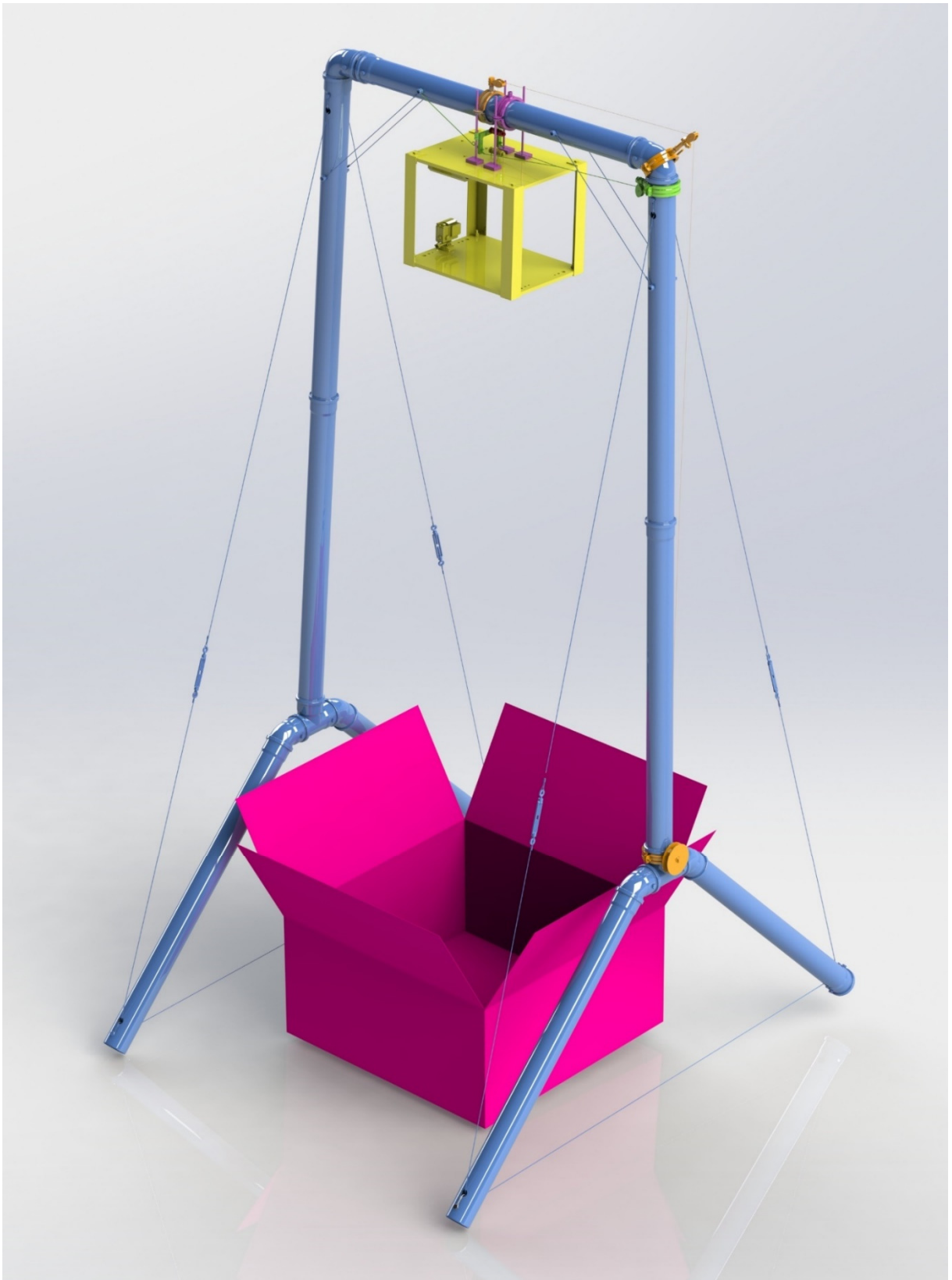
Na obrázku 1 a 2 je celá konstrukce zobrazena spolu s barevným odlišením jednotlivých systémů, zobrazena je střední výšková varianta. Jednotlivé systémy jsou pak dále v dokumentu detailně popsány spolu se základními aspekty jejich návrhu.

Pozn.: Některé detaily mohou být v modelu zobrazeny jen schematicky, stejně jako ve všech dalších obrázcích modelu v tomto dokumentu.

- Rám pádové věže
- Zdvihací mechanismus
- Odjišťovací mechanismus
- Doraz
- Závažíčko
- Experimentální zařízení
- Dopadová plocha



Obrázek 1: Detail modelu horní části pádové věže s barevně odlišenými systémy

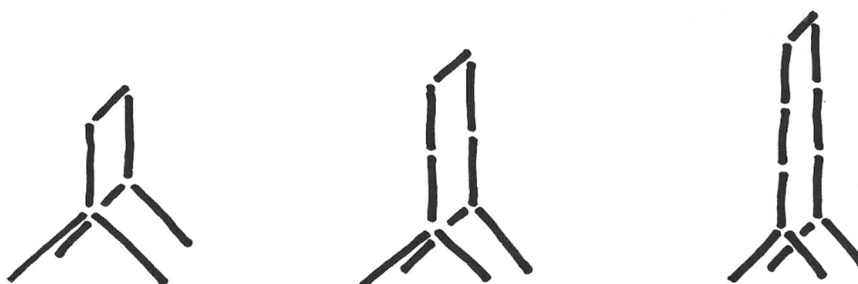


Obrázek 2: Model pádové věže s barevně odlišenými systémy

3.1. Rám pádové věže

Mezi základní požadavky na rám patří jeho tuhost, nízká cena, lehkost a malé rozměry ve složeném stavu. Tyto prioritní parametry byly tedy vzaty v úvahu a materiálem rámu byly po vzoru malé demonstrační pádové věže NASA [9] zvoleny PVC trubky. Hlavní výhodou oproti kovovým materiálům s vyšší tuhostí je daleko nižší cena, více než 10x nižší než např. hliník. Jsou také dostatečně lehké na to, aby se daly bez problému přenášet. Další výhodou je možnost postavení konstrukce z normalizovaných součástí, bez nutnosti jejich výroby. Jako největší problém užití plastových trubek se později ukázala přílišná volnost v kloubových a odbočkových spojích, což se více projevuje s rostoucí výškou pádové věže. S tímto problémem se ale již od počátku návrhu počítalo, tento problém byl vyřešen vhodně umístěnými ocelovými lanky a napínáky.

Celkový tvar rámu byl volně inspirován [9] a jinými jednoduchými pádovými věžemi, jejichž obrázky jsou volně dostupné na internetu. Tento tvar je konstrukčně jednoduchý a účinný, složitější tvary však mohou nabízet lepší stabilitu, avšak na úkor přenositelnosti, ceny a složitosti sestavení. Na obrázku 3 je schematicky zobrazen tvar pádové věže ve třech výškových konfiguracích.



Obrázek 3: Znázornění výškových konfigurací pádové věže

Z dostupných průměrů 32, 40, 50, 75, 110 mm HT trubek byly použity trubky průměru 75 mm, tento průměr byl zvolen jako vhodný kompromis mezi menšími průměry s lepší přenositelností, ale horší tuhostí a většími průměry se špatnou přenositelností a smontovatelností, ale lepší stabilitou věže. I při použití průměru 75 mm je smontovatelnost a rozebíratelnost podmíněna použitím mazacího tuku, smontování i rozmontování pak zvládne jeden zručný člověk.

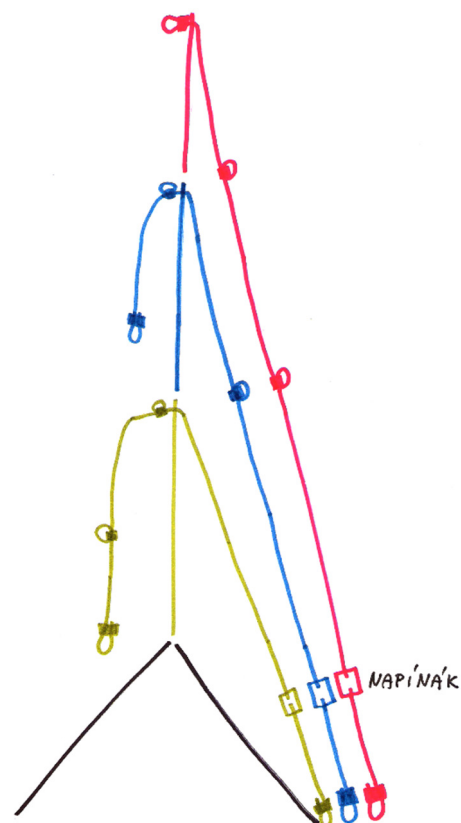
Celkem bylo použito 11 metrových trubek, z čehož 4 z nich slouží ke zvýšení věže a prodloužení doby volného pádu, tedy délky mikrogravitace. Věž lze nastavit z nejnižší konfigurace o dva metry do výšky a zvýšit dobu pádu o přibližně 270 ms (z původní hodnoty 640 ms až na 910 ms). Dvou či tří metrové trubky nebyly použity pro svojí horší skladnost a přenositelnost. Pro docílení vhodného tvaru bylo použito celkem 6 kolen, 4 po 45° a 2 po 87° a 2 odboček po 87° (87° bylo místo 90° zvoleno jednoduše proto, že 90° kolena a odbočky se nevyvrábějí, trubky jsou svým původním účelem určeny k vedení kapaliny a ne ke stavbě věží, apod.).

