

Úvod do měření elektrických veličin

Učební text pro gymnázia

BEZPEČNOST PRÁCE

Třetí ročník čtyřletého resp. sedmý ročník osmiletého studia fyziky je věnován elektromagnetickým jevům. Práce s elektrickým proudem v laboratorních cvičeních vyžaduje seznámení s důležitými bezpečnostními předpisy.

Úraz elektrickým proudem

Úraz může způsobit proud protékající postiženým tělem nebo může vzniknout jako důsledek jiných nežádoucích účinků elektrického proudu, elektrického či magnetického pole.

Nebezpečí úrazu elektrickým proudem je dáno *velikostí* proudu, tvarem vlny nebo pulsu, *frekvencí, dobou*, po kterou proud prochází organismem, a *trajektorií*, po níž je proud veden lidským tělem. Velikost proudu procházejícího tělem přitom závisí na velikosti *napětí* a *impedanci* lidského těla.

K posuzování **fyziologických účinků** stejnosměrného a střídavého proudu jsou definovány tyto prahové hodnoty elektrického proudu: **Práh vnímání** je minimální hodnota elektrického proudu vyvolávající počitek u osoby, jejímž tělem protéká. **Práh reakce** je minimální hodnota proudu, která způsobí bezděčnou svalovou kontrakci. **Mez uvolnění** je maximální hodnota elektrického proudu, při níž osoba třímající elektrody neztrácí schopnost se sama uvolnit. **Práh fibrilace srdečních komor** je minimální hodnota elektrického proudu procházejícího lidským tělem, která způsobí fibrilace srdečních komor.

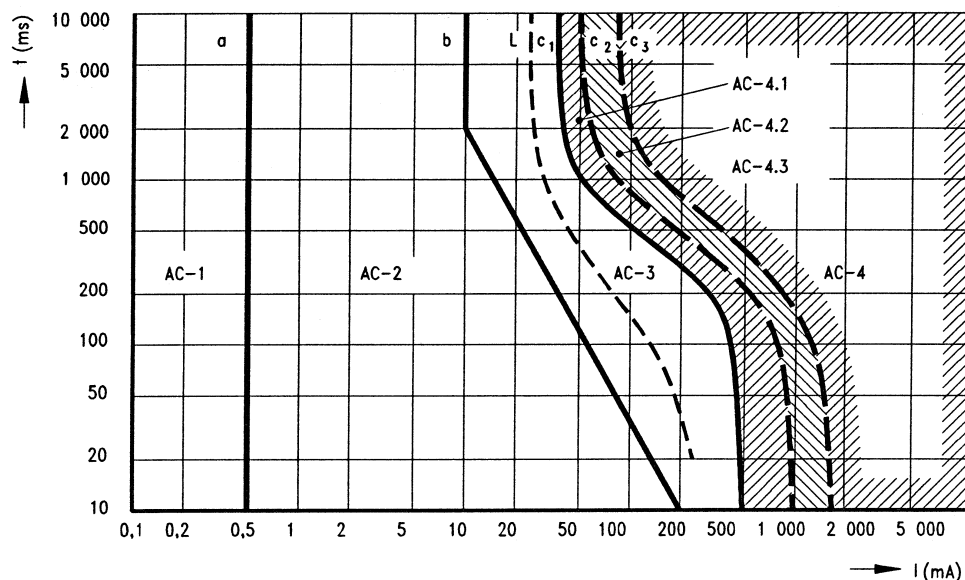
Ženy a děti jsou k proudu citlivější než muži. Pro ženy je nutno uvažovat 66 % a pro děti 50 % hodnoty proudu bezpečného pro muže.

Odpověď na otázku o velikosti bezpečného proudu není ovšem jednoznačná. Jak již bylo uvedeno, nebezpeční úrazu závisí na mnoha „objektivních“ faktorech; rozdíly v individuální citlivosti jedinců jsou ovšem také značné. Mnohá tvrzení o účincích elektrického proudu na lidský organismus mají z těchto důvodů „pravděpodobnostní charakter“.

