

**PŘÍRODOVĚDECKÁ FAKULTA UNIVERZITY
PALACKÉHO**
Katedra optiky



DIPLOMOVÁ PRÁCE

FOUCAULTOVO KYVADLO

Vypracoval: Bc. Tomáš Schmiedt
Vedoucí práce: prof. RNDr. Tomáš Opatrný, Dr.

Foucaultovo kyvadlo

Tomáš Schmiedt

2. ledna 2018

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému školiteli prof. RNDr. Tomáši Opatrnému, Dr. za veškerý čas, úsilí a znalosti, které mi při zpracování této diplomové práce poskytl. Veliký dík také patří správě budovy Přírodovědecké fakulty v čele s Ing. Ondřejem Kolářem a Ing. Michalem Kartákem, bez jejichž pomoci by se kyvadlo nepovedlo sestrojít. Dále bych chtěl poděkovat Mgr. Michalu Dudkovi a Ing. Zdeňku Řehořovi, Ph.D. za jejich odborné rady v oblasti elektroniky, Mgr. Milanu Vůjtkovi, Ph.D. za zapůjčování magnetometru a RNDr. Vladimíru Chlupovi za výrobu držáků pro laserové diody.

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem diplomovou práci zpracoval samostatně pod vedením prof. RNDr. Tomáše Opatrného, Ph.D. s použitím zdrojů, které jsou uvedeny v seznamu literatury a obrázků na konci práce.

V Olomouci dne 2. 1. 2018

Podpis:

Obsah

1	Úvod	3
2	Coriolisova síla	4
3	Perioda stáčení kyvadla v Olomouci	5
4	Kmitající kyvadlo s kruhovou trajektorií	6
5	Trajektorie pohybu kyvadla jako lineárního harmonického oscilátoru	9
6	Charronův prstenec	12
7	Práce kyvadla k překonání odporové síly	13
8	Relativní rychlost ztrát amplitudy a faktor kvality	13
9	Konstrukce a upevnění kyvadla	14
10	Výroba a sestavení Charronova prstence	16
11	Lano, koncovka a závaží kyvadla	19
	11.1 Výpočet práce kyvadla k překonání odporové síly	20
	11.1.1 Výpočet práce závaží	22
	11.1.2 Výpočet práce lana	24
12	Zavěšování kyvadla	25
	12.1 Výpočet relativní rychlosti ztrát amplitudy a faktoru kvality	26
13	Cívka a magnet	28
14	Laserové závory	29
	14.1 Snímání pohybu lana pomocí obalu lana	33
15	Arduino a program	33
16	Obvod elektromagnetu	37
17	Úhломěr	39
18	Měření kmitání kyvadla poháněného cívkou	39
	18.1 Stáčení roviny kmitání	39
	18.2 V omezeném režimu – při dvou aktivních závorách	40
19	Závěr	43

A Dokumentace k laserové diodě z Laserové závory pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.	47
B Technické parametry svorkovnice	49
C Náskres rozmístění stojanů kolem informačního kruhu	49
D Fotografie prostoru pod skly.	50
E Ukládání cívky pod skla, umístění svorkovnice	51

1 Úvod

Foucaultovo kyvadlo je součástí experimentu dokazujícího, že Země se otáčí kolem své osy. Přišel s ním francouzský fyzik Jean Bernard Léon Foucault, jehož pokus proběhl v roce 1851 v pařížském Pantheonu. Foucault tehdy na lano o délce 68 metrů zavěsil závaží o hmotnosti 28 kilogramů, doba kmitu kyvadla byla 16 sekund. Závaží Foucault vybavil hrotem, který zaznamenával pohyb kyvadla do písku pod závažím. Díky tomu bylo možné pozorovat změny roviny kmitání kyvadla.

V dnešní době již existuje mnoho podobných kyvadel, které visí na různých místech na Zemi. Některá jen s pouhým lanem a závažím, jiná propracovanější s vlastním zdrojem energie, díky němuž jsou neustále udržována v pohybu s konstantní amplitudou výchylky. Kyvadlo je tak možné zhlédnout třeba nejen v Technickém muzeu ve Vídni, v Německém technickém muzeu v Berlíně, ale také ve Vědeckém muzeu v Giani (Jižní Afrika), či Amundsenově-Scottově stanici na Jižním pólu.

Rovina kmitání kyvadla se stáčí na různých místech na Zemi jinou rychlostí. Pokud bychom měli možnost sledovat zároveň pohyb kyvadla v Amundsenově-Scottově stanici a v Technickém muzeu ve Vídni, po čase bychom si všimli, že rovina kmitání kyvadla se v Amundsenově-Scottově stanici stáčí rychleji než v Technickém muzeu. Jak bude později v práci ukázáno, rychlost stáčení roviny kmitání kyvadla totiž závisí na zeměpisné šířce.

Cílem práce bylo sestrojít funkční Foucaultovo kyvadlo na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého a seznámit se s různými teoretickými postupy popisujícími pohyb Foucaultova kyvadla, možnostmi jeho konstrukce, včetně zdroje, který vyrovnává ztráty energie.

Foucaultovo kyvadlo sestrojené na fakultě se skládá ze závěsného mechanismu, v němž je upevněno lano, na kterém je zavěšeno závaží ve tvaru koule. Cívka umístěná pod koulí kompenzuje ztráty způsobené odporem vzduchu, jenž působí na kmitající kyvadlo. Cívka však nepracuje permanentně, jen po určité době půl periody kmitání kyvadla. Zapnutí a vypnutí cívky je řízeno detektory v podobě optických závor a programem, který je součástí elektronické platformy Arduino DUE. Foucaultovo kyvadlo bude na fakultě sloužit jako inspirace a učební pomůcka jak žákům základních a středních škol, tak i studentům škol vysokých.

2 Coriolisova síla

Pro vysvětlení pohybu kyvadla v rotující soustavě je potřeba zavést pojem Coriolisova síla. Jedná se o zdánlivou sílu, která nemá základ v silovém působení těles, ale je součástí popisu dynamiky těles v neinerciálních soustavách. Pro Foucaultovo kyvadlo je Coriolisova síla

$$\vec{F}_C = -2m_t\vec{\Omega}_s \times \vec{v}_t, \quad (1)$$

kde m_t je hmotnost tělesa, na které Coriolisova síla působí. Coriolisova síla závisí na úhlové rychlosti Ω_s rotující soustavy a rychlosti v_t tělesa, které se v ní nachází. Pokud tedy těleso zůstává v klidu, nebo se pohybuje ve směru osy otáčení, Coriolisova síla na něj nepůsobí. Coriolisova síla je vzhledem k tomu, že $\vec{\Omega}_s$ a \vec{v}_t vystupují ve vektorovém součinu, vždy kolmá na směr pohybu tělesa [1].

Pro lepší pochopení působení Coriolisovy síly lze využít příkladu kuličky na otáčejícím se horizontálním kotouči. Posouvá-li se kulička ze středu kotouče po libovolné horizontální dráze, pozorovatel v inerciální soustavě nacházející se mimo kotouč uvidí, jak se kulička pohybuje stále stejným směrem. Avšak pozorovatel nacházející se uprostřed kotouče, tudíž v neinerciální soustavě, zjistí, že kulička se nepohybuje přímočaře, ale její pohyb je zakřivený. Právě toto zakřivení způsobuje Coriolisova síla. Pokud se kotouč otáčí ve směru hodinových ručiček, zakřivuje se trajektorie kuličky doleva. Jestliže se kotouč otáčí proti směru hodinových ručiček, pak se trajektorie kuličky zakřivuje doprava.

Podobně Coriolisova síla působí i na kyvadlo na zemském povrchu. Vlivem Coriolisovy síly se tak kyvadlo stáčí na severní polokouli doprava, na jižní naopak doleva.

Coriolisova síla je ale na různých místech Země různě velká. Závisí totiž na zeměpisné šířce, která má vliv na úhlovou rychlost Země. Pro Coriolisovu sílu má ale význam pouze vertikální složka úhlové rychlosti Země, jejíž velikost je dána vztahem

$$\Omega_{ZS} = \Omega_{ZM} \sin \phi, \quad (2)$$

kde Ω_{ZM} je maximální úhlová rychlost Země a ϕ je zeměpisná šířka. Získáme tak rovnici Coriolisovy síly pro polohu kyvadla na určité zeměpisné šířce:

$$F_C = 2m_K\Omega_{ZM} \sin(\phi)v_K. \quad (3)$$

Z rovnice 3, kde m_K je hmotnost kyvadla a v_K je rychlost kyvadla, vyplývá, že na rovníku se zeměpisnou šířkou $\phi = 0^\circ$ se Coriolisova síla neprojeví, takže člověk nebude pozorovat žádné stáčení roviny kmitání kyvadla. Naopak na jednom z pólů, kde $\phi = 90^\circ$, bude Coriolisova síla největší, a stáčení roviny kmitání tak bude nejvýraznější.

3 Perioda stáčení kyvadla v Olomouci

Rovina kmitání kyvadla se na pólech stočí za jeden hvězdný den (23 hodin 56 minut 4 sekundy, což je 86 164 sekund) o celých 360° (2π radiánů). Na ostatních místech na Zemi se rovina kmitání kyvadla stáčí pomaleji než na pólech. Vypočítáme si, o kolik stupňů za hodinu a za minutu se stočí rovina kmitání kyvadla v Olomouci, která leží na zeměpisné šířce

$$\phi_O = 49^\circ 35' 38''. \quad (4)$$

Maximální úhlová rychlost Země Ω_{ZM} se vypočítá ze vztahu

$$\Omega_{ZM} = \frac{2\pi}{T_{ZM}}, \quad (5)$$

kde T_{ZM} je perioda rotace Země, jejíž hodnota se rovná jednomu hvězdnému dni ($T_{ZM} = 86\,164$ s). Perioda T_{ZM} odpovídá periodě stáčení roviny kmitání kyvadla na pólech. Úhlová rychlost ω_O stáčení roviny kmitání na zeměpisné šířce Olomouce je dána

$$\omega_O = \frac{2\pi}{T_O}, \quad (6)$$

kde T_O je perioda stáčení roviny kmitání kyvadla na zeměpisné šířce dané polohou Olomouce a jejíž hodnotu se snažíme získat. S využitím vztahu 2 dostaneme

$$\Omega_{ZM} \sin \phi_O = \frac{2\pi}{T_O} \quad (7)$$

a pomocí vztahu 5 dosadíme T_{ZM} do rovnice 2, čímž obdržíme vztah

$$\frac{2\pi}{T_{ZM}} \sin \phi_O = \frac{2\pi}{T_O}. \quad (8)$$

Po úpravě získáme rovnici pro výpočet periody stáčení roviny kmitání kyvadla na zeměpisné šířce odpovídající poloze Olomouce

$$T_O = \frac{T_{ZM}}{\sin \phi_O}. \quad (9)$$

Vztah 9 lze použít pro jakoukoliv zeměpisnou šířku Země. Po dosazení získáme velikost T_O :

$$T_O = 1,31 \text{ dne} = 31,43 \text{ hod} = 1\,885,92 \text{ min} = 113\,155 \text{ s.} \quad (10)$$

Rovina kmitání kyvadla se tak v Olomouci otočí o 360° za 31,43 hodin. Za 1 hodinu se rovina kmitání stočí o

$$\theta_{O1hod} = 11^\circ 25' \quad (11)$$

a za 1 minutu o

$$\theta_{O1min} = 11' 25''. \quad (12)$$

4 Kmitající kyvadlo s kruhovou trajektorií

Na kmitající kyvadlo působí nejen Coriolisova síla \vec{F}_C , ale také síla gravitační \vec{F}_g a síla vlákna \vec{F}_{NV} . Výslednice těchto sil je pak dána jako

$$F_{vys} = \vec{F}_g + \vec{F}_{NV} + \vec{F}_C \quad (13)$$

Pokud je výchylka kyvadla malá, uvažujeme pohyb kyvadla jen v horizontální rovině [2]. Vyjádříme si jednotlivé síly ve vztahu 13, čímž získáme rovnici

$$-m_K \omega_{K+-}^2 r_A = -\frac{m_K g r_A}{L} \pm 2m_K \omega_{K+-} r_A \Omega_{ZM} \sin \phi, \quad (14)$$

kde ω_{K+-} je úhlová rychlost kmitajícího kyvadla. Rovnice se znaménkem ”+” platí pro pohyb kyvadla v protisměru hodinových ručiček, se znaménkem ”-” ve směru hodinových ručiček. Vydělíme-li rovnici (14) výrazem $m_K r_A$, obdržíme

$$\omega_{K+-}^2 r \pm \omega_{K+-} r_A \Omega_{ZM} \sin \phi - \frac{g}{L} = 0. \quad (15)$$

Vztah (15) je kvadratickou rovnicí s neznámou ω_{K+-} . Diskriminant D má tvar

$$D = 4\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + 4\frac{g}{L} = 4\left(\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + \frac{g}{L}\right), \quad (16)$$

který dosadíme do vztahu pro řešení kořenů rovnice (15)

$$\omega_{K+-} = \frac{2 \pm \Omega_{ZM} \sin \phi \pm \sqrt{4\left(\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + \frac{g}{L}\right)}}{2}. \quad (17)$$

Vykrácením se vztah (17) převede na tvar

$$\omega_{K+-} = \pm \Omega_{ZM} \sin \phi \pm \sqrt{\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + \frac{g}{L}} \quad (18)$$

se čtyřmi možnými řešeními ω_{K+-} . Řešení se znaménkem " - " před odmocninou však můžeme zanedbat. Výraz pod odmocninou v rovnici (18) je totiž větší jak $\Omega_{ZM} \sin \phi$, takže řešení se znaménkem " - " před odmocninou by dávalo zápornou ω_{K+-} , což není možné, neboť platí $\omega_{K+-} \geq 0$.

Zbyla nám dvě řešení, z nichž jedno je pro pohyb kyvadla v protisměru hodinových ručiček

$$\omega_{K+} = -\Omega_{ZM} \sin \phi + \sqrt{\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + \frac{g}{L}} \quad (19)$$

a druhé pro pohyb ve směru hodinových ručiček

$$\omega_{K-} = +\Omega_{ZM} \sin \phi + \sqrt{\Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi + \frac{g}{L}} \quad (20)$$

Vzhledem k tomu, že $\frac{g}{L} \gg \Omega_{ZM}^2 \sin^2 \phi$, můžeme vztahy (19) a (20) upravit do tvarů

$$\omega_{K+} = -\Omega_{ZM} \sin \phi + \sqrt{\frac{g}{L}} = -\Omega_{ZM} \sin \phi + \omega_K, \quad (21)$$

$$\omega_{K-} = +\Omega_{ZM} \sin \phi + \sqrt{\frac{g}{L}}. \quad (22)$$

což je také

$$\omega_{K+} = -\Omega_{ZS} + \omega_K, \quad (23)$$

$$\omega_{K-} = +\Omega_{ZS} + \omega_K, \quad (24)$$

kde

$$\Omega_{ZS} = \Omega_{ZS} \sin \phi \quad (25)$$

je úhlová rychlost Země na zeměpisné šířce ϕ a

$$\omega_K = \sqrt{\frac{g}{L}} \quad (26)$$

je vlastní úhlová rychlost kyvadla. Úhlová rychlost kmitajícího kyvadla ω_{K+} i ω_{K-} je tak dána nejen vlastní úhlovou rychlostí kyvadla, ale také úhlovou rychlostí Země Ω_{ZS} na zeměpisné šířce ϕ .

Zeměpisná šířka se dělí na severní a jižní, což je jiné označení pro kladnou (severní) a zápornou (jižní) zeměpisnou šířku. Pokud toto uplatníme na rovnice (23) a (24), zjistíme, že na severní polokouli bude platit $\omega_{K+} < \omega_K$ a $\omega_{K-} > \omega_K$, zatímco na jižní to vzhledem k zápornému ϕ bude přesně naopak.

Obdrželi jsme tedy vztahy pro výpočet úhlové rychlosti pohybu kyvadla po kružnici. Provedme superpozici pohybu ve směru a v protisměru hodinových ručiček. Rozdílné frekvence se vruší, a my tak získáme rovnici pro rovinný pohyb.

