

Konstrukce zařízení pro experimenty z fyziky

Jan Pertl

Bakalářská práce
2023

 Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně
Fakulta technologická

Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně

Fakulta technologická

Ústav výrobního inženýrství

Akademický rok: 2022/2023

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

(projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Jan Pertl**
Osobní číslo: **T20734**
Studijní program: **B3909 Procesní inženýrství**
Studijní obor: **Technologická zařízení**
Forma studia: **Prezenční**
Téma práce: **Konstrukce zařízení pro experimenty z fyziky**

Zásady pro vypracování

- 1) Nastudovat teoretické detaily fyzikálního pokusu (základ teoretické části práce) a vypracovat rešerši na základě diskuze s vedoucím práce.
- 2) Návrh a konstrukce přístrojů pro výuku předmětu "Experimenty z fyziky" pro druhý a třetí semestr bakalářského studia (např.: experiment pro demonstraci matematického a fyzikálního popisu harmonického oscilátoru a kruhového pohybu a jejich souvislosti). Počet a příklady fyzikálních pokusů se budou organicky vyvíjet podle času a náročnosti konstrukce v průběhu experimentální činnosti na bakalářské práci.
- 3) Provést demonstraci vybraných experimentů ve spolupráci s vedoucím práce při výuce předmětu "Experimenty z fyziky I"

Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

- 1) LEWIN, W. et GOLDSTEIN, W.: Z lásky k fyzice: od konce duhy až na okraj času – putování po dívech fyziky. Praha: Argo, 2012. Aliter (Argo). ISBN 978-80-257-0704-3
- 2) HALLIDAY, D., RESNICK, R. et WALKER, J.: Fyzika – vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno: VUTIUM, 2000. Překlady vysokoškolských učebnic. ISBN 80-214-1868-0.
- 3) FEYNMAN, R. P., LEIGHTON, R. B. et SANDS, M. L.: Feynmanovy přednášky z fyziky s řešenými příklady. Havlíčkův Brod: Fragment, 2000. ISBN 80-7200-405-0.
- 4) REKTORYS, K. et al.: Přehled užití matematiky I. Praha: Prometheus, 1995. ISBN: 80-858449-92-5.
- 5) Vybrané publikace z časopisů *Physical Review Physics Education Research – APS* nebo *Physics Education – IOPscience*
- 6) Přednášky profesora Lewina na youtube.com

Vedoucí bakalářské práce: **doc. Mgr. Aleš Mráček, Ph.D.**
Ústav fyziky a mater. inženýrství

Datum zadání bakalářské práce: **2. ledna 2023**
Termín odevzdání bakalářské práce: **19. května 2023**

prof. Ing. Roman Čermák, Ph.D. v.r.
děkan

L.S.

Ing. Martin Bednařík, Ph.D. v.r.
ředitel ústavu

Ve Zlíně dne 22. února 2023

PROHLÁŠENÍ AUTORA BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

Beru na vědomí, že:

- bakalářská práce bude uložena v elektronické podobě v univerzitním informačním systému a dostupná k nahlédnutí;
- na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb. o právu autorském, o právech souvisejících s právem autorským a o změně některých zákonů (autorský zákon) ve znění pozdějších právních předpisů, zejm. § 35 odst. 3;
- podle § 60 odst. 1 autorského zákona má Univerzita Tomáše Bati ve Zlíně právo na uzavření licenční smlouvy o užití školního díla v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona;
- podle § 60 odst. 2 a 3 autorského zákona mohu užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití jen s předchozím písemným souhlasem Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše);
- pokud bylo k vypracování bakalářské práce využito softwaru poskytnutého Univerzitou Tomáše Bati ve Zlíně nebo jinými subjekty pouze ke studijním a výzkumným účelům (tj. k nekomerčnímu využití), nelze výsledky bakalářské práce využít ke komerčním účelům;
- pokud je výstupem bakalářské práce jakýkoliv softwarový produkt, považují se za součást práce rovněž i zdrojové kódy, popř. soubory, ze kterých se projekt skládá. Neodevzdání této součásti může být důvodem k neobhájení práce.

Prohlašuji,

- že jsem na bakalářské práci pracoval samostatně a použitou literaturu jsem citoval. V případě publikace výsledků budu uveden jako spoluautor.
- že odevzdaná verze bakalářské práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou obsahově totožné.

Ve Zlíně, dne:

Jméno a příjmení studenta:

.....

podpis studenta

ABSTRAKT

Tématem bakalářské práce je srovnání dvou pohybů: pohybu harmonického oscilátoru a rovnoměrného kruhového pohybu. Cílem práce je tvorba aparátu, pokusu, který bude vzájemnou podobnost znázorňovat. Práce se skládá ze dvou částí, teoretické a praktické. Teoretická část je zaměřena především na vysvětlení porovnávaných fyzikálních dějů, vymezuje základní veličiny k nim vztažené, zabývá se mechanickými vlastnostmi materiálu a popisuje výrobní metodu 3D tiskem. V praktické části je popsána tvorba a požadavky na celý aparát, který je následně modelován a sestaven.

Klíčová slova: harmonický oscilátor, kruhový pohyb, pokus, fyzika

ABSTRACT

The subject matter of this bachelor's thesis is the comparison of two motions: the motion of a harmonic oscillator and the uniform circular motion. The aim of this work is to create an apparatus and conduct an experiment that will illustrate the mutual similarities. It consists of two parts which include theoretical and practical part. The theoretical part is mainly focused on the explanation of the compared physical events, the definition of the basic quantities related to them, the mechanical properties of the material, and description of the production method by 3D printing. The practical part on the other hand describes the procedure and requirements for the entire apparatus, which is then modeled and assembled.

Keywords: harmonic oscillator, circular motion, experiment, physics

PODĚKOVÁNÍ

Tímto bych chtěl poděkovat vedoucímu mé bakalářské práce doc. Mgr. Aleši Mráčkovi, Ph.D., za odborné vedení, cenné rady, čas věnovaný konzultacím, ale hlavně nadšení pro věc, které mi pomohlo práci zkompletovat.

Prohlašuji, že odevzdaná verze bakalářské/diplomové práce a verze elektronická nahraná do IS/STAG jsou totožné.

OBSAH

ÚVOD	10
I TEORETICKÁ ČÁST	11
1 KRUHOVÝ POHYB	12
1.1 OBECNÝ POPIS KRUHOVÉHO POHYBU	12
1.2 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ KRUHOVÝ POHYB	13
1.2.1 Úhlová poloha	13
1.2.2 Otočení	14
1.2.3 Úhlová rychlost	15
1.2.4 Úhlové zrychlení	16
2 KMITAVÝ POHYB	17
2.1 OBECNÝ POPIS KMITAVÉHO POHYBU	17
2.2 VELIČINY CHARAKTERIZUJÍCÍ KMITAVÝ POHYB	18
2.2.1 Harmonický pohyb.....	18
2.2.2 Rychlost harmonického pohybu.....	19
2.2.3 Zrychlení harmonického pohybu	20
2.2.4 Pohybová rovnice pro harmonický pohyb	21
2.3 HARMONICKÝ OSCILÁTOR	21
2.3.1 Netlumený a tlumený harmonický pohyb	21
3 SROVNÁNÍ KMITÁNÍ A ROVNOMĚRNÉHO KRUHOVÉHO POHYBU	22
3.1 HISTORICKÉ POZNATKY.....	22
3.2 KRUHOVÝ POHYB PROMÍTANÝ NA PŘÍMKU	23
3.3 ZNÁZORNĚNÍ POKUSEM	24
4 PRUŽNOST A PEVNOST	25
4.1 NAMÁHÁNÍ TAHEM A TLAKEM.....	25
4.1.1 Namáhání tahem.....	25
4.1.2 Namáhání tlakem.....	25
4.2 KVADRATICKÉ MOMENTY PLOCHY PRŮŘEZU.....	26
4.3 NAMÁHÁNÍ OHYBEM	26
4.4 VZPĚR ŠTÍHLÝCH PRUTŮ.....	26
5 3D TISK	27
5.1 TECHNOLOGIE FDM.....	28
5.2 MATERIÁLY VHODNÉ PRO FDM	29
5.2.1 PLA	30
5.2.2 ABS	30
5.2.3 PP	31
II PRAKTICKÁ ČÁST	32

6	NÁVRH ZAŘÍZENÍ PODLE DANÝCH POŽADAVKŮ	33
6.1	NÁVRH KOLA	34
6.2	NÁVRH RÁMU	35
6.3	VÝBĚR PRUŽINY	36
6.4	VÝBĚR ELEKTRONIKY	37
6.4.1	Pohonná jednotka	37
6.4.2	Řízení pohonné jednotky	38
6.4.3	Napájení servo testeru	38
6.4.4	Pohonný akumulátor	39
7	VOLBA VYROBNÍ METODY A MATERIÁLU	40
7.1	3D TISK DÍLŮ METODOU FDM	41
7.2	VOLBA MATERIÁLU	42
8	MODELOVÁNÍ A VÝROBA DÍLŮ	43
8.1	RÁM	43
8.1.1	Přední část rámu	43
8.1.2	Zadní část rámu	44
8.1.3	Dolní část podpěry ramene	45
8.1.4	Horní část podpěry ramene	46
8.1.5	Horní rám	47
8.2	RAMENO	47
8.3	KOLO	48
8.4	DROBNÉ DÍLY	48
8.4.1	Hřídel	49
8.4.2	Středový díl kola	49
8.4.3	Táhlo	50
8.4.4	Uložení pohonu a jeho spojení se hřídelí	51
8.4.5	Válec pro závaží se šroubovacím dnem	52
9	SESTAVA A KONTROLNÍ VÝPOČET	53
9.1	MODEL SESTAVY	53
9.2	KONTROLA VÝPOČTEM	54
9.2.1	Výpočet plochy průřezu	54
9.2.2	Výpočet dovoleného napětí v tahu	55
10	PROVEDENÍ POKUSU	56
10.1	NASTAVENÍ ZÁVAŽÍ	56
10.2	ZAPOJENÍ ELEKTRONIKY	56
10.3	NASTAVENÍ RYCHLOSTI	57
10.4	NASTAVENÍ BUZENÍ	57
	ZÁVĚR	58
	SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY	59

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK	62
SEZNAM OBRÁZKŮ	64
SEZNAM PŘÍLOH.....	66

ÚVOD

Pro nemalou část studentů mohou být hodiny často nezáživné, obzvláště pokud se daná problematika nedá dobře představit. Pro předměty jak středních, tak vysokých škol je tedy velmi zpestřující možnost si moci látku reálně vyobrazit na nějakém zařízení, pokusu. Myslím si, že takovýto prvek výuky pomůže nejen vyučujícímu vysvětlit danou problematiku, ale také žákům může lépe taková zkušenost zůstat v paměti. Téměř každý z nás pamatuje na chemické pokusy, například chemickou reakci, kdy vzniká „sloní pasta“, hodiny biologie, kde jsme se dívali na věci pod mikroskopem, anebo třeba na hodinu fyziky, kde se třela ebonitová tyč liščím ocasem pro znázornění statické elektřiny.

Na samém začátku je tedy nějaký přírodní jev, kterým se zabýváme a hledáme způsob, jak ho ostatním lépe vysvětlit, než pouhým dosazením do vzorců nebo přečtením skript. A tak jsem na návrh zapáleného vyučujícího fyziky, zda by bylo možné zkonstruovat pokus, který by ukazoval podobnost mezi harmonickým oscilačním pohybem a pravidelným pohybem po kružnici, nemohl říct ne. Také vzhledem k tomu, že od mládí rád rozebírám, opravuji a tvořím různé technické věci, tak je mi tato problematika blízká.

Cílem této bakalářské práce je tedy sestavení dříve zmíněného pokusu. Práce je rozdělena na dvě části. Část teoretická se zabývá vysvětlením fyzikálních jevů a jejich vztahy, cílem konstrukce a metodou výroby 3D tiskem. Praktická část je zaměřena na požadavky konstrukce a její tvorbu, následné vymodelování a závěrem je zkonstruovaný pokus.

I. TEORETICKÁ ČÁST

1 KRUHOVÝ POHYB

1.1 Obecný popis kruhového pohybu

Kruhový pohyb nebo také pohyb po kružnici, je důležitý fyzikální jev, který se vyskytuje nejen v přírodě, ale využívá se hojně i v technice. K tomuto typu pohybu dochází v případě, když objekt opisuje kruhovou dráhu kolem osy rotace neboli osy otáčení. [1]

Může být popsán pomocí několika veličin. Jednou z nich je poloměr kruhové dráhy r , který je definován jako vzdálenost mezi osou otáčení a kružnicí, kterou bod (těleso) opisuje. Dalším důležitým faktorem je úhel θ , který objekt urazí při pohybu po kružnici. Tento úhel je měřen zpravidla v radiánech, případně ve stupních a určuje, jak daleko se objekt posune po kruhové dráze. Podstatná je i rychlost objektu pohybujícího se po kružnici. Ta se mění v závislosti na poloměru kruhové dráhy a úhlu, který objekt urazí za jednotku času. Čím větší je poloměr kruhové dráhy, tím je objekt rychlejší. [1]

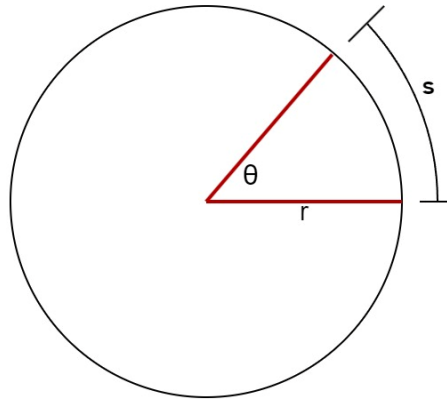
Kruhový pohyb se vyskytuje také v mnoha přírodních jevech, jako je pohyb planet kolem Slunce nebo například pohyb Měsíce kolem Země. Tyto objekty se pohybují po trajektoriích, které lze na kružnici aproximovat, jsou ovlivněny gravitační silou mezi nimi a jejich středovým tělesem. Ve vesmíru najdeme poměrně často binární systém dvou hvězd, kdy dvě hvězdy různé hmotnosti obíhají kolem společného těžiště. Těžiště zde může dokonce ležet i v těžší hvězdě. Příkladem tohoto jevu pak může být Měsíc a Země, kdy se těžiště této binární soustavy nachází asi 1700 kilometrů pod povrchem Země. [2]

Uplatnění nachází také v mnoha technických aplikacích. Rotující stroje, jako jsou například motory, nebo turbíny, které využívají kruhový pohyb k vytváření energie. Dalším příkladem jsou kola na vozidlech, kdy se kolo otáčí kolem své osy při pohybu vozidla po silnici. [1]

Obecně lze tedy říct, že kruhový pohyb je důležitý fyzikální jev s mnoha aplikacemi v různých oblastech, jako je průmysl, astronomie, matematika, sport apod. Porozumění kruhovému pohybu a jeho vlastnostem umožňuje vývoj nových technologií a zařízení a zlepšení výkonu a výkonnosti stávajících zařízení. [1]

1.2 Veličiny charakterizující kruhový pohyb

1.2.1 Úhlová poloha



Obrázek 1: Úhlová poloha

Úhlová poloha je veličina, která udává, jaký úhel svírá takzvaná vztažná přímka, která je kolmá k ose otáčení a zároveň je spojená s tělesem, s pevně zvoleným směrem v rovině, zpravidla ve směru osy x (viz. obrázek 1). Matematicky lze vyjádřit pomocí vzorce (1.1). [1]

$$\theta = \frac{s}{r} \quad (\text{v radiánech}) \quad (1.1)$$

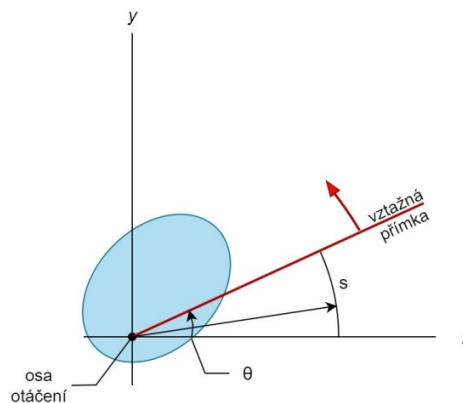
Kde θ je úhlová poloha [rad], s je délka oblouku kružnice [m] a r je poloměr kružnice [m].

Pro vyjádření úhlové polohy v obloukové míře se používá jednotka radián, která udává poměr délky oblouku kružnice a jejího poloměru. Při úplném kruhovém pohybu tělesa, tedy jedné otáčky, se úhlová poloha mění od nuly (kdy se těleso nachází na počátečním bodě) až po hodnotu 2π radiánů, kdy se těleso vrátí zpátky do počátečního bodu. Pokud těleso bude pokračovat, pak bude tato hodnota i nadále růst. Například 4π radiánů budou znamenat dvě celé otočky tělesa kolem osy otáčení. [1]

Dále používáme úhlovou polohu pro výpočet rychlosti, zrychlení a dalších veličin kruhového pohybu. Pokud se mění s časem, hovoříme o úhlové rychlosti a úhlovém zrychlení, které jsou dalšími důležitými veličinami pro popis kruhového pohybu. [1]

1.2.2 Otočení

Otočení je veličina charakterizující otáčivý pohyb tělesa. Jedná se o úhel θ , o který se těleso otáčí kolem pevné osy během rotace (viz. obrázek 2). Výsledné hodnoty se udávají zpravidla v radiánech, ale je také možnost vyjádřit hodnoty ve stupních. Pokud rotace probíhá proti směru hodinových ručiček, a zároveň nám tedy roste úhel θ , nabývají čísla kladných hodnot. V případě, že těleso rotuje po směru hodinových ručiček budou výsledné hodnoty záporné. [1]



Obrázek 2: Řez rotujícího tělesa a jeho otočení

Řez rotujícího tělesa, kde je osa otáčení kolmá k rovině nákresu a směřuje ke čtenáři.