Jelikož jsou trubky určeny pro proudění kapalin, při stavbě vyšly dvě širší části k sobě, s čímž se předem počítalo, to bylo vyřešeno seříznutím náhradní čtvrt metrové trubky na kratší, cca 105 mm a jejím vložením do širších konců, čímž došlo k jejich funkčnímu spojení.

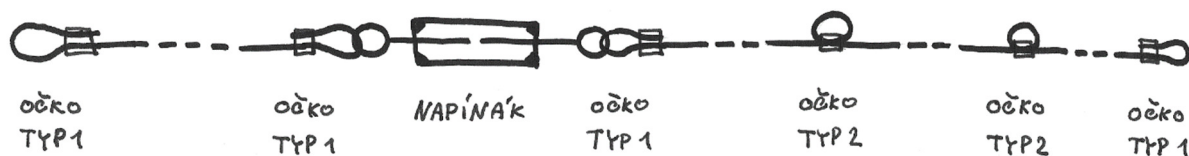
Odbočka a 2 kolena po 45° byly k sobě pevně spojeny šroubem M8 a maticí, tak aby mezi nimi nedocházelo k protáčení a tím rozjíždění nohou věže do stran, toto bylo provedeno celkem čtyřikrát, jednou pro každou nohu.

Po sestavení věže byly zjištěny některé nedostatky stability: nohy věže se rozjížděly od sebe, při vyšších konfiguracích se věž výrazně nakláněla ve směru kolmém na horní trubku a také mírně do boků. To bylo vyřešeno podle původního plánu přidáním ocelových lanek průměru 2 mm, a to mezi nohy, jedno na každou boční stranu. Dále celkem 4 lanka byla přidána mezi vždy konec nohy a horní část nejvyšší vertikální trubky.

Tato lanka byla vyrobena univerzálně, tak aby se dala použít pro všechny výškové konfigurace pádové věže, obsahují dva typy oček pro uchycení, viz obrázek 4 a 5. Typ 1 je vždy na koncích a typ 2 uprostřed lanka. Očko druhého typu zajišťuje stabilitu věže v případě užití prostřední či nízké varianty a zároveň konstantní délku lanka při jištění nejvyšší varianty věže, dá se také snadno provléci skrz trubku. Díky univerzálnosti lanka se tedy v případě potřeby např. při použití věže v nejvyšší konfiguraci může použít stabilizační lanko na prostřední vertikální trubce, ve výchozím nastavení je však vždy použito na té nejvyšší. Na těchto lankách jsou navíc umístěny napínáky pro vypnutí konstrukce, byly použity dva jen s oky a dva s okem a hákem. Napínáky jen s oky by měly být použity na stejné předozadní straně konstrukce a měly by být uchyceny ještě před stavbou horní části věže. Univerzální část lanka se čtyřmi oky je vhodné při stavbě umístit nad napínákem, tak aby byl napínák v dosahu experimentátora.



Obrázek 4: Schematické znázornění univerzálnosti dlouhého lanka



Obrázek 5: Detail dlouhého lanka

Všechny výše zmíněná lanka byla uchycena na trubky následujícím způsobem: 80 mm od konce trubky byla vyvrtána větší díra o průměru přibližně 15 mm pro průchod lanka na druhou stranu trubky a 35 mm od konce díra průměru 8 mm pro šroub M8 (šroub se díky tomu v díře nehýbe), délka šroubu byla zvolena 20 mm, byla použita matice a dotažena tak, aby pod hlavou šroubu na vnější straně trubky zůstala cca 2 mm mezera pro lanko. Lanko je při tomto způsobu uchycení namáháno jen v tahu kolmo na osu šroubu a tím pádem se minimalizuje vysmeknutí lanka z uchycení. V případě potřeb lze matici dotáhnout a tím zajistit lanko napevno. (Obrázek 6)



Obrázek 6: Detail uchycení lanek na koncích HT trubek

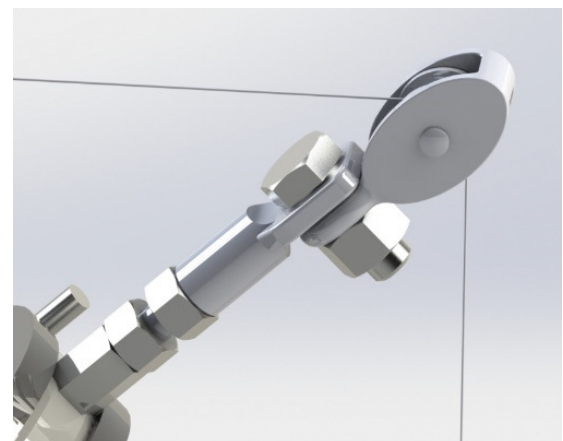
Další lanka byla umístěna v horních rozích pádové věže, aby eliminovala ohyb v 87° kolenech, napínají se skrze oddálení nohou od sebe. Celkem se jedná o čtyři lanka, na koncích uchycená za hlavou šroubu M8 vedoucího skrz trubku nebo za matici na druhé straně šroubu. Pro šroub byla opět použita díra průměru 8 mm aby se eliminovala vůle šroubu.

Pro zajištění správné polohy horní trubky byly použity tři šrouby M8, spojena byla horní trubka na obou koncích, tedy s vyrobenou spojkou (pevně, tj. šroubem a maticí) a s 87° kolenem volně, jen šroubem v 8 mm díře, tzn. šroub nevypadává. Na druhé straně bylo taktéž spojeno 87° koleno, ale s vyrobenou spojkou, taktéž jen šroubem. Volného spojení bylo užito vzhledem k nemožnosti montáže matice a požadavku na dostatečnou rozebíratelnost.

3.2. Zdvihací mechanismus

Při svojí maximální výšce, kdy věž může dosahovat téměř 4 metrů, bylo nutné implementovat mechanismus, kdy člověk zůstává na zemi a experimentální zařízení buď vytáhne nahoru, nebo je vytaženo strojem. Byla zvolena první varianta pro svoji jednoduchost a cenu.

Jako vhodný mechanismus byl zvolen systém dvou kladek, upevněných uprostřed a v rohu horní části věže. Místo kladek by šlo rovnocenně užít i vhodného šroubu s okem, jelikož kladky zde plní jen tvarovou funkci vzhledem k téměř nulovému tření mezi povrchem kladky a velmi tenkým vlasem. Kladka uprostřed horní trubky byla upevněna pomocí objímky, šroubu M10 a odpovídající matice. Pod touto kladkou byla do trubky vyvrtána díra dostatečného průměru pro protažení vlasce, konkrétně 8 mm. K protažení vlasce trubkou před začátkem experimentů je



Obrázek 7: Detail upevnění kladky v horním rohu pádové věže

nutné použít tužší předmět např. brčko. Kladka v rohu byla taktéž upevněna pomocí objímky a šroubu M10 s maticí, ale navíc také trubkovým závěsem, kusem závitové tyče M8 délky přibližně 50 mm a dvěma maticemi, viz obrázek 7. (Šestihran přivařený k objímce obsahuje vnitřní závit M8 a M10.)

Uchytení cívky vlasce bylo řešeno jejím nasazením na šestihran objímky a zajištěním šroubem, tak aby se cívka při odmotávání točila stejným směrem, kterým se utahuje šroub, jinak by mohlo dojít k jeho povolení a vyšroubování.