5 Trajektorie pohybu kyvadla jako lineárního harmonického oscilátoru

Předpokládejme stále, že se kyvadlo pohybuje jen v horizontální rovině. Pokud budeme o kyvadlu uvažovat jako o lineárním harmonickém oscilátoru, lze jeho kmitání popsat pohybovými rovnicemi

$$\ddot{x}_K - 2\Omega_{ZM}\dot{y}_K = -\omega_K^2 x_K \quad (27)$$

a

$$\ddot{y}_K + 2\Omega_{ZM}\dot{x}_K = -\omega_K^2 y_K, \quad (28)$$

kde x_K a y_K jsou prostorové souřadnice kyvadla. Výraz $\pm 2\Omega_{ZM}$ v rovnicích (27) a (28) vyjadřuje vliv zemské rotace na pohyb kyvadla. Zavedeme-li komplexní proměnnou $u_K = x_K + iy_K$ [3], můžeme rovnice (27) a (28) zapsat v jednotném tvaru:

$$\ddot{u}_K + 2i\Omega_{ZM}\dot{u}_K + \omega_K^2 u_K = 0. \quad (29)$$

Diferenciální rovnici (29) budeme řešit pomocí charakteristické rovnice. V takovém případě derivace n -tého stupně převádíme na mocniny n -tého stupně. V našem případě tak získáme kvadratickou rovnici

$$\lambda^2 + 2i\Omega_{ZM}\lambda + \omega_K^2 = 0. \quad (30)$$

Diskriminant D vychází

$$D = -4\Omega_{ZM}^2 - 4\omega_K^2 = -4(\Omega_{ZM}^2 + \omega_K^2). \quad (31)$$

Diskriminant je záporný, kořeny charakteristické rovnice (32) tak budou mít imaginární tvar

$$\lambda_1 = i\sqrt{\Omega_{ZM}^2 + \omega_K^2} - i\Omega_{ZM} = i\alpha_K, \quad (32)$$

$$\lambda_2 = -i\sqrt{\Omega_{ZM}^2 + \omega_K^2} - i\Omega_{ZM} = i\beta_K. \quad (33)$$

Řešením rovnice (29) je tedy

$$u = Ae^{i\alpha_K t} + Be^{-i\beta_K t}, \quad (34)$$

následným zderivováním podle času dostaneme vztah

$$\dot{u} = i\alpha A e^{i\alpha t} - i\beta B e^{-i\beta t}. \quad (35)$$

Abychom získali hodnoty koeficientů A a B , budeme uvažovat, že závaží v čase $t = 0$ s startuje z klidové pozice $(b,0)$, tj. $x_K = x_0 = b$ a $y_K = y_0 = 0$. Dosazením těchto hodnot do rovnic (34) a (35) se tyto rovnice zjednoduší do tvarů

$$b = A + B \quad (36)$$

a

$$\alpha A = \beta B, \quad (37)$$

z nichž vyjádříme koeficienty A a B :

$$A = \frac{b\beta}{\alpha + \beta}, \quad (38)$$

a

$$B = \frac{b\alpha}{\alpha + \beta}. \quad (39)$$

Dosazením vztahů (38) a (39) do rovnice (34) obdržíme

$$u = \frac{b}{\alpha + \beta}(\beta e^{i\alpha t} + \alpha e^{-i\beta t}) = x_K + iy_K. \quad (40)$$

Vztah (40) rozepíšeme na reálnou a imaginární část, čímž získáme pohybové rovnice kyvadla

$$x_K = \frac{b}{\alpha + \beta}(\beta \cos \alpha t + \alpha \cos \beta t), \quad (41)$$

$$y_K = \frac{b}{\alpha + \beta}(\beta \sin \alpha t - \alpha \sin \beta t). \quad (42)$$

Umocněním rovnic (41), (42) a jejich sečtením dostaneme

$$r^2 = x^2 + y^2 = \frac{b^2}{(\alpha + \beta)^2}(\alpha^2 + \beta^2 + 2\alpha\beta \cos(\alpha + \beta)t). \quad (43)$$

Pokud přejdeme do soustavy souřadnic, která se otáčí s rovinou kyvadla, získáme pro souřadnice x' a y' této soustavy vztahy

$$x' = x \cos \Omega t - y \sin \Omega t. \quad (44)$$

$$y' = x \sin \Omega t + y \cos \Omega t. \quad (45)$$

Dosazením rovnic (41) a (42) do vztahů (44) a (45) obdržíme

$$x' = \frac{b}{\alpha + \beta}(\beta \cos(\alpha + \Omega_{ZM})t + \alpha \cos(\beta - \Omega_{ZM})t), \quad (46)$$

$$y' = \frac{b}{\alpha + \beta}(\beta \sin(\alpha + \Omega_{ZM})t - \alpha \sin(\beta - \Omega_{ZM})t). \quad (47)$$

Vyjádřením α a β ze vztahů (32) a (33) lze rovnice (46) a (47) upravit do podoby

$$x' = b \cos \sqrt{(\omega_k^2 + \Omega_{ZM}^2)t}, \quad (48)$$

$$y' = b \frac{\beta - \alpha}{\beta + \alpha} \sin \sqrt{(\omega_k^2 + \Omega_{ZM}^2)t}. \quad (49)$$

Součet $\beta - \alpha$ a rozdíl $\beta + \alpha$ lze pomocí rovnic (32) a (33) vyjádřit jako $\beta - \alpha = 2\Omega_{ZM}$ a $\beta + \alpha = 2\sqrt{\omega_k^2 + \Omega_{ZM}^2}$. Pokud navíc vzorce (48) a (49) umocníme a sečteme, dostaneme rovnici elipsy:

$$\frac{x'^2}{b^2} + \frac{y'^2}{b^2} \frac{\omega_k^2 + \Omega_{ZM}^2}{\Omega_{ZM}^2} = 1. \quad (50)$$

Úhlová rychlost ω_k je konstantní a její velikost je zhruba o 10^4 větší, než je velikost Ω , která představuje komponentu úhlové rychlosti Země. V rovnici (50) tak v součtu $\omega_k^2 + \Omega_{ZM}^2$ lze složku Ω^2 zanedbat. Vztah se tedy zjednoduší na tvar

$$\frac{x'^2}{b^2} + \frac{y'^2}{b^2} \frac{\omega_k^2}{\Omega_{ZM}^2} = 1, \quad (51)$$

případně pro periodu rotace Země T_{ZM} a vlastní periodu kyvadla T_K získáme

$$\frac{x'^2}{b^2} + \frac{y'^2}{b^2} \frac{T_K^2}{T_{ZM}^2} = 1. \quad (52)$$

Rovnice (52) představuje **Chevillietův teorém** [3]. Trajektorií Foucaultova kyvadla je elipsa, jejíž velikosti hlavní i vedlejší osy jsou úměrné periodě otáčení Země a vlastní periodě kyvadla.

6 Charronův prstenec

Aby se zabránilo eliptickému pohybu kyvadla, uvádí se kyvadlo často do pohybu přepálením provázku, který kyvadlo drží v určité vychýlené pozici, z níž kyvadlo poté směřuje přímo do rovnovážné polohy. Při ručním rozhoupání totiž člověk jen stěží dosáhne rovinného kmitání kyvadla. Nicméně i po spuštění tlumeného kyvadla pomocí přepáleného provázku po čase

nastane chvíle, kdy kyvadlo přejde do eliptického pohybu.

Charronův prstenec slouží k odstranění elipsace. Jedná se o prstenec, který je upevněn v horizontální poloze a jehož středem prochází lanko ve chvíli, kdy se kyvadlo prochází rovnovážnou polohou. Lanko se při vychýlení opírá o prstenec, což způsobí zamezení tečného pohybu kyvadla. To tak postupně přechází z eliptického pohybu do pohybu rovinného.

7 Práce kyvadla k překonání odporové síly

Nebužené kyvadlo při svém kmitání ztrácí svou celkovou energii vlivem tření vzduchu. Odporová síla F_{odp} vzduchu, která působí na kmitající kyvadlo, lze vypočítat pomocí Newtonova zákona odporu, který je dán vztahem

$$F_{odp} = \frac{1}{2} \rho_{VZ} C_x S_{PK} v_K^2, \quad (53)$$

kde ρ_{VZ} je hustota vzduchu, C_x součinitel odporu, který zohledňuje tvar tělesa, v_K rychlost kyvadla a S_{PK} účinnou plochu kyvadla.

8 Relativní rychlost ztrát amplitudy a faktor kvality

Pokud kyvadlo kmitá tlumeně, jeho amplituda výchylky klesá s časem. Vztah pro časovou změnu amplitudy A_t je dán vztahem

$$A_t = A_K e^{\frac{-\gamma t}{2}}, \quad (54)$$

kde γ reprezentuje relativní rychlost ztrát amplitudy. Rovnici 54 podělíme amplitudou A_K , a dostaneme tak

$$\frac{A_t}{A_K} = e^{\frac{-\gamma t}{2}}. \quad (55)$$

Zlogaritmováním vztahu 54 získáme

$$\ln \frac{A_t}{A_K} = \frac{-\gamma t}{2}, \quad (56)$$

z čehož už snadno vyjádříme rovnici pro γ :

$$\gamma = -\frac{2 \ln \frac{A_t}{A_K}}{t}. \quad (57)$$

Ke zjištění relativní rychlosti ztrát amplitudy γ je tak třeba znát amplitudu výchylky A_K a okamžitou výchylku A_t .

Faktor kvality Q_K určuje, jak moc je kyvadlo tlumené. Je dán rovnicí

$$Q_K = \frac{\omega_K}{\gamma}. \quad (58)$$

9 Konstrukce a upevnění kyvadla

S plánem sestrojil Foucaultovo kyvadlo na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého se počítalo již od postavení této fakulty na tř. 17. listopadu. Kvůli tomu během výstavby budovy byla k nosníkům ve světlíku atria budovy přivařena oka, na kterých je kyvadlo zavěšeno. Rozmístění těchto ok však omezovalo možnosti, jakým způsobem šlo kyvadlo na ně upevnit (viz obrázek 1). Nosníky s oky navíc byly nainstalovány pod sklonem $16,8^\circ$ vzhledem k podlaze v přízemí a jednotlivých patrech. Kromě toho oka směřovala kolmo z nosníků, takže sama s podlahou v přízemí svírala úhel $16,8^\circ$.

Foucaultovo kyvadlo je umístěno v atriu fakulty, v prostoru mezi schody, jednotlivými poschodími a informačním kruhem v přízemí. V půdorysu toto ohraničení tvoří půlkruh. Ohraničení ovlivňuje maximální možný rozkmit Foucaultova kyvadla. Aby bylo možné pracovat s co největším možným rozkmitem, bylo nutné umístit rovnovážnou polohu Foucaultova kyvadla co nejbližší nad střed půlkruhu vytvořeného schodištěm a informačním kruhem.

Je-li Foucaultovu kyvadlu vykompenzována ztracená energie, jeho rovina kmitání se stáčí tak dlouho, až se opět vrátí do své původní pozice. Toto klade velký požadavek na symetričnost zavěšení kyvadla. Kyvadlo tedy nebylo možné upevnit pouhým zauzlováním lana do jednoho z ok. V takovém případě by totiž Foucaultovo kyvadlo nemělo stejnou periodu pro všechny směry roviny kmitání. Zauzlování lana do oka by totiž způsobilo, že



Obrázek 1: Oka ve světlíku.

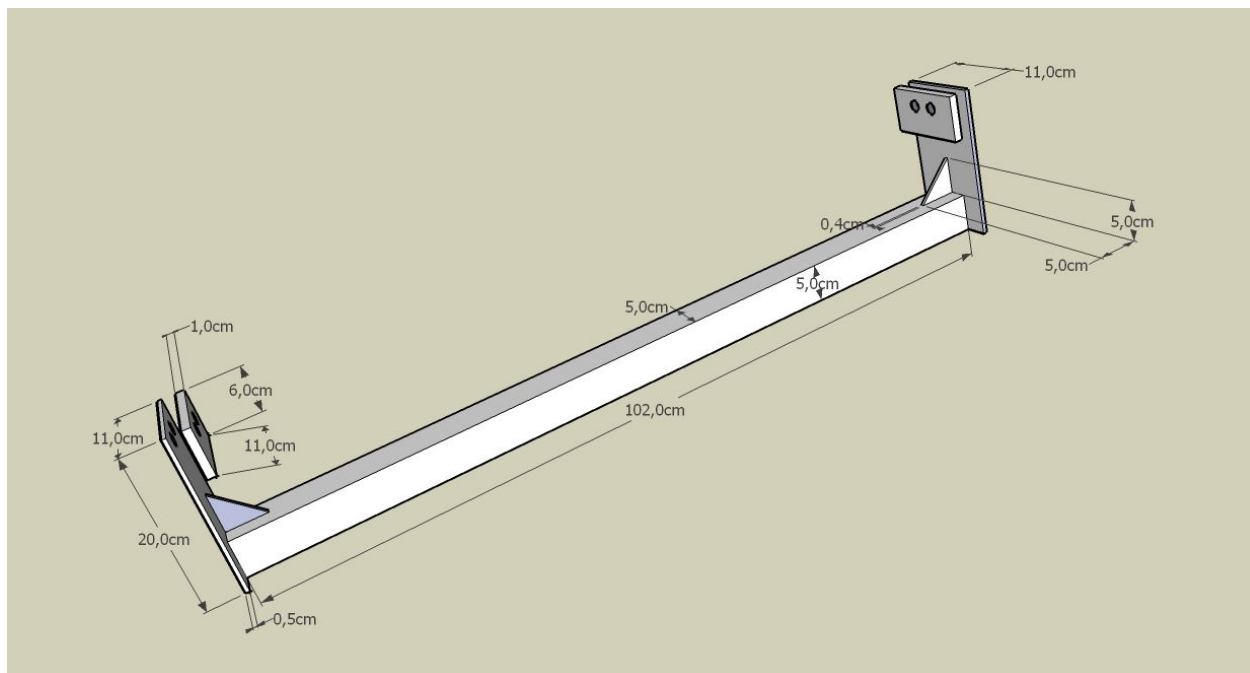
v jednom směru by se Foucaultovo kyvadlo kývalo s jinou délkou lana než v jiném.

Pro zajištění symetrie byl zkonstruován závěsný mechanismus (dále jen závěs), který byl vyroben pro uchycení na dvou okách a bylo nutné ho sestavit tak, aby pomocí něj bylo možné vykompenzovat sklon nosníků ve světlíku vůči podlaze v přízemí. Lano Foucaultova kyvadla by pak v rovnovážné poloze směřovalo kolmo na podlahu v přízemí fakulty. Nákres závěsu je na obrázku 2.

Závěs byl podle autorova návrhu vyroben u frýdeckomístecké firmy Technosvar a.s. Hlavní část závěsu tvoří jekl o délce 1 025 mm. Tato délka odpovídá vzdálenosti mezi dvěma nejbližšími oky na stejném nosníku. Tento rozsah je pro všechna oka na všech nosnících stejný. Vzdálenost mezi oky byla několikrát proměřena na místě, a to horolezcem Markem Šafaříkem. K jeklu jsou přivařeny boční ocelové desky o rozměrech 200x110x10 mm. Kvůli větší stabilitě závěsu jsou mezi jekl a boční desky přivařena žebra, které mají zabránit prohýbání bočních desek.

Celý závěs visí na čtyřech šroubech M6x20, po dvou na každém oku. Šrouby jsou k okám a bočním deskám připevněny pomocí menších ocelových destiček o rozměrech 60x110x10 mm. Pro výrobu závěsu byla použita ocel materiálu tř. 11 v komaxitovém nátěru. Jedná se o povrchovou úpravu, kdy je práškový plast elektrostaticky nanášen na kovový povrch.

