

UNIVERZITA PARDUBICE
FAKULTA CHEMICKO-TECHNOLOGICKÁ
Ústav aplikované fyziky a matematiky

**NÁVODY
K LABORATORNÍM CVIČENÍM
Z FYZIKY I**

RNDr. Jan Z a j í c , CSc. a kol.

Pardubice 2010

Obsah :

A) LABORATORNÍ ŘÁD	3
B) ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLŮ	5
C) ÚLOHY LABORATORNÍCH CVIČENÍ	10
Skládání sil	10
Balistické kyvadlo	15
Měření koeficientu viskozity	18
Měření měrné tepelné kapacity pevných látek	23
Měření odporu rezistorů	29
Výkon stejnosměrného proudu	35
Specifický náboj elektronu	39
Vodič s proudem v magnetickém poli	44
Kalibrace odporového teploměru, termistoru a termočlánku	46
Měření ohniskových vzdáleností spojných čoček	51
Spektroskop	60
Měření voltampérových charakteristik	66
Kapacita deskového kondenzátoru	70
Vybíjení kondenzátoru a měření velkých odporů	71

© RNDr. Jan Z a j í c , CSc. a kol., 2010



LABORATORNÍ ŘÁD

posluchačských laboratoří z fyziky

- 1.** Účast na laboratorních cvičeních z fyziky je **povinnou** formou výuky. Chybí-li někdo pro nemoc nebo jinou závažnou příčinu, bude mu v závěru semestru poskytnuta možnost náhradního cvičení. Počet úloh je Ústavem aplikované fyziky a matematiky stanoven na **10 prací**, a to tak, že první týden se konají úvody do laboratorních cvičení, od druhého týdne se provádí vlastní měření jednotlivých úloh a poslední týden semestru je vyhrazen na náhrady zameškaných prací a vykonání zkoušky z předmětu.
- 2.** Posluchačská laboratoř se nachází v prostorách Ústavu aplikované fyziky a matematiky v Polabinách–Stavařově, Studentská 84, v 6. podlaží budovy označené EA (místnost 06031). V prostorách posluchačských laboratoří je nutné se **přezouvat**, šatnu mají posluchači k dispozici přímo v laboratoři. Na pracoviště si nosí pouze nezbytné potřeby pro záznamy z měření a pro provádění výpočtů.
V posluchačské laboratoři je **zakázáno kouřit a konzumovat potraviny**.
- 3.** Po příchodu do laboratoře si každá skupina **nejprve zkontroluje své pracoviště** podle seznamu přístrojů a pomůcek k dané úloze a případné nedostatky ihned nahlásí přítomnému učiteli.
- 4. Každý posluchač se musí na úlohu předem připravit.** Je třeba, aby znal teoretický základ úlohy a pracovní postup měření. Zjistí-li přítomný učitel nepřipravenost studenta ke cvičení, nedovolí mu je měřit a určí mu náhradní termín.
- 5.** Po kontrole pracoviště začne dvojice měřit.
U elektrických úloh však bez výjimky až po kontrole každého obvodu učitelem.
Pouze učitel také provede připojení obvodu ke zdroji elektrického proudu !!!
Po skončení elektrického měření ponechá dvojice obvod zapojený, učitel provede opět jeho kontrolu, odpojí zdroj, a pak teprve smí posluchači rozebrat příslušné zapojení.

Tento postup je bezpodmínečně nutno dodržet i když se během jedné úlohy provádí měření na více elektrických obvodech !!!

6. Každý posluchač si vede **laboratorní deník** (obvykle sešit formátu A4), do něhož si zapisuje poznámky nutné k přípravě měření a během měření samotného pak i všechny naměřené hodnoty, jež mu slouží ke zpracování protokolu z dané úlohy.

7. Po skončení všech úkolů dané úlohy a kontrole naměřených hodnot učitelem skupina uklidí pomůcky a přístroje na pracovišti a podepíše předávací protokol (ten je v deskách na stole).

Uklizené pracoviště nechá překontrolovat přítomnému učiteli a teprve s jeho svolením opustí fyzikální laboratoř.

8. Dojde-li ke ztrátě nějakého přístroje nebo pomůcky, případně k jejich poškození hrubou nedbalostí posluchače, hradí jejich ztrátu či opravu příslušný viník. Každou zjištěnou závadu jsou posluchači povinni okamžitě nahlásit svému vyučujícímu.

9. Na základě měření se z laboratorní úlohy se zpracovává protokol (viz „Zásady pro zpracování protokolu z laboratorních cvičení“). Protokol zásadně odevzdá **každý posluchač** vždy na začátku příštího laboratorního cvičení.

Pokud posluchač tuto svou základní studijní povinnost nesplní a protokol na začátku příští práce neodevzdá, práce mu nebude uznána a měření následující úlohy musí provést v náhradním termínu.

10. Změření **všech** úloh **a vypracování protokolů z nich** je nutnou podmínkou pro možnost vykonání zkoušky z předmětu.

ZÁSADY PRO VYPRACOVÁNÍ PROTOKOLŮ

Na základě měření dané laboratorní úlohy se zpracovává protokol. I když posluchači pracují zpravidla ve dvojicích, odevzdává laboratorní protokol **k a ž d ý sám za sebe**, a to zásadně **před začátkem dalšího laboratorního cvičení !!!**

Protokol se vypracovává výhradně na **bílý papír formátu A4**, grafické závislosti (pokud nejsou zpracovány na počítači) se rýsují na **milimetrový papír téhož formátu**. Jednotlivé listy protokolu se pak sešívají sešíváčkou (jež je k dispozici v laboratoři). Text protokolu, všechny obrázky, schémata, tabulky a grafy musí být vyhotoveny jen trvanlivou formou zápisu (zásadně nepoužíváme obyčejnou tužku!).

Každý protokol musí být výrazně členěn na jednotlivé části, jimiž jsou:

A) Záhloví obsahující následující podstatné údaje:

- číslo a název měřené úlohy (podle příslušného seznamu pro daný předmět);
- jméno a příjmení posluchače s uvedením spolupracovníka;
- datum měření úlohy;
- datum odevzdání protokolu;
- u mechanických úloh pak i laboratorní podmínky (teplota, tlak, vlhkost).

Např.:

2. MĚŘENÍ HUSTOT KAPALIN

Zpracoval:

Měřeno:

Spolupracovník:

Odevzdáno:

Studijní skupina: 6

Teplota: 24°C

Dvojice: 4

Tlak: 98,76 kPa

Vlhkost: 66 %

B) Úkol (-y) :

- jsou uvedeny v návodech, případně ještě doplněny či upřesněny v deskách přímo na měřicím stole **nebo přítomným učitelem**.

C) Potřeby :

- zde platí totéž co v bodě B).

D) Obecná část :

- v ní by měl posluchač stručně a výstižně přiblížit fyzikální podstatu dané měřicí metody, uvést všechny vztahy a vzorce, jež bude potřebovat k početnímu zpracování, včetně popisu použitých symbolů fyzikálních veličin;

→ u některých úloh připojí, kde je třeba, i vysvětlující obrázek, u elektrických měření pak vždy schéma příslušného zapojení obvodu.

E) Postup měření :

→ v tomto bodě student konkrétně popíše jednotlivé etapy měření příslušné úlohy, uvede přístroje a pomůcky, jichž používal při zjišťování potřebných údajů.

F) Naměřené hodnoty :

→ hodnoty získané měřením obvykle zapisujeme (zejména tehdy, když měření provádíme opakovaně) do tabulek, jejichž vzor je vždy v návodech u každé úlohy předtištěn;

→ každá tabulka musí být nadepsána a orámována (ne však tužkou!), její záhlaví musí obsahovat normalizovaná označení měřených či počítaných veličin včetně příslušné fyzikální jednotky (tu obvykle píšeme do závorky - viz připojený vzor tabulky);

→ do sloupců pod záhlavím se potom vypisují již jen prosté číselné hodnoty dané veličiny; tyto hodnoty v každém sloupci uvádíme vždy na stejný počet desetinných míst;

→ pro vyšší přehlednost hodnot můžeme čísla v daném sloupci vyjádřit pomocí vhodné mocniny, buď volbou násobných nebo dílčích jednotek (mA, kΩ, μm, ...), případně vypsáním příslušného mocninného součinitele přímo do záhlaví tabulky, např.:

Cejchování stupnice galvanometru:

n	....	j (dílek)	I (A)	I (μA)	I (A).10 ⁶
1	....	3,75	3,77.10 ⁻⁶	3,77	3,77
2		5,25	5,29.10 ⁻⁶	5,29	5,29
3		7,00	7,03.10 ⁻⁶	7,03	7,03
4		9,50	8,58.10 ⁻⁶	8,58	8,58
5		12,75	12,80.10 ⁻⁶	12,80	12,80
6		16,50	16,62.10 ⁻⁶	16,62	16,62

→ všechny fyzikální veličiny, jejichž rozměr není roven jedné, musí být **všude mimo tabulku vyjádřeny s odpovídající jednotkou !!!**

G) Výpočty :


→ při počítání určité fyzikální veličiny musí být vždy uveden vzorec, do něhož dosazujeme příslušné hodnoty;

→ u správně vyčísleného výsledku nesmí nikdy chybět fyzikální jednotka počítané veličiny;

→ vypočítanou hodnotu je třeba zaokrouhlit s ohledem na přesnost použité měřicí metody, což znamená, že počet platných cifer výsledku by měl respektovat nejméně přesnou hodnotu ze všech, jež do vzorce dosazujeme (obvykle tak uvádíme výsledek na tři, maximálně na čtyři platné číslice!), např.:

Výpočet měrné tepelné kapacity železa:

$$c_{\text{Fe}} = \frac{(m_1 \cdot c_{\text{H}_2\text{O}} + c_{\text{kal}}) \cdot (t - t_1)}{m_2 \cdot (t_2 - t)} = \frac{(3 \cdot 4186,8 + 1270) \cdot (24,51 - 22,34)}{1,146 \cdot (82,5 - 24,51)} \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1} = 452 \text{ J.kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$$

- celistvé výpočty uvádějte do protokolu obvykle tehdy, jsou-li jedinečné, opakované výpočty se pokaždé nevypisují, ty zpravidla sumarizujeme v některém sloupci předtiskuté tabulky; vzorce použité k výpočtu však musí být v tomto případě uvedeny v obecné části protokolu;
- zvláštní pozornost je třeba věnovat zápisům výsledků **statistických souborů**, kdy vždy počítáme:
 - a) **průměrnou** (neboli střední) **hodnotu** výsledku,
 - b) **pravděpodobnou chybu** tohoto průměru,
 - c) **relativní chybu** měření (jež vyjadřuje poměr pravděpodobné chyby průměru a tohoto průměru vyjádřený v procentech);
- jak průměr, tak i chyba musí být zaokrouhleny na stejný počet desetinných míst (u chyby se zaokrouhluje vždy nahoru!) a obě veličiny musí mít i stejnou fyzikální jednotku; 
- po zaokrouhlení by pravděpodobná chyba měla mít **jednu, maximálně dvě platné číslice** (chyba uvedená na více platných číslic vždy znamená menší přesnost daného měření!);
- používáme-li při zápise výsledku mocnin deseti, je pravidlem uvádět průměrnou hodnotu měření i její pravděpodobnou chybu se stejným mocninným součinitelem, např.:

$$C = (1,012 \pm 0,004) \cdot 10^{-6} \text{ A/dílek}$$

Příklad zpracování opakovaného měření:

Určení hustoty lihu metodou spojitých nádob:

$$r_{\text{H}_2\text{O}} = 996,732 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

n	h (cm)	H (cm)	r (kg·m ⁻³)	Δr (kg·m ⁻³)
1	32,5	40,7	796	- 4
2	30,8	38,8	791	+ 1
3	28,7	35,8	799	- 7
4	26,1	33,1	786	+ 6
5	23,6	30,0	784	+ 8
6	21,0	26,4	793	- 1
7	19,8	24,6	802	- 10
8	18,8	23,6	794	- 2
9	17,0	21,7	781	+ 11
10	16,3	20,4	796	- 4

$$\bar{r} = 792 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Pravděpodobná chyba průměru:

→ **počítaná metodou pomocí kvadrátů odchylek:**

$$\bar{J}_r = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{\sum (\Delta r_i)^2}{n \cdot (n-1)}} = \frac{2}{3} \cdot \sqrt{\frac{408}{10 \cdot 9}} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 1,419 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

→ **počítaná metodou kladných odchylek:**

$$\bar{J}_r = \frac{5}{3} \cdot \frac{\sum \Delta r_i^+}{n \cdot \sqrt{n-1}} = \frac{5}{3} \cdot \frac{26}{10 \cdot 3} \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 1,444 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3} \approx 2 \text{ kg} \cdot \text{m}^{-3}$$

Hustotu počítáme s přesností na tři platné číslice – stovky, desítky a jednotky $\text{kg}\cdot\text{m}^{-3}$, a tudíž i chybu měření zaokrouhlíme **nahoru** na jednotky !!! - jak je patrné, dávají nakonec oba uvedené postupy výpočtu pravděpodobné chyby průměru stejný výsledek.

Ten potom zapíšeme ve tvaru

$$r_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = (792 \pm 2) \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \quad \text{nebo} \quad r_{\text{C}_2\text{H}_5\text{OH}} = 792 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3} \pm 2 \text{ kg}\cdot\text{m}^{-3}.$$

Relativní chyba tohoto měření činí 0,25 % .

H) Závěr:

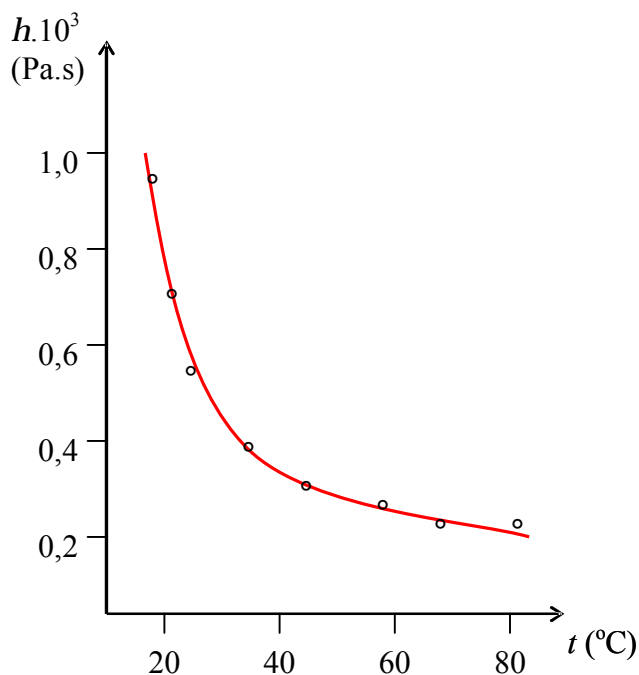
- v něm by měl posluchač zhodnotit dosažené výsledky měření, pokud aplikoval více metod, pak je třeba porovnat jednotlivé výsledky navzájem, zdůvodnit přednosti i nedostatky každé použité metody;
- pokud je to možné, provede posluchač srovnání svých naměřených nebo vypočítaných hodnot s údaji uvedenými ve fyzikálních tabulkách a vysvětlí příčiny případných rozdílů;
- u statistických měření vysvětlí velikost dosažené chyby výsledku;
- v případě grafického zpracování určitého měření vyhodnotí průběh jednotlivých závislostí.

I) Grafy:

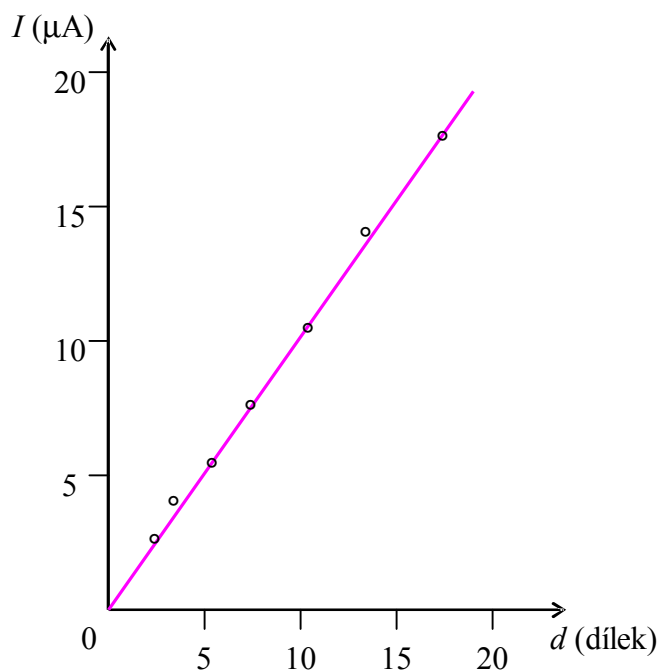
- pokud nepoužíváme při tvorbě grafických závislostí počítačového zpracování, pak grafy zásadně rýsujeme na milimetrový papír formátu A 4; logaritmické závislosti lze vynášet též na semilogaritmický papír;
- grafy (stejně jako ostatní části protokolu) musí být zásadně vypracovány trvanlivou formou zápisu, tedy v žádném případě pouze obyčejnou tužkou !!! ;
- každý graf musí mít všechny potřebné náležitosti, t.j.:
 - a) souřadnicové osy s řádným popisem a měřítkem (rovnoměrně vynesenu stupnicí),
 - b) viditelně vynesené body naměřené nebo vypočítané závislosti,
 - c) narýsovanou příslušnou funkční závislost (křivku nebo přímku),
 - d) nadpis, z něhož je patrné, o jaké měření se jedná;
- graf rýsujeme tak, že bílý okraj milimetrového papíru zůstává nepopsaný, souřadnicové osy vynášíme z tohoto důvodu alespoň 1 cm od okraje rastru;
- k popisu os patří označení nanášené veličiny - na ose x nezávisle, na ose y závisle proměnná, dále její jednotka a příslušné měřítko;
- stupnici hodnot dané veličiny vynášíme na souřadnicové osy vždy **rovnoměrně** (nikdy na osy nenanášíme přímo naměřené nebo spočítané údaje jednotlivých měření !!! - ty jsou zapsány v příslušné tabulce, kde je vždy najdeme);
- body, z nichž je příslušná závislost sestrojena, musí být v grafu vždy dobře patrné, a proto je znázorňujeme pomocí křížků, koleček, čtverečků a pod. (\wedge , $+$, \circ , \bullet , \square , $*$);
- k řádnému vynesení příslušné grafické závislosti je třeba změřit (vypočítat) alespoň 10 – 15 hodnot, v místech maxim, minim či větších zakřivení čár je třeba počítat s větší hustotou bodů, a tedy i s větší frekvencí jednotlivých měření;
- křivku rýsujeme před první a za poslední vnesený bod maximálně do poloviny průměrné vzdálenosti bodů, **extrapolace** křivky do větších vzdáleností pak znázorňujeme zásadně přerušovanou čarou (čárkovaně);

- výslednou závislost nikdy nekreslíme jako lomenou čáru případně vlnovku s řadou inflexí „bod od bodu“, ale vnesenými body vždy **proložíme** křivku či přímku podle křivítka nebo pravítka (viz obr. na následující straně);
- proložení grafické závislosti mezi naměřenými body totiž představuje určité zprůměrování hodnot a eliminaci chyb, kterými je pochopitelně zatížena každá měřící metoda;
- na jeden milimetrový papír formátu A 4 rýsujeme ve většině případů jen jeden graf (nebo jednu soustavu závislostí téhož charakteru při různých hodnotách nějakého parametru);
- je třeba dbát na to, aby graf pokrýval celou plochu papíru, proto je nutné vhodně volit měřítka na jednotlivých osách a též je dobré si uvědomit, že není vždy nejvhodnější umístit počátek souřadnicového systému do průsečíku os (tedy začínat vynášet hodnoty na osy vždy „od nuly“);
- a závěrem – ke každé vnesené grafické závislosti patří **nadpis !!!**, z něhož je patrné, o jakou závislost se jedná.

Závislost dynamické viskozity
destilované vody na teplotě



Kalibrační křivka galvanometru
s otočnou cívkou



Poznámka: Jestliže použijete ke zpracování protokolu z laboratorní úlohy počítač, pak zásady vyjádřené v bodech A) až H) platí naprosto stejně. Stejně tak platí i zásady, jež jsou vyslovené v bodě I), pro **grafické zpracování naměřených závislostí** jen s jediným rozdílem, že v takovém případě pochopitelně nepoužíváte milimetrový papír. Jinak veškeré požadované náležitosti musí váš graf zkonstruovaný počítačem obsahovat (zde se nejvíce chyb zejména objevuje při prokládání křivek vnesenými body).

Skládání sil

Úkol: Vyšetřovat rovnováhu tří sil, působících na tuhé těleso v jednom bodě.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Při skládání soustavy několika sil působících na tuhé těleso se snažíme účinek těchto sil nahradit působením síly jediné. Musí být však při tom zachován jak posuvný, tak i otáčivý účinek původní soustavy sil, to znamená, že výslednice F takové soustavy bude dána vektorovým součtem skládaných sil

$$F = \sum_{k=1}^n F_k \quad (1)$$

a navíc i její moment počítaný vzhledem k libovolnému nehybnému bodu O bude dán vektorovým součtem momentů skládaných sil počítaných k témuž bodu O

$$M = \sum_{k=1}^n M_k \quad (2)$$

Pozn.: Při skládání sil působících na tuhé těleso stačí vyšetřovat pouze působení sil vnějších, neboť síly vnitřní mají vždy nulovou výslednici i nulový výsledný moment.

Rovnovážná poloha tělesa

Tuhé těleso se nachází v rovnovážné poloze, je-li v dané inerciální soustavě v klidu. Nutnou podmínkou pro to, aby tuhé těleso v rovnovážné poloze bylo, je rovnováha vnějších sil, jež na těleso působí *a současně* také rovnováha momentů těchto sil.

a) Rovnováha vnějších sil působících na tuhé těleso

Ⓜ vnější síly F_k ($k = 1, 2, \dots, n$), jež působí na tuhé těleso, jsou v rovnováze právě tehdy, je-li jejich výslednice nulová. To znamená, že vektorový součet těchto sil musí být roven nule

$$\sum_{k=1}^n F_k = \mathbf{0} \text{ N} \quad (3)$$

b) Rovnováha momentů vnějších sil působících na tuhé těleso vzhledem k danému bodu O

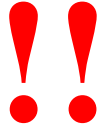
Ⓜ momenty M_k vnějších sil působících na tuhé těleso počítané vzhledem k nehybnému bodu O jsou v rovnováze právě tehdy, je-li jejich výsledný moment vzhledem k témuž bodu nulový,

$$\sum_{k=1}^n M_k = \mathbf{0} \text{ Nm} \quad M_k = \mathbf{r}_k \times \mathbf{F}_k \quad (4)$$

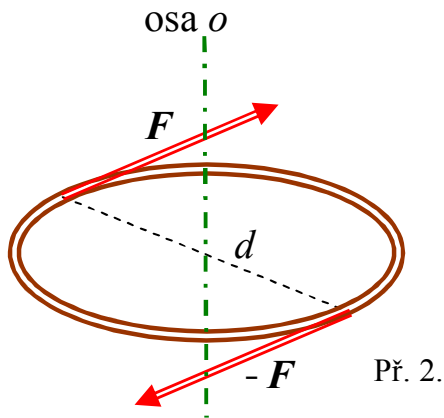
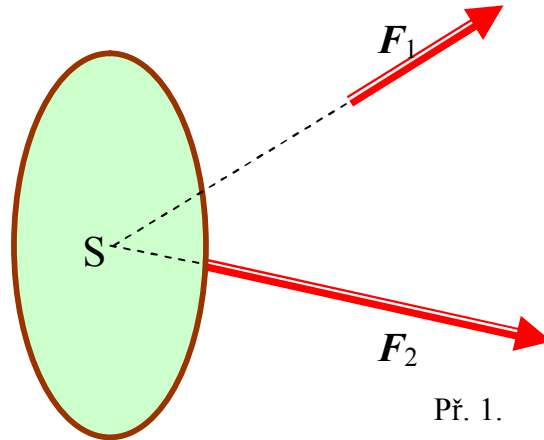
kde \mathbf{r}_k je polohový vektor působíště síly F_k vůči bodu O .

Jestliže všechny vnější síly působí **v jednom bodě** tuhého tělesa, je postačující podmínkou pro to, aby bylo těleso v rovnovážné poloze, podmínka rovnováhy těchto sil (3). V takovém případě je totiž podmínka pro rovnováhu momentů (4) splněna automaticky (všechny skládané síly mají totiž stejné působíště a jeho polohový vektor vzhledem k libovolnému bodu v prostoru je pro všechny síly i pro sílu výslednou identicky stejný).

Budou-li vnější síly působit **v různých bodech** tuhého tělesa, musí být splněny současně obě dvě výše uvedené podmínky (3) i (4), neboť platnost (či neplatnost) jedné z nich automaticky nezaručuje i platnost (či neplatnost) druhé – viz dva následující příklady.



Př. 1.: Dvě síly F_1 a F_2 působí na tuhé těleso tak, že obě jejich vektorové přímky procházejí hmotným středem tělesa S . Výslednice sil F je nenulová, výsledný silový moment M počítaný vzhledem k hmotnému středu nulový je. Těleso koná pouze **posuvný pohyb**.



Př. 2.: Na těleso působí dvojice sil F a $-F$. Jejich výslednice je evidentně nulová, ale výsledný silový moment je nenulový (jeho velikost $M = F \cdot d$). Těleso koná pouze **rotační pohyb**.

Podmínky rovnováhy (3) a (4) jsou vyjádřeny ve vektorovém tvaru. V trojrozměrné kartézské soustavě souřadné je pak lze rozepsat do jednotlivých složek:

- **podmínka silové rovnováhy:**

$$\sum_{k=1}^n F_{kx} = 0 \text{ N} , \quad \sum_{k=1}^n F_{ky} = 0 \text{ N} , \quad \sum_{k=1}^n F_{kz} = 0 \text{ N} \quad (5)$$

- **podmínka momentové rovnováhy:**

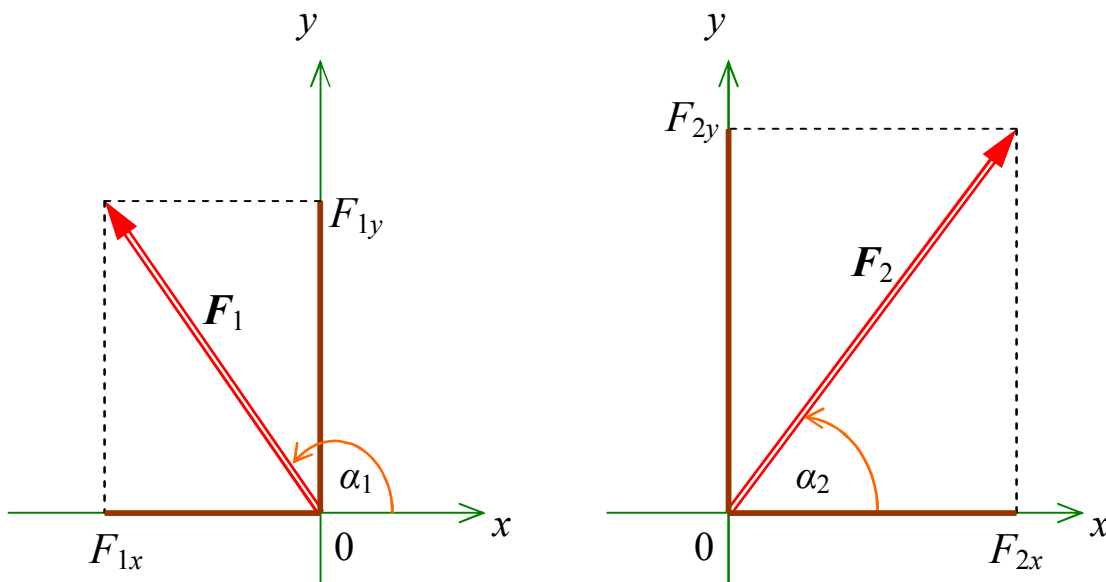
$$\sum_{k=1}^n M_{kx} = 0 \text{ Nm} , \quad \sum_{k=1}^n M_{ky} = 0 \text{ Nm} , \quad \sum_{k=1}^n M_{kz} = 0 \text{ Nm} \quad (6)$$

V naší úloze budeme pracovat pouze se třemi silami působícími v jedné rovině – v rovině pracovní desky. Lze snadno dokázat, že v případě **různoběžných** sil (ať už působí v jednom nebo různých bodech roviny), je postačující podmínkou rovnováhy podmínka silová (3), platnost momentové (4) je pak automaticky zaručena.

Působí-li síly v jedné rovině, lze při použití pravoúhlé souřadnicové soustavy každou sílu rozložit na dvě složky F_x a F_y ve směru os x a y . Jejich velikost lze snadno vyjádřit pomocí vztahů

$$F_{kx} = |F_k| \cos a_k \quad , \quad F_{ky} = |F_k| \sin a_k \quad (7)$$

kde $|F_k|$ je velikost příslušné síly a a_k je směrový úhel, jenž svírá vektor síly F_k s kladnou částí osy x (viz následující obr. 1).



Obr. 1: Určení složek vektoru síly

Směrový úhel a přitom měříme zásadně v jednom směru, a to od kladné části osy x **proti směru chodu hodinových ručiček**. Jedině tak nám totiž vyjdou v prvním kvadrantu obě složky síly kladné, v druhém kvadrantu x -ová záporná a y -ová kladná, atd.

K výpočtu úhlu a lze využít nejlépe goniometrickou funkci tangens, jejíž hodnotu určíme vytýčením vhodného pravoúhlého trojúhelníka na pracovní ploše s milimetrovou sítí. Přitom je potřeba (pro přesnost měření) volit rozměry tohoto trojúhelníka co největší.

Podmínku silové rovnováhy v rovině pak vyjadřují pouze dvě rovnice pro x -ové a y -ové složky

$$\sum_{k=1}^n F_{kx} = 0 \text{ N} \quad , \quad \sum_{k=1}^n F_{ky} = 0 \text{ N} \quad . \quad (8)$$

Jinými slovy, má-li být celý systém v rovnováze, musí být v rovnováze složky všech působících sil.

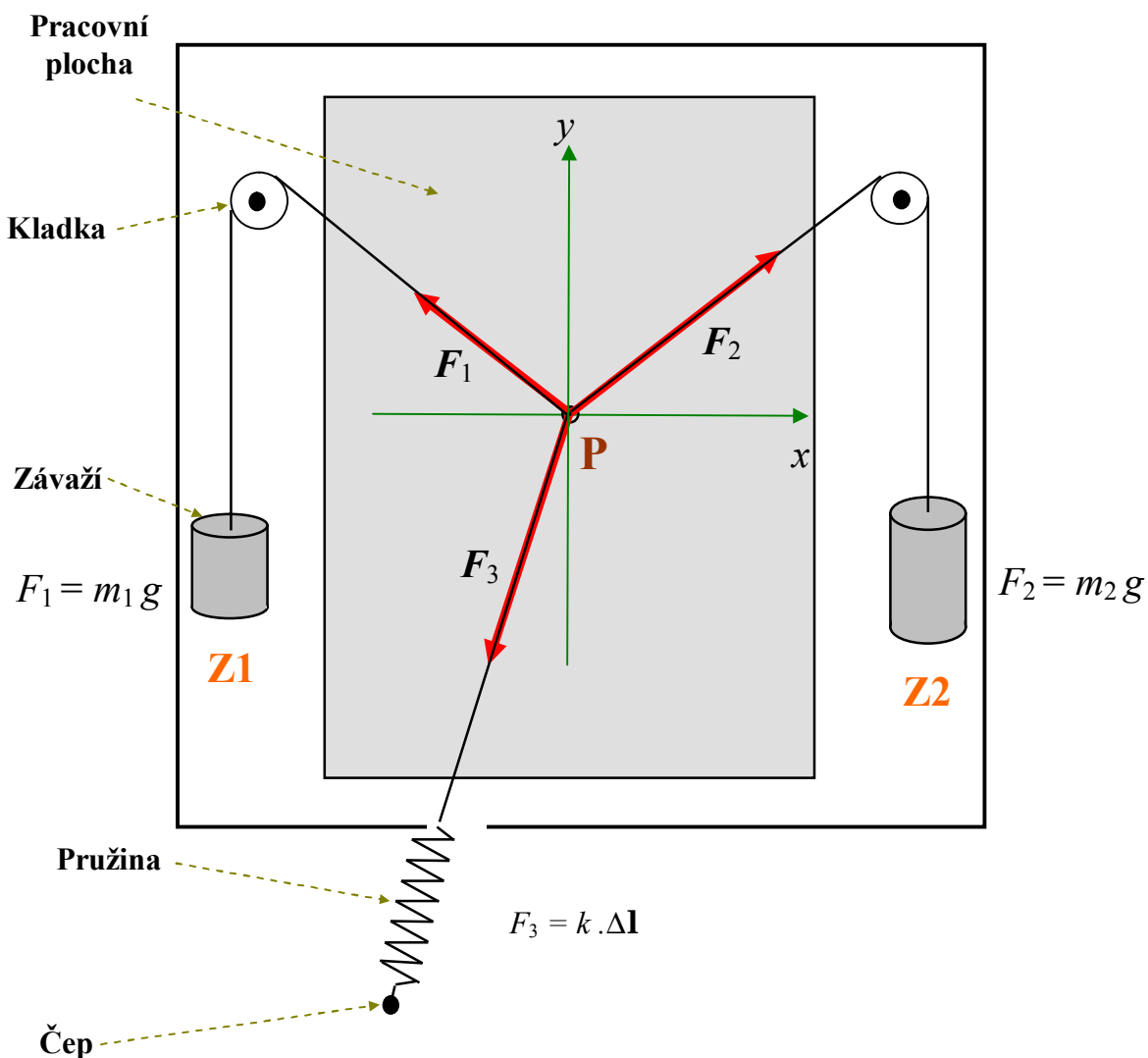
Naopak, při znalosti složek lze snadno vypočítat velikost odpovídající síly podle vztahu

$$|\mathbf{F}_n| = \sqrt{(F_{nx})^2 + (F_{ny})^2} \quad . \quad (9)$$

Postup práce:

Určování velikosti jedné neznámé síly

Skládání a rovnováhu sil vyšetřujeme na svislé pracovní ploše, jež je schématicky znázorněna na obr.2. Dvě známé síly F_1 a F_2 jsou představovány tíhovými silami závaží **Z1** a **Z2**, neznámá síla F_3 , jež s nimi udržuje rovnováhu, je síla pružnosti daná působením napnuté pružiny.



Obr. 2: Schéma stojanu s pracovní plochou při vyšetřování rovnováhy sil se společným působišťem **P**.

|| Před vlastním zahájením práce vám vyučující stanoví, kterou kombinaci dvou závaží a jedné pružiny budete proměřovat.

Úkoly:

1. Stanovení hmotnosti závaží a tuhosti pružin.

a) Zvažte obě závaží s přesností na desetiny gramu a vypočítejte velikosti příslušných tíhových sil.

b) Změřte tuhost zvolené pružiny k následujícím způsobem:

Ⓡ posuvným měřítkem změřte délku nenapnuté pružiny, kterou označte \mathbf{l}_0 ; pružinu pak volně zavěste na některý z čepů na stojanu;

Ⓡ na pružinu postupně zavěšujte různá závaží (Z1 až Z4), pokaždé změřte délku napnuté pružiny a označte ji \mathbf{l}_1 až \mathbf{l}_4 .

Ⓡ pro prodloužení $\Delta \mathbf{l}_i = \mathbf{l}_i - \mathbf{l}_0$ pružiny musí platit vztah

$$m_i g = k_i \cdot \Delta \mathbf{l}_i \quad , \quad (10)$$

kde k_i je příslušná tuhost pružiny a m_i hmotnost závaží.

Ⓡ střední hodnota tuhosti \bar{k} příslušné pružiny je pak dána aritmetickým průměrem všech čtyř měření na dané pružině

$$\bar{k} = \frac{1}{4}(k_1 + k_2 + k_3 + k_4) \quad . \quad (11)$$

Pokud se ovšem některá ze čtyř hodnot tuhosti k_i výrazně odlišuje od ostatních, vyřaďte ji a výpočet střední hodnoty proveďte pouze ze zbývajících tří.

2. Určení velikosti neznámé síly F_3

Ⓡ Podle pokynů vyučujícího sestavte soustavu **tří sil** působících **v jednom bodě** (viz obr. 2). Přitom dvě tíhové síly budete považovat za známé skládané síly F_1 a F_2 , neznámou silou bude pro nás síla F_3 , jež je dána působením napnuté pružiny.

Ⓡ Hodnoty zapisujte do následující tabulky, k určení směrových úhlů α_1 a α_2 přitom využijte milimetrovou síť na pracovní ploše (viz obr. 1 v obecné části).

Tabulka – určení velikosti neznámé síly: ($\Delta \mathbf{l}_3 = \dots\dots\dots$ mm)

síla F_1	$m_1 =$ g	$F_1 =$ N	$\alpha_1 =$ °	$F_{1x} =$ N	$F_{1y} =$ N
síla F_2	$m_2 =$ g	$F_2 =$ N	$\alpha_2 =$ °	$F_{2x} =$ N	$F_{2y} =$ N
síla F_3				$F_{3x} =$ N	$F_{3y} =$ N

Ⓡ Velikosti složek F_{3x} a F_{3y} neznámé síly F_3 vypočítáte na základě podmínky (8). Musí platit

$$F_{3x} = -(F_{1x} + F_{2x}) \quad ; \quad F_{3y} = -(F_{1y} + F_{2y}) \quad . \quad (12)$$

Velikost F_3 neznámé síly pak určíte podle vztahu (9)

$$F_3 = |\mathbf{F}_3| = \sqrt{(F_{3x})^2 + (F_{3y})^2} \quad .$$

Ⓡ Takto vypočítanou velikost F_3 neznámé síly na závěr **porovnejte s hodnotou zjištěnou pomocí prodloužení $\Delta \mathbf{l}_3$ pružiny** s využitím vztahu $F_3 = \bar{k} \Delta \mathbf{l}_3$.

Balistické kyvadlo

Úkol: Zjistěte s pomocí balistického kyvadla rychlost kuličky vystřelené různou silou v ústí hlavně vrhacího zařízení.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

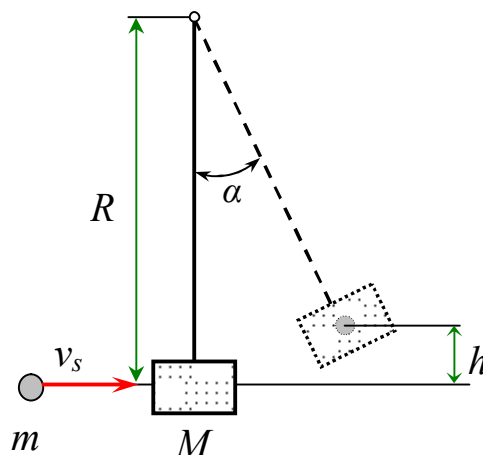
Obecná část:

Balistické kyvadlo je klasické zařízení pro určování rychlosti střely. Skládá se z těžkého tělesa hmotnosti M , které je zavěšeno na dlouhém závěsu s nízkou hmotností, nejlépe bifilárním. V našem případě budeme používat zjednodušenou variantu kyvadla s jednoduchým závěsem délky R (viz obr. 1). Rychlost střely v_s hmotnosti m se určí z výchylky α závěsu balistického kyvadla, jež střela zasáhne v jeho klidové poloze ($v_0 = 0 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$). Bezprostředně po zásahu se pohybuje kyvadlo se střelou rychlostí v_1 (při zásahu se jedná o nepružný ráz) a následně vystoupí do výšky h nad svou rovnovážnou polohou.

Jelikož se jedná o silově izolovanou soustavu střela – kyvadlo, zůstává celková hybnost této soustavy zachována (**platí zákon zachování hybnosti**). Musí tedy nutně platit podmínka

$$m \cdot v_s = (M + m) \cdot v_1 \quad . \quad (1)$$

Obr. 1.



Pro pohyb kyvadla **po zásahu střelou** musí zase platit zákon zachování mechanické energie, tedy počáteční kinetická energie kyvadla se musí rovnat jeho konečné potenciální energii ve výšce h

$$\frac{1}{2} \cdot (M + m) \cdot v_1^2 = (M + m) \cdot g \cdot h \quad . \quad (2)$$

Kombinací obou rovnic (1) a (2) můžeme pro velikost rychlosti střely jednoduše odvodit vztah

$$\boxed{v_s = \frac{m + M}{m} \cdot \sqrt{2gh}} \quad . \quad (3)$$

Vzhledem k používanému experimentálnímu uspořádání je pak výhodné nahradit veličinu h výrazem

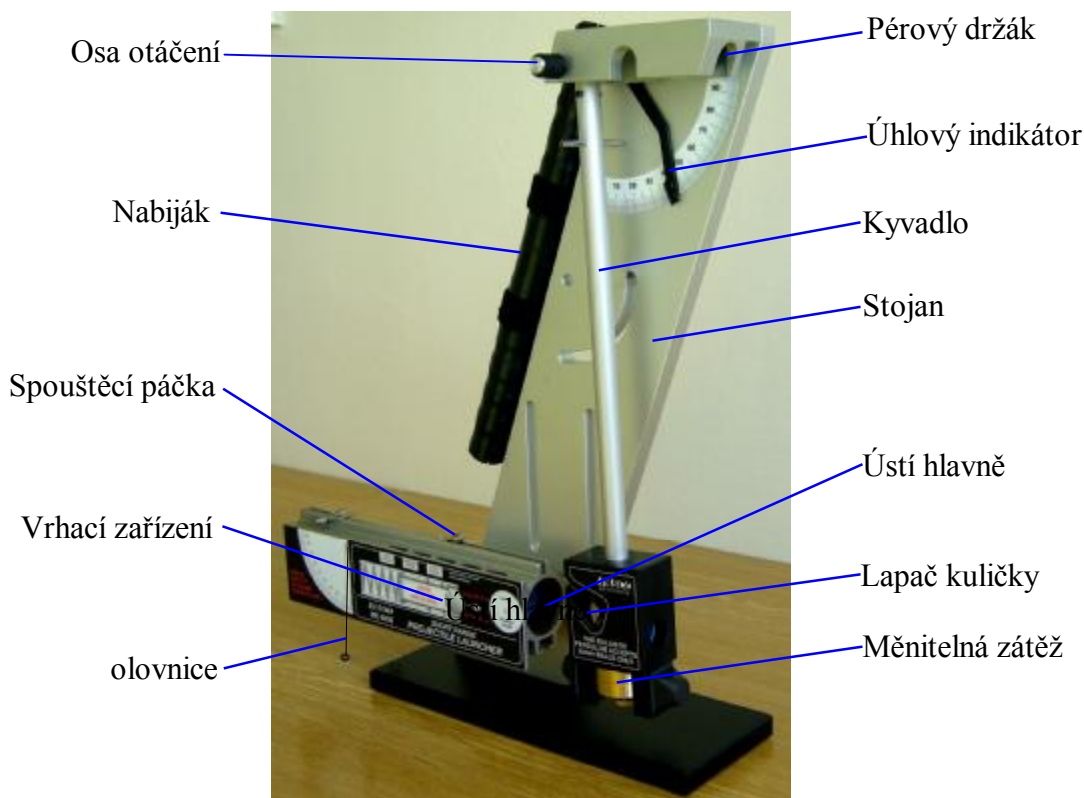
$$h = R \cdot (1 - \cos \alpha) \quad .$$

Pracovní postup:

K experimentu použijte balistické kyvadlo firmy PASCO Scientific (USA) – viz obr. 2.

- Ⓡ Před vlastním měřením **určete hmotnost ocelové kuličky m** ; hmotnost kyvadla M a vzdálenost R těžiště kyvadla od osy otáčení jsou známé veličiny:

$$\begin{aligned} M &= 246,9 \text{ g} \quad , \\ R &= 28,2 \text{ cm} \quad . \end{aligned}$$



Obr. 2.

- 1) Otočte kyvadlo do vodorovné polohy a zajistěte ho zacvaknutím do pérového držáku.
- 2) Vložte ocelovou kuličku do hlavně a zatlačte ji s pomocí nabijáku, až spoušť zachytí píst v jedné ze tří poloh (nikdy nepoužívejte nabiják aniž by kulička nebyla v hlavni).
- 3) Vraťte kyvadlo do svislé polohy a nastavte úhlový indikátor na nulu.
- 4) Zatáhnutím za spouštěcí páčku vystřelte kuličku do kyvadla a odečtěte úhel vychýlení α .
- 5) Zopakujte postup podle bodů 1 až 4 s tím rozdílem, že úhlový indikátor nastavíte na úhel o jeden až dva stupně menší než byl úhel α , který kyvadlo dosáhlo při předchozím výstřelu. (Pokuste se vysvětlit důvod tohoto postupu).
- 6) Stejným způsobem proveďte alespoň dva další výstřely.
- 7) Naměřené hodnoty zprůměrujte a vypočítejte rychlost kuličky při výstřelu.

- Ⓡ Po dohodě s vyučujícím pozměňte některé parametry experimentu a podle bodů 1) až 7) proveďte další měření rychlosti kuličky.

Nikdy se nedívejte do hlavně zepředu !!!

Nabití hlavně kontrolujte vždy z boku !!!

Používejte ochranné brýle !!!

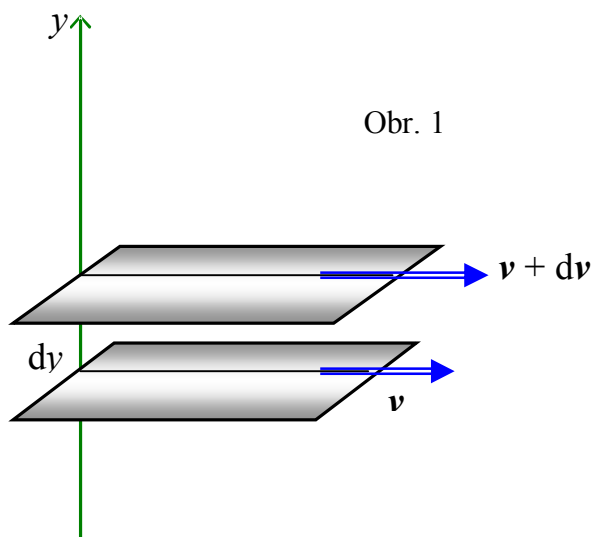
Měření koeficientu viskozity

Úkol: Změřit dynamickou viskozitu destilované vody absolutní metodou a její závislost na teplotě relativní metodou.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Na rozdíl od ideální kapaliny nejsou reálné kapaliny dokonale tekuté. Při laminárním proudění reálné kapaliny trubicí se zvyšuje její rychlost směrem ke středu trubice. Vrstva kapaliny mající vyšší rychlost se snaží zrychlovat vrstvu pomalejší a naopak pomalejší brzdí rychlejší. Mezi vrstvami kapaliny, jež se pohybují různou rychlostí, tak vzniká tečné napětí t - dochází k vnitřnímu tření v reálné kapalině.



Veličinou, jež charakterizuje míru tohoto tření, je **dynamická viskozita** h . Je vlastně konstantou úměrnosti ve vztahu vyjadřujícím přímou úměrnost mezi velikostí tečného napětí t a rychlostním spádem dv/dy (tj. poměrem přírůstku velikosti rychlosti dv ve vrstvách vzdálených o dy kolmo na směr proudění - viz obr. 1 - ku této vzdálenosti). Platí

$$t = h \frac{dv}{dy} \quad (1)$$

V soustavě SI je jednotkou dynamické viskozity jeden $\text{kg} \cdot \text{m}^{-1} \cdot \text{s}^{-1}$, používá se také ekvivalentní Pa.s.

Podíl dynamické viskozity h a hustoty r dané kapaliny pak definuje další charakteristickou veličinu reálných kapalin **kinematickou viskozitu**

$$\nu = \frac{h}{r} \quad (2)$$

Její jednotkou v soustavě SI je jeden $\text{m}^2 \cdot \text{s}^{-1}$.

Proudí-li kapalina laminárně úzkou trubicí, je její rychlost u stěny nulová a lze odvodit, že nárůst rychlosti ve směru kolmém na směr proudění roste se čtvercem vzdálenosti od stěny. Na základě této skutečnosti odvodil francouzský lékař a fyzik Jean-Louis Marie Poiseuille [poazej] (1799 – 1869) vztah pro objem V kapaliny proteklé trubicí za dobu T ve tvaru

$$V = \frac{p \cdot r^4}{8h} \cdot \frac{\Delta p}{l} \cdot T \quad (3)$$

kde r je poloměr trubice, l její délka, h dynamická viskozita kapaliny a Δp tlakový rozdíl mezi konci trubice.

Je-li tlakový rozdíl Δp způsoben hydrostatickým tlakem kapaliny samotné (např. při výtoku kapaliny z nádoby opatřené na boku trubící či kapilárou), platí

$$\Delta p = h \cdot r \cdot g$$

kde h je výška hladiny kapaliny nad výtokovým otvorem, r její hustota a g tíhové zrychlení. V takovém případě lze ze vztahu (3) vyjádřit dynamickou viskozitu výrazem

$$h = \frac{\rho r^4 h r g T}{8 l V} \quad (4)$$

Známe-li nebo změříme-li hodnoty r , l , h , r , V a T , můžeme pak dynamickou viskozitu dané kapaliny snadno vypočítat.

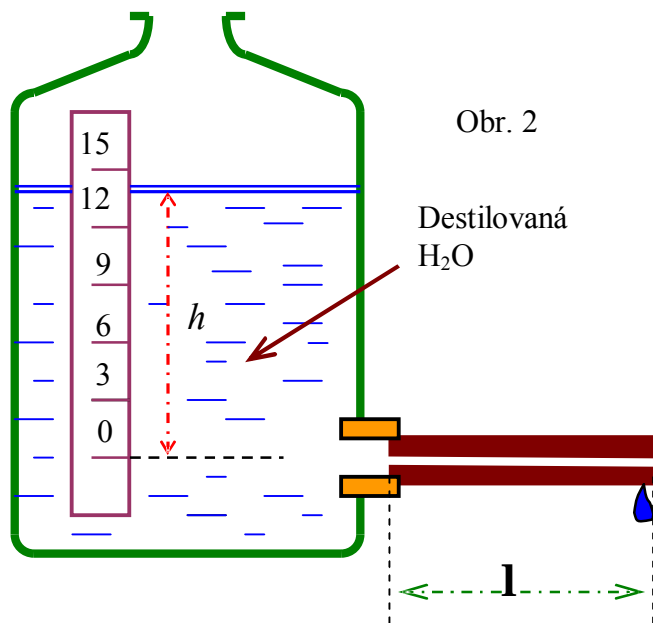
Postup měření :

I. Absolutní metoda měření dynamické viskozity při pokojové teplotě

K měření koeficientu viskozity použijeme nádobu dostatečného průměru s bočním otvorem, v němž je připevněna trubice s kapilárou (viz obr. 2). Průtok kapaliny právě touto kapilárou umožní získat potřebné údaje do vztahu (4) pro výpočet dynamické viskozity kapaliny. Tou bude v našem případě destilovaná voda.

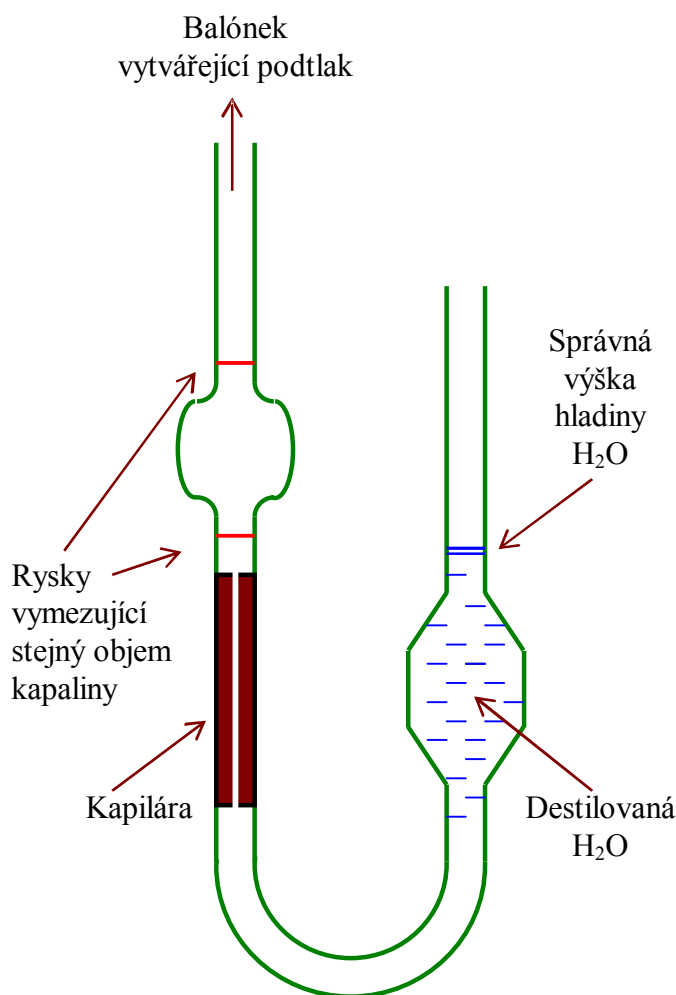
Tlakový rozdíl mezi konci kapiláry Δp je způsoben právě hydrostatickým tlakem kapaliny v nádobě, jejíž výšku h lze měřit na milimetrovém měřítku. Je-li průměr nádoby dostatečně velký a je-li objem V vyteklé kapaliny naopak malý, zůstane výška hladiny h vzhledem k ose kapiláry během měření konstantní.

Poloměr r kapiláry bude zadán, její délku l změříte posuvným měřítkem, dobu výtoku T stopkami, objem V vyteklé kapaliny odměrným válcem, hustotu kapaliny r při příslušné teplotě t odečtete v tabulkách. Dynamickou viskozitu h pak vypočítáte pomocí vztahu (4).



II. Relativní měření Ostwaldovým viskozimetrem – závislost dynamické viskozity na teplotě

Dynamická viskozita h je veličinou, jež **silně závisí na teplotě kapaliny**. Tuto závislost lze změřit např. pomocí Ostwaldova viskozimetru, jenž je schématicky naznačen na obr. 3. Po nasátí měřené kapaliny do levého ramene viskozimetru se měří čas T , jenž potřebuje k průtoku kapilárou kapalina o objemu obsaženém v horní baňce. Tento objem je přesně definován dvěma ryskami (jedna je nad a druhá pod touto baňkou). Přetlak Δp , pod nímž kapalina protéká Ostwaldovým viskozimetrem, je časově proměnný (hladina kapaliny klesá) a navíc závisí i na hustotě měřené kapaliny, jež se s teplotou také mění! Aby bylo měření prováděno správně a pokaždé za stejných podmínek, je nutné aby viskozimetr zaujímal stále přesně svislou polohu.



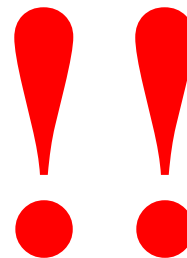
Obr. 3

Teplotní závislost dynamické viskozity

$$h = f(t)$$

destilované vody vyšetřujeme tak, že Ostwaldův viskozimetr ponoříme do vodní lázně, jejíž teplotu t regulujeme pomocí termostatu. Protože se u tohoto měření jedná o relativní metodu, **musíme nutně znát počáteční hodnotu dynamické viskozity h_0** námi měřené kapaliny při výchozí teplotě t_0 . K této hodnotě h_0 je pak nutné všechny další výpočty z měření při vyšších teplotách t vztahovat!

Ve vašem případě bude touto známou výchozí hodnotou dynamická viskozita h_0 zjištěná absolutní metodou při pokojové teplotě t_0 předchozím měřením.



První měření relativní metody s Ostwaldovým viskozimetrem proto provádíme vždy při stejné teplotě jako metodu první (tj. absolutní). Změříme dobu průtoku kapaliny T_0 , a pak postupně zvyšujeme teplotu a stejným způsobem v měření pokračujeme. Tlakový rozdíl mezi na konci kapiláry není v tomto případě konstantní (výška h hladiny vody postupně klesá!), a proto nelze vycházet při výpočtu přímo ze vztahu (4). Je-li však viskozimetr stále ve stejné svislé poloze, probíhá pokles výšky při všech měřeních stejně, a pak lze psát, že pro dynamické viskozity platí

$$h_0 = \textit{konst.} \cdot r_0 \cdot T_0 \quad \text{pro výchozí teplotu } t_0, \text{ resp.}$$

$$h_n = \textit{konst.} \cdot r_n \cdot T_n \quad \text{pro libovolnou teplotu } t_n,$$

kde *konst.* je jistá konstanta charakterizující daný viskozimetr, r_0 a r_n hustoty měřené kapaliny při teplotách t_0 a t_n a T_0 a T_n pak příslušné doby průtoků kapaliny viskozimetrem při těchto teplotách.

Dáme-li poslední dva vztahy do poměru, dostáváme hledaný výraz pro dynamickou viskozitu kapaliny h_n při teplotě t_n

$$h_n = h_0 \cdot \frac{r_n}{r_0} \cdot \frac{T_n}{T_0} \quad (5)$$

Úkoly:

1) Stanovte dynamickou viskozitu h_0 destilované vody **absolutní metodou** při pokojové teplotě t_0 .

Při tomto měření proveďte postupně pět měření při různých výškách hladiny h kapaliny v nádobě. Výšku volte alespoň 10 cm! Objem V kapaliny proteklé kapilárou určujte odměrným 10 ml válcem, délku kapiláry změřte posuvným měřítkem, čas stopkami. Poloměr r kapiláry je znám, ten neměříte – je uveden přímo na kapiláře.

Výsledky měření uvádějte v následující tabulce I:

Tabulka I: Absolutní metoda měření dynamické viskozity

$$r_0 = \dots\dots\dots \text{ kg.m}^{-3}$$

$$l = \dots\dots\dots \text{ m}$$

$$V = 10 \text{ ml}$$

$$r = \dots\dots\dots \text{ mm}$$

$$t_0 = \dots\dots\dots \text{ }^\circ\text{C}$$

n	h (cm)	T (s)	h_0 ($\text{kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$)
1			
5			

$$\bar{h}_0 = \dots\dots\dots \text{ kg.m}^{-1}.\text{s}^{-1}$$

Výpočet provádějte pomocí vztahu (4). Ze získaných výsledků jednotlivých měření pak určete **průměrnou hodnotu dynamické viskozity** \bar{h}_0 při teplotě t_0 , **pravděpodobnou chybu** tohoto průměru a **relativní chybu** měření.

2) Proveďte **měření teplotní závislosti** dynamické viskozity destilované vody.

Viskozitu měříte relativní metodou pomocí Ostwaldova viskozimetru. Měření začnete při stejné teplotě t_0 , při níž jste prováděli metodu absolutní. Pak postupně zvyšujte teplotu zhruba po pěti stupních (**maximálně však do 60 °C !!!**). Před každým měřením ale vyčkejte několik minut, aby se ustálila teplota v celém objemu aparatury. Doba průtoku T_0 , resp. T_n daného objemu destilované vody viskozimetrem měřte při každé teplotě **vždy třikrát** (zvýšíte tím přesnost metody) !

Hodnoty dynamické viskozity h_n vypočítáte ze vztahu (5), do něhož dosazujete vždy průměrnou hodnotu času ze tří provedených měření při každé teplotě. Hustotu vody při příslušné teplotě t_n odečtete z tabulek.

Naměřené hodnoty a výsledky zapisujte do následující **tabulky II**:

n	T_n (°C)	r_n (kg.m ⁻³)	T_n (s)	$\overline{T_n}$ (s)	h_n (kg.m ⁻¹ .s ⁻¹)
1	t_0	r_0	...	$\overline{T_0}$	$\overline{h_0}$ (známe)
2	...	...	...	...	.....
3	...	...	...	...	.....
4	...	...	...	...	.....
5	...	...	...	...	.....
6	...	...	...	...	.....
			...		
			...		
			...		

3) Výsledky relativní metody **zpracujte graficky**. Na vodorovnou osu nanášejte teplotu t , na osu svislou pak dynamickou viskozitu h . Do stejného grafu rovněž zakreslete závislost $h = f(t)$ vynesenu z tabulkových hodnot, **obě křivky porovnejte a rozdíly vysvětlete!**

Měření měrné tepelné kapacity pevných látek

Úkol: Určit měrné tepelné kapacity vybraných pevných látek pomocí kalorimetru.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Pod pojmem **tepelná výměna** rozumíme takový fyzikální děj, při němž se mezi dvěma tělesy předává energie jiným způsobem než konáním práce nebo výměnou látky. Tento děj se uskutečňuje náhodnými srážkami částic (atomů, molekul obou látek) na rozhraní těchto dvou těles. K tepelné výměně však může docházet i u těles, jež nejsou v bezprostředním kontaktu (např. zářením).

Skalární fyzikální veličina určená energií E , kterou při tepelné výměně předá teplejší těleso tělesu chladnějšímu, je **teplo** Q . Jeho fyzikální jednotkou je **joule** (J).

Přijme-li látka při tepelné výměně teplo Q a nedojde-li ke změně skupenství, zvýší se teplota látky o určitou hodnotu Δt . Poměr dodaného tepla Q a odpovídajícího přírůstku teploty Δt pak definuje **tepelnou kapacitu tělesa**

$$C = \frac{Q}{\Delta t} \quad . \quad (1)$$

Jednotkou tepelné kapacity je J.K^{-1} . Tepelná kapacita tělesa vlastně číselně udává, jaké teplo těleso přijme (nebo vydá), když se jeho teplota zvýší (nebo sníží) právě o jeden teplotní stupeň.

U homogenních látek (dané hmotnosti m) lze pak definovat též jejich **měrnou tepelnou kapacitu** vztahem

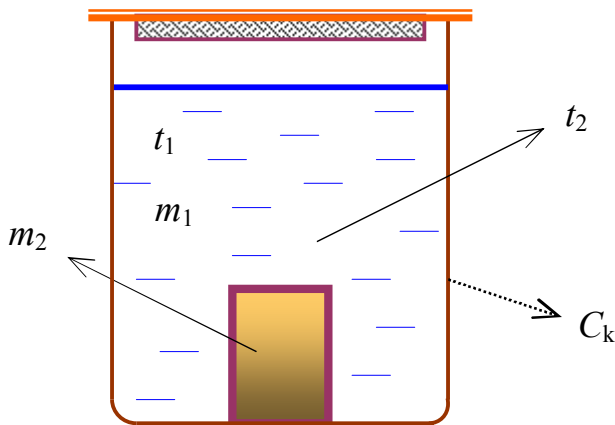
$$c = \frac{C}{m} = \frac{Q}{m\Delta t} \quad . \quad (2)$$

Jednotkou měrné tepelné kapacity je $\text{J.kg}^{-1}.\text{K}^{-1}$ a je to hodnota, jež bývá tabelována. Číselně je rovna teplu, jež přijme 1 kg stejnorodé látky, když se jeho teplota zvýší právě o jeden teplotní stupeň (resp. vydá při snížení teploty o jeden teplotní stupeň). Měrná tepelná kapacita je fyzikální veličina charakteristická pro danou látku; pro různé látky a různá skupenství má měrná tepelná kapacita různou hodnotu. Není však konstantou, její hodnota se poněkud mění v závislosti na teplotě i na tlaku. Proto se v tabulkách udává hodnota měrné tepelné kapacity pro určitou teplotu (jako např. c_{18} , c_{20} , apod.). Obecně platí, že s klesající teplotou se měrná kapacita látky snižuje; přesto ji lze považovat v nepříliš širokém teplotním intervalu (jako je tomu např. i při měření této laboratorní úlohy) za hodnotu konstantní.

Ze vztahu (2) pro měrnou tepelnou kapacitu pak vyplývá, že teplo, jež přijme homogenní látka, je přímo úměrné hmotnosti látky m a nárůstu její teploty Δt

$$Q = m \cdot c \cdot \Delta t \quad . \quad (3)$$

Stanovením měrných tepelných kapacit látek a měřením tepla při různých dějích spojených s tepelnou výměnou se zabývá **kalorimetrie**, jedna z částí experimentální fyziky. Při těchto měřeních se používá nástrojů nazývaných **kalorimetry**. Na obr. 1 je jeho jednoduché schéma.



Obr. 1

Předpokládejme, že v nádobě na vedlejším obrázku jsou dvě látky, jejichž hmotnosti jsou m_1 a m_2 . Měrné tepelné kapacity obou látek jsou c_1 a c_2 . Nechť původní teplota první látky t_1 je nižší než teplota t_2 látky druhé ($t_1 < t_2$). Mezi oběma látkami bude proto docházet tepelné výměně. Pro jednoduchost předpokládejme, že je tato tepelná výměna ideální (tedy bez jakéhokoli předávání tepla do okolí). Výměna bude probíhat tak dlouho, než nastane rovnovážný stav, při němž se teploty obou látek vyrovnají na výsledné teplotě t . Pro tuto teplotu musí logicky platit nerovnost $t_1 < t < t_2$.

V souladu se zákonem zachování energie musí platit, že teplo $Q_2 = m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t)$, jež vydá látka mající původně vyšší teplotu, se musí rovnat teplu $Q_1 = m_1 \cdot c_1 \cdot (t - t_1)$, jež naopak přijme látka, jež měla původně teplotu nižší. Tuto skutečnost vyjadřuje **kalorimetrická rovnice** ve tvaru

$$m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t) = m_1 \cdot c_1 \cdot (t - t_1) \quad . \quad (4)$$

Látkou v kalorimetru, jež má původně nižší teplotu, bývá obvykle voda (její měrná tepelná kapacita c_1 je dobře známa a má hodnotu přibližně $4\,186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$).

Při tepelné výměně se však neohřívá jen studená voda samotná, ale současně vzrůstá i teplota kalorimetru (stejně jako u vody z teploty t_1 na výslednou teplotu t). Je-li C_k kapacita kalorimetru, přejde kalorimetrická rovnice (4) do přesnějšího tvaru

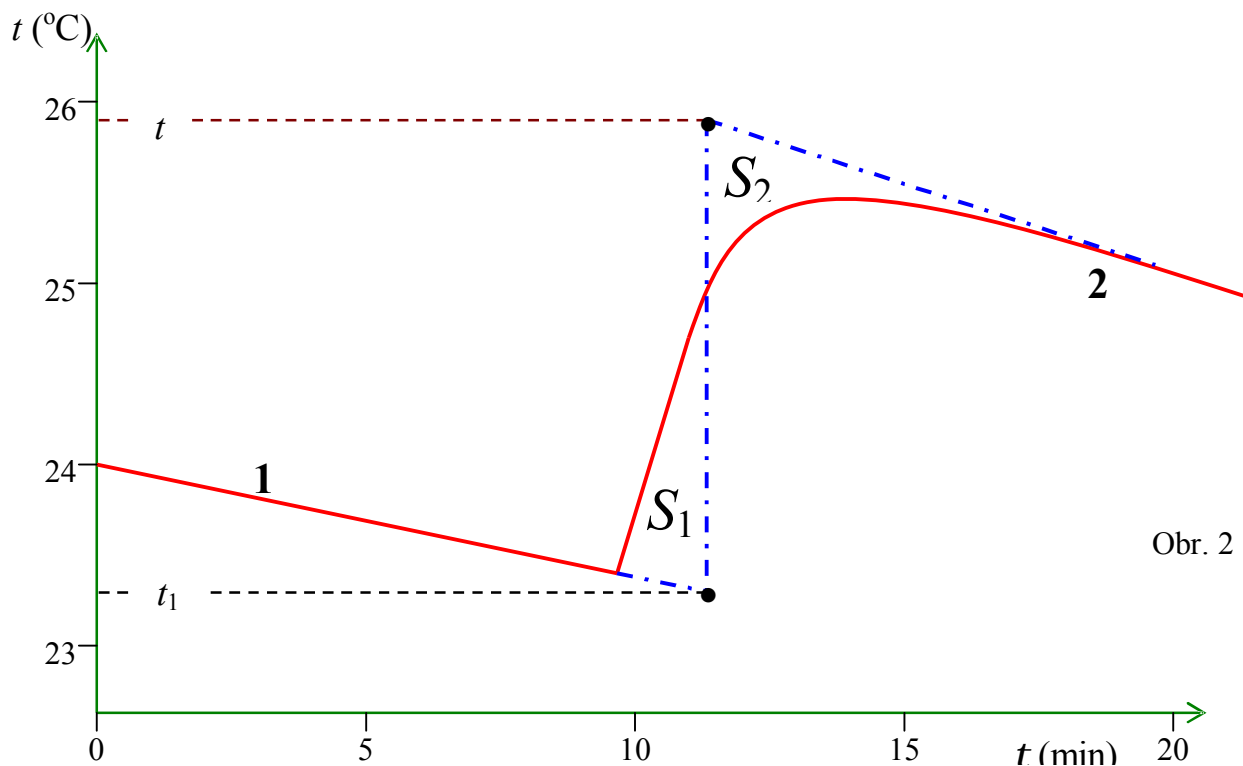
$$m_2 \cdot c_2 \cdot (t_2 - t) = m_1 \cdot c_1 \cdot (t - t_1) + C_k \cdot (t - t_1) \quad . \quad (5)$$

Pomocí této rovnice obvykle při experimentech nejprve určíme neznámou kapacitu C_k kalorimetru, a pak teprve můžeme přistoupit ke zjišťování hodnot měrných tepelných kapacit různých látek (jež v kalorimetrické rovnici vystupují jako jako veličina c_2).

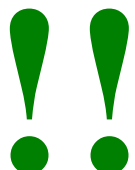
Obecný průběh teploty v kalorimetru je znázorněn na obr. 2 - plná **červená** čára). Ideální tepelnou výměnu, jež by proběhla nekonečně rychle a v dokonale izolujícím kalorimetru, znázorňuje v témž grafu čerchovaná **modrá** lomená čára. Tu lze snadno zkonstruovat tak, že nejprve prodloužíme (extrapolujeme) lineární úseky 1 a 2 skutečného průběhu teploty (úsek 1 „doprava“, úsek 2 „doleva“) a spojíme je svislicí. Tato svislice musí být vedena tak, aby dvě plochy S_1 a S_2 vymezené skutečnou a ideální závislostí byly stejně velké a aby míra kompenzace provedené na straně teploty t_1 i na straně teploty t byla stejná. Hodnoty y-ových souřadnic koncových bodů čerchované svislice pak udávají jaké by byly teploty t_1 studené vody v kalorimetru a výsledná teplota t , kdyby tepelná výměna proběhla teoreticky nekonečně rychle. **Teprve tímto grafickým vyhodnocením získané hodnoty se dosazují do vztahu pro výpočet kapacity kalorimetru C_k , získaný úpravou rovnice (5). Platí, že**

$$C_k = \left(m_2 \cdot \frac{t_2 - t}{t - t_1} - m_1 \right) \cdot c \quad (6)$$

Pozn.: V případě, že mícháme stejné kapaliny, např. teplou vodu se studenou, platí s dostatečnou přesností $c_1 = c_2 = c = 4\,186 \text{ J} \cdot \text{kg}^{-1} \cdot \text{K}^{-1}$.



Pozn.: Je třeba mít na paměti, že v reálných případech vždy dochází při tepelných výměnách mezi tělesy k určitým ztrátám tepla do okolí, a proto kalorimetrická rovnice (5) platí jen přibližně. Přesto, jak se sami budete moci přesvědčit, lze při správném měření dosáhnout velmi dobré shody mezi vámi zjištěnými údaji a tabulkovými hodnotami.



Měrnou tepelnou kapacitu měřeného tělesa pak vypočítáme z upravené kalorimetrické rovnice (5)

$$c = \frac{(m_1 c_1 + C_k) \cdot (t - t_1)}{m_2 \cdot (t_2 - t)} \quad (7)$$

Postup měření :

1) Přípravné práce:

Za účelem omezení prostožů během měření připravíme vybraná tělesa jejichž měrná tepelná kapacita má být změřena.

- a) Vážením na laboratorních vahách zjistíme s přesností na 0,1 g hmotnost tělesa m_2 .
- b) Těleso ponoříme do vodní lázně vyhřívané na teplotu t_2 (v rozmezí 80 až 90 °C) a ponecháme ho tam až do zahájení vlastního měření měrné tepelné kapacity c .

2) Měření tepelné kapacity kalorimetru C_k :

Úkol provedeme na základě definované tepelné výměny mezi dvěma stejnými látkami (teplou a studenou vodou), jejichž hmotnosti, teploty před výměnou i po výměně a měrné tepelné kapacity známe, a kalorimetrem, jehož kapacitu potřebujeme pro další měření určit.

K měření teploty a jejího časového průběhu využijeme teplotní čidlo **Pasport Temperature Sensor** jehož signal vedeme přes interface **Pasport USB Link** do notebooku a zaznamenáváme pomocí programu **DataStudio**.

- a) Nalijeme do kalorimetru 3 litry vody z vodovodu ($m_1 = 3$ kg) mající přibližně pokojovou teplotu a spustíme míchadlo (páčkový vypínač vpravo dole).
- b) Změříme teplotu vody – t_s digitálním teploměrem.
- c) Zkontrolujte, je-li připojen interface do USB portu počítače; pokud není, připojte ho.
- d) Zapneme notebook a v dialogovém okně PASPortal spustíme kliknutím na ikonu „**Launch DataStudio**“ program DataStudio.
 - Ⓡ zvětšíme velikost grafu;
 - Ⓡ kliknutím na osu y otevřeme okno „**Graph Settings**“; v něm nastavíme rozsah od teploty $(t_s - 1)$ °C do teploty $(t_s + 8)$ °C;
na ose x nastavíme čas: time minimum = 0 ; time maximum = 20 min.
Volbu potvrdíme OK.
 - Ⓡ dvojkliknutím na „**Temperature**“ (v okénku Data vlevo nahoře) otevřeme okno „**Data properties**“, ve kterém nastavíme v záložce „**numeric**“ počet desetinných míst (digits to right of decimal) na hodnotu 2 ; volbu potvrdíme OK.
V datovém řádku vybereme „**Time**“ a nastavíme počet desetinných míst na hodnotu 1.


- Ⓡ kliknutím na tlačítko „Setup“ otevřeme okno „Experiment Setup“ a v okénku „Sample rate“ nastavíme časový interval mezi jednotlivými body (např. 5 s).
 - Ⓡ okno Setup minimalizujeme nebo zavřeme (v pravém horním rohu) a v případě potřeby znovu upravíme velikost grafu.
- e) Vložíme teplotní čidlo do kalorimetru a kalorimetr uzavřeme.
- f) Spustíme program kliknutím na ikonu „start“

Protože vyrovnávání teplot uvnitř kalorimetru po nalití studené vody neprobíhá okamžitě, je třeba sledovat teplotu t_1 po jistou dobu, cca **8 minut**. Teprve na konci osmé minuty do kalorimetru nalijeme přesně odměřenou hmotnost m_2 horké vody (doporučujeme zhruba v rozmezí 0,3 kg až 0,4 kg), jejíž teplotu t_2 v rozmezí od 80 do 90 °C máme změřenou laboratorním teploměrem s přesností na 0,5 °C. V měření (teď už výsledné) teploty t v kalorimetru pak pokračujeme ještě **dalších cca 8 minut** po nalití horké vody.

Dbejte na to, aby měření probíhalo bez přerušení v jednom sledu !!!

- g) Kliknutím na ikonu „stop“ měření zastavíme.
- h) Výsledek uložíme (FILE, Save Activity as...) na adresu Dokumenty/Kalorimetrie pod svým jménem a následně exportujeme na vlastní Flashdisc ve formátu txt (FILE, Export Data..., Uložit jako typ).

V menu FILE otevřeme okno Export Data, zvolíme příslušnou sadu měření (Run) a potvrdíme OK. Tím se otevře okno Uložit jako. V něm Uložit do: zvolíme cílovou adresu (flashdisc); uložit jako typ: Text File (*.txt) a uložíme pod zvoleným názvem.

S pomocí funkce Smart (ikona ) odečteme teploty t a t_1 a vypočteme měrnou tepelnou kapacitu kalorimetru C_k podle rovnice (6). Průsečíkem záměrného kříže pohybujeme pomocí šipkových kláves ▲ a ►.

- i) S vypnutím programu počkáme na učitele.

3) Měření měrné tepelné kapacity c vybraných pevných látek

Úkol provádíme v podstatě téměř stejným postupem jako při určování tepelné kapacity kalorimetru.

Nejprve do kalorimetru nalijeme znova 2 litry (t.j. $m_1 = 2$ kg) vody z vodovodu mající přibližně pokojovou teplotu, spustíme míchadlo (páčkový vypínač vpravo dole) a po dobu osmi minut tuto teplotu zaznamenáváme jako u předchozího úkolu.

Na konci osmé minuty co nejpřesněji stanovíme teplotu t_2 a ohřáté těleso **rychle** vložíme do kalorimetru. Dalších osm minut pak sledujeme průběh výsledné teploty t v kalorimetru.

Stejným postupem jako v předchozím úkole odečteme hodnoty teplot t_1 a t odpovídající ideální nekonečně rychlé tepelné výměně. Měrnou tepelnou kapacitu měřeného tělesa pak vypočítáme z upravené kalorimetrické rovnice (7)

Měření opakujeme s tělesem z jiného materiálu.

- 4) Vypočítané hodnoty měrných tepelných kapacit vámi měřených těles **porovnejte s hodnotami uvedenými ve fyzikálních tabulkách** a případné rozdíly **vysvětlete !!!**

Poznámka

Měření výchozí teploty v programu DataStudio

Použitím klávesové zkratky **Alt + m** spustíme záznam teploty a na ose x odečteme její hodnotu, kterou zaznamenáme jako t_s

Po odečtení zastavíme záznam použitím klávesové zkratky **Alt + .**

Kliknutím na plochu grafu vymažeme body.

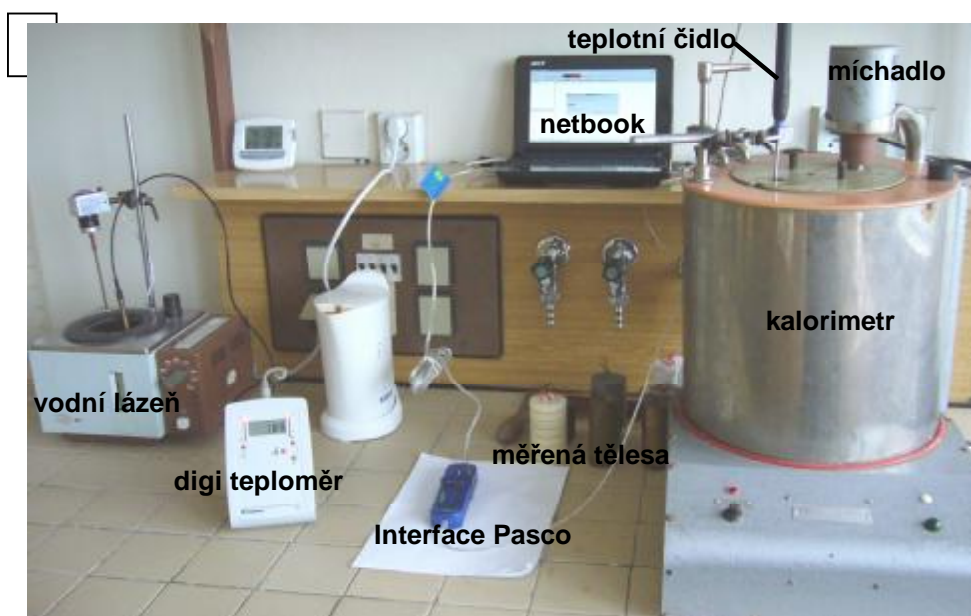
V menu zvolíme kliknutím Experiment

Monitor Data

Stop Data

Na ose y odečíst teplotu

Kliknutím na plochu grafu vymazat body



Zařízení pro měření měrné tepelné kapacity

Měření odporu rezistorů

Úkol: Proměřit sadu rezistorů s neznámým odporem různými metodami a porovnat přesnost jednotlivých měření.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Elektrický odpor rezistorů lze měřit různými metodami, což souvisí jednak s rozsahem hodnot měřených odporů a jednak s požadovanou přesností měření. V těchto metodách většinou používáme zapojení se zdroji konstantního stejnosměrného proudu v ustáleném stavu, ale lze použít i zdrojů střídavých proudů, což obvykle nevyžaduje žádné zásadní změny ve způsobu měření. Pouze při vyšších frekvencích střídavého proudu (zhruba nad 1 kHz) mohou přesnost výsledku negativně ovlivnit parazitní indukčnosti a kapacity měřených rezistorů i jiných částí obvodu.

