

Vážení zákazníci,

dovolujeme si Vás upozornit, že na tuto ukázkou knihy se vztahují autorská práva, tzv. copyright.

To znamená, že ukáзка má sloužit výhradně pro osobní potřebu potenciálního kupujícího (aby čtenář viděl, jakým způsobem je titul zpracován a mohl se také podle tohoto, jako jednoho z parametrů, rozhodnout, zda titul koupí či ne).

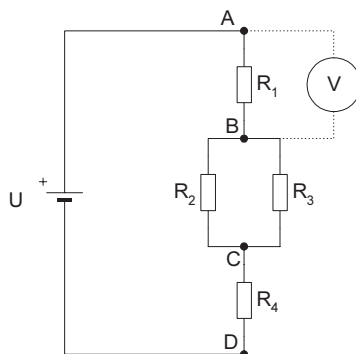
Z toho vyplývá, že není dovoleno tuto ukázkou jakýmkoliv způsobem dále šířit, veřejně či neveřejně např. umístováním na datová média, na jiné internetové stránky (ani prostřednictvím odkazů) apod.

redakce nakladatelství BEN – technická literatura
redakce@ben.cz



5. MĚŘENÍ ELEKTRICKÉHO NAPĚTÍ

Přístroje, které slouží k měření elektrického napětí se nazývají *voltmetry*. Připojujeme je vždy *paralelně* k prvku obvodu, na němž chceme velikost napětí zjistit. Chceme-li např. zjistit napětí na rezistoru R_1 v obvodu na obr. 5.1, zapojíme voltmetr mezi body A a B. Zajímá-li nás napětí na paralelní kombinaci rezistorů R_2 a R_3 , připojíme přístroj mezi body B a C.



Obr. 5.1
Paralelní připojení voltmetru do měřeného obvodu

Voltmetr zapojený do měřicího obvodu má mít co nejmenší vliv na velikost proudu, který obvodem protéká, musí tedy mít co největší vnitřní odpor.

Přetížení voltmetru nastává, připojíme-li přístroj na vyšší napětí, než je jeho zvolený měřicí rozsah. Na přetížení jsou velmi citlivé zejména magnetoelektrické a elektrodynamické přístroje, protože jejich měřicí cívky jsou vinuté z tenkého vodiče a přetížením by mohlo dojít vlivem velkého proudu k tepelnému přetížení (poškození či úplnému spálení izolace) cívek nebo přívodních pružin. Feromagnetické přístroje jsou vůči přetížení odolnější, protože jejich měřicí cívka je pevná a proto může být bohatěji dimenzovaná.

Neznáme-li napětí v měřeném obvodu a ani ho nelze přibližně odhadnout, musíme na voltmetru nastavit jeho *nejvyšší* rozsah a teprve po připojení přístroje do obvodu zvolit případně rozsah nižší. Tím se vyhneme přetížení přístroje, ke kterému dochází zvláště často ve školních laboratořích.

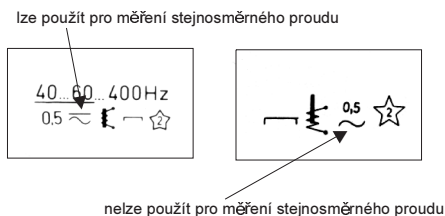
5.1 Měření stejnosměrného napětí

Pro měření stejnosměrného napětí používáme nejčastěji *magnetoelektrické* voltmetry, které lze použít pro měření stejnosměrného napětí v rozmezí od několika set mV do přibližně 1000 V. Magnetoelektrické voltmetry se vyznačují vysokou přesností (běžně 0,5) a malou spotřebou. U běžných magnetoelektrických voltmetrů bývá vnitřní odpor $r_i = 5000 \Omega/V$, konstruují se však i přístroje s extrémně malou spotřebou, jejich vnitřní odpor bývá až $r_i = 100\,000 \Omega/V$. Má-li však přístroj příliš velký vnitřní odpor, protéká měřicí cívkou jen velmi malý proud, přístroj má malý pohybový moment a klesá tím i jeho přesnost. Tyto přístroje mívají třídu přesnosti nejvýše 1.

Další měřicí soustava s velmi vysokým vnitřním odporem je soustava elektrostatická (její vnitřní odpor je teoreticky nekonečný), ale elektrostatické voltmetry se v praxi používají pouze v oblasti vysokého napětí. Pro měření běžných napětí o velikosti desítek až stovek voltů se nepoužívají, protože mají velmi malý pohybový moment.