Matematicky se otočení vyjadřuje jako rozdíl úhlových poloh vztahem (1.2): [1]

$$\Delta\theta = \theta_2 - \theta_1 \quad (1.1)$$

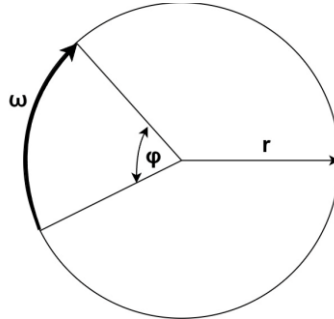
Kde $\Delta\theta$ představuje změnu hodnoty úhlu [rad] a θ_1 a θ_2 jsou počáteční a konečné hodnoty úhlu [rad]. Vztah je zobrazen následně graficky pomocí obrázku č. 3. [1]



Obrázek 3: Otočení tělesa v čase

1.2.3 Úhlová rychlost

Úhlová rychlost je veličina popisující rychlost otáčení tělesa nebo bodu kolem určité osy (viz. obrázek 4). Označuje se řeckým písmenem omega (ω) a udává se nejčastěji v radiánech za sekundu [$rad \cdot s^{-1}$], ale někdy také v otáčkách za sekundu [$ot \cdot s^{-1}$]. [1]



Obrázek 4: Otočení tělesa kolem osy

Dělíme ji na **průměrnou úhlovou rychlost** $\bar{\omega}$, která se vypočítá jako podíl změny úhlu k času, který je potřebný k této změně. Matematicky se průměrná úhlová rychlost zapisuje vztahem (1.3): [1]

$$\bar{\omega} = \frac{\theta_2 - \theta_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\theta}{\Delta t} \quad (1.2)$$

Kde θ_2 je koncová hodnota úhlu [rad], θ_1 je počáteční hodnota a stejně tak t_2 a t_1 znázorňuje koncový a počáteční čas [s]. Rozdíly hodnot potom znázorňujeme pomocí $\Delta\theta$ a Δt .

Je důležité si uvědomit, že průměrná úhlová rychlost je pouze průměrem rychlosti během daného časového intervalu. Pokud se úhlová rychlost mění v průběhu času, může se vypočítaná průměrná úhlová rychlost lišit od **okamžité úhlové rychlosti** ω v daném okamžiku, kterou vypočítáme podle vztahu: [1]

$$\omega = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\theta}{\Delta t} = \frac{d\theta}{dt} \quad (1.3)$$

Vztahy (1.3) a (1.4), které jsme uvedli, neplatí pouze pro celé rotující tuhé těleso, ale platí i pro každou samostatnou částici tohoto tělesa. Také zde mohou v závislosti na směru rotace nabývat hodnoty jak kladných (pohybem proti směru hodinových ručiček), tak záporných čísel (pohybem po směru hodinových ručiček). [1]

1.2.4 Úhlové zrychlení

Úhlové zrychlení vyjadřuje, jak rychle se mění rychlost případně směr otáčení. Pokud je úhlové zrychlení konstantní, pak se objekt nebo těleso otáčí se stále se zvyšující (nebo se snižující) úhlovou rychlostí. Pokud je nulové, tak se těleso otáčí stále stejnou rychlostí, nebo je nehybné. Dělíme ho na **průměrné úhlové zrychlení**, které nám udává, jak se změnila úhlová rychlost v průběhu určitého časového intervalu. Matematicky se průměrné úhlové zrychlení $\bar{\varepsilon}$ vypočítá jako poměr změny úhlové rychlosti $\Delta\omega$ ke změně času Δt , za který k této změně došlo: [1]

$$\bar{\varepsilon} = \frac{\omega_2 - \omega_1}{t_2 - t_1} = \frac{\Delta\omega}{\Delta t} \quad (1.5)$$

Kde $\Delta\omega$ je změna úhlové rychlosti [$rad \cdot s^{-1}$] a Δt je časový interval za který změna proběhla [s].

Nejčastěji se ale setkáváme s **okamžitým úhlovým zrychlením**, které lze vyjádřit jako limitu průměrného zrychlení při blížení se hodnoty Δt k nule. Platí tedy následující: [1]

$$\varepsilon = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta\omega}{\Delta t} = \frac{d\omega}{dt} \quad (1.6)$$

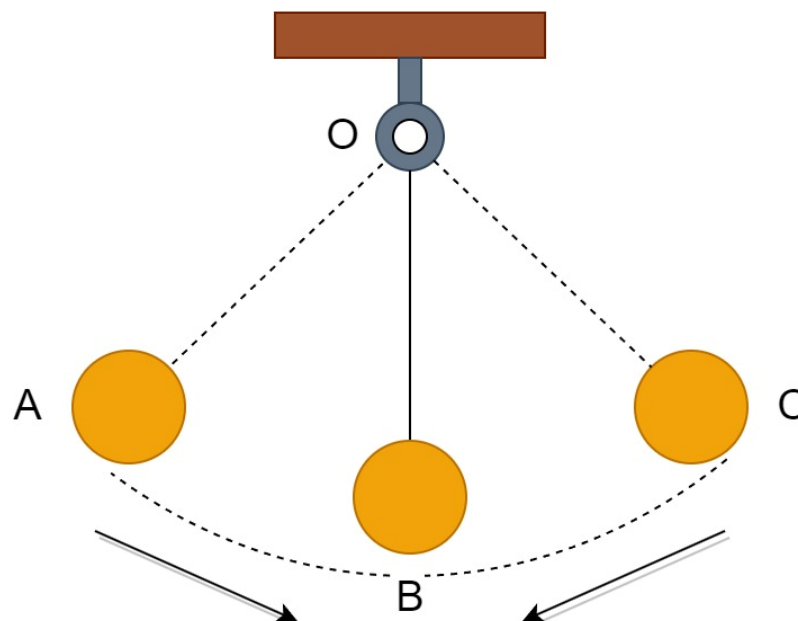
Stejně jako u úhlové rychlosti, i nyní platí uvedené vztahy (1.5) a (1.6) jak pro celé rotující tuhé těleso jako celek, tak i pro každou jednotlivou část tohoto tělesa. [1]

2 KMITAVÝ POHYB

2.1 Obecný popis kmitavého pohybu

Kmitavý pohyb, také velmi často nazývaný jako mechanické kmitání, je typ pohybu, kdy se těleso neustále vrací do své rovnovážné polohy. Pokud se tento pohyb opakuje pravidelně, nazýváme ho periodickým pohybem, což znamená opakování změn fyzikálních veličin v pravidelných intervalech. Mnoho příkladů periodického pohybu lze nalézt v přírodě i v technice, jako jsou kmitání strun, pohyb kyvadel, oscilace v elektronice a další. [2] [3]

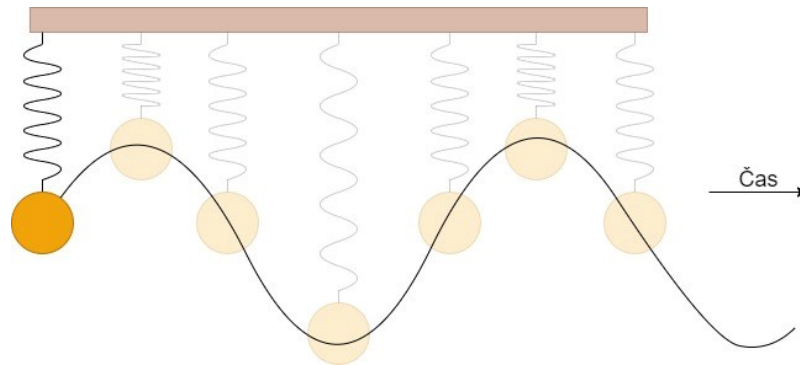
Dalším důležitým pojmem je mechanický oscilátor, tedy zařízení, které kmitá samo o sobě bez vnějšího vlivu. Jedním z příkladů mechanického oscilátoru je kyvadlo, což je kulička zavěšená na nitce (viz. obrázek 5). V rovnovážné poloze se kyvadlo nachází bez pohybu. Po vychýlení do polohy A se kyvadlo začne pohybovat a vrací se do rovnovážné polohy B, kde má největší rychlost. Poté pokračuje v pohybu a dosáhne největší výchylky C, kde se nakonec zastaví a vrací se zpět do polohy B a celý cyklus se začne opakovat. Tento pohyb je nerovnoměrný, což znamená, že kyvadlo mění rychlost během kmitů. Pokud kyvadlo projde všemi naznačenými polohami např. při přechodu z jedné krajní polohy do druhé, tzn. z polohy A do C, vykonalo jeden kyv. Pokud se ovšem vrátí do počáteční vychýlené polohy A, vykoná druhý kyv a tento celý cyklus dvou kyvů se nazývá kmit. [4, 2]



Obrázek 5: Pohyb kyvadla

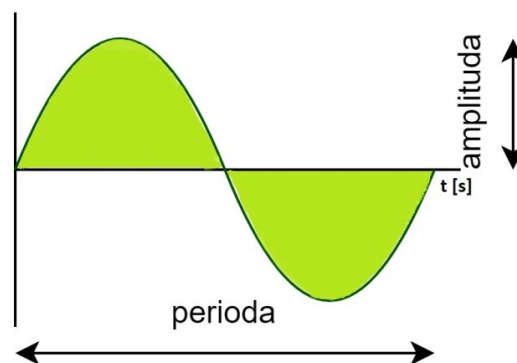
2.2 Veličiny charakterizující kmitavý pohyb

2.2.1 Harmonický pohyb



Obrázek 6: Harmonický pohyb v čase

Harmonický pohyb je znázorněn na obrázku 6, kde je možné pozorovat závaží kmitající na pružině v čase. Důležitými parametry jsou zde **frekvence** f , která nám udává počet kmitů, které proběhnou za jednu sekundu, jednotkou frekvence je Hertz [Hz]. Například 1 Hz bude znamenat, že bod, nebo těleso vykoná jeden kmit za sekundu. [1]



Obrázek 7: Perioda a amplituda

Dále pak **perioda** T , znázorněná na obrázku 7, která vyjadřuje dobu, za kterou proběhne jeden celý kmit, zavádíme proto následující vztah (2.1): [1] [5]

$$T = \frac{1}{f}$$

(2.1)

Kde T je perioda [s] a f značí frekvenci udávanou v [Hz].

Pro přesný popis harmonického pohybu je důležité znát **výchylku**, tu nám vyjadřuje následující vztah (2.2): [1]

$$x(t) = x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.2)$$

Kde $x(t)$ udává **výchylku**, dále jsou zde dány konstanty:

Maximální výchylka neboli amplituda x_m , kde spodní index m značí maximum a vyjadřuje velikost největší možné výchylky od počátku v obou směrech, znázorněna také na obrázku č. 7.

Úhlová frekvence ω , jinak nazývaná také kruhová frekvence, nebo úhlový kmitočet, má jednotku radián za sekundu [$rad \cdot s^{-1}$], znázorňuje nám ji následující vztah (2.3): [1] [6]

$$\omega = 2 \cdot \pi \cdot f \quad (2.3)$$

Poslední veličinou je takzvaná **počáteční fáze** φ , zde je znázorněna výchylka v počátečním čase $t = 0$. [1]

2.2.2 Rychlost harmonického pohybu

Popisuje, jak rychle se daný objekt pohybuje v každém okamžiku daného časového intervalu. Pro harmonický pohyb, který se pohybuje podél osy x , se rychlost v definuje jako první derivace výrazu pro souřadnici (2.2), tedy podle následujícího vztahu (2.4): [1]

$$v(t) = \frac{dx}{dt} = \frac{d}{dt}(x_m \cdot \cos(\omega \cdot t + \varphi)) \quad (2.4)$$

neboli

$$v(t) = -\omega \cdot x_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.5)$$

Je-li **amplituda rychlosti** maximální, pak se značí v_m k čemuž dochází, pokud je velikost výchylky nejmenší, tedy $x(t) = 0$, naopak je-li amplituda rychlosti $v(t) = 0$, pak je velikost výchylky největší, tedy $x(t) = x_m$. [1]

2.2.3 Zrychlení harmonického pohybu

Zrychlení harmonického pohybu popisuje, jak rychle se mění rychlost pohybujícího se objektu v daném okamžiku. Pro harmonický pohyb, který se pohybuje podél osy x , lze zrychlení vyjádřit jako druhou derivaci výchylky podle času, nebo také jako derivaci rovnice (2.5) kde dostaneme následující vztah (2.6): [1]

$$a(t) = \frac{dv}{dt} = \frac{d}{dt}(-\omega \cdot x_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi)) \quad (2.6)$$

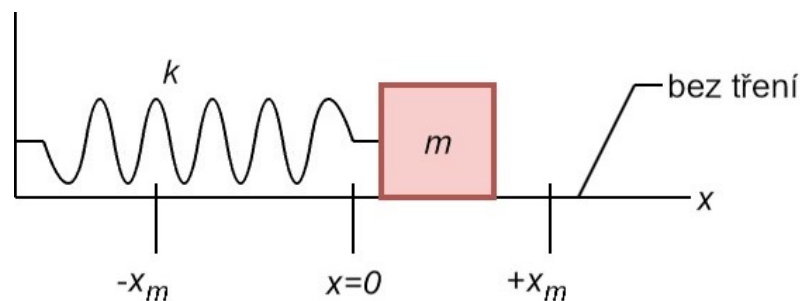
neboli

$$a(t) = -\omega^2 \cdot x_m \cdot \sin(\omega \cdot t + \varphi) \quad (2.7)$$

Kde $a(t)$ vyjadřuje **zrychlení**, to nabývá hodnot $\pm\omega^2 x(t)$. Pokud vztah pro výpočet výchylky (2.2) a pro výpočet zrychlení (2.7) propojíme, získáme následující vztah (2.8): [1]

$$a(t) = -\omega^2 \cdot x(t) \quad (2.8)$$

Tato rovnice (2.8) vyjadřuje závislost zrychlení harmonického pohybu na jeho výchylce. Konkrétně říká, že zrychlení je úměrné výchylce násobené konstantou $-\omega^2$. Vztah také ukazuje, že zrychlení je vždy opačné ve směru než výchylka. Pokud je výchylka kladná (například je pružina vychýlena doprava), je zrychlení záporné (to znamená, že se pružina zrychluje směrem doleva). Naopak, pokud je výchylka záporná (tj. pružina je vychýlena doleva), je zrychlení kladné (tj. pružina se zrychluje směrem doprava) viz. obrázek 8. [1]



Obrázek 8: Harmonický oscilátor

2.2.4 Pohybová rovnice pro harmonický pohyb

Vzhledem k tomu, že známe závislost zrychlení na čase díky vztahu (2.7) můžeme určit sílu která na částice musí působit, aby dosahovala právě tohoto zrychlení. Pokud použijeme Newtonova zákona spolu s rovnicí (2.7) dostaneme následující vztah (2.9): [1]

$$F = m \cdot a = -(m \cdot \omega^2) \quad (2.9)$$

Kde jsou následující veličiny: síla F udávaná v $[N]$, hmotnost m v $[kg]$, zrychlení a $[m \cdot s^{-2}]$, úhlová rychlost ω $[rad \cdot s^{-1}]$ a amplituda x $[m]$. [1]

2.3 Harmonický oscilátor

2.3.1 Netlumený a tlumený harmonický pohyb

Netlumený harmonický pohyb je periodický pohyb, který se vyskytuje, když je na pohyblivý objekt působící síla úměrná jeho vzdálenosti od rovnovážné polohy a směřuje k této poloze. Tato síla se nazývá "lineární návratná síla" a je popsána Hookovým zákonem. Pohybující se objekt se pohybuje do a z rovnovážné polohy a opakuje toto kmitání. V případě netlumeného harmonického pohybu je pohyb bez jakéhokoli odporu a energie se uchovává mezi pohyblivým objektem a pružinou. Těleso tedy dosahuje stále stejných maximálních výchylek. [7]

V reálném světě se ovšem setkáme výhradně s **tlumeným harmonickým pohybem**. Je nutné tedy zavedení pojmu odporová síla F_b , která působí vždy proti pohybu objektu a způsobuje ztrátu energie v důsledku tření. Tato síla se projevuje zejména při pohybu v prostředí, kde je přítomný vzduch nebo jiný typ látky, která způsobuje tření. Mezi odporovou silou a rychlostí v platí v malých rychlostech přímá úměra a lze ji zapsat pomocí následující rovnice (2.10): [7]

$$F_b = b \cdot v \quad (2.10)$$

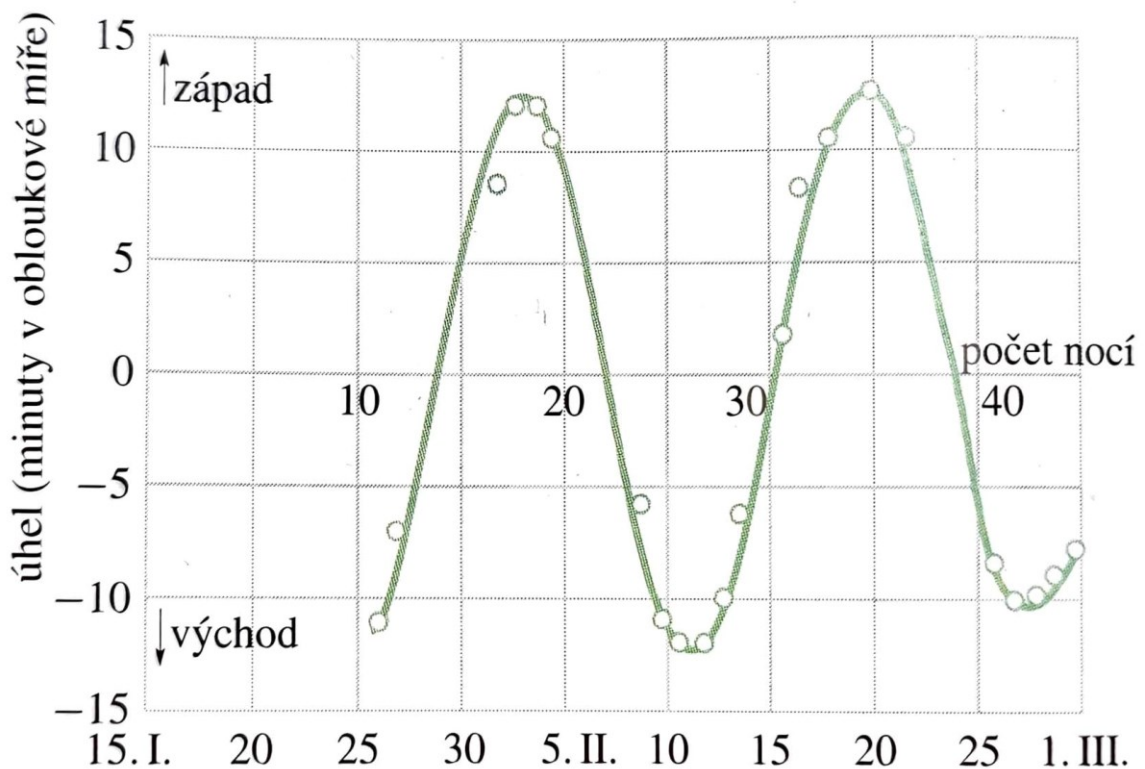
Kde je F_b odporová síla $[N]$, b součinitel útlumu $[-]$ a v rychlost $[m \cdot s^{-1}]$. [7]

3 SROVNÁNÍ KMITÁNÍ A ROVNOMĚRNÉHO KRUHOVÉHO POHYBU

3.1 Historické poznatky

Již v roce 1610 pozoroval Galileo planetu Jupiter její čtyři hlavní měsíce, kde si zapisoval jejich polohu. Pohyb měsíců působil jako harmonický pohyb, každý z nich se hýbal „tam a zpět“ kolem pomyslného rovnovážného bodu, tedy planety Jupiter. Po vyznačení bodů měsíce Callisto do grafu vznikla křivka, která je znázorněna na obrázku 9, která velmi připomíná výchylku u harmonického pohybu kmitání, která splňuje vztah (2.2). [1]

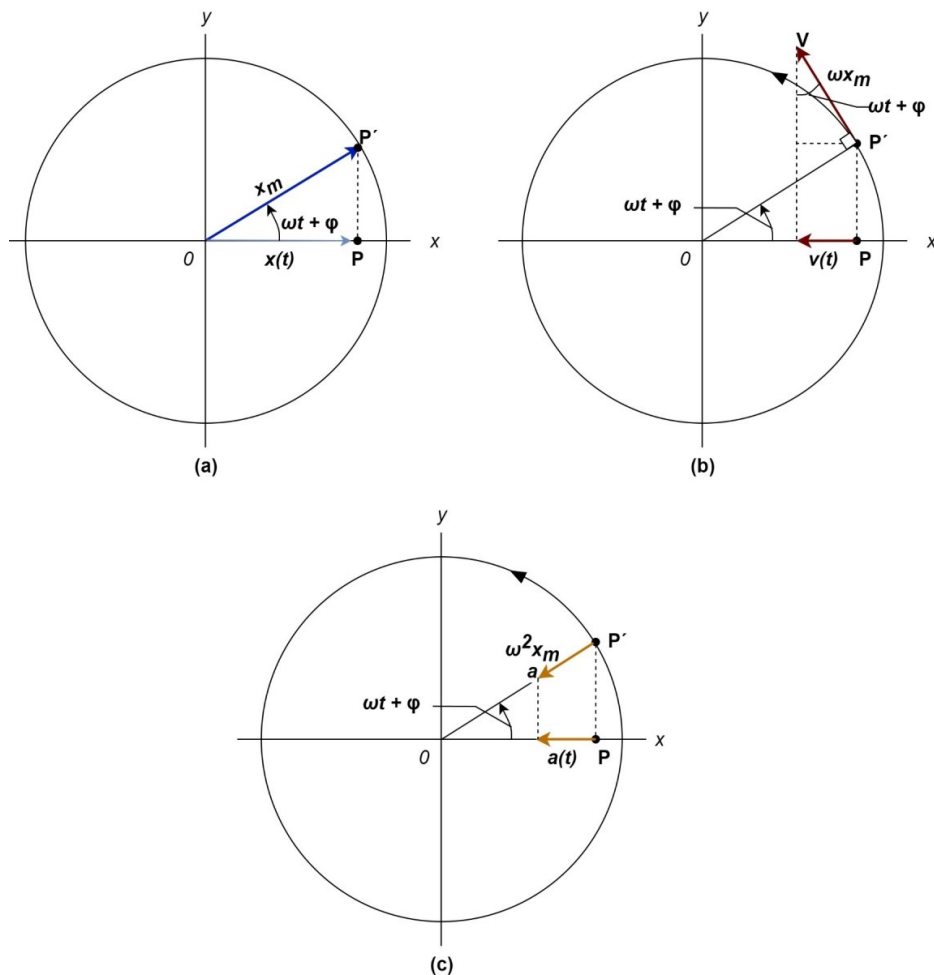
Skutečnost je ovšem taková, že Callisto krouží kolem Jupitera prakticky stále stejnou rychlostí, a tedy rozhodně nekoná harmonický pohyb, ale naopak pohyb rovnoměrný kruhový. Jen, který Galileo ovšem viděl byla jeho projekce na přímce, která leží v rovině pohybu. Pomocí tohoto zjištění můžeme tedy dojít k následující závislosti. Pokud budeme promítat rovnoměrný kruhový pohyb na průměr kružnice, po které pohyb probíhá, vznikne nám pohyb harmonický. [1]



Obrázek 9: Úhel mezi Jupiterem a jeho měsícem Callisto (2)

3.2 Kruhový pohyb promítaný na přímku

Dále je možné vidět tento jev na obrázku 10 kde částice P' vykonává rovnoměrný kruhový pohyb, a tedy se pohybuje konstantní úhlovou rychlostí ω po takzvané referenční kružnici. Kde x_m udává velikost polohového vektoru dané částice. Úhel, který svírá polohový vektor částice s osou x v čase t , je roven $\omega t + \varphi$, kde φ je velikost úhlu v čase $t = 0$. [1]



Obrázek 10: Pohyb částice po kružnici

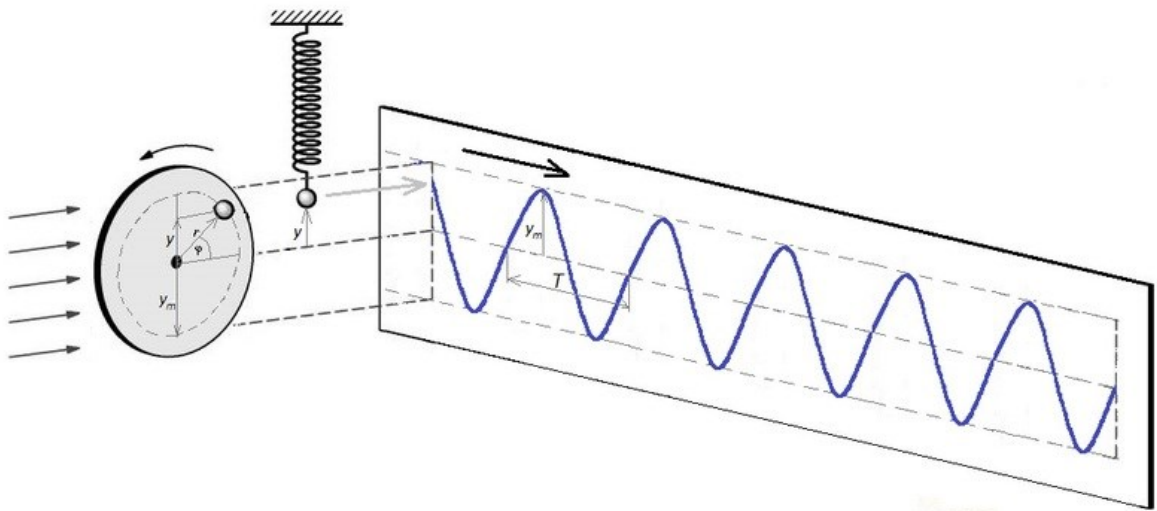
(a) Referenční částice P' se rovnoměrně pohybuje po referenční kružnici o poloměru x_m . Polohu částice P získáme projekcí polohy P' na osu x . Částice P vykonává harmonický pohyb.

(b) Projekcí vektoru rychlosti \mathbf{v} referenční částice dostaneme rychlost harmonického pohybu.

(c) Projekcí vektoru zrychlení \mathbf{a} referenční částice dostaneme zrychlení harmonického pohybu. [1]

3.3 Znázornění pokusem

Souvislost těchto dvou pohybů nejlépe znázorňuje následující obrázek 11, kde je zároveň znázorněný jak pohyb kmitavý (kulička na pružině), tak rovnoměrný kruhový (kulička na kruhu který rotuje konstantní rychlostí. Celá scéna je nalevo nasvětlená (šipky směřující na kruh), při stejné frekvenci a výchylce obou pohybujících se kuliček zjistíme, že jsou stále v dokonalém zákrytu a na stínítku je tedy pouze jeden stín. Z toho nám následně vyplývá, že poloměru r první kuličky odpovídá amplituda y_m kuličky druhé. Dále je možné si povšimnout, že pokud necháme tento stín vykreslovat na plátno, které se pohybuje v čase t , bude výsledkem sinusoida, jak je znázorněno na obrázku č. 11. [8]



Obrázek 11: Souvislost kmitavého pohybu s pohybem rovnoměrným po kružnici [8]

4 PRUŽNOST A PEVNOST

4.1 Namáhání tahem a tlakem

Při namáhání tahem (resp. tlakem) dochází k působení dvou sil opačné orientace, které mají stejnou velikost a leží na společné nositeli. Tato nositelka je totožná s těžištní osou daného průřezu, nazývanou střednice. Pokud je jeden konec součásti upnut, pak reakce na tento konec je rovna zátěžné síle. [9]

4.1.1 Namáhání tahem

Při výpočtu namáhání tahem je třeba zohlednit několik faktorů, jako je síla působící na materiál, průřez materiálu a jeho mechanické vlastnosti. Výsledkem výpočtu je napětí v materiálu. Pro výpočet napětí v materiálu používáme vztah (4.1): [9] [10]

$$\sigma_t = \frac{N}{S} = \frac{F}{S} \quad (4.1)$$

kde σ_t je napětí uvnitř materiálu v tahu [Pa], F je síla působící na materiál [N] a S je průřez materiálu kolmý na směr působení síly [m^2].

4.1.2 Namáhání tlakem

Při výpočtu namáhání tlakem je síla působící na materiál směřována do průřezu, což vede k opačnému znaménku napětí než u namáhání tahem. Toto napětí se zpravidla označuje indexem "d" a je definováno vztahem (4.2): [9]

$$\sigma_d = \frac{N}{S} = -\frac{F}{S} \quad (4.2)$$

kde σ_t je napětí uvnitř materiálu v tlaku [Pa], F je síla působící na materiál [N] a S je průřez materiálu kolmý na směr působení síly [m^2]. U dlouhých štíhlých prutů se většinou setkáme s náchylností k ztrátě stability, což znamená, že se mohou deformovat až do bodu, kdy se zhroutí. Proto je nutné je dále kontrolovat z hlediska stability, aby se zajistilo, že si zachovají svou pevnost a nosnost. [9]

4.2 Kvadratické momenty plochy průřezu

Při posuzování únosnosti prutu není dostačující pouze znalost průřezové plochy, ale také informace o rozložení této plochy (s výjimkou prostého tahového namáhání). V praxi se často používají tenkostěnné profily, protože umožňují efektivní využití materiálu a zajišťují potřebnou únosnost konstrukce při menší hmotnosti. [9]

4.3 Namáhání ohybem

Namáhání ohybem neboli ohybovým momentem, je typ namáhání, při kterém dochází k ohýbání materiálu kolem osy, která leží v průřezu. Při tomto typu namáhání jsou jedna strana průřezu vystavena tahovým silám, zatímco druhá strana je vystavena silám tlakovým. Maximálních hodnot nabývá v krajních bodech průřezu a je definováno vztahem (4.3): [9]

$$\sigma_o = \frac{M_o}{W_o} \quad (4.3)$$

Kde σ_o je napětí v ohybu [Pa], M_o momentová síla [N] a W_o modul odporu průřezu [m^3]

4.4 Vzpěr štíhlých prutů

Při zatížení štíhlých prutů osovým tlakem může dojít ke ztrátě stability tvaru a k vybočení osy prutu. Tento jev se nazývá kritická ztráta stability a vyskytuje se v situacích, kdy tlakové síly překonají kritickou hodnotu, tedy $F > F_{KRIT}$. Proto je nezbytné při návrhu konstrukce brát v úvahu nejen únosnost materiálu, ale také stabilitu tvaru. V praxi se využívají různé techniky a metody pro posouzení stability štíhlých prutů, jako například Eulerova teorie stability. Pro obecný výpočet F_{KRIT} použijeme následující vztah (4.4): [9]

$$F_{KRIT} = \frac{\pi^2 \cdot E \cdot I_{min}}{L^2} \quad (4.4)$$

Kde F_{KRIT} je kritická síla [N], E Youngův modul pružnosti [Pa], I_{min} minimální kvadratický moment [m^4], L délka prutu [m].

5 3D TISK

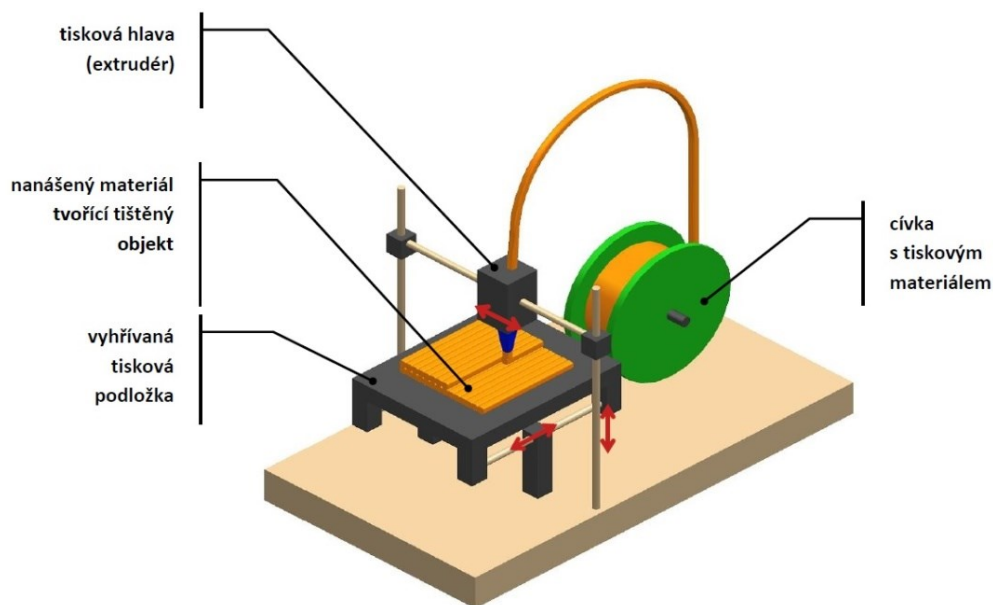
Základním principem 3D tisku je přidávání materiálu vrstvu po vrstvě za účelem vytvoření fyzických objektů z geometrické reprezentace. Poprvé byl komercializován Charlesem Hullem v roce 1980 a od té doby zaznamenal značný rozmach. Tato technologie se nyní používá v různých průmyslových odvětvích, včetně výroby umělých srdečních pump, rohovek, raketových motorů, ocelových mostů a potravinářských výrobků. Technologie 3D tisku vznikla z technologie výroby vrstvy po vrstvě trojrozměrné struktury přímo z výkresu počítačem podporovaného navrhování (CAD). Technologie 3D tisku je natolik inovativní že je jako samostatná technologická etapa. Otevírá nové příležitosti za použití konvenčních termoplastů, keramiky, materiálů na bázi grafenu a kovů, všechny tyto materiály lze tisknout pomocí technologie 3D tisku. Díky cenové dostupnosti a masovému rozšíření je výrazná úspora i na logistice a čase s tím spojeném, jelikož lze vyrobit jedním strojem takřka nekonečnou paletu výrobků. [11]