Známe metody přímé, jež jsou založeny na bezprostřední aplikaci Ohmova zákona

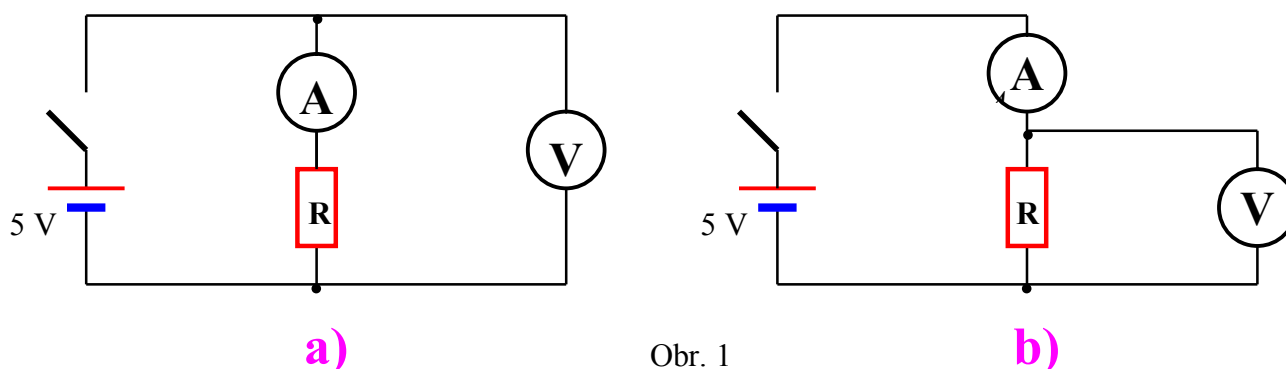
$$R = \frac{U}{I}, \quad (1)$$

a řadu nepřímých metod, jež k určení neznámého odporu používají v zásadě porovnání s jedním nebo více odpory známými. Jisté specifické postavení má nepřímá metoda měření velkých odporů vybíjením kondenzátoru přes měřený odpor, jež se provádí jako samostatná laboratorní úloha.

I. Přímé metody

Elektrický odpor rezistoru můžeme určit z Ohmova zákona (1), změříme-li proud I protékající rezistorem o hledaném odporu R při odpovídajícím napětí U mezi svorkami rezistoru. Musíme si však uvědomit, že přístroje, jimiž měříme proud a napětí (ampérmetr a voltmetr), však vždy do jisté míry ovlivňují svými vlastními vnitřními odpory R_A resp. R_V velikosti obou zmíněných veličin v obvodu, a získaný výsledek – odpor R rezistoru – je tak vždy pouze přibližný.

Při zapojení přístrojů do obvodu lze v zásadě užít dva různé způsoby (viz následující obr. 1):



Obr. 1

V zapojení podle obr. 1a) měříme správně proud, ale dopouštíme se určité nepřesnosti při měření napětí (to neměříme na svorkách rezistoru, ale na celé sériové kombinaci rezistor – ampérmetr). Metoda tak dává výsledek o něco vyšší, než je hodnota měřeného odporu.

V případě zapojení obvodu podle obr. 1b) je tomu naopak – správně je tentokrát měřena hodnota napětí na svorkách rezistoru, ale ampérmetr ukazuje celkový proud protékající paralelní kombinací měřený rezistor - voltmetr. Tudíž tato metoda dává naopak výsledek o něco menší, než je skutečná hodnota měřeného odporu.

Známe-li vnitřními odpory R_A resp. R_V použitých přístrojů, lze jednoduchým výpočtem (ten si proveďte sami!) zjistit, že správná hodnota odporu R rezistoru v zapojení podle obr. 1a) je dána výrazem

$$R = \frac{U}{I} - R_A \quad , \quad (2)$$

kde R_A je odpor ampérmetru. A podobně v případě zapojení podle obr. 1b) bude hledaný odpor R vyjádřen výrazem

$$R = \frac{1}{\frac{I}{U} - \frac{1}{R_V}} \quad , \quad (3)$$

kde R_V je odpor voltmetru.

Obecně platí, že odpor ampérmetru R_A je velmi malý (ampérmetr také proto připojujeme do obvodu sériově), zatímco odpor voltmetru R_V bývá naopak vysoký (a tento měřicí přístroj zařazujeme do obvodu paralelně k měřenému prvku). Z těchto skutečností vyplývá, že zapojení podle obr. 1a) je vhodnější pro měření větších odporů, kdy lze ve výrazu (2) zanedbat vnitřní odpor ampérmetru R_A ($R_A \ll R$). Zapojení podle obr. 1b) je zase vhodnější pro odpory menší, kdy lze v takovém případě ve jmenovateli výrazu (3) zanedbat převrácenou hodnotu vnitřního odporu voltmetru $1/R_V$. Vztahy (2) a (3) tak přejdou zpět v jednoduchý matematický tvar Ohmova zákona

$$R = \frac{U}{I} \quad . \quad (1)$$

Použijeme-li u přímé metody tohoto přístupu, dopouštíme se sice určité nepřesnosti, ale je si třeba také uvědomit, že i samotné měřicí přístroje měří s jistou chybou (mají vždy danou třídu přesnosti), což může do jisté míry naše zjednodušení vztahů (2) a (3) kompenzovat.

Na přímé metodě je též založeno měření elektrického odporu rezistoru ohmmetrem. Tento přístroj je v podstatě ampérmetr, jenž měří proud protékající rezistorem o neznámém odporu R_x , přičemž zdroj napětí U (obvykle baterie) je už v přístroji zabudován. Údaj na displeji přístroje je pak uváděn přímo v ohmech. Ohmmetry obvykle slouží k rychlému měření nevyžadujícímu příliš velkou přesnost.

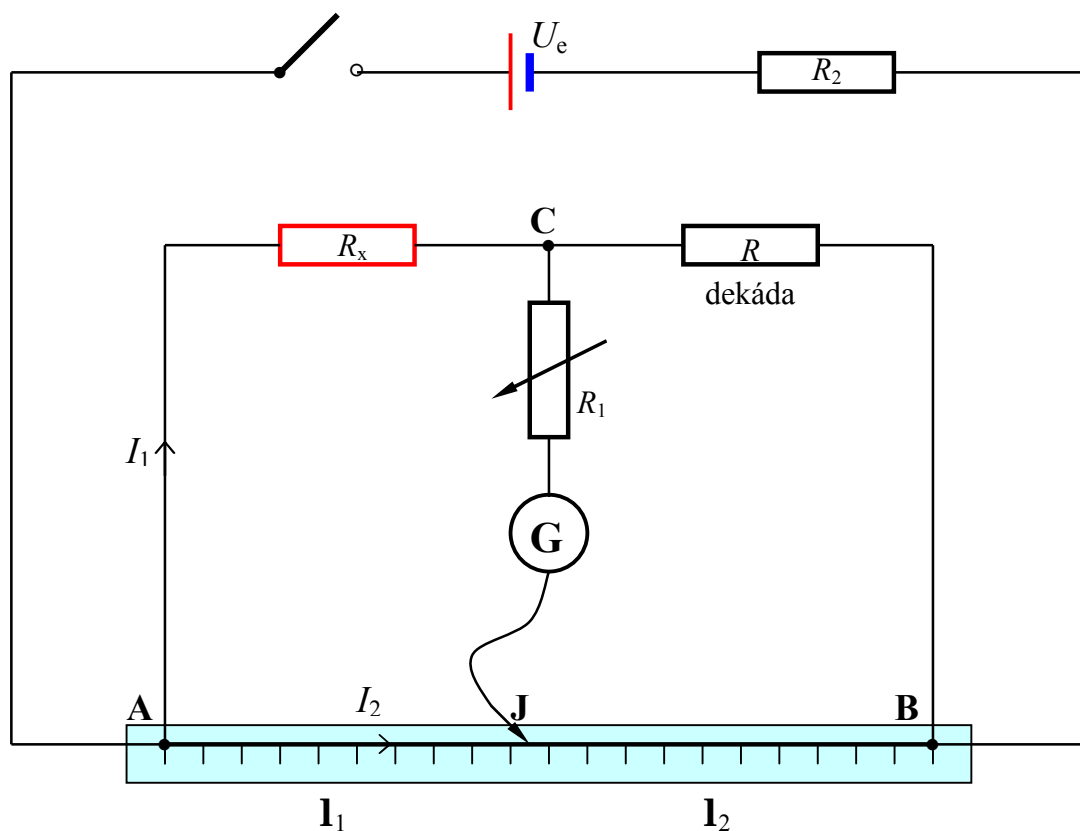
II. Nepřímé metody

Mezi nejběžnější nepřímé metody měření elektrického odporu patří např. metoda substituční, srovnávací či můstková. Nejdůležitější a nejčastěji používanou je můstková metoda, jíž lze využít nejen pro měření odporu rezistorů, ale i pro měření jiných prvků elektrických obvodů (např. kapacit a indukčností ve střídavých můstcích – viz příslušné laboratorní úlohy). Touto metodou lze obvykle získat též nejpřesnější výsledky. Princip můstkového zapojení je na obrázku 2.

Jedná se vlastně o zapojení čtyř rezistorů - měřeného s neznámým odporem R_x , dekády, jejíž odpor R můžeme libovolně nastavit, a dvou částí odporového drátu upevněného mezi body **A** a **B**. Ten je na dvě části rozdělen pohyblivým jezdcem **J**, přičemž jejich délky jsou

$$l_1 = | \mathbf{AJ} | \quad \text{a} \quad l_2 = | \mathbf{BJ} | \quad .$$

Elektrické odpory těchto částí drátu označme R_A , resp. R_B . V prostřední větvi můstku **CJ** je zapojen galvanometr, jenž měří proud procházející touto větví a indikuje, zda můstek je či není v tzv. rovnováze. Sériově připojeným proměnným odporem R_1 lze měnit pouze velikost výchylky galvanometru, a tím zvyšovat či snižovat citlivost měření.



Obr. 2

Můstek bude v rovnováze tehdy, když při posouvání jezce **J** po odporovém drátu dosáhneme nulové výchylky na galvanoměru **G**. V tomto okamžiku se prostřední větev můstku děje v obvodu vlastně neúčastní.

Tím pádem proud I_1 protékající měřeným odporem R_x protéká také beze změny dekadou s odporem R a proud I_2 , jenž teče spodní větví můstku (tedy odporovým drátem), má také stejnou velikost v obou délkách \mathbf{I}_1 a \mathbf{I}_2 .

Navíc ze skutečnosti, že mezi body **C** a **J** neteče proud, vyplývá, že oba mají stejný elektrický potenciál. Tudíž napětí na rezistoru s neznámým odporem R_x musí být stejné jako je napětí na levé části odporového drátu \mathbf{I}_1 a podobně napětí na dekádě R má stejnou velikost jako napětí pravé části odporového drátu \mathbf{I}_2 .

Podle Ohmova zákona tak musí platit vztahy

$$\begin{aligned} R_x I_1 &= R_A I_2 && \text{pro levou polovinu můstku a} \\ R I_1 &= R_B I_2 && \text{pro jeho pravou půlku.} \end{aligned}$$

Jejich vydělením pak dostaneme jednoduchou úměru mezi odpory

$$\frac{R_x}{R} = \frac{R_A}{R_B} .$$

Jelikož má odporový drát stejný plošný průřez S po celé délce, lze vyjádřit odpory R_A a R_B obou částí drátu vztahy

$$\begin{aligned} R_A &= r \frac{\mathbf{I}_1}{S} && \text{a} \\ R_B &= r \frac{\mathbf{I}_2}{S} && , \end{aligned}$$

kde r je rezistivita drátu. Odtud už po krátké úpravě dostaneme pro hledaný odpor R_x konečný vztah

$$\boxed{R_x = R \frac{\mathbf{I}_1}{\mathbf{I}_2}} . \quad (4)$$

Na principu můstkové metody jsou pak založeny přístroje speciálně konstruované pro měření elektrických odporů (ale i indukčností a kapacit) v technické praxi.

Postup měření :

1) Změřte odpor R_x pěti neznámých rezistorů přímou metodou podle Ohmova zákona. Každý odpor měřte pouze jednou, ale sestavte obě zapojení jak podle obr. 1a), tak i podle 1b). Na měřicích přístrojích vždy postupujte od nejvyššího rozsahu k rozsahům nižším; hodnoty proudu i napětí odečítejte až na tom rozsahu, kde budete mít na displeji přístroje 3 platná čísla, aby přesnost vašeho měření byla co nejvyšší! Hodnoty zapisujte do následující Tabulky I a výsledky získané oběma metodami porovnejte navzájem.

Tabulka I

Odpor číslo	zapojení a)			zapojení b)		
	U (V)	I (mA)	R_x (Ω)	U (V)	I (mA)	R_x (Ω)
1						
2						
3						
4						
5						

- 2) Sadu rezistorů s neznámými odpory D_x změřte přímo ohmmetrem. Každý odpor stačí změřit pouze jednou. Na měřicím přístroji opět postupujte od nejvyššího rozsahu k rozsahům nižším a hodnotu odporu odečítejte až na tom rozsahu, kde budete mít na displeji přístroje 3 platná čísla.
- 3) Proměřte sadu rezistorů nepřímou metodou pomocí Wheatstoneova mostu. Zapojte obvod podle schématu na obr. 2. Obecně platí, že můstkové měření je nejpřesnější, když jsou hodnoty odporů R_x a R srovnatelné (pak totiž budou i délky l_1 a l_2 odporového drátu přibližně stejné, jejich poměr bude blízký jedničce a každá nepřesnost se zdaleka tak neprojeví, jako kdyby byl mezi těmito hodnotami např. řádový rozdíl). Jelikož již známe hodnoty odporů R_x z předchozích měření, můžeme na dekádě nastavit odpor R ve srovnatelné výši s odporem R_x a to tak, aby byl přibližně v rozmezí

$$R = R_x \pm 30\% R_x \quad .$$

Každý z pětice neznámých rezistorů přitom proměřte desetkrát, pokaždé však volte na dekádě jinou hodnotu odporu R z výše vymezeného intervalu. Jezdcem **J** vyrovnejte pokaždé důkladně můstek do rovnováhy a odečtěte hodnoty délek l_1 a l_2 odporového drátu. Naměřené údaje zapisujte do Tabulky II.

Tabulka II

n	R (Ω)	l_1 (cm)	l_2 (cm)	R_x (Ω)	ΔR_x (Ω)
1					
2					
.					
.					
10					

$$\overline{R_x} = \dots \Omega$$

Ze vztahu (4) vypočítejte a do tabulky doplňte hodnoty odporu R_x z každého měření. Určete střední (průměrnou) hodnotu neznámého odporu $\overline{R_x}$, jeho pravděpodobnou chybu \overline{J}_{R_x} a relativní chybu měření v procentech. Výsledek pak zapište ve tvaru

$$R_x = \overline{R_x} \pm \overline{J}_{R_x} \quad .$$

- 4) Změřte odpory R_x neznámých rezistorů komerčním můstkem $RLCG$, případně pomocí dalších přístrojů, jež jsou v posluchačské laboratoři k dispozici. Výsledky všech měření získané různými metodami porovnejte navzájem.
- 5) Pomocí ohmmetru nebo komerčního můstku $RLCG$ proveďte měření některých vybraných sériových i paralelních kombinací rezistorů R_x a ověřte vztahy, jež platí pro velikost výsledného odporu, tj.

$$R_s = R_1 + R_2 \quad \text{pro sériové zapojení a}$$

$$R_p = \frac{1}{\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2}} \quad \text{pro zapojení paralelní.}$$

V ý k o n s t e j n o s m ě r n ě h o p r o u d u

Ú k o l : Sledovat závislost výkonu stejnosměrného proudu na velikosti vnějšího odporu

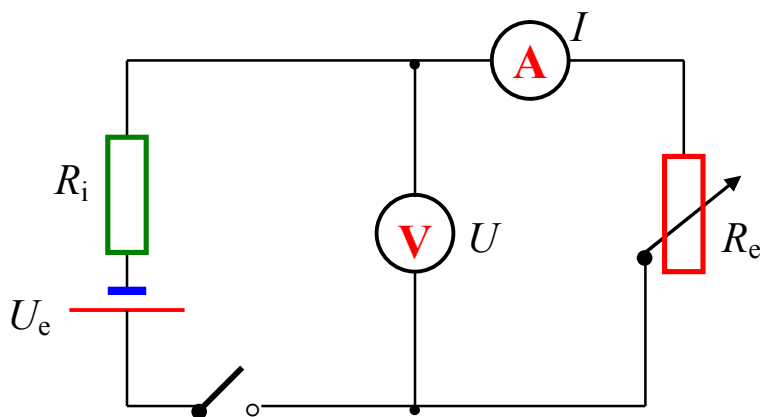
P o t ř e b y : Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Výkon, jenž zdroj stejnosměrného proudu dodává do obvodu, závisí na velikosti odporu R_e vnější části obvodu. Představme si jednoduchou modelovou situaci – obvod, jenž se skládá pouze ze zdroje s elektromotorickým napětím U_e a vnitřním odporem R_i , k němuž je připojen jediný rezistor s odporem R_e (viz obr.1). Zdroj dodává do vnějšího obvodu (tedy do rezistoru s odporem R_e) proud I . Jeho velikost, jež závisí právě na odporu R_e , měříme ampérmetrem; k odporu paralelně připojený voltmetr pak měří napětí U , jež je současně svorkovým napětím zdroje. Pro jeho velikost platí

$$U = U_e - R_i \cdot I \quad . \quad (1)$$

Svorkové napětí U zdroje tedy klesá s rostoucím proudem v obvodu - zdroj je vyšším odběrem proudu více zatěžován.



Obr. 1

Celkový výkon P_z , jenž dodává zdroj do celého obvodu, je dán výrazem

$$P_z = \frac{U_e^2}{R_i + R_e} \quad . \quad (2)$$

Jak je patrné, s rostoucím odporem R_e vnější části obvodu, postupně nepřímo úměrně klesá (což odpovídá i té skutečnosti, že při vyšším odporu R_e je zdroj méně zatěžován odběrem proudu). Nejvyšší výkon pak dodává zdroj do obvodu tehdy, je-li vnější část obvodu ve zkratu ($R_e = 0 \Omega$); pak nutně platí

$$P_{z,max} = \frac{U_e^2}{R_i} \quad . \quad (3)$$

Zaměříme se nadále pouze na tu část celkového výkonu zdroje, jež se spotřebuje ve vnější části obvodu, t.j. na odporu R_e . Tento výkon P lze snadno spočítat, platí totiž

$$P = U \cdot I = R \cdot I^2 \quad . \quad (4)$$

Jelikož proud I protékající obvodem na obr. 1 je dán vztahem vyplývajícím z Ohmova zákona

$$I = \frac{U_e}{R_i + R_e} \quad , \quad (5)$$

dostaneme po dosazení a krátké úpravě funkční závislost výkonu P na velikosti vnějšího odporu R_e ve tvaru

$$\boxed{P(R_e) = R_e \frac{U_e^2}{(R_i + R_e)^2}} \quad . \quad (6)$$

Protože se jedná o spojitou, hladce diferencovatelnou funkci, získáme její případný extrém ze známé podmínky pro první derivaci

$$\frac{dP}{dR_e} = 0 \quad .$$

Po krátkém výpočtu (ten si proveďte sami !), dostáváme

$$\frac{dP}{dR_e} = U_e^2 \frac{R_i - R_e}{(R_i + R_e)^3} \quad . \quad (7)$$

Jak je patrné z posledního vztahu, nastává extrém výkonu při rovnosti vnitřního odporu zdroje a vnějšího odporu obvodu

$$\boxed{R_i = R_e} \quad . \quad (8)$$

Že se jedná o maximum výkonu na vnějším odporu R_e lze snadno ověřit ze změny znaménka první derivace. Ze vztahu (7) je patrné, že

$$\begin{aligned} \frac{dP}{dR_e} > 0 & \quad \text{pro} \quad R_e < R_i \quad \text{a} \\ \frac{dP}{dR_e} < 0 & \quad \text{pro} \quad R_e > R_i \quad . \end{aligned}$$

Po dosazení podmínky rovnosti $R_i = R_e$ (7) do vztahu (6), pak dostáváme, že maximální výkon elektrického proudu na vnějším odporu R_e obvodu lze vyjádřit výrazem

$$\boxed{P_{\max} = \frac{U_e^2}{4R_i}} \quad . \quad (9)$$

Tento vztah lze experimentálně ověřit, což bude i jedním z úkolů vaší práce.

Poznámka: Je však nutné si uvědomit, že jsme v předcházejícím výpočtu vyšetřovali **ideální elektrický obvod**. Odpor R_A ampérmetru a odpor spojovacích vodičů jsme považovali za nulový a odpor R_V voltmetru naopak za nekonečně velký. V reálném případě (tj. i při vašem měření této úlohy) se však odpory všech těchto prvků v obvodu projeví a dojde tak k mírným odchylkám vámi naměřených a následně i vypočítaných hodnot od výsledků, jež dávají vztahy (1) – (9).

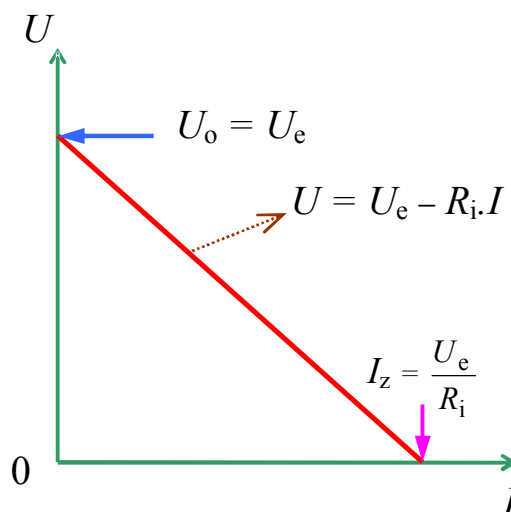
Postup měření:

Pro sledování závislosti výkonu P stejnosměrného proudu spotřebovaného na vnějším odporu R_e na velikosti tohoto odporu zapojíme obvod podle již výše uvedeného obr. 1. Protože používáme stabilizovaný zdroj napětí, jehož skutečný vnitřní odpor je zanedbatelný, je nutné vnitřní odpor R_i zdroje modelovat sériově připojenou dekádou. Aby měl proud odebíraný ze zdroje do obvodu přiměřenou velikost, volíme hodnoty modelového vnitřního odporu v desítkách ohmů (70 – 90 Ω). Vnější odpor R_e pak postupně měníme v okolí předem zvolené hodnoty vnitřního R_i . Výkon P ustáleného elektrického proudu na spotřebovaný na vnějším odporu pak vypočítáme z naměřených hodnot proudu I a napětí U podle vztahu (4)

$$\boxed{P = U \cdot I} \quad . \quad (4)$$

K ověření platnosti vztahu (9) pro maximální výkon P_{\max} spotřebovaný na vnějším odporu je nutné určit hodnotu elektromotorického napětí U_e vámi používaného zdroje. To je možné provést dvěma následujícími způsoby.

- a) Toto napětí přímo změříte voltmetrem při rozpojení vnějšího obvodu ($R_e \rightarrow \infty$). Zdroj nebude prakticky zatěžován odběrem proudu (záleží na kvalitě použitého voltmetru a jeho vnitřním odporu R_V) a podle vztahu (1) bude v takovém případě svorkové napětí, jež voltmetrem měříte, přímo rovno napětí elektromotorickému.
- b) Hodnotu elektromotorického napětí U_e zdroje lze získat též vyhodnocením grafické závislosti svorkového napětí na odebíraném proudu $U = f(I)$ – viz obr. 2.



Obr. 2 – zatěžovací charakteristika zdroje

V souladu se vztahem (1) $U = U_e - R_i \cdot I$ je tato lineární závislost vyjádřena klesající přímkou, přičemž její průsečík s proudovou osou představuje zkratový proud I_z a průsečík s osou napětíovou tzv. napětí naprázdno U_o , jež je rovno právě napětí elektromotorického U_e . Jelikož většinou neměříme proudy blízké 0 A (což platí i pro vaše měření), je třeba průsečík s napětíovou osou získat extrapolací zátěžové přímky „doleva“ ke svislé ose.

Úkoly:

1) Vyšetřete závislost výkonu P stejnosměrného proudu na vnějším odporu R_e na velikosti tohoto odporu pro tři různé modelově zvolené hodnoty vnitřního odporu R_i zdroje:

a) $R_i = 70 \Omega$; b) $R_i = 70 \Omega$; c) $R_i = 70 \Omega$.

Vnější odpor R_e obvodu při všech třech měřeních měňte v intervalu od 30Ω do 150Ω po deseti ohmech a naměřené a následně vypočítané hodnoty zapisujte do následující tabulky:

R_e (Ω)	$R_i = 70 \Omega$			$R_i = 80 \Omega$			$R_i = 90 \Omega$		
	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)	U (V)	I (mA)	P (mW)
30									
40									
50									
...									
...									
150									

$$U_e = \dots\dots\dots V$$

2) Do jednoho grafu vynesete všechny tři závislosti svorkového napětí U zdroje na odebíraném proudu I do obvodu (viz obr. 2) a extrapolací odečtete hodnotu elektromotorického napětí U_e zdroje. Ověřte, zda tato hodnota odpovídá údajům naměřenému voltmetrem při rozpojené vnější části obvodu.

3) Graficky zpracujte závislost výkonu P stejnosměrného proudu na vnějším odporu R_e na velikosti tohoto odporu (opět zpracujte všechny tři závislosti do jednoho grafu). Zvolte si vhodné měřítko, aby maxima jednotlivých křivek byla dostatečně výrazná!

4) Ověřte, zda platí, že maximum výkonu P_{\max} na vnějším odporu nastává skutečně při rovnosti vnitřního odporu R_i zdroje a vnějšího odporu R_e obvodu.

5) Porovnejte vámi vypočítanou maximální hodnotu výkonu P z naměřených hodnot svorkového napětí U a proudu I ($P = U \cdot I$) s teoretickou hodnotou udávanou výrazem

$$P_{\max} = \frac{U_e^2}{4 \cdot R_i} \quad (9)$$

a vysvětlíte v závěru vašeho protokolu z této práce případný rozdíl!

Specifický náboj elektronu

Úkol: Na základě pohybu elektronu v homogenním magnetickém poli stanovit jeho specifický náboj.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

V magnetickém poli působí **na pohybující se nabitě objekty** tělesa, částice) magnetická síla F_m , jež je dána výrazem

$$F_m = Q \cdot [v \wedge B] \quad , \quad (1)$$

jejíž velikost

$$F_m = Q v B \sin a \quad (2)$$

závisí na velikosti a směru vektoru rychlosti nabitěho objektu. Úhel a je úhel, jenž vektor rychlosti v svírá s vektorem B indukce magnetického pole. Ten pak charakterizuje v daném bodě prostoru magnetické pole právě na základě jeho silových účinků.

Směr magnetické síly je vždy kolmý k vektoru rychlosti v (a také k vektoru indukce B). Magnetická síla proto nemůže měnit velikost rychlosti (nabitý objekt v magnetickém poli nelze ani urychlovat ani brzdit), mění však směr tohoto vektoru !!!

Z hlediska mechanických účinků je magnetická síla vlastně silou dostředivou.

Vletí-li nabitý objekt do prostoru, v němž je homogenní magnetické pole ($B = konst.$), bude se v důsledku magnetického silového působení pohybovat obecně po šroubovici; v případě, že objekt vletí do homogenního magnetického pole kolmo ($v \perp B$), bude konat rovnoměrný pohyb po kružnici o určitém poloměru R (obojí lze na měřící aparatuře demonstrovat).