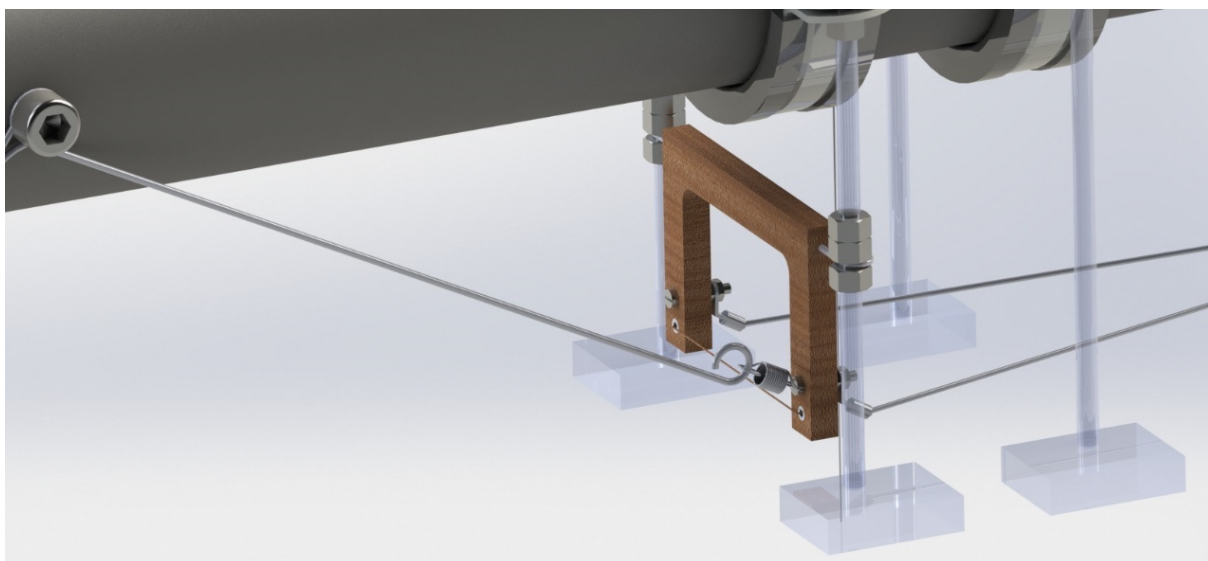
Během testování byly použity dva různé druhy cívek vlasce, první typ měl uvnitř válcový otvor a druhý šestihranný otvor o rozměru cca 15 mm. První typ se proti protočení zajistí dotažením šroubu M8 či M10 podloženým vhodným množstvím podložek či matic podle šířky cívky, tak aby se cívka neprotáčela ani při zatížení, to je zpravidla potřeba udělat klíčem. Druhý typ se zajistí vytažením směrem od objímky na matici rozměru šestihranu 14 mm našroubovanou na dotaženém šroubu M10 vhodné délky, podle šířky cívky.

3.3. Odjišťovací mechanismus

Pro krátké doby pádu, tj. relativně nízké pádové věže je žádoucí eliminovat možné zdroje vibrační experimentálního zařízení. Významným zdrojem těchto vibrací může být spouštěcí mechanismus, především pokud je založen na mechanickém principu.

Po zvážení výše zmíněného byl zvolen způsob zavěšení experimentálního zařízení na vlasci, dostatečně tlustém, aby bezpečně unesl požadované zatížení. Odjištění funguje na principu přepálení vlasce chrom-niklovým odporovým drátem o průměru 0,3 mm.

Konkrétní průměr vlasce byl nakonec zvolen 0,45 mm s nosností kolem 17 kg. Vlasce o průměru 0,25 mm se ukázali jako nedostačující, i když vydržet měly, k jejich přetržení došlo vždy při vytahování experimentálního zařízení. Lze použít i vlasce většího průměru, čímž se zmenší prověšení. Funkčnost přetavení byla úspěšně odzkoušena i na vlasci o průměru 1,5 mm (šňůra na prádlo).



Obrázek 8: Detail odjišťovacího systému

Spotřeba vlasce by neměla být nijak velká jednak vzhledem k počtu provedených experimentů a také k jeho nevelké spotřebě na jeden experiment, jež je kolem 90 mm . Cena použitého vlasce vychází přibližně na 1 Kč za metr, tj. necelých $0,1\text{ Kč}$ na experiment.

Místo šroubů objímky jsou umístěny dvě závitové tyče M6 délky 200 mm , které slouží především jako doraz experimentálního zařízení a rovněž plní funkci odebraných šroubů objímky, spolu s odpovídající maticí. Mezi tyto závitové tyče je zavěšen tvar U vyrobený z textitu, a to na dvou drátčích ohnutých kolem závitových tyčí tvořících osu rotace profilu U. Tyto drátky jsou zajištěny s dostatečnou vůlí na závitové tyči ve správné výšce, tak aby zaprvé nedocházelo ke kontaktu experimentálního zařízení s odjišťovacím mechanismem a zadruhé aby zbyl dostatečný prostor pro závažíčko v podobě šroubu s dvěma maticemi. Na druhé straně jsou drátky jen volně zasunuty cca 10 mm hluboko do dřeva. Umístění na závitových tyčích nabízí možnost nastavení, tak aby bylo docíleno co nejlepší funkce.

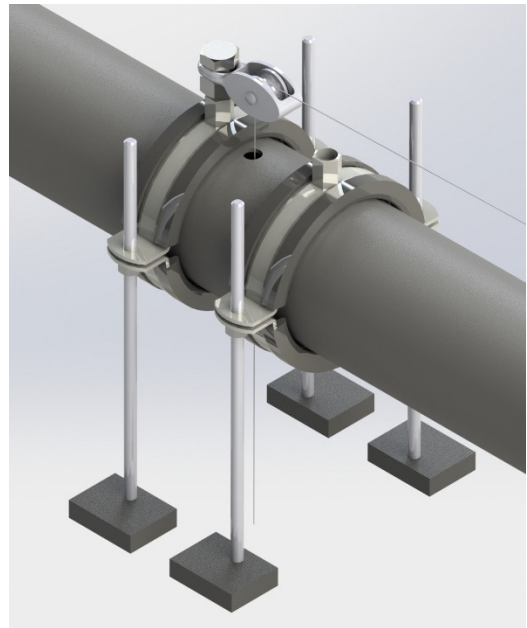
Na dřevěném tvaru U je mezi volnými konci natažen odporový drát, procházející skrz profil, izolovaný od drátu celkem čtyřmi keramickými izolacemi a na druhé straně je upevněn pod maticku šroubu M3 a podložen podložkou. Použitím izolace nedochází k přílišné degradaci dřevěného materiálu. Toto řešení uchycení také umožňuje jeho poměrně rychlou výměnu odporového drátu, po nějakém čase totiž dojde k jeho přetržení (během prvním několika desítek shozů k pozorovatelné degradaci drátku nedošlo). Na šroubku je umístěna další maticka, pod níž jsou upevněna malá očka dvou měděných vodičů průměru jádra 1 mm . Tyto dva vodiče vedou přes kladku v horním rohu (stejném přes který vede vlasce) dolů ke zdroji/spínači. Přibližně po 300 mm od vlasce se spojují v jeden, či jsou spojeny v jeden např. bužírkou, jako v našem případě. Díky tomuto řešení, kdy vodiče slouží k vedení a také k odjištění, tedy přitáhnutí odporového drátu k vlasci byl eliminován jeden drát. Jelikož ale bylo potřebné užít vodičů vyššího průměru (vzhledem k proudu procházejícímu odporovým drátem) a jejich hmotnost není zanedbatelná, bylo potřeba užít zpětné síly, která by vracela odjišťovací mechanismus do původní polohy, gravitace se projevila být nedostatečnou. Proto byla namontována pružina dostatečné síly, aby plnila tento účel. Uchycena byla kolem jedné z nohou U, pod maticemi a na druhé straně k drátu vedoucímu k hornímu uchycení lanek stabilizace, tak aby plnila svůj účel. (Obrázek 8)

Vodiče vedou od odporového aktivačního mechanismu dolů k experimentátorovi, kde jsou buď zapojeny do proudového zdroje se spínačem, nebo na baterie, doporučuje se první možnost, pokud je to možné. Předpokládá se, že při užití baterií by se poměrně rychle vybyly. Odpor použitého drátu je přibližně $1\ \Omega$. Pro správnou funkci odporového drátu by jím měl procházet proud alespoň okolo $1,5\text{ A}$, potřebné napětí v použité konfiguraci bylo změřeno $3,2\text{ V}$. Konkrétně byl použit zdroj pro odporovou pilu, nastavený na $21\text{ V} - \text{PWM } 5\%$. Přepalování bylo úspěšně odzkoušeno i se 4 AA bateriemi o celkovém napětí 6 V .

3.4. Doraz

Při vytahování experimentálního zařízení musí dojít k jeho zastavení v horní pozici, tak aby mezi ním a trubkou byl dostatek místa na odjišťovací mechanismus a závažíčko. Měl by také tlumit vibrace experimentálního zařízení vzniklé při jeho vytahování.