Pro měření stejnosměrného napětí se dají použít i moderní přístroje feromagnetické, starší, levnější provedení přístrojů této soustavy nelze pro měření stejnosměrných veličin z důvodů příliš velké chyby použít. O vhodnosti použití feromagnetického voltmetru pro měření stejnosměrného napětí je nejlépe přesvědčit se přímo na číselníku přístroje. Na obr. 5.2 je porovnání částí číselníků dvou feromagnetických voltmetrů, z nichž první pro měření stejnosměrného napětí může být použit, druhý nikoliv.

Obr. 5.2
Význam značek
na výchylkových
voltmetrech



Elektrodynamické voltmetry umožňují měření stejnosměrného napětí, ale dnes se tyto přístroje již téměř nepoužívají a pokud ano, tak pouze v přesném laboratorním provedení, se kterým se technik v praxi nesetká.

Pro měření velmi malých napětí (řádově nV až μV) slouží přístroje zvané *galvanometry*. S jejich provedením a použitím pro měření napětí se seznámíme později.

5.2 Měření střídavých napětí

Velikost střídavých periodických napětí se s časem mění a proto tato napětí charakterizujeme pomocí jejich *efektivní*, *střední* nebo *maximální* hodnoty, které jsou u ustáleného střídavého napětí konstantní.

Z praktických důvodů je pro nás nejzajímavější efektivní hodnota napětí. Z analogových měřicích přístrojů ukazují velikost efektivní hodnoty napětí feromagnetické přístroje, které se však vyznačují velkou spotřebou a kmitočtovou závislostí. Proto se obvykle užívají pouze pro měření napětí technického kmitočtu. Nejmenší proveditelný rozsah je asi 6 V, běžně se však používají pro měření napětí v rozmezí 65 až 500 V. Běžné feromagnetické voltmetry mívají třídu přesnosti 1 až 1,5. Velkou výhodou těchto přístrojů je to, že udávají i efektivní hodnotu nesinusových střídavých napětí. Tutéž vlastnost mají i voltmetry elektrostatické, ty se však v současné době pro svoji vysokou cenu již téměř nevyrábějí. Dříve vyráběné elektrostatické voltmetry mívaly vysokou přesnost (třída přesnosti 0,1 až 0,2), proto se používaly pouze pro přesná měření v laboratořích a zkušebnách.

Pro přímé měření vysokých napětí ($U > 1 \text{ kV}$) se používají elektrostatické voltmetry. Jejich velkou výhodou je nezávislost výchylky na kmitočtu, proto je lze použít i v oblastech vysokého kmitočtu, např. při dielektrických ohřevech (sušení dřeva, svařování fólií, výroba neoprénových obleků, ...). Elektrostatické voltmetry udávají efektivní hodnotu napětí.

Jak již víme z kapitoly 4.13.2, lze pro měření střídavých napětí použít i magnetoelektrické voltmetry s usměrňovačem. Hlavní výhodou voltmetrů této soustavy (schéma vnitřního zapojení je na obr. 4.25) je malá spotřeba, použitelnost do 20 kHz a možnost měření i střídavých napětí malých hodnot. Hlavní a zásadní nevýhodou těchto voltmetrů je to, že neměří efektivní, ale střední hodnotu napětí. Stupnice je sice přepočítána a cejchována v efektivních hodnotách, platí ovšem pouze pro sinusový průběh napětí. Nejsme-li si jisti, že napětí na zátěži je sinusové (v současné době se díky různým polovodičovým zdrojům či řízení rozličných zařízení výkonovými elektronickými prvky vyskytuje stále řídkěji), je nutno použít voltmetr feromagnetický, protože jinak se při měření dopustíme chyby, která bude tím větší, čím více se bude průběh měřeného napětí odchylovat od sinusovky. Síťové napětí kopíruje sinusovku celkem věrně a tak lze magnetoelektrické voltmetry s usměrňovačem bez problémů použít např. v oblasti silnoproudé elektrotechniky (pro měření na motorech a transformátorech). Třída přesnosti těchto voltmetrů obvykle nebývá větší než 1,5.

5.3 Změna rozsahu voltmetru

Pro běžná praktická měření se nehodí jednorozsahové přístroje, proto se výrobci snaží počet rozsahů měřících přístrojů zvýšit. Zvýšit rozsah voltmetru můžeme pomocí předřadného rezistoru (předřadníku), měřícího transformátoru napětí, předřadného kondenzátoru a odporového či kondenzátorového děliče napětí. Poslední tři způsoby lze použít pouze u elektrostatických voltmetrů.