Poloměr R kruhové trajektorie lze snadno určit na základě výše zmíněné skutečnosti, že

$$F_m = F_d \quad .$$

Musí tedy platit ($v \perp B \Rightarrow \sin a = 1$)

$$Q v B = \frac{mv^2}{R}$$

a odtud

$$\boxed{R = \frac{mv}{QB}} \quad (3)$$

Poměr náboje Q a hmotnosti m nabitěho objektu se nazývá **specifický náboj** a z předcházejícího vztahu plyne, že

$$\frac{Q}{m} = \frac{v}{RB} \quad . \quad (4)$$

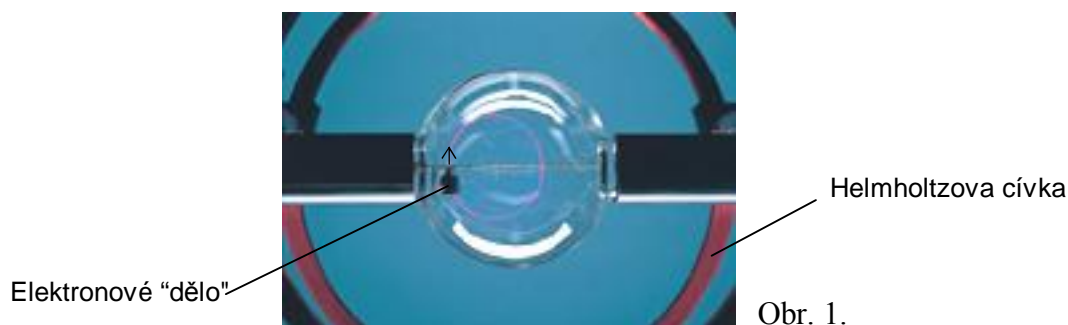
Jestliže chceme tuto veličinu určit, musíme znát nejen poloměr kruhové trajektorie, ale také velikost indukce magnetického pole a velikost rychlosti, s níž nabitý objekt do magnetického pole vstupuje.

V případě vašeho měření bude pohybujícím se nabitým objektem úzký svazek elektronů emitovaný rozžhavenou katodou a urychlený nejprve elektrickým polem mezi katodou a anodou (pro tuto elementární částici budeme nadále označovat její klidovou hmotnost $m = m_e$ a elementární náboj, jehož je nositelem, $Q = e$).

Je-li U_{AK} napětí mezi oběma elektrodami, získá každý elektron po průchodu tímto potenciálovým rozdílem kinetickou energii


$$\frac{1}{2} m v^2 = e \cdot U_{AK} \quad . \quad (5)$$

Takto urychlené elektrony pak vstupují do vyčerpaného prostoru baňky naplněné argonem o nízkém tlaku. Letící elektrony excitují při srážkách atomy tohoto inertního plynu, a ty po přechodu do základního stavu vyzařují červenofialové světlo. Tak můžeme sledovat trajektorii pohybujících se elektronů v baňce (viz obr. 1).



Obr. 1.

Není-li v baňce přítomno magnetické pole, vidíme, že se svazek elektronů pohybuje přímočaře. Necháme-li Helmholtzovými cívkami, jež obklopují baňku, procházet elektrický proud, vytvoří se v prostoru baňky prakticky homogenní magnetické pole a elektrony se začnou pohybovat po křivočaré trajektorii (šroubovici nebo kružnici). Poloměr R křivosti této trajektorie nám umožňují měřit světélkující značky uvnitř baňky.

Pozn.: Na aparatuře lze snadno demonstrovat zákonitosti obsažené ve vztahu (3). Při dané velikosti indukce magnetického pole poloměr R vzrůstá s rychlostí elektronů (s urychlovacím napětím U_{AK}), naopak při dané rychlosti svazku se po zvětšení indukce magnetického pole zmenší poloměr R křivosti trajektorie svazku. 

Jednoduchou úpravou vztahů (4) a (5) – proveďte si sami !!! – dostáváme pak konečný potřebný výraz pro specifický náboj elektronu

$$\frac{e}{m_e} = \frac{2 \cdot U_{AK}}{(RB)^2} \quad . \quad (6)$$

K výpočtu této důležité fyzikální veličiny schází už jen znalost velikosti B indukce magnetického pole vytvářeného průchodem proudu I Helmholtzovými cívkami. Z Biotova–Savartova–Laplaceova zákona vyplývá, že velikost indukce B magnetického pole je v takovém případě vždy úměrná proudu I procházejícímu vodičem. Platí

$$B = k \cdot I \quad , \quad (7)$$

kde veličina k závisí pouze na geometrii vodiče a magnetických vlastnostech prostředí v okolí vodiče. Tím je ale v tomto případě vzduch, jehož relativní permeabilita μ_r je prakticky rovna jedné. Pro naše uspořádání Helmholtzových cívek pro velikost indukce B jimi vytvářeného pole platí

$$B = \frac{2m_0 N d^2}{\left(\sqrt{d^2 + a^2}\right)^3} \cdot I \quad ,$$

kde d je průměr cívek, N počet závitů v každé z nich a vzdálenost obou cívek a m_0 permeabilita vakua ($m_0 = 4 \cdot \pi \cdot 10^{-7} \text{ H} \cdot \text{m}^{-1}$).

Veličina k ve vztahu (7) je tedy konstantou a je dána výrazem

$$k = \frac{2m_0 N d^2}{\left(\sqrt{d^2 + a^2}\right)^3} \quad .$$

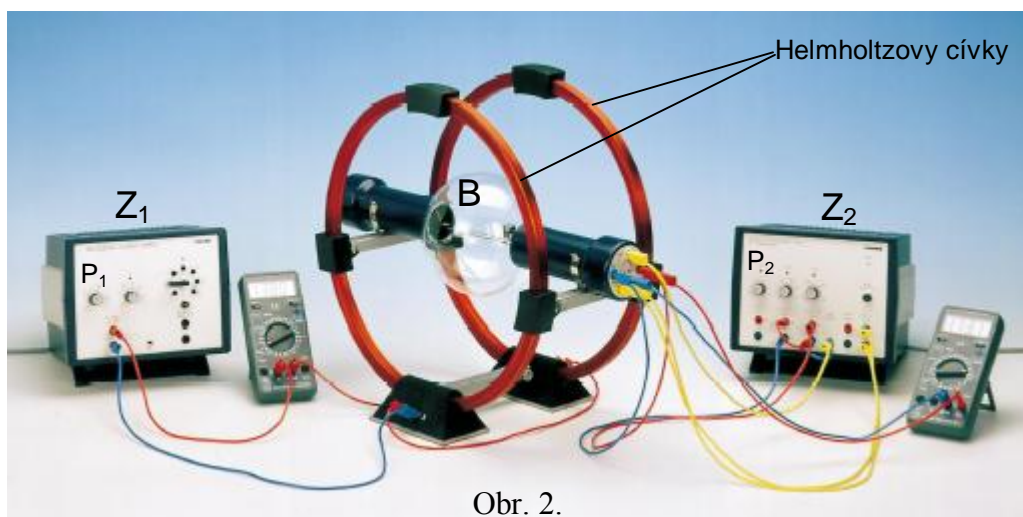
V našem případě jsou parametry Helmholtzových cívek následující: $d = 0,4 \text{ m}$; $a = 0,2 \text{ m}$; $N = 154$. Tak pro hodnotu konstanty k ve výrazu (7) dostáváme v našem případě

$$k = 6,92 \cdot 10^{-4} \text{ T} \cdot \text{A}^{-1} \quad . \quad (8)$$

Postup práce:

Aparatura (viz obr. 2) je již sestavena, zapojení zdrojů provede přítomný učitel !!!

- 1) Pomocí potenciometru P_2 na přední desce zdroje Z_2 postupně nastavujte urychlovací napětí U_{AK} mezi katodou a anodou a tím postupně zvyšujte rychlost letících elektronů. Měření začněte při napětí $U_{AK} = 160 \text{ V}$ a po 20 V pokračujte až do maximální hodnoty $U_{AK} = 300 \text{ V}$. Ostatní potenciometry se nastaví podle pokynů učitele.



Obr. 2.

- 2) Při každém napětí U_{AK} nastavujte pomocí potenciometru P_1 na přední desce zdroje Z_1 proud procházející Helmholtzovými cívkami tak, aby elektronový svazek dopadal postupně na první až čtvrtou světélkující značku v baňce B , což odpovídá poloměrům křivosti trajektorie $R = 2$ cm, 3 cm, 4 cm a 5 cm.

Pozor !!! Při větších napětích U_{AK} už ani není možné měření s nejmenšími poloměry křivosti provést!

- 3) Hodnoty napětí U_{AK} a proudů I zapisujte do následující tabulky:

Tabulka I: Pohyb elektronu v homogenním magnetickém poli

U_{AK} (V)	$R = 2$ cm			$R = 3$ cm			$R = 4$ cm			$R = 5$ cm		
	I (A)	B (mT)	e/m_e $\cdot 10^{-11}$ (C.kg $^{-1}$)	I (A)	B (mT)	e/m_e $\cdot 10^{-11}$ (C.kg $^{-1}$)	I (A)	B (mT)	e/m_e $\cdot 10^{-11}$ (C.kg $^{-1}$)	I (A)	B (mT)	e/m_e $\cdot 10^{-11}$ (C.kg $^{-1}$)
160												
180												
...												
300												

- 4) Ke každé hodnotě proudu I vypočítáme velikost indukce B magnetického pole podle vztahů (7) a (8), zapíšeme do tabulky a nakonec provedeme výpočet specifického náboje elektronu při každém měření podle rovnice (6) a rovněž zaznamenáme do tabulky.
- 5) Vámi vypočítané hodnoty specifického náboje elektronu pak porovnejte s hodnotou tabulkovou

$$\frac{e}{m_e} \approx 1,759 \cdot 10^{11} \text{ C.kg}^{-1}$$

Najděte oblast měření, kde jsou si experimentální a tabulková hodnota nejbližší a vysvětlete proč je tomu právě v této oblasti.

- 6) Na základě provedeného měření pak ověřte, že při dané rychlosti svazku elektronů je poloměr R jejich kruhové trajektorie nepřímo úměrný indukci magnetického pole vytvářeného proudem I v cívkách (viz vztah (3)). Graficky však zpracujte závislosti

$$R = f\left(\frac{1}{B}\right), \text{ případně } R = f\left(\frac{1}{I}\right)$$

pro tři různá urychlovací napětí $U_{AK} = 160$ V, 240 V a 300 V.

Tyto závislosti by vám měly vyjít jako lineární. Je totiž mnohem snazší posoudit, zda je nějaká přímka přímkou než jestli je nějaká křivka hyperbolou prvního řádu.



- 7) Ověřte rovněž skutečnost, že poloměr R kruhové trajektorie svazku elektronů je přímo úměrný jejich rychlosti v . Měření proved'te postupně pro tři různé hodnoty indukce magnetického pole, jež odpovídají proudům $I = 1,3$ A, $1,5$ A a $1,7$ A v cívkách. Naměřené a vypočítané hodnoty zapisujte do připojené tabulky, graficky pak zpracujte závislost

$$R = f(v) .$$

Tabulka II: Ověření závislosti poloměru R trajektorie na rychlosti nabitě částice

I (A)	B (mT)	$R = 2$ cm		$R = 3$ cm		$R = 4$ cm		$R = 5$ cm	
		U_{AK} (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s ⁻¹)	U_{AK} (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s ⁻¹)	U_{AK} (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s ⁻¹)	U_{AK} (V)	$v \cdot 10^{-6}$ (m.s ⁻¹)
1,3									
1,5									
1,7									

Po skončení měření

nezapomeňte vypnout digitální měřicí přístroje !!!

Vodič protékáný proudem v magnetickém poli

- Úkol:**
- A) Vyzkoušejte účinek magnetického pole na volně pohyblivý proudovodič s pomocí Laplaceových kolejnic.
 - B) Ověřte platnost přímé úměrnosti mezi silou působící na proudovodič v magnetickém poli, délkou vodiče a velikostí proudu. Ověřte Flemingovo pravidlo levé ruky.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Sílu působící na vodič s proudem libovolného tvaru v magnetickém poli (tzv. **Ampérovu sílu**) můžeme získat integrací rovnice

$$d\mathbf{F} = I \cdot (d\mathbf{l} \times \mathbf{B}) ,$$

kde I je proud ve vodiči, \mathbf{B} magnetická indukce a $d\mathbf{l}$ délkový element vodiče.

Sílu, kterou působí homogenní magnetické pole o indukci \mathbf{B} na úsek přímého vodiče délky L protékáný proudem I pak určuje rovnice

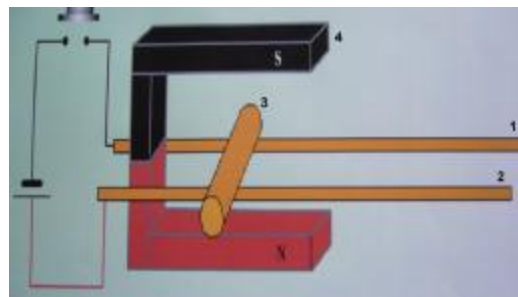
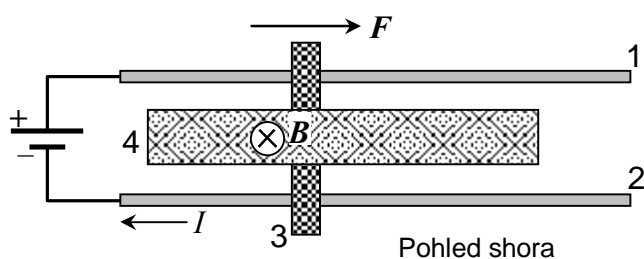
$$F = I \cdot L \cdot B \cdot \sin \alpha ,$$

kde α je úhel mezi vodičem a směrem vektoru \mathbf{B} magnetické indukce.

Postup měření:

A) **Demonstrace účinku magnetického pole na vodič, kterým prochází elektrický proud**

Název Laplaceovy kolejnice se někdy (zvláště ve Francii) používá k označení dvou rovnoběžných vodičů (1,2), které lze připojit ke zdroji značného elektrického proudu. Přes vodiče je napříč položena volně pohyblivá elektricky vodivá kulatá tyč (3), jež uzavírá elektrický obvod. Tyč se přitom nachází mezi dvěma póly silného permanentního magnetu (4), který vytváří pole kolmo orientované k tyči.



Obr. 1. Laplaceovy kolejnice – schéma

- 1) Sestavte zařízení podle obrázku a zkontrolujte správnost připojení zdroje elektrického napětí.
- 2) Zapněte zdroj napětí a zvyšujte proud do maximální hodnoty 5 A (pozvolna, event. skokem). Pozorované účinky zaznamenejte.
- 3) Pokus opakujte s opačnou polaritou napětí i s opačným směrem vektoru \mathbf{B} magnetické indukce.
- 4) Navrhněte, k čemu by mohl být pozorovaný jev využit.



Obr. 2. Laplaceovy kolejnice se zdrojem napětí

B) Měření velikosti síly působící na vodič s proudem v magnetickém poli

S pomocí zařízení zobrazeného na obr. 3. ověřte platnost přímé úměrnosti mezi působící Ampérovou silou a délkou vodiče, případně hodnotou proudu při konstantní magnetické indukci o velikosti $B = 91 \text{ mT}$.



Obr. 3. Zařízení pro zkoumání vlivu magnetického pole na proudovodič

- 1) Vodič zvolené délky připojte k nosným ramenům a vložte mezi póly magnetu umístěného na misce vah tak, aby se nacházel uprostřed.
- 2) Zapněte váhy a zaznamenejte hmotnost vodiče při nulovém proudu.
- 3) Postupně zvyšujte proud až do hodnoty 5 A a zaznamenávejte naměřené hmotnosti.
- 4) Totéž měření proveďte s vodiči jiné délky.
- 5) Výsledky zpracujte graficky.

Ověřte platnost Flemingova pravidla levé ruky (vektor magnetické indukce směřuje od červeného pólu k bílému).

Maximální přípustná hodnota proudu je 5 A .

Kalibrace odporového teploměru, termočlátku a termistoru

- Úkol:**
- Proved'te kalibraci odporového teploměru, termočlátku a termistoru.
 - Určete teplotní koeficienty odporového teploměru, konstanty charakterizující termočlánek a aktivační energii daného termistoru.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

a) Odporový teploměr

Odpor pevných kovových vodičů s rostoucí teplotou přibližně lineárně vzrůstá, což vyjadřuje vztah

$$R_t = R_0 \cdot (1 + a \cdot t) \quad ,$$

kde R_t je odpor kovového vodiče při určité teplotě t , R_0 jeho odpor při teplotě 0°C a a je teplotní součinitel odporu daného materiálu.

Jelikož v širším rozsahu teplot dochází k odchylkám od linearitu u této závislosti, přidáváme do teplotní závislosti odporu ještě kvadratický člen. Platí

$$R_t = R_0 \cdot (1 + a \cdot t + b \cdot t^2) \quad , \quad (1)$$

kde a a b jsou teplotní součinitele charakteristické pro určitý kovový vodič (tyto hodnoty bývají tabelovány). Vyšší teplotní koeficient mívají zpravidla čisté kovové materiály, jejich odpor roste s teplotou výrazněji a lze je proto použít k výrobě odporových teploměrů.

Odporový teploměr je v podstatě spirála z čistého kovu, jejíž odpor lze měřit. V souladu s výrazem (1) každé teplotě t odpovídá určitý odpor R_t a naopak, známe-li konstanty R_0 , a a b , můžeme ze známého odporu spirály určit příslušnou teplotu. K určení těchto tří konstant stačí vyřešit soustavu tří rovnic, jež dostaneme, když přesně změříme při třech různých teplotách t_1 , t_2 a t_3 tři odpovídající odpory R_{t1} , R_{t2} , a R_{t3} spirály odporového teploměru a tyto hodnoty postupně dosadíme do vztahu (1). Platí:

$$\begin{aligned} R_{t1} &= R_0 \cdot (1 + a \cdot t_1 + b \cdot t_1^2) \\ R_{t2} &= R_0 \cdot (1 + a \cdot t_2 + b \cdot t_2^2) \\ R_{t3} &= R_0 \cdot (1 + a \cdot t_3 + b \cdot t_3^2) \quad . \end{aligned} \quad (2)$$

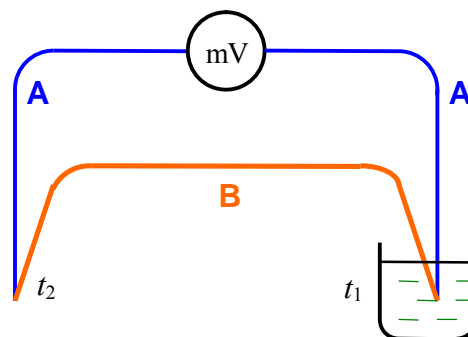
Vyřešením této soustavy rovnic získáme hledané parametry odporového teploměru R_0 , a a b a můžeme pak na základě vztahu (1) každé naměřené hodnotě R_t odporu spirály přiřadit příslušnou teplotu t . Grafické znázornění průběhu odporu odporového teploměru na teplotě pak udává kalibrační křivka, z níž lze přímo ze změřeného odporu odečíst hledanou teplotu.

b) Termočlánek

Termočlánek je elektrický obvod vytvořený ze dvou různých vodičů s různou výstupní prací elektronu z daného kovu. V důsledku toho vzniká na styku obou vodičů kontaktní potenciál, jenž vzrůstá se zvyšující se teplotou. Když budou mít oba spoje termočlánek stejnou teplotu, bude stejný i kontaktní potenciál v obou spájených místech, což ale při opačné polaritě obou napětí dává výsledné napětí nulové. Teprve když se začne lišit teplota spájených míst, budou různé kontaktní potenciály v obou spojích termočlánek a v obvodu vznikne elektromotorické napětí, nazývané termoelektrickým napětím **Seebeckovým**. Termočlánek tak může sloužit jako elektrický zdroj.

Pro Seebeckovo termoelektrické napětí U_e přitom platí, že je přímo úměrné rozdílu teplot obou spojů termočlánek. Velikost tohoto napětí při teplotním rozdílu jednoho stupně však činí pro různé dvojice kovů řádově pouhé desítky mikrovoltů.

Seebeckova termoelektrického jevu se hlavně využívá při měření teploty (viz obr. 1). Jeden z vodičů tvořících termočlánek je připojen ke svorkám milivoltmetru, jenž měří rozdíl termoelektrických napětí na obou spojích. Přitom jeden spoj (tzv. „studený“) udržujeme na konstantní teplotě (obvykle bývá ponořen do směsi ledu a vody při $0\text{ }^\circ\text{C}$), zatímco druhý měřicí (tzv. „teplý“) spoj je umístěn do místa, jehož teplotu chceme určit.



Obr. 1 - termočlánek

Termoelektrické napětí U_e je prakticky přímo úměrné teplotnímu rozdílu obou spojů, při větších teplotních rozdílech je lze pro větší přesnost měření charakterizovat kvadratickou závislostí

$$U_e = a \cdot (t_2 - t_1) + b \cdot (t_2 - t_1)^2 \quad ,$$

kde konstanty a , b jsou veličiny charakteristické pro daný typ termočlánek. Jejich fyzikálními jednotkami jsou $[a] = \text{V} \cdot \text{K}^{-1}$ a $[b] = \text{V} \cdot \text{K}^{-2}$. Je-li teplota „studeného“ spoje t_1 právě $0\text{ }^\circ\text{C}$, lze termoelektrické napětí U_e vyjádřit jen jako funkci teploty t_2 konce „teplého“. Píšeme-li pak místo teploty t_2 pouze t , dostáváme pro tento případ vyjádření Seebeckova termoelektrického napětí ve tvaru

$$U_e = a \cdot t + b \cdot t^2 \quad . \quad (3)$$

Podobně jako v případě odporového teploměru, lze i u termočlánek vypočítat konstanty a , b (zde nám stačí pouze dvě rovnice pro dvě neznámé). Vypočítáme-li tyto hodnoty, můžeme pak snadno na základě vztahu (3) každé naměřené hodnotě U_e Seebeckova termoelektrického napětí přiřadit příslušnou teplotu t „teplého“ spoje termočlánek. Závislost termoelektrického napětí U_e na teplotě pak udává kalibrační křivka termočlánek, z níž lze jednoduše přiložením pravítka odečítat příslušnou teplotu t .

c) Termistor

Termistory jsou odpory zhotovené z různých polovodičových materiálů, jejichž odpor se s teplotou výrazně mění. Mají jednoduchou konstrukci, malé rozměry, mechanickou stabilitu, dlouhou dobu použití a nevyžadují prakticky žádnou údržbu. Jako výchozího materiálu se při výrobě termistorů používá nejčastěji různých oxidů, například NiO_2 , Mn_2O_3 , Co_2O_3 , UO_2 , Fe_2O_3 a podobně.

Vodivost termistoru $G = 1/R$ závisí – ostatně jako u každého polovodiče – na absolutní teplotě tak, že s rostoucí teplotou T exponenciálně vzrůstá (a odpor R naopak exponenciálně klesá), což vyjadřuje vztah

$$G = G_0 \cdot e^{-\frac{E_g}{2kT}}, \quad (4)$$

kde $k \approx 1,381 \cdot 10^{-23} \text{ J} \cdot \text{K}^{-1}$ je **Boltzmannova konstanta** a E_g **pak aktivační energie** (též šířka zakázaného pásu) daného polovodiče. G_0 je konstanta vyjadřující vodivost polovodiče při určité teplotě T_0 . V grafu, kde na osu x nanášíme převrácenou hodnotu absolutní teploty T^{-1} a na osu y logaritmus vodivosti G , bude závislost (4) znázorněna klesající přímkou

$$\ln G = \ln G_0 - \frac{E_g}{2k} \cdot T^{-1}, \quad (5)$$

jejíž směrnice $-\frac{E_g}{2k}$ je dána právě hodnotou aktivační energie E_g , čehož lze velmi jednoduše využít při stanovení tohoto základního parametru každého polovodiče (viz obr. 2).

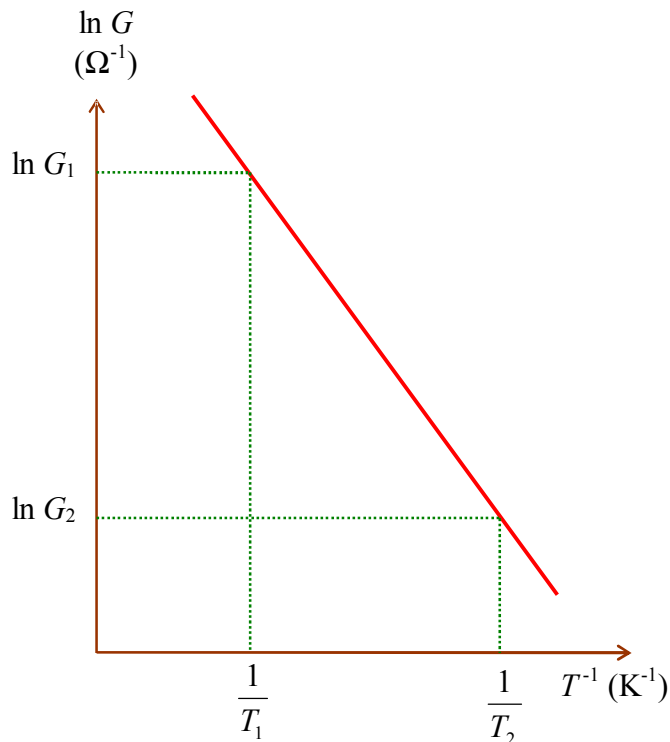
Jsou-li G_1 a G_2 vodivosti termistoru odpovídající teplotám T_1 a T_2 , pak po dosazení příslušných dvojic hodnot do rovnice (5) a po krátké úpravě dostáváme konečný vztah pro výpočet aktivační energie termistoru ve tvaru

$$E_g = \frac{2k \cdot \ln \frac{G_1}{G_2}}{\left(\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}\right)}. \quad (6)$$

Chceme-li však vyjádřit aktivační energii E_g v elektronvoltech (eV), musíme použít převodního vztahu mezi touto jednotkou a joulem

$$1 \text{ J} = 6,242 \cdot 10^{18} \text{ eV}.$$

Po dosazení číselné hodnoty Boltzmannovy konstanty k pak upravíme rovnici (6) do konečného tvaru



Obr. 2 - k výpočtu aktivační energie polovodiče

$$E_g = 1,724,10^{-4} \cdot \frac{\ln \frac{G_1}{G_2}}{\frac{1}{T_2} - \frac{1}{T_1}} \quad (\text{eV}) \quad (7)$$

Postup práce:

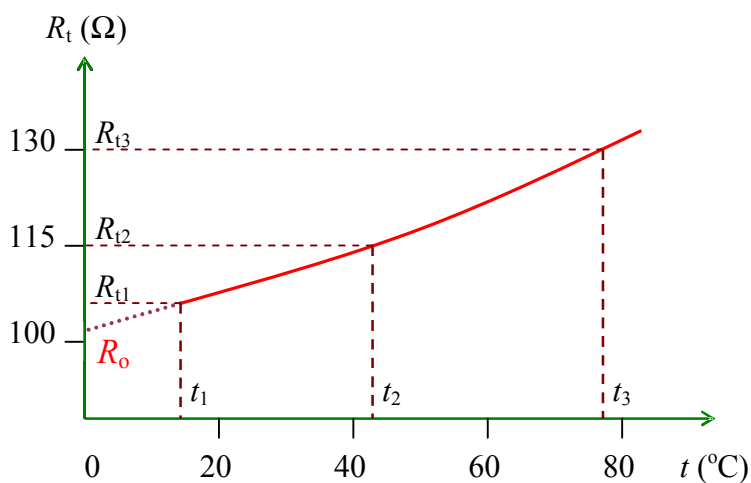
- 1) Kalibraci všech tří prvků (odporového teploměru, termočlánu i termistoru) **provádějte současně**. Při dané teplotě t odečtete na milivoltmetru příslušné elektromotorické napětí U_e termočlánu a na automatickém mostě *RLCG* odpory platinového odporového teploměru R_{Pt} a termistoru R_{term} . Měření začněte při pokojové teplotě (cca 20°C) a další odečítání hodnot provádějte vždy zhruba po pěti stupních, maximálně však do 80°C. Před každým měřením je třeba vyčkat několik minut, než nastane tepelná rovnováha Ⓡ t.j. než se ustálí teplota v celé aparatuře (tuto teplotu odečítejte na rtuťovém teploměru ponořeném do vodní lázni s přesností desetiny stupně!). Stav tepelné rovnováhy ve vodní lázni se projeví ustálením hodnot měřených veličin na displejích příslušných přístrojů (milivoltmetru a automatického mostu *RLCG*).

Získané hodnoty pak zanepte do následující tabulky:

n	t (°C)	U_e (mV)	R_{Pt} (Ω)	R_{term} (Ω)	$1/T$ (K ⁻¹)	$\ln G$ (Ω ⁻¹)
1						
2						
3						
.						

Poslední dvě kolonky v tabulce je nutno dopočítat, slouží vám k pozdějšímu zpracování měření termistoru!

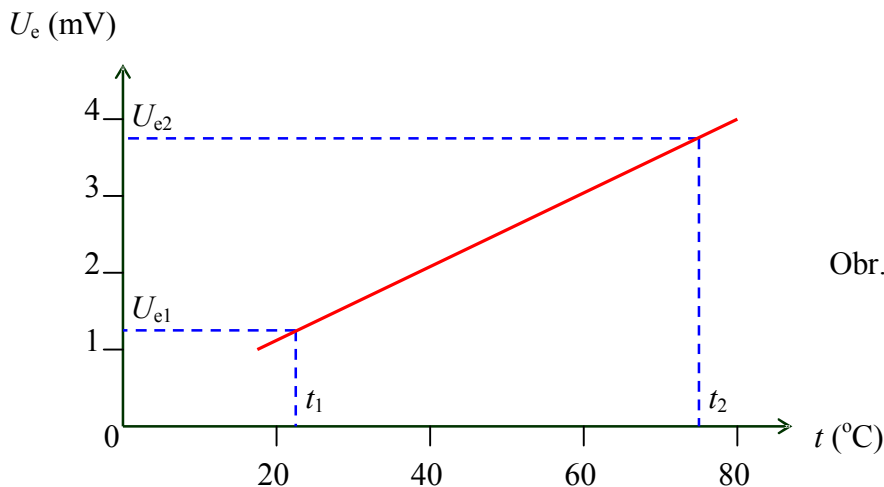
- 2) Zpracování naměřených hodnot odporu R_{Pt} **platinového odporového teploměru** proveďte jak početně řešením soustavy rovnic (2), tak i graficky.



Obr. 3

Do grafu vynesete závislost odporu R_t na teplotě t (obr. 3). Z tohoto grafu si vyberte tři vzdálenější body a teprve tyto hodnoty dosadíte do soustavy (2). Jejím řešením pak získáte příslušné konstanty R_0 , a a b vašeho platinového teploměru. Hodnotu odporu R_0 můžete navíc odečíst pomocí extrapolace přímo z grafu. Vypočítaný lineární součinitel odporu a pak porovnejte s tabulkovou hodnotou pro platinu!

- 3) Podobným způsobem - poččetně i graficky – zpracujte naměřené hodnoty termoelektrického napětí **termočlátku**. Protože je „studený“ spoj v termosce se směsí ledu a vody při stálé teplotě $t_0 = 0^\circ\text{C}$, lze do grafu vynášet přímo závislost elektromotorického napětí U_e na teplotě t spoje „teplejšího“ (obr. 4). Pro výpočet konstant a a b měřeného termočlátku si potom vyberte z grafu dva vzdálenější body, odpovídající hodnoty $t_{1,2}$ a $U_{e1,2}$ dosadíte do vztahu (3) a řešením soustavy dvou rovnic o dvou neznámých získáte hledané veličiny a , b .



- 4) Zpracování hodnot odporu získaných při kalibraci **termistoru** provedte tak, jak je obvyklé pro vyhodnocení teplotní závislosti odporu (resp. vodivosti) každého polovodiče a jak je znázorněno na obr. 2. Na vodorovnou osu vynášejte převrácené hodnoty absolutní teploty $1/T$, na svislou pak přirozený logaritmus vodivosti G . Uvědomte si, že platí

$$\ln G = \ln \frac{1}{R} = -\ln R \quad \text{!!!}$$

K narýsování této závislosti můžete použít též semilogaritmický papír. Do grafu vnesenými body proložte přímkou a teprve z této přímky odečtete dvě vzdálenější dvojice hodnot $1/T_1$, $\ln G_1$, resp. $1/T_2$, $\ln G_2$. Takto získané hodnoty pak dosadíte do rovnice (7) a vypočítejte aktivační energii E_g vámi měřeného termistoru!

Měření ohniskových vzdáleností spojných čoček

Úkol: Změřit ohniskové vzdálenosti spojných čoček různými metodami.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Geometrická optika je tím oborem optiky, v němž se při popisu procesu šíření optického záření a při procesu optického zobrazování zanedbává vlnová povaha světla i jeho kvantové vlastnosti. Matematický popis procesů, na něž se omezuje geometrická optika, i příslušné geometrické konstrukce používají jako základní pojem **geometrický paprsek**. Ten je sice po geometrické stránce naprosto totožný s pojmem světelný paprsek, ale nepřipisuje se mu žádný zvláštní obsah po stránce fyzikální.

Geometrická optika se opírá o čtyři základní principy (resp. zákony):

- ① 1. princip přímočarého šíření světla,
- ② 2. zákon odrazu,
- ③ 3. zákon lomu,
- ④ 4. princip nezávislosti chodu světelných paprsků.

U čoček se při zobrazování uplatňuje jen lom světelných paprsků. Podle charakteru zobrazení rozlišujeme **čočky spojně** (neboli spojky), jež mění rovnoběžný svazek paprsků ve sbíhavý, a **čočky rozptylně** (neboli rozptylky), jež naopak mění rovnoběžný svazek paprsků na rozbíhavý.

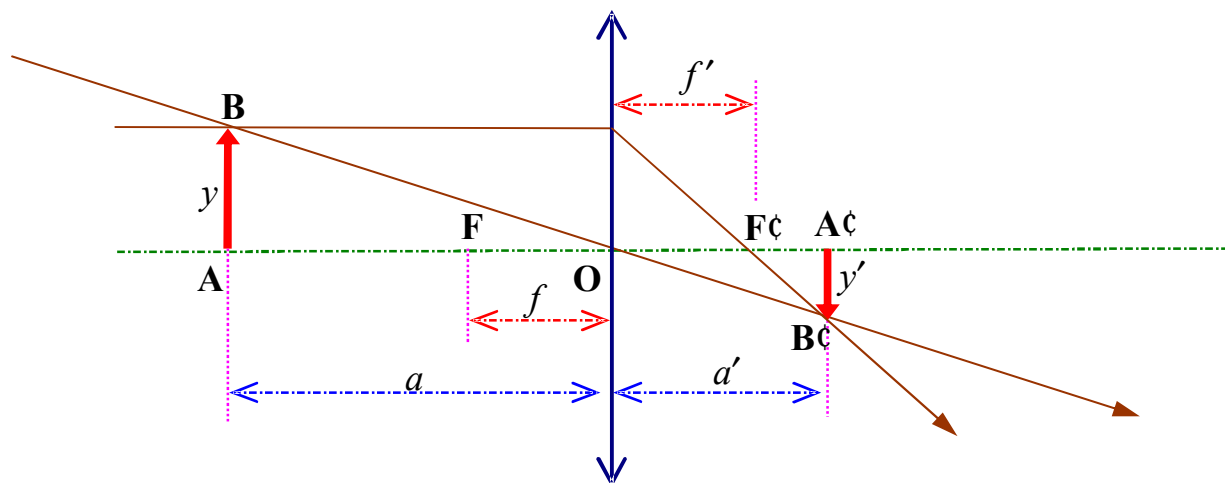
Zobrazování tenkou spojnou čočkou

Základní přímkou je u každé čočky (podobně jako i u jiných zobrazovacích zařízení) tzv. **optická osa** tenké čočky, jež prochází čočkou kolmo a navíc jejím **optickým středem O**. Body **F** a **F'** jsou **předmětové** a **obrazové ohnisko**, jejich vzdálenosti od optického středu čočky nazýváme **předmětová ohnisková vzdálenost** $f = |FO|$ a **obrazová ohnisková vzdálenost** $f' = |OF'|$. Pro ideální tenkou čočku platí, že jsou tyto dvě vzdálenosti stejné ($f' = f$), a proto pro ně používáme společné označení **ohnisková vzdálenost** f .

Na rozdíl od zrcadel světlo čočkami prochází, a proto rozlišujeme prostor, z něhož světlo do čočky vstupuje – tzv. **předmětový prostor**, a prostor, do něhož světlo po průchodu čočkou vystupuje – tzv. **obrazový prostor**.

Při konstrukci obrazu vytvořeného tenkou čočkou (viz následující obr. 1) pak využíváme tří druhů význačných paprsků:

- Ⓡ paprsek procházející optickým středem **O** čočky se jako jediný neláme a nemění svůj směr,
- Ⓡ paprsek rovnoběžný s optickou osou po průchodu čočkou protíná optickou osu v obrazovém ohnisku **F'**,
- Ⓡ paprsek procházející předmětovým ohniskem **F** se po průchodu čočkou stává rovnoběžným s optickou osou.



a předmětová vzdálenost

y výška předmětu

a' obrazová vzdálenost

y' výška obrazu

Obr. 1 - zobrazování tenkou spojnou čočkou

Je však třeba zdůraznit, že zde platí určitá znaménková konvence (pravidla). Předmětová vzdálenost a je **kladná v předmětovém prostoru** a **záporná v obrazovém prostoru**, u obrazové vzdálenosti a' je tomu pochopitelně přesně naopak (**kladná** v obrazovém a **záporná** v předmětovém prostoru) Ⓡ tato situace nastává právě v těch případech, když vzniká při zobrazování čočkou tzv. **zdánlivý obraz**). Výškám předmětu a obrazu y, y' přiřazujeme stejně jako např. při zobrazování zrcadlem **nad** optickou osou **kladnou** hodnotu, **pod** ní pak hodnotu **zápornou**.

Vztah mezi předmětovou vzdáleností a , obrazovou vzdáleností a' a ohniskovou vzdáleností f pak vyjadřuje **zobrazovací rovnice tenké čočky**

$$\boxed{\frac{1}{a} + \frac{1}{a'} = \frac{1}{f}} \quad (1)$$

Příčné zvětšení Z obrazu lze pak vyjádřit několika navzájem ekvivalentními vztahy. Platí, že

$$\boxed{Z = \frac{y'}{y} = -\frac{a'}{a} = -\frac{a' - f}{f} = -\frac{f}{a - f}} \quad (2)$$

A pozor !!! Bude-li vznikat obraz **vzpřímený**, bude znaménko příčného zvětšení **kladné** ($Z > 0$); vzniká-li ovšem obraz **převrácený**, bude jeho znaménko **záporné** ($Z < 0$).



Ze zobrazovací rovnice pak lze po změření předmětové a obrazové vzdálenosti snadno vypočítat ohniskovou vzdálenost tenké čočky

$$f = \frac{aa'}{a + a'} \quad (3)$$

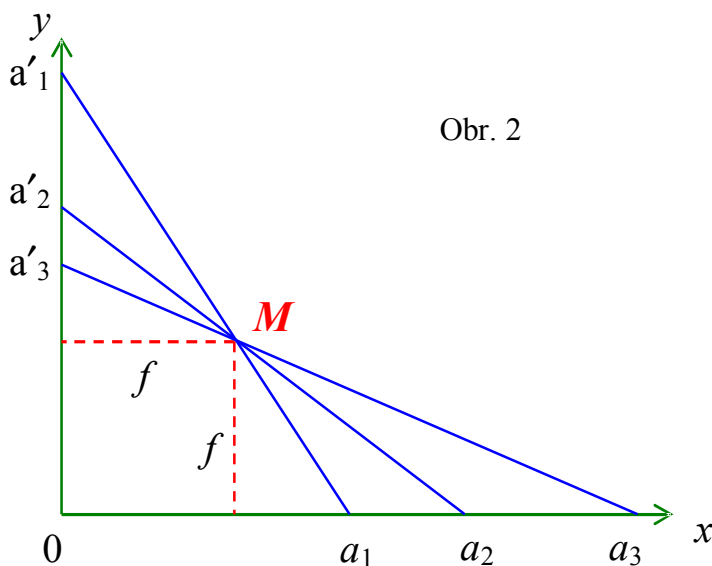
Kromě přímé aplikace zobrazovací rovnice se však používají pro zjišťování ohniskových vzdáleností čoček i jiné (nepřímé) metody, jež jsou buď jednodušší, než je měření předmětové vzdálenosti a a obrazové vzdálenosti a' , nebo jsou zatíženy menší chybou než výpočet podle vzorce (3). Je třeba si uvědomit, že reálné čočky nebývají nekonečně tenké, mají určitou tloušťku a že zobrazovací rovnice (1) přesně platí skutečně jen pro takové čočky, jejichž tloušťka je zanedbatelně malá.

Postup měření:

I. Určení ohniskové vzdálenosti spojné čočky přímou metodou ze zobrazovací rovnice

Změříme-li předmětovou vzdálenost a zobrazovaného předmětu a obrazovou vzdálenost a' ostrého obrazu, je možno toto měření okamžitě vyhodnotit podle vztahu (3). Toto měření lze však zpracovat též **graficky**, a to následujícím způsobem.

Spočívá v tom, že na vodorovnou osu x pravoúhlé soustavy souřadnic nanášíme předmětovou vzdálenost a , na svislou osu y pak obrazovou vzdálenost a' . Takto vynesené body pak spojíme úsečkou (viz obr. 2). Provedeme-li více měření předmětové a obrazové vzdálenosti u jedné a téže čočky a zpracujeme-li je naprosto stejným způsobem, zjistíme, že se všechny takto zkonstruované úsečky protínají v jednom bodě **M**. Přitom bude platit, že obě souřadnice tohoto bodu **M** jsou rovny hledané ohniskové vzdálenosti měřené čočky (tedy platí **M** [f ; f]).



Obr. 2

Zdůvodnění tohoto postupu je přitom velmi snadné. Přímky, jejichž částmi jsou úsečky vynesené na obr. 2, lze posat rovnicemi, jež mají zápis v úsekovém tvaru

$$\frac{x}{a} + \frac{y}{a'} = 1 \quad (4)$$

Všechny takové přímky ale musí nutně obsahovat bod **M**, jehož souřadnice jsou $x = f$, $y = f$, neboť právě dosazením těchto hodnot do rovnice (4) dostáváme vztah, jenž je jen upraveným zápisem zobrazovací rovnice tenké čočky

$$\frac{f}{a} + \frac{f}{a'} = 1$$

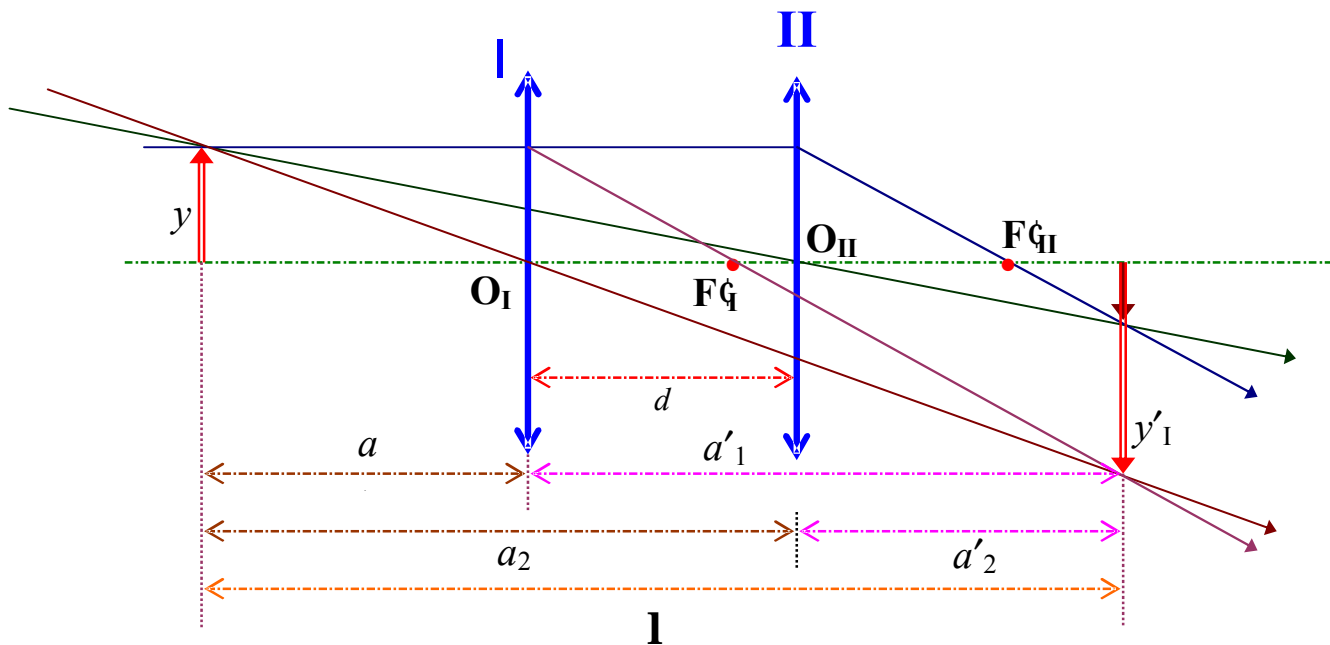
II. Besselova metoda

Tato metoda je založena na poznatku, že pro jistou pevnou vzdálenost **l** předmětu a stínítka, na němž se vytváří obraz, existují dvě polohy čočky **I** a **II** (viz následující obr. 3), při nichž vzniká ostrý skutečný obraz. Lze snadno dokázat, že takový případ může nastat jen v tom případě, kdy vzdálenost předmětu od stínítka $\mathbf{l} = a + a'$ splňuje triviální podmínku

$$\mathbf{l} > 4f$$

Je-li právě $\mathbf{l} = 4f$, vzniká jen jeden stejně velký skutečný převrácený obraz, při menších vzdálenostech **l**, než je čtyřnásobek ohniskové vzdálenosti dané čočky skutečný obraz na stínítku vůbec nevzniká.

V poloze I je čočka blíže předmětu a obraz je zvětšený, v poloze II je čočka blíže obrazu, a ten je naopak zmenšený. Je patrné, že obě polohy čočky budou položeny symetricky vzhledem ke středu vzdálenosti mezi předmětem a stínítkem **l** a předmětová vzdálenost v prvním případě bude rovna obrazové vzdálenosti v druhém případě a naopak. To vyplývá z tzv. **záměnnosti chodu paprsků**, podle níž lze na optické ose spojné čočky navzájem vyměnit polohy předmětu a obrazu a s tím i symetricky polohu čočky samé.



Obr. 3

Označíme-li vzdálenost obou poloh čočky (I a II) jako d , potom vidíme, že platí

$$\mathbf{l} = a_1 + a_1' \quad , \quad d = a_1' - a_1 \quad .$$

Jednoduchou úpravou dostáváme

$$a_1 = \frac{\mathbf{l} + d}{2} \quad , \quad a_1' = \frac{\mathbf{l} - d}{2} \quad .$$

Po dosazení hodnot a_1 a a_1' do vztahu (3) dostaneme pro hledanou ohniskovou vzdálenost

$$f = \frac{aa'}{a + a'} = \frac{(\mathbf{l} + d) \cdot (\mathbf{l} - d)}{4\mathbf{l}} \quad \text{a odtud}$$

$$\boxed{f = \frac{\mathbf{l}^2 - d^2}{4\mathbf{l}}} \quad . \quad (5)$$

Vidíme, že k určení ohniskové vzdálenosti nám u této metody stačí při pevné vzdálenosti \mathbf{l} mezi předmětem a obrazem změřit pouze jeden délkový údaj – vzdálenost d dvou poloh čočky.

III. Stanovení ohniskové vzdálenosti spojné čočky z příčného zvětšení

Příčné zvětšení čočky je definováno jako poměr velikosti obrazu y' ku velikosti předmětu y , jenž je danou čočkou zobrazován, a jeho matematické vyjádření udává série vztahů (2).

Jednoduchou úpravou jednoho z nich

$$Z = -\frac{a' - f}{f}$$

získáme vzorec vyjadřující ohniskovou vzdálenost čočky pomocí příčného zvětšení

$$\boxed{f = \frac{a'}{1 - Z}} \quad . \quad (6)$$

IV. Abbeova metoda

Tato metoda je také založena na měření příčného zvětšení. Na rozdíl od předcházející metody č. III však nevyžaduje měření obrazové vzdálenosti a' , jež je u silnějších čoček vždy zatíženo určitou chybou.

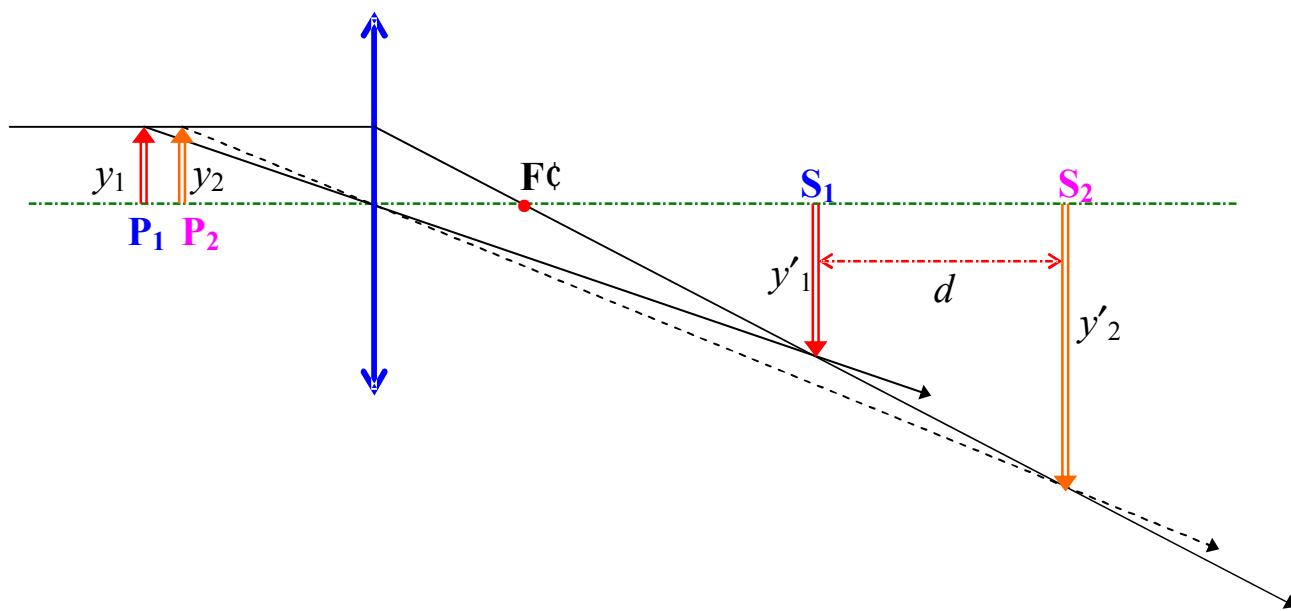
Pro danou polohu předmětu P_1 a stínítka S_1 existuje při splnění podmínky $\mathbf{l} > 4f$ jistá poloha čočky, při níž vznikne na stínítku ostrý zvětšený a převrácený obraz předmětu (viz obr. 4). Měřením velikosti předmětu y_1 a jeho obrazu y'_1 , můžeme určit příčné zvětšení

$$Z_1 = \frac{y'_1}{y_1} .$$

Nyní oddálíme stínítko od čočky o jistou **přesně změřenou vzdálenost** d do polohy S_2 . Čočku ale přitom necháme v nezměněné poloze a najdeme takovou polohu předmětu P_2 , při níž opět vzniká ostrý zvětšený obraz výšky y'_2 . Pro toto druhé zvětšení platí

$$Z_2 = \frac{y'_2}{y_2} .$$

Obr. 4



Podle předcházející metody III musí pro obě zobrazení platit

$$f = \frac{a'_1}{1 - Z_1} \quad a \quad f = \frac{a'_2}{1 - Z_2} .$$

Odtud dostáváme

$$d = a'_2 - a'_1 = f(1 - Z_2) - f(1 - Z_1) = f(Z_1 - Z_2) ,$$

z čehož vyplývá poslední vztah pro ohniskovou vzdálenosti

$$\boxed{f = \frac{d}{Z_1 - Z_2}} . \quad (7)$$

Úkoly:

1) Grafické zpracování přímé metody

Pro konstrukci úseček použijeme čtyř dvojic naměřených předmětových a obrazových vzdáleností. Umístěte stínítko do polohy, kdy vznikne po zobrazení čočkou jak zvětšený, tak i zmenšený obraz předmětu (tím je v tomto, ale i v dalších úkolech čtvercová síťka na níž je znázorněna definovaná vzdálenost). Změřte nejprve předmětovou a obrazovou vzdálenost a_1 a a'_1 pro zvětšený obraz, a poté tyto hodnoty označené jako a_2 a a'_2 pro zmenšený obraz. Pro vyšší přesnost toto měření opakujte pětkrát; předmětové a obrazové vzdálenosti měřte s přesností na jednotky milimetrů!

Potom stínítko posuňte o něco dál od zobrazovaného předmětu a předcházející měření zopakujte. Naleznete zvětšený a zmenšený obraz a měřte příslušné předmětové a obrazové vzdálenosti a_3 a a'_3 resp. a_4 a a'_4 .

Naměřené hodnoty zapisujte do tabulky I a zpracujte graficky (viz obr. 2). Na vodorovnou osu nanášejte průměrné hodnoty $\overline{a_1}, \dots, \overline{a_4}$ předmětových vzdáleností a na svislou osu pak průměrné hodnoty $\overline{a'_1}, \dots, \overline{a'_4}$ vzdáleností obrazových.

Pozor !!! Má-li být měření správně vyhodnoceno, musejí se osy grafu protínat jednoznačně **v počátku !!!**

Tabulka I:

n	a_1 (mm)	a'_1 (mm)	a_2 (mm)	a'_2 (mm)	a_3 (mm)	a'_3 (mm)	a_4 (mm)	a'_4 (mm)
1								
2								
3								
4								
5								
Ø								

2) Besselova metoda

Zvolte pevně vzdálenost l (předmět – stínítko) tak, aby vznikl zvětšený i zmenšený ostrý obraz předmětu (čtvercové síť). Pak desetkrát změříme vzdálenost d obou poloh čočky $d = |O_I O_{II}|$ s přesností na jednotky milimetrů. Uvědomte si, že měření této vzdálenosti d je zejména u silnějších čoček mnohem přesnější než měření předmětové a obrazové vzdálenosti a a a' !!!