Doraz byl tedy vyřešen co možná nejjednodušším způsobem, tak aby se minimalizoval počet součástí – místo šroubů objímky držící horní kladku a do další objímky, sloužící pouze tomuto účelu byly dány závitové tyče dlouhé 200 mm. Jejich vhodným nastavením vznikne pod horní trubkou dostatečný prostor. Aby byla splněna funkce objímky, musely být závitové tyče doplněny o matice každá, čímž došlo k opětovnému stažení kolem horní trubky. Na spodní konec závitových tyčí byl přidán pěnový polypropylen tloušťky 20 mm, z jedné strany lepkavý, na tuto stranu byla přilepena matice M6 a závitová tyč byla zašroubována cca 7 mm do pěny, tím se vytvořil měkký doraz pro utlumení vibrací. (Obrázek 9)

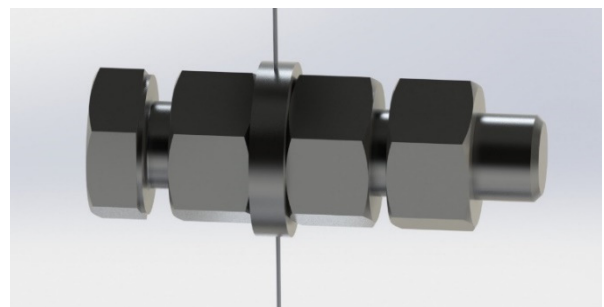


Obrázek 9: Detail systému dorazu

3.5. Závažíčko

Po přepálení vlasce odporovým drátem dojde k uvolnění jeho horní části, je přitom velmi žádoucí zabránit zpětnému průchodu vlasce trubkou (obzvláště při užití vyšších variant) a taktéž zajistit jeho opětovnou dosažitelnost osobou provádějící experiment po jeho úspěšném provedení, tak aby se mohlo pokračovat s dalšími experimenty. Na vlasec proto musí být ve vhodné vzdálenosti od experimentálního zařízení umístěno závažíčko, tak aby jeho hmotností vlasec klesl dolů (po přetavení). Závažíčko nesmí být umístěno příliš nízko, kde by překáželo odjištění, ani příliš vysoko, protože by nedošlo k zaražení zařízení o podpory, ale o závažíčko. Podoba závažíčka by měla být volena tak, aby bylo možné ho jednoduše demontovat a znovu připevnit, což bude vyžadováno po každém experimentu.

Po zvážení výše uvedeného byl zvolen obyčejný metrický šroub M12 délky 40 mm, tedy šroub s dostatečnou hmotností, na kterém jsou našroubovány tři odpovídající matice. Mezi dvě z nich blíže k hlavě šroubu jsou vloženy dvě podložky. Mezi tyto podložky je pak sevřen vlasec jedenkrát obmotaný kolem šroubu, použití podložek je nutné, jinak může dojít k přetřezání vlasce sevřením v závitě. (Obrázek 10)

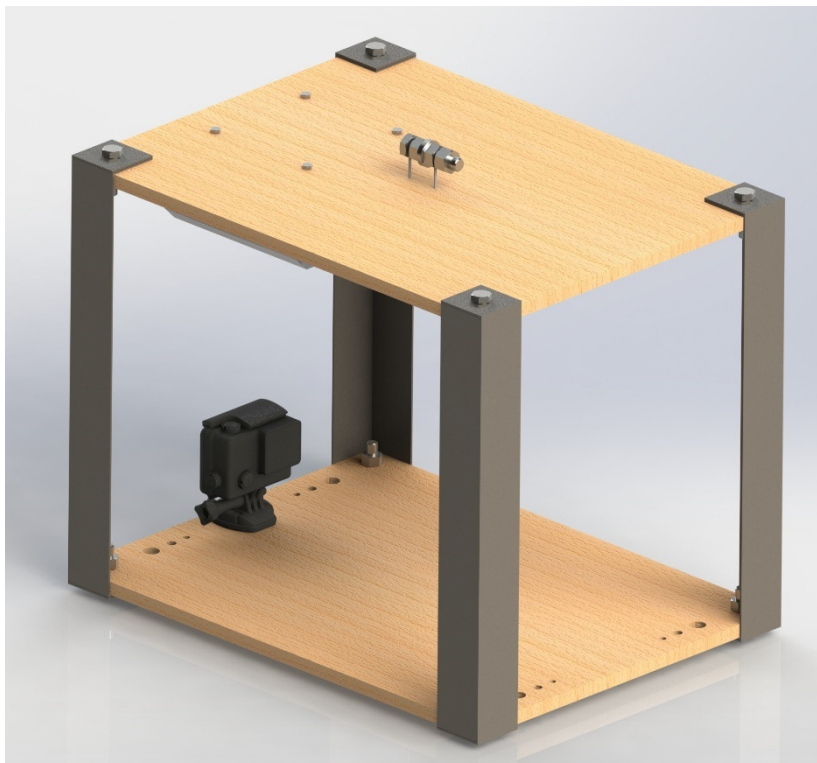


Obrázek 10: Detail systému závažíčka

Vhodná vzdálenost umístění od uchycení experimentálního zařízení byla zjištěna 65 ± 10 mm.

3.6. Experimentální zařízení

Tak abychom mohli experiment analyzovat, musíme mít dostatečně prostorné zařízení, jež bude padat spolu s experimentem a ve kterém bude zaznamenáván obraz a zrychlení. Zařízení, které bude nejlépe tuhé konstrukce a které bude schopné odolat rázům při dopadu. Aerodynamický tvar je výhodou.

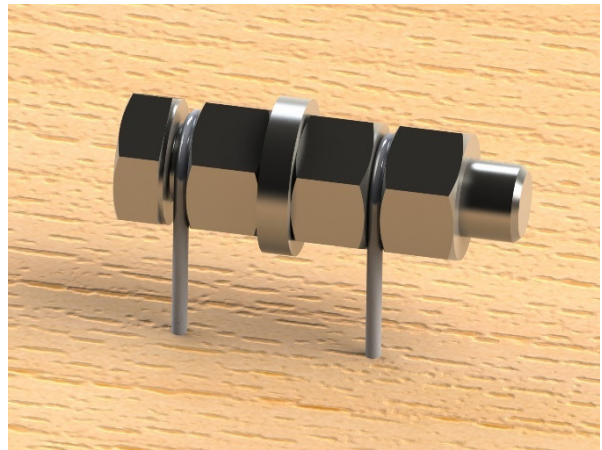


Obrázek 11: Detail systému experimentálního zařízení

3.6.1. Rám

Jako rám je možné užít obyčejnou plastovou krabici vhodného rozměru, není ale příliš tuhá a pevná. Proto byla raději zvolena výroba vhodnějšího, ale stále jednoduchého zařízení, prioritami byla opět nízká cena a přijatelná hmotnost. Jako podstavy byly použity dvě překližkové desky tloušťky 8 mm o rozměru 300 x 400 mm, které byly v rozích spojeny plechy ohnutými tvaru L. Použitý plech tloušťky 1,5 mm byl nastříhán na čtyři kusy o rozměrech 80 x 400 mm, do každého kusu byly vyvrtány dvě díry v místě budoucích rohů, tak aby výška zařízení byla přibližně 300 mm. Následně byl plech ohnut na ohýbačce a s pomocí svěráku do konečného rozměru. Plechy byly zajištěny, po vyvrtání odpovídajících děr, celkem osmi šrouby M8 délky 25 mm a pojištěny maticemi. Konečný výsledek je znázorněn na obrázku 11.

Zavěšení a uchycení rámu k vlasci bylo voleno univerzální se závažíčkem, tj. byl použit stejný šroub M12 se třemi maticemi a dvěma podložkami a stejný mechanismus sevření vlasce. Uchycení na horní podstavu rámu je vyřešeno dvěma háky z drátu průměru 2 mm uprostřed podstavy vzdálené od sebe tak, aby první z nich zapadl mezi hlavu šroubu a k ní nejbližší matici a druhý mezi dvě matice na konci šroubu, tak jak je vidět na ilustraci. Poslední matice se pak dotáhne tak, aby sevřela jeden z háků, to proto, aby při dopadu celé závažíčko či uchycení experimentálního zařízení (tj. ta samá věc) nevyletělo pryč. Oba háky jsou na spodní straně horní podstavy pevně zalaminovány. (Obrázek 12)



Obrázek 12: Detail uchycení experimentálního zařízení

3.6.2. Technologické vybavení

Požadavkem na kameru je především její odolnost proti rázům a možnost nahrávání v obstojném rozlišení ve vysoké snímkové frekvenci, akcelerometr pak postačí obyčejný, slouží jen k ověření teoretických předpokladů dosahované kvality mikrogravitace.

Použitá kamera je jedna z levnějších akčních kamer, má široký úhel záběru a možnost nahrávání 240 fps v rozlišení 480p, konkrétně se jedná o *Xiaomi Yi Sports* s cenou něco přes 2000 Kč, srovnatelně lze ale užít i akční kamery jiných značek, pokud splňují výše zmíněná kritéria, uchycení by u nich mělo být stejné, takže lze případně použít zrovna tu co je k dispozici. Možnost umístění kamery se původně uvažovala ve více místech a v různých výškových polohách, ale díky tzv. rybímu oku kamery nakonec postačil jen jeden montážní úchyt, kamera i tak snímá téměř celý vnitřek zařízení. Uchycení je řešeno šroubem M6 procházejícím skrz podstavu do úchytu dodávaného s kamerou, která má závit užívaný ve stativích (proto by bylo lepší použít šroub M6 se speciální roztečí, je však daleko dražší a funkčně vyjde téměř na stejno). Nemalou výhodou kamery je její možnost ovládání přes Wi-Fi, je žádoucí zapnout nahrávání až těsně před odjištěním a vypnout ho brzy po dopadu a tím předejít gigabajtům „mrtvého“ záznamu.

Dalších „nutným“ vybavením je akcelerometr a paměť, na kterou budou data z něj zaznamenávána. 3-osový akcelerometr byl připojen na jednoduchý počítač/mikrokontrolér *Arduino Nano* a tento počítač na čtečku paměťových microSD karet. *Arduino* bylo také připojeno ke zdroji elektrické energie, konkrétně ke čtyřem AA bateriím zapojeným sériově, každá o napětí 1,5 V, tj. dávající celkové napětí 6 V, což tak akorát postačuje (limitní rozpětí požadovaného napětí je 6 – 20 V). Byl implementován spínač a zelená LED dioda signalizující zapnutí. Všechna tato elektronika byla pevně umístěna do krabičky dostatečných rozměrů a přišroubována šrouby M4 délky 25 mm k horní části rámu, nad kameru. Do krabičky byl udělán otvor pro vyjmutí microSD karty a případnou výměnu baterií. Při umísťování jednotlivých komponent byl kladen důraz na to, aby se při dopadu neuvolnily, aby byl akcelerometr uchycen pevně a dával tak smysluplná data a aby byly baterie a microSD karta

dostupné člověku bez nutnosti otevření krabičky. Pro test funkce zařízení byl software *Arduina* vytvořen nepatrnou modifikací standardně přiložených příkladů.

3.6.3. Vyvažování

Aspoň minimální vyvážení je nutné především z důvodu možné rotace zařízení při volném pádu, ale i pro jeho snadnější zajištění v horní poloze a udržení horizontální polohy při zvedání, což je důležité zejména kvůli nezajištěnosti experimentu v zařízení.

Vyvažování bylo řešeno vyvrtáním děr pro šrouby M4, M6 a M10 v dolní podstavě, umístěných vedle obou stran kamery a stejně za prostorem pro experiment. Zvolením vhodně dlouhých šroubů spolu s vhodným počtem matic či podložek se zařízení dá dostatečně vyvážit. V případě potřeby perfektního vyvážení lze zařízení dovyvážit libovolně umístěným závažíčkem (může být např. matice) a jeho dočasným zajištěním na místě (např. dobrou izolepou).

3.7. Dopadová plocha

Experimentální zařízení ke konci pádu dosahuje rychlosti téměř $10 \frac{m}{s}$ při užití věže v nejvyšší konfiguraci, i tak ale dopadové, zpomalovací zařízení musí být schopno spolehlivě pohltit jeho kinetickou energii. Dostatečná plocha dopadového zařízení pak zaručí, že experimentální zařízení nepadne mimo. Jako nejlepší a velmi jednoduché řešení se jeví užití kartonové krabice naplněné předměty, které vytratí kinetickou energii do své vnitřní energie a svého přemístění v prostoru, v omezené míře pak i v pružnou deformaci, která ale není příliš žádoucí, aby experimentální zařízení nevyskočilo mimo krabici a někoho nezranilo či se nerozbilo.

Jako zpomalovací materiál byly použity běžné polystyrenové „mašličky“ používané k ochraně přepravovaného materiálu, také je možné užít vhodně poskládanou bublinkovou fólií, polštáře či deku. Polystyrenové kuličky nejsou příliš praktické, po dopadu by se rozletěly do všech směrů a bylo by nutné je uklízet. Požadovaná hloubka zpomalovací vrstvy se odvíjí od hmotnosti experimentálního zařízení a od výšky jeho pádu, nám stačilo použít přibližně 200 mm silnou vrstvu i při užití nejvyšší konfigurace pádové věže.

Nejpraktičtější velikost krabice je přitom taková, aby se do ní samotná konstrukce dala celá poskládat při skladování, její rozměry by mohly být 1200 x 500 x 500 mm, avšak minimální dopadová plocha by měla mít rozměr alespoň uhlopříčku zařízení, tj. 500 mm, plus bezpečnou vzdálenost na obou stranách, tj. řekněme 100 mm, to dává minimální rozumný rozměr 700 x 700 mm pro otevřenou část krabice. Vhodně zvolená výška krabice pak zajistí, že experimentální zařízení z ní nevyskočí. Použitá krabice má rozměry 620 x 620 x 620 mm (největší co byla k dispozici), což tak akorát postačuje na relativně bezpečné zachycení experimentálního zařízení.

4. Soupis polotovarů použitých při výrobě

Věc	Počet/rozměr
HTEM trubka \varnothing 75 mm, délky 1000 mm	11
HTEM trubka \varnothing 75 mm, délky 250 mm	1
HTEA odbočka 87°, \varnothing 75 mm	2
HTB koleno 45°, \varnothing 75 mm	4
HTB koleno 87°, \varnothing 75 mm	2
Ocelové lanko \varnothing 2 mm	30 m
Hliníková objímka pro ocelová lanka \varnothing 2 mm	36
Napínák M5 oko + hák	2
Napínák M5 oko + oko	2
Instalační objímka na trubku \varnothing 72 – 78 mm	5
Kladka pro lano \varnothing 5 mm	3
Trubkový závěs M8	1
Závitová tyč M8	50 mm
Vlasec \varnothing 0,45 mm	100 m na cívce
Textit tloušťky 7 mm	75 x 60 mm
Drát \varnothing 2 mm	550 mm
Chrom-niklový odporový drát	100 mm
Keramická izolace	4
Vodič \varnothing jádra 1 mm	10 m
Tažná pružina	1
Závitová tyč M6	800 mm
Pěnový polypropylen tloušťky 20 mm, lepidivý	40 x 40 mm
Překližka tloušťky 8 mm	400 x 600 mm
Plech tloušťky 1,5 mm	240 x 400 mm
Skelná tkanina	240 x 320 mm
Epoxidová pryskyřice	50 ml
Kamera, kryt, úchyt	1
Akcelerometr, Arduino Nano, čtečka microSD karet	1
LED, rezistor 1 k Ω , spínač	1
Krabička na elektroniku	1
Destička pro umístění elektroniky	55 x 135 mm
AA baterie	4
Pouzdro na 4 AA baterie	1
Vodiče	dle potřeby
Cín na pájení	dle potřeby
Bužírka	dle potřeby
Vteřinové lepidlo	dle potřeby
Kartonová krabice	620 x 620 x 620 mm
Polystyrenové kousky	0,072 m ³
Šroub M12x40	2
Šroub M10x25	4
Šroub M8x100	4
Šroub M8x25	8

Věc	Počet/rozměr
Šroub M8x20	19
Šroub M6x50	2
Šroub M6x20	1
Šroub M4x25	4
Šroub M3x16	2
Šroub M3x10	1
Šroub M2x6	5
Matice M12	6
Matice M10	5
Matice M8	31
Matice M6	15
Matice M4	10
Matice M3	5
Matice M2	5
Podložky pro M12	4
Podložky pro M3	5
Podložky pro M2	16
Vrutky, rozměry dle potřeb	6

Tabulka 1: Soupis polotovarů použitých při výrobě

Ačkoliv se dají všechny v tabulce 1 uvedené komponenty běžně sehnat, ne každý má doma např. ohýbačku na plech či lisovací zařízení na lanka, proto pokud by si někdo chtěl takovouto věž postavit doma, potřeboval by trochu improvizovat s jemu dostupným vybavením.

5. Experimenty

5.1. Možnosti

V pádové věži lze provádět mnoho jednoduchých experimentů pro demonstraci podmínek mikrogravitace, zde je vypsáno několik příkladů jevů, u kterých lze pozorovat jejich odlišné chování v beztížném stavu a konkrétní podobu experimentu.