V OBR. 1 jsou znázorněny zóny fyziologických účinků **střídavého** sinusového proudu o frekvencích 15 Hz – 100 Hz; na vodorovné ose je vynášena velikost proudu, na svislé ose doba, po níž proud tělem prochází. Zóna AC-1 (do 0,5 mA) představuje proudy, na něž člověk obvykle nereaguje. Zóna AC-2 představuje proudy nad prahem vnímání, které však jsou bez škodlivých fyziologických účinků.

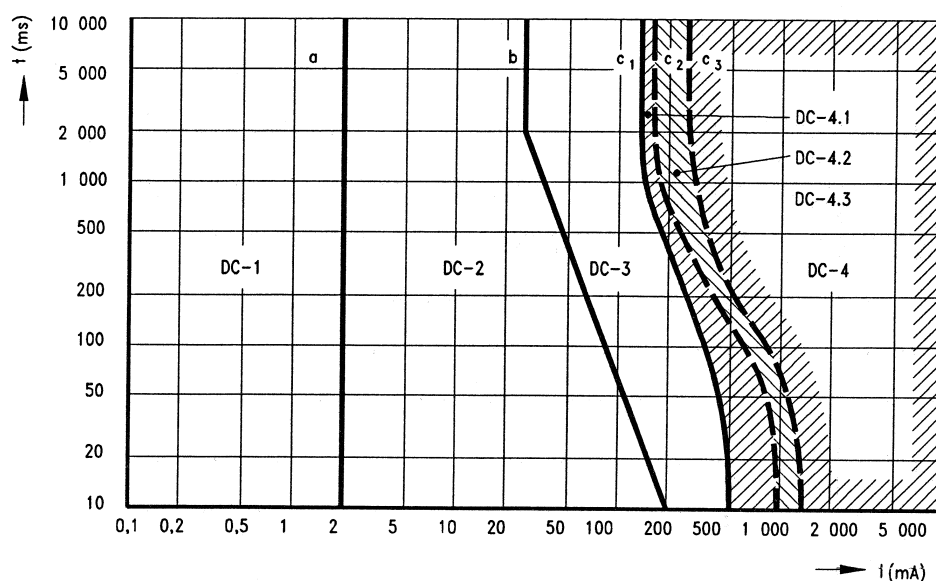
V zóně AC-3 dochází ke svalovým křečím, dýchacím potížím, poruchám srdeční činnosti. Všechny změny jsou vratné, k organickému poškození nedochází. V zóně AC-4 dochází k nebezpečným patofyzickým jevům, přibývají s rostoucím proudem a časem (zástava srdce, zástava dýchání, popáleniny). V části zóny AC-4.1 je pravděpodobnost fibrilací srdečních komor menší než 5 %, v AC-4.2 pravděpodobnost do 50 % a v AC-4.3 nad 50 %.

Poznamenejme, že v závislosti na frekvenci jsou nejnižší hodnoty tělového proudu odpovídajícího mezi uvolnění mezi 10 Hz a 500 Hz. Vyšší a nižší frekvence jsou tedy méně nebezpečné.



OBR. 1

V OBR. 2 jsou znázorněny zóny účinků **stejnoseměrného** proudu. Význam zón je stejný jako v předchozím případě; je dobré všimnout si rozdílů, např. práh reakce je zde 2 mA, tedy čtyřikrát vyšší než v případě střídavého proudu.



OBR. 2

Odborná způsobilost v elektrotechnice

Problematiku odborné způsobilosti pracovníků v elektrotechnice upravuje **vyhláška 50/1978 Sb.** Některá její ustanovení se týkají i školních laboratoří. Existuje několik stupňů odborné způsobilosti: **Pracovníci seznámení** (§ 3) jsou ti, kteří byli organizací v rozsahu své činnosti seznámení s předpisy o zacházení s elektrickým zařízením (ČSN 34 3108) a upozorněni na možné ohrožení těmito zařízeními.

Pracovníci poučení (§ 4) jsou ti, kteří byli organizací v rozsahu své činnosti poučení o předpisech pro činnosti na elektrických zařízeních, školeni v této činnosti, upozorněni na možné ohrožení elek-

trickými zařízeními a seznámení s poskytováním první pomoci při úrazech elektrickým proudem. Rozsah školení je dán náplní budoucí činnosti; znalosti pracovníků poučených jsou ověřovány.