Přijetí technologie 3D tisku ve výrobě má zároveň několik nevýhod pro průmyslová odvětví. Výsledkem použití technologie 3D tisku je například to, že snižuje spotřebu výrobní práce, a tak výrazně ovlivňuje ekonomiku zemí, které se spoléhají na velký počet míst pro lidi s nízkou kvalifikací. Dále je zde nutné zmínit, že uživatelé mohou tisknout i nebezpečné předměty jako třeba zbraně. V neposlední řadě je nevýhodou, že pokud získá člověk nelegální data s modelem, je velmi snadné takový výrobek sám vyrobit a tím pádem padělat. [11]

Stručně řečeno, technologie 3D tisku se v posledních letech objevila jako flexibilní a výkonná technika pro pokročilý zpracovatelský průmysl. Závěrem lze říci, že technologie 3D tisku je flexibilní a výkonná technika, která je široce používána ve zpracovatelském průmyslu. Má různé aplikace a jeho přijetí mění výrobní linky a zlepšuje efektivitu. Je však třeba vzít v úvahu, že ani tato technologie není dokonalá a má své limity. [11]

5.1 Technologie FDM

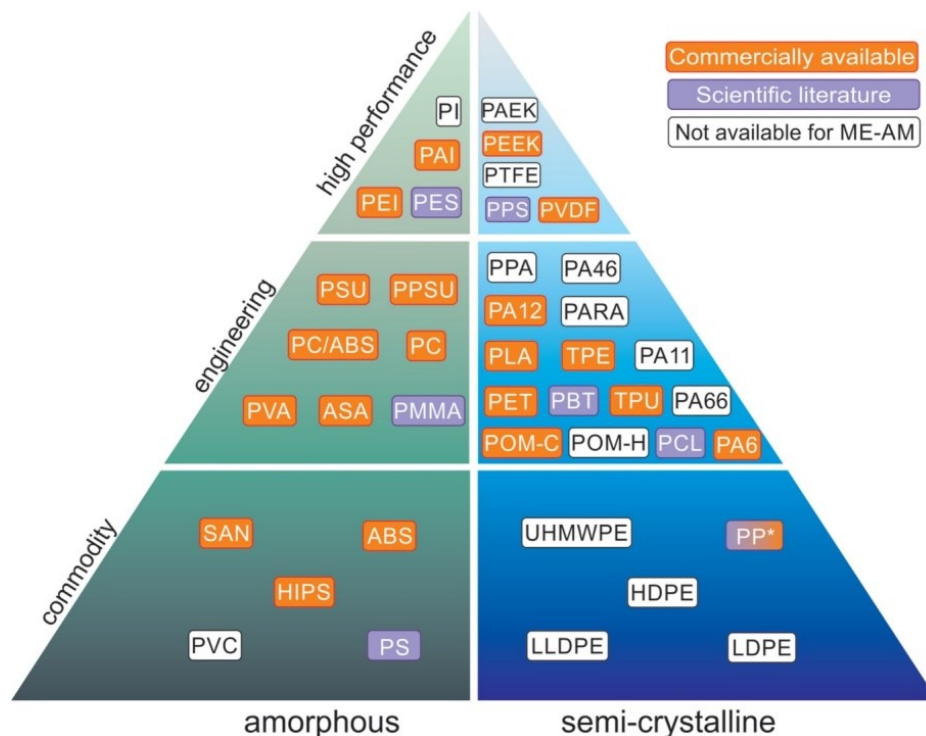
Materiálová extruze, také označována jako ME-AM, tedy fúzní filamentová výroba nebo fúzní vrstevnaté modelování, je extruzní technika aditivní výroby, která byla vyvinuta koncem 80. let společností Stratasys Inc. pod názvem fúzní deponiční modelování (FDM™). V průběhu moderního procesu se tuhý termoplastický filament vtlačuje do horké matrice dvěma protiběžnými hnacími koly. Navinuté filameny, obvykle připravené extruzí libovolného termoplastického polymeru, jsou následně transportovány pohyblivou nanášecí jednotkou na vyhřívanou stavební platformu, což vede k vrstvené výrobě konstrukčního prvku podle CAD-definovaných vrstevnatých kontur, jak je znázorněno na obrázku 12. Aby byl filament vytlačen tryskou, zahřívá se v tavící části a trysce na teplotu, při které může snadno téct, což je většinou nad teplotou tání polokrystalických termoplastických filamentů. Po opuštění trysky se vytlačený materiál ukládá na stavební platformu nebo na předchozí vrstvu v horizontální rovině; uložená tavenina se ochladí a ztuhne. Jakmile je selektivní deponování jedné vrstvy dokončeno, stavební platforma se sníží o výšku jedné vrstvy, aby bylo možné tisknout další vrstvy. [12]



Obrázek 12: Proces kladení materiálu pomocí FDM [13]

5.2 Materiály vhodné pro FDM

Tato technologie umožňuje použití široké škály termoplastů, které jsou komerčně dostupné v cívkách, splňují téměř všechny výše diskutované požadavky na materiál a ve srovnání s jinými technologiemi aditivní výroby mají poměrně nízkou cenu. Do roku 2012 byly materiály, zejména pro levné 3D tiskárny, omezeny především na polyлактиidová vlákna (PLA) a akrylonitril butadien styren (ABS), díky jejich snadné zpracovatelnosti jak z hlediska extruze filamentu, tak z hlediska výrobní technologie. Dodnes jsou tyto dva materiály stále mezi nejprodávanějšími v portfoliu materiálů a jsou dvěma z mála materiálů, které lze zpracovat téměř bez deformací. V poslední době se však alternativy materiálů výrazně zvýšily, což vedlo k širokému výběru komerčně dostupných termoplastů. Obrázek 13 shrnuje současnou dostupnost nejdůležitějších typů polymerů ve formě filamentu, spolu s informací o komerční dostupnosti. Mnoho typů polymerů (zobrazených oranžově na obrázku 13) již bylo komercializováno, protože jak průmysl, tak výzkumníci zdůrazňovali rozšiřování portfolia materiálů. Kromě PLA a ABS lze dnes jako standardní materiály označit zejména také polyethylentereftalát PET a polykarbonát PC. Většina ostatních materiálů, i když jsou běžně dostupné, nemohou být vždy použity bez problémů, vyžadují spoustu praktických zkušeností, a proto stále potřebují zlepšení v procesovatelnosti dílu, stabilitě a přesnosti. [12]



Obrázek 13: Rozdělení polymerních materiálů [12]

5.2.1 PLA

PLA je jedním z nejnovativnějších materiálů vyvinutých v různých oblastech použití. Tento typ polymeru je termoplastický a biologicky odbouratelný. Může být uplatněn v lékařských aplikacích díky své biokompatibilitě, která není metabolicky škodlivá. Tohoto procesu lze dosáhnout jeho přeměnou na filament a jeho následným zpracováním metodou FDM. Filament pak může být převeden do různých forem běžně používaných jako jsou například implantáty. Technika 3D tiskového lešení FDM provedla nedávný vývoj nanokompozitního materiálu PLA/grafenoxid (GO) s přizpůsobenou strukturou. Tato studie byla provedena za účelem analýzy mnoha parametrů síťování, jako je morfologie, chemie, strukturní a mechanické vlastnosti a biokompatibilita, aby se ukázalo jejich potenciální využití v biologických aplikacích. Studie dospěla k závěru, že použití nanokompozitu PLA/GO ve 3D tisku je platforma se slibnými mechanickými vlastnostmi a buněčnou kompatibilitou, která má potenciál v aplikaci pro tvorbu kostí. Vývoj vláken na bázi PLA pro zlepšení jejich mechanických vlastností byl prováděn komplexně, počínaje testováním čistého PLA, směsí termoplastických elastomerních termoplastů (TPU) a kompozitů vyztužených skleněnými vlákny. Z těchto studií se vyvozuje závěr, že vyztužení skelnými vlákny je pro vlastnosti materiálu velmi prospěšné, protože zvyšuje modul v tahu a modul v ohybu. Na druhou stranu přidání například TPU poskytuje směsí PLA zvýšenou houževnatost. [14]

5.2.2 ABS

ABS je obecný termín používaný k popisu různých akrylonitrilových směsí a kopolymerů, polymerů obsahujících butadien a styrenu. Byl představen v 50. letech minulého století jako přísnější alternativa ke kopolymerům styrenu a akrylonitrilu (SAN). ABS bylo v té době více známé jako nitrilový kaučuk. Nitril je pryžový, oproti němu je SAN sklovitý a pokojová teplota činí z této struktury materiál, který je amorfní, sklovitý, houževnatý a v neposlední řadě nárazuvzdorný. ABS má složitou strukturu s různými složeními a účinky aditiv, takže je v některých aspektech dost špatný. Mezi jeho výhody naopak patří převládající podíl na trhu, jakožto materiálu používaného v procesu 3D tisku metodou FDM. Výběr dalších složek má však také své slabé stránky. Výzkumníci provedli různý vývoj, aby napravili nedostatky v mechanických vlastnostech ABS, jedním z nich bylo vyvinutí kompozitního vlákna ABS vyztuženého Oxidem grafitu (GO). Touto metodou se podařilo zvýšit Pevnost v tahu a Youngův modul. [14]

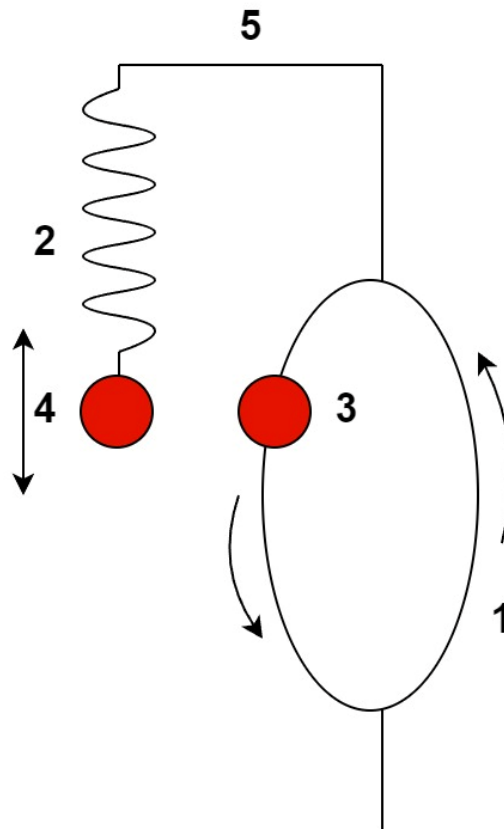
5.2.3 PP

Polypropylen je termoplastický polymer a jeden z nejpoužívanějších nízkohustotních a zároveň levných termoplastických semikrystalů. Aplikace PP se obecně používají v různých průmyslových odvětvích, jako je armáda, domácí spotřebiče, automobily a stavebnictví, a to kvůli jeho fyzikálním a chemickým vlastnostem. Ve srovnání s jinými technickými plasty (PC, PA atd.) má však nízké tepelné, elektrické a mechanické vlastnosti. Je specifický vysokým koeficientem tření v podmínkách suchého smyku. Mechanické vlastnosti polypropylenu se zlepšují kombinací s anorganickými plnivými ve formě nanočástic. Yetgin (2019) zkoumal účinek přidání GO k PP s a bez Polypropylene-graft-maleic anhydride (PP-g-MA) jako kompatibilizačního činidla pomocí procesů extruze a vstřikování. Výsledky ukazují, že tření a rychlost opotřebení nanokompozitů z PP se zvyšují s aplikovaným zatížením a smykovou rychlostí. Další výzkum se pokusil porovnat tiskařské schopnosti polypropylenu plněného 30 % skleněným vláknem s neplněným PP a jejich následné srovnání z hlediska mechanických vlastností. Přídavek skleněných vláken zvyšuje Youngův modul a konečnou pevnost v tahu asi o 40 % za stejných tiskových podmínek. Podobná vylepšení v modulech byla také pozorována u 3D tištěných polypropylenů plněných celulóзовými nanofibrilami, stejně jako studie optimalizace jeho sloučenin, které obsahují sférické mikrokuličky pro aplikaci FDM maximalizací kompatibility matrice a plniva, která ovlivňuje schopnost potisknutí, vlastnosti tažnosti a houževnatost. V závěrečné rázové zkoušce na tištěných kompozitech vykazoval optimalizovaný systém rázovou energii o 80 % vyšší než čistý PP. [14]

II. PRAKTICKÁ ČÁST

6 NÁVRH ZAŘÍZENÍ PODLE DANÝCH POŽADAVKŮ

Jak již bylo řečeno v úvodu, cílem této bakalářské práce je zkonstruovat zařízení, které bude znázorňovat podobnost mezi rotačním (kruhovým) a harmonickým oscilačním pohybem. Pro tento účel bylo sestaveno následující schéma na obrázku 14, které zobrazuje přibližnou podobu konstrukce zařízení splňující požadovaný účel.



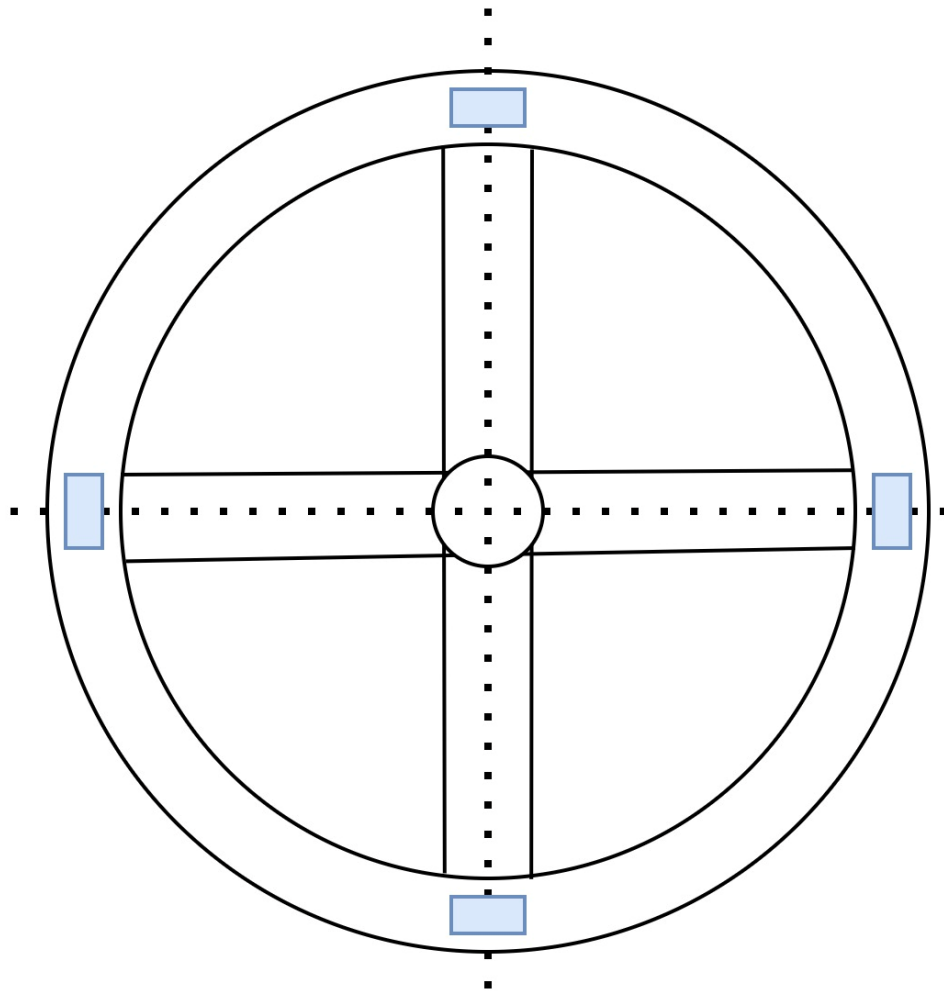
Obrázek 14: náčrt konstrukce

rotující kolo 1, pružina zajišťující oscilační pohyb 2, pohyblivé body 3 a 4

Při pohledu na čelo rotujícího kola 1, bude zřejmé, že se jedná o dva rozdílné pohyby. Pro lepší znázornění je znázorněno na obou klíčových místech (na konci pružiny a na okraji kola) „body“ 3 a 4, které budou tvořit barevně odlišené části. Pokud celou konstrukci otočíme o 90° a uvidíme tedy boční stranu kola 1, dojdeme k závěru, že se oba body 3 a 4 pohybují společně vedle sebe. Díky tomu bude zřejmá podobnost obou pohybů. Konkrétním částem konstrukce se budeme věnovat dále. Proto, aby byl pokus co nejdelší je potřeba zvolit vhodný pohon a zároveň je nutné jemné buzení kmitů pružiny, protože pokud by takto nebylo učiněno, tak by se jednalo o kmity tlumené (vlivem odporu pružiny a tření vzduchu) a kýžený efekt by se po chvíli vytratil.