Kapilární jevy, v experimentu by se do uzavřené nádoby umístili dvě trubičky, jedna průměru 5 mm a druhá např. 20 mm, obě by měly být nahoře otevřené, tak aby se mohly vyrovnat tlaky. Tekutina by v beztížném stavu měla vystoupat výše v případě užší trubičky.

Smáčivost tekutin, postačí jednoduchá nádoba, nejlépe válcového tvaru naplněná tekutinou, pro lepší viditelnost obarvenou např. potravinářským barvivem. Tekutina by měla po stranách nádoby vystoupat výše, v případě válcové nádoby by měla vytvořit tvar paraboloidu.

Hoření, dobře se dá demonstrovat obyčejnou svíčkou zabezpečenou tak, aby nedošlo k požáru. V prostředí beztíže vzhledem k absenci tíhy nedochází k vytlačování teplého vzduchu hustším studenějším vzduchem a tím k zásobování hoření dostatkem kyslíku. Plamen vytvoří kulový tvar, šíří se do všech směrů stejně a spalování probíhá velmi pomalu, vzhledem k nedostatku kyslíku, nakonec by měla svíčka zhasnout úplně.

Magnetismus, dva magnety válcového tvaru (nejlépe neodymové – silnější) se uzavřou ve válci stejnými póly k sobě, magnety musí mít ve válci jen malou vůli, aby se nemohly překlopit, taktéž musí být dostatečně vysoké, ze stejného důvodu. V experimentálním zařízení se umístí tak, aby osy jejich válců byly ve směru působení gravitace, po vystavení beztížnému stavu se od sebe magnety oddálí, v ideálním teoretickém případě ve vakuu by to bylo do nekonečna, v našem případě při užití neodymových magnetů i oněch 300 mm, které krabice na výšku má.

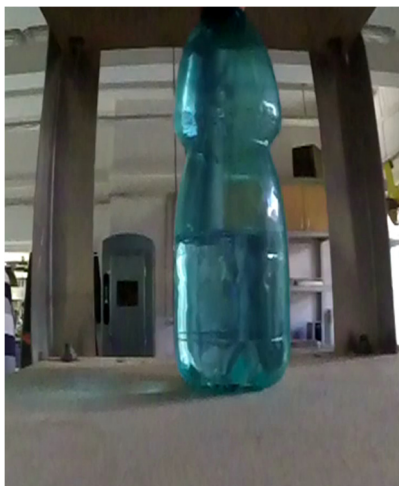
Mimo výše zmíněné jsou obzvláště krásné experimenty využívající pružné členy, tak aby se tělesa po odjištění dostala do vzduchu a tam jakoby zdánlivě levitovala, v případě jejich nepoužití totiž tělesa sice jsou ve stavu beztíže, ale jen „leží“ tam kde byly předtím, což není tak působivé, jako když se vznáší ve vzduchu, stejně jako by byly na oběžné dráze.

5.2. Výsledky a jejich interpretace

Bylo provedeno několik experimentů pro demonstraci funkčnosti pádové věže a zhodnocení výsledků, dále jsou podrobněji prezentovány dva z experimentů.

5.2.1. Experiment s vodou v lahvi

Lahev s vodou byla puštěna z dvou metrové varianty věže. Níže jsou zobrazeny snímky zajímavých okamžiků během pádu spolu s časem. V čase $t = 0 \text{ ms}$ začíná volný pád, postupně se uvnitř lahve tvoří hladina parabolického tvaru s maximem v čase $t = 340 \text{ ms}$. Krátce po tomto okamžiku se odpor vzduchu stává již nezanedbatelným, lahev „narazí“ zpět do podstavy a paraboloid se začne zmenšovat, zbytkové zrychlení působící na experimentální zařízení skrze odpor vzduchu je v tento okamžik okolo $0,2 \frac{\text{m}}{\text{s}^2}$. V čase $t = 535 \text{ ms}$ dochází k dopadu do krabice. Pro tento experiment bylo zaznamenáno i zrychlení, viz dále. (Obrázky 13-17)



Obrázek 13: $t = 0 \text{ ms}$



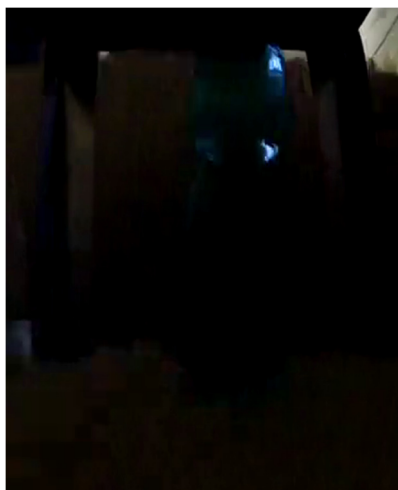
Obrázek 14: $t = 155 \text{ ms}$



Obrázek 15: $t = 340 \text{ ms}$



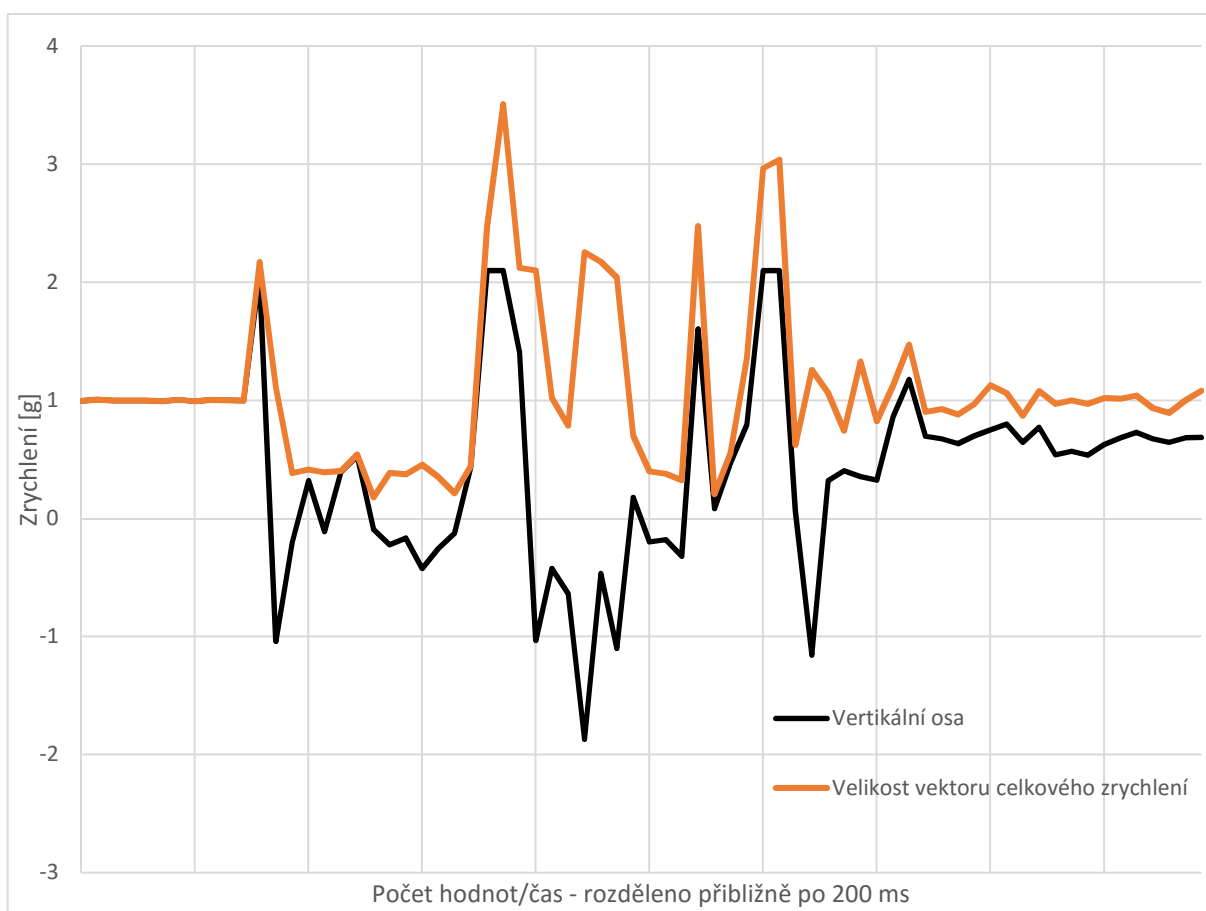
Obrázek 16: $t = 385 \text{ ms}$



Obrázek 17: $t = 535 \text{ ms}$

Zrychlení bylo zaznamenáváno na instalovaný akcelerometr, který ho měří ve všech třech osách a také úhlové zrychlení kolem těchto os. Nejprve bylo třeba akcelerometr nekalibrovat, tak abychom mohli správně analyzovat výsledky. Experimentální zařízení bylo tedy položeno na vodorovný povrch a akcelerometr zapnut, takto se nechal zaznamenávat data po cca 60 s, během kterých bylo zařízení otočeno, aby se zjistilo odsazení. Ve vodorovné poloze byla průměrná hodnota 14 638 a vzhůru nohama -18 375, tj. odsazení je -1868 a 1g se rovná 16 506. Jelikož integrovaný počítač neobsahuje hodiny, bylo potřeba zjistit ještě přibližný počet hodnot zaznamenaných za 1 s. Během minuty bylo zaznamenáno celkem 2126 hodnot, tj. cca 35,4 hodnot za sekundu.

Z počátku grafu 4 je vidět, že šum měřícího zařízení je malý, volný pád probíhá přibližně mezi časem 300 – 700 ms na grafu. Hodnota zrychlení v tomto čase by přitom měla být kolem 0g a mírně se přitom zvyšovat, z grafu je však patrné, jak moc hodnoty pro vertikální osu poskakují, což nemá žádné jednoduché vysvětlení a vyžadovalo by to podrobnější analýzu citlivosti akcelerometru a jeho ostatních dat, např. zda nedošlo k rotaci experimentálního zařízení, což by naznačovala velikost vektoru celkového zrychlení. V grafu je dále zaznamenáno přetížení po dopadu a opětovné vymrštění zařízení do vzduchu, kdy se zase na chvíli ocitá v beztížném stavu, než dopadne do krabice, tentokrát již není v horizontální poloze, a proto je konečná hodnota zrychlení ve vertikální ose rovna přibližně 0,7g.



Graf 4: Záznam zrychlení experimentálního zařízení

5.2.2. Experiment s odpružením podložek a šroubu

Byla použita nejvyšší čtyřmetrová varianta pádové věže. Podložky a šroub jsou umístěny na mírně napružený most, po odjištění jsou vymrštěny vzhůru a poté padají spolu s experimentálním zařízením, které ale zpomaluje díky odporu vzduchu, proto se podložky a šroub opět přibližují k podstavě. Rychlost pohybu podložek a šroubu je v inerciální vztažné soustavě experimentálního zařízení velmi malá a tudíž je zde i odpor vzduchu zanedbatelný, na podobném principu fungují odporové štíty sofistikovanějších pádových věží. V čase $t = 505 \text{ ms}$ dopadnou zpět na most a jsou mírně vymrštěny směrem vzhůru. Dopad experimentálního zařízení nastává v čase $t = 825 \text{ ms}$. (Obrázky 18-25)



Obrázek 18: $t = 0 \text{ ms}$



Obrázek 19: $t = 185 \text{ ms}$



Obrázek 20: $t = 275 \text{ ms}$



Obrázek 21: $t = 445 \text{ ms}$



Obrázek 22: $t = 505 \text{ ms}$



Obrázek 23: $t = 655 \text{ ms}$



Obrázek 24: $t = 735 \text{ ms}$



Obrázek 25: $t = 825 \text{ ms}$

6. Postup montáže, demontáže a opakovaných úkonů při provádění experimentů

1. Sestavení nohou

- 1.1. 2x zasunout trubku 1 a 2 do spojky tvaru Y (Značení trubek viz obrázek 26)
- 1.2. 2x spojit nohy trubek 1 a 2 středním lankem
- 1.3. 2x nasadit dlouhé lanko na trubku 1, tak aby byl napínák blíž noze
- 1.4. 2x nasadit kratší část dlouhého lanka na trubku 2 (tj. tu část, kam se zahákne hák napínáku)

2. Sestavení horní části

- 2.1. Spojit trubku 3 s trubkou 4 přes koleno a zajistit ve správné poloze šroubem M8
- 2.2. Na druhé straně spojit trubku 3 s trubkou 5
- 2.3. Do rohů trubky 3 umístit celkem čtyři krátká lanka
- 2.4. Trubkou 4 provléct odpovídající dlouhá lanka, tak aby nohy s cívkou vlasce byly na stejné straně (jako trubka 4)
- 2.5. Trubkou 5 provléct odpovídající lanka tak aby napínáky s hákem byly na stejné straně
- 2.6. Dlouhá lanka zajistit na šroubu v požadované poloze podle plánované výšky věže
- 2.7. Provléct vodiče odjištění kladkou pod kolenem trubky 4
- 2.8. Provléct vlasec dvěma vodicími kladkami a použitím brčka i skrz trubku 3
- 2.9. Zajistit vlasec závažíčkem na konci provlečeném trubkou 3

3. Sesazení – dbát opatrnosti na správné umístění vlasce na kladkách

3.1. Nízká verze

- 3.1.1. Nasazení horní části na nohy

3.2. Střední verze

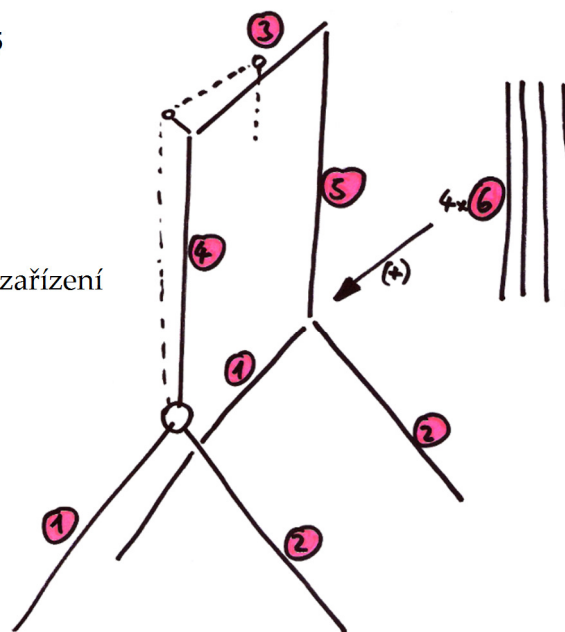
- 3.2.1. 2x nasadit trubku 6 do spojky Y
- 3.2.2. Nasadit horní část do trubek 6

3.3. Vysoká verze

- 3.3.1. 2x nasadit trubku 6 do spojky Y
- 3.3.2. Nasadit trubky 6 do trubek 4 a 5
- 3.3.3. Sesadit zbylé konce trubek 6

4. Dokončení

- 4.1. Umístit dopadovou krabici
- 4.2. Připojit zdroj
- 4.3. Umístit kameru do experimentálního zařízení



Obrázek 26: Schéma značení trubek čísly

5. Opakované úkony při provádění experimentů

- 5.1. Připojit na vlasec druhé závažíčko ve vzdálenosti cca $65 \pm 10 \text{ mm}$ od prvního
- 5.2. Umístit do experimentálního zařízení experiment
- 5.3. Zavěsit experimentální zařízení na nižší závažíčko a zajistit maticí
- 5.4. Zapnout akcelerometr
- 5.5. Vytáhnout experiment do jeho zaražení o doraz
- 5.6. Zapnout nahrávání kamery
- 5.7. Odjistit
- 5.8. Vypnout nahrávání a akcelerometr
- 5.9. Odpojit od experimentálního zařízení závažíčko

6. Demontáž

- 6.1. Odpojit závažíčko
- 6.2. Vytáhnout vlasec
- 6.3. Dále je demontáž možné provést dle potřeb, většinou je nejlepší začít vytažením trubek nad spojkou Y

7. Poznámky

- 7.1. Montáž vyšší a střední verze se doporučuje provádět ve dvou lidech
- 7.2. Sesazování trubek do sebe usnadní mazací tuk
- 7.3. Lanka lze dle potřeby a uvážení nepoužít, jediná nutná jsou střední lanka mezi nohama
- 7.4. Při stavbě nízké verze je jednodušší lanka a vlasec umístit až na konec
- 7.5. Montáž i demontáž zkušenému člověku nezabere více než 15 minut
- 7.6. Zastavěná plocha je přibližně $2 \times 1,5 - 2,5 \text{ m}$ podle varianty

7. Zjištěné nedostatky a náměty k vylepšení

7.1. Vylepšení kvality obrazového záznamu

Do experimentálního zařízení lze přidat světlo, to by mělo vylepšit zrnitost záznamu kamery a viditelnost experimentu. Světlo může být i externí, stojící vedle pádové věže. Většinu experimentů je také lepší pozorovat vůči jednolitému pozadí světlé barvy. Toto lze řešit instalací plexiskla matné barvy za experiment, či upevněním obyčejného, dostatečně pevného materiálu, tkaniny či kartonu.