Pracovníci znalí (§ 5) jsou ti, kteří mají odborné vzdělání (vyučení, střední odborné vzdělání nebo vysokou školu, vše v některém z oborů elektrotechniky) a po zaškolení složili zkoušku. Přezkoušení zajišťuje organizace nejméně jednou za tři roky.

Pracovníci pro samostatnou činnost (§ 6) jsou pracovníci znalí s vyšší kvalifikací, kteří splňují požadavky odborného vzdělání, minimální požadované praxe a složením další zkoušky prokázali znalosti potřebné pro samostatnou činnost.

Další stupně budou pouze vyjmenovány: pracovníci pro řízení činnosti (§ 7), pracovníci pro řízení činnosti prováděné dodavatelským způsobem a pracovníci pro řízení provozu (§ 8), pracovníci pro provádění revizí – „revizní technici“ (§ 9), pracovníci pro samostatné projektování a pracovníci pro řízení projektování (§ 10).

Učitelé v labotořích škol všech stupňů, pokud jsou absolventy vysokých škol některého z oborů elektrotechniky a přírodovědeckých fakult (obor fyzika), se považují *na svých pracovištích* za pracovníky pro řízení činnosti. Jejich znalosti musejí být ověřovány nejméně jednou za tři roky.

Technické uspořádání a bezpečnost práce

Elektrická zařízení lze (dle ČSN 33 0010) třídit různými způsoby:

- (1) Podle **nebezpečí úrazu** elektrickým proudem:
 - a) **silnoproudá zařízení** – při obvyklém užívání mohou nastat proudy nebezpečné osobám nebo věcem,
 - b) **slaboproudá zařízení** – při obvyklém užívání nemohou nastat proudy nebezpečné osobám nebo věcem.
- (2) Podle **účelu**:
 - a) **silová zařízení** – slouží k výrobě, přeměně, přenosu a rozvodu elektrické energie a její přeměně na práci nebo na jiný druh energie,
 - b) **sdělovací zařízení** – určena k přenosu, zpracování, záznamu a reprodukci informací v jakékoliv formě,
 - c) **řídící zařízení** – slouží k měření, řízení, ochraně a kontrole ostatních elektrických a neelektrických zařízení,
 - d) **zvláštní zařízení** – slouží jiným než výše uvedeným účelům (např. ve zdravotnictví).
- (3) Podle **druhu** (proudové **soustavy**):
 - a) **stejnoseměrná zařízení** – na stejnosměrný, pulzující nebo zvlhňený proud,
 - b) **střídavá zařízení** – pracují se střídavým proudem.

Střídavá silová zařízení se dále dělí dle počtu fází na jednofázová, trojfázová a vícefázová. Podle kmitočtu pak na zařízení nízkofrekvenční (do 60 Hz), středofrekvenční (v rozsahu 60 Hz až 10 kHz) a vysokofrekvenční (nad 10 kHz).

Prostory, v nichž se elektrická zařízení používají, se třídí takto:

Prostory normální jsou prostory, kde je používání elektrických zařízení považováno za bezpečné. Pro tyto prostory je normou ČSN 33 2000-4-41 stanoveno bezpečné malé napětí střídavé 50 V, stejnosměrné 100 V.

Prostory nebezpečné jsou prostory, kde působením vnějších vlivů je vyvoláno přechodné nebo

stále nebezpečí elektrického úrazu. (Jedná se o prostory se zvýšenou vlhkostí či množstvím kovů apod.) V těchto prostorech je bezpečné malé napětí střídavé 25 V, stejnosměrné 60 V.

Prostory zvlášť nebezpečné jsou prostory, kde existuje *zvýšené* nebezpečí elektrického úrazu. Jedná se např. o prostředí, kde se pracuje s elektrickými zařízeními ve vodě, v kotlích, v kovových nádržích apod. Zde je bezpečné malé napětí střídavé 12 V, stejnosměrné 25 V.

PRVNÍ POMOC

První pomoc lze rozdělit do dvou kroků: a) technická první pomoc, b) zdravotnická první pomoc.

Technická první pomoc

Technická první pomoc spočívá v odstranění příčin, které způsobily úraz nebo zhoršují stav postiženého. V případě úrazu elektrickým proudem jde o vyproštění postiženého z dosahu proudu. Existuje několik způsobů vyproštění:

Vypnutí přívodu elektrického proudu (vypínačem, jističem, vyšroubováním pojistek, vytažením vidlice ze zásuvky) – nejbezpečnější způsob z hlediska zachránce. V případě, že postižený je v poloze, kdy po vypnutí elektrického proudu a následném povolení křečovitého stažení jeho svalstva je nebezpečí pádu z výšky, je třeba nejdříve provést zajištění proti pádu nebo volit jiný způsob vyproštění.

Odtažení postiženého z dosahu proudu – způsob vyproštění, kdy nelze vypnout elektrické zařízení nebo kdy vypnutí není prokazatelné, popř. by znamenalo příliš velkou časovou ztrátu. Zachránce musí při odtažení zabránit přímému dotyku s vodičem nebo tělem postiženého a chránit se improvizovanými ochrannými pomůckami; odtažení provádět pouze jednou rukou. U elektrických zařízení nad 1 000 V se k postiženému přibližovat drobnými kroky (snažit se překlenout co nejmenší potenciálový rozdíl).

Odsunutí zdroje úrazu z dosahu postiženého použije zachránce při nebezpečí vzniku krokových napětí nebo při opětném automatickém zapnutí zařízení. Odsunutí zdroje úrazu lze provést jen předmětem s dostatečně velkým izolačním odporem. Přístup ke zdroji úrazu je možný jen s využitím improvizovaných pomůcek s dobrými izolačními vlastnostmi.

Přerušení přívodu elektrického proudu je způsob vhodný pouze v případě zařízení nízkého napětí, kdy je technicky možné přerušit přívod bez ohrožení zachránce nebo se volí v případě, kdy je vypnutí zdroje časově náročné. Přerušení přívodu by měl provádět pouze pracovník s dostatečnou odbornou způsobilostí v elektrotechnice. Přerušení se musí provést nástrojem s dostatečnou izolační schopností. Po přerušení je nutno zajistit volný živý konec zařízení proti samovolnému styku s přerušným vodičem.

Vyšetření zdravotního stavu

Hodnotíme stav základních životních funkcí:

Dýchání. Příznak: proudění vzduchu ústy, nosem, pohyb hrudníku. Hodnocení: dostatečné — nedostatečné — zástava dechu.

Krevní oběh. Příznak: tep na krční tepně. Hodnocení: hmatný — hmatný, ale slabý — nehmatný, zástava oběhu.

Stav vědomí. Příznak: reakce na oslovení, slovní kontakt. Hodnocení: uvědomuje si stav (vědomí zachováno) — zmatený (povrchní bezvědomí) — nereaguje (hluboké bezvědomí).

Pokud nejsou základní životní funkce ohroženy, teprve potom zachránce orientačně zjišťuje další tělesná poškození.

Zdravotnická první pomoc

Umělé dýchání z plic do plic a nepřímá **srdeční masáž** byly vyloženy jinde (tělesná výchova).

Odborná lékařská pomoc

Lékařskou pomoc lze přivolat buď užitím mobilního telefonu, nebo z kabinetu fyziky. Pro volání mimo interní síť gymnázia je nutno na telefonu nejprve vytočit znak 0 (nula).

MĚŘICÍ PŘÍSTROJE, CHYBY MĚŘENÍ

Elektrické napětí se měří **voltmetrem** připojeným paralelně ke zdroji nebo k prvku obvodu, na němž se napětí měří. Voltmetr má velký vnitřní odpor, řádově $k\Omega$ – $M\Omega$. Elektrický proud se měří **ampérmetrem** zapojeným do obvodu sériově. Vnitřní odpor ampérmetru je velmi malý; ampérmetr nesmí být nikdy připojen přímo ke zdroji. (Jako *nenásledovánímhodný* příklad uveďme případy nešťastníků, pokoušejících se změřit „proud v zásuvce“!)

Konstrukce měřicích přístrojů bude probrána v kapitole *Elektromagnetická indukce*; změny rozsahů přístrojů (předřadné odpory, bočníky) byly studovány v kapitole *Vedení elektrického proudu v kovech*. V tomto textu se proto zaměříme jen na *praktické* aspekty měření a na výpočty *chyb měření*.

Značky na přístrojích

Proud měřicího přístroje:

- stejnosměrný
- ~ střídavý
- ≈ stejnosměrný i střídavý

Poloha přístroje při měření:

- ⊥ svislá
- vodorovná
- ∠ šikmá

Zkušební napětí izolační je značeno pěticípou hvězdou. Prázdná hvězda značí zkušební napětí 500 V, je-li ve hvězdě uvedeno nějaké číslo, pak značí zkušební napětí v kilovoltech.

Číslo nad znakem – či ~ označuje **třídu přesnosti** (viz další kapitola).

Chyby při měření napětí a proudu

Při měření napětí a proudu (jako ostatně při jakémkoli měření) dochází k chybám. Připomeňme jejich klasifikaci:

Hrubé chyby vznikají omylem experimentátora, jeho nepozorností či přehlédnutím. Vznikají např. záměnou číslic v zápisu, opomenutím některého (podstatného) kroku měření. Tyto chyby podstatně zkreslují výsledek měření. Jsou snadno rozpoznatelné („jedna řádově odlišná hodnota v souboru naměřených, blízkých hodnot“). Hodnoty získané měřením, při němž došlo k hrubé chybě, je třeba ze souboru naměřených hodnot vyloučit.

Systematické (soustavné) chyby se při opakovaném měření (za stejných podmínek) projevují stále stejně. Patří mezi ně *chyby metody* vznikající nedokonalostí, neúplností či nevhodností použité metody měření (metoda např. vychází z teoretického předpokladu, který „v praxi“ není beze zbytku splněn), dále *chyby přístrojů* (nepřesnost

přístrojů způsobená např. nedokonalou stupnicí, změnou délky (rozměrů) měřidla způsobenou změnou teploty), a konečně také *chyby osobní*, tj. chyby pozorovatelovy, způsobené např. dobou nervové reakce při měření času stopkami. Systematické chyby lze eliminovat zavedením početních korekcí (počítá se pak i s dobou nervové reakce pozorovatele; při vážení se zohlední, že závaží a vážený předmět rozdílného objemu jsou na miskách nadlehčovány jinak velkou vztlakovou silou vzduchu apod.).

Náhodné (nahodilé) chyby jsou výsledkem vlivů nepravidelných dějů, jejichž účinky se náhodně skládají. Výsledky opakovaných měření (provedených stejnou metodou a stejným experimentátorem) se právě v důsledku náhodných chyb vždy poněkud liší. Spektrum příčin těchto chyb je velmi široké, jde o řadu nezávislých vlivů: náhlé změny tlaku, teploty, vlhkosti vzduchu v místě měření, nesprávné ustavení přístroje, změny teploty měřícího zařízení, změny fyzikálních polí v místě měření (např. změny geomagnetického pole). Na důsledky náhodných chyb je třeba brát při měření zřetel; měření se několikrát opakuje a získané výsledky se analyzují metodami matematické statistiky, tak lze stanovit nejpravděpodobnější hodnotu měřené veličiny.

Při měření napětí a proudu je **chyba metody** způsobena tím, že měřicí přístroje ovlivňují měřené hodnoty napětí a proudu, neboť v obvodu spotřebovávají určitý výkon. Např. při měření odporu je třeba s tímto faktem počítat a uvažovat i vnitřní odpory přístrojů, popř. je zapojit takovým způsobem, aby jejich vnitřní odpory bylo možno zanedbat.

Chyba přístroje je závislá na konstrukci a stavu přístroje. Je podmíněna řadou dílčích chyb: chybou vyvolanou třením, nesprávným vyvážením přístroje, zbytkovou deformací pružin apod. Tyto okolnosti jsou výrobcem hodnoceny a přístroj je zařazen do určité třídy přesnosti.

Náhodné chyby jsou kromě výše uvedených vlivů způsobeny ještě vlivy elektrických a magnetických polí. Měření elektromagnetickým přístrojem může být významně ovlivněno (a znehodnoceno), např. je-li přístroj umístěn blízko zdi, v níž vedou kabely elektrické rozvodné sítě protékané velkými proudy.

Výsledná chyba měření je dána „součtem“ chyb uvedených v předešlém textu. Často jsou některé z těchto chyb malé a lze je vůči jiným zanedbat. Tak např. výsledná krajní chyba měření κ' je obecně dána „součtem“ (krajní) chyby opakovaných měření κ (počítané ze směrodatné odchylky aritmetického průměru) a z chyby měřidla m :

$$\kappa' = \sqrt{\kappa^2 + m^2}.$$

V praxi elektrických měření často provádíme *pouze jedno* měření a chybu opakovaných měření neuvažujeme. Stanovení chyby měření se pak redukuje pouze na stanovení chyby měřidla; postup je odlišný u analogového (ručkového) a digitálního přístroje.

Analogový přístroj

Rozsah přístroje se nastavuje otočným knoflíkem popř. přepojováním vodičů do příslušných zdírek; maximální počet dílků stupnice je přitom konstantní. Proto je třeba vždy stanovit, jaké číselné hodnotě měřené veličiny odpovídá stanovený počet dílků. Výpočet je snadný: počet dílků vynásobíme **konstantou rozsahu** – číslem, které udává, kolik voltů (ampérů, ohmů) připadá při zvoleném rozsahu na jeden dílek stupnice. (Příklad: Rozsah 1,2 V, stupnice má 60 dílků, konstanta rozsahu je tedy 0,02 V/dílek.)

Třída přesnosti udává největší přípustnou chybu v procentech z měřeného rozsahu. **Absolutní krajní chyba přístroje** je proto dána vztahem

$$m = \text{třída přesnosti} \cdot \frac{\text{užitý měřicí rozsah}}{100}. \quad (1)$$

Je tedy vhodné volit měřicí rozsah tak, aby se ručka pohybovala v poslední třetině stupnice.

Příklad. Na miliampérmetru s třídou přesnosti 0,5 byla naměřena hodnota 45,5 mA na rozsahu 60 mA. Potom (podle vztahu (1)) je $m = 0,5 \cdot \frac{60}{100} \text{ mA} = 0,3 \text{ mA}$; neprovádíme-li opakované měření, je výsledná hodnota proudu $I = (45,5 \pm 0,3) \text{ mA}$. Při měření téhož proudu na rozsahu 240 mA dostáváme však výsledek $m = 1,2 \text{ mA}$, tedy $I = (46 \pm 1) \text{ mA}$.

Poznámka. Obvyklé univerzální přístroje mají třídu přesnosti 1,5; laboratorní přístroje třídu přesnosti 0,5–1; citlivé cejchovní přístroje 0,2.

Relativní krajní chyba přístroje se z absolutní chyby vypočítá obvyklým způsobem.

Digitální přístroj

Digitální multimetry mívají toto označení zdírek: COM (z angl. *common*, společný) se označuje společná zdířka (pro měření všech veličin), ostatní zdířky jsou označeny značkou jednotky příslušné veličiny (V, A, mA, Ω). Měřená veličina a rozsah se volí přepínačem, používá se označení DC (z angl. *direct current*) pro stejnosměrné proudy a napětí resp. AC (z angl. *alternating current*) pro střídavé proudy a napětí.

Postupujeme podobně jako při měření analogovým přístrojem: nejprve volíme nejvyšší rozsah, potom (podle výsledků měření) rozsahy nižší. Přepínání rozsahů na digitálním přístroji není samoúčelné – na nižších rozsazích měří přístroj přesněji.

Chyby měřidla jsou uvedeny v dokumentaci k digitálnímu měřicímu přístroji; jednotná norma (jako v případě analogových přístrojů) dosud neexistuje. Nejčastěji se však v dokumentaci k přístroji setkáme s jedním z těchto způsobů popisu chyby měřidla:

1. Zadání pomocí chyby měřené hodnoty a chyby rozsahu

V dokumentaci je uvedena pro každý rozsah **chyba měřené hodnoty** m_{r1} , vyjádřená v procentech, a **chyba použitého měřicího rozsahu** m_{r2} , opět vyjádřená v procentech (z krajní hodnoty rozsahu).¹⁾ Obě chyby se sčítají.