6.1 Návrh kola

Vzhledem k tomu, že největším dílem konstrukce bude samotné kolo na obrázku 14, je zvolen právě tento díl je jako první k návrhu. Celý pokus bude prezentován v přednáškové místnosti, nebo třídě, jak bylo již zmíněno, je tedy žádoucí, aby byl dostatečně velký pro publikum vzdálené jak několik jednotek, tak i třeba 10 metrů. Celý projekt bude realizován na 3D tiskárně, která má omezené rozměry tisku. Proto při volbě kola odpadá možnost výroby jednoho celistvého kusu, jelikož by mělo vnější průměr omezený na přibližně 20 cm, a bylo by tedy příliš malé na to, aby byl pokus přehledný. Nabízí se zde tedy možnost vyrobit kolo ze 4 oddělených dílů, které budou spojené dohromady, a bude dosaženo tedy v průměru 40 centimetrů, což už bude dostatečné. Přibližný náčrt zobrazuje obrázek 15, kde tečkovaná čára znázorňuje hranice jednotlivých dílů a modré obdélníky, spolu s nejmenším kruhem uprostřed, místa spojení kola.



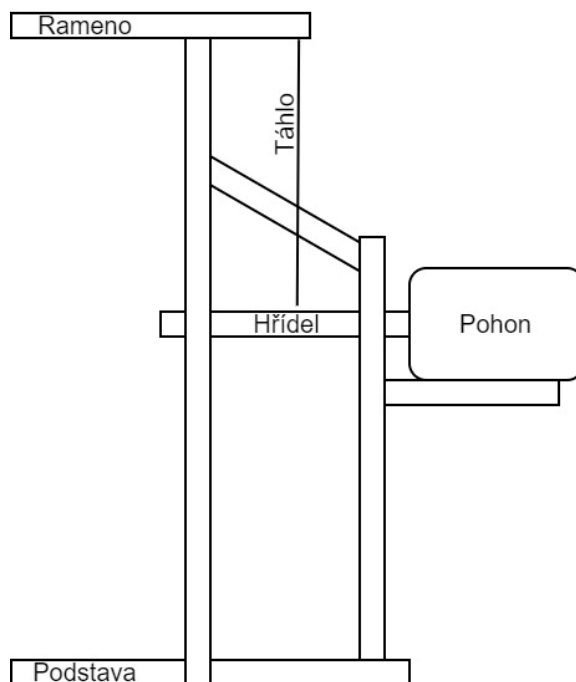
Obrázek 15: náčrt rotujícího kola

6.2 Návrh rámu

Již z obrázku 14 je zřejmé, že rám bude muset splňovat následující podmínky:

- Dostatečně rozměrnou podstavu, aby byl celý aparát stabilní, a to i přesto, že pružina spolu se zvýrazněným bodem (závažím) bude předsunutá před okraj kola.
- Výšku, která bude adekvátní průměru kola i délce ramene, na kterém bude zavěšená pružina spolu se závažím, které se ve výchozí poloze bude nacházet na středu kola, respektive na úrovni hřídele. Vhodná bude i možnost nastavení výšky nejvyššího bodu pro případné ladění.
- Rameno, které bude dostatečně dlouhé, aby na jeho konci zavěšená pružina byla v dostatečném odstupu od kola, a tudíž nemohlo dojít ke kolizi. Potřebná bude i pevnost ramene v ohybu, protože bude zatěžováno dynamicky kmitajícím závažím, respektive „bodem“.
- V neposlední řadě musí soustava obsahovat uložení pro hřídel, která bude mít excentricky připojené táhlo a bude propojovat i kolo s pohonnou jednotkou.

Na základě daných parametrů volím tvar, který je vyobrazen na obrázku 16.



Obrázek 16: náčrt rámu

6.3 Výběr pružiny

Vzhledem k technologii výroby byly věci, které nelze vytisknout metodou 3D tisku, zakoupeny (pružina, závaží, elektronika). Pružina byla zvolena podle rozměrů, které bude celá aparatura mít, konkrétně průměru kola (přibližně 40 cm). Jako vhodná se zdála pružina běžně používaná u dřevěných postaviček na pružině. Pružina vykazovala prodloužení o přibližně 25 cm při zatížení 100 g a zůstala bez známek nevratných deformací i po protažení o 50 cm což je vzhledem k požadovaným vlastnostem dostatečné a lze ji vidět na obrázku 17.



Obrázek 17: pružina

6.4 Výběr elektroniky

Vstupní požadavky na elektroniku se odvíjí od fyzických vlastností pokusu. Jedím z nich je velikost kola 40 cm, které bude muset pohon uvést do pohybu a následně ho v něm udržovat, zároveň bude nutné aby byl dostatečně silný pro neustálé kmitání ramenem a s tím spojené všechny odpory vlivem tření. Dalším důležitým faktorem pro výběr pohonu je rychlost se kterou se bude kolo otáčet, ta se odvíjí od přirozeného kmitání pružiny. Po přibližném měření kmitočtu pružiny se 100 g závažím, kdy byl měřen počet kmitů a následně podělen časem v sekundách, byl zjištěn kmitočet 1 Hz.

6.4.1 Pohonná jednotka

Na základě požadavků se nabízí použití stejnosměrného motoru, ale vzhledem k otáčkám, by byla nutná převodovka abychom se dostali na již zmíněný 1 Hz. Sestrojení převodovky by si žádalo další konstruování a celý vývoj pokusu by tak výrazně protáhlo. Dalším způsobem by byl motor krokový, zde by vzrostla ovšem cena. Nakonec byl zvolen vzhledem k poměru ceny a výkonu servomotor s nekonečným chodem, jedná se o motor příbuzný běžnému servomotoru s polohovým otáčením, může se ale ubírat kterýmkoli směrem, bez rozsahu otáček. Dalším rozdílem oproti klasickému servomotoru je řídicí signál, ten zde neslouží k nastavení statické polohy serva, ale určuje rychlost a směr otáčení. Tento motor se často používá v modelářské praxi, například pro pohon modelu radarové antény, nebo navijáku. Byl zvolen servomotor s točícím momentem 25 kg/cm který je více než dostatečný pro pokus, zároveň dosahuje až 55 otáček při napětí 6 V. Zvolený servomotor lze vidět na obrázku 18. [15] [16]



Obrázek 18: Servomotor s nekonečným chodem

6.4.2 Řízení pohonné jednotky

Pro zvolený servopohon je nutné vybrat také vhodnou řídicí jednotku. V modelářské praxi je běžně zapojena do přijímače, který servo jak napájí, tak do něj posílá i řídicí signál. Vzhledem k tomu, že je k řízení potřebný i vysílač je tohle řešení zbytečně nákladné, a také není potřeba ovládat celý pokus z dálky. Proto byl zvolen pro řízení pohonné jednotky tzv. servo tester. Jedná se o zařízení, které se standardně používá pro testování, případně nastavení těchto servomotorů. Funkci plní stejně jako řídicí přijímač, ale k jeho nastavení využívá potenciometr a ovládání probíhá tedy fyzicky, funguje jak k napájení, tak k produkci řídicího signálu. Zvolený servo testr lze vidět na obrázku 19. [17]



Obrázek 19: Servo testr

6.4.3 Napájení servo testeru

Pro napájení by bylo možné využít přímo stejnosměrný zdroj v rozmezí 4,8 – 6,0 V který by byl zapojen do servo testru pomocí JRC konektoru. Nicméně vzhledem k dostupnému vybavení, bylo zvoleno napájení pomocí výstupu regulátoru (obrázek 20) standardně používaného pro řízení střídavých modelářských motorů, který má právě 6 V výstup. V RC modelech se běžně používá k napájení přijímače, který následně ovládá serva, v tomto případě bude napájet již dříve zmíněný servo testr. [18]



Obrázek 20: regulátor napětí

6.4.4 Pohonný akumulátor

Pro napájení je potřebný akumulátor, vzhledem k regulátoru napětí bude vybíráno v rozsahu šesti až patnácti volty, což odpovídá pěti až dvanácti článkům NiMH/NiCd nebo dvou až čtyř článků LiPo, v obou případech zapojených sériově. Vzhledem k výhodám LiPo akumulátoru, mezi které patří vysoký poměr mezi uloženou energií a hmotností, dále velmi nízké samovybíjení, nízká cena a další, byl zvolen právě ten. Je určitě nutné zmínit i nevýhody spjaté s touto technologií. Při mechanickém poškození vzniká riziko požáru. Teplotní rozsah je přibližně od 5 ° do 40 °C. [19]

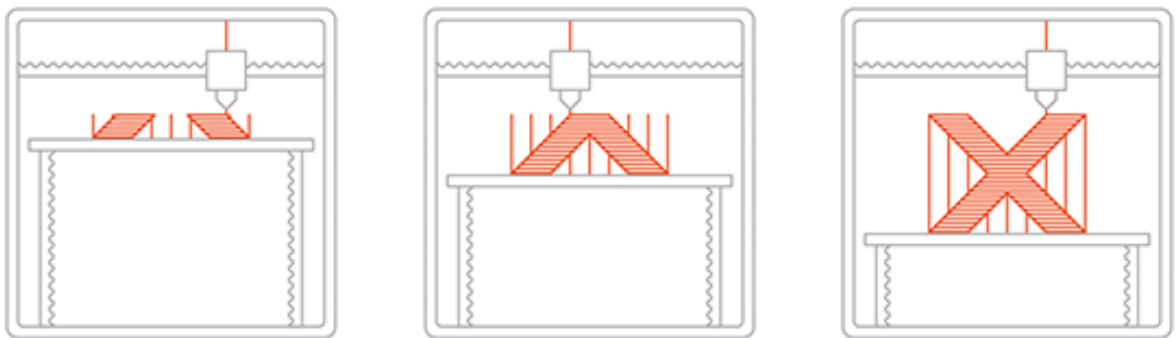
Zvolen byl dvou článek LiPo (obrázek 21), svojí kapacitou 4 000 mAh sice několikanásobně převyšuje nutné minimum, které je odhadováno na 500-1000 mAh pro provoz v rámci desítek minut, vzhledem k spotřebě serva kolem 150 mAh bez zátěže, nicméně je vhodné mít více energie než méně, jelikož je tento typ akumulátoru nevhodné pod vybijet, tím se může totiž nenávratně poškodit. [20]



Obrázek 21: Li-pol baterie

7 VOLBA VYROBNÍ METODY A MATERIÁLU

Vzhledem k tvorbě konstrukce, která byla vytvořena jako jeden jediný kus, by byla příprava forem, například pro metodu vstřikování, příliš nákladná. Další možností by bylo například vytvoření rámu z laserem vyřezávaných dílů ze dřeva, zde by ovšem nebylo dosahováno vysoké variability ve tvarech, pouze skládání dvourozměrných objektů a jejich následné lepení atp. Byl zvolen tedy 3D tisk metodou FDM, která je pro výrobu jednoho kusu, případně jednotek kusů naprosto ideální. A to i přesto, že je každý díl tisnut několik desítek minut, až jednotek hodin, jelikož tisk probíhá vrstvu po vrstvě, jak zobrazuje obrázek 22. Oproti tomu metoda vstřikování zabere u menších dílů vyšší jednotky vteřin a u větších nižší desítky vteřin.



Obrázek 22: Vznik trojrozměrného předmětu vrstvu po vrstvě (21)

Nicméně v případě, že nebude nějaký díl vyhovovat, není nutné nic měnit a upravovat, kromě samotného modelu, jelikož je velmi pravděpodobné, že vzhledem k tvorbě praktického pokusu nebudou všechny díly hned na první pokus sedět a fungovat. Je tedy možné vzít tu samou tiskárnu a ten samý materiál a vyrobit nový díl s mírnou korekcí rozměrů.

7.1 3D tisk dílů metodou FDM

Díky této výrobní metodě můžeme získat unikátní díly, aniž bychom museli mít vysoké vstupní náklady. Jako tiskárnu byla zvolena Prusa i3 MK2, zobrazená na obrázku 23. a to vzhledem k tomu, že jednu osobně vlastním už 6 let, a tedy s ní mám hodně praktických zkušeností. [21]



Obrázek 23: Prusa i3 MK2 (22)

Mezi hlavní přednosti tohoto modelu patří:

- tisková plocha 250 × 210 × 200 milimetrů
- automatická 9bodová kalibrace pomocí indukční sondy
- nízká pořizovací cena (v roce 2016 byla cena 18 990 Kč ve verzi stavebnice)
- široká paleta tisknutelných materiálů [21]

7.2 Volba materiálu

Použití vyráběného zařízení se očekává, vzhledem k předvádění pokusu studentům středních a vysokých škol, za velmi jednoduchých podmínek (například v učebně, nebo přednáškové místnosti), tedy při pokojové teplotě, bez vlivů vody, větru. Díky tomu je volba materiálu velmi snadná a nabízí se nejméně nákladný materiál. Ve světě 3D tisku je nejjednodušší aditivní výroba FDM s použitím kyseliny polyléčné (PLA) [22]

Jedná se o materiál cenově velmi dostupný, ale hlavně velmi snadný pro tisk, a to i větších objektů (viz. obrázek 24). Přestože nemá nejlepší materiálové vlastnosti, z široké palety, která lze použít, tak právě vyváženým poměrem cena/výkon se jeví jako ideální. Další možností by bylo použití ABS, ale zde vzhledem k rozměrům by mohlo docházet k teplotní roztažnosti, a tedy k následným prasklinám. Poslední dostupnou volbou by mohlo být PET, zde bychom se ale mohli setkat s problémem při potřebě lepit jednotlivé díly k sobě. Nicméně mohu potvrdit z vlastní zkušenosti, že PET má z těchto tří materiálů nejlepší pružnost, tolik se neláme a zároveň drží vrstvy kvalitně mezi sebou.



Obrázek 24: 3D tisknutá maska z PLA (23)

8 MODELOVÁNÍ A VÝROBA DÍLŮ

Pro modelování byl zvolen program Solid Edge, vzhledem k jeho jednoduchosti a příjemnému prostředí. Obdobných výsledků by ovšem šlo dosáhnout i při použití jiných programů podporujících 3D modelování, jako je například Inventor, nebo Catia. Následující podkapitoly se zabývají modelováním a parametřím jednotlivých částí. Pro všechny díly platí využití toho, že vytisknuté PLA je oproti kovům měkký a tvárný materiál, proto při použití metrických šroubů stačí pouze zvolit vhodný průměr otvoru 2,7 mm (byl zjištěn na několika testovacích otvorech 2,5-3,2 mm lišících se o 0,1 mm) a šroub si závit vytvoří sám.

8.1 Rám

Rám je složen z několika částí, těmi jsou: přední a zadní část rámu, dolní a horní část podpěry ramene, horní rám sloužící pro snížení vůle této podpěry a pro uchycení druhého ložiska, a nakonec výškové nastavení podpěry ramene.

8.1.1 Přední část rámu

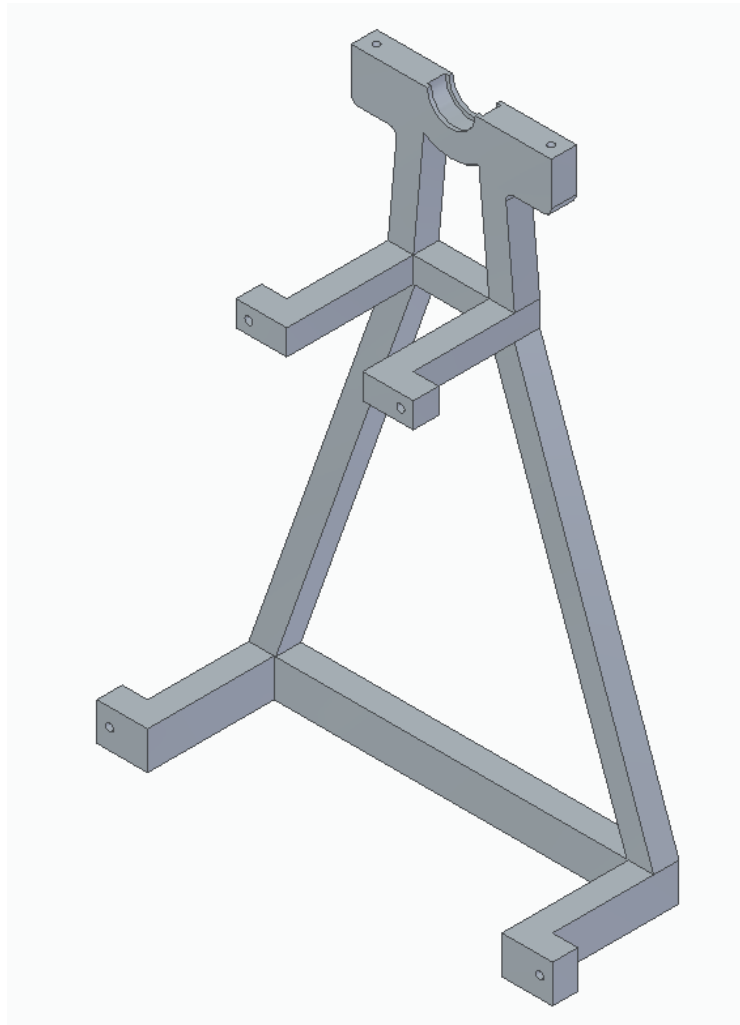
Na tuto část jsou kladeny následující požadavky: stabilita konstrukce skrze přesah ramene se závažím, uložení ložiska pro hřídel, která bude otáčet kolem, příčná stabilita celého aparátu pro minimalizaci kmitů vlivem otáčením kola, které nebude dokonale vyvážené vzhledem k metodě 3D tisku a možnost spojení s ostatními částmi rámu. Vymodelovaná přední část rámu je vidět na obrázku 25.