7.2. Uzavření experimentálního zařízení

V případě provádění experimentů ohrožujících okolí by bylo vhodné umístit na otevřené strany experimentálního zařízení plexiskla, snadno odnímatelná (alespoň jedna strana) a s otvory na obsluhu kamery a akcelerometru. Jedna z dalších výhod kromě zvýšení bezpečnosti je i snížení odporu vzduchu, naopak nevýhodou je vyšší cena a hmotnost, při užití rozumné tloušťky plexiskla.

7.3. Univerzální úchyty na experimenty / jednoduchý odporový štít

V experimentálním zařízení nebyly vytvořeny žádné úchyty pro experiment, ten je nutné volně položit do experimentálního zařízení či úchyty pro něj přidělat dle potřeby. Pokud by se vytvořila sada experimentů se stejným způsobem uchycení, pak by bylo výhodné vytvořit i jednoduchý úchyt v samotném zařízení, tak aby umožňoval jejich snadnou a rychlou instalaci. Užitím úchytu se zabrání vyskočení experimentu ze zařízení a jeho případnému poničení či ztrátě (v případě drobných věcí) při zvedání i při dopadu. Nevýhodou tohoto řešení je pevné svázání experimentu se zařízením a jeho zpomalování díky odporu vzduchu. Pokud by se experiment nechal padat v samotném experimentálním zařízení, došlo by v podstatě k implementaci odporového štítu, na experiment by odpor vzduchu neměl téměř žádný vliv.

7.4. Zajištění odjišťovacích vodičů

Před odjištěním se věž nechá chvíli stabilizovat, aby se utlumily vibrace. Systém se pak aktivuje přitaháním odporového drátu na vlasec, tím se ale systém může znovu rozkmitat, proto by bylo lepší drát přitáhnout, nechat systém uklidnit a následně zapnout zdroj a zařízení odjistit. To je možné i nyní, ale jen pokud vodiče drží člověk v ruce a tahá za ně, což není dokonalé, lepší by bylo vodiče v aktivované poloze zajistit pasivně na rámu věže.

7.5. Vytahování experimentálního zařízení

Vytažení experimentálního zařízení probíhá díky otáčení cívky s vlascem a jeho namotávání, což je pomalé a namáhavé, obzvláště pokud je zařízení těžké a je použita cívky s vnitřním šestihranem. Jako lepší řešení se jeví nenamotávat vlasec na cívku, aby mohl být zajištěn, ale zajistit ho k rámu jinak, např. podobným mechanismem, který je použit na závažíčku a k uchycení experimentálního zařízení nebo vyrobit speciální cívku většího průměru i s rukojetí na točení.

7.6. Vylepšení akcelerometru

V budoucnosti by měly být k počítači připojeny hodiny a případně upravena elektronika tak, aby bylo možné zaznamenávat více dat za sekundu.

8. Fotodokumentace

Na obrázcích 27-34 jsou fotografie reálného zařízení.



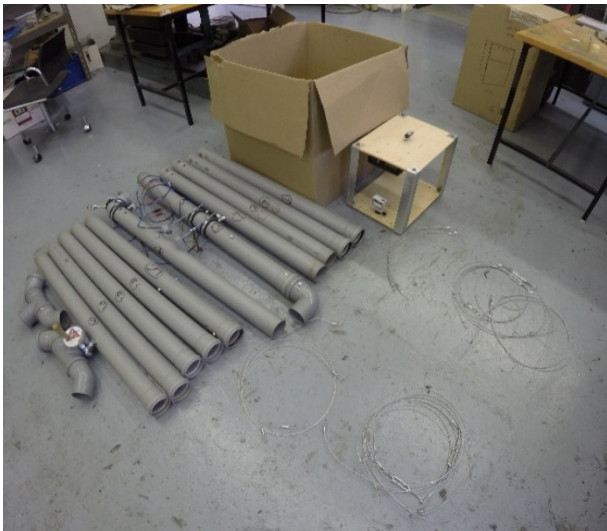
Obrázek 28: Nízká varianta pádové věže



Obrázek 27: Střední varianta pádové věže



Obrázek 29: Vysoká varianta pádové věže



Obrázek 30: Přehled všech dílů



Obrázek 31: Experimentální zařízení v pádu - nízká varianta



Obrázek 32: Detail dopadové plochy



Obrázek 33: Detail systémů uchycených na horní trubce - odjištěný stav



Obrázek 34: Detail horní části pádové věže

9. Závěr

Podařilo se navrhnout, postavit a odzkoušet demonstrační pádovou věž. Obzvláště tuhost konstrukce se očekávala lepší, i když pro nižší a střední variantu dostačuje. Zvýšení tuhosti konstrukce by ale bylo na úkor přenositelnosti věže, což je jeden z hlavních aspektů jejího designu, proto bylo třeba najít vhodný kompromis. V několika případech byly použity univerzální prvky zjednodušující celou konstrukci, jako např. v případě uchycení horního dorazu, kladky pro vedení vlasce a odjištění na stejnou objímku, nebo pro systém dlouhých stabilizačních lanek či společný prvek závažíčka a zavěšení experimentálního zařízení. Také tepelný odjišťovací mechanismus se plně osvědčil. Tyto prvky jsou nové v porovnání s jinými, rozměry a účelem srovnatelnými, zařízeními. Konstrukce přitom zůstává natolik jednoduchá a levná, že lze realizovat za několik málo tisíc Kč i v domácích podmínkách. Z teoretických předpokladů i praktických experimentů je patrné, jak nezanedbatelný vliv má odpor vzduchu s prodlužující se dobou pádu, tudíž by tato věž neměla být užívána k žádným vědeckým experimentům, jen pro školní demonstrace a podobně.

10. Přehled použité literatury

- [1] ZARM. ZARM Drop Tower Bremen User Manual. ZARM. [Online] 26. Duben 2012. [Citace: 3. Srpen 2016.] https://www.zarm.uni-bremen.de/fileadmin/user_upload/drop_tower/Users_Manual_0412.pdf.
- [2] Beysens, Daniel A. a van Loon, Jack J.W. A. *Generation and Applications of Extra-Terrestrial Environments on Earth*. . : River Publishers, 2015. ISBN 978-87-93237-53-4.
- [3] NASA. Zero Gravity Research Facility at NASA Glenn Research Center. *NASA Glenn Research Facilities*. [Online] [Citace: 3. Srpen 2016.] <https://facilities.grc.nasa.gov/documents/TOPS/TopZERO.pdf>.
- [4] Meseguer, J., a další. Surface tension and microgravity. *European Journal of Physics*. 7. Červenec 2014, Sv. 35.
- [5] Zhang, Xiaoqian, a další. Some key technics of drop tower experiment device of National Microgravity Laboratory (China) (NMLC). *Science in China Series E Technological Sciences*. Červen 2005, Sv. 48, 3.
- [6] *NPC2015-Paper No. 16 Experiments in Reduced Gravity Space Environment Using 1.1 Second Drop Tower and Challenges Involved*. Jyothikumar, Arjun Bindu, a další. Mumbai : Proceedings of the 2nd National Propulsion Conference, 2015.
- [7] von Kampen, P., Kaczmarczik, U. a Rath, H.J. The new Drop Tower catapult system. *Acta Astronautica*. 2006, Sv. 59, 278-283.
- [8] Schwerelosigkeit im Mini-Fallturm. *DLR_School_lab Neustrelitz*. [Online] 2012. [Citace: 4. Srpen 2016.] http://www.dlr.de/schoollab/Portaldata/24/Resources/dokumente/nz/3_Experimentbeschreibung-Schwerelos_WEB.pdf.
- [9] NASA. Educational Brief: Wireless Drop Towers for Microgravity Demonstrations. NASA. [Online] 19. Leden 2003. [Citace: 24. Červenec 2016.] http://er.jsc.nasa.gov/seh/microgravity_drops.pdf.
- [10] ESA User Guide to Low Gravity Platforms. ESA. [Online] Leden 2014. [Citace: 4. Srpen 2016.] http://www.esa.int/Our_Activities/Human_Spaceflight/Research/European_user_guide_to_low_gravity_platforms.
- [11] Rogers, Melissa J.B., Vogt, Gregory L. a Wargo, Michael J. Educational Brief: The Mathematics of Microgravity. NASA. [Online] Únor 1997. [Citace: 3. Srpen 2016.] http://er.jsc.nasa.gov/seh/Mathematics_of_Microgravity.pdf.
- [12] van Loon, Jack, Goswami, J.W.A. Nandu a Václavík, Michal. Human Space Technology Initiative. *UNOOSA*. [Online] 2015. [Citace: 4. Srpen 2016.] http://www.unoosa.org/res/oosadoc/data/documents/2015/stspace/stspace62rev_2_0_html/st_space_62rev02E.pdf.

[13] Munson, Bruce R., a další. *Fundamentals of fluid mechanics*. . : Wiley, 2013. ISBN 978-1-118-11613-5.