Ukažme na příkladu měření napětí. Je-li krajní hodnota užitého rozsahu U_{\max} a měřená hodnota U , absolutní chyba měřidla je dána vztahem:

$$m = \frac{m_{r1}}{100} U + \frac{m_{r2}}{100} U_{\max}. \quad (1)$$

Relativní chybu (v procentech) dostaneme, jestliže m dělíme naměřenou hodnotou U a vynásobíme 100:

$$m_r = m_{r1} + m_{r2} \frac{U_{\max}}{U}.$$

Příklad. Na voltmetru (chyba rozsahu: 0,1 %, chyba z měřené hodnoty 0,1 %) bylo naměřeno 2,568 V na rozsahu 4 V. Potom je absolutní chyba z rozsahu 0,004 V, absolutní chyba z naměřené hodnoty 0,003 V, celková absolutní chyba 0,007 V. Píšeme proto výsledek $U = (2,568 \pm 0,007) \text{ V}$. Relativní chybu si čtenář jistě vypočítá sám.

2. Zadání pomocí chyby měřené hodnoty a počtu kvantizačních kroků

V dokumentaci je – podobně jako v předešlém případě – uvedena chyba z měřené hodnoty m_{r1} v procentech a **počet kvantizačních kroků** N , který vyjadřuje počet jedniček nejnižšího místa

¹⁾ Tato chyba se někdy označuje zkratkou „f. s.“ (z angl. *full scale*).

číslicového zobrazovače na zvoleném rozsahu přístroje přepočítaný na správnou hodnotu měřené fyzikální veličiny, tzn. vynásobený příslušnou **váhou** kvantizačního kroku v_{kk} :

$$m = \frac{m_{r1}}{100}U + N \cdot v_{kk}. \quad (2)$$

Počet kvantizačních kroků bývá v dokumentaci označen slovem „digit“. (Anglický termín *digit* pro číslici se v této souvislosti nepřekládá, v elektrotechnické metrologické hantýrce se běžně mluví o „digitech“.)

Příklad. Na voltmetru naměříme hodnotu $U = 5$ V. Voltmetr ji přitom na displeji zobrazí ve tvaru 5.0000, tedy pěticiferně. V dokumentaci je uvedena chyba takto: $\pm 0,01$ % z měřené hodnoty ± 7 digit. Je tedy počet kvantizačních kroků $N = 7$. Poslední cifra displeje má význam desetitisíciny voltu, proto váha kvantizačního kroku $v_{kk} = 10^{-4}$ V. Podle vztahu (2) dostáváme chybu: $m = 5 \cdot 10^{-4}$ V + $7 \cdot 10^{-4}$ V = 0,0012 V. Píšeme $V = (5,000 \pm 0,001)$ V.

Ve fyzikální laboratoři Gymnázia F. X. Šaldy se nyní používají mj. digitální multimetry M 840 D. Chyby přístroje se v dokumentaci uvádějí druhým z uvedených způsobů, pomocí kvantizačních kroků.

Praktické rady při zapojování obvodů

- (1) Seznámíme se důkladně se všemi přístroji, které budeme používat, a s jejich značkami ve schématech obvodů.
- (2) Měřicí přístroje přepneme na nejvyšší rozsahy; reostaty nastavíme tak, aby odebíraný proud byl minimální; potenciometry a regulační transformátory nastavíme tak, aby odebírané napětí bylo nulové.
- (3) Zdroje, přístroje a další zařízení rozložíme po stole tak, aby jejich rozmístění odpovídalo schématu zapojení.
- (4) Nejdříve zapojíme do obvodu sériově všechny spotřebiče a ampérmetry. Postupujeme (ve stejnosměrném obvodu) od záporného pólu zdroje (zdroj zatím nezapojujeme!) ke kladnému, dbáme na správnou polaritu při zapojení přístrojů.
- (5) Paralelně ke zdrojům, rezistorům, diodám apod. připojíme voltmetr.
- (6) **Zapojený obvod necháme zkontrolovat učitelem!**
- (7) Připojíme zdroj, zapneme spínač.