Obrázek 25: Přední část rámu

8.1.2 Zadní část rámu

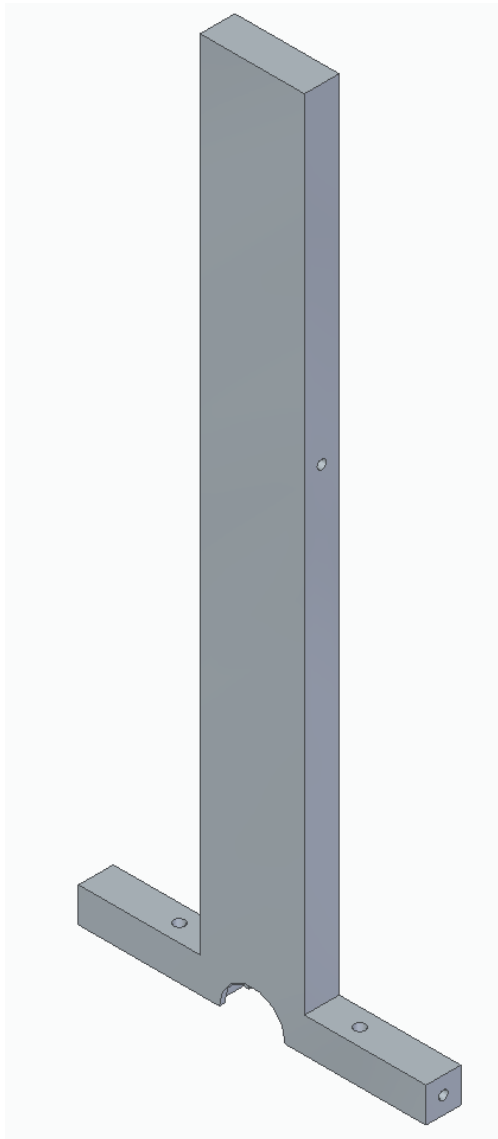
Na tuto část jsou kladeny následující požadavky: stabilita konstrukce, uložení ložiska pro hřídel, která bude otáčet kolem. Stejně jako u přední části rámu i zde bude nutná příčná stabilita a tato část je připravena na spojení s ostatními díly. Navíc je zde požadavek pro upevnění pohonné jednotky, tedy servomotoru. Vymodelovaná zadní část rámu je vidět na obrázku 26.



Obrázek 26: Zadní část rámu

8.1.3 Dolní část podpěry ramene

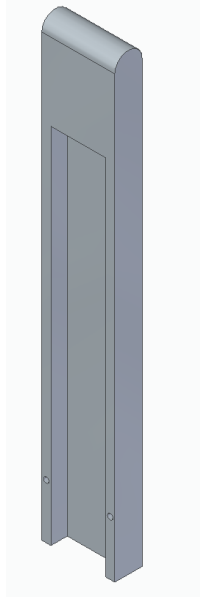
Na tuto část jsou kladeny následující požadavky: uložení ložiska pro hřídel kola, příprava na spojení s ostatními díly konstrukce, dostatečná pevnost v tlaku pro nesení horní části podpěry, ramene, a v neposlední řadě na něm zavěšené z jedné strany kmitající závaží na pružině, tak ze strany druhé táhlo působící stejnou silou. Vymodelovaná dolní část podpěry ramene je vidět na obrázku 27.



Obrázek 27: Dolní část podpěry ramene

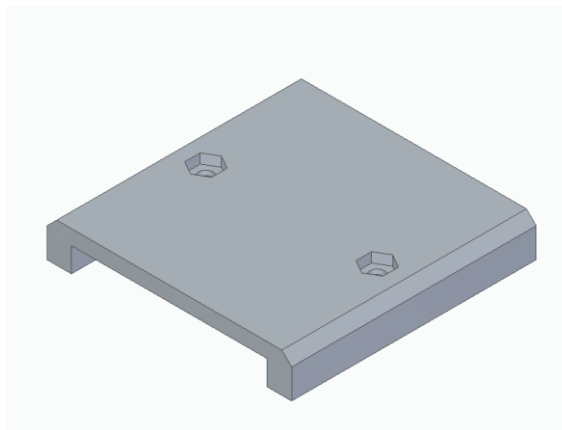
8.1.4 Horní část podpěry ramene

Na tuto část jsou kladeny následující požadavky: prodloužení dolní části podpěry ramene, možnost nastavení výšky ramene jako celku, dostatečná pevnost v tlaku pro nesení ramene a na něm zavěšené z jedné strany kmitající závaží na pružině, tak ze strany druhé táhlo působící stejnou silou. Vymodelovaná dolní část podpěry ramene je vidět na obrázku 28.



Obrázek 28: Horní část podpěry ramene

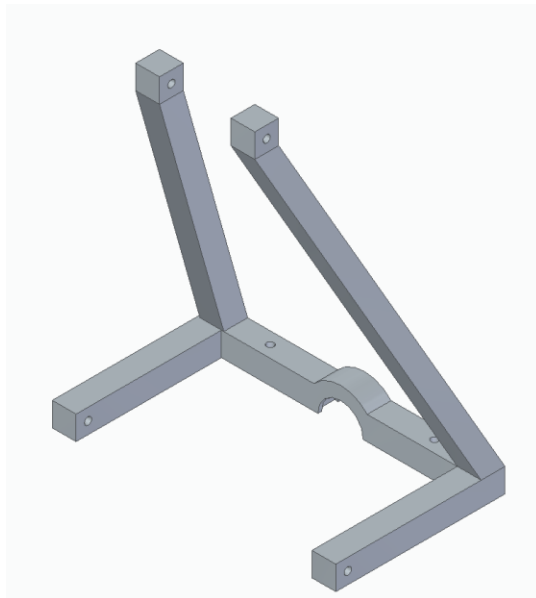
Dále je jeho nedílnou součástí i zámek posuvu, zobrazený na obrázku 29, kterým se stáhne horní část ramene k dolní a stane se z nich pevný celek. V tomto dílci jsou již předpřipravené otvory pro matice M3 pro možnost pevného dotažení konstrukce, jelikož by utahování přímo do plastu nemuselo stačit a bylo by tedy nevyhovující pro občasná ladění.



Obrázek 29: Zámek posuvu

8.1.5 Horní rám

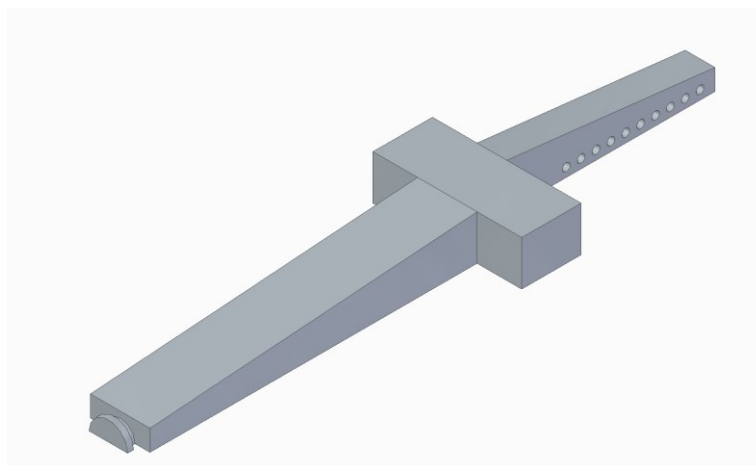
Na tuto část jsou kladeny následující požadavky: upevnění ložiska v zadní části rámu a spojení s podpěrou ramene pro zvýšení stability celého systému. Vymodelovaná dolní část podpěry ramene je vidět na obrázku 30.



Obrázek 30: Horní rám

8.2 Rameno

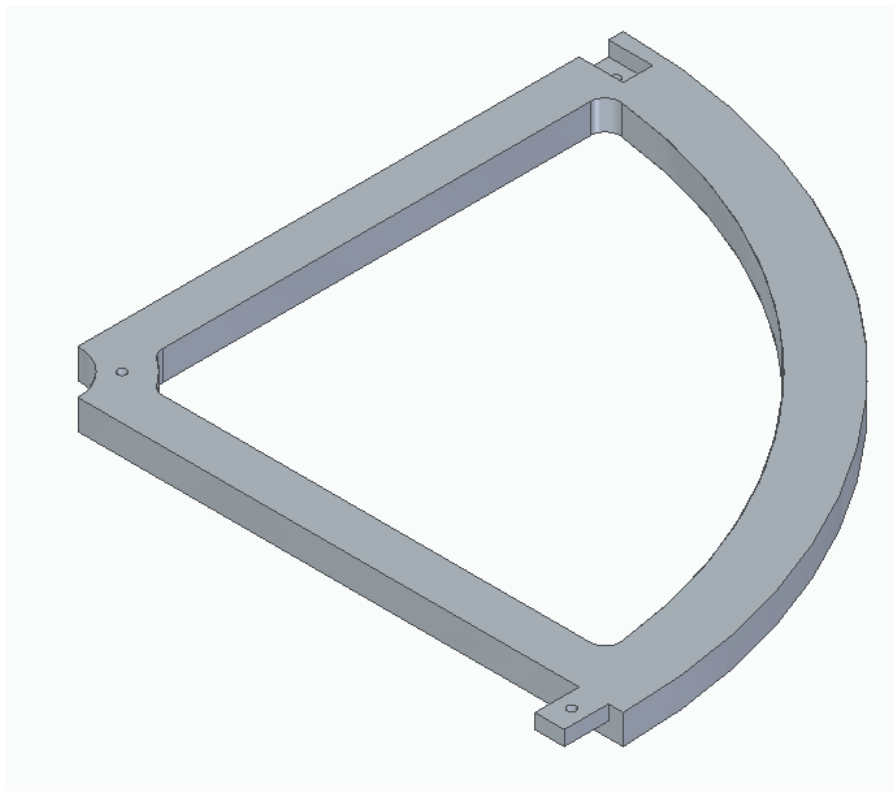
Rameno bude splňovat následující požadavky: dostatečná pevnost v ohybu pro nesení jak závaží kmitajícího na pružině, tak táhla pro jemné kmitání, úchyt pro tyto části konstrukce včetně možností nastavení vzdálenosti ramene pro úpravu velikosti výchylky, a tedy míry buzení kmitání a v neposlední řadě i vybrání pro podpěru ramene. Vymodelovaná dolní část podpěry ramene je vidět na obrázku 31.



Obrázek 31: Rameno

8.3 Kolo

Kolo bude splňovat následující požadavky: skládání ze 4 jednotlivých dílu vzhledem k rozměrovým predispozicím tiskárny, průměr 40 cm a příprava na spojení s hřídelí. Vymodelovaný díl kola je vidět na obrázku 32.



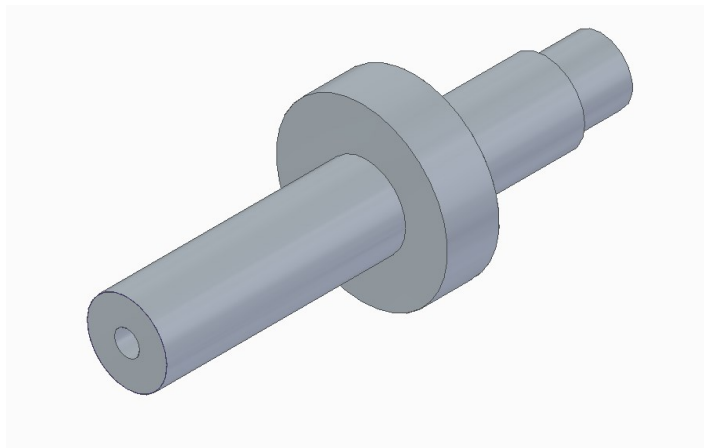
Obrázek 32: Díl kola

8.4 Drobné díly

Tato sestava si bude vyžadovat i nemalé množství drobných dílů, zpravidla navazujících na díly již uvedené. Příkladem může být hřídel, rameno a jeho táhlo, středový díl kola, ale také třeba uchycení servomotoru. Proto se jim budu věnovat v této samostatné podkapitole.

8.4.1 Hřídel

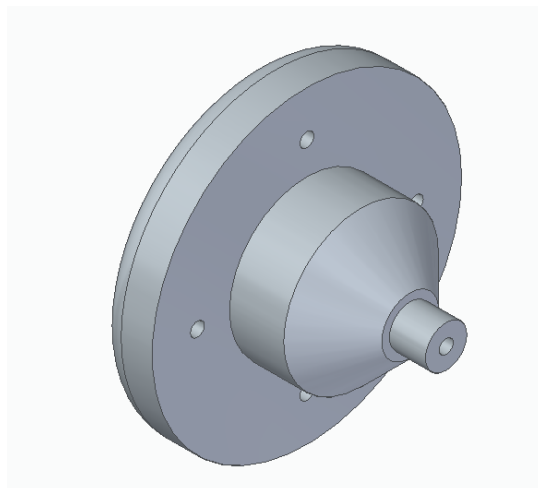
Pro spojení hnacího ústrojí spolu s kolem využijí hřídele, která zároveň bude obsahovat excentrický válec, ten bude propojený pomocí táhla k ramenu a při otáčení hřídele bude tedy táhlo rameno konat posuvný pohyb nahoru a dolů, a tím způsobí jeho kmitání. Kmitáním ramene dosáhneme dodávání energie pružině, a tedy i rozkmitání a následné kmitání tělesa na ní uchycené. Na jedné straně bude vstupovat do ložiska, a zároveň se spojovat s koncovkou servomotoru, na straně druhé do ní bude našroubován centrální díl kola umístěný v ložisku. Výslednou podobu hřídele lze vidět níže na obrázku 33.



Obrázek 33: Hřídel

8.4.2 Středový díl kola

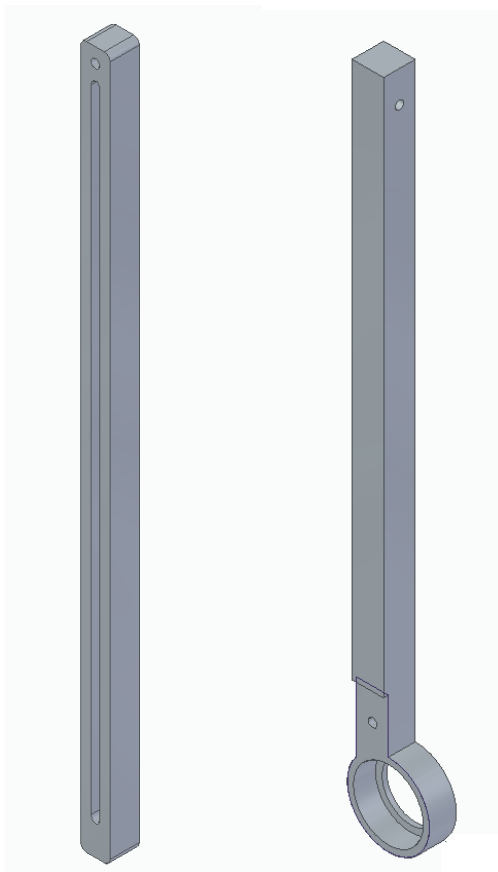
Pro spojení kola bude potřeba díl, který bude propojovat jednotlivé části, držet v ložisku a v neposlední řadě k němu bude šroubovým spojením připevňována hřídel. Navrhnutý díl je vyobrazen na obrázku 34.



Obrázek 34: Středový díl kola

8.4.3 Táhlo

Pro pohyb ramene je nutné již zmíněné táhlo, které bude spojeno s excentrickým válcem umístěným na hřídeli. Táhlo je složeno vzhledem k potřebné délce ze dvou dílu, a to horního a dolního dílu vyobrazeném na obrázku 35. Na dolním dílu je vybrání pro uzamykající díl, zobrazený na obrázku 36, který bude držet táhlo vhodně umístěné. Celkem se jedná tedy o 3 díly, horní část táhla, spodní část táhla a uzamykací díl.



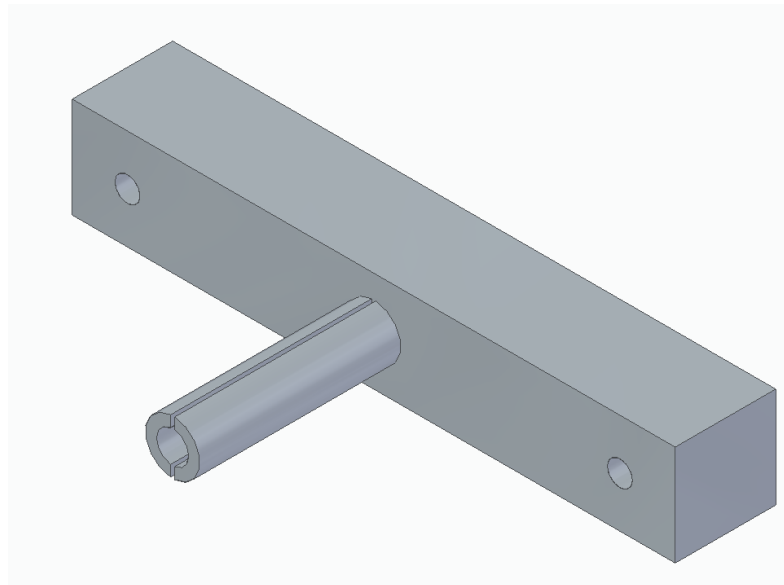
Obrázek 35: Horní díl táhla (vlevo), dolní díl táhla (vpravo)



Obrázek 36: Uzamykací díl

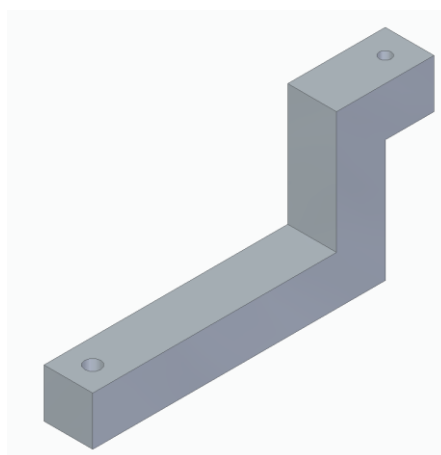
8.4.4 Uložení pohonu a jeho spojení se hřídelí

Servomotor je nutné přichytit ke konstrukci proto, aby byla známa jeho vzdálenost do konstrukce, je nejdříve nutné jej spojit se hřídelí. Servomotor v balení obsahuje rameno, na které bude vhodné vytvořit spojku, která se následně zasune do otvoru ve hřídeli. Vůle mezi tímto dílem a hřídelí bude minimální, aby nám po jeho zasunutí vznikl spoj, který proklouzne až při určité síle. Bude tedy dost pevný na to, aby otáčel kolem ale v případě poruchy, například zaseknutí kola, se začne protáčet. Navrhnutý díl je zobrazen na obrázku 37.



Obrázek 37: Spojka serva a hřídele

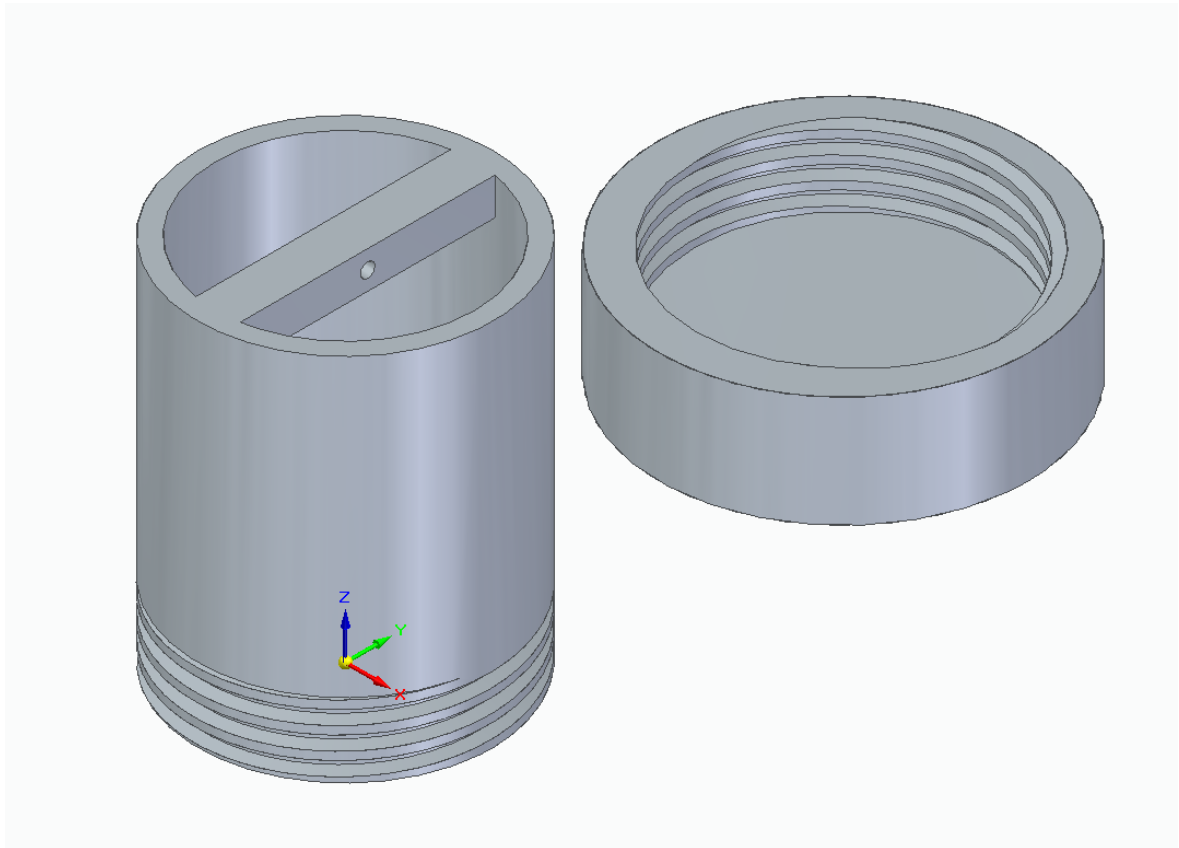
Nakonec je nutné servo uložit. K tomu poslouží následující velmi jednoduchý díl, který se jedním koncem přišroubuje do připraveného otvoru v rámu a na druhém konci se přichytí servo. Navrhnutý díl je zobrazen na obrázku 38.



Obrázek 38: Uložení serva

8.4.5 Válec pro závaží se šroubovacím dnem

Pro možnost jednoduchého odladění hmotnosti byla zvolena výroba válce se šroubovacím dnem, do kterého se následně bude moci snadno vložit závaží v případě, že bude třeba změnit přirozenou frekvenci kmitání pružiny. Požadavek na tento díl je pouze otvor v horní části pro pružinu a vhodný prostor uvnitř na 100 g závaží. Znázorněný je na obrázku 39.

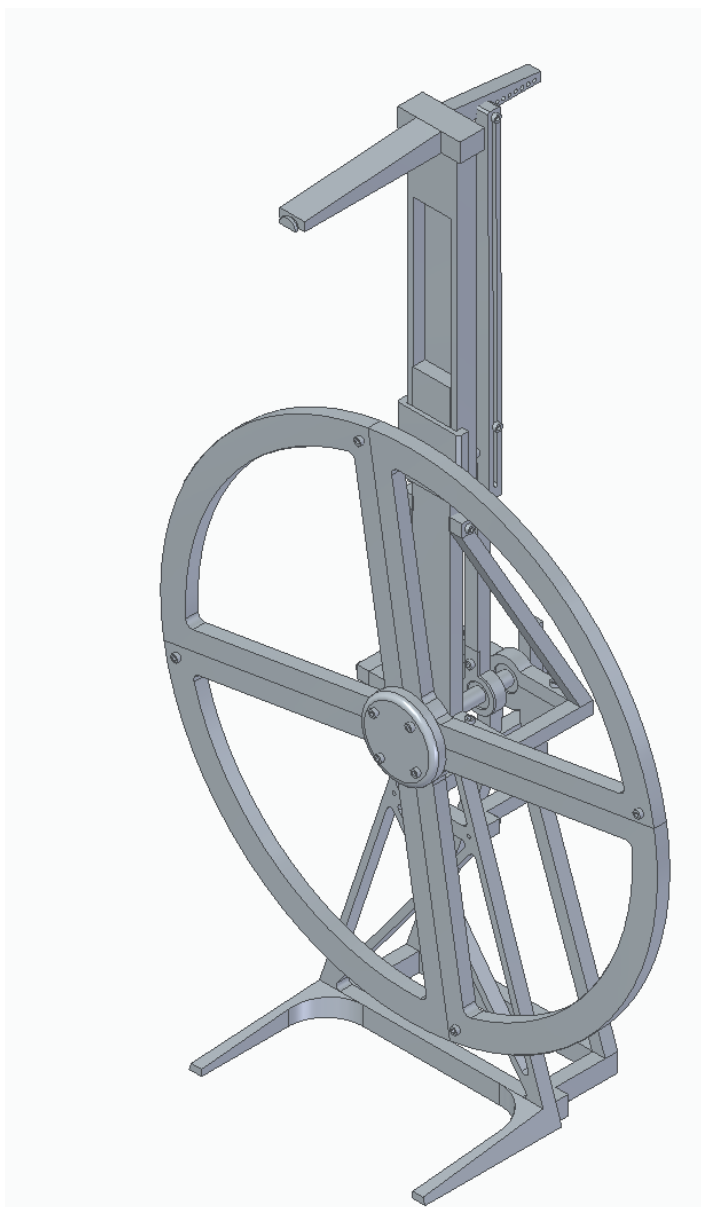


Obrázek 39: Válec s dnem

9 SESTAVA A KONTROLNÍ VÝPOČET

9.1 Model sestavy

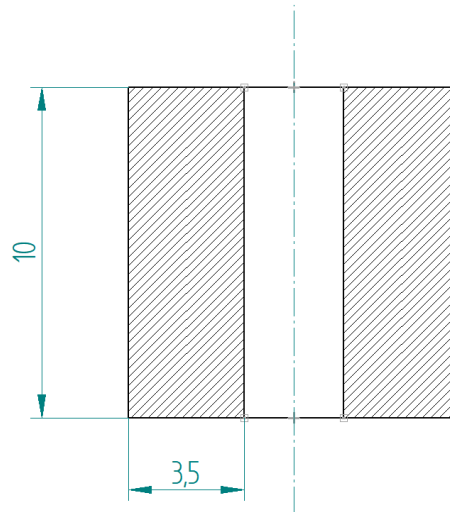
Sestavu lze vidět na obrázku 40 je spojena za pomoci šroubů M3 délky 20 a 35 mm. Přesný způsob složení je znázorněn na výkresu sestavy. Dále je použito dvou ložisek vhodných do bruslí pro snadnou dostupnost. Servo je k sestavě přichyceno pomocí montážního materiálu s ním dodávaným.



Obrázek 40: Sestava

9.2 Kontrola výpočtem

Pro kontrolní výpočet pevnosti v tahu byla zvolena druhá část tažného ramene, protože má nejmenší průřez. Plocha průřezu je vidět na obrázku 41 spolu s rozměry



Obrázek 41: Průřez ramene

9.2.1 Výpočet plochy průřezu

Průřez na obrázku 41 vypočítáme z obsahu dvou stejných obdélníků podle následujícího vzorce 9.2.

$$S = a \cdot b \cdot 2$$

(9.5)

Kde S je výsledná obsah a a a b jsou strany obdélníku.

Po dosazení vypadá rovnice takto:

$$S = 10 \cdot 3,5 \cdot 2$$

$$S = 70 \text{ mm}^2$$

Výsledná plocha je vzhledem k dosazování v mm^2 , 70 mm^2 .

9.2.2 Výpočet dovoleného napětí v tahu

Podle vztahu 4.1 vypočítáme dovolené napětí v tahu, vzhledem k tomu, že známe

$$\sigma_d = \frac{F}{S} \quad (4.6)$$

kde σ_d je dovolené napětí v tahu [Pa], F je síla působící na materiál [N] a S je průřez materiálu kolmý na směr působení síly [m^2].

Napětí dovolené je pro materiál PLA rovno 37 Mpa, plocha S je 70 mm^2 , zde můžeme pokrátit mm^2 a Mpa na základní m^2 a Pa, po úpravě dostaneme tedy následující vztah 9.2.2 do kterého dosadíme. [23]

$$F = S \cdot \sigma_d \quad (9.2.2)$$

$$F = 70 \cdot 37$$

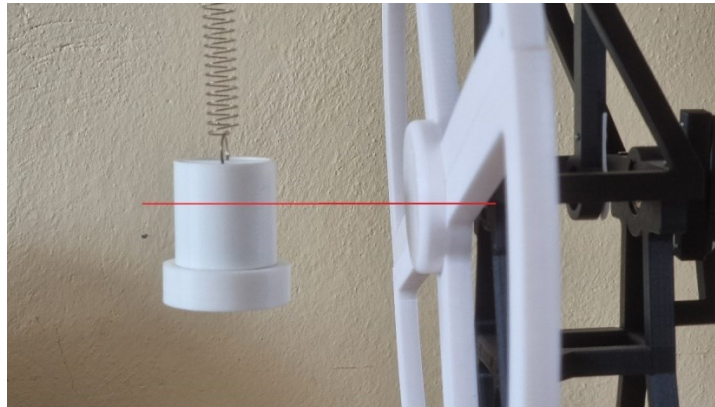
$$F = 2\,590\, N$$

Výsledkem je hodnota 2 590 N, ta odpovídá přibližně zatížení 259 Kg. Tento údaj je nutno vynásobit koeficientem 0,3, jelikož v reálném modelu je pouze 30% výplň. Dostaneme 77,7 Kg což je s trochou nadsázky hodnota hmotnosti aparátu i s jeho obsluhou. Stojí za zvážení, jestli by nebylo vhodné pro úsporu materiálu tento rozměr zmenšit. Je ale nutno si uvědomit, že aparatura by měla být nejen dostatečně pevná pro svou funkčnost, ale také pro manipulaci s ní. Proto si myslím, že jsou dané rozměry adekvátní.

10 PROVEDENÍ POKUSU

10.1 Nastavení závaží

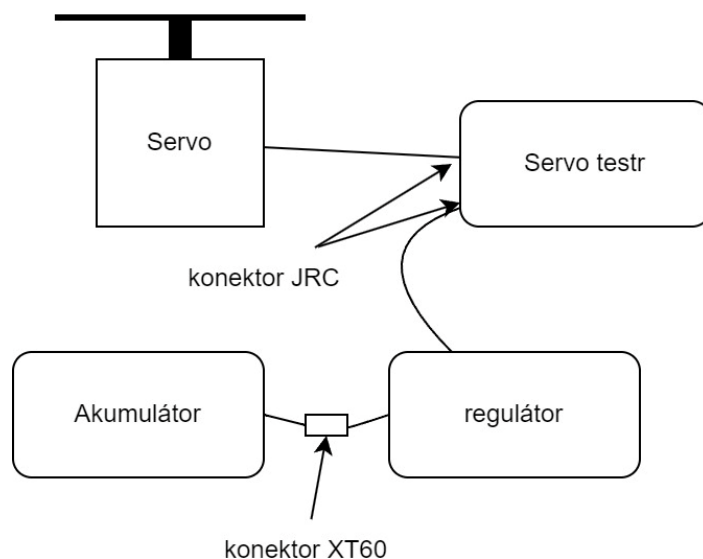
Při provedení pokusu se postupuje následovně. Nejprve se umístí závaží na pružině na horní rameno. Zkontrolujeme, že je závaží v rovině se středem kola viz obrázek 42. V případě, že tomu tak není, je nutné povolit dva šrouby na zámku posuvu a šroub uprostřed ramene táhla, následně nastavit požadovanou výšku a šrouby zpět utáhnout.



Obrázek 42: Nastavení výšky závaží

10.2 Zapojení elektroniky

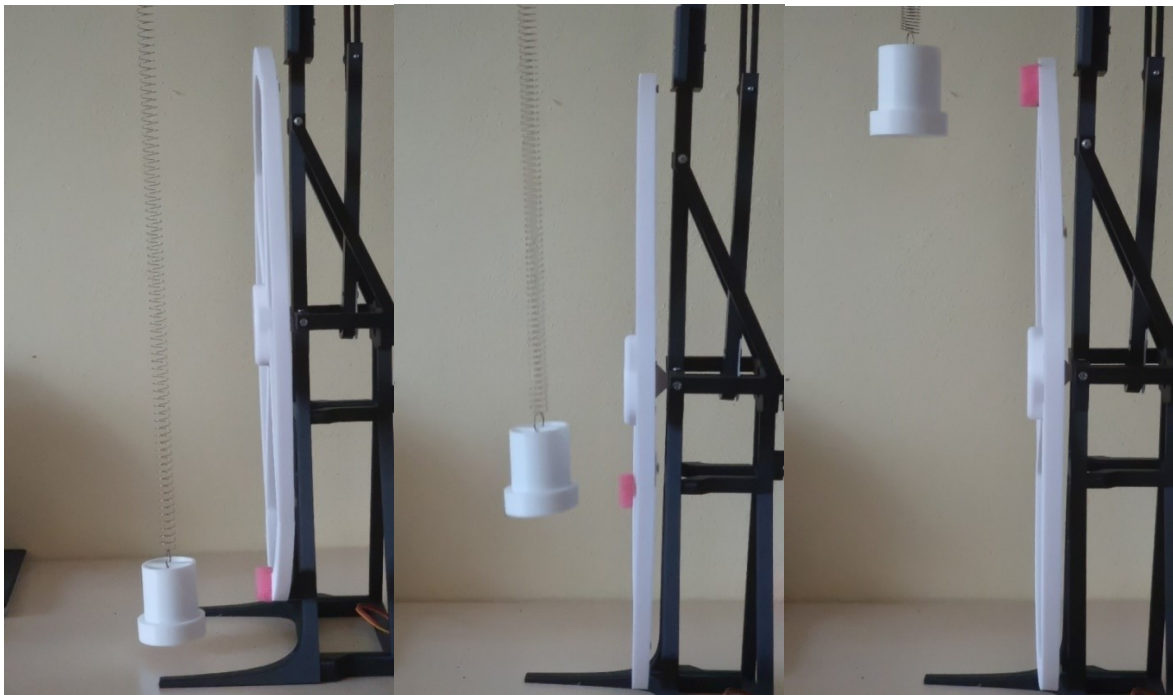
Po fyzickém nastavení je zapojeno servo do servo testru. Následně se do něj připojí napájecí výstup z regulátoru. Nakonec se připojí baterie na vstup regulátoru. Celé schéma znázorňuje obrázek 43 níže.