Za pomoci horolezce Marka Šafaříka jsme zjistili, mezi která dvě oka by se závěs měl nejlépe umístit. Hlavním požadavkem bylo, aby kyvadlo kmitalo s co největším možným rozkmitem, tudíž aby se rovnovážná poloha kyvadla nacházela nad středem půlkruhu



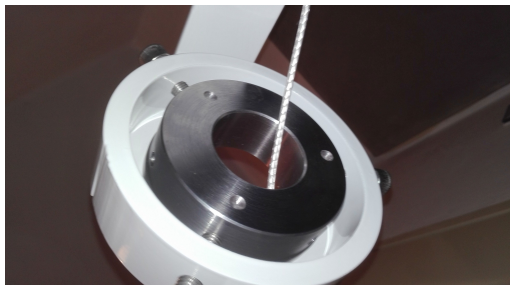
Obrázek 2: Nákres závěsu.

tvoreného schody a informačním kruhem. Aby tohoto bylo možné dosáhnout, s pomocí lan jsme si museli zobrazit některá vytipovaná oka ze světlíku na podlaze v přízemí. Lano jsme zauzlovali do jednoho z ok, a poté jsme ho spustili až k podlaze v přízemí. Na nezaúzlovaném konci jsme připevnili klíče, které tak reprezentovaly závaží kyvadla. Tento experiment jsme provedli pro čtyři různá oka. Jednalo se o 2. a 3. okno na 3. nosníku od děkanátu a o 2. a 3. okno na 4. nosníku od děkanátu (pořadí ok bylo nastaveno vzhledem k olomouckému hlavnímu vlakovému nádraží). Experiment s lanem byl později upřesněn pomocí laserového dálkoměru zapůjčeného od RNDr Vladimíra Chlupa. Z dostupných měření bylo vybráno umístění závěsu na 2. a 3. okno 3. nosníku od děkanátu.

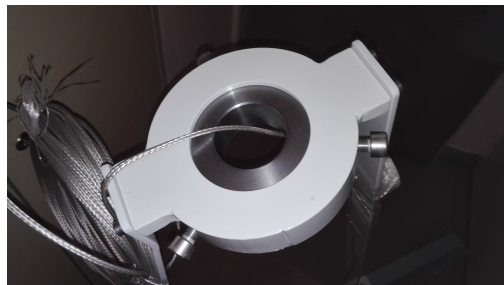
10 Výroba a sestavení Charronova prstence

Součástí závěsu je Charronův prstenec, který je zachycen na obrázku 3, kde je uložen v zařízení pro jeho uchycení. Obrázek 4 ukazuje pohled zespodu. Prstenec zhotovila dle autorova návrhu firma Technosvar a.s., finální povrchovou úpravu provedl pan Jaroslav Chmel z firmy Zámečnictví Chmel. Vnitřní horní část Charronova prstence byla vyrobena pod vnitřním úhlem 89,5 stupňů; vnitřní dolní část má úhel 91,5 stupňů. Obě části pokračují pod svými úhly až do poloviny výšky prstence, kde byl prstenec odborně povrchově zpracován, aby se obě části nejen propojily, ale aby také vytvořily hladký povrch, po kterém se lano při svých kmitech opírá. Výška prstence je 30 mm. Kromě toho bylo nutné zabrousit do hladka i hrany horní a dolní části. Díky tomu se výrazně omezila hrozba rychlého

opotřebování lana právě v místě prstence.

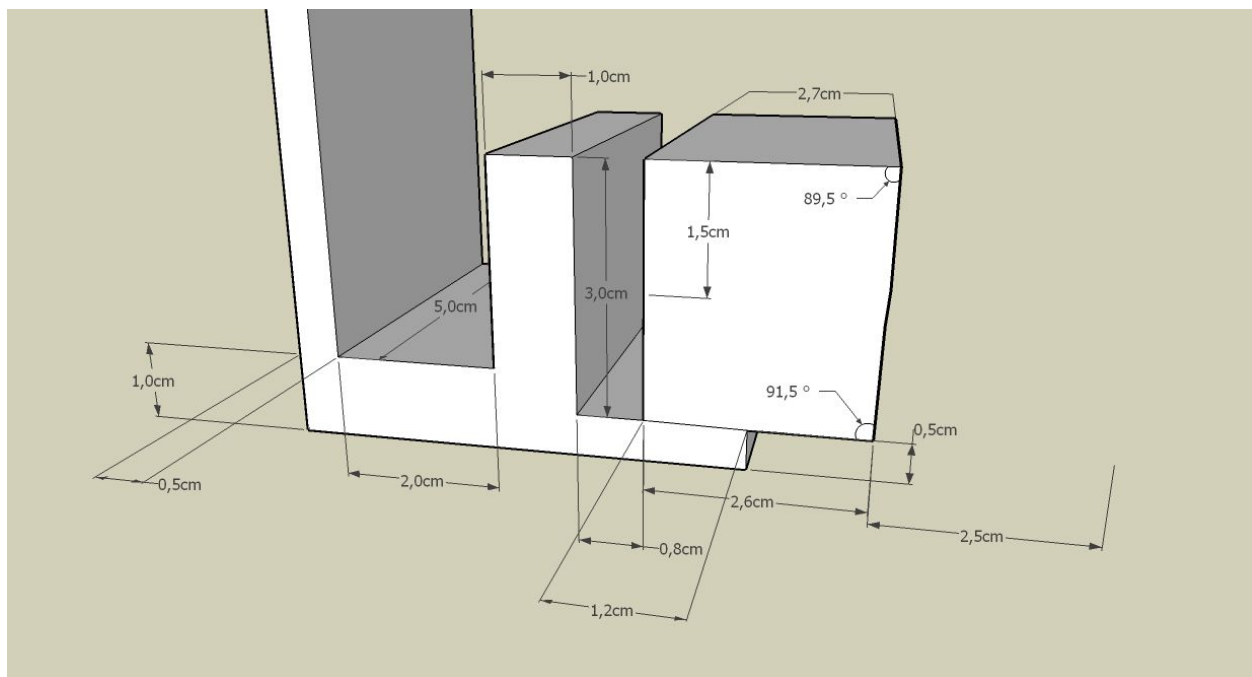


Obrázek 3: Charronův prsteneček umístěný v zařízení pro jeho uchycení.



Obrázek 4: Pohled na Charronův prsteneček umístěný v zařízení pro jeho uchycení z jiné strany.

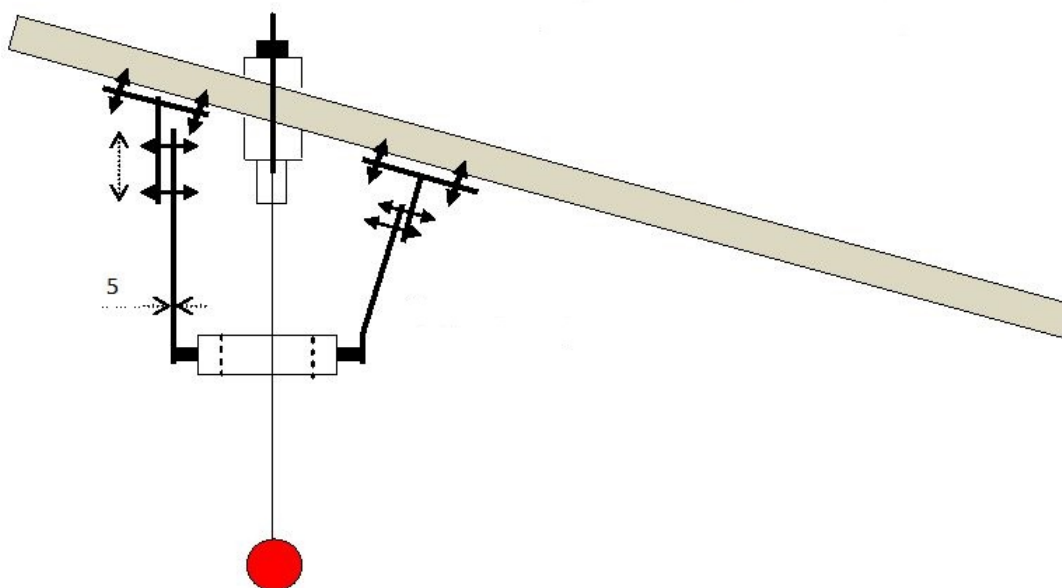
Vnější poloměr Charronova prstence je 51 mm. Vnitřní poloměr se odvíjí od úhlů vnitřních částí prstence. Horní vnitřní část je skloněna pod menším úhlem než dolní vnitřní část. Z toho vyplývá, že vnitřní poloměr horní části bude menší než poloměr dolní části. V tomto případě je vnitřní poloměr horní části 24 mm, dolní části 25 mm. Z profilu je Charronův prsteneček možné vidět na obr. 5, kde je uložen v zařízení pro jeho upevnění.



Obrázek 5: Charronův prsteneček v 3D profilu uložený v zařízení pro jeho upevnění.

Díky tomuto zařízení je Charronův prsteneček upevněn ve vzdálenosti 1 000 mm od uchycení lana. Nákres zařízení, vytvořený panem Chmelem, v jehož zámečnictví bylo zařízení

vyrobeno, je možné vidět na obr. 6. Základem zařízení je kruhový podstavec, v němž je Charronův prstenec pomocí šroubů upevněn. Tento podstavec má vnější poloměr 69 mm, vnitřní poloměr 59 mm. Jeho tloušťka je tedy 10 mm. K tomuto podstavci jsou přivařeny dvě železné destičky o rozměru 20x50x10 mm, které slouží jako propojovací článek s dalšími částmi zařízení k uchycení Charronova prstence.



Obrázek 6: Závěs se zařízením, díky kterému je Charronův prstenec upevněn v určité pozici.

Boční ocelové desky o velikosti 50x5 mm drží kruhový podstavec pro Charronův prstenec. K podstavci je každá z těchto desek připevněna pomocí železné destičky se dvěma šrouby M6. Z druhé strany je boční deska připevněna dvěma šrouby M6 k systému dvou destiček. Zatímco jedna z destiček slouží ke spojení s boční deskou, druhá je přišroubována k závěsu kyvadla.

V systému destiček není vyvrtána klasická díra pro šroub, ale je v ní vyvrtána větší plocha oválovitého tvaru. Díky tomu je možné šroub umístit do více pozic podél této oválovité plochy, a upravovat tak náklon kruhového podstavce. Tím se nastaví jeho pozice v horizontální rovině.

Kromě toho boční desky nejsou k závěsu připevněny pod stejným úhlem. Zatímco jedna směřuje kolmo k zemi, a svírá tak se závěsem úhel $16,8^\circ$, druhá je napojena kolmo k závěsu a až těsně před spojením s kruhovým podstavcem se láme kolmo k zemi. Díky tomuto typu spojení má celá konstrukce větší stabilitu, než kdyby obě boční desky byly připevněny k závěsu pod úhlem $16,8^\circ$.

Pro vycentrování Charronova prstence byly do kruhového podstavce vyvrtány tři díry, každá po 120 stupních. Do těch jsou umístěny šrouby M8, pomocí kterých je možné posouvat Charronovým prstencem po kruhové podložce v horizontální rovině a zároveň ho v ní upevnit. K vycentrování jsme použili nástroj na obrázku 7. Jedná se o plastovou formu, do níž bylo zasazeno lano. Pokud tato forma i s lanem zapadla přesně do Charronova prstence, byl tento prstenec vycentrován. V opačném případě bylo nutné šrouby posouvat prstencem a usadit ho do správné pozice. Po autorových instrukcích provedl centrování prstence odborník na výškové práce.



Obrázek 7: Plastová objímka lana, která slouží k vycentrování Charronova prstence.

11 Lano, koncovka a závaží kyvadla

Lano pro kyvadlo mělo být původně ocelové. Z bezpečnostních důvodů, neboť ocelové kyvadlo by mohlo fungovat jako hromosvod, a při bouřce by tak mohlo přivést blesk až k závaží, bylo nakonec vybráno lano nevodivé. Jedná se lano Dyneema D-F1 s průměrem $d_L = 3$ mm od firmy Lanex a.s. Materiálem je 100% DYNEEMA® SK 78 (technicky vyspělé vlákno), výrobcem uváděná pevnost lana je 700 kg. Jak uvádí prodejce, jedná se o lano s minimální průtažností. Povrch lana je opatřen speciální ochrannou vrstvou, která dává velkou oděruvzdornost a stálost i při vystavení UV záření. Používá se třeba pro uchycení výtahů, ale také pro jachting.

K zjištění potřebné délky lana se využil laserový dálkoměr zapůjčený od RNDr. Vladimíra Chlupa. Pomocí něj se změřila vzdálenost od podlahy ke středu mezi vybranými

oky, na kterých měl být závěs umístěn. Naměřená vzdálenost byla $L_{VS} = 25,91$ m. Na základě této hodnoty bylo pořízeno lano o délce 27 m, jehož délka byla posléze upravena na požadovanou vzdálenost.

Lano je k závěsu i k závaží uchyceno přes samosvorné koncovky. Ty byly dodány firmou Carl Stahl & spol, s.r.o. Samosvorné koncovky se skládají ze dvou částí, které se do sebe zašroubují. Skrze menší část se protáhne lano. To se v této části poté uchytí pomocí dvou klínek, které jsou součástí koncovky. Větší část koncovky obsahuje závit M6 s hloubkou 18 mm, do něhož je na šroubována závitová tyč. Přes tuto tyč jsou koncovky upevněny v závěsu a v závaží.

Obě samosvorné koncovky mají shodné parametry. Kromě závitu M6 u větší části je jejich celková délka 55 mm a průměr 13 mm. Před instalací kyvadla se ale koncovky lišily ve velikosti klínek. Při objednání samosvorných koncovek ještě nebyl definitivně rozhodnutý průměr kyvadla, proto se zajistila koncovka pro průměr lana 3 mm i 4 mm. Parametry měly shodné, avšak při použití lana s průměrem 3 mm pro koncovku na lano s průměrem 4 mm lano prokluzovalo a vypadávalo z koncovky. Řešením bylo vyrobení dalších klínek tak, aby lano s průměrem 3 mm v koncovce pro lano s průměrem 4 mm udrželo. Koncovka s těmito klínky je propojena se závažím.

Závaží kyvadla tvoří železná koule o hmotnosti $m_K = 37$ kg . Tomu při hustotě železa $\rho_I = 7\,870$ kg/m³ a vzorci pro hmotnost železné koule

$$m_K = V\rho_I = \frac{4}{3}\rho_I\pi r^3 \quad (59)$$

odpovídá průměr koule $d_K = 207,85$ mm. Koule byla zhotovena firmou Technosvar a.s. Do koule jsou vyvrtány proti sobě dva závity. První závit M20 s hloubkou 50 mm byl vyvrtán kvůli uchycení koule k lanu přes samosvornou koncovku. I tento závit byl vyvrtán u firmy Technosvar. Druhý závit byl vyroben pro uchycení magnetu, jenž slouží ke zvýšení magnetického pole a propojení koule s cívkou. O vyvrtání závitu, vytvoření plastového šroubu pro tento závit a přivaření koncovky ke šroubu pro závit M20 zhotovil pan Jaroslav Chmel z firmy Zámečnictví Chmel.

11.1 Výpočet práce kyvadla k překonání odporové síly

Rovnici 53 využijeme pro výpočet práce, kterou nebuzené kyvadlo při svém pohybu musí vykonat k překonání odporové síly vzduchu za $\frac{T_K}{2}$. Seznam veličin potřebných k výpočtu jsou uvedeny v tabulce 1. Uvažujeme amplitudu kyvadla $A_K = 0,65$ m, poloměr kyvadla je $R_k = 0,104$ m. Kyvadlo kmitá s periodou $T_K = 10,2$ s. Dále je potřeba znát hustotu vzduchu ρ_{VZ} a součinitel odporu C_x pro kouli. Účinný průřez S_{PK} se vypočítá ze vztahu

$$S_{PK} = \pi R_K^2. \quad (60)$$

Rychlost kyvadla v_k je dána vzorcem

$$v_K = \omega_K A_K \cos \omega t, \quad (61)$$

kde $\omega_K = \frac{2\pi}{T_K}$.

Veličiny	Hodnota
A_K	0,65 m
R_K	0,104 m
ρ_{VZ}	1,29 kg m^{-3}
C_x	0,5
S_{PK}	0,03 m^{-3}
T_K	10,2 s
ω_K	0,62 s^{-1}
L_{VS}	25,91 m
d_L	0,003 m

Tabulka 1: Seznam veličin potřebných k výpočtu práce kyvadla, kterou je nutné vynaložit k překonání odporu vzduchu.

Obecný výpočet práce vykonané silou na určité dráze je dán integrálem

$$W = \int_0^s F ds. \quad (62)$$

V našem případě dosadíme do vztahu 62 odporovou sílu F_{odp} vyjádřenou rovnicí 53 a za dráhu výchylku kyvadla A , a získáme tak

$$W = \int_0^{A_K} \frac{1}{2} \rho_{VZ} C_x S_{PK} v_K^2 dA. \quad (63)$$

Snažíme se zjistit velikost práce, kterou vykoná kyvadlo při překonávání odporu vzduchu za určitý čas. Integrál ve vztahu 62 je třeba upravit tak, aby integrační proměnnou nebyla výchylka kyvadla, ale čas. Ještě předtím je však nutné rozdělit výslednou práci na dva integrály. Na závaží kyvadla totiž bude působit jiná odporová síla, než jaká bude působit na lano. Proto práce vykonaná lanem k překonání této odporové síly bude jiná, než jakou práci vykoná závaží.

11.1.1 Výpočet práce závaží

Pro výpočet práce závaží i lana využijeme vztahu 63. V případě závaží nahradíme diferenciál výchylky kyvadla dA rovnicí pro okamžitou výchylku, která je dána

$$A = A_K \cos \omega_K t. \quad (64)$$

Ze vztahu 64 se derivací A podle t zjistí diferenciál výchylky kyvadla

$$dA = \omega A_K \sin \omega_K t dt. \quad (65)$$

Horní a dolní mez integrálu s diferenciálem času se upraví dosazením horní a dolní meze za A do rovnice 64. Po úpravě a výpočtu se získá nová horní mez $\frac{T_K}{4}$ a nová dolní mez 0. Pokud si navíc uvědomíme, že v_K je definována 61, můžeme psát

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \int_0^{\frac{T_K}{4}} \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^3 A_K^3 \cos^3(\omega_K t) dt. \quad (66)$$

Integrujeme podle času, takže všechny veličiny, které nejsou závislé na čase můžeme brát jako konstanty a umístíme je před integrál. Dostaneme

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^3 A_K^3 \int_0^{\frac{T_K}{4}} \cos^3(\omega_K t) dt. \quad (67)$$

K vypočítání integrálu z rovnice 67 využijeme goniometrického vztahu

$$1 = \cos^2(\omega_K t) + \sin^2(\omega_K t). \quad (68)$$

Úpravou vztahu 67 tak dostaneme

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^3 A_K^3 \int_0^{\frac{T_K}{4}} (1 - \sin^2(\omega_K t)) \cos(\omega_K t) dt. \quad (69)$$

Substitucí $\sin(\omega_K t) = b$, nahrazením diferenciálu $\omega_K \cos(\omega_K t) dt = db$, což je po úpravě $\cos(\omega_K t) dt = \frac{db}{\omega_K}$, a upravení mezí (horní b , dolní 0) získáme

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^2 A_K^3 \int_0^1 (1 - b^2) db. \quad (70)$$

Integrál v rovnici 70 si můžeme rozložit na rozdíl dvou integrálů. Po integraci je vztah pro práci koule

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^2 A_K^3 \left[b - \frac{b^3}{3} \right]_0^1. \quad (71)$$

Vrácením $\sin(\omega_K t)$ za b se upraví i horní a dolní mez, takže vztah pro práci koule nabude tvaru

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^2 A_K^3 \left[\sin(\omega_K t) - \frac{\sin(\omega_K t)^3}{3} \right]_0^{\frac{T_K}{4}}. \quad (72)$$

Dosazením mezí do proměnných dostaneme

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{2} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^2 A_K^3 \left[1 - \frac{1}{3} - 0 + 0 \right], \quad (73)$$

po spočtení závorky a úpravě získáme výsledný vztah

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{3} \rho_{vz} C_x S_{PK} \omega_K^2 A_K^3, \quad (74)$$

Dosazením veličin z tabulky 1 vychází

$$W_{Koule} \frac{T_K}{4} = 6,81 \cdot 10^{-4} J = 0,68 \text{ mJ}. \quad (75)$$

Vztah 75 vyjadřuje práci, kterou musí závaží vykonat k překonání odporu vzduchu za čtvrtinu periody. Celková práce závaží za polovinu periody bude dvojnásobkem výsledku rovnice 75, tj.

$$W_{Koule} \frac{T_K}{2} = 13,62 \cdot 10^{-4} J = 1,36 \text{ mJ}. \quad (76)$$

11.1.2 Výpočet práce lana

K výpočtu práce lana je zapotřebí více než jednoho integrálu. Každá infinitezimální část lana dl má totiž jinou amplitudu výchylky, proto je nutné integrovat nejen přes amplitudu výchylky, ale také přes délku lana l . Kromě toho účinnou plochu S_{PK} v tomto případě reprezentuje šířka lana d_L . Rovnice práce lana tak bude tvaru

$$W_{Lano} \frac{T_K}{4} = \int_0^{\frac{A_K}{4}} \int_0^{L_{VS}} \frac{1}{2} \rho_{VZ} C_x v_K^2 d_L dl dA. \quad (77)$$

Jak je z rovnice 77 patrné (vzhledem k horní mezi druhého integrálu), pro výpočet byla celková délka lana nahrazena vzdáleností L_{VS} mezi podlahou v přízemí a světlíkem. Po spočtení integrálů podobně jako při počítání práce závaží nakonec získáme vztah

$$W_{Lano} \frac{T_K}{4} = \frac{1}{12} \rho_{VZ} C_x \omega_K^2 d_L A_K^3. \quad (78)$$

Ze vztahu 67 již dopočítáme velikost práce $W_{Lano} \frac{T_K}{4}$, kterou musí lano vykonat k překonání odporové síly vzduchu za $\frac{T_K}{4}$

$$W_{Lano} \frac{T_K}{4} = 4,34 \cdot 10^{-4} J = 0,43 \text{ mJ}. \quad (79)$$

Za polovinu periody musí lano vykonat dvojnásobnou práci, tj.

$$W_{Lano} \frac{T_K}{2} = 0,86 \text{ mJ}. \quad (80)$$

Sečtením výsledků z rovnic 76 a 80 dostaneme práci

$$\frac{W_{T_K}}{2} = 1,36 + 0,86 = 2,18 \text{ mJ}, \quad (81)$$

což je práce, kterou kyvadlo musí vykonat, aby překonalo odpor vzduchu za $\frac{T_K}{2}$.

12 Zavěšování kyvadla

Zavěšování kyvadla proběhlo 4. června 2016. O zavěšení se postarali odborníci na výškové práce (dále jen odborníci) z firmy Výškové práce Olomouc. Jako nejvhodnější místo pro přístup k okům, na kterých je kyvadlo zavěšeno, bylo vybráno okno ve světlíku nacházející se těsně pod koncem 1. nosníku od děkanátu. Ve světlíku jsou sice k dispozici i dveře, ty ale odborníci nemohli použít pro uchycení na nosníky, neboť nosníky se nachází příliš vysoko nad dveřmi. Pro odborníky by tak bylo nemožné upevnit skobu v oku na nosníku. Dveře však byly využívány pro předávání nástrojů a vybavení odborníkům, kteří již byli zavěšeni na okách.



Obrázek 8: Zavěšování závěsu se zařízením pro uchycení Charronova prstence.

Před zavěšováním se celý závěs sestavil, aby odborníci při své práci už jen přišroubovali závěs k okům a upevnili Charronův prstenec do správné polohy. Správné nastavení Charronova prstence specialisté postupně kontrolovali vodováhou, dokud Charronův prstenec ne-

byl umístěn do ideální pozice. Fotografie ze zavěšování je na obrázku 8 (strana 25).

12.1 Výpočet relativní rychlosti ztrát amplitudy a faktoru kvality

Provedli jsme měření amplitudy výchylky A_K při tlumeném kmitání, abychom zjistili velikost relativní rychlosti ztrát γ a faktoru kvality Q_K . Naměřené hodnoty jsou uvedeny v tabulkách 2a a 2b.

Tabulka 2: Změřené hodnoty amplitudy výchylky A_K v průběhu času.

(a) 1. měření		(b) 2. měření	
$t[\text{min}]$	$A_K[\text{mm}]$	$t[\text{min}]$	$A_K[\text{mm}]$
0	800	0	800
10	705	10	715
20	580	20	635
30	520	30	535
40	440	40	480
50	395	50	385
60	360	60	355

Tabulka 3: Změřené hodnoty amplitudy výchylky A_K v průběhu času.

(a) 3. měření		(b) 4. měření	
$t[\text{min}]$	$A_K[\text{mm}]$	$t[\text{min}]$	$A_K[\text{mm}]$
0	750	0	750
5	700	5	705
10	660	10	665
15	615	15	630
20	585	20	595
25	550	25	550
30	525	30	525
35	490	35	500
40	470	40	470
45	440	45	445
50	415	50	425
55	395	55	410
60	385	60	395

Z údajů uvedených v tabulkách 2a a 2b je patrné, že amplituda výchylky kyvadla za jednu hodinu klesla z maximální hodnoty amplitudy na polovinu. Naměřené hodnoty jsme dále zpracovali pomocí vzorců 57 a 58, díky čemuž jsme dopočítali velikosti γ a Q_K . Pro správně měření jsme si převedli dobu měření z minut na sekundy (1 min = 60 s). Úhlová rychlost kyvadla je $\omega_K = 0,62 \text{ s}^{-1}$. Vypočítané hodnoty jsou zapsány v tabulkách 3a a 3b.

Tabulka 4: Změřené hodnoty relativní rychlosti ztrát γ a faktoru kvality Q_K .

(a) 1. měření			(b) 2. měření		
$t[\text{min}]$	$\gamma[\text{s}^{-1}]$	$Q_K[-]$	$t[\text{min}]$	$\gamma[\text{s}^{-1}]$	$Q_K[-]$
0	-	-	0	-	-
10	0,000421	1471,37	10	0,000374	1655,85
20	0,000536	1156,78	20	0,000385	1610,48
30	0,000479	1295,31	30	0,000447	1386,87
40	0,000498	1244,49	40	0,000426	1456,47
50	0,000470	1317,79	50	0,000488	1271,59
60	0,000444	1397,61	60	0,000451	1373,55

Tabulka 5: Změřené hodnoty relativní rychlosti ztrát γ a faktoru kvality Q_K .

(a) 3. měření			(b) 4. měření		
$t[\text{min}]$	$\gamma[\text{s}^{-1}]$	$Q_K[-]$	$t[\text{min}]$	$\gamma[\text{s}^{-1}]$	$Q_K[-]$
0	-	-	0	-	-
5	0,000460	1347,97	5	0,000413	1503,02
10	0,000426	1455,02	10	0,000401	1546,31
15	0,000441	1405,89	15	0,000387	1600,20
20	0,000414	1497,21	20	0,000386	1606,83
25	0,000414	1499,25	25	0,000414	1499,25
30	0,000405	1564,45	30	0,000396	1564,45
35	0,000386	1529,36	35	0,000386	1605,56
40	0,000389	1591,99	40	0,000389	1591,99
45	0,000395	1569,48	45	0,000387	1603,45
50	0,000395	1571,49	50	0,000379	1637,37
55	0,000389	1595,48	55	0,000401	1546,31
60	0,000370	1673,94	60	0,000366	1693,94

Z tabulek 3a a 3b lze vyčíst, že velikost rozsahu, v němž faktor kvality Q_K nabývá svých hodnot, je cca 385, resp. 315 (měření probíhala v těsné návaznosti za sebou, v rádech několika minut). Oproti tomu z jemnějšího měření v jiném dni jsme vypočítali hodnoty faktorů kvality Q_K , které jsou zapsány v tabulce 5b. Velikost rozmezí těchto hodnot je

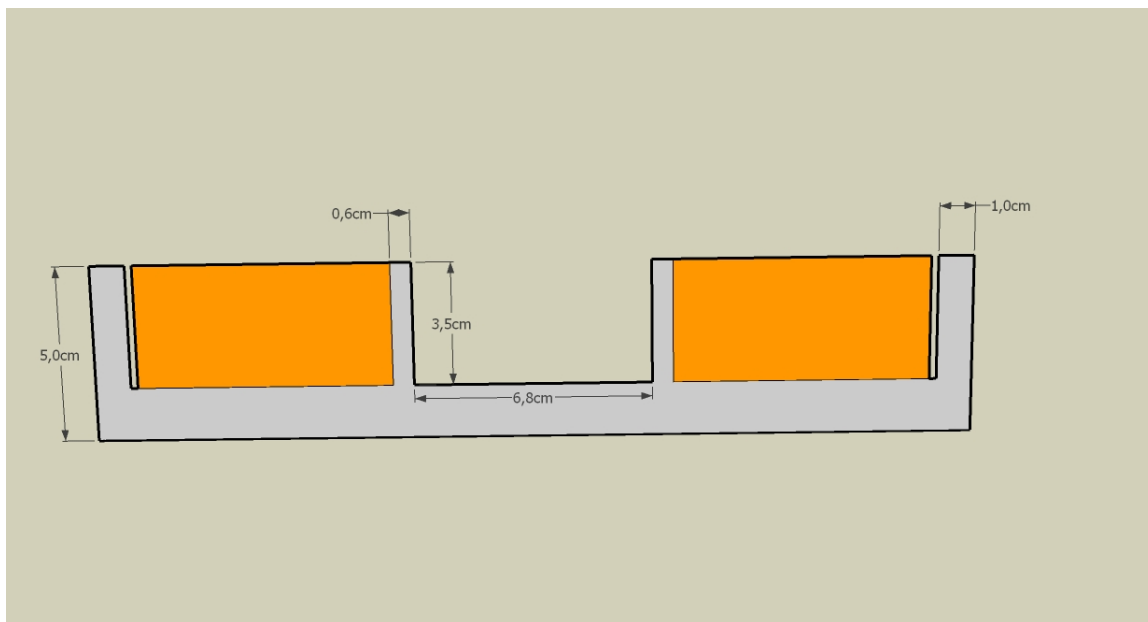
cca 200. V dalším dni, z něhož jsou výsledky uvedeny v tabulce 5a, jsme získali hodnoty faktoru kvality, které s postupem času rostly. Z dostupných údajů vyplývá, že faktor kvality kyvadla ani jednou nepřesáhl hodnotu 1800.

13 Cívka a magnet

Aby kyvadlo mohlo kmitat permanentně, tj. aby mu byly kompenzovány ztráty energie vzniklé odporem vzduchu, musí se mu dodávat ztracená energie vnějším zdrojem. Takovým zdrojem energie je cívka.

Cívka je elektrotechnická součástka, která slouží jako elektromagnet. Pokud cívkou prochází stejnosměrný elektrický proud, cívka vytváří stále magnetické pole. Velikost magnetického pole, konkrétně magnetického indukčního toku, závisí na velikosti proudu a indukčnosti cívky. Pro zvětšení velikosti magnetického pole se využívá jádro z feromagnetické látky, nejčastěji z magneticky měkké oceli nebo magneticky měkkého železa, která/é se vloží do cívky.

O zhotovení cívky dle autorova návrhu se postarala firma P&V Elektronik spol. s r.o. Nákres cívky z profilu je na obrázku 9. Cívka je namotána z měděného vodiče o průměru 1 mm, celkem má 1 700 závitů. Vodič je na obrázku 9 znázorněn oranžovou barvou. Výška cívky je 35 mm.



Obrázek 9: Nákres cívky s rozměry z profilu. Oranžová část znázorňuje vodič, šedá kostru cívky.

Cívka je uložena do kostry vyrobené z magneticky měkkého železa (na obr. 9 znázorněn šedou barvou). Tato kostra plní funkci jádra, kromě toho zajišťuje cívce bezpečí proti mechanickému poškození. Vnitřní poloměr kostry je 34 mm, výška kostry 50 mm. Celá kostra je pozinkovaná, čímž je chráněna proti korozi.

Na cívce s kostrou bylo provedeno měření, kdy se pomocí magnetometru měřilo magnetické pole, které cívka vytváří při připojení na zdroj napětí. Cívka má odpor 15Ω a bylo na ní naměřeno napětí 3,15 V. Cívkou tak protékal proud 0,21 A. Výsledky měření jsou v tabulkách 6a a 6b.

Tabulka 6: Naměřené hodnoty složek vektoru magnetické indukce v závislosti na vertikální vzdálenosti d od horního okraje cívky. Vertikální složka magnetické indukce je označena B_{VC} , horizontální B_{HC} .

(a) Vzdálenost od středu cívky $r = 34 \text{ mm}$.

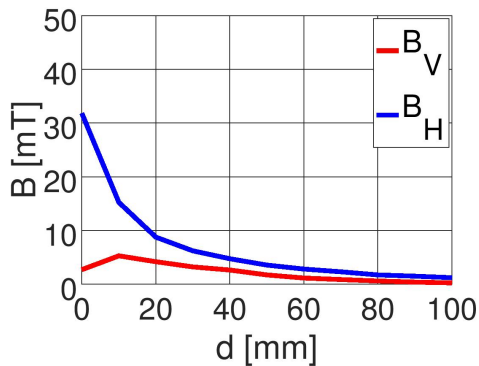
Datum: 26. 9. 2016		
$d[\text{mm}]$	$B_{VC}[\text{mT}]$	$B_{HC}[\text{mT}]$
0	2,71	31,80
10	5,28	15,23
20	4,19	8,76
30	3,22	6,21
40	2,64	4,74
50	1,73	3,56
60	1,15	2,82
70	0,87	2,31
80	0,60	1,73
90	0,39	1,50
100	0,25	1,21

(b) Vzdálenost od středu cívky $r = 40 \text{ mm}$.

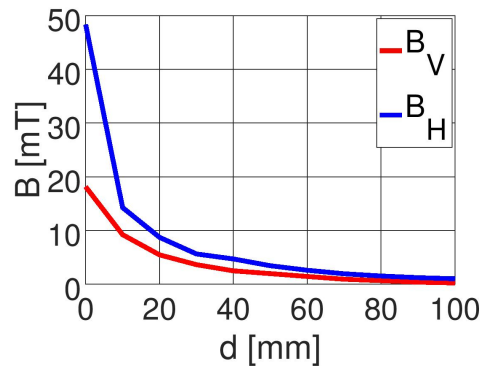
Datum: 26. 9. 2016		
$d[\text{mm}]$	$B_{VC}[\text{mT}]$	$B_{HC}[\text{mT}]$
0	18,13	48,30
10	9,22	14,26
20	5,46	8,72
30	3,64	5,63
40	2,49	4,70
50	1,97	3,44
60	1,44	2,60
70	0,93	1,94
80	0,66	1,53
90	0,38	1,22
100	0,24	1,02

Na základě naměřených hodnot z tabulek 6a a 6b jsou vykresleny grafy na obrázcích 10 a 11. Z grafů je patrné, že s rostoucí vzdáleností od cívky s kostrou klesá velikost složek magnetické indukce B_{VC} a B_{HC} .

Z důvodu naměření nízkých hodnot složek magnetické indukce se pořídil magnet, s jehož pomocí by bylo možné zvýšit hodnotu magnetického pole. Do koule naproti šroubu, k němuž je připevněno lano, se navrtal další otvor, do kterého se umístil plastový šroub. Na tento šroub byl připevněn magnet o průměru 15 mm a výšce 3 mm. Magnet na svém povrchu ve středu vytváří magnetické pole, jehož vertikální složka má velikost $B_{VM} = 285,0 \text{ mT}$ a horizontální velikost $B_{HM} = 5,9 \text{ mT}$. Ve vertikální vzdálenosti 6 mm od středu magnetu je $B_{VM} = 126,0 \text{ mT}$.



Obrázek 10: Charronův prstěnek umístěný v zařízení pro jeho uchycení.



Obrázek 11: Pohled na Charronův prstěnek umístěný v zařízení pro jeho uchycení z jiné strany.

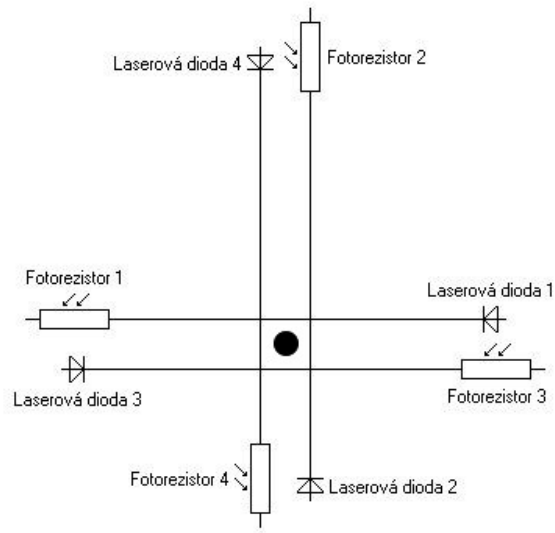
14 Laserové závory

Aby bylo možné cívku využít k pohánění kyvadla, je nutné část obvodu s ní spínat pouze po určité době. Pokud by totiž byl do cívky veden proud po celou periodu kyvadla, a magnetické pole vytvořené cívkou by tak působilo permanentně, cívka by v jednu chvíli kyvadlo poháněla, v jinou by ho zase zpomalovala. Byl tedy sepsán zdrojový kód (dále označovaný jako program), který zajišťuje správné spínání části obvodu s cívkou. Funkčnost tohoto programu je rozebrána v následující kapitole.

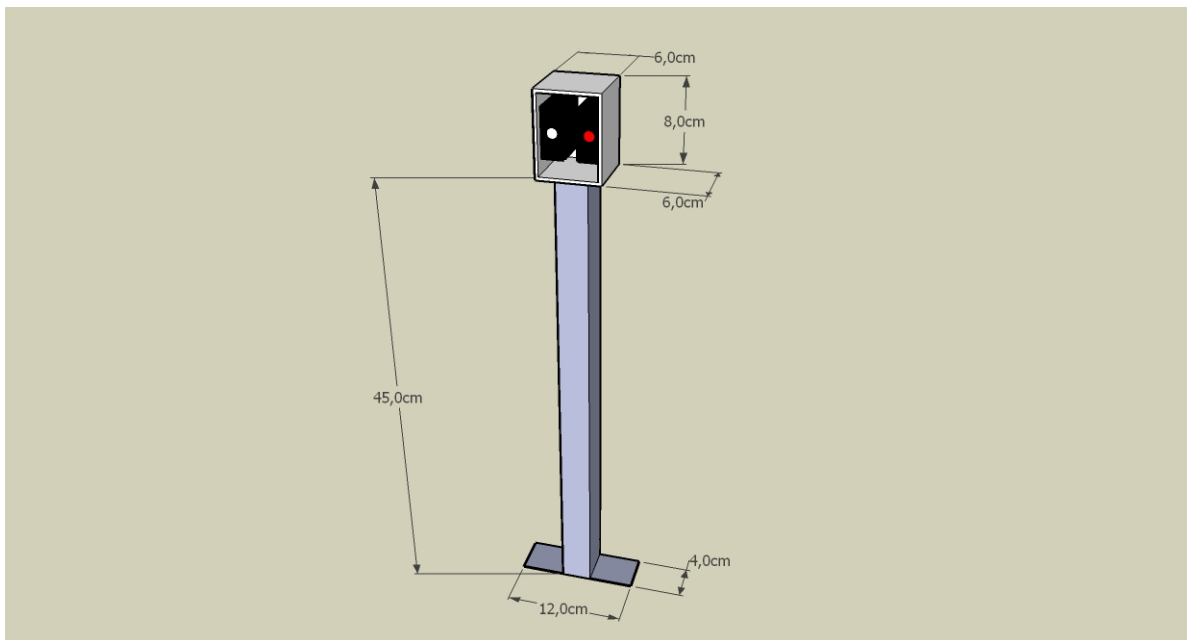
Pro správné fungování programu je nutné, aby byl zaznamenán každý průchod kyvadla rovnovážnou polohou. K tomu byl sestrojen detekční systém tvořený čtyřmi světelnými závory. Každá závor je tvořena laserovou diodou a fotorezistorem. Laserové diody byly použity z Laserových závor pro vnitřní provedení od firmy Flajzar, s.r.o. (viz. příloha). Nákres rozmístění závor je na obrázku 12.

Z něho je patrné, že závory jsou rozmístěny kolem rovnovážné polohy kyvadla. Kromě toho jsou světelné závory rozděleny do dvou párů, přičemž v páru jsou závory vůči sobě rovnoběžné a jeden pár závor je kolmý na ten druhý. V každém páru je laserová dioda jedné závory umístěna v určité vzdálenosti vedle fotorezistoru druhé závory. Pokud si laserové diody a fotorezistory označíme dle obrázku od 1 do 4, je laserová dioda závory 1 umístěna vedle fotorezistoru závory 3. Díky rozmístění závor vytvoří všechny čtyři laserové svazky kousek od rovnovážné polohy čtverec, přičemž rovnovážná poloha se nachází ve středu tohoto čtverce.

Pro instalaci závor byly sestrojeny stojany, v nichž jsou závory umístěny v takové výšce, aby mohly zaznamenávat pohyb lana kyvadla. Nákres stojanu i s umístěním závory je na obr. 13. Stojan je složen z patky připevněné k zemi dvěma šrouby, na které je přivařen jekl o délce 450 mm. Na jeklu je připevněn další s rozměry 80x60x60 mm. V tomto jsou uloženy



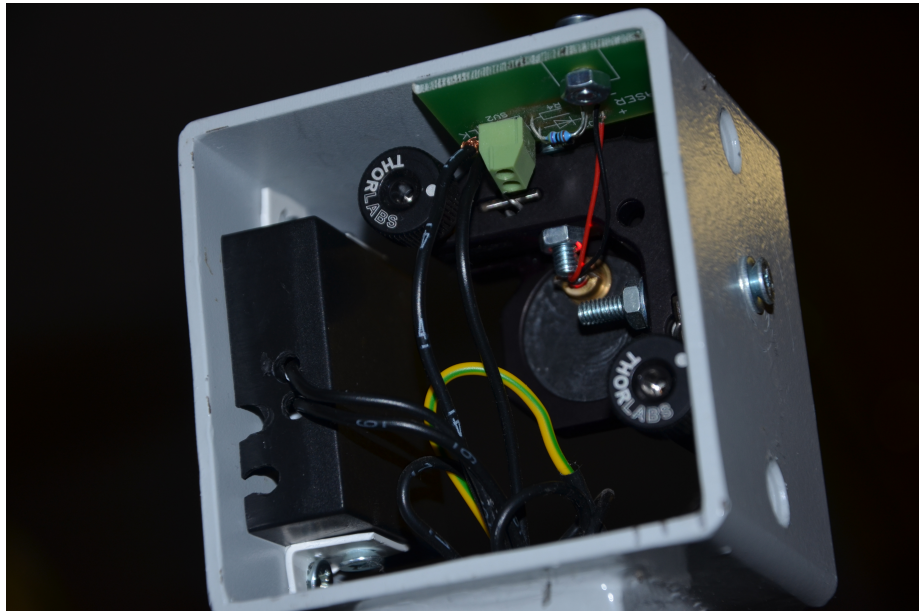
Obrázek 12: Nákres rozmístění světelných závor. Černý puntík označuje rovnovážnou polohu kyvadla.



Obrázek 13: Nákres stojanu pro světelnou závoru. Krabička s červeným puntíkem značí laserovou diodu, krabička s bílým puntíkem fotorezistor.

jedna laserová dioda a jeden fotorezistor, přičemž je dodržen postup výše. Jedná se tedy o laserovou diodu z jedné světelné závory z páru a fotorezistor z druhé závory tohoto páru.

Laserová dioda je umístěna ve speciálním držáku, který je připevněn ke stojanu šrouby M4. Pomocí dvou šroubů, které jsou součástí držáku, lze svazkem z diody pohybovat v horizontálním i vertikálním směru. Levým horním šroubem pohybuje svazkem v horizontálním směru. Otočením šroubu doleva se svazek posune také doleva, otočením doprava se svazek posune doprava. Pravým dolním šroubem pohybuje svazkem ve vertikálním směru. Otočením šroubu doleva se svazek posune dolů, otočením doprava se svazek posune nahoru.



Obrázek 14: Fotografie zachycující rozmístění jednotlivých částí závory a držáku ve stojanu. Fotorezistor je umístěn v černé krabičce vlevo, držák pro laserovou diodu je umístěn vpravo.

Pro uchycení fotorezistoru ve stojanu se použila část z černé krabičky, která původně byla součástí Laserové závory od firmy Flajzar s.r.o. Rozměry krabičky jsou 47x42x22 mm. Krabička se původně skládala ze dvou částí: užší s úchyty a větší, která se zaklapávala do užší. Kombinace obou těchto částí měla být využita v našem projektu, kvůli čemuž se taky vyvrtaly dva otvory pro úchyty užší krabičky. Ovšem po výrobě a instalaci držáku laserové diody by se obě části nevezly do stojanu. Proto se použila pouze větší část, která slouží k zatemnění fotorezistoru.

Fotorezistor je spojen s vodiči vedoucími ze svorkovnice pomocí dalších dvou svorek, tzv. čokolád. Tyto čokolády jsou ke krabičce připevněny permanentním lepidlem. Krabička je ke stojanu přišroubována pomocí čtyř šroubů M4 a části lišty, která v našem projektu

slouží jako pravoúhlý spojovací materiál.

14.1 Snímání pohybu lana pomocí obalu lana

Pro snímání pohybu lana má lano příliš úzký průměr, takže by nedocházelo ke správnému programovému vyhodnocení. Proto byl sestrojen hliníkový obal lana, který je již snímán bez potíží. Obal je k vidění na obrázku 15. Součástí obalu je i hliníková tyčinka k upevnění lana v obalu. Obal se skládá ze dvou částí, které je možné zkroutit proti sobě. Při instalování se lano prostrčilo do středu obalu a přiložila se k němu tyčinka. Poté se části zkroutily proti sobě, čímž se obal přichytil na lano.

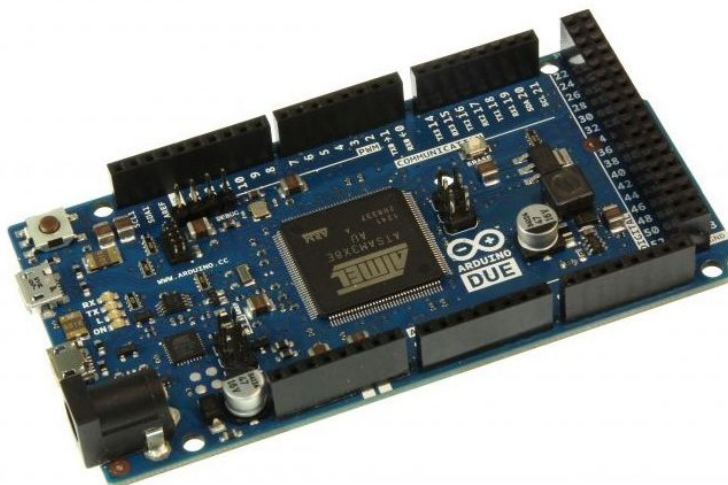


Obrázek 15: Fotografie obalu lana pro správné snímání fotorezistorem.

15 Arduino a program

Program pro vyhodnocení naměřených hodnot z detektorů a spínání/vypínání cívky byl vytvořen v Arduinu DUE, elektronické platformě s vlastním hardwarem a softwarem (vývojovým prostředím). Arduino DUE je k vidění na obr. 25. Základem hardwaru Arduina DUE je čip Atmel SAM3X8E s jádrem 32 bitů a frekvencí 84 MHz. Deska obsahuje dva microUSB

konektory. Jeden je využíván pro programování, do druhého je možné zapojit zařízení v podobě myši, klávesnice apod.



Obrázek 16: Arduino DUE.

Arduino dále obsahuje piny. Některé jsou určeny pro napájení obvodu pomocí Arduina. K dispozici jsou piny pro napětí 5 V a 3,3 V a dva piny pro GND (zem). Kromě toho jsou na desce analogové a digitální piny pro analogové a digitální vstupy/výstupy. Výstupní napětí z pinů je 3,3 V. Arduino disponuje také červeným resetovacím tlačítkem, které nainstalovaný program spustí od začátku.

Napájet lze Arduino pomocí microUSB konektoru sloužícího pro programování. Pokud se totiž Arduino takto přes kabel připojí k PC, či notebooku, automaticky je do Arduina přiveden proud, a Arduino tak může být provozuschopné. Kromě toho lze k napájení využít přímo napájecí konektor.

