III. METODY MĚŘENÍ A ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

Způsob, jímž se provádí fyzikální měření, závisí jednak na povaze měřené veličiny, jednak na tom, ze kterých vztahů pro měřenou veličinu vyjdeme a jakých přístrojů použijeme.

Všechny měřicí metody se dělí na:

1. absolutní měřicí metody,
2. srovnávací měřicí metody.

ad 1) Absolutní měřicí metody vycházejí z definice měřené veličiny, která se určí výpočtem ze známých základních fyzikálních veličin. Používají se k měření základních veličin.

ad 2) Hodnota měřené veličiny se srovnává se známou hodnotou veličiny téhož druhu nebo veličiny jiného druhu, jež je známou funkcí měřené veličiny. Sem patří všechny měřicí metody kromě metod absolutních. Srovnávací metody dále dělíme na výchylkové, nulové, koincidenční a speciální.

Podle způsobu určení měřené veličiny lze měření rozdělit na:

měření přímá - hodnotu měřené veličiny získáváme přímo, aniž by bylo nutno dodatečně provádět výpočty založené na funkční závislosti dané veličiny na jiných známých veličinách; např. určení velikosti proudu z údaje ampérmetru,

měření nepřímá - hodnota měřené veličiny se určuje pomocí přímých měření veličin jiného druhu, které jsou s měřenou veličinou vázány známými vztahy; např. měření odporu pomocí Ohmova zákona,

měření kombinační - hodnoty určitého počtu měřených veličin stanovíme z různých kombinací výsledků měření přímých nebo nepřímých řešením soustavy rovnic; např. měření teplotních součinitelů odporů.

V dalším popíšeme dvě měřicí metody, používané při měření úloh uvedených v těchto skriptech.

1. METODY MĚŘENÍ

a) Metoda kompenzační

Podstatou metody je, že měřenou veličinu kompenzujeme (vyrovnáváme) veličinou téhož druhu, stejné a známé velikosti, ale opačného znaménka tak, aby se oba účinky vyrovnaly a nastala rovnováha.

Metoda bývá velmi často uspořádána tak, že po vykompenzování měřicí přístroj ukazuje nulovou výchylku. Má to tu výhodu, že nemusíme znát příslušné hodnoty na stupnici přístroje a nezáleží na přesnosti stupnice. Stačí, když přístroj dosti přesně ukazuje nulovou polohu. Takovou metodou je vlastně vážení na analytických vahách, kdy silový moment tělesa kompenzujeme momentem závaží, kompenzační metoda měření elektromotorického napětí a mnohé další.

b) Metoda omezovací

Pro měření času u periodických dějů, které se opakují ve velkém počtu a pro něž je jedna perioda delší než dvojnásobek odhadu chyby jednoho měření, můžeme použít omezovací metodu, kterou lze za uvedených předpokladů dosáhnout libovolné relativní přesnosti. Postup vyložíme na příkladu měření doby kyvu reverzního kyvadla.

Změříme stopkami např. dobu deseti kyvů:

$10\,\tau = 12{,}2$ s.

Víme-li teď, že tato doba je zaručena uvnitř mezí $\pm 0{,}2$ s (což je přesnost jednoho měření stopkami), můžeme zapsat:

$12{,}0 \text{ s} < 10\,\tau < 12{,}4$ s.

Pro 20 kyvů bude tedy

$24{,}0 \text{ s} < 20\,\tau < 24{,}8$ s.

Tyto meze jsou užší, než doba jednoho kyvu. Stačí tedy spustit stopky na začátku libovolného kyvu a bez počítání kyvů je zastavit při ukončení kyvu po 24,0 sekundách. Na stopkách přečteme hodnotu, např. 24,4 s. Tím se zúží meze pro 20 kyvů a bude

$24{,}2 \text{ s} < 20\,\tau < 24{,}6$ s.

Z toho pak pro 50 kyvů

$60{,}5 \text{ s} < 50\,\tau < 61{,}5$ s.

Rozdíl mezí je opět menší než doba jednoho kyvu, takže zastavením stopek po 60,5 sekundách dostaneme zase přesnější určení doby 50 kyvů. Určili jsme 61,2 s. Tím se zúží meze pro 50 kyvů a bude

$61{,}0 \text{ s} < 50\,\tau < 61{,}4$ s.

Pro 100 kyvů bude tedy

$122{,}0 \text{ s} < 100\,\tau < 122{,}8$ s.

Rozdíl mezí je opět menší než doba jednoho kyvu, stačí tedy spustit stopky na začátku libovolného kyvu a bez počítání kyvů je zastavit při ukončení kyvu po 122,0 sekundách.

Ukončíme-li teď měření, je údaj $100\,\tau = 122{,}4$ s zaručen uvnitř mezí $\pm 0{,}2$ s:

$122{,}2 \text{ s} < 100\,\tau < 122{,}6$ s.

Z toho pro dobu jednoho kyvu platí:

$1{,}222 \text{ s} < \tau < 1{,}226$ s,

neboli

$\tau = (1{,}224 \pm 0{,}002)$ s.

Výhodou metody je, že můžeme určit dobu velkého počtu opakovaných dějů bez jejich přesného počítání. Podstatnou podmínkou použití této metody ovšem je, abychom volili jen takový násobek, aby rozdíl mezí násobku byl menší než velikost měřeného intervalu.

2. METODY ZPRACOVÁNÍ MĚŘENÍ

a) Interpolace

je početní postup, kterým můžeme určit velikost měřené veličiny x, odpovídající dané výchylce y měřicího přístroje, zjistíme-li dvě výchylky y_1, y_2, odpovídající dvěma známým hodnotám x_1, x_2 téže veličiny tak, aby platilo $y_1 < y < y_2$. V malém rozmezí výchylek lze závislost výchylky y na měřené veličině x pokládat za lineární a musí tedy platit:

$$y_1 = a\,x_1 + b\,, \quad y_2 = a\,x_2 + b \tag{1}$$

a taky

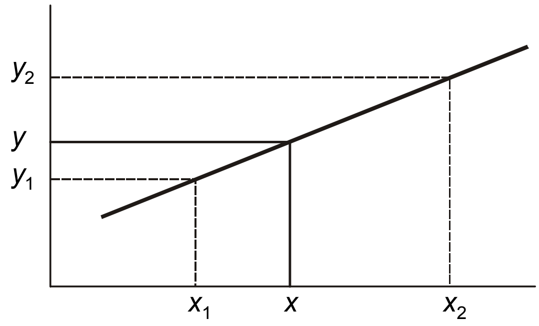
$$y = a\,x + b. \tag{2}$$

Vyloučením konstant a, b obdržíme pro velikost měřené veličiny interpolační vztah:

$$x = x_1 + \frac{y - y_1}{y_2 - y_1}\left(x_2 - x_1\right). \tag{3}$$

Tento postup se nazývá **lineární interpolace** a je znázorněn na obr. 1.

Lineární interpolaci budeme používat při vážení na tlumených analytických vahách. Protože je pracné vyvážit předmět závažím přesně do výchylky nezatížených vah ($\approx y$), vyvážíme předmět nějakým závažím ($\approx x_1$) do výchylky na stupnici ($\approx y_1 \neq y$) a přidáme (nebo ubereme) malý přívažek ($\approx \Delta x$) tak, aby nové závaží ($\approx x_2 = x_1 \pm \Delta x$) způsobilo výchylku ($\approx y_2$) na druhé straně stupnice. Hmotnost váženého předmětu (závaží x, odpovídající výchylce y) určíme pak interpolací ze vztahu (3).



Obr. 1 Lineární interpolace

Další interpolační metodou, kterou budeme používat, je **interpolace grafická**. Zjišťujeme závislost výchylky měřicího přístroje (nebo odpovídající fyzikální veličiny) na měřené veličině pro řadu známých hodnot měřené veličiny. Tuto závislost (nemusí být lineární!) vyneseme do grafu a body proložíme křivkou. Velikost měřené veličiny odpovídající zjištěné výchylce potom odečítáme z grafu. Nutnou podmínkou je dodržení zásad pro konstrukci grafu (viz článek 3, kapitola III).

b) Metoda skupinová

Patří mezi metody, jimiž provádíme vyrovnání naměřených hodnot. Obvykle se používá ke stanovení parametrů, obsažených ve funkční závislosti dvou měřených veličin.

Dosadíme naměřené hodnoty obou veličin do předpokládaného vztahu. Vzniklé rovnice rozdělíme na tolik skupin, kolik je neznámých parametrů. V každé skupině sečteme všechny rovnice a vydělíme jejich počtem. Obdržíme soustavu tolika rovnic, kolik parametrů hledáme a jejím řešením dostaneme přibližně hodnoty hledaných parametrů.

Postup ukážeme na příkladu lineární funkce. Máme n dvojic naměřených hodnot veličin x, y a víme, že nebude obecně platit současně všech n rovnic

$$y_i = a\,x_i + b, \qquad i = 1, 2, \ldots, n. \tag{4}$$

Dvojice odpovídajících naměřených hodnot x_i, y_i seřadíme podle velikosti veličiny x a rozdělíme na dvě skupiny I a II o n_{I} a n_{II} měřeních, $i = 1, 2, \ldots, n_{\mathrm{I}}$; $n_{\mathrm{I}} + 1, \ldots, n_{\mathrm{I}} + n_{\mathrm{II}} = n$, pro n sudé je $n_{\mathrm{I}} = n_{\mathrm{II}}$, pro n liché $n_{\mathrm{I}} = n_{\mathrm{II}} + 1$. Sečteme rovnice (4) v obou skupinách a vydělíme jejich počtem. Označíme-li průměry naměřených hodnot v obou skupinách:

$$\overline{x}_{\mathrm{I}} = \frac{1}{n_{\mathrm{I}}}\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{I}}} x_i\,; \quad \overline{x}_{\mathrm{II}} = \frac{1}{n_{\mathrm{II}}}\sum_{i=n_{\mathrm{I}}+1}^{n} x_i\,; \quad \overline{y}_{\mathrm{I}} = \frac{1}{n_{\mathrm{I}}}\sum_{i=1}^{n_{\mathrm{I}}} y_i\,; \quad \overline{y}_{\mathrm{II}} = \frac{1}{n_{\mathrm{II}}}\sum_{i=n_{\mathrm{I}}+1}^{n_{\mathrm{I}}} y_i\,, \tag{5a}$$

dostaneme pro přibližné hodnoty a_0, b_0 konstant a, b dvě rovnice:

$$y_{\mathrm{I}} = a_0\,\overline{x}_{\mathrm{I}} + b_0\,; \quad y_{\mathrm{II}} = a_0\,\overline{x}_{\mathrm{II}} + b_0\,, \tag{5b}$$

jejichž řešením obdržíme:

$$a_0 = \frac{\overline{y}_{\mathrm{II}} - \overline{y}_{\mathrm{I}}}{\overline{x}_{\mathrm{II}} - \overline{x}_{\mathrm{I}}}\,; \quad b_0 = \frac{\overline{y}_{\mathrm{I}}\,\overline{x}_{\mathrm{II}} - \overline{y}_{\mathrm{II}}\,\overline{x}_{\mathrm{I}}}{\overline{x}_{\mathrm{II}} - \overline{x}_{\mathrm{I}}}\,. \tag{6}$$

Zbývá rozhodnout otázku přesnosti určení konstant a_0, b_0 . Dosadíme je do odchylkových rovnic

$$\Delta_i = a_0\, x_i + b_0 - y_i \tag{7}$$

a vypočteme střední kvadratické chyby jednoho měření y_i v každé skupině

$$s_{\mathrm{I}} = \sqrt{\frac{\sum\limits_{(\mathrm{I})} (\Delta_i)^2}{n_{\mathrm{I}} - 1}}\ ; \quad s_{\mathrm{II}} = \sqrt{\frac{\sum\limits_{(\mathrm{II})} (\Delta_i)^2}{n_{\mathrm{II}} - 1}}\ . \tag{8}$$

Aby nejistota určení konstant a_0, b_0 byla nejmenší, musí platit $s_{\mathrm{I}} \cong s_{\mathrm{II}}$. Nejsou-li tyto hodnoty alespoň přibližně stejné, posuneme rozhraní obou skupin tak, aby pokud možno počet měření v I. skupině n_{I} a počet měření v II. skupině n_{II} byl v poměru příslušných směrodatných odchylek $n_{\mathrm{I}} : n_{\mathrm{II}} = s_{\mathrm{I}} : s_{\mathrm{II}}$.

Pro nejistoty konstant a_0, b_0 můžeme pak odvodit vztahy:

$$u_{a_0} = \frac{1}{\overline{x}_{\mathrm{II}} - \overline{x}_{\mathrm{I}}} \sqrt{\frac{s_{\mathrm{I}}^2}{n_{\mathrm{I}}} + \frac{s_{\mathrm{II}}^2}{n_{\mathrm{II}}}}\ ;$$

$$u_{b_0} = \frac{1}{\overline{x}_{\mathrm{II}} - \overline{x}_{\mathrm{I}}} \sqrt{\overline{x}_{\mathrm{II}}^2 \frac{s_{\mathrm{I}}^2}{n_{\mathrm{I}}} + \overline{x}_{\mathrm{I}}^2 \frac{s_{\mathrm{II}}^2}{n_{\mathrm{II}}}}\ . \tag{9}$$

V případě, že v lineárním vztahu dvou veličin určujeme pouze jednu konstantu a_0 ($b_0 = 0$), stačí sečíst všechny hodnoty závisle proměnné y a vydělit součtem všech hodnot nezávisle proměnné x:

$$a_0 = \frac{\sum\limits_{i=1}^{n} y_i}{\sum\limits_{i=1}^{n} x_i}\ . \tag{10}$$

c) Metoda postupná

Tato metoda je vhodná pro měření, která se vícekrát opakují a kde konečná hodnota jednoho měření je počáteční hodnotou měření následujícího. Její princip spočívá v početním zpracování naměřených údajů. Používá se obecně v těch případech, kdy měření postupuje po stejných hodnotách měřené veličiny a naměřené hodnoty tvoří přibližně aritmetickou posloupnost. Tak je tomu u periodických časových měření nebo při stanovení vlnové délky stojatého vlnění v rezonátoru.
Máme tedy n naměřených hodnot $x_1, x_2, ..., x_n$ a velikosti měřené veličiny y odpovídá rozdíl dvou po sobě jdoucích hodnot x_i a $y_i = x_{i+1} - x_i$, kde $i = 1, 2, ..., n$-1. Kdybychom za nejsprávnější hodnotu veličiny y vzali aritmetický průměr hodnot y_i (jak to děláme v případě opakovaných měření), dostaneme hodnotu průměru

$$\overline{y} = \frac{1}{n-1}\left[(x_2 - x_1) + (x_3 - x_2) + \ldots + (x_n - x_{n-1})\right] = \frac{x_n - x_1}{n-1}\ , \tag{11}$$

jež je nezávislá na všech ostatních naměřených hodnotách kromě první a poslední.

Přesnější výsledek získáme, rozdělíme-li po sobě jdoucí naměřené hodnoty na dvě poloviny (počet naměřených hodnot n musí být tedy sudý!) a utvoříme rozdíly prvních, druhých až posledních měření v obou skupinách. Je-li v každé polovině $m = n/2$ hodnot, udává každý z těchto rozdílů $Y_i = x_{m+i} - x_i$, $i = 1, 2, ..., m$ m-násobnou hodnotu měřené veličiny y.

Zpracujeme-li teď veličiny Y_i statisticky, dostaneme:

$$\overline{Y} = \frac{1}{m}\sum_{i=1}^{m} Y_i \; ; \quad u_{\overline{Y}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^{m}\left(Y_i - \overline{Y}\right)^2}{(m-1)m}} \,, \qquad (12)$$

kde je stejnoměrně využito všech naměřených hodnot. Pro střední hodnotu měřené veličiny y pak bude platit:

$$\overline{y} = \frac{1}{m}\overline{Y} \; ; \quad u_{\overline{y}} = \frac{1}{m} u_{\overline{Y}} \; . \qquad (13)$$

Protože nejistota veličiny y (viz kap. IV), stanovená z průměru (11), je řádově stejná jako $u_{\overline{Y}}$, lze postupnou metodou stanovit přesnější výsledek měření, jak je patrno ze vztahu (13). Uvedený postup ilustrujeme na příkladu měření vlnové délky stojatého vlnění v rezonátoru (Tabulka č.1)

Tabulka č. 1.

A			B			C			
i	x_i (cm)	x_{5+i} (cm)	$Y_i = 5\frac{\lambda_i}{2}$ (cm)	(ΔY_i) (cm)	$(\Delta Y_i)^2$ (cm)^2	$y_i = \frac{\lambda_i}{2}$ (cm)	(Δy_i) (cm)	$(\Delta y_i)^2$ (cm)^2	i
1	4,3	53,6	49,3	-0,04	$0{,}16\cdot10^{-2}$	9,5	-0,31	$9{,}61\cdot10^{-2}$	1
2	13,8	63,5	49,7	0,36	$12{,}96\cdot10^{-2}$	9,9	0,09	$0{,}81\cdot10^{-2}$	2
3	23,7	73,3	49,6	0,26	$6{,}76\cdot10^{-2}$	10,1	0,29	$8{,}41\cdot10^{-2}$	3
4	33,8	82,5	48,7	-0,64	$40{,}96\cdot10^{-2}$	9,4	0,41	$16{,}81\cdot10^{-2}$	4
5	43,2	92,6	49,4	0,06	$0{,}36\cdot10^{-2}$	10,4	0,59	$34{,}81\cdot10^{-2}$	5
6	53,6					9,9	0,09	$0{,}81\cdot10^{-2}$	6
7	63,5					9,8	-0,01	$0{,}01\cdot10^{-2}$	7
8	73,3					9,2	-0,61	$37{,}21\cdot10^{-2}$	8
9	82,5					10,1	0,29	$8{,}41\cdot10^{-2}$	9
10	92,6								
		Σ=	246,7		$61{,}2\cdot10^{-2}$	88,3		$116{,}90\cdot10^{-2}$	
			$\overline{Y} = 49{,}34$ cm, $u_Y = 0{,}175$ cm $\overline{\lambda} = 19{,}74$ cm, $u_\lambda = 0{,}07$ cm $\lambda = (19{,}74 \pm 0{,}07)$ cm			$\overline{y} = 9{,}81$ cm, $u_y = 0{,}13$ cm $\overline{\lambda} = 19{,}62$ cm, $u_\lambda = 0{,}26$ cm $\lambda = (19{,}6 \pm 0{,}3)$ cm			

V části A tabulky jsou uvedeny naměřené hodnoty; rozdíl po sobě jdoucích hodnot odpovídá délce půlvlny $\lambda_i/2$. Naměřené hodnoty jsou rozděleny na dvě poloviny, zapsané vedle sebe. V části B jsou tyto hodnoty zpracovány postupnou metodou a v části C pro srovnání postupem (viz rovnice (11)).

d) Zprostředkující měření - metoda nejmenších čtverců

U těchto měření půjde o zjištění nejpravděpodobnějších hodnot několika fyzikálních veličin nebo konstant fyzikálních zákonů, jejichž souvislost s měřenými veličinami může být dána různým způsobem, a které vedle toho mají někdy splňovat jisté podmínky. Vyjádříme-li souvislost mezi měřenými a hledanými veličinami matematickým vztahem a dosadíme-li do tohoto vztahu naměřené hodnoty, dostaneme tzv. určující rovnice. Počet určujících rovnic je vždy větší než počet neznámých, a protože měření je zatíženo nejistotami, neexistují takové hodnoty hledaných veličin, které by splňovaly všechny určující rovnice současně. Hledáme proto nejpravděpodobnější hodnoty stanovovaných veličin. Řešení podobných úloh se nazývá vyrovnávání měření a je založeno na metodě nejmenších čtverců.

Princip vyrovnání měření metodou nejmenších čtverců objasníme na následujícím příkladu:
Provedli jsme n měření veličin x a y tak, že hodnotě x_i odpovídá hodnota y_i ($i = 1, 2, ..., n$); (x může být např. teplota a y některá veličina, závislá na teplotě; y_i pak značí hodnotu, kterou dostaneme měřením y při dané teplotě $x = x_i$). Předpokládáme, že mezi veličinami x a y platí funkční vztah

$$y = a\,x + b, \tag{14}$$

počet měření $n > 2$ a máme určit nejpravděpodobnější hodnoty konstant a, b. Kdyby při měření nevznikaly chyby, platilo by pro jedinou dvojici konstant a, b a pro všechna měření přesně $y_i = a\,x_i + b$ a všechny body (x_i, y_i) by ležely na přímce dané rovnicí (14). Ve skutečnosti platí $y_i = a\,x_i + b$ + nejistota. Body (x_i, y_i) jsou kolem přímky $y = a\,x + b$ rozptýleny. Měření y_i pak můžeme vyjádřit rovnicí

$$y_i = a\,x_i + b + u_i, \qquad i = 1, 2, ..., n, \tag{15}$$

kde u_1, u_2, ..., u_n jsou nejistoty měření, které považujeme za náhodné veličiny.

Rovnice (15) jsou určující rovnice a úlohou je proložit body (x_1, y_1), (x_2, y_2), ..., (x_n, y_n) přímku, tj. určit konstanty a, b tak, aby přímka co nejlépe přiléhala k empirickým bodům (x_i, y_i). Konstanty, které tuto podmínku splňují, označíme a^*, b^* a jejich určení závisí na tom, jaké zvolíme kritérium pro "přiléhavost přímky k bodům".

Metoda nejmenších čtverců požaduje, aby součet čtverců rozdílů $\Delta y_i = y_i - a^* x_i - b^*$ byl nejmenší:

$$S = \sum_{i=1}^{n} \left(y_i - a^* x_i - b^* \right)^2 . \tag{16}$$

Podmínky extrému

$$\frac{\partial S}{\partial a^*} = 0 \qquad \frac{\partial S}{\partial b^*} = 0 \tag{17}$$

představují tzv. normální rovnice, které po provedení naznačených parciálních derivací a úpravě zapíšeme ve tvaru

$$a^* \sum_{i=1}^{n} x_i^2 + b^* \sum_{i=1}^{n} x_i = \sum_{i'=1}^{n} x_i y_i$$

$$a^* \sum_{i=1}^{n} x_i + b^* n = \sum_{i=1}^{n} y_i \tag{18}$$

Řešením rovnic (18) dostaneme pro daný počet experimentálních bodů (x_i, y_i) nejpravděpodobnější hodnoty konstant a^*, b^*:

$$a^{\bullet} = \frac{n\Sigma x_i y_i - \left(\sum_i x_i\right)\left(\sum_i x_i y_i\right)}{n\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i\right)^2}$$

$$b^* = \frac{\left(\sum_i x_i^2\right)\left(\sum_i y_i\right) - \left(\sum_i x_i\right)\left(\sum_i x_i y_i\right)}{n\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i\right)^2} \quad . \qquad (19)$$

Veličina S ve vztahu (16) se nazývá chybový součet čtverců. Pomocí ní vypočteme střední odchylku jednoho měření y_i:

$$s = \sqrt{\frac{S}{n-p}} \, , \qquad (20)$$

kde p představuje počet stanovovaných veličin (konstant), v našem případě $p = 2$. Výraz n-p je počet stupňů volnosti. Pro standardní nejistoty konstant a, b, můžeme odvodit vztahy:

$$u_a = s\sqrt{\frac{n}{n\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i\right)^2}} \, ,$$

$$u_b = s\sqrt{\frac{\sum_i x_i^2}{n\sum_i x_i^2 - \left(\sum_i x_i\right)^2}} \quad . \qquad (21)$$

- **Poznámka :**

Není-li mezi měřenými veličinami lineární vztah, lze někdy vhodnou substitucí jejich souvislost "linearizovat" a pak použít vyrovnání měření pro tyto nové proměnné, např. :

$Y = \mathrm{a}\log X + \mathrm{b}$, $\quad X' = \log X \;\Rightarrow\; Y = \mathrm{a}X' + \mathrm{b}$;

$Y = \mathrm{a}X^n + \mathrm{b}$, $\quad X' = X^n \;\Rightarrow\; y = \mathrm{a}X' + \mathrm{b}$;

$Y = \mathrm{e}^{\mathrm{aX}} + \mathrm{b}$, $\quad Y' = \ln Y \;\Rightarrow\; Y' = \mathrm{a}X + \mathrm{b}$; apod.