Hodnoty získané měřením zapisujte do tabulky II, podle vztahu (5) vypočítejte hledanou ohniskovou vzdálenost f čočky, její průměrnou hodnotu \bar{f} , pravděpodobnou chybu průměru \bar{J}_f a relativní chybu měření.

Tabulka II:

$$l = \dots \text{ mm}$$

n	d (mm)	f (mm)	Δf (mm)
1			
2			
3			
...			
10			

$$\bar{f} = \dots \text{ mm}$$

3) Určování ohniskové vzdálenosti ze zvětšení

Stínítko dejte do polohy, kdy se vytvoří ostrý **zvětšený** obraz předmětu. Na čvercové síťce, kterou zobrazujete, máte přesně vyznačenou vzdálenost 2 cm, takže zvětšení předmětu určíte snadno změřením velikosti obrazu právě těchto 2 cm na stínítku. Měření provádějte pro vyšší přesnost desetkrát, velikost obrazu určujte **posuvným měřítkem**, do tabulky III pak zaznamenávejte obrazovou vzdálenost a' a zvětšení Z .

**Dejte pozor na to, že vzniká obraz převrácený
a zvětšení je proto záporné !!!**

Hledanou ohniskovou vzdálenost f vypočítejte ze vztahu (6). Dále postupujte jako v předcházejícím úkole - určete průměrnou hodnotu \bar{f} , její pravděpodobnou chybu \bar{J}_f a relativní chybu měření!

Tabulka III:

n	a' (mm)	Z	f (mm)	Δf (mm)
1				
2				
3				
...				
10				

$$\bar{f} = \dots \text{ mm}$$

4) Abbeova metoda

Postupujeme podle návodu uvedeného v obecné části. Čočkou opět zobrazujte čtvercovou síťku s vyznačenou vzdáleností 2 cm. Pro zvýšení přesnosti proved'te deset měření při první poloze S_1 stínítka a deset při druhé poloze S_2 . Ohniskovou vzdálenost čočky počítejte podle vztahu (7), hodnoty zapisujte do tabulky IV a opět určete průměrnou hodnotu \bar{f} , její pravděpodobnou chybu \bar{J}_f a relativní chybu měření!

Tabulka IV:

$d = \dots \text{ mm}$

n	Z_1	Z_2	f (mm)	Δf (mm)
1				
2				
3				
...				
10				

$\bar{f} = \dots \text{ mm}$

Výsledky získané v úkolech 2) - 4) zapisujte vždy ve tvaru

$$f = \bar{f} \pm \bar{J}_f \quad .$$

5) Hodnoty ohniskové vzdálenosti f dané čočky vypočítané různými metodami porovnejte!

Spektroskop

- Úkol:**
- a) Stanovení disperzní křivky hranolu.
 - b) Určení neznámých vlnových délek spektrálních čar vybraných výbojek.
 - c) Určení hlavních kvantových čísel k v atomu vodíku z čar Balmerovy série.
 - d) Určení absorpčních oblastí vybraných vzorků kapalných a pevných látek.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Při průchodu světla z jednoho prostředí do druhého dochází k jeho lomu. Tento jev je způsoben různou rychlostí šíření světla v různých prostředích. Pozorujeme jej např. při přechodu světla ze vzduchu do vody nebo do skla. Vzduch se svými **optickými vlastnostmi** blíží vakuu, a proto se v něm světlo libovolné barvy prakticky šíří maximální možnou rychlostí $c \approx 3 \cdot 10^8 \text{ ms}^{-1}$. Ve skle nebo ve vodě, tedy v prostředí opticky hustším, je vždy rychlost světla v menší. Poměr těchto dvou rychlostí

$$n = \frac{c}{v}$$

se nazývá **absolutní index lomu** a je to fyzikální veličina, jež nemá jednotku a jejíž velikost je vždy větší nebo rovna jedné.

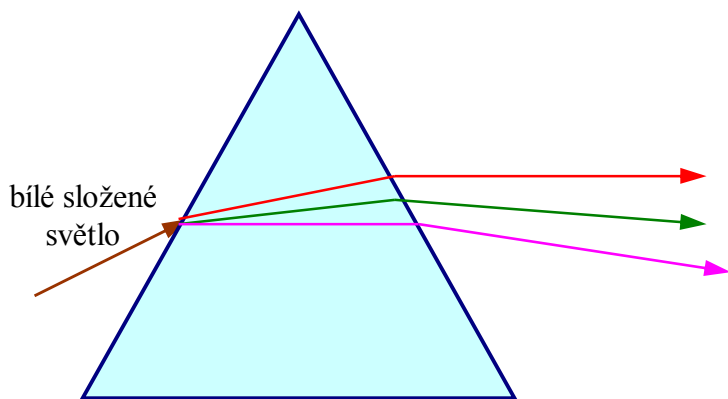
Při daném úhlu dopadu a světelného paprsku na rozhraní obou prostředí určuje index lomu jednoznačně i úhel lomu b paprsku, což matematicky vyjadřuje **Snellův zákon**

$$\frac{\sin a}{\sin b} = \frac{c}{v} = n \quad .$$

Kdyby se světlo složené z různých barev šířilo v hmotném prostředí stejnou rychlostí nezávislou na jeho barvě, nedocházelo by při lomu světla též k jeho rozkladu. Protože však tento jev nastává, znamená to, že lom světla je závislý na barvě světla (přesněji na frekvenci světla určité barvy). Z toho logicky vyplývá, že světla různých barev se musejí nutně v hmotném prostředí šířit různě velkou rychlostí v .

Z viditelného oboru (t.j. světlo o vlnové délce zhruba 400 nm – 760 nm) vykazuje nejvyšší rychlost šíření (a také se nejméně láme) červené světlo, lom u ostatních barev směrem k fialové narůstá (a rychlost šíření klesá). Tento jev se nazývá **disperze světla**. Graf závislosti rychlosti šíření světla v prostředí na jeho vlnové délce, případně závislost indexu lomu n na vlnové délce l se nazývá **disperzní křivkou daného prostředí**.

Při průchodu světla optickým hranolem dochází dokonce ke dvojímu lomu světelného paprsku (viz obr. 1 na následující straně).

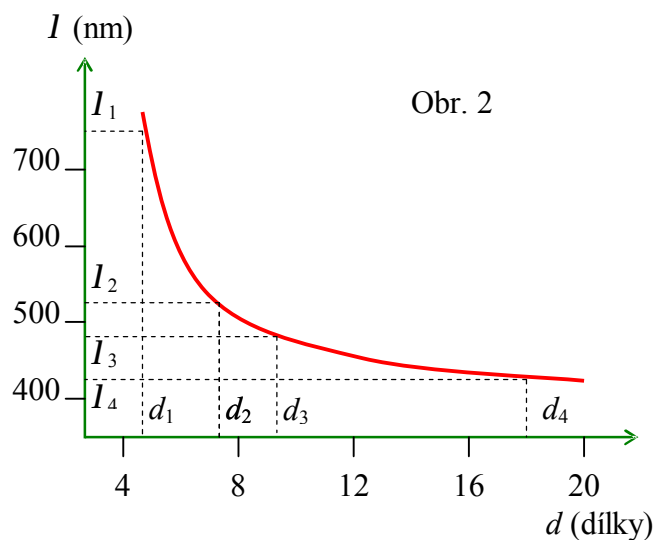


Obr. 1

Při jednom lomu totiž není rozklad světla tak výrazný jako při lomu vícenásobném. Bílé světlo se tak po průchodu hranolem rozloží na spojité spektrum nazývané **spektr** **hranolovým**.

Spektroskop je optický přístroj k pozorování spekter. Umožňuje-li nám navíc i měřit frekvence, resp. vlnové délky ve spektru (např. pomocí vhodně promítnuté lineární stupnice do zorného pole přístroje), nazýváme ho **spektrometr**.

Spektrometr musíme před každým měřením **ocejchovat**, t.j. každému dílku promítnuté stupnice musíme přiřadit určitou vlnovou délku. K tomu nám slouží takový zdroj (výbojka), u něhož jsou známé vlnové délky spektrálních čar. Souvislost mezi dílkou d promítnuté stupnice a vlnovými délkami I graficky vyjadřuje tzv. **disperzní křivka spektrometru** (viz vedlejší obr. 2). Jelikož postačí tuto disperzní křivku aproximovat polynomem třetího stupně, stačily by k jejímu určení a tudíž i k ocejchování spektrometru **čtyři** známé spektrální čary. Přesnost aproximace však značně zvýšíme, pokud použijeme více čar spektra.



Obr. 2

Pozorujeme-li ve spektru známé výbojky spektrální čary o vlnových délkách I_1 , I_2 , I_3 a I_4 na dílcích **lineární stupnice** d_1 , d_2 , d_3 a d_4 , můžeme pak jakémukoli dalšímu dílku d_i této stupnice přiřadit vlnovou délku I_i právě pomocí aproximačního polynomu třetího stupně

$$I_i = k + ld_i + md_i^2 + nd_i^3, \quad (1)$$

kde k , l , m , n jsou po řadě konstantní, lineární, kvadratický a kubický koeficient polynomu.

Spektrum atomu vodíku:

Vodíkový atom představuje jednoduchý kvantový systém tvořený jedním protonem v jádře atomu a jedním elektronem kolem jádra obíhajícím. Pro energetiku hladiny obíhajícího elektronu platí vztah

$$E_n = -\frac{h.c.R}{n^2} \quad (2)$$

kde $R = 10\,973\,731,6 \text{ m}^{-1}$ je **Rydbergova konstanta**, $h = 6,626\,068 \cdot 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$ **Planckova konstanta**, n **hlavní kvantové číslo** a $c = 299\,792\,458 \text{ m}\cdot\text{s}^{-1}$ **rychlost světla ve vakuu**.

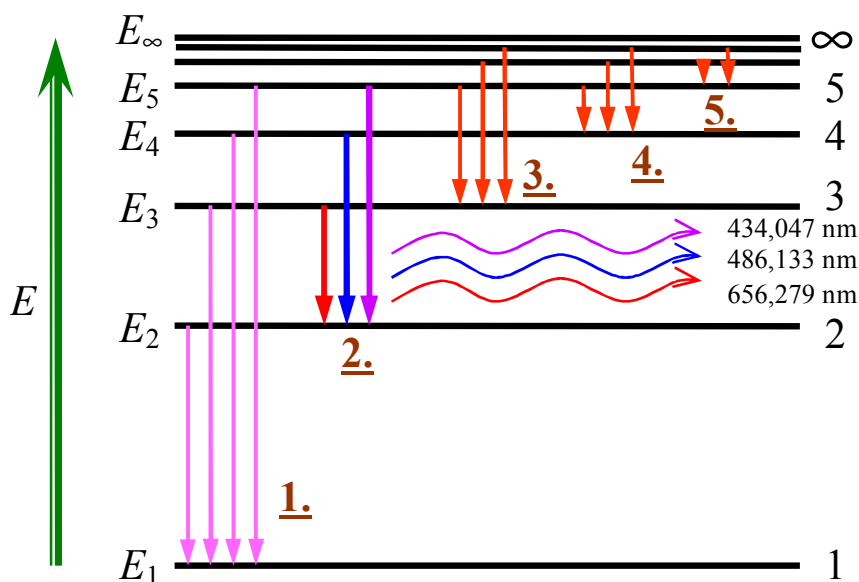
Při přechodu elektronu z vyšší energetické hladiny k na nižší n (při tzv. **deexcitaci**) se vyzářuje elektromagnetické záření o frekvenci f (resp. vlnové délce l) v souladu se vztahem (**POZOR** na to, že energie obíhajícího elektronu **je záporná !!!**)

$$h.f = \frac{h.c}{l} = E_k - E_n = h.c.R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (3)$$

K excitaci elektronu na vyšší energetickou hladinu dochází při výboji v parách tohoto plynu. Při následné deexcitaci se tedy vyzáří elektromagnetické záření o vlnové délce l , pro niž platí **Rydbergův vztah**

$$\frac{1}{l} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{k^2} \right) \quad (4)$$

Ze vztahu (4) je patrné, že lze vodíkové spektrum rozdělit do několika (teoreticky i nekonečně mnoha) **sérií spektrálních čar**, z nichž každá je charakterizována pevným kvantovým číslem n příslušným hladině, na kterou vždy elektron sestoupí po deexcitaci z libovolné vyšší energetické hladiny s kvantovým číslem k ($k > n$) – viz následující obr. 3.



Obr. 3

Jednotlivé série byly pak nazvány podle svých objevitelů:

- 1.** $n = 1$ série Lymanova (v ultrafialové části spektra)
- 2.** $n = 2$ série Balmerova (jediná ve viditelné části spektra)
- 3.** $n = 3$ série Paschenova (v infračervené části spektra)
- 4.** $n = 4$ série Brackettova (v infračervené části spektra)
- 5.** $n = 5$ série Pfundova (v infračervené části spektra)

Čáry vodíkového spektra, jež leží ve viditelném oboru elektromagnetického záření, přísluší pouze do **Balmerovy série**, pro kterou platí $n = 2$. Tyto čáry budete moci pozorovat a jejich vlnové délky pomocí aproximačního polynomu (1) počítat. Následně pak budete moci ověřit i platnost Rydbergova vztahu (4).

Postup měření:

Měření provádíme na Bunsenově spektrometru, který je již nastaven, **a proto s ním nijak nemanipulujte !!!** Hlavní částí přístroje je optický hranol, v němž dochází k vlastnímu rozkladu světla. Světlo do přístroje vstupuje úzkou štěrbinou do kolimátoru a po průchodu hranolem je rozloženo pozorujeme v zorném poli dalekohledu. Současně pomocí druhého kolimátoru promítáme do zorného pole lineární stupnici, jež nám umožňuje vypočítat vlnové délky v různých pozorovaných spektrech.

- 1)** Nejprve provedeme **cejchování stupnice spektrometru**. K tomuto úkolu se velice dobře hodí čárové spektrum rtuťové-kadmiové výbojky, jež obsahuje vedle několika slabších i řadu intenzivních spektrálních čar (viz Tabulka I).

Tabulka I

Pořadí (zleva)	Barva čáry	Intenzita čáry	Prvek	Vlnová délka λ (nm)
1	červená	silná	Cd	644
2	žlutý dublet	silná	Hg	579/577
3	žlutozelená	silná	Hg	546
4	zelená	velmi slabá	Cd	514
5	zelená	silná	Cd	509
6	modrozelená	velmi slabá	Hg	492
7	modrozelená	silná	Cd	480
8	modrá	slabá	Cd	468
9	modrá	silná	Hg	436
10	fialová	slabá	Hg	408
11	fialová	slabá	Hg	405

Pozn.: Pokud vám u žlutého dubletu obě čáry splývají dohromady v čáru jednu, zvolte jako hodnotu vlnové délky λ střední hodnotu 578 nm.

K výpočtu aproximačního polynomu (1) použijte vhodného programu (Excel, Orogen, Grapher,...). Využijte přitom co největšího počtu čar a výsledek vaší kalibrace pečlivě kontrolujte na grafu. Na vodorovnou osu nanášejte dílky stupnice, z níž odečítáte v zorném poli přístroje polohu jednotlivých spektrálních čar, na svislou osu pak vynášejte jim odpovídající vlnové délky. Disperzní křivka musí být plynulá, její průběh je pouze konvexní. Případně špatně odečtené nebo přiřazené body (spektrální čáry) z kalibrace vyřaďte!

- 2) **Určete neznámé vlnové délky** spektrálních čar dalších výbojek (dalších prvků), podle zadání vyučujícího. K výpočtu vlnových délek I použijte vámi sestavený aproximační polynom (1). Výsledky zaokrouhľujte vždy na tři platná místa, t.j. s přesností na jednotky nanometrů – používaný spektrometr totiž rozhodně nemá vyšší rozlišovací schopnost! Vypočítané hodnoty pak zapište do následující Tabulky II.

Tabulka II:

Prvek

n	d (dílky)	Barva	I (nm)
1			
2			
3			
.			
.			

- 3) Velkou pozornost věnujte **vyhodnocení vodíkového spektra**. Zde kromě výpočtu spektrálních čar Balmerovy série podle vztahu (1), spočítejte také hlavní kvantová čísla k těch hladin, z nichž elektron přeskakuje na hladinu s kvantovým číslem $n = 2$, a při této deexcitaci danou vlnovou délku I vyzařuje. K tomuto výpočtu použijte Rydbergův vztah (2). Uvědomte si, že hodnoty kvantových čísel k by se měly blížit celým číslům (3, 4, 5). Hodnoty zapisujte do Tabulky III.

Tabulka III:

Spektrum atomu vodíku

n	d (dílky)	Barva	I (nm)	k
1				
2				
3				

- 4) Všechny počítané spektrální čáry pak opět **zaneste do grafu** disperzní křivky vámi používaného spektrometru. Při správném výpočtu musí tyto body ležet na disperzní křivce. V závěru své práce pak diskutujte případné odchylky vašich výpočtů od tabelovaných hodnot.

5) **Určete absorpční oblasti** vybraných roztoků a pevných látek. Na rozdíl od předcházejících úkolů nepozorujete v tomto případě spektrum emisní, ale doplňkové spektrum absorpční. Zatímco spektra látek v plynném skupenství jsou spektra čárová, u látek v kapalném skupenství a u pevných látek pozorujeme **spektra pásová**. Navíc hranice pásů nebývají ostré, takže měření, zejména na tak jednoduchém přístroji, jenž máte v laboratoři k dispozici, je spíše jen orientačního charakteru.

V tomto úkole proto již nemusíte výsledky zpracovávat početně, ale jednoduchým vyhodnocením z grafu (z vámi zkonstruované disperzní křivky hranolu). Vlastní experiment provádíte tak, že před kolimátor spektrometru dáte zdroj bílého světla (žárovku). V zorném poli dalekohledu by mělo být pozorovatelné celé spektrum viditelného světla. Pak mezi zdroj bílého světla a štěrbinu budete vkládat postupně jednotlivé vzorky (kyvety s barevnými roztoky a barevná skla) a budete určovat příslušné absorpční oblasti. Výsledek vyznačte v disperzní křivce a запиšte do Tabulky IV.

Tabulka IV: Absorpční oblasti kapalin a pevných látek

Vzorek č. a jeho barva	absorbovaná oblast		propouští barvu
	$d_1 - d_2$ (dílký)	$I_1 - I_2$ (nm)	
1 ... zelený roztok			zelenou a modrou
2 ...			
3 ...			
...			

6) Porovnejte spektrum tepelného zdroje světla – žárovky, jež je spojitě a řídí se vyzařovacím zákonem černého tělesa se zdroji s nespojitým spektrem – zářivka, LED apod., kde jednotlivé čáry či pásy jsou produkovány elektronovými procesy v atomech či pevných látkách. Uvědomte si přitom a popište, jak vzniká bílé světlo.

Měření voltampérových charakteristik

- Úkol:**
- A)** Zjistěte průběh voltampérových charakteristik žárovky s kovovým vláknem, variátoru, ohmického odporu a Zenerovy diody a porovnejte je.
 - B)** Určete která z těchto součástek může pracovat jako stabilizátor napětí nebo proudu a vymezte jejich pracovní oblast.
 - C)** Určete odpor měřeného rezistoru a diferenciální odpor žárovky na začátku, uprostřed a na konci V-A charakteristiky.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

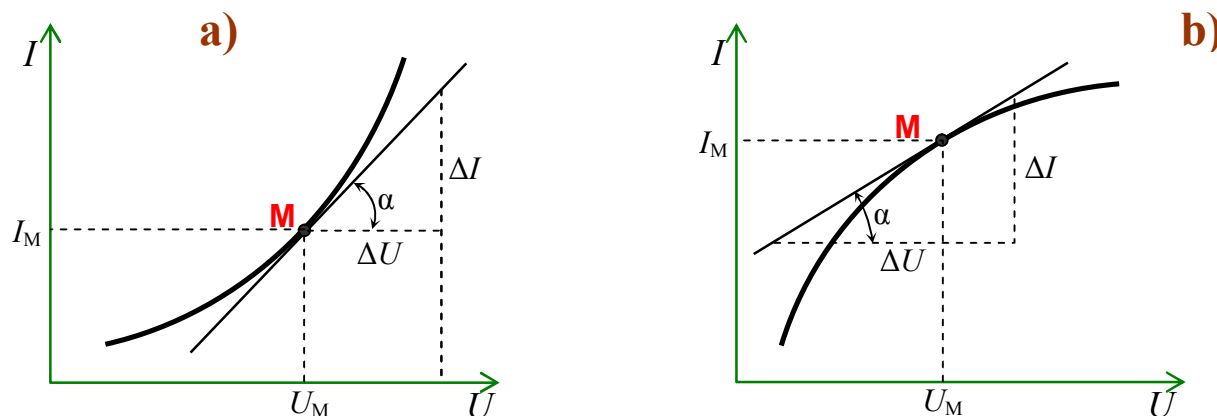
Obecná část:

Jako **voltampérová charakteristika** se označuje grafické znázornění závislosti proudu procházejícího součástkou (prvkem) elektrického obvodu na napětí. Podle jejího tvaru se prvky elektrických obvodů dělí na lineární a nelineární.

K úplnému určení lineární charakteristiky postačí znalost jediné veličiny, a to odporu (případně impedance) daného prvku; v takovém případě platí Ohmův zákon

$$I = \frac{U}{R}, \text{ resp. } I = \frac{U}{Z}.$$

Nelineární charakteristiky (obr. 1) často nelze popsat pomocí jednoduchého analytického výrazu.



Obr. 1.

Odpor prvku se mění s rostoucím napětím, platí $R = R(U)$. V takovém případě je tzv. **statický odpor** R_S prvku dán poměrem napětí a proudu v příslušném pracovním bodě; např. podle obr. 1 platí v bodě **M**

$$R_S = \frac{U_M}{I_M}.$$

Diferenciální odpor R_D je potom definován jako

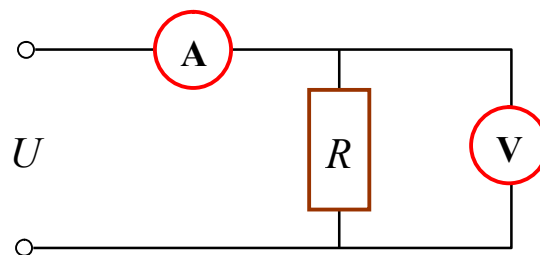
$$R_D = \frac{\Delta U}{\Delta I},$$

což je vlastně převrácená hodnota směrnice tečny k voltampérové charakteristice daného prvku v pracovním bodě (viz obr. 1). Proto bývá tento odpor též někdy nazýván jako „tečný odpor“. Platí

$$\operatorname{tg} \alpha = \frac{\Delta I}{\Delta U} = \frac{1}{R_D} .$$

Pokud v daném bodě platí $\frac{\Delta U}{\Delta I} > 0 \Omega$, je voltampérová charakteristika rostoucí a diferenciální odpor prvku kladný. Opačný průběh se vyskytuje pouze ve speciálních případech. Charakteristika na obr. 1a odpovídá součástce, jejíž odpor R se s rostoucím napětím snižuje (např. žárovka s uhlíkovým vláknem, termistor, aj.), zatímco na obr. 1b je charakteristika součástky, jejíž odpor R se s rostoucím napětím zvyšuje (např. žárovka s kovovým vláknem).

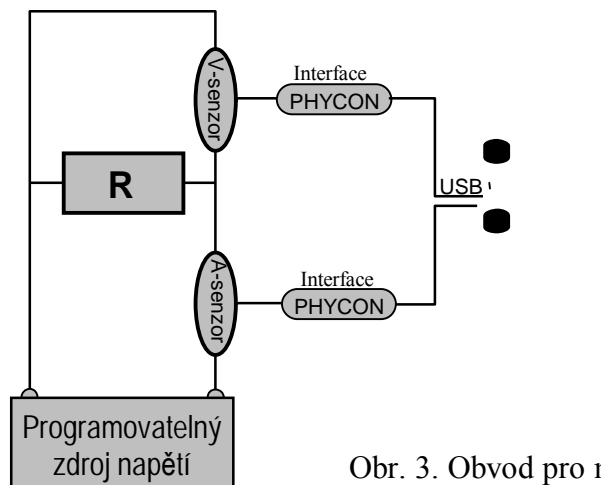
Schéma zapojení používaného pro měření voltampérových charakteristik je znázorněno na obr. 2.



Obr. 2. Schéma obvodu pro měření voltampérových charakteristik

Pracovní postup:

Měření je koncipováno s využitím osobního počítače a digitalizační soupravy Phycon (Phywe) ke sběru a vyhodnocení experimentálních dat. Kromě notebooku tvoří soupravu čidla (senzory) pro měření napětí a proudu a dvě rozhraní (interface) pro převod analogových dat na digitální. Propojení s notebookem je prostřednictvím USB.

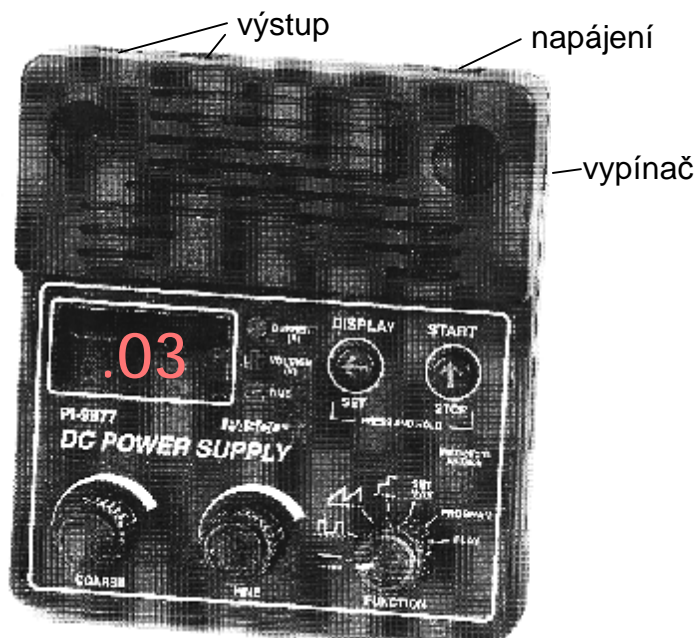


Obr. 3. Obvod pro měření voltampérových charakteristik s pomocí počítače

- 1) Sestavte obvod podle obr. 3. Jako součástku R použijte postupně žárovku, variátor, Zenerovu diodu, ohmický odpor.
- 2) Zapněte notebook, spusťte program **Measure** a nastavte parametry podle návodu.
- 3) Zapněte a naprogramujte zdroj napětí podle návodu.
- 4) Spusťte program kliknutím na **Start Measurement** a hned poté stiskněte na zdroji napětí tlačítko **START/STOP**.
- 5) Na obrazovce notebooku sledujte kreslení závislosti a ihned po dosažení konečné hodnoty napětí stopněte počítačový program.
- 6) Naměřené hodnoty uložte.

ZDROJ NAPĚTÍ

Jako zdroj napětí se v této úloze používá programovatelný zdroj DC Power Supply PI-9877 (Pasco), který může poskytovat napětí měnící se v závislosti na čase definovaným způsobem (obr. 1).



Pro měření charakteristik je nutno naprogramovat lineární vzestup napětí od nuly do určité maximální hodnoty za určitý časový interval (funkce *Ramp*). K tomu zvolíme následující postup.

- 1) Zapněte zdroj vypínačem (1) na pravé straně přístroje.
- 2) Knoflík Function přepněte do polohy \sphericalangle . Kontrolka LED voltage začne pomalu blikat.
- 3) Otáčením knoflíků COARSE event. FINE nastavte na displeji zvolenou hodnotu **maximálního napětí 10 V**.
- 4) Stiskněte a držte tlačítko O SET. Kontrolka LED voltage začne blikat rychle. Při stále stisknutém tlačítku nastavte otáčením knoflíků COARSE event. FINE hodnotu **minimálního napětí 0 V**.
- 5) Stiskněte tlačítko O DISPLAY. Rozsvítí se kontrolka LED Time. Otáčením knoflíků COARSE event. FINE nastavte v sekundách časový interval, během kterého se má změnit napětí z minimální nastavené hodnoty na maximální (např. 5 s).

- 6) Stiskněte a držte tlačítko **Ů** DISPLAY. Kontrolka LED Time začne rychle blikat. Při stále stisknutém tlačítku nastavte otáčením knoflíku FINE **hodnotu -1**, což definuje režim, při kterém se napětí nejprve zvýší do maximální hodnoty a následně sníží na minimální hodnotu. Tím je skončeno programování rampy během něhož je na výstupu ze zdroje stále nulové napětí.
- 7) Automatická změna napětí se spustí/zastaví stisknutím tlačítka **Ÿ** START/STOP.



SPUŠTĚNÍ PROGRAMU PHYCON MEASURE PRO SBĚR DAT

Spustit program – ikona measure

V menu File vybrat New measurements – objeví se nové okno PHYCON / PHYGATE

V okénku get value zvolit every

Zadat čas: pro resistor a Zenerovu diodu 500 ms,
pro žárovku 50 ms,
pro variátor 5 ms.

V okénku vpravo dole kliknout na ikonu Inactive (rozsvítí se ikona Active)

Kliknout na OPTION u ikony Active – otevře se další okno X-Y Online graph

V okénku Y-axis zvolit Current Probe 1

Nastavit rozsah měření from 0 to 0,3 A

Vypnout Autorange

V okénku X-axis

Z nabídky vybrat Voltage Probe 2 (místo time)

Nastavit rozsah měření from 0 to 10 V

Z nabídky vybrat no autorange (místo autorange)

Volby potvrdit kliknutím na OK – návrat do předchozího okna

Kliknutím na To measurement (vpravo dole) otevřít okno s připraveným grafem a jeho velikost podle potřeby upravit (táhnutí za rámeček při stisknuté levém tlačítku)

Spustit měření (bod 4 pracovního postupu) – kliknutím na Start measurement v okně PHYCON/PHYGATE Measuring

Zastavit měření – klik na Stop measurement v okně PHYCON/PHYGATE Measuring

Uložit výsledky měření

- otevřít tabulku kliknutím na ikonu (Data table)
- kliknout na measurement
- kliknutím zvolit Export data . . .
- kliknutím zvolit Safe to file
- kliknutím zvolit Export as numbers
- volby potvrdit OK
- v oknu Uložit jako zvolit název a adresu uložení (nejlépe na vlastní Flashdisk)
- výsledky zpracovat v programu EXCEL

K a p a c i t a d e s k o v é h o k o n d e n z á t o r u

Úkol: Změřte závislost kapacity deskového kondenzátoru na vzdálenosti elektrod a zjistěte jaký vliv má druh prostředí mezi nimi.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Kapacita deskového kondenzátoru složeného ze dvou rovnoběžných rovinných desek oddělených homogenním izotropním nevodivým prostředím je dána vztahem

$$C = \varepsilon \cdot \frac{S}{d} \quad (1)$$

kde ε je permitivita prostředí mezi deskami, S je plocha desek a d jejich vzdálenost.

Postup měření:

K měření použijte deskový kondenzátor s kruhovými elektrodami, jejichž vzdálenost je možno kontrolovaně měnit, a univerzální poloautomatický most *RLCG*.

1. Vypočítejte plochu S desek a ověřte platnost vztahu (1) pro určitou vybranou vzdálenost d elektrod kondenzátoru. Výsledek vašeho výpočtu porovnejte s údajem na poloautomatickém mostě *RLCG*.
2. Změřte závislost kapacity kondenzátoru na vzdálenosti d elektrod v celém dostupném rozsahu. Výsledek měření zpracujte graficky a porovnejte s teoretickou závislostí

$$C \sim \frac{1}{d}$$

3. Vkládejte mezi elektrody kondenzátoru desky z různého nevodivého materiálu a zaznamenejte jejich vliv na kapacitu kondenzátoru při obou frekvencích nastavitelných na poloautomatickém mostě *RLCG* (100 Hz i 1 kHz). Pokuste se určit relativní permitivitu materiálu vkládaných desek.

Vybíjení kondenzátoru a měření velkých odporů

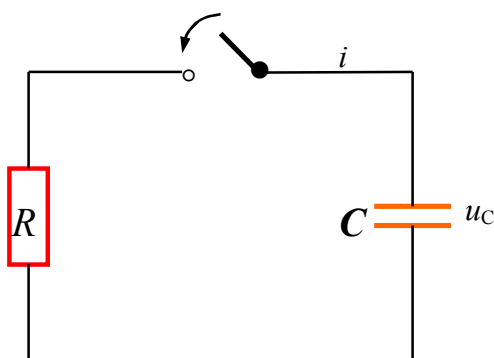
Úkol: Změřit hodnoty několika velkých odporů metodou vybíjení kondenzátoru přes příslušný velký odpor.

Potřeby: Viz seznam v deskách u úlohy na pracovním stole.

Obecná část:

Pro měření velkých odporů (zhruba větších než $10^6 \Omega$) nevyhovují již běžné metody měření odporů (jež jste prováděli např. v úloze „Měření odporu rezistorů“). Je to zejména proto, že v takovém případě protékají obvody velmi malé proudy a jejich měření je obvykle zatíženo velkou chybou.

Jednou z možností, jak poměrně přesně měřit i relativně velké odpory, je metoda založená na měření časové závislosti napětí na jednoduchém paralelním RC obvodu, jenž je v neustáleném (tzv. **přechodném stavu**). Podrobně je fyzikální podstata tohoto jevu rozebrána a příslušné vztahy odvozeny v článku 5.1.4 „Přechodné stavy RC a RL obvodu stejnosměrného proudu“ ve skriptech J. Zajíc „Fyzika II“ (UPa 2004), str. 140-143. Zde uvedeme jen to nejzákladnější.



Obr. 1 - přechodový stav při vybíjení RC obvodu

Pro vaše měření se využívá zákonitostí, jež platí pro přechodný stav RC obvodu při vybíjení nabitě kapacity C (kondenzátoru) přes paralelně zapojený velký odpor – viz vedlejší obr. 1.

Předpokládejme, že počáteční napětí na kapacitě $u_C = U_0$. Po zapnutí spínače v čase $t_0 = 0$ s se začne kapacita vybíjet přes odpor R , napětí u_C na ní postupně klesá až na nulu, kdy se kapacita vybije a obvodem pak přestane procházet proud.

Zákonitosti platící pro příslušné veličiny v RC obvodu při tomto přechodném stavu lze získat pomocí II. Kirchhoffova zákona řešením z něj vycházející poměrně jednoduché diferenciální rovnice (viz uvedená literatura).

Pro časovou závislost velikosti napětí u_C na kapacitě C při jejím vybíjení dostáváme tak výraz

$$u_C = U_0 \cdot e^{-\frac{1}{RC} t} \quad (1)$$

Rychlost poklesu napětí u_C na kapacitě závisí právě na hodnotách kapacity C a odporu R obvodu. Relativně pomalý pokles napětí bude dosažen při vysokém odporu obvodu. A právě na tom je založena metoda měření velkých odporů vybíjením kondenzátoru přes tyto odpory.

Naměříme-li v časech t_1 , t_2 při vybíjení kondenzátoru na tomto prvku napětí U_1 , resp. U_2 , dostáváme po dosažení těchto hodnot do vztahu (1) a následném logaritmování:

$$\ln U_1 = \ln U_0 - \frac{1}{RC} \cdot t_1$$

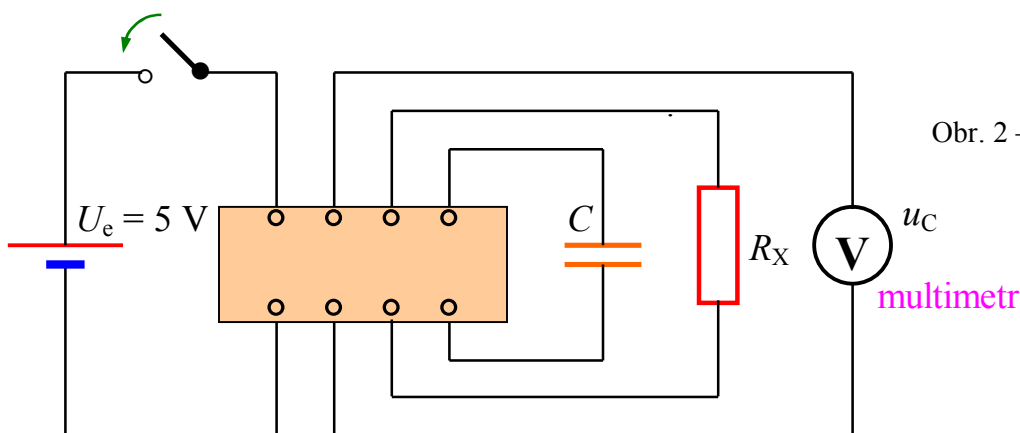
$$\ln U_2 = \ln U_0 - \frac{1}{RC} \cdot t_2$$

Odečteme poslední dvě rovnice a po krátké úpravě (proved'te si !!!) pak dostaneme vyjádření pro velký odpor

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{t_2 - t_1}{\ln U_1 - \ln U_2} \quad (2)$$

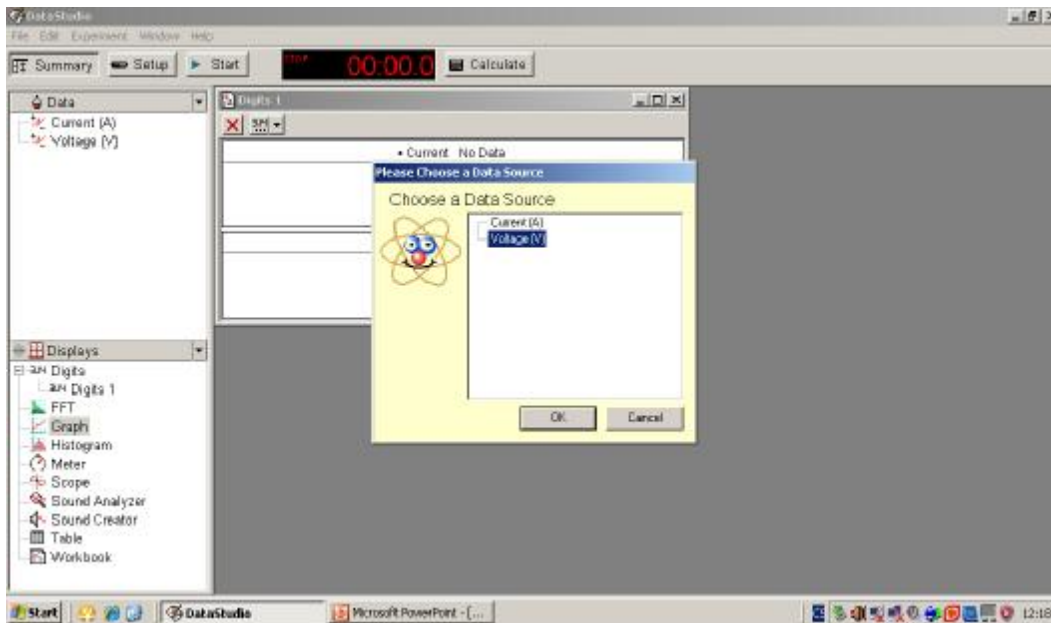
Postup měření:

- 1) Zapojte obvod podle následujícího schématu na obr. 2. Všechny prvky v obvodu jsou paralelně připojeny ke svorkovnici (šedý obdélník ve schématu). **Multimetr na obrázku nahrad'te datalogerem PASCO** s napěťovou a proudovou sondou. Po zapojení obvodu požádejte učitele o jeho schválení a o spuštění softwarové aplikace **DataStudio**.

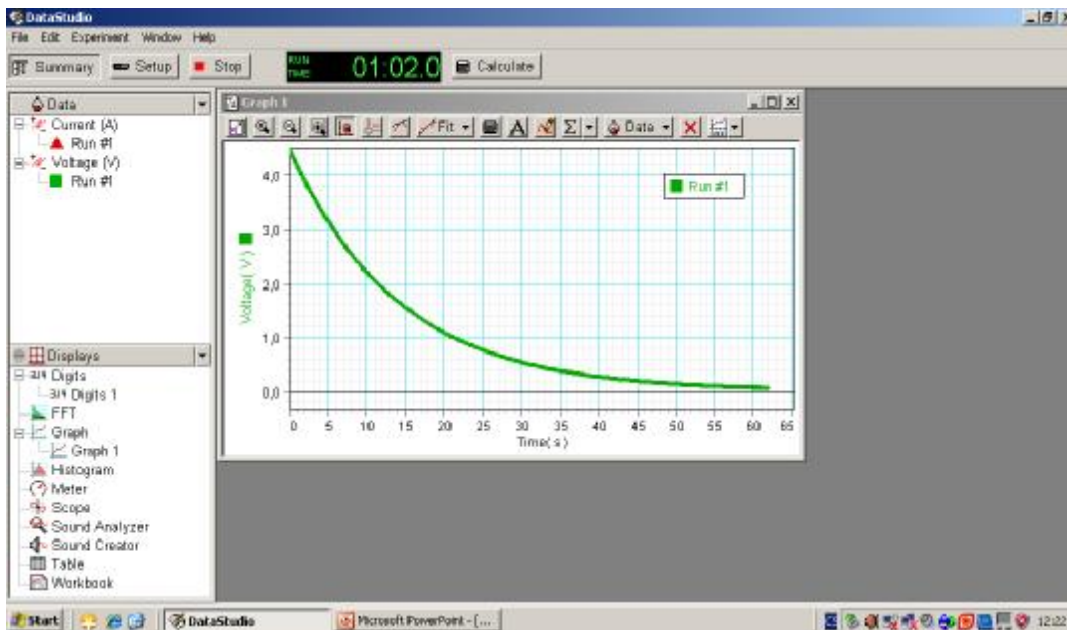


Obr. 2 – schéma zapojení obvodu

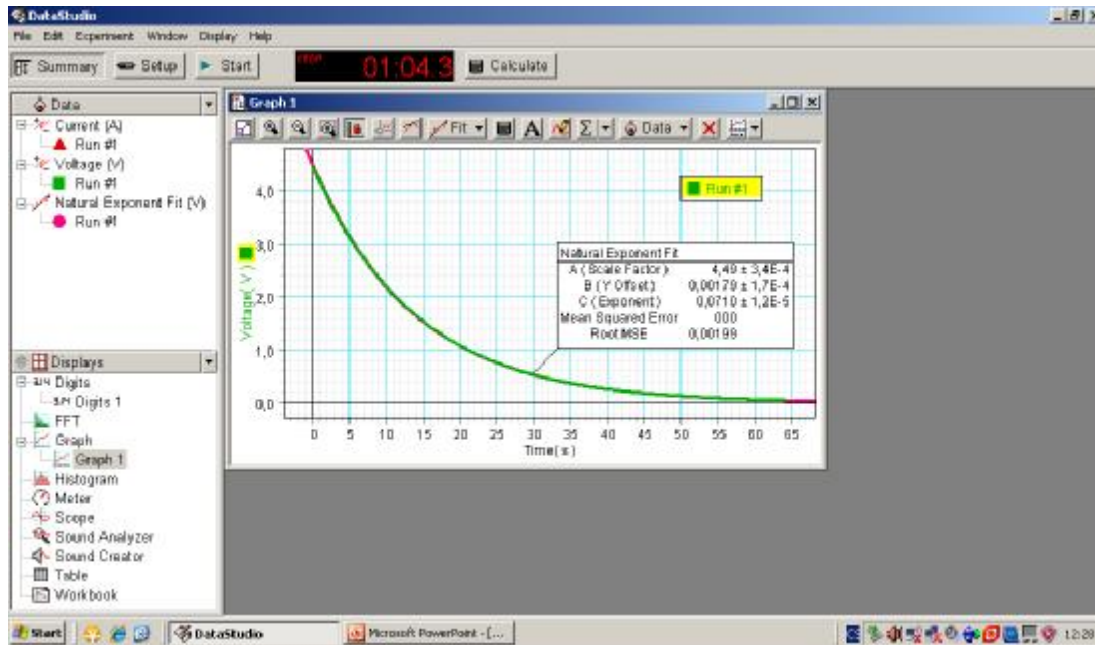
- 2) V levém dolním menu zvolte položku “Graf” a vyberte napěťovou sondu, která jediná je do obvodu zapojena, tak jak je to naznačeno na následujícím obrázku:



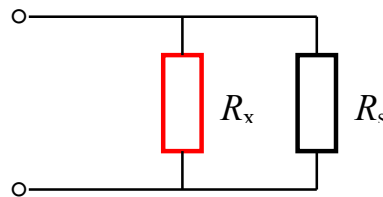
- 3) Nabijte zapnutím vypínače kondenzátor C ze stabilizovaného zdroje na napětí 5 V. Počkejte několik sekund, poté klikněte na tlačítko “Start“ vlevo od stopek a vypněte vypínač. Po odpojení zdroje se kondenzátor začne vybíjet přes měřený odpor R_x a napětí postupně klesá. Tento pokles napětí je zaznamenávám datalogerem a vykreslován v Grafu (viz následující obrázek).



- 4) Po vybití kondenzátoru zastavte načítání hodnot napětí tlačítkem “Stop“ a proložte naměřenými daty exponenciální závislost (výběrem z menu “Fit“). Z nabitovaného exponentu C (viz. následující obrázek) můžete pomocí vztahu 1 určit neznámý odpor R_x



- 5) Určitým problémem tohoto zapojení je to, že se kondenzátor nevybíjí pouze přes příslušný velký odpor R_x , ale také přes všechny svodové odpory aparatury (zejména pak přes vnitřní odpor multimetru). Tento svodový odpor R_s si můžeme představit jako paralelně připojený k měřenému odporu R_x (viz obr. 3).



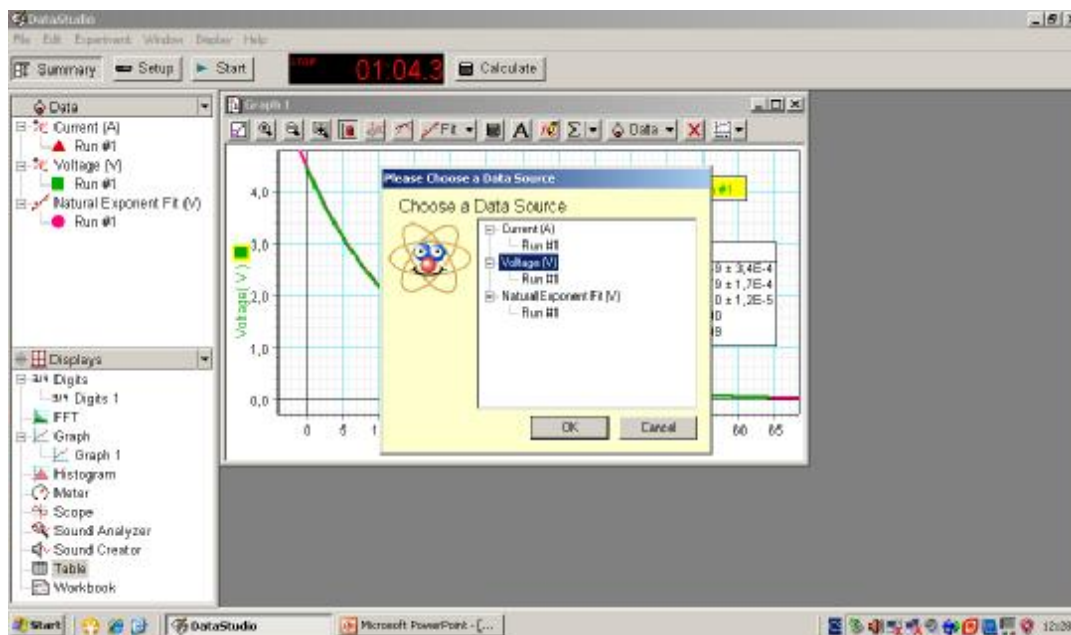
Obr. 3

Tím pádem tak neměříme velikost neznámého odporu R_x , ale celé paralelní kombinace R_{xs} . Pro tento výsledný odpor platí známý vztah

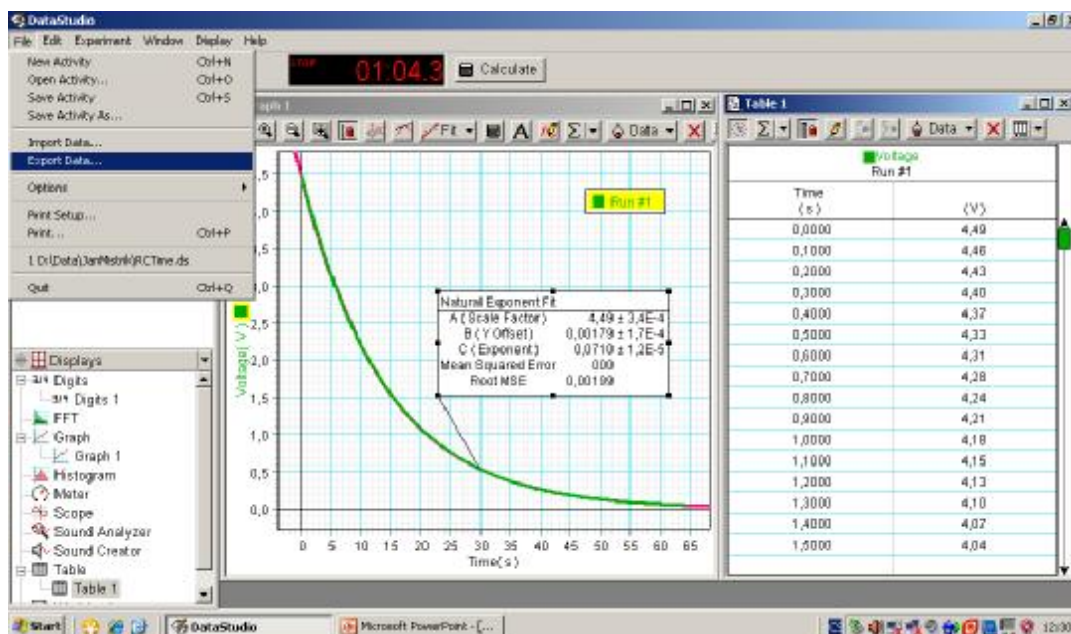
$$\frac{1}{R_{xs}} = \frac{1}{R_x} + \frac{1}{R_s} \quad (3)$$

K určení „čisté“ hodnoty odporu R_x proto musíme navíc na závěr úlohy vždy provést ještě měření samotného svodového odporu R_s . Postup je naprosto stejný jako v bodu 2), pouze od svorkovnice odpojíme krabičku s velkými odpory $R_{1,2,3,4}$ a necháme kondenzátor vybíjet pouze přes svodový odpor R_s obvodu. Napětí ale bude klesat pomaleji, proto je rozumné prodloužit interval odečítání hodnot u_C zhruba na 30 s.

- 6) Naměřené hodnoty získáme kliknutím na položku “Table“ a výběrem datového souboru “Voltage”, tak jak je to naznačeno na následujícím obrázku



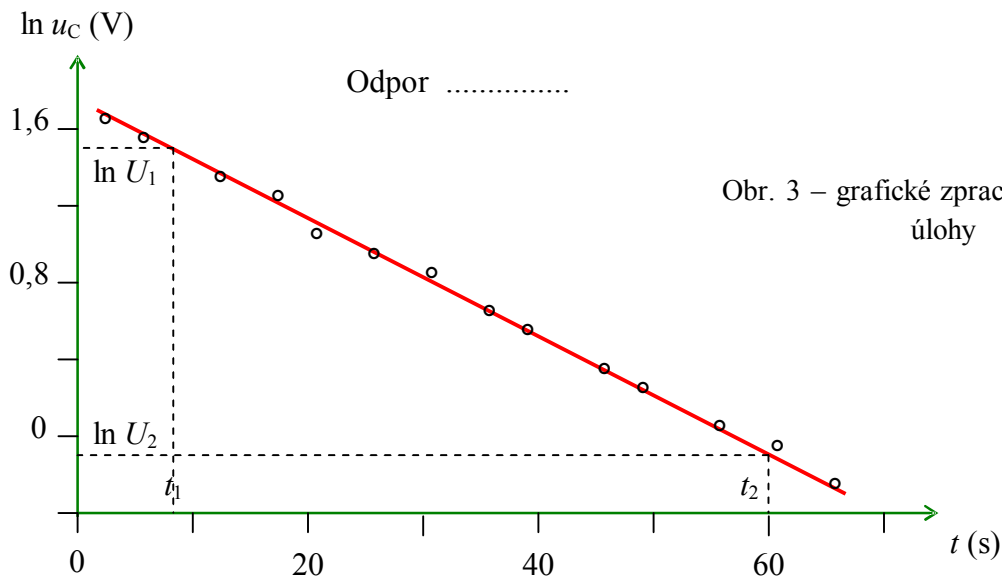
Potvrzením tohoto úkonu se nám zviditelní tabulka s naměřenými daty, které můžeme exportovat do textového souboru funkcí “Export data” v položce “File” hlavního menu



7) Poté získané hodnoty zpracujte graficky. Jelikož je pokles napětí na kapacitě u_C exponenciálně závislý na čase t , je výhodné do grafu vynášet přímo závislost

$$\ln u_C = f(t) \quad ,$$

jež má lineární klesající průběh viz obr. 3.



8) Teprve po vynesení těchto závislostí přistupte k vlastnímu výpočtu neznámého velkého odporu. Z přímky na obr. 3, jež vznikne proložením vámi naměřených hodnot, odečtete dvě odpovídající dvojice hodnot $[t_1 ; \ln U_1]$ a $[t_2 ; \ln U_2]$, dosadte je do vztahu (2) a určete příslušný velký odpor u každého měření. Čím vzdálenější body v grafu vyberete, tím menší chyby měření se dopouštíte! Přesnou hodnotu kapacity vybíjených kondenzátorů je možné si změřit na automatickém mostě *RLCG*.

7) Nakonec pak proveďte výpočet „čisté“ hodnoty každého neznámého odporu R_x . Ze vztahu (3) totiž okamžitě vyplývá, že

$$R_x = \frac{R_{xs} \cdot R_s}{R_s - R_{xs}} \quad . \quad (4)$$

Výsledky získané pro daný odpor při vybíjení obou kapacit porovnejte a případné rozdíly pak v závěru protokolu z této úlohy zdůvodněte.