Pro programování v Arduinu je vytvořeno integrované vývojové prostředí s názvem Arduino IDE. Toto prostředí je založené na jazyce Wiring, lze ale programovat také v jazycích C, či C++. Software ve verzi Arduino 1.8.2 byl stažen z webové stránky <https://www.arduino.cc/en/Main/Software>. Po instalaci bylo jako první nutné stáhnout si balík pro desku DUE, neboť ten se mezi základními balíky pro tuto verzi Arduina nevykytoval. Po otevření programu se v horní liště v sekci "Nástroje" v anglické verzi (Tools) rozklikla sekce "Vývojová deska:...", která dále nabídla řadu desek k použití. Možnost desky DUE ale chyběla, takže se rozklikla nabídka "Manažér desek". Otevřela se nabídka dalších desek, mezi kterými už deska DUE nechyběla. Po jejím nainstalování se deska již zobrazuje v sekci "Vývojová deska:...", a deska DUE tak je nastavena jako výchozí.

Program je vždy rozdělen do tří částí. V první se zavádí (inicializují) proměnné, které budou platné v celém programu. Druhou částí je funkce `setup()`. Do ní je vložen kód, který poběží jen jednou. Poslední třetí částí je funkce `loop()`, v níž je zapsán kód, jenž se bude neustále opakovat.

Celý program pro kyvadlo je uložen na CD, které je součástí diplomové práce. Na obrázku 17 je k vidění nejdůležitější část programu umístěná ve funkci `loop()`. Jedná se o podmínku, díky níž se spouští časovač, pomocí kterého je řízena cívka. Na obrázku 17 je zobrazena jen jedna podmínka, v celém programu jsou ale celkem čtyři, každá pro jeden detektor.

```
if(DetektorAktualniHodnota1 > 900) // (a)
{
  if(DetektorD3 == 1) // (b)
  {
    DetektorMillis13Konec = millis(); // (c)
    DetektorMillis13Polovina = (DetektorMillis13Konec - DetektorMillis13Zacatek)/2; // (d)
    DetektorZbyvajiciCas13 = PulPerioda - DetektorMillis13Polovina; // (e)
    VypniCivkuVCase = DetektorZbyvajiciCas13 + millis(); // (f)
    DetektorD1 = 0; // (g)
    DetektorD2 = 0;
    DetektorD3 = 0;
    DetektorD4 = 0;
  }
  else
  {
    DetektorMillis13Zacatek = millis(); // (h)
    DetektorD1 = 1;
  }
}
```

Obrázek 17: Část programu s podmínkou, díky níž se spouští časovač, pomocí kterého je řízena cívka.

Řádek označený jako **(a)** definuje funkci `if` s podmínkou. Pokud je tato podmínka splněna, vyplní se příkaz, který je součástí `if`. Jestliže podmínka splněna není, z příkazu se neprovede nic. V podmínce je proměnná `DetektorAktualniHodnota1`, do níž je zaznamenávána aktuální hodnota napětí získaná z fotodetektoru označeném jako 1. Arduino zobrazuje výstupní hodnoty v rozsahu od 0 do 1023, proto i napětí získané z detektoru se musí nacházet v tomto rozsahu. Pokud je detektor plně osvětlen, hodnota napětí je 0. Je-li na detektoru absolutní tma, hodnota napětí je 1023. Podmínka tak říká, že příkaz pod `if` se vyplní tehdy, když napětí dosahuje nejvyšších hodnot, tj. když kyvadlo přetne laserový svazek světelné závory.

Na řádku **(b)** je uvedena další funkce `if`. Tato má ale v podmínce uvedeno, že příkaz pod ní se vyplní ve chvíli, když kyvadlo v dané sekvenci již prošlo skrze světelnou závoru

označenou jako 3. Pokud podmínka splněna není, provede se příkaz pod **else**. Proměnná **DetektorD3** nabývá jen dvou hodnot, **0** a **1** (v tomto případě bylo možné použít i funkci **boolean**, proměnná by tak nabývala hodnot **true** a **false**). Pokud je hodnota **0**, kyvadlo v dané sekvenci ještě neprošlo skrze světelnou závoru 3.

U bodu (c) je proměnná **DetektorMillis13Konec**, která zaznamenává aktuální čas Arduina. Funkce **millis()** totiž funguje podobně jako stopky. Jakmile je v Arduinu zahájen určitý program, uchovává funkce **millis()** čas od spuštění programu. V řádku (d) je do proměnné **DetektorMillis13Polovina** uložen rozdíl mezi hodnotami uloženými v proměnných **DetektorMillis13Konec** a **DetektorMillis13Zacatek** podělený dvěma. Jelikož jsme stále ve funkci **if**, kdy kyvadlo v dané sekvenci již prošlo světelnou závorou 3, je v proměnné **DetektorMillis13Zacatek** zaznamenána čas, v němž kyvadlo přerušilo laserový svazek světelné závory 3. V proměnné **DetektorMillis13Polovina** je tak uložen čas, kdy se kyvadlo nacházelo v rovnovážné poloze.

Proměnná **DetektorZbyvajiciCas13** na řádku (e) v sobě uchovává dobu, která kyvadlu v dané sekvenci zbývá do dosáhnutí rovnovážné polohy poté, co kyvadlo přerušilo laserový paprsek světelné závory 1. Proměnná **PulPerioda** má v sobě uchovánu konstantní hodnotu poloviny periody kyvadla. U bodu (f) se do proměnné **VypniCivkuVCase** uloží doba, kdy kyvadlo v dané sekvenci dosáhne rovnovážné polohy. Poté se všechny proměnné **DetektorD(1 – 4)** nastaví na hodnotu **0**, což je uvedeno na řádku (g).

Jestliže na řádku (b) není splněna podmínka **DetektorD3 == 1**, tj. kyvadlo v dané sekvenci ještě nepřetnulo laserový svazek světelné závory 3, vyplní se příkaz pod **else**. Do proměnné **DetektorMillis13Zacatek** se uloží aktuální čas, tedy čas, kdy došlo k protnutí laserového svazku světelné závory 1.) (viz bod (h)). Kromě toho se proměnná **DetektorD1** nastaví na hodnotu **1**.

Závěrečná část programu ukázaná na obrázku 18 obsahuje funkci **if**, pomocí které se do obvodu s cívkou pouští pinu označeného **pokus** proud. V podmínce na řádku **a** je uvedeno, že doba kyvadla zbývající do dosáhnutí rovnovážné polohy v dané sekvenci je v intervalu od 0 do 1 200 s. Pokud je podmínka splněna, provede se příkaz na řádku **b**, tj. do obvodu nepoteče proud z pinu **pokus**. Díky tomu poteče proud do cívky, jak bude ukázáno v následující kapitole Obvod. Není-li podmínka splněna, proud z pinu poteče, avšak nepoteče do cívky.

16 Obvod elektromagnetu

Cívka pro udržování kyvadla v permanentním pohybu je umístěna v elektrickém obvodu a je řízena pomocí detektorů a vyhodnocovacího programu, který je součástí Arduina. Celý obvod je seřízen tak, aby do cívky nevedl proud po celou periodu kmitání kyvadla, ale jen

```

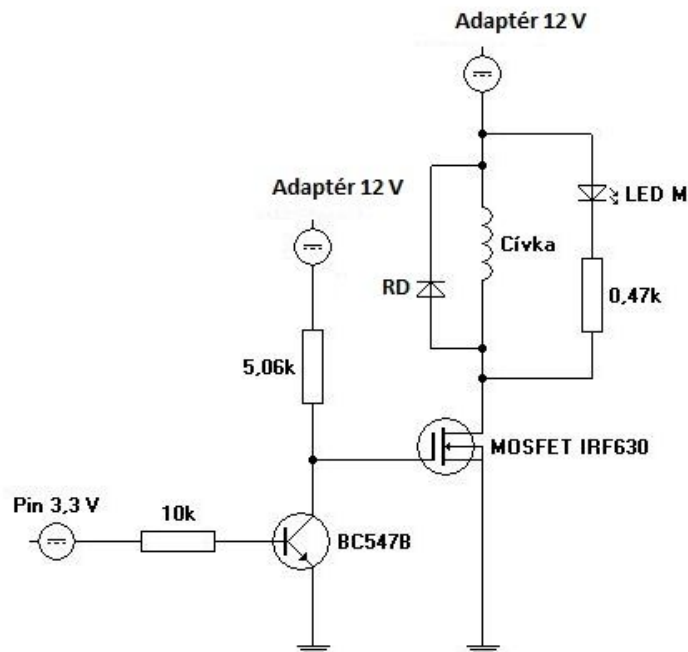
if((millis() >= (VypniCivkuVCase - 1200)) && (VypniCivkuVCase >= millis())) // (a)
{
    digitalWrite(pokus, LOW); // (b)
}
else
{
    digitalWrite(pokus, HIGH); // (c)
}

```

Obrázek 18: Závěrečná část programu, kde dochází k vyhodnocení podmínek v programu. To má za následek, že do obvodu s cívkou buď proud poteče, nebo nepoteče.

v určité okamžiky. Díky tomu je kyvadlu dodávána energie kompenzující ztráty.

Nákres části obvodu, která slouží k pohánění cívky, je znázorněn na obrázku 19. Základem je pin Arduina, z něhož na základě programu (viz obrázek 18) buď teče proud, nebo neteče. Vzhledem k tomu, že maximální hodnota výstupního napětí z pinu Arduina je 3,3 V, nebylo možné pin připojit rovnou k cívce ani nebylo možné ho připojit k obvodu, který by obsahoval pouze tranzistor, či MOSFET. Výstupní napětí pinu 3,3 V by totiž nedokázalo otevřít bázi tranzistoru, nebylo by též dostatečné pro Gate MOSFETu.



Obrázek 19: Nákres obvodu s cívkou.

Vytvořila se tedy kaskáda složená z tranzistoru BC547B, jenž je typu NPN, a MOS-

FETU IRF630. Proud z pinu Arduina tedy teče přes rezistor o velikosti $10\text{ k}\Omega$ do báze tranzistoru. Díky tomu se tranzistor otevře, proud z adaptéru o napětí 12 V poteče přes tranzistor, a část obvodu obsahující MOSFET a cívkou tak zůstane uzavřena. Jestli ale z pinu Arduina neteče do báze tranzistoru proud, je tranzistor uzavřen. Proud z adaptéru o napětí 12 V tudíž poteče do Gate MOSFETu, a část obvodu s cívkou se tedy otevře. Proud teče i cívkou, která vytváří magnetické pole. Tím je vysvětlen i závěr programu, jenž je na obrázku 18.

Paralelně s cívkou je zapojena rychlostní dioda a LED dioda. Rychlostní dioda označená **RD** je zapojena v závěrném směru a slouží jako jistič, aby zbytkový proud z MOSFETu, ke kterému dochází po přerušení proudu tekoucího cívkou, nepoškodil právě cívkou. LED dioda označená jako **LED** je zapojena v propustném směru a ve své větvi je v sérii s rezistorem $470\ \Omega$. Tato dioda slouží k informování o tom, zda cívkou teče proud, či ne. Pokud cívkou proud teče, dioda svítí; jestli neteče, dioda nesvítí.

Propojení závor ve stojanech s obvodem zajišťuje průchozí řadová svorka SAK pro průřez $2,5\text{ mm}^2$ (dále jen svorkovnice). Ta je umístěna pod malým sklem poblíž východu směrem k hlavnímu vlakovému nádraží. Ke každému stojanu je ze svorkovnice přiřazeno celkem 8 svorek. Z jednoho konce každé z těchto svorek vede vodič, který ústí ve stojanu. Zaměříme se pouze na jednu sadu těchto svorek, tj. na osm svorek vedoucí k jednomu stojanu. Šest svorek mají stejnou barvu, zbývající dvě odlišnou. Jedna z odlišných je červená, druhá modrá. Pomocí těchto dvou lze přivést napětí 12 V k závoře. Tyto dvě svorky měly mít využití v původním návrhu, v němž jsme pro detekci kmitání kyvadla chtěli použít celé Laserové závory od firmy Flajzar s.r.o. Kmitání kyvadla však při našich měření zajišťuje pouze laserová dioda z Laserové závory od firmy Flajzar s.r.o., přičemž maximální napájení této diody je 5 V .

Každá dvojice (laserová dioda a fotorezistor) ve stojanu vyžaduje celkem čtyři vodiče. Ze zbývajících šesti stejnobarevných svorek se tedy pomocí dvou napájí laserová dioda a pomocí dalších dvou se fotorezistor připojí k obvodu. Zbývající dvě svorky fungují jako rezerva. Všechny vodiče jsou označeny čísly, v jedné sadě jsou tedy vodiče očíslovány od 1 do 8. Vodiče jsou označeny směrem od červené svorky, která je očíslována jedničkou. Vedle ní je modrá svorka s dvojkou atd.

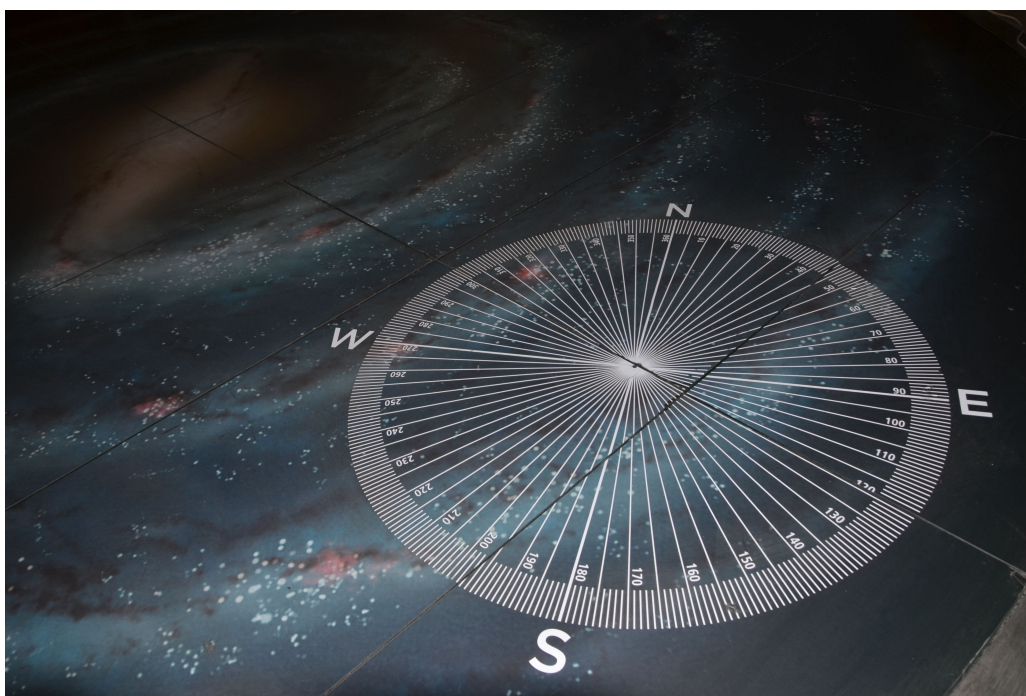
Svorkovnice ještě obsahuje dvě další svorky, jednu červenou a druhou modrou, které jsou umístěny na kraji svorkovnice. Pomocí těchto svorek lze přivést do obvodu napětí až 24 V .

V části obvodu s fotorezistorem je kromě rezistoru ještě vodič, který obvod fotorezistoru spojuje s pinem Arduina. Tento pin snímá hodnoty napětí na fotorezistoru. Důležité je, aby tento obvod byl napájen zdrojem Arduina o napětí $3,3\text{ V}$, poněvadž se jedná o maximální možnou snímanou hodnotu. Při použití zdroje o napětí 5 V jsme u závor s kratší vzdáleností sice v Arduinu dokázali v rozmezí od 0 do 1023 rozeznat rozdíl mezi osvětleným

a neosvětleným fotorezistorem, v případě závoru s delší vzdáleností už tento rozdíl nebyl patrný. Právě kvůli nastavenému zdroji napětí 5 V jsme byli mimo měřený rozsah od 0 do 1023.