5.3.1 Předřadník

Změna rozsahu voltmetru pomocí předřadníku je nejčastější metodou, jak zvýšit měřící rozsah ústrojí. Při měření napětí ve stejnosměrných obvodech je to jediný možný způsob, jak rozsah voltmetru zvýšit. Předřadné rezistory se používají u přístrojů všech soustav s výjimkou soustavy elektrostatické, kde je místo rezistoru třeba měřicímu ústrojí předřadit kondenzátor.

Pro maximální napětí, které může měřit magnetoelektrické měřící ústrojí platí:

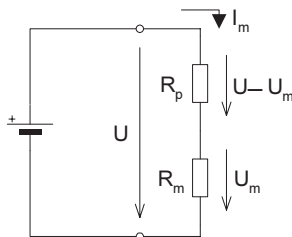
$$U_m = R_m I_m,$$

kde R_m – odpor měřící cívky,

I_m – maximální proud, který může protékat měřící cívkou.

Protože měřící cívka je navinuta z tenkého vodiče, je obvykle maximální dovolený proud, který určuje základní rozsah a použitelnost magnetoelektrického přístroje velmi malý (zpravidla 100 μ A až 5 mA). Odpor měřící cívky bývá několik set ohmů, proto lze samotným magnetoelektrickým přístrojem měřit pouze malá napětí (nejvýše jednotky voltů). Proto, abychom zvýšili rozsah magnetoelektrického voltmetru, zařazujeme do série s měřící cívkou předřadný rezistor (předřadník) R_p . Na obr. 5.3 je idealizované schéma magnetoelektrického voltmetru s předřadníkem, rezistor R_m představuje odpor otočné cívky. Protéká-li obvodem na obr. 92 dovolený proud I_m , vznikne na předřadníku úbytek napětí, jehož velikost je dána rozdílem celkového napětí obvodu a úbytkem napětí na měřící cívce.

Obr. 5.3
Idealizované schéma
magnetoelektrického
voltmetru s předřadníkem



Tedy

$$U_p = R_p I_m = U - U_m.$$

Pro maximální dovolený proud tekoucí obvodem tedy platí

$$I_m = \frac{U - U_m}{R_p} = \frac{U_m}{R_m} \Rightarrow \frac{R_p}{R_m} = \frac{U - U_m}{U_m}.$$

Z toho lze vyjádřit odpor předřadníku:

$$R_p = R_m \left(\frac{U}{U_m} - 1 \right).$$

Zavedeme si veličinu *poměrné zvětšení rozsahu* (poměr předřadníku)

$$n = \frac{U}{U_m}.$$

Velikost poměru předřadníku **n** nám udává, kolikrát se zvětší napětový rozsah voltmetru.

Pro odpor předřadníku potom platí vztah:

$$R_p = R_m(n - 1).$$

Příklad 13

Malý, panelový magnetoelektrický přístroj má na číselníku uveden dovolený proud měřicího ústrojí 1 mA. Přesným číslicovým ohmmetrem jsme zjistili, že jeho měřicí cívka má odpor 500 Ω. Určete, jak velký odpor musíme přístroji předřadit, abychom jím mohli měřit napětí do 15 V.

Velikost základního rozsahu přístroje

$$U_m = R_m I_m = 500 \cdot 10^{-3} = \underline{\underline{0,5 \text{ V}}}$$

Poměr předřadníku

$$n = \frac{U}{U_m} = \frac{15}{0,5} = \underline{\underline{30}}.$$

Velikost odporu předřadníku

$$R_p = R_m (n - 1) = 500(30 - 1) = 14500 \Omega = \underline{\underline{14,5 \text{ k}\Omega}}.$$

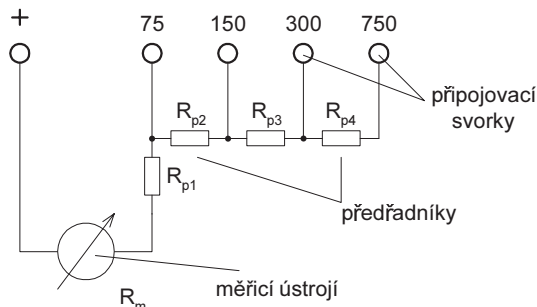
Pokud s měřicím přístrojem zařadíme do série rