

Fyzikální praktikum pro nefyzikální obory

Úloha č. 3: Měření proudu a napětí, vlastnosti elektrických měřicích přístrojů

jarní semestr 2012

1. Elektrická měření a elektrické měřicí přístroje

Měření elektrických veličiny (hlavně proudu a napětí, méně často i odporu a výkonu) je jedna z klíčových experimentálních dovedností. Její důležitost vzrůstá s tím, že v současné době je časté i převádění neelektrických veličin na napětí nebo proud pomocí speciálních snímačů.

Měření elektrických veličin – proudu a napětí, případně odporu a výkonu – patří ke zcela základním experimentálním technikám. Jejich použití se neomezuje pouze na sledování elektrických jevů. V současné době je patrný trend převádět i jiné, neelektrické veličiny, na napětí nebo proud pomocí speciálních snímačů, a tím roste význam správného měření elektrických veličin.

Příklady elektrických snímačů pro neelektrické veličiny V úloze Měření teploty jsou s výjimkou kapalinových teploměrů všechna používaná čidla elektrickými snímači teploty – od termočlánku až po infračervené čidlo. UV metr z úlohy Emise a absorpce světla je též převodníkem neelektrické veličiny na veličinu elektrickou, stejně jako CCD čip kamery z úlohy Zrak. Je potřeba si uvědomit, že při každém měření pomocí počítače je výstupem hodnota napětí, ať je k počítači připojeno jakékoliv čidlo.

Přístroje pro měření proudu a napětí dělíme na ručkové (analogové) a číslicové (digitální). Rozdíl není jen ve způsobu zobrazování naměřené hodnoty, ale především v konstrukci přístroje, a z ní plynoucích rozdílných vlastností pro měření. Více o konstrukci těchto přístrojů najdete v Dodatku A

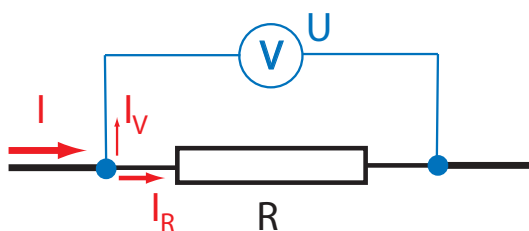
Vlastnosti měřicího přístroje určuje **vnitřní odpor R_i** , který je definován jako podíl napětí na svorkách přístroje U_p a proudu I_p , který přístrojem prochází

$$R_i = \frac{U_p}{I_p}. \quad (1.1)$$

Obecně platí, že kvalitní voltmetry by měly mít hodnotu vnitřního odporu co největší, zatímco kvalitní ampérmetry co nejmenší. Zdůvodnění najdete v kapitolách 2. a 3..

2. Měření elektrického napětí

Elektrické napětí mezi dvěma body prostoru (konkrétně při měřeních mezi dvěma body elektrického obvodu) je definované jako rozdíl elektrických potenciálů v těchto bodech. Chceme-li elektrické napětí měřit, musíme svorky měřicího přístroje – voltmetru – co nejlépe vodivě spojit se zmíněnými body. Například měření napětí na elektrickém odporu R realizujeme pomocí zapojení dle obr. 2.1



Obrázek 2.1: Měření napětí na odporu R

Voltmetr zapojujeme **paralelně** s prvkem, na kterém chceme napětí měřit.

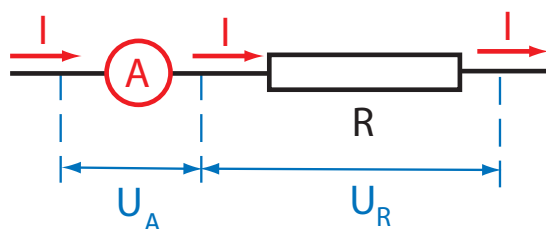
Vzhledem k nenulovému vnitřnímu odporu voltmetru protéká měřicím přístrojem proud, což může být nežádoucí jev. Ideální voltmetr je tedy ten, který má nekonečný vnitřní odpor. Digitální přístroje jsou z tohoto hlediska podstatně lepší než přístroje analogové.

Kontrolní otázka č. 1

Co by se stalo, kdybychom zapojili typický voltmetr do obvodu sériově? Došlo by k poškození voltmetru nebo měřeného prvku? Dala by se naměřená hodnota považovat za správnou?

3. Měření elektrického proudu

Ampérmetr zapojujeme **sériově** s měřeným prvkem (viz obr. 3.2), protože měřený proud protékající prvkem musí protékat i přístrojem. Ideální ampérmetr má nulový vnitřní odpor.



Obrázek 3.2: Měření proudu protékajícího odporem R

Kontrolní otázka č. 2

Co by se stalo, kdybychom zapojili typický ampérmetr paralelně k měřenému prvku? Došlo by k poškození ampérmetru nebo měřeného prvku? Dala by se naměřená hodnota považovat za správnou?

4. Současné měření proudu a napětí

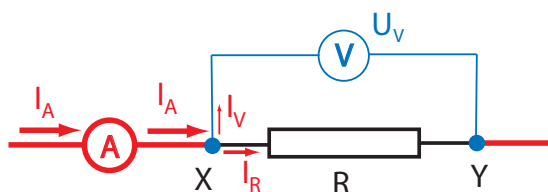
Často potřebujeme současně měřit elektrické napětí i proud, který prochází daným prvkem obvodu. Typickou situací může být měření odporu a jeho výpočet z Ohmova zákona

$$R = \frac{U_R}{I_R}, \quad (4.2)$$

kde U_R je napětí na odporu R a I_R proud, který odporem protéká.

4.1. Metoda A

Toto lze uskutečnit například podle zapojení z obr. 4.3 (zapojení budeme v dalším textu nazývat metodou A).



Obrázek 4.3: Měření odporu z Ohmova zákona metodou A

Napětí, které naměří voltmetr, je skutečně správné napětí na odporu R , tedy $U_R = U_V$.

Ovšem ampérmetr měří proud I_A , který není roven proudu I_R tekoucím odporem R , protože v uzlových bodech X a Y se proud dělí na proud tekoucí odporem a voltmetrem.

Hodnoty, které zjistíme měřicími přístroji, tedy nelze přímo dosadit do rovnice. Pokud bychom tak učinili, dopustili bychom se systematické chyby, která trvale posune měřenou hodnotu k vyšším nebo nižším hodnotám.

Kontrolní otázka č. 3

Jak je tomu v případě měření odporu metodou A při dosazení přímo měřených hodnot do vztahu? Bude námi spočtený odpor systematicky větší nebo menší než odpor skutečný?

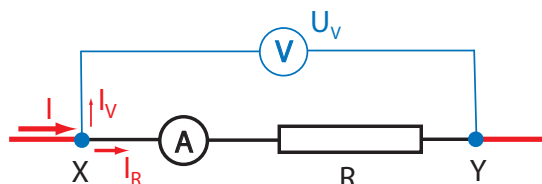
Při výpočtu skutečné hodnoty měřeného odporu R musíme vzít do úvahy, že i voltmetr má vnitřní odpor R_V , a tedy hodnota proudu tekoucího rezistorem se liší od hodnoty proudu tekoucího ampérmetrem o $I_V = \frac{U_V}{R_V}$: $I_R = I_A - I_V = I_A - \frac{U_V}{R_V}$. Známe-li vnitřní odpor voltmetru R_V , můžeme podle vztahu 4.2 z naměřených hodnot proudu I_A a napětí U_V určit hodnotu odporu rezistoru jako

$$R = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}. \quad (4.3)$$

Odpor, takto změřený a spočítaný metodou A, není zatížen výše zmíněnou systematickou chybou.

4.2. Metoda B

Metoda A není jedinou možností, jak současně zapojit ampérmetr a voltmetr. Problém, kdy ampérmetr neměří skutečný proud procházející odporem, snadno vyřešíme tak, že ampérmetr zapojíme přímo do odporové větve dle obr. 4.4. Pak ampérmetr skutečně měří



Obrázek 4.4: Měření odporu z Ohmova zákona metodou B

správný proud, protože mezi přístrojem a odporem R již není žádný uzel, kde by se mohl proud dělit. Ovšem jeden problém jsme vyřešili a druhý způsobili. Nyní voltmetr neměří napětí na odporu, ale měří součet napětí na odporu a ampérmetru $U_V = U_A + U_R$.

Kontrolní otázka č. 4

Jaké je znaménko systematické chyby při vyhodnocení metody B bez korekce vlivu ampérmetru?

Napětí na ampérmetru určíme ze známého vnitřního odporu přístroje R_A jako $U_A = R_A I_A$ a z rovnice 4.2 dostaneme pro hodnotu odporu nezatíženého systematickou chybou

$$R = \frac{U_V - R_A I_A}{I_A}. \quad (4.4)$$

4.3. A nebo B?

Teď se nabízí důležitá otázka: Která metoda, A nebo B, je pro měření odporu výhodnější? Při prvním pohledu by se zdálo, že je to lhostejné. Oba vztahy jsou přesné a při jejich odvození nebyly učiněny žádné aproximace.

Pro minimalizaci chyby měření odporu je však důležité, aby druhý (korekční) člen v rozdílu byl mnohem menší, než člen první. Pokud totiž počítáme výslednou veličinu jako rozdíl veličin měřených, může chyba výsledku dramaticky narůst.

Metoda A bude výhodnější, pokud proud tekoucí voltmetrem bude mnohem menší než proud tekoucí měřeným odporem (nebo-li vnitřní odpor voltmetru bude mnohem větší než měřený odpor). Metoda B bude výhodná v případě, že napětí na ampérmetru bude mnohem menší než napětí na měřeném odporu (tj. vnitřní odpor ampérmetru bude mnohem menší než měřený odpor). Ve většině případů nám jako rozhodující kritérium postačí následující jednoduché pravidlo: **malé odpory měříme metodou A a velké odpory metodou B.**

5. Určení chyby měření napětí a proudu

Jako při každém jiném měření i zde jsou naměřené hodnoty zatíženy experimentálními chybami. Systematické chyby lze minimalizovat volbou správné metody měření, náhodné chyby však v principu odstranit nedokážeme a jediné, co můžeme udělat, je určit jejich míru.

Obecnou metodou určení tzv. směrodatné odchylky měřené hodnoty s_x je statistické zpracování většího počtu měření dle známého vztahu

$$s_x = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (\bar{x} - x_i)^2}{n(n-1)}}$$

kde x_i jsou jednotlivé měřené hodnoty z celkového počtu n měření a \bar{x} je střední hodnota (aritmetický průměr z měřených hodnot). Tento postup však často nevede ke správnému výsledku – buď měření nelze opakovat (například měření voltampérové charakteristiky) nebo při opakovaném měření dostáváme stále stejné hodnoty, což by při neuváženém použití vztahu vedlo k nulové chybě. Náhodná chyba měření elektrických veličin je často dominantně dána chybou měřících přístrojů. Informaci o chybách měření tak nejlépe získáme z údajů výrobce příslušného přístroje.

5.1. Určení chyby ručkových přístrojů

Ke stanovení chyby ručkových přístrojů se standardně používá veličina zvaná třída přesnosti, která bývá vyznačena přímo na stupnici měřícího přístroje. **Třída přesnosti určuje krajní chybu jako procento z aktuálního rozsahu přístroje.**

Zde je nutné si uvědomit jednu důležitou skutečnost. Chyba přístroje je dána rozsahem, nikoliv měřenou hodnotou. Je tedy zřejmé, že měření bude tím přesnější (tj. tím menší bude relativní chyba), čím bude měřená hodnota bližší maximální měřitelné hodnotě, tj. rozsahu přístroje. Na přístrojích s měnitelným rozsahem se vždy snažíme měřit tak, aby ručka byla pokud možno nejvíce vpravo, blíže k maximální hodnotě.

Příklad: Určení chyby měření ručkového přístroje Měříme napětí 4,52 V na voltmetru s třídou přesnosti 0,5 s rozsahem 10 V. Krajní chyba měřené hodnoty je rovna 0,5 % z 10 V, tedy 0,05 V. Směrodatná odchylka je třetinou krajní chyby, pro naměřenou hodnotu můžeme psát

$$U = (4,52 \pm 0,02) \text{ V}$$

Chybu obvykle zaokrouhlujeme na jedno platné místo, hodnotu zaokrouhlujeme na stejný řád, na kterém se nachází chyba.

5.2. Určení chyby digitálních přístrojů

Chybu počítáme pomocí vztahu uvedeného v manuálu digitálního měřícího přístroje. Obvykle jde o součet příspěvků úměrných měřené hodnotě a měřicímu rozsahu. Použitá zkratka slova **digits** značí **počet jednotek na posledním desetinném místě aktuálního rozsahu.**

Příklad: Určení chyby měření digitálního měřícího přístroje Hodnota napětí 4,521 V byla naměřena měřícím přístrojem METEX M3890 D (na rozsahu 20 V). V manuálu je pro výpočet chyby uvedeno $0,8\% \pm 2 \text{ dgs}$. První číslo udává procento z měřené hodnoty, druhé číslo je počet jednotek na posledním desetinném místě aktuálního rozsahu (tzv. digits). Pro danou hodnotu je krajní chyba rovna

$$\pm 0,8\% z 4,524 \text{ V} \pm 1 * 0,001 \text{ V} = \pm 0,04 \text{ V}.$$

Výsledek zapíšeme po zaokrouhlení ve tvaru

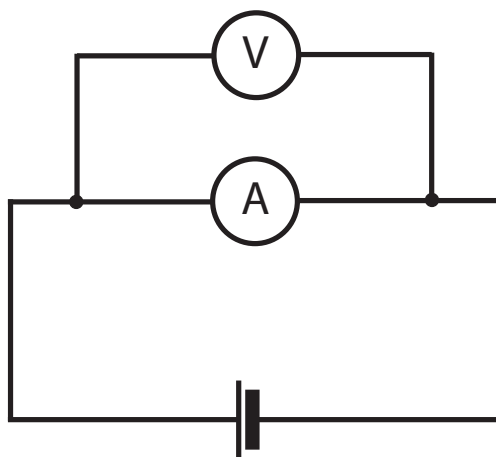
$$U = (4,52 \pm 0,04) \text{ V}.$$

6. Měření vnitřního odporu ručkového měřicího přístroje

Vnitřní odpor většinou udává výrobce přístroje, u ručkového přístroje je však možné relativně jednoduše vnitřní odpor určit. Lze pro to použít dvě metody.

6.1. Z Ohmova zákona

Měřicí přístroj (zde ampérmetr) zapojíme do obvodu dle obr. 6.5. Měříme proud procházející ampérmetrem a současně i spád napětí na jeho svorkách. Odpor určíme přímo z Ohmova zákona.



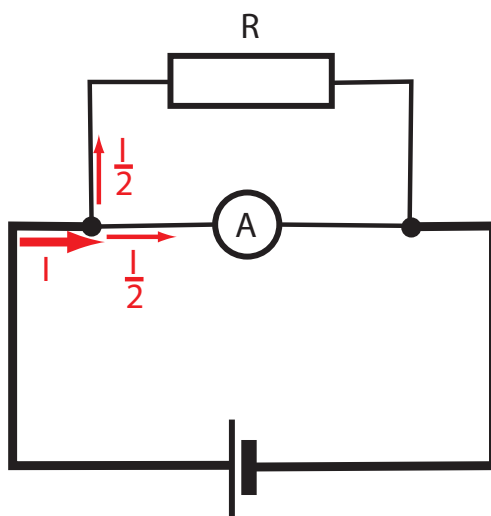
Obrázek 6.5: Měření vnitřního odporu ampérmetru z Ohmova zákona

Kontrolní otázka č. 5

Je třeba při tomto experimentu korigovat vliv měřicích přístrojů, tak, jak jsme to ukázali výše při měření odporu metodami A a B?

6.2. Substituční metoda

Druhá metoda využívá stavitelného odporu, tzv. odporové dekády. Použijeme zapojení dle obr. 6.6, které se liší do zapojení předchozího (obr. 6.5) pouze tím, že vyměníme voltmetr za odporovou dekádu R . Nejprve necháme dekádu nepřipojenu a říditelným zdrojem nastavíme na ampérmetru určitou výchylku (například na maximum rozsahu). Poté dekádu připojíme a snažíme se nastavením hodnoty jejího odporu dosáhnout poloviční výchylky na ampérmetru. Pokud máme jistotu, že zdroj dodává do obvodu stále stejný proud (a zdroj u této úlohy uvedenou podmínku splňuje), musí nyní protékat oběma větvemi shodný proud. To nastane tehdy, když odpory v obou větvích jsou stejné, a tedy vnitřní odpor přístroje je roven odporu nastavenému na dekádě.



Obrázek 6.6: Měření vnitřního odporu ampérmetru pomocí odporové dekády

7. Změna rozsahu měřicích přístrojů

Mezi ampérmetrem a voltmetrem není z principiálního hlediska žádný rozdíl. Oba přístroje mohou měřit jak napětí, tak i proud. Uživatelská odlišnost těchto přístrojů spočívá v cejchování stupnice a v hodnotě vnitřního odporu, který bývá typicky u ampérmetru malý a u voltmetru velký. Můžeme tedy po malých úpravách použít tentýž systém jak pro měření napětí, tak i pro měření proudu, a dokonce můžeme i v jistých mezích měnit rozsahy obou přístrojů. Způsob, jakým to lze zajistit, si ukážeme v následujících odstavcích.

Kontrolní otázka č. 6

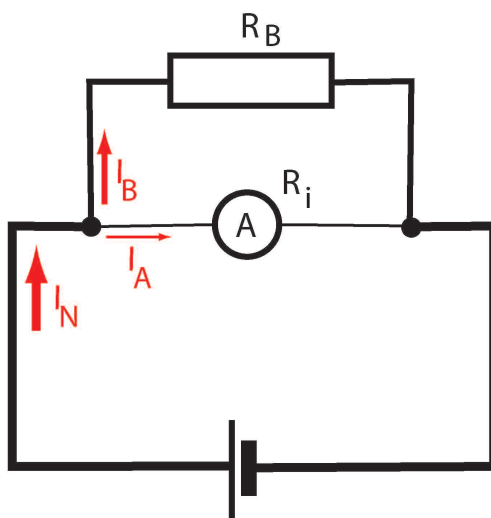
Mějme analogový měřicí přístroj z výroby cejchovaný jako ampérmetr rozsahu $100 \mu\text{A}$. Víme, že přístroj má vnitřní odpor 2000Ω . Kdybychom tento přístroj chtěli bez jakékoliv úpravy použít jako voltmetr, jaký by byl jeho rozsah?

7.1. Změna rozsahu ampérmetru

Obecně můžeme rozsah přístroje pouze zvětšit. Měřený proud rozdělíme do dvou větví. Do první větve zapojíme měřicí přístroj a do druhé větve odpor vhodné velikosti, tzv. bočník (viz obr. 7.7). Funkce bočníku je zcela zřejmá. Označíme-li I_N nový proudový rozsah přístroje a I_A maximální proud, který může téci měřicím přístrojem, je nový proudový rozsah n -krát větší než původní: $I_N = n \cdot I_A$. Z tohoto proudu může téci jeden díl měřicím přístrojem a zbytek musí být veden bočníkem. Je-li tedy odpor měřicího přístroje R_i , musí být odpor bočníku menší, a to $(n - 1)$ krát:

$$R_B = \frac{R_i}{\frac{I_N}{I_A} - 1} \quad (7.5)$$

Příklad: Zvětšení rozsahu ampérmetru desetkrát Chceme-li použít přístroj původního rozsahu $100 \mu\text{A}$ pro měření proudu do 1 mA , musí při tomto proudu protékat bočníkem $900 \mu\text{A}$



Obrázek 7.7: Zapojení bočníku

a vlastním přístrojem pouze původních $100 \mu\text{A}$. Protože bočníkem poteče proud devětkrát větší než měřicím přístrojem, musí být jeho odpor devětkrát menší než odpor bočníku.

Výpočet hodnoty odporu bočníku R_B Podle obrázku 7.7 je zřejmé, že proud tekoucí bočníkem je rozdílem celkového proudu I_N a proudu tekoucího měřicím přístrojem I_A :

$$I_B = I_N - I_A$$

Dále musí být napětí na obou větvích shodné a rovno napětí zdroje U . Použijeme-li přepis pomocí napětí a odporu, dostaneme

$$\frac{U}{R_B} = \frac{U}{R_N} - \frac{U}{R_i},$$

což je vztah pro paralelní skládání odporů. Pro odpor bočníku pak plyne

$$R_B = \frac{R_i R_N}{R_i - R_N} = \frac{R_i}{\frac{R_i}{R_N} - 1}.$$

Protože napětí na všech větvích je shodné, platí i

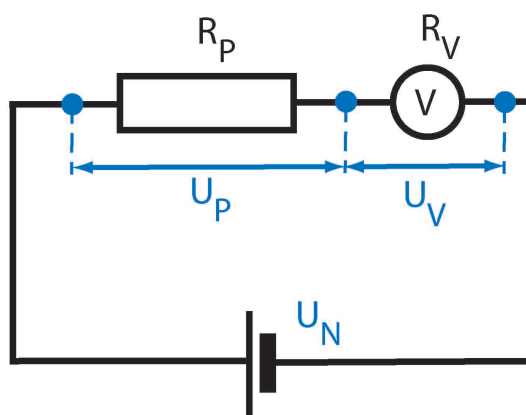
$$I_A R_i = I_N R_N,$$

což dosazeno do předchozího vztahu dává vztah pro velikost odporu bočníku 7.5 .

7.2. Změna rozsahu voltmetru

Namísto paralelně zapojeného bočníku je v případě změny rozsahu voltmetru třeba použít sériově zapojený odpor, tzv. předřadník (zapojení předřadníku je na obr.7.8). Měřicí přístroj a předřadník pak spolu tvoří napěťový dělič tak, aby při celkovém napětí rovném novému $U_N = n.U_V$ rozsahu bylo na měřicím přístroji napětí shodné s jeho původním rozsahem U_V , zbytek napětí je na předřadníku. Protože měřicím přístrojem i předřadníkem teče stejný proud, dělí se napětí v poměru odporů. Odpor předřadníku R_P musí proto být $(n - 1)$ -násobkem vnitřního odporu měřicího přístroje R_V :

$$R_P = R_V \left(\frac{U_N}{U_V} - 1 \right) \quad (7.6)$$



Obrázek 7.8: Zapojení předřadníku

Příklad: Zvětšení rozsahu voltmetru dvacet pět krát Máme-li ampérmetr s měřicím rozsahem $100 \mu\text{A}$ a vnitřním odporem 2000Ω , funguje jako voltmetr do $U = R_V \cdot I_A = 2000 \cdot 0,1 \text{ mV} = 0,2 \text{ V}$. Chceme-li měřit napětí do 5 V , čili pětadvacetkrát větší, musí být na měřicím přístroji napětí $0,2 \text{ V}$ a na předřadníku 24x větší, čili $4,8 \text{ V}$. Odpor předřadníku musí být také 24x větší než odpor měřicího přístroje, čili $R_P = 24 \cdot 2000 \Omega = 48000 \Omega$.

Výpočet hodnoty odporu předřadníku R_P Podle obrázku 7.8 je zřejmé, že celkové napětí zdroje je součtem napětí na měřicím přístroji a předřadníku:

$$U_P = U_N - U_V.$$

Protože měřicím přístrojem i předřadníkem teče stejný proud, je $\frac{U_V}{R_V} = \frac{U_P}{R_P} = I$ a lze odvodit vztah, který je vztahem pro sériové skládání odporů:

$$R_P = \left(\frac{U_N}{I} - R_V \right).$$

Dosadíme-li do tohoto vztahu za proud I , dostaneme

$$R_P = \left(\frac{U_N}{\frac{U_V}{R_V}} - R_V \right),$$

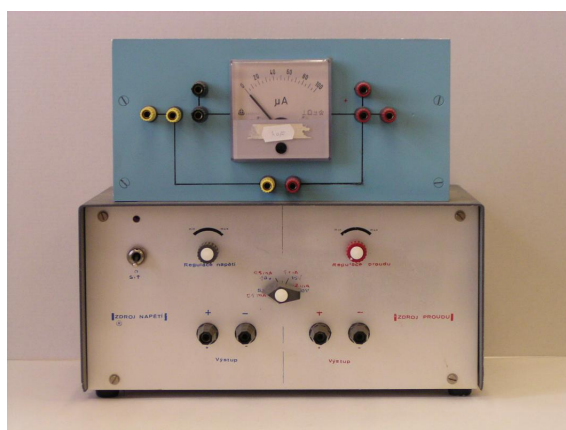
odkud po vytknutí odporu voltmetru už plyne vztah pro velikost odporu bočnicku 7.5 .

8. Experimentální vybavení

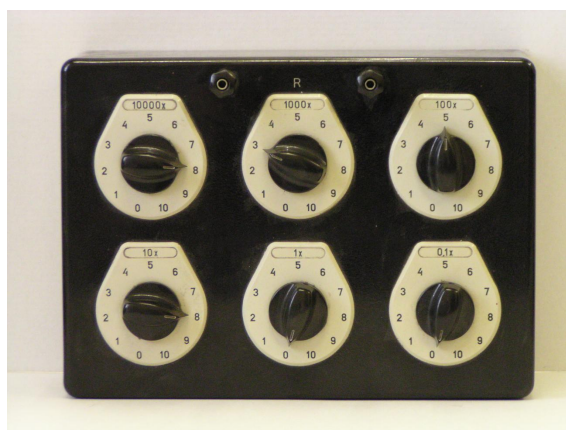
Vlastní měření budeme provádět s pomocí stabilizovaného zdroje, který tvoří jeden celek s měřicím přístrojem – ampérmetrem rozsahu $100 \mu\text{A}$. Ampérmetr je umístěn nad zdrojem na desce, která má již předpřipravené zapojení, pomocí něhož lze snadno realizovat všechna potřebná zapojení (viz obr. 8.9). Černé čáry na desce znázorňují vodivé spojení jednotlivých kontaktních bodů.

Zdroj se skládá ze dvou částí – stabilizovaného zdroje napětí (vlevo) a stabilizovaného zdroje proudu (vpravo). Pokud budeme s měřicím přístrojem pracovat jako s ampérmetrem, použijeme zdroj proudu, pokud jako s voltmetrem, použijeme zdroj napětí.

Na obr. 8.10 je odporová dekáda, která je v úloze také k dispozici. Požadovaný odpor nastavujeme otočnými prepínači. Na dekádě na obr. 8.10 je nyní nastaven odpor $83\,580 \Omega$.



Obrázek 8.9: Zdroj napětí a proudu s integrovaným měřicím přístrojem

Obrázek 8.10: Odporová dekáda s nastavenou hodnotou 83 580 Ω

Úkoly:

1. Sestavte jednoduchý obvod s použitím zdroje proudu z obr. 8.9, ve kterém bude zapojena odporová dekáda s vhodným přednastaveným odporem. S použitím libovolného měřicího přístroje změřte proud, který obvodem protéká, a napětí, které je na dekádě. S použitím Ohmova zákona spočítejte odpor dekády a výsledek porovnejte s údajem na dekádě. Určete chyby měřeného napětí i proudu a vypočítejte chybu odporu dekády.
2. Změřte vnitřní odpor ampérmetru rozsahu $100 \mu\text{A}$ oběma výše uvedenými metodami. Pro měření z Ohmova zákona použijte digitální voltmetr MIT 330.
3. Spočítejte velikosti bočníků, které zvětší rozsah ampérmetru $100 \mu\text{A}$ na velikosti $0,5 \text{ mA}$, 1 mA a 2 mA . Bočníky realizujte odporovou dekádou. Pomocí jiného ampérmetru ověřte správnou funkci přístroje na nových rozsazích.
4. Spočítejte velikosti předřadníků, které umožní používat ampérmetr $100 \mu\text{A}$ jako voltmetr s rozsahy 5 V a 10 V . Předřadníky realizujte odporovou dekádou. Pomocí jiného voltmetru ověřte správnou funkci přístroje na nových rozsazích.

A Typy měřicích přístrojů

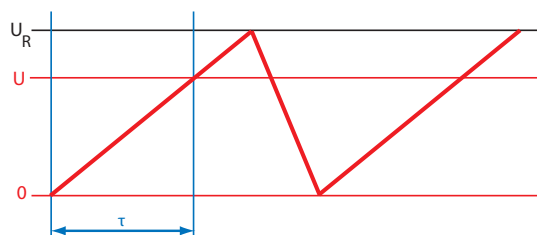
1.1. Ručkové měřicí přístroje

Tyto přístroje využívají silové interakce mezi magnetickým polem a cívkou, kterou protéká měřený proud¹. Nejčastější uspořádání je tzv. magnetoelektrický (deprézský) systém, kde je ručka spojena s otočnou cívkou umístěnou v poli permanentního magnetu. Při průchodu proudem působí na cívku silový moment, který je úměrný proudu. Cívka a s ní spojená ručka zaujme takovou polohu, ve které je moment magnetické síly roven vratnému momentu pružiny. Celý pohyblivý systém cívka + ručka má jistý nenulový moment setrvačnosti. Proto přístroj není schopen registrovat rychlé změny měřeného signálu a okamžitá výchylka ručky je úměrná střední hodnotě měřeného proudu. Pokud chceme tímto přístrojem měřit střídavý proud, je nutné proud usměrnit diodou zapojenou do série s přístrojem.

Důležité je, že přístroj v principu měří proud, i když jej lze použít pro měření napětí. Vždy tedy musí přístrojem určitý proud procházet, což může významně ovlivnit děje v obvodu, ve kterém je přístroj zapojen.

1.2. Digitální měřicí přístroje

Digitální přístroj je elektronický systém, který umožňuje převod měřené analogové veličiny na digitální. Jeho podstatnou součástí je analogově-digitální převodník, nebo-li A/D převodník. Existuje celá řada konstrukcí, jejichž výčet a popis přesahuje rozsah tohoto textu. Uvedeme si jen jeden příklad, který převádí problém měření napětí na měření času. Princip je znázorněn na obr. 1.11. Součástí převodníku je zdroj napětí lineárně rostoucího v čase a pokrývající celý měřicí rozsah přístroje (tzv. pilovité napětí, zde od U_0 do U_R). Převodník pak měří čas, za který pilovité napětí dosáhne hodnoty napětí měřeného. Čas lze měřit relativně jednoduše a přesně s využitím vysokofrekvenčního generátoru a čítače. Generátor pulzů využívá vlastních kmitů křemenného krystalu, obdobně jako oscilátor ve standardních hodinkách typu Quartz². Kmitá-li například oscilátor na frekvenci 1 MHz, pak každý pulz registrovaný čítačem odpovídá času 1 μ s.



Obrázek 1.11: Měření napětí A/D převodníkem s převodem na měření času

Mezi digitální přístroje řadíme i A/D převodníky instalované na přídatných měřicích kartách do počítačů, i když tato zařízení zcela postrádají běžný vzhled měřicího přístroje.

Významnou vlastností digitálních voltmetrů a A/D převodníků je vysoký vnitřní odpor, který zajišťuje velmi malý odběr elektrického proudu při vlastním měření.

Více informací o automatizaci a digitálních přístrojích najdete v návodu k úloze Automatizace měření.

¹ Existují ručkové přístroje založené i na odlišném principu, jsou však méně časté.

² Quartz je anglicky křemen.