17 Úhloměř

Pro potřeby měření stáčení roviny kmitání netlumeného kyvadla byl zhotoven úhloměř, který je přilepen na sklech v přízemí, nad kterými kmitá kyvadlo. Úhloměř zobrazuje po 1^o rozpětí úhlů od 0^o po 360^o, jednotlivé stupně jsou vyznačeny čárami. Střed úhloměru se nachází v rovnovážné poloze kyvadla, poloměr úhloměru je 750 mm. Na úhloměru jsou vyznačeny i světové strany dle anglické symboliky – N (North, sever), S (South, jih), E (East, východ) a W (West, západ). Úhloměř je k vidění na obrázku 20.



Obrázek 20: Úhloměř přilepený na sklech v přízemí fakulty.

18 Měření kmitání kyvadla poháněného cívkou

18.1 Stáčení roviny kmitání

Z teorie vyplývá, že v Olomouci by se rovina kyvadla měla za hodinu stočit o úhel $\theta_{01hod} = 11^{\circ} 25'$. Nechali jsme kyvadlo kmitat netlumeně, tj. obvod s cívkou byl v každé

T/2 zapnutý po dobu 1 200 ms, a bez použití magnetu našroubovaného ze spodní strany a měřili jsme, o kolik stupňů se rovina kyvadla bude stáčet během jedné hodiny. Výsledky změřených úhlů θ_t , které reprezentují stočení roviny kyvadla za měřený čas, jsou uvedeny v tabulkách 7a, 7b, 7c a 7d.

Tabulka 7: Změřené hodnoty úhlů θ_t , který reprezentuje stočení roviny kyvadla za měřený čas.

(a) 1. měření		(b) 2. měření		(c) 3. měření		(d) 4. měření	
$t[\text{min}]$	$\theta_t[^\circ]$	$t[\text{min}]$	$\theta_t[^\circ]$	$t[\text{min}]$	$\theta_t[^\circ]$	$t[\text{min}]$	$\theta_t[^\circ]$
0	0	0	0	0	0	0	0
5	1,5	5	1,0	5	1,0	5	1,0
10	2,5	10	2,0	10	1,5	10	1,5
15	3,5	15	3,0	15	2,0	15	2,5
20	4,5	20	4,0	20	3,0	20	3,5
25	5,5	25	4,5	25	4,0	25	4,0
30	6,5	30	5,5	30	5,0	30	5,0
35	7,0	35	6,0	35	5,5	35	5,5
40	7,5	40	7,0	40	6,0	40	6,5
45	8,5	45	8,0	45	6,5	45	7,0
50	9,5	50	8,5	50	7,5	50	8,0
55	10,5	55	9,0	55	8,5	55	9,0
60	11,0	60	10,0	60	9,5	60	10,0

Kyvadlo pokaždé kmitalo se stále stejnou amplitudou, která se pohybovala kolem 95 cm. Šroub s magnetem tedy není potřeba k tomu, aby zvyšoval magnetické pole cívky. Ta je sama schopna bez potíží udržovat kyvadlo v permanentním pohybu.

Z měření hodnot úhlů stáčení θ_t je patrné, že za hodinu se rovina kyvadla ne vždy stočila o úhel, který odpovídá teoretické hodnotě úhlu stočení $\theta_{O1hod} = 11^\circ 25'$. Nejbližší k teoretické hodnotě má naměřená hodnota z tabulky 7a. V tomto případě se mohla projevit chyba v podobě způsobu měření, kdy jednotlivá stáčení kyvadla byla z úhloměru odečítána okem. U naměřených hodnot z tabulek 7b až 7d se podobná chyba mohla také projevit. V tomto případě je ale odchylka od teoretické hodnoty již větší než 1° . Je možné, že měření ovlivnila třeba nějaká nerovnost na Charronově prstenci, případně měření mohla svým působením zkreslit cívka.

18.2 V omezeném režimu – při dvou aktivních závorách

V případě potíží s jednou ze závor, např. uvolnění napájecího vodiče k laserové diodě, takže laserová dioda přestane svítit, lze kyvadlo provozovat v omezeném režimu. Pár závor

s poškozenou částí odpojíme, a detekci kyvadla tak bude zajišťovat pouze druhý pár závor. Kyvadlo se bude chovat jako netlumené, pokud jeho rovina kmitání bude v dostatečné vzdálenosti od rovnoběžných rovin, které jsou tvořeny závorami aktivního páru. Pokud se rovina kmitání kyvadla stočí do blízkosti rovnoběžné polohy s výše uvedenými rovinami, kyvadlo začne z přímočarého pohybu přecházet v stále větší elipsování. Pokud je ale nastavena dostatečně dlouhá doba spínání, kyvadlo by po čase mělo opět ztrácet na elipsování, až bude opět kmitat s přímočarou trajektorií.

Příkladem je měření stáčení roviny kmitání kyvadla v situaci, kdy aktivním párem závor byly závory rovnoběžné se schodištěm. Během měření bylo sledováno stáčení ve chvíli, kdy se rovina kmitání kyvadla již nacházela poblíž rovnoběžné polohy s aktivním párem závor. Výsledky měření jsou zaznamenány v tabulce 8.

Měření kyvadla započalo ve chvíli, kdy amplituda kyvadla byla 77 cm. Během měření nastával pokles amplitudy kyvadla. Po 25 minutách měření začalo kyvadlo elipsovát, amplituda byla už jen 63,5 cm. Míra elipsování se s dalším postupem času zvětšovala, po 55 minutách od začátku měření kyvadlo elipsovalo výrazně. Amplituda se z úhloměru odečítala mnohem hůře.

Po 68 minutách měření došlo k rapidnímu elipsování kyvadla, které bylo pravděpodobně zapříčiněno nepravidelným zapínáním cívky. V tomto čase byla naměřena amplituda kyvadla 32,5 cm. Po 75 minutách kyvadlo již přestalo rapidně elipsovát a vracelo se k přímočaré trajektorii. Po 110 minutách měření kyvadlo kmitalo již přímočaře s amplitudou 89 cm.

$t[min]$	$\epsilon_t[^\circ]$
0	18,5
5	19,5
10	20,0
15	21,0
20	22,0
25	23,5
30	24,5
35	25,0
40	26,5
45	27,5
50	29,0
55	30,5
60	32,0
65	33,0
68	40,0
69	60,0
70	68,0
72	74,0
75	80,0
77	83,0
80	87,0
82	89,0
110	96,0
115	97,0
120	98,5

Tabulka 8: Výsledky měření stáčení roviny kmitání kyvadla ve chvíli, kdy se rovina kmitání kyvadla již nacházela poblíž rovnoběžné polohy s aktivním párem závor. Veličina t je doba měření, ϵ_t je úhel, který se odečetl v danou dobu měření na úhломěru.

19 Závěr

Seznámil jsem se s principem činnosti Foucaultova kyvadla a s možnostmi jeho sestavení tak, aby kyvadlo kmitalo netlumeně. Prostudoval jsem články o vlivech různých sil působících na kyvadlo, o variantách popisu jeho kmitání a stáčení a o zamezení elipsování kyvadla pomocí Charronova prstence.

Na základě získaných znalostí jsem vytvořil nákresy jednotlivých částí projektu, pomocí kterých jsem nechal sestavit Foucaultovo kyvadlo na Přírodovědecké fakultě Univerzity Palackého v Olomouci. Závaží kyvadla, které tvoří železná koule o hmotnosti $m_K = 37$ kg a o průměru $d_K = 207,85$ mm, bylo zavěšeno na technicky vyspělé vlákno DYNEEMA® SK 78 s výrobcem uváděnou pevností 700 kg. Lano bylo upevněno do závěsu, který je pomocí čtyř šroubů zavěšen na dvou okách traverzy ve světlíku budovy. Aby se při kmitání kyvadla zamezilo elipsování kyvadla, připevnil se k závěsu Charronův prstenc. Ten zamezuje tečnému pohybu, a kyvadlo tak přechází z elipsování do přímočarého pohybu.

Kyvadlo kmitání netlumeně pomocí magnetického pole vytvářeného cívkou se 1700 závitů, která je v kostře umístěna pod skly v přízemí budovy. Cívka vytváří magnetické pole po určitou dobu každé půl periody kmitání, tato doba je určena programem vytvořeným v softwarovém rozhraní Arduina. Tento program je založen na zaznamenání doby průchodu kyvadlo rovnovážnou polohou. Data získává ze čtyř světelných závor tvořených laserovou diodou a fotorezistorem.

Provedl jsem se několik měření tlumeného i netlumeného kyvadla. V případě tlumeného kyvadla jsem z naměřených údajů vypočítal faktor kvality, který se pohyboval v rozmezí od 1000 do 1750. Z naměřených hodnot amplitudy v průběhu času bylo zřejmé, že amplituda kyvadla po jedné hodině klesne z původních 800 mm (případně 750 mm) na zhruba polovinu.

V případě netlumeného kyvadla jsem proměřoval stáčení roviny kmitání kyvadla. Z dostupných měření jsem pozoroval stočení za hodinu o $9,5^\circ$ až 11° . V Olomouc je teoretická hodnota stáčení za jednu hodinu $\theta_{O1hod} = 11^\circ 25'$. Odchylka naměřených hodnot od teoretické mohla být způsobena nepřesným odečítáním úhlů, které bylo prováděné pouhým okem, případně měření mohly ovlivnit nerovnosti na Charronově prstenci. Vliv by na stáčení mohla mít i cívka, jejíž kostra tvoří jádro cívky, a má tak dopad na celkové magnetické pole vytvářené cívkou.

Foucaultovo kyvadlo může na fakultě sloužit jako předmět dalšího bádání. Jedná se ale také o zpestření atria budovy, které může zaujmout návštěvníky fakulty.

Reference

- [1] J. Bajer: *Mechanika 2*, 487 stran, Olomouc 2008.
- [2] G. I. Opat: *The precession of a Foucault pendulum viewed as a beat phenomenon of a conical pendulum subject to a Coriolis force*, Am. J. Phys. 59, 822 (1991).
- [3] W. S. Kimball: *The Foucault Pendulum Star Path and the n-Leaved Rose*, Am. J. Phys. 13, 271 (1945).
- [4] J. B. Hart, R. E. Miller: *A simple geometric model for visualizing the motion of a Foucault pendulum*, Am. J. of Physics 55, 1 (1987).
- [5] R. Stuart Mackay: *Sustained Foucault Pendulums*, American Journal of Physics 21, 180 (1953).
- [6] W. J. Noble: *A Direct Treatment of the Foucault Pendulum*, American Journal of Physics 20, 334 (1952).
- [7] http://en.wikipedia.org/wiki/List_of_Foucault_pendulums
- [8] D. R. Curott: *The Role of the Constraining Force in a Foucault Pendulum*, Am. J. Phys. 40, 1007 (1972).
- [9] J. von Bergmann and H. von Bergmann: *Foucault pendulum through basic geometry*, Am. J. Phys. 75, 888 (2007).
- [10] E. O. Schulz-DuBois: *Foucault Pendulum Experiment by Kamerlingh Onnes and Degenerate Perturbation Theory*, Am. J. Phys. 38, 173 (1970).
- [11] T. F. Jordan, J. Maps: *Change of the plane of oscillation of a Foucault pendulum from simple pictures*, Am. J. Phys. 78, 11 (2010).

Seznam obrázků

1	Oka ve světlíku.	15
2	Nákres závěsu.	16
3	Charronův prstenec umístěný v zařízení pro jeho uchycení.	17
4	Pohled na Charronův prstenec umístěný v zařízení pro jeho uchycení z jiné strany.	17
5	Charronův prstenec v 3D profilu uložený v zařízení pro jeho upevnění. . .	17
6	Závěs se zařízením, díky kterému je Charronův prstenec upevněn v určité pozici.	18
7	Plastová objímka lana, která slouží k vycentrování Charronova prstence. . .	19
8	Zavěšování závěsu se zařízením pro uchycení Charronova prstence.	25
9	Nákres cívky s rozměry z profilu. Oranžová část znázorňuje vodič, šedá kostru cívky.	29
10	Charronův prstenec umístěný v zařízení pro jeho uchycení.	30
11	Pohled na Charronův prstenec umístěný v zařízení pro jeho uchycení z jiné strany.	30
12	Nákres rozmístění světelných závor. Černý puntík označuje rovnovážnou polohu kyvadla.	30
13	Nákres stojanu pro světelnou závoru. Krabička s červeným puntíkem značí laserovou diodu, krabička s bílým puntíkem fotorezistor.	32
14	Fotografie zachycující rozmístění jednotlivých částí závor a držáků ve stojanu. Fotorezistor je umístěn v černé krabičce vlevo, držák pro laserovou diodu je umístěn vpravo.	32
15	Fotografie obalu lana pro správné snímání fotorezistorem.	34
16	Arduino DUE.	34
17	Část programu s podmínkou, díky níž se spouští časovač, pomocí kterého je řízena cívka.	36
18	Závěrečná část programu, kde dochází k vyhodnocení podmínek v programu. To má za následek, že do obvodu s cívkou buď proud poteče, nebo nepoteče.	37
19	Nákres obvodu s cívkou.	38
20	Úhломěr přilepený na sklech v přízemí fakulty.	40
21	První část dokumentace k laserové diodě a černé krabičce z Laserové závory pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.	47
22	Druhá část dokumentace k laserové diodě a černé krabičce z Laserové závory pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.	48
23	Nákres rozmístění stojanů kolem informačního kruhu. Černé čáry značí traverzy, na kterých jsou položena skla. Černý puntík je místo uložení cívky. . .	49
24	Fotografie prostoru pod skly před sestrojením kyvadla a umístěním cívky. . .	50
25	Fotografie ukládání cívky pod skla. V pravém rohu je umístění svorkovnice. .	51

Seznam tabulek

1	Seznam veličin potřebných k výpočtu práce kyvadla, kterou je nutné vynaložit k překonání odporu vzduchu.	21
2	Změřené hodnoty amplitudy výchylky A_K v průběhu času.	26
3	Změřené hodnoty amplitudy výchylky A_K v průběhu času.	26
4	Změřené hodnoty relativní rychlosti ztrát γ a faktoru kvality Q_K	27
5	Změřené hodnoty relativní rychlosti ztrát γ a faktoru kvality Q_K	27
6	Naměřené hodnoty složek vektoru magnetické indukce v závislosti na vertikální vzdálenosti d od horního okraje cívky. Vertikální složka magnetické indukce je označena B_{VC} , horizontální B_{HC}	31
7	Změřené hodnoty úhlu θ_t , který reprezentuje stočení roviny kyvadla za měřený čas.	41
8	Výsledky měření stáčení roviny kmitání kyvadla ve chvíli, kdy se rovina kmitání kyvadla již nacházela poblíž rovnoběžné polohy s aktivním párem závor. Veličina t je doba měření, ϵ_t je úhel, který se odečetl v danou dobu měření na úhloměru.	42

PŘÍLOHY

A Dokumentace k laserové diodě z Laserové závory pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.

Tomáš Flajzar, poslední aktualizace návodu 14.2.2006

Laserová závora slouží pro zabezpečení libovolného prostoru, průchodu nebo průjezdu až na vzdálenost několika desítek metrů. Přerušení paprsku, ať už vstupem nebo průchodem osoby či průjezdem vozidla, je signalizováno rozpojením vstupního relé. Jeho kontakt může být zapojen např. na zabezpečovací ústřednu nebo na počítačové impulsy.

Technické údaje:

Napájení: 12V

Max. odběr proudu (laser svítí, relé drží): 65mA

Typ laseru: polovodičový laser, výkon max. 5mW, třída 3A, vlnová délka 30 – 680nm

Pracovní dosah závory: laserůvky až několik stovek metrů, prakticky lze použít na cca 50 - 100metrů (bez optiky)

Rozměry plošných spojů: 42 x 37mm

Rozměry plastových krabiček: 47 x 42 x 22mm (bez úchytů)

Zatížení kontaktu relé: 100mA (odporová zátěž)

Pracovní teplota: vnitřní provedení: 0 až +40°C, venkovní provedení: -15° C až +40°C.

Pracovní prostředí: se standardním laserovým modulem LABR je použití pouze ve vnitřních prostorech, s precizním zalitým laserovým modulem FL5MW lze použít i ve venkovním prostředí (nabízeny jsou obě varianty) – viz. text.

