
Úloha č. 9: Měření elektrického napětí a proudu

jarní semestr 2023

1 Elektrická měření a elektrické měřicí přístroje

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.

2 Typy měřicích přístrojů

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 vlastnostech.

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

$$R_i = \frac{U_p}{I_p}. \quad (1)$$

Obecně platí, že kvalitní voltmetry by měly mít hodnotu vnitřního odporu co největší, zatímco kvalitní ampérmetry co nejmenší. Zdůvodnění najdete v kapitolách 3 a 4. Místo označení R_i budeme v následujícím textu používat R_A pro ampérmetr a R_V pro voltmetr.

2.1 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 proudu 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 s to 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.

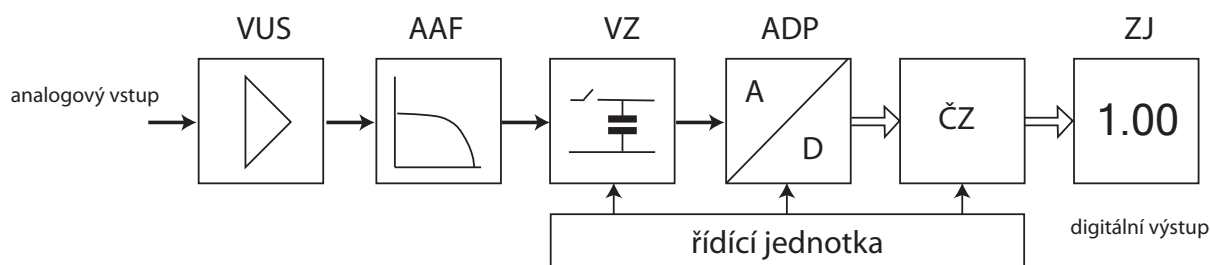
Důležité je, že přístroj v principu měří proud, i když jej lze použít pro měření napětí. Vždy tedy musí přístrojem určitý proud procházet, což může významně ovlivnit děje v obvodu, ve kterém je přístroj zapojen.

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

2.2 Digitální měřicí přístroje

Digitální přístroj je elektronický systém, který provádí převod měřené analogové veličiny na digitální signál. Převod spojitého analogového signálu na digitální proud čísel vyžaduje provádění:

- vzorkování signálu v čase – odběr vzorku vstupního signálu v určitých okamžicích daných vzorkovacími impulsy,
- kvantování vzorků v hodnotě – zaokrouhlení odebraného vzorku na hodnotu nejbližší tzv. kvantovací úrovně,
- kódování – vyjádření kvantovaných hodnot určitým kódem (např. nezáporným celým číslem).



Obrázek 1: Obecné schéma digitálního přístroje. VUS – vstupní úprava signálu, AAF – antialiasingový filtr, VZ – vzorkovač, ADP – analogově digitální převodník, ČZ – číslicové zpracování, ZJ – zobrazovací jednotka

Blokové schéma digitálního přístroje je na obrázku 1. Analogový signál může být nejprve vhodně upraven (např. zesílen) v bloku vstupní úpravy signálu (VUS). Antialiasingový filtr (AAF) zajistí korektní záznam rychlých periodických dějů. Je to v principu dolnofrekvenční propust, která ze signálu odstraňuje frekvence vyšší než je polovina vzorkovací frekvence. Vzorkovač (VZ) provede odběr vzorku analogového signálu a zajistí jeho neměnnost během převodu. Samotný převod (kvantování a kódování) provede analogově/digitální převodník (A/D převodník, ADP). Výsledné číslo je zpracováno v bloku číslicového zpracování (ČZ), např. přepočteno podle kalibrace přístroje, a zobrazeno na displeji.

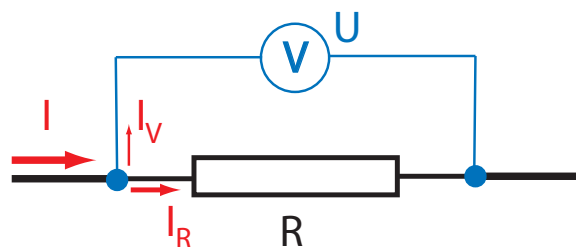
Protože digitální měřicí přístroje pracují s číselnou reprezentací měřené hodnoty, je poměrně snadné je doplnit o obvody, které zajistí přenesení naměřené hodnoty do počítače po některém ze standardních rozhraní (RS-232, USB, GPIB, atd.). Digitální přístroje lze proto často ovládat přímo z počítače. Případně jsou určeny pouze pro práci s počítačem, který pomocí obslužného softwaru využívají pro zobrazování, záznam či další zpracování dat.

Mezi digitální přístroje řadíme např. univerzální digitální multimetry, digitální osciloskopy nebo měřicí karty, které se připojují přímo na sběrnici počítače nebo přes standardní rozhraní. Významnou vlastností digitálních přístrojů je vysoký vnitřní odpor, který zajišťuje velmi malý odběr elektrického proudu při vlastním měření.

Více informací týkajících se problematiky A/D a D/A převodu se dočtete v části automatizace měření.

3 Měření elektrického napětí

Elektrické napětí mezi dvěma body prostoru (konkrétně při měřeních mezi dvěma body elektrického obvodu) je definováno jako rozdíl elektrických potenciálů v těchto bodech. Chceme-li

Obrázek 2: Měření napětí na odporu R

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

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

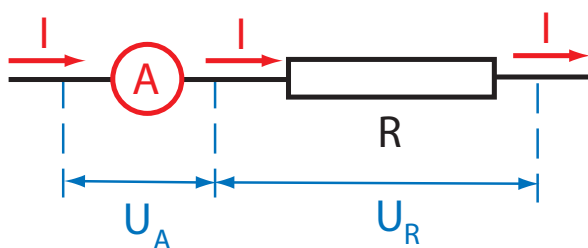
Vzhledem ke konečnému vnitřnímu odporu voltmetru protéká měřicím přístrojem proud, což může být nežádoucí jev. Ideální voltmetr je tedy ten, který má nekonečný vnitřní odpor. Digitální přístroje jsou z tohoto hlediska podstatně lepší než přístroje analogové.

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?

4 Měření elektrického proudu

Ampérmetr zapojujeme sériově s měřeným prvkem (viz obr. 3), protože měřený proud protékající prvkem musí protékat i přístrojem. Ideální ampérmetr má nulový vnitřní odpor.

Obrázek 3: Měření proudu protékajícího odporem R

Kontrolní otázka č. 2

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

5 Určení nejistoty měření napětí a proudu

Jako při každém jiném měření i v případě měření elektrických veličin jsou naměřené hodnoty zatíženy experimentálními chybami, ať už systematickými nebo náhodnými. U elektrických měřicích

přístrojů opakováním měření obvykle dostaneme stejné hodnoty – nejistota typu A je tedy nulová. Měření má proto smysl provádět jen jedenkrát a za nejistotu měření bereme nejistotu typu B, kterou nám udává výrobce přístroje.

5.1 Určení nejistoty typu B ručkových přístrojů

Ke stanovení nejistoty typu B ručkových přístrojů se standardně používá veličina zvaná třída přesnosti, která bývá vyznačena přímo na stupnici měřicího přístroje. **Třída přesnosti určuje největší dovolenou (mezní) chybu měření jako procento z aktuálního rozsahu přístroje. Standardní nejistota typu B se rovná této chybě.**

Zde je nutné si uvědomit jednu důležitou skutečnost. Nejistota přístroje je dána rozsahem, nikoliv měřenou hodnotou. Je tedy zřejmé, že měření bude tím přesnější (tj. tím menší bude relativní nejistota), čím bude měřená hodnota blíží 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 nejistoty měření ručkového přístroje Měříme napětí 4,52 V na voltmetru s třídou přesnosti 0,5 s rozsahem 10 V. Mezní nejistota měřené hodnoty je rovna 0,5 % z 10 V, tedy 0,05 V. Výsledek je tedy (s předpokladem dobré změření výrobcem)

$$U = 4,52 (5) \text{ V},$$

$$U = (4,52 \pm 0,05) \text{ V} \quad (p = 68,3 \%, \nu \sim 30).$$

Třída přesnosti a z ní spočtená mezní chyba nemá význam krajní nejistoty normálního rozdělení, neboť přístroje s určitou třídou přesnosti dávají spíše větší odchylky od správné hodnoty než odchylky menší, jinak by byly zařazeny do lepší třídy. Při použití bimodálního rozdělení je **standardní nejistota typu B rovna mezní chybě**.

5.2 Určení nejistoty typu B digitálních přístrojů

Krajní nejistotu typu B počítáme pomocí vztahu uvedeného v návodu k digitálnímu měřicímu přístroji. 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 nejistoty měření digitálního měřicího přístroje Hodnota napětí 4,524 V byla naměřena měřicím přístrojem METEX M3890 D (na rozsahu 20 V). V manuálu je pro výpočet nejistoty uvedeno $\pm(0,8 \% + 2 \text{ dgs})$. 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 nejistota rovna

$$0,8 \% \text{ z } 4,524 \text{ V} + 2 \cdot 0,001 \text{ V} = 0,036 \text{ V} + 0,002 \text{ V} = 0,038 \text{ V}.$$

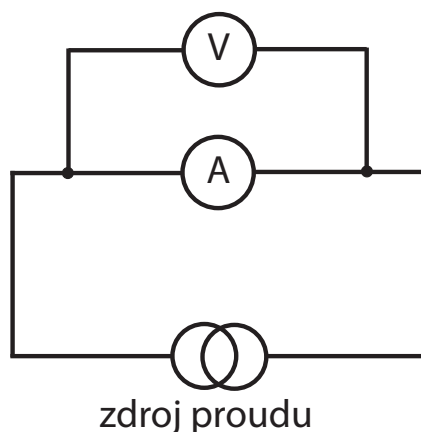
Výsledek zapíšeme po zaokrouhlení ve tvaru

$$U = (4,52 \pm 0,04) \text{ V} \quad (p = 99,7 \%, \nu \sim 30).$$

Standardní nejistota u_B , vystupující v zákonu přenosu nejistoty, je potom rovna třetině krajní nejistoty.

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.



Obrázek 4: Měření vnitřního odporu ampérmetru z Ohmova zákona

6.1 Z Ohmova zákona

Měřicí přístroj (zde ampérmetr) zapojíme do obvodu dle obr. 4. Měříme proud procházející ampérmetrem a současně i spád napětí na jeho svorkách. Odpor určíme přímo z Ohmova zákona.

Kontrolní otázka č. 3

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

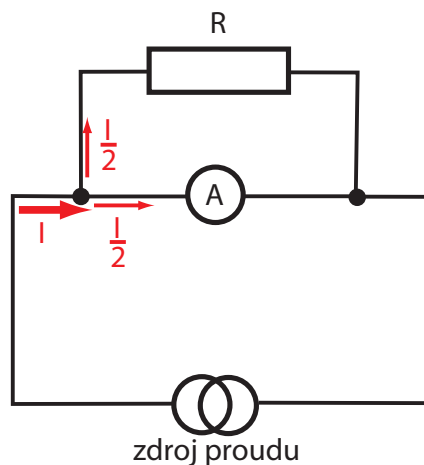
Druhá metoda využívá stavitelného odporu, tzv. odporové dekády. Použijeme zapojení dle obr. 5, které se liší do zapojení předchozího (obr. 4) pouze tím, že vyměníme voltmetr za odporovou dekádu R . Nejprve necháme dekádu nepřipojenu a říditelným zdrojem nastavíme na ampérmetru určitou výchylku (například 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.

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. 4

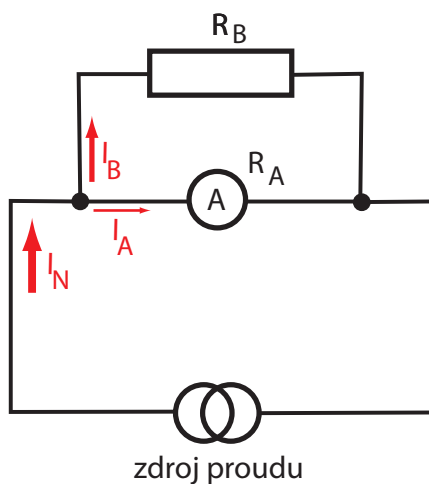
Mějme analogový měřicí přístroj z výroby cejchovaný jako ampérmetr rozsahu 10 A. Víme, že přístroj má vnitřní odpor $0,2\ \Omega$. Kdybychom tento přístroj chtěli bez jakékoliv úpravy použít jako voltmetr, jaký by byl jeho rozsah?



Obrázek 5: Měření vnitřního odporu ampérmetru pomocí odporové dekády

7.1 Změna rozsahu ampérmetru

Obečně 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. 6). Funkce bočníku je velmi jednoduchá. Označíme-li I_N nový proudový rozsah přístroje a I_A



Obrázek 6: Zapojení bočníku

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 přístrojem a zbytek musí být veden bočníkem

$$I_B = I_N - I_A = (n - 1)I_A.$$

Protože napětí je na měřicím přístroji a na bočníku stejné,

$$R_B I_B = R_A I_A = U,$$

kde R_B je odpor bočníku a R_A odpor ampérmetru, lze $(n - 1)$ -krát většího proudu I_B bočníkem dosáhnout jen $(n - 1)$ -krát menším odporem bočníku

$$R_B = \frac{R_A I_A}{I_B} = \frac{R_A}{n - 1}.$$

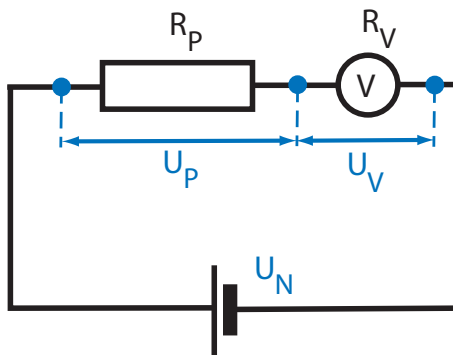
Odpor bočníku tedy musí být roven

$$R_B = \frac{R_A}{\frac{I_N}{I_A} - 1}. \quad (2)$$

Příklad: Zvětšení rozsahu ampérmetru $10\times$ Chceme-li použít přístroj původního rozsahu $100\ \mu\text{A}$ pro měření proudu do $1\ \text{mA}$, musí při tomto proudu protékat bočníkem $900\ \mu\text{A}$ 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 ampérmetru.

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). Měřicí přístroj a předřadník



Obrázek 7: Zapojení předřadníku

pak spolu tvoří napěťový dělič tak, aby při celkovém napětí rovném novému rozsahu $U_N = n \cdot U_V$ bylo na měřicím přístroji napětí shodné s jeho původním rozsahem U_V , zbytek napětí je na předřadníku

$$U_P = U_N - U_V = (n - 1)U_V.$$

Protože měřicím přístrojem i předřadníkem teče stejný proud, dělí se napětí v poměru odporů

$$\frac{U_V}{R_V} = \frac{U_P}{R_P} = I.$$

Odpor předřadníku R_P musí proto být $(n - 1)$ -násobkem vnitřního odporu měřicího přístroje R_V

$$R_P = \frac{U_P}{U_V} R_V = (n - 1)R_V.$$

Odpor předřadníku tedy musí být roven

$$R_P = \left(\frac{U_N}{U_V} - 1 \right) R_V. \quad (3)$$

Příklad: Zvětšení rozsahu voltmetru $25\times$ Máme-li ampérmetr s měřicím rozsahem $100\ \mu\text{A}$ a vnitřním odporem $4\,000\ \Omega$, funguje jako voltmetr do napětí $U = R_V \cdot I_A = 4\,000 \cdot 100 \cdot 10^{-6}\ \text{V} = 0,4\ \text{V}$. Chceme-li měřit napětí do $10\ \text{V}$, čili pětadvacetkrát větší, musí být na měřicím přístroji napětí $0,4\ \text{V}$ a na předřadníku $24\times$ větší, čili $9,6\ \text{V}$. Odpor předřadníku musí být také $24\times$ větší než odpor měřicího přístroje, čili $R_P = 24 \cdot 4\,000\ \Omega = 96\,000\ \Omega$.

8 Automatizace měření

Automatizace měření pomocí výpočetní techniky patří mezi moderní fyzikální metody měření v laboratorní i průmyslové praxi. Nejčastěji měřenou fyzikální veličinou je elektrické napětí. Ostatní fyzikální veličiny, i neelektrické, se často na měření elektrického napětí převádí. Avšak současné počítače, dříve též označované jako číslicové či digitální, však nejsou přímo na měření elektrického napětí vybaveny. Nezpracovávají totiž přímo spojitě fyzikální veličiny, ale čísla (jakkoli elektrickým napětím kódované). Existují speciální obvody, které umí mezi analogovou veličinou a číslem převádět.

Analogově-digitální převodník (A/D) dovoluje převádět analogovou veličinu na číslo, digitálně-analogový převodník (D/A) převádí naopak číslo na analogovou veličinu. A/D převodník tedy veličinu měří, D/A naopak generuje.

Důležitým parametrem převodníků je rozlišení čili počet bitů čísla, které je možné do převodníku poslat (u D/A) nebo naopak z něj přečíst (u A/D).

8.1 Reprezentace čísel v počítači

Číselná hodnota je v současných počítačích ukládána a zpracovávána ve dvojkové (binární) soustavě. To znamená, že číslo je možné zapsat pouze pomocí dvou číslic, 0 a 1. Dvojkové číslici se také říká bit (*binary digit*). Srovnáme tyto příklady (index znamená vyjádření v příslušné soustavě):

$$\begin{aligned} 235_{10} &= 2 \cdot 10^2 + 3 \cdot 10^1 + 5 \cdot 10^0 \\ 110_2 &= 1 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 0 \cdot 2^0 = 6_{10}. \end{aligned}$$

Číslo 110_2 je tedy zkráceným zápisem, který vyjadřuje počet různých řádů se základem 2. Mezi čísla vyjádřených v různých číselných soustavách je možné samozřejmě převádět. Převod z dvojkové do desítkové soustavy je naznačen výše. Pro převod z desítkové do dvojkové soustavy se používá následující algoritmus:

1. Převáděné číslo zapíšeme do prvního řádku tabulky vlevo. Do stejného řádku vpravo zapíšeme dvojkou.
2. Číslo vlevo vydělíme dvěma, celou část zapíšeme o řádek níže pod něj a celočíselný zbytek po dělení (dělíme dvěma, zbytkem tedy může být nula nebo jednička) zapíšeme opět na nižší řádek vpravo.
3. Opakujeme krok 2., až dospějeme k dvojici 0, 0. Potom zbytky přečteme v obráceném pořadí (zdola).

235	2
117	1
58	1
29	0
14	1
7	0
3	1
1	1
0	1
0	0

Pro kontrolu spočteme opět vyjádření v desetiné soustavě:

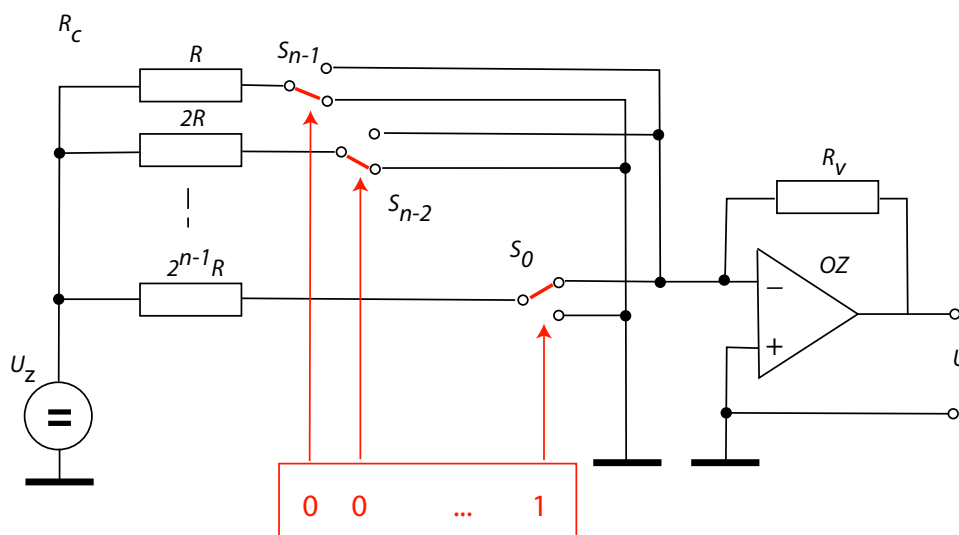
$$\begin{aligned}
 11101011_2 &= 1 \cdot 2^7 + 1 \cdot 2^6 + 1 \cdot 2^5 + 0 \cdot 2^4 + 1 \cdot 2^3 + 0 \cdot 2^2 + 1 \cdot 2^1 + 1 \cdot 2^0 = \\
 &= 128 + 64 + 32 + 0 + 8 + 0 + 2 + 1 = \\
 &= 235_{10}.
 \end{aligned}$$

Hodnota binární číslice je v počítači reprezentována různým způsobem. Příkladem je logika TTL, při které je nula reprezentována napětím v intervalu $0 - 0,8 \text{ V}$ a jednička napětím v rozsahu $2,5 - 5 \text{ V}$.

8.2 Digitálně-analogový převodník (D/A převodník)

Jak již bylo uvedeno výše, digitálně-analogový převodník (D/A) dovoluje převádět číslo na analogovou veličinu. Lze jej tedy použít jako regulovatelný zdroj malého výkonu. Jednoduchý n -bitový D/A převodník je zobrazen na obrázku 8. Vstupem jsou hodnoty bitů, výstupem napětí U . Napětí zdroje je U_z . Pro výstupní napětí použitého operačního zesilovače OZ platí

$$U = \frac{R_v}{R_c} \cdot U_z$$



Obrázek 8: D/A převodník s váhovými rezistory

Hodnota odporu R_c je měněna podle dodaných bitů pomocí spínačů S_i (např. tranzistorů), které zapojují jednotlivé větve paralelně zapojených rezistorů. Např. pro 4-bitový převodník ($n = 4$) a číslo 1 bude výsledné napětí

$$U = \frac{R_v}{8R} \cdot U_z.$$

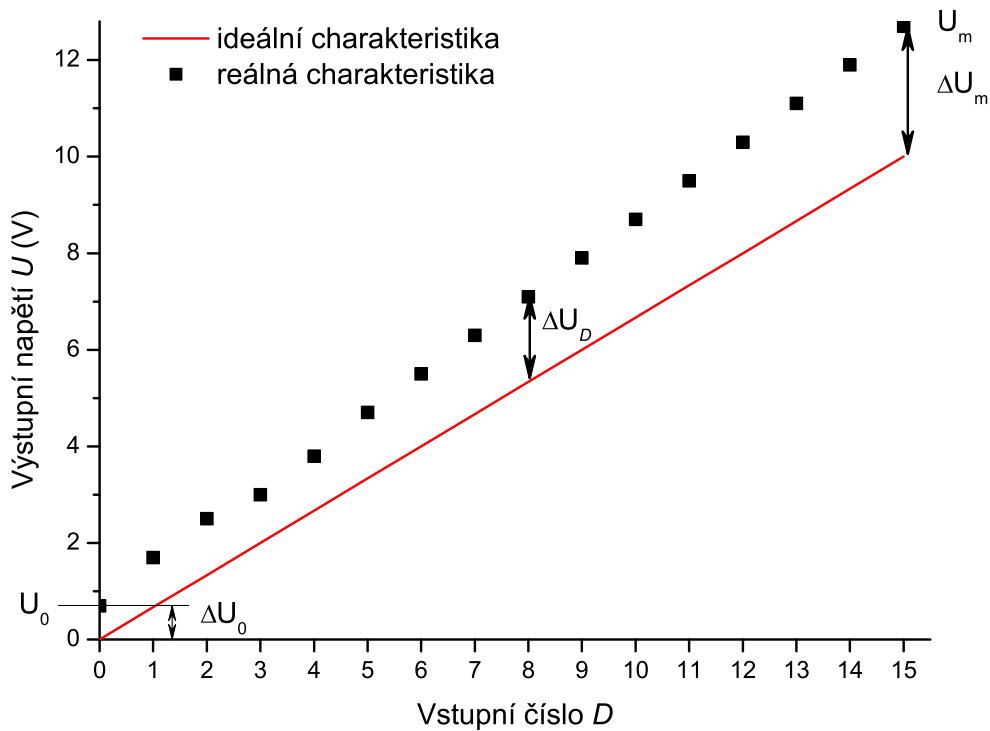
Protože u paralelního zapojení rezistorů se sčítají převrácené hodnoty jejich odporů, v případě čísla 3 bude výsledné napětí

$$U = 3 \frac{R_v}{8R} \cdot U_z,$$

tedy trojnásobné ve srovnání s napětím pro číslo 1. Převodník na obr. 8 je tzv. převodník s váhovými rezistory. V praxi se ovšem používají převodníky různých typů.

Statické vlastnosti převodníku charakterizuje převodní charakteristika (viz obr. 9). Důležitým parametrem převodníku je ideální kvantizační krok D/A převodníku

$$U_q = \frac{U_r}{2^n - 1}$$



Obrázek 9: Převodní charakteristika D/A převodníku

kde U_r je nominální napěťový rozsah převodníku a n počet bitů převodníku. Z dalších parametrů se zavádí např.

- chyba nuly (ofsetu)

$$\delta_0 = \frac{\Delta U_0}{U_r},$$

- chyba měřítka (zesílení)

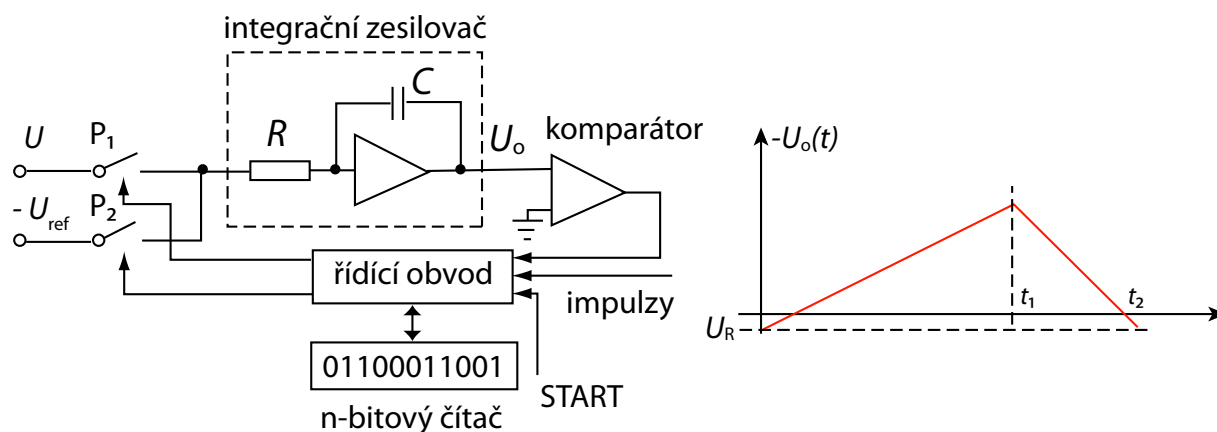
$$\delta_m = \frac{\Delta U_m - \Delta U_0}{U_r},$$

kde U_0 a U_m jsou minimální a maximální hodnoty napětí reálně nastavitelné na převodníku a ΔU_0 a ΔU_m jejich odchylky od nominálních hodnot. Zpravidla se tato odchylka určuje jako rozdíl hodnoty reálné a hodnoty nominální. Pokud tedy označíme minimální nominální hodnotu jako $U_{0,n}$ a maximální nominální hodnotu jako $U_{m,n}$, tak potom odchylky od nominálních hodnot jsou určeny následovně

$$\begin{aligned}\Delta U_0 &= U_0 - U_{0,n} \\ \Delta U_m &= U_m - U_{m,n}\end{aligned}$$

8.3 A/D převodník

Připomeňme, že analogově-digitální převodník (A/D) provádí převod analogové fyzikální veličiny na její číselné vyjádření, veličinu tedy měří. Konstrukcí A/D převodníků je celá řada a jejichž výčet a podrobný popis přesahuje rozsah tohoto textu. Jako příklad si uvedeme A/D převodník s dvojitou integrací, který je často součástí multimetrů a který převádí problém měření napětí na měření času (viz obr. 10). Na vstup integračního zesilovače je nejprve spínačem P_1 připojeno měřené napětí U . To je po určitou dobu t_1 integrováno, napětí na výstupu U_o narůstá. Poté je vstup odpojen a na vstup integrátoru je přes spínač P_2 přivedeno referenční napětí opačné polarity. Klesající napětí na výstupu U_o je porovnáváno vůči nule komparátorem. Čas, který uplyne od



Obrázek 10: A/D převodník s dvojitou integrací.

začátku druhé integrace do přechodu U_o přes nulové napětí, je úměrný hodnotě vstupního napětí. K měření času slouží generátor impulzů a čítač. A/D převodník je součástí každého digitálního měřicího systému.

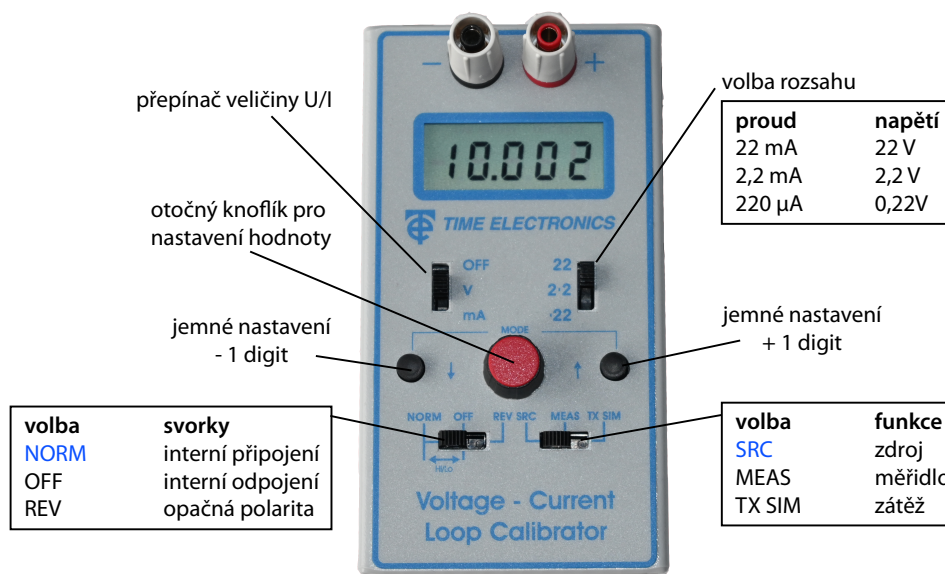
9 Experimentální vybavení

9.1 Analogová část

Vybavení pro experimenty k analogové části znázorňuje obrázek 11. V této části budeme nejprve zkoumat vlastnosti ručkového přístroje, ocejchovaného výrobcem jako ampérmetr s rozsahem $100 \mu\text{A}$. Následně z něj uděláme ampérmetr jiného rozsahu a analogový voltmetr. Vlastní měření budeme provádět pomocí kalibrátoru, což je přístroj, který může fungovat jako velmi přesný zdroj napětí i proudu (viz obr. 12).



Obrázek 11: Experimentální vybavení k analogové části



Obrázek 12: Kalibrátor a jeho ovládací prvky. V naší úloze budeme mít dolní přepínače v poloze vlevo (funkce jsou v tabulce vyznačeny modře).

Má-li kalibrátor fungovat jako zdroj stabilizovaného napětí nebo proudu, oba dolní přepínače musí být v levé pozici. Výběr stabilizované veličiny se provádí horním přepínačem vlevo, výběr rozsahu horním přepínačem vpravo. Hodnotu na výstupu nastavujeme otočným knoflíkem, jemné doladění o jeden digit malými knoflíky z obou stran.

Před přepnutím rozsahu nebo změnou stabilizované veličiny se vždy přesvědčíme, že je otočný knoflík stažen na nulu (točíme lehce proti směru hodinových ručiček). Při přepnutí rozsahu se jinak může stát, že do ručkového přístroje pustíme příliš velký proud a zničíme ho!

Na obrázku 13 je odporová dekáda, která je v úloze také k dispozici. Požadovaný odpor nastavujeme otočnými přepínači. Na dekádě je nyní nastaven odpor 83 580 Ω .



Obrázek 13: Odporová dekáda s nastavenou hodnotou 83 580 Ω .

9.2 Digitální část

V úloze jsou k dispozici dva D/A převodníky (viz obrázek 14), čtyřkanálový šestnáctibitový převodník USB-9263 s typickým nominálním rozsahem -10,7 V až 10,7 V a jednoduchý osmibitový

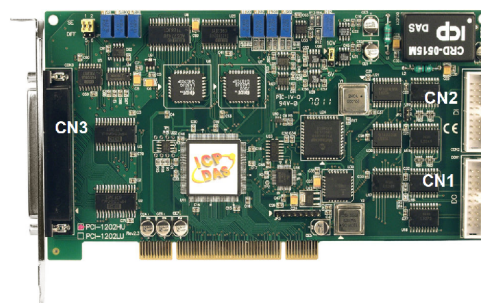
D/A převodník MDAC-08 s nominálním rozsahem 0 V až 10 V. Převodník USB-9263 se připojuje přímo k počítači přes rozhraní USB; v úloze se používá pouze nultý kanál. Převodník MDAC-08 je připojen přes digitální výstup multifunkčního USB modulu USB-6008. Tento převodník navíc vyžaduje stabilizovaný zdroj napětí 12 V. Při zapojení je nutné dávat pozor na správnou polaritu zapojení zdroje. Na převodníku je umístěno osm barevných LED diod, které svým stavem (svítí/nesvítí) vyjadřují v binárním tvaru číslo, které je z počítače vystaveno na vodičích a které tedy převodník převádí na napětí. Generované napětí je možné měřit na předních svorkách převodníku.



Obrázek 14: Dva D/A převodníky: vlevo profesionální 4-kanalový 16-bitový převodník USB-9263 firmy National Instruments, vpravo jednoduchý osmibitový D/A převodník MDAC-08

V úloze dále otestujete A/D převodník v měřicí kartě ICP DAS PCI-1202LU, která je využita v měřicím systému ISES. Karta má následujícími parametry:

- 32-bit +5V PCI Bus, Plug & Play,
- rozlišení 12 bitů,
- vzorkovací frekvence max. 110 KS/s,
- 32/16 vstupy AI typu single-ended/differential,
- FIFO 1k word (0,1 s pro 10 kHz vzorkovací frekvenci),
- programovatelný gain
- 2 nezávislé 12-bitové D/A převodníky,
- 16 kanálů DI/DO.



Obrázek 15: Měřicí karta ICP DAS PCI-1202LU

Úkoly

Analogová část

1. Změřte vnitřní odpor ampérmetru o rozsahu $100 \mu\text{A}$ oběma výše uvedenými metodami. Pro měření z Ohmova zákona použijte jako voltmetr stolní digitální multimetr Keysight U3401A.
2. Spočítejte velikosti bočníků, které zvětší rozsah ampérmetru $100 \mu\text{A}$ na hodnoty 0,5 mA, 1 mA a 2 mA. Bočníky realizujte odporovou dekadou. Správnou funkci přístroje na nových rozsazích ověřte kalibrátorem nastaveným na maximální hodnotu nového rozsahu ručkového přístroje.

3. Spočítejte velikosti předřadníků, které umožní používat ampérmetr $100\ \mu\text{A}$ jako voltmetr s rozsahy 5 V a 10 V. Předřadníky realizujte odporovou dekádou. Správnou funkci přístroje ověřte opět kalibrátorem nastaveným na maximální hodnotu nového rozsahu ručkového přístroje.

Digitální část

1. Určete číselný rozsah osmibitového a šestnáctibitového D/A převodníku. Víte přitom, že do převodníku je možné zadávat pouze celá nezáporná čísla.
2. Určete reálný napěťový rozsah, kvantizační krok a rozlišovací schopnost D/A převodníku. Porovnejte osmibitový převodník MDAC08 a šestnáctibitový modul USB-9263. K přesnému měření výstupního napětí použijte multimetr HP 34401A, připojený k počítači přes rozhraní GPIB. Pro ruční zadávání libovolných čísel do D/A převodníků je připraven program *TestDA*. (Automatické generování čísel v geometrické řadě 2^n si lze vyzkoušet s programem *AutoTestDA*.)
3. U osmibitového převodníku stanovte z naměřených hodnot chybu offsetu a chybu zesílení.
4. Nastavte na šestnáctibitovém převodníku USB-9263 napětí 3,2 V. Potřebné číslo předem odhadněte výpočtem. Použijte program *TestDA*.
5. Otestujte vliv vzorkovací frekvence na kvalitu záznamu analogového signálu. Ke generování harmonického průběhu použijte modul USB-9263 a program *Generátor*, ve kterém nastavíte frekvenci generovaného signálu např. na 1 kHz. Zpětný záznam realizujte A/D převodníkem v měřicím systému ISES. Vzorkovací frekvenci v systému ISES nastavte na 20 kHz, 2 kHz, 1 kHz, 1,1 kHz nebo 100 Hz. Jak velká musí být vzorkovací frekvence, aby záznam obsahoval původní frekvenci generovaného signálu, tj. 1 kHz? Je karta vybavena antialiasingovým filtrem?
6. Určete kvantizační krok A/D převodníku v měřicí kartě systému ISES. Na modulu INPUT zkratujte vodičem vstupní svorky a spusťte měření (se vzorkovací frekvencí např. 40 kHz). V záznamu potom nalezněte nejmenší nenulovou změnu napětí. (Záznam můžete např. exportovat a zobrazit jako bodový graf v programu QtiPlot.) Získanou hodnotu porovnejte s teoretickým kvantizačním krokem A/D převodníku (převodník je dvanáctibitový).

A Užití v praxi

Pochopení principu měření elektrického napětí a proudu je podstatné pro mnoho činností v průmyslové praxi. Většina neelektrických veličin se převádí na napětí nebo proud pro využití moderní záznamové a výpočetní techniky. Důkladné pochopení vlastností řetězce zpracování měřeného signálu je důležité pro správnou interpretaci dat a stanovení měřicích a kalibračních postupů. Mimo diagnostiku elektrických zařízení, kde se využívá přímo měření elektrického napětí nebo proudu, se můžeme s podobnými měřeními setkat u řady dalších metod.

Mezi metody využívající přímo měření napětí a proudu patří **čtyřbodová metoda stanovení měrného odporu materiálu**. Pro správnou interpretaci výsledků měření je nutná znalost interakce měřicího zařízení se vzorkem a také znalost kontaktních jevů. Podobnou metodou je měření odporu šíření, která se používá ke **stanovení hloubkových profilů elektrických vlastností materiálů** pomocí měření napětí a proudu na dvou měřicích hrotech krokujících po šikmém výbrusu materiálu. Metoda vyžaduje provedení kalibrace na vzorcích se známým měrným odporem.

Dalším příkladem je **měření teploty pomocí termočlánků** nebo **řízení koncentrace roztoků pomocí měření jejich vodivosti**. Převod dalších veličin na elektrické napětí nebo proud je často komplexní záležitost využívající různých fyzikálních jevů (např. tlak, hmotnost, intenzita záření, koncentrace látek apod.)