3. GRAFICKÉ ZPRACOVÁNÍ VÝSLEDKŮ

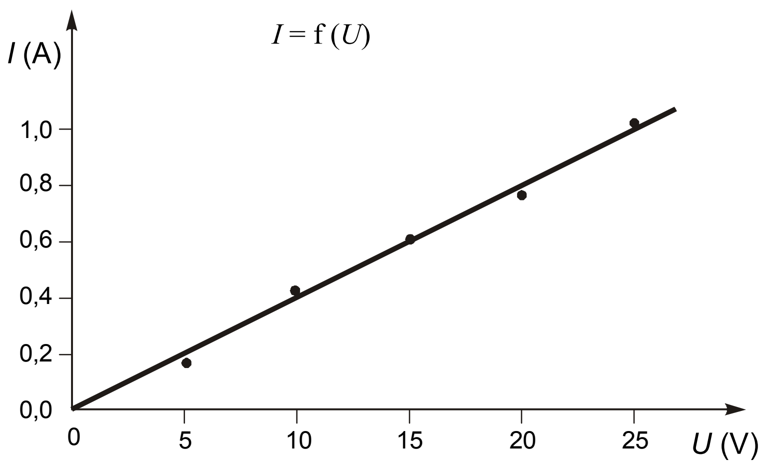
Grafické zpracování výsledků měření jednoduchým způsobem poskytuje názornou představu o provedeném měření závislosti dvou fyzikálních veličin.

Při měření závislosti $y = \mathrm{f}(x)$ obdržíme n bodů (x_i, y_i), které slouží ke konstrukci grafu a svým rozložením naznačují průběh křivky. Často můžeme předpokládat plynulý průběh jevu a tím i spojitou změnu parametrů fyzikální soustavy. V praxi však často pozorujeme při konstrukci grafu určitý rozptyl bodů získaných měřením. Proto každou závislost, která má zřejmě plynulý průběh, znázorníme jednoduchou hladkou křivkou. Křivku nevedeme přímo naměřenými body (výjimkou je korekční křivka, která je tvořena lomenou čarou), ale mezi body tak, aby algebraický součet odchylek jednotlivých bodů od křivky byl roven 0.

Pokud se stane, že jedna nebo více naměřených hodnot jsou zatíženy chybou, která přesahuje možnou nejistotu měření, a je-li v daném oboru vyloučena náhlá změna průběhu sledované závislosti, lze tyto odchylky vysvětlit pouze hrubou chybou. Takové body z grafu vynecháme, případně, zjistíme-li hrubou chybu již v průběhu měření, v těchto bodech měření opakujeme.

Hlavní zásady grafického zobrazení.

1. K sestrojení grafů použijte buď milimetrový, logaritmický či semilogaritmický papír nebo využijte možnosti počítačového zpracování.
2. Pokud grafy kreslíte tužkou, použijte pravítko a křivítko. Čáry a křivky nikdy nekreslete od ruky!
3. Základem grafu jsou souřadné osy. Na každou osu vyneste vhodně zvolenou rovnoměrnou stupnici, zahrnující rozsah naměřených hodnot. Měřítko volte takové, aby nejistota odečítání z grafu byla menší, než nejistota určení znázorňované veličiny. Dílky stupnic vyznačte krátkými kolmými ryskami, k nimž připojíte číselný údaj vně os. Osy popište symboly příslušných veličin a jejich jednotkami.
4. Při kreslení grafu $y = \mathrm{f}(x)$ hodnoty nezávisle proměnné vynášejte zásadně na osu x, hodnoty závisle proměnné na osu y. Souřadnice bodů odpovídajících naměřeným hodnotám na osách ani v grafu nevyznačujte!
5. Zakreslete všechny body, z nichž je graf konstruován, a to křížkem, kroužkem apod. Těmito body pak proložte plynulou křivku tak, aby procházela co nejblíže jednotlivých bodů.
6. Graf musí mít v záhlaví nadpis, vyjadřující, jaká závislost je grafem zobrazena.
7. Zásady uvedené v bodech 3 až 6 dodržujte i v případě, že graf konstruujete na počítači. Vzorový graf je uveden na obr. 2.



Obr. 2. Závislost proudu na napětí při regulaci potenciometrem ($R_Z \to \infty$)