Popis zapojení:

Základem zapojení je laser a fototranzistor. U starší verze bylo přerušení paprsku vyhodnocováno CMOS obvodem 4011, v této nové verzi je použit mikroprocesor PIC12F629. Tím bylo možné celou konstrukci ještě více zjednodušit, doplnit další funkce a zvýšit spolehlivost. 5V napájení laseru a procesoru zajišťuje stabilizátor 78L05, relé má 12V cívku a je napájeno přímo z 12V, tj. před stabilizátorem.

Laserová závora je umístěna na dvou deskách: na řídicí desce, resp. desce přijímače a na desce vysílače je umístěn laser. Obě desky jsou propojeny dvojitou až na vzdálenost 50 metrů (i více, dle průjezdu).

Popis funkce:

V klidovém stavu laser z vysílače svítí na fototranzistor na přijímací straně, relé drží. Pokud dojde k přerušení paprsku, relé rozepne. Dle nastavení pomocí propojky J2 buď po celou dobu, kdy je paprsek přerušen, nebo jen na dobu 0,8 sek.

Propojkou J1 lze nastavit pracovní mód závory. Pokud je propojka J1 propojena, laser svítí trvale. Pokud je propojka rozpojena, laser pulzuje. Obojí má své výhody. Pokud laser svítí trvale, je rychlejší reakce na rozpojení paprsku. V praxi je však neopatrná prodává v impulsním režimu bezpečnější. Rolí to hraje snad jen pokud chceme sledovat přerušení paprsku na velmi krátkou dobu, tj. laserová závora není použita pro sledování průchodu osob a průjezdu vozidel.

Více výhod je na straně impulsního režimu. Jednak je zde vyšší odolnost proti narušení, neboť procesor sám řídí přerušování a ve stejných intervalech požaduje odezvu, takže pokud budete chytit na přijímací stranu posvítit např. laserovým ukazovátkem, bude okamžitě spuštěn poplach, neboť procesor rozpozná jiný rytmus, nebo v tomto případě nepřerušení paprsku v požadované době. Další výhodou je vyšší životnost laseru a nižší spotřeba. Nevýhodou je kratší dosah závory, prakticky do 50 metrů. V běžném průjezdu nebo průchodu však dostačující.

Tabulka funkcí:

Propojka:	Stav:	Režim:
J1	spojena	Trvalý svít laseru
J1	rozpojena	Impulsní režim laseru
J2	spojena	Relé je rozpojeno po celou dobu přerušení paprsku
J2	rozpojena	Při přerušení paprsku dojde k rozpojení relé jen na 0,8 sek.

Mechanická konstrukce:

Laserová závora je umístěna na dvou plošných spojích: deska přijímače a deska vysílače. Hlavní částí je ta přijímací. Zde je umístěn i snímač fototranzistor nebo fotodioda D1 – my jsme zvolili fototranzistor LTR4206. Před osazením do plošného spoje je třeba ohnout nožičky o 90°. **Kolektor (a sestřihnutá hrana) je na desce směrem k rezistorům R1 a R2.** Laser, který je umístěn na druhé desce, je přichycen klasickou kabelovou úchytkou – viz. obrázek s rozmístěním součástek. Osazené desky jsou pak umístěny v plastových krabičkách s vyvrtanými otvory 10mm pro průchod paprsku – viz. obrázek. Vysílací část s laserem je s řídicí částí propojena prostřednictvím svorek LA a LK (laser anoda, katoda).

I když plocha fototranzistoru je poměrně malá, díky rozptylu paprsku laseru na větší vzdálenost je zaměřen poměrně snadně a funkce spolehlivá.

Je třeba zabránit dopadu externího světla na fototranzistor. Ve vnitřních prostorech je to jednoduché, pokud laserovou závoru budete používat venku, tam už je třeba větší opatrnosti a vhodného umístění tak, aby do krabičky přijímače nesvítilo slunce. Součástí stavebnice venkovní verze je gumová trubička s vnitřním průměrem 7mm a délkou 26mm. Po zvětšení otvoru na průměr 11mm se jí provléče a vystřčí ven z krabičky. Svoji délkou 26mm snižuje vliv okolního osvětlení na funkci laserové závory.

Obrázky mechanického řešení najdete na našich internetových stránkách www.flajzar.cz.

Obrázek 21: První část dokumentace k laserové diodě a černé krabičce z Laserové závory pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.

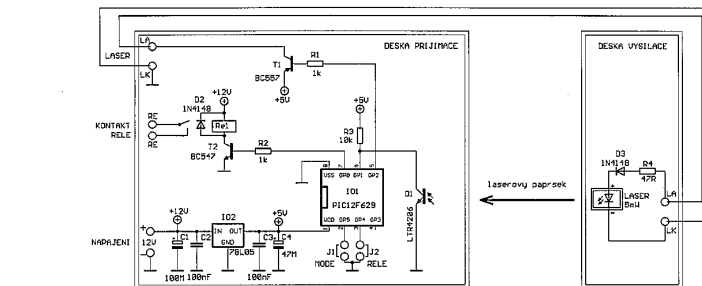
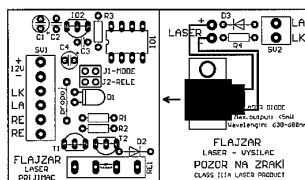
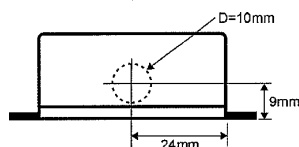


Schéma zapojení laserové zavorý



Rozmístění součástek na plošném spoji přijímače a vysílače
Umístění otvoru pro průchod paprsku



Umístění vhodné prostředí:

Laserová zavora je dodávána ve dvou provedeních - v základní, vnitřní variantě a pro venkovní použití. Rozdíl je prakticky jen v typu použitého laseru. Vnitřní varianta využívá laser LA8R, venkovní varianta využívá laser FL5MW, který je zalitý - je tedy odolnější proti vlhkosti a má větší rozsah pracovní teploty. U venkovní varianty je třeba, po osazení plošných spojů a vyzkoušení, zalakovat plošný spoj ochranným lakem.

Rozsah pracovních teplot vnitřního laseru je 0 až 40°C, laseru pro vnější použití -15°C až +40°C. Na tuto teplotu byla ko nstruكة testována i n nás.

Co laser zcela jistě nenávratně poškodí je teplota vyšší než 50°C. Pokud vám upadne e drátek na laseru, pájejte velmi opatrně, co nejnižší teplotou a co nejkratší dobu.

Důležité upozornění:

POZOR!!! PŘI POŠÍVENÍ LASEREM DO OČI MŮŽE DOJÍT K POŠKOZENÍ ZRAKU! POLOHU A MÍSTO UMÍSTĚNÍ VYSÍLAČE S LASEREM ZVOLTE TAK, ABY NEMOHLA DOJÍT K POŠKOZENÍ ZRAKU OSOB NEBO ZVÍŘAT! LASEROVÝ MODUL JE VÝROBKEM, KTERÝ NEPATŘÍ DO RUKOU DĚTEM!

Seznam součástek:

I01 – naprogramovaný procesor PIC12F629 I/P	R1, R2 – 1k, RM5mm
I02 – stabilizátor 78L05 TO92	R3 – 10k, RM5mm
LASER – dle varianty buď LA8R (vnitřní) nebo FL5MW (venkovní)	R4 – 47R, RM5mm
T1 – BC557 nebo podobný	C1 – 100M / 16V
T2 – BC547 nebo podobný	C2, C3 – 100nF, RM2,5mm
D1 – fototranzistor LTR4206	C4 – 47M / 10V
D2, D3 – 1N4148	J1, J2 – 2x2kořík + 2propojky
SV1 – svorkovnice 3 x 2pin, RM3,5mm	SV2 – svorkovnice 1 x 2pin, RM3,5mm
Patice DIL8 pro IO1	Držák laseru – kabelová příchytka + šroub
RE1 – KUAN S1A120000 nebo podobné	2 x plastová krabička KSO
Plošný spoj LASV1	
Plastová průchodka KT0451 (jen u venkovní verzi) – viz. text	

Recyklace :

Informace pro uživatele k likvidaci elektrických a elektronických zařízení. Uvedený symbol na výrobku, jeho obalu nebo v průvodní dokumentaci znamená, že použité elektrické nebo elektronické výrobky nesmí být likvidovány společně s komunálním odpadem. Za účelem správné likvidace výrobku jej odevzdejte na určených sběrných místech, kde budou přijata zdarma. Při nesprávné likvidaci tohoto druhu odpadu mohou být v souladu s národními předpisy uděleny pokuty.

Výrobce , servis, technická podpora:

FLAJZAR s.r.o., Liděřovice 8.p. 151, 696 81 Vnorovy (okres Hodonín), e-mail: flajzar@flajzar.cz, www.flajzar.cz
tel.: +420 518 628 596, 518 629 256, 518 629 256, 518 324 086, fax: +420 518 324 088, technické dotazy k zařízení zasílejte nejlépe emailem na technik@flajzar.cz, v krajním případě volejte na : +420 518 324 087 (Po – Pá 8,00 – 16,00).

(c) 2006 FLAJZAR s.r.o. Kopírování návodu nebo jeho částí pouze s písemným souhlasem firmy FLAJZAR s.r.o.

Obrázek 22: Druhá část dokumentace k laserové diodě a černé krabičce z Laserové zavorý pro vnitřní provedení od firmy Flajzar s.r.o.

B Technické parametry svorkovnice

Průchozí řadová svorka SAK pro průřez $2,5 \text{ mm}^2$.

Technické parametry:

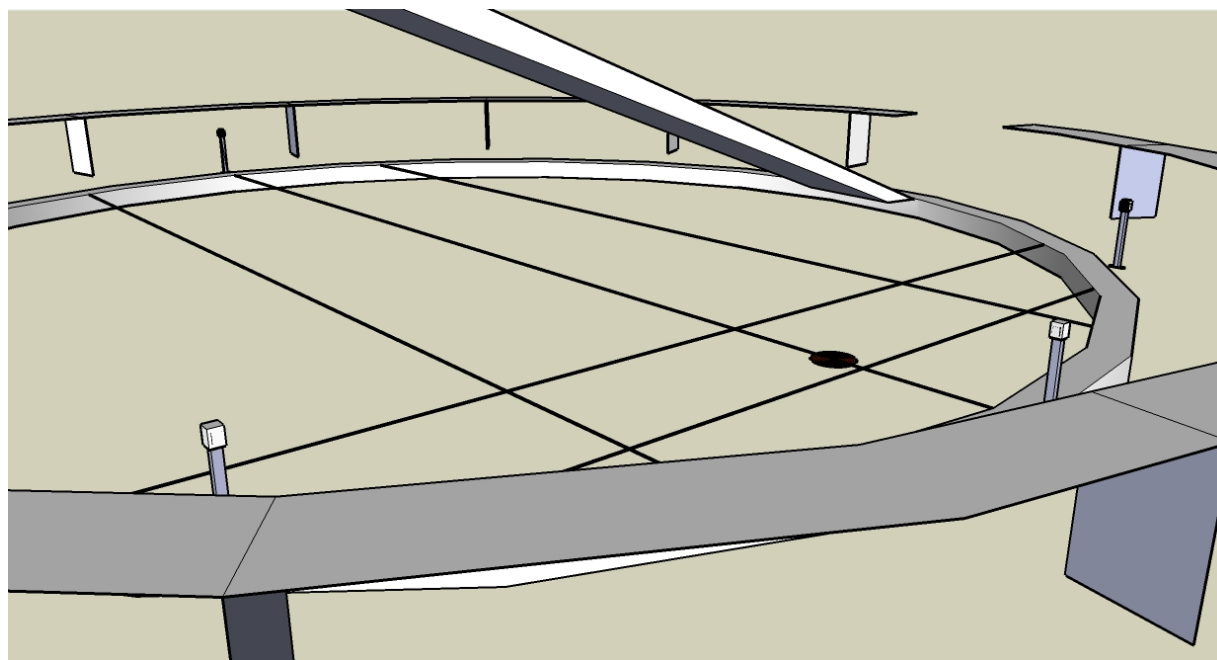
Napětí: 800 V

Proud: 24 A

Průřez vodiče: 0,5 až $2,5 \text{ mm}^2$

Provozní teplota: $-50 \text{ }^\circ\text{C}$ až $+100 \text{ }^\circ\text{C}$

C Náskres rozmístění stojanů kolem informačního kruhu



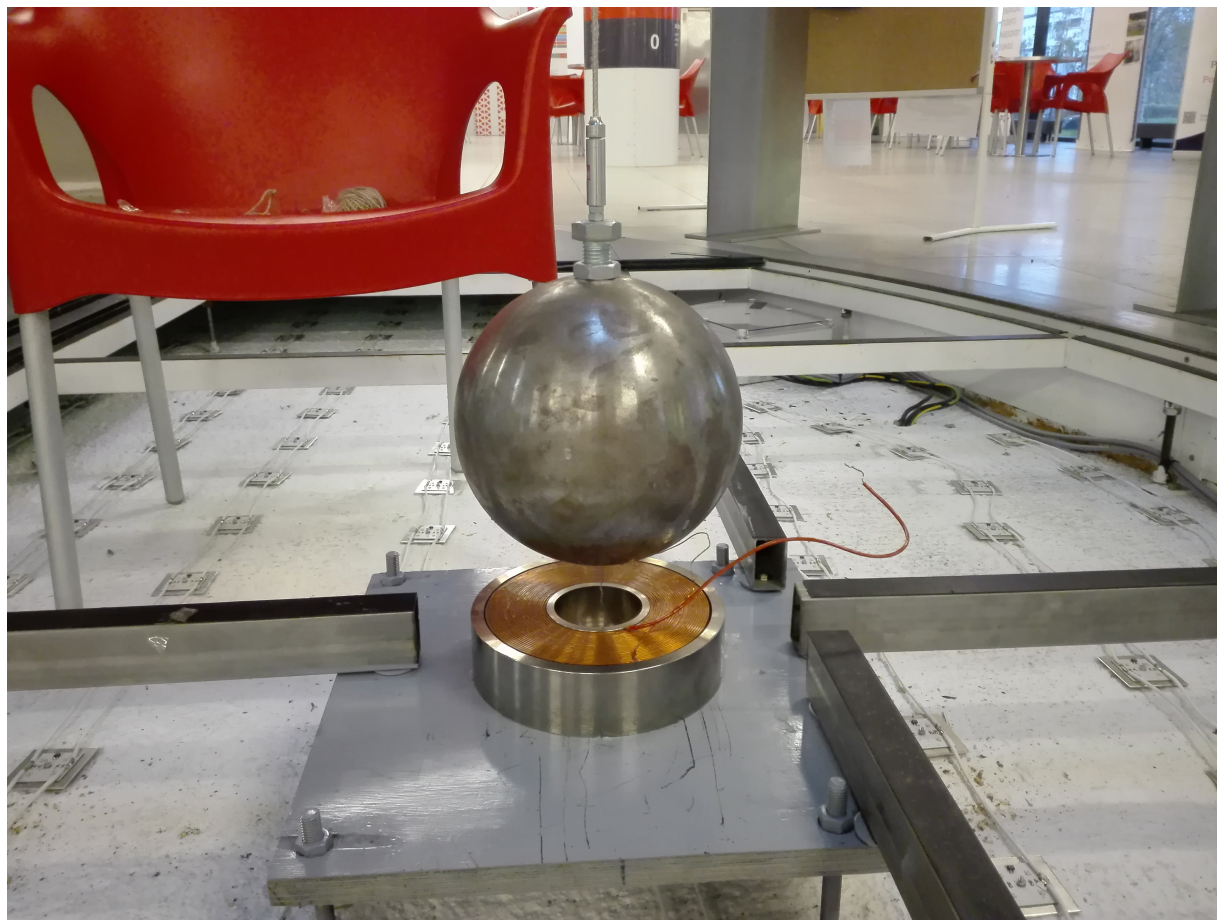
Obrázek 23: Náskres rozmístění stojanů kolem informačního kruhu. Černé čáry značí tra-verzy, na kterých jsou položena skla. Černý puntík je místo uložení cívky.

D Fotografie prostoru pod skly



Obrázek 24: Fotografie prostoru pod skly před sestavením kyvadla a umístěním cívky.

E Ukládání cívky pod skla, umístění svorkovnice



Obrázek 25: Fotografie ukládání cívky pod skla. V pravém rohu je umístění svorkovnice.