Obrázek 43: Schéma zapojení

10.3 Nastavení rychlosti

Potenciometrem je nastavena pomalu řídicí hodnota pro servomotor přibližně na 1900 jednotek, které zobrazuje digitálním display. Následně je nutné počkat přibližně minutu na rozkmitání závaží. Je-li to nutné, je možnost frekvenci upravit pootočením potenciometru. Cílený efekt je zobrazený na obrázku 44.

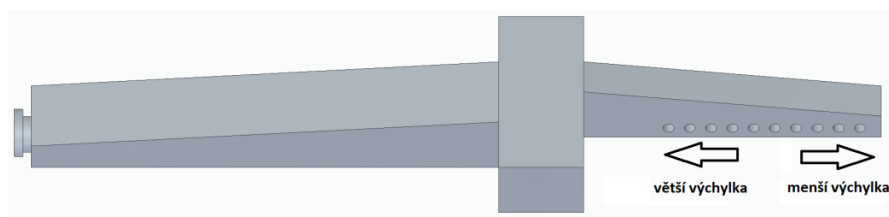


Obrázek 44: Výsledný efekt pokusu

Pokud je požadovaná frekvence stále odlišná, je možné snížit nebo zvýšit hmotnost závaží. V případě, že je frekvence souhlasná, pouze se bod na kole pohybuje v jiném místě, je možné kolo povolit pootočit a znovu dotáhnout.

10.4 Nastavení buzení

Pro případ, že by závaží nekmitalo s dostatečnou výchylkou, je možné míru buzení nastavit výběrem otvoru na rameni do kterého je přišroubováno táhlo. Pro větší výchylku ramene volíme otvory vlevo, pro menší zase otvory vpravo, jak je vidět na obrázku 45.



Obrázek 45: Schéma nastavení

ZÁVĚR

Bakalářská práce je tematicky rozdělena na část teoretickou a praktickou. Celkově se zabývá návrhem a výrobou aparatury, pokusu znázorňujícího podobnost dvou fyzikálních pohybů. Jedná se konkrétně o harmonický oscilační pohyb a pravidelný pohyb po kružnici. Tento pokus je následně určen pro názornou ukázkou studentům základního fyzikálního kurzu na Fakultě technologické, Univerzity Tomáše Bati ve Zlíně.

V části teoretické byly první kapitoly věnovány popisu jednotlivých pohybů, vysvětlení pojmů a veličin k nim vztaženým. Další kapitola se věnuje srovnání kmitání a rovnoměrného kruhového pohybu, což je hlavní myšlenka této bakalářské práce. Čtvrtá kapitola se věnuje základním pojmům a souvislostem v oboru pevnosti a pružnosti pro lepší pochopení a tvorbu konstrukce. Na závěr teoretické části jsou výrobní metody, zde je nastínění metod pomocí 3D tisku, a k ní vhodné materiály. Následná tvorba aparatury probíhá až v druhé části.

Praktická část byla věnována samotnému návrhu a následné výrobě. První kapitola praktické části, šestá kapitola celkově, se věnuje jednotlivým částem zařízení a jejich návrhu v závislosti na povaze experimentu. Zabývá se návrhem kola, rámu, výběrem pružiny a elektroniky. Následuje volba výrobní metody a materiálu. V osmé kapitole je již modelování konkrétních dílů aparatury, tedy rámu, ramena, kola a jiných drobných dílů. U všech těchto dílů jsou rozebrány konstrukční požadavky, a je vysvětleno co mají jednotlivé části plnit. Předposlední kapitola se zabývá sestavou, součástí je i kontrolní výpočet pro zkontrolování pevnosti části konstrukce. Závěrečná kapitola byla věnována samotnému provedení pokusu. Je v ní vysvětleno možné nastavení, následné zapojení a odladění rychlosti. Hlavním cílem bakalářské práce bylo také předvést tento experiment studentům v předmětu „Experimenty z fyziky I“ (grant předmětu je vedoucí bakalářské práce) jako názornou ukázkou podobnosti matematického popisu kruhového pohybu a kmitání tělesa na pružině, přestože se jedná fyzikálně o jiný pohyb.

SEZNAM POUŽITÉ LITERATURY

1. HALLIDAY, D., RESNICK, R. et WALKER, J. Fyzika - vysokoškolská učebnice obecné fyziky. Brno : VUTIUM, 2000. ISBN 80-214-1868-0.
2. LEWIN, W. et GOLDSTEIN, W. Z lásky k fyzice: od konce duhy až na okraj času - putování po dívech fyziky. Praha : Argo, 2012. ISBN 978-80-257-0704-3.
3. (©) FYZWEB. Kmitavý pohyb - popis a zavedení. sites.google.com. [Online] 2023. [Citace: 4. 5 2023.] <https://sites.google.com/site/fyzika007/mechanicke-kmitani-a-vlneni/kmitavy-pohyb---jeho-zavedeni?fbclid=IwAR1e5CQQ-GV04PcbIWsZZdTr1mOBYbkI1REEAMZFbNzzctegHVD-qerX70E>.
4. Králová, Mgr. Magda. KMITÁNÍ. edu.techmania. [Online] © Techmania Science Center o.p.s. [Citace: 21. 1 2022.] <http://edu.techmania.cz/cs/encyklopedie/fyzika/akustika/kmitani>.
5. (©) Wikiwand. Perioda (fyzika). wikiwand.com. [Online] 2023. [Citace: 2. 5 2023.] [https://www.wikiwand.com/cs/Perioda_\(fyzika\)?fbclid=IwAR131kUO1SE0IB0SAiLiHKWFd1bHMwG5yctVEmN_Q5tOp9PYOVt5aiSeL14](https://www.wikiwand.com/cs/Perioda_(fyzika)?fbclid=IwAR131kUO1SE0IB0SAiLiHKWFd1bHMwG5yctVEmN_Q5tOp9PYOVt5aiSeL14).
6. © 2023 itnetwork.cz. Mechanické kmitání a vlnění. itnetwork.cz. [Online] 2023. [Citace: 5. 5 2023.] <https://www.itnetwork.cz/maturitni-otazky-z-fyziky-mechanicke-kmitani-a-vlneni?fbclid=IwAR26C7KsCPxH9UTIU2HUmIh9UcvqfPypTAz9dG76yqfuKTuFhTVaI9M0Spw>.
7. Hofmann J., Urbanová M. Fyzika I. Praha : VŠCHT Praha, 2005. ISBN: 978-80-7080-777-4.
8. Jaroslav Reichl, Martin Všetická. fyzika.jreichl. Kmitavý pohyb. [Online] © 2006 - 2023 Jaroslav Reichl, Martin Všetická. [Citace: 23. 1 2023.] <http://fyzika.jreichl.com/main.article/view/151-kmitavy-pohyb>.
9. kol., Halama Radim Ph.D. a. Pružnost a pevnost. [interaktivní studijní materiál] Ostrava : © Halama et al., 2012.
10. © DocPlayer.cz. NAMÁHÁNÍ NA TAH. docplayer.cz. [Online] 2017. [Citace: 3. 5 2023.] https://docplayer.cz/22276325-Namahani-na-tah-namahani-na-tah.html?fbclid=IwAR0l06FhT0NMb7O2AOuv85_qPtaB8TfzJbjHzzrS7F5oQ_gEjRzM-XdNX_nQ.

11. Shahrubudina N., T.C. Lee, R. Ramlan. An Overview on 3D Printing Technology: Technological, Materials, and Applications. Batu Pahat : Elsevier B.V., 2019.
12. Martin Spoerk, Clemens Holzer, Joamin Gonzalez-Gutierrez. Material extrusion-based additive manufacturing of polypropylene: A review on how to improve dimensional inaccuracy and warpage. onlinelibrary.wiley.com. [Online] 2020. [Citace: 5. 5 2023.] <https://onlinelibrary.wiley.com/doi/full/10.1002/app.48545>.
13. © 2012 - 2022 DKMP. Přehled technologií 3D tisku. dkmp.cz. [Online] 9. 1 2018. [Citace: 2. 5 2023.] <https://www.dkmp.cz/o-nas/detail/Prehled-technologiei-3D-tisku?fbclid=IwAR3LMRfshjDhsPDofVwhfSi1-USRVLY76LCq8Rq4fG9-XHVelDsiNnNHdd4>.
14. Ruben Bayu Kristiawan, Fitriani Imaduddin EMAIL logo , Dody Ariawan , Ubaidillah and Zainal Arifin. A review on the fused deposition modeling (FDM) 3D printing: Filament processing, materials, and printing parameters. degruyter.com. [Online] 2021. [Citace: 5. 5 2023.] <https://www.degruyter.com/document/doi/10.1515/eng-2021-0063/html>.
15. © Robu.in. Types of Servo Motor – AC Servo Motor and DC Servo Motor. robu.in. [Online] 20. 4 2020. [Citace: 5. 5 2023.] <https://robu.in/types-of-servo-motor/>.
16. Copyright 2018 汕头市斯派特电子科技有限公司. SPT5525LV-360/360 Continuous Rotation/SPT Servo/Large torque/Large angle/Metal gear/Digital servo. spt-servo.com. [Online] 30. 11 2021. [Citace: 5. 5 2023.] <http://www.spt-servo.com/Product/5621733416.html>.
17. © Components101. CCPM Servo Tester. components101.com. [Online] 2021. [Citace: 3. 5 2023.] <https://components101.com/misc/ccpm-servo-tester>.
18. © 2016 -2023 Big hobby.cz. Jak vybrat správný regulátor? bighobby.cz. [Online] 2023. [Citace: 8. 5 2023.] <https://www.bighobby.cz/modelarska-poradna/jak-vybrat-spravny-regulator/>.
19. © 2016 -2023 Big hobby.cz. Jak vybrat správnou baterii. bighobby.cz. [Online] 2023. [Citace: 1. 5 2023.] <https://www.bighobby.cz/modelarska-poradna/jak-vybrat-spravnou-baterii/>.
20. Salt, John. RC LiPo Batteries. rchelicoptfun.com. [Online] 2023. [Citace: 2. 5 2023.] <https://www.rchelicoptfun.com/lipo-batteries.html>.

21. © 1998-2023 oXyShop s.r.o. 3D tisk: jak funguje a kde začít? svethardware.cz. [Online] 2023. [Citace: 2. 5 2023.] <https://www.svethardware.cz/3d-tisk-jak-funguje-a-kde-zacit/48403-3>.
22. © Vydavatelství Nová média, s. r. o. Exkluzivně z 3Dexpa: Světová premiéra 3D tiskárny Prusa i3 MK2. 3d-tisk.cz. [Online] 15. 5 2016. [Citace: 11. 4 2023.] <https://www.3d-tisk.cz/exkluzivne-z-3dexpa-svetova-premiera-3d-tiskarny-prusa-i3-mk2/>.
23. © Prusa Research a.s. PLA. help.prusa3d.com. [Online] 2023. [Citace: 1. 5 2023.] https://help.prusa3d.com/cs/article/pla_2062.
24. BCN3D Technologies, Inc. PLA Filament: The pros and cons of this 3D printing staple material. bcn3d.com. [Online] 22. 8 2020. [Citace: 3. 5 2023.] <https://www.bcn3d.com/pla-filament-stands-for-strength-temp/>.

SEZNAM POUŽITÝCH SYMBOLŮ A ZKRATEK

θ	Úhlová poloha
s	Délka obvodu kružnice
r	Poloměr kružnice
ω	Úhlová rychlost
$\bar{\omega}$	Průměrná úhlová rychlost
t	Čas
$\bar{\varepsilon}$	Průměrné úhlové zrychlení
f	Frekvence
T	Perioda
$x(t)$	Výchylka
x_m	Maximální výchylka
φ	Počáteční fáze
a	Zrychlení
F	Síla
m	Hmotnost
F_b	Odporová síla
b	Součinitel útlumu
v	Rychlost
σ_t	Napětí v tahu
S	Plocha
N	Normálová síla
σ_o	Napětí v ohybu
M_o	Momentová síla
W_o	Modul odporu průřezu
F_{KRIT}	Kritická síla

E	Youngův modul pružnosti
I_{min}	Minimální kvadratický moment
L	Délka prutu
CAD	Computer Aided Design
FDM	Fused deposition modeling
ME	Material Extrusion
AM	Additive manufacturing
ABS	Akrylonitril butadien styren
PLA	Kyselina polyléčná
PET	Polyethylentereftalát
PC	Polykarbonát
GO	Oxid grafitu
TPU	Termoplastický polyuretan
SAN	Styren akrylonitrilová pryskyřice
PP	Polypropylen
PP-g-MA	Polypropylene-graft-maleic anhydride
RC	Radio control
NiCd	Nikl-kadmiový akumulátor
NiMh	Nikl-metal hydridový akumulátor
LiPo	Lithium-polymerový akumulátor
Atp	A tak podobně
Kč	Koruny české

SEZNAM OBRÁZKŮ

Obrázek 1: Úhlová poloha	13
Obrázek 2: Řez rotujícího tělesa a jeho otočení	14
Obrázek 3: Otočení tělesa v čase	14
Obrázek 4: Otočení tělesa kolem osy	15
Obrázek 5: Pohyb kyvadla	17
Obrázek 6: Harmonický pohyb v čase	18
Obrázek 7: Perioda a amplituda	18
Obrázek 8: Harmonický oscilátor	20
Obrázek 9: Úhel mezi Jupiterem a jeho měsícem Callisto (2).....	22
Obrázek 10: Pohyb částice po kružnici.....	23
Obrázek 11: Souvislost kmitavého pohybu s pohybem rovnoměrným po kružnici (8)	24
Obrázek 12: Proces kladení materiálu pomocí FDM (13)	28
Obrázek 13: Rozdělení polymerních materiálů (12).....	29
Obrázek 14: náčrt konstrukce	33
Obrázek 15: náčrt rotujícího kola	34
Obrázek 16: náčrt rámu.....	35
Obrázek 17: pružina.....	36
Obrázek 18: Servomotor s nekonečným chodem	37
Obrázek 19: Servo testr.....	38
Obrázek 20: regulátor napětí.....	38
Obrázek 21: Li-pol baterie	39
Obrázek 22: Vznik trojrozměrného předmětu vrstvu po vrstvě (21).....	40
Obrázek 23: Prusa i3 MK2 (22).....	41
Obrázek 24: 3D tisknutá maska z PLA (23)	42
Obrázek 25: Přední část rámu	43
Obrázek 26: Zadní část rámu	44
Obrázek 27: Dolní část podpěry ramene.....	45
Obrázek 28: Horní část podpěry ramene	46
Obrázek 29: Zámek posuvu	46
Obrázek 30: Horní rám	47
Obrázek 31: Rameno	47
Obrázek 32: Díl kola.....	48
Obrázek 33: Hřídel.....	49
Obrázek 34: Středový díl kola	49

Obrázek 35: Horní díl táhla (vlevo), dolní díl táhla (vpravo).....	50
Obrázek 36: Uzamykací díl	50
Obrázek 37: Spojka serva a hřídele	51
Obrázek 38: Uložení serva.....	51
Obrázek 39: Válec s dnem	52
Obrázek 40: Sestava.....	53
Obrázek 41: Průřez ramene.....	54
Obrázek 42: Nastavení výšky závaží	56
Obrázek 43: Schéma zapojení.....	56
Obrázek 44: Výsledný efekt pokusu	57
Obrázek 45: Schéma nastavení	57

SEZNAM PŘÍLOH

- Příloha P I: Výkres Sestavy – 001-0000-000
- Příloha P II: Výkres Přední části rámu – 001-0000-001
- Příloha P III: Výkres Zadní části rámu – 001-0000-002
- Příloha P IV: Výkres Dolní části podpěry ramene – 001-0000-003
- Příloha P V: Výkres Horní části podpěry ramene – 001-0000-004
- Příloha P VI: Výkres Zámku posuvu – 001-0000-005
- Příloha P VII: Výkres Horního rámu – 001-0000-006
- Příloha P VIII: Výkres Ramena – 001-0000-007
- Příloha P IX: Výkres Kola – 001-0000-008
- Příloha P X: Výkres Hřídele – 001-0000-009
- Příloha P XI: Výkres Středového dílu kola – 001-0000-010
- Příloha P XII: Výkres Horního dílu táhla – 001-0000-011
- Příloha P XIII: Výkres Dolního dílu táhla – 001-0000-012
- Příloha P XIV: Výkres Uzamykacího dílu – 001-0000-013
- Příloha P XV: Výkres Spojky serva a hřídele – 001-0000-014
- Příloha P XVI: Výkres Uložení serva – 001-0000-015
- Příloha P XVII: Výkres Válce – 001-0000-016
- Příloha P XVIII: Výkres Dna – 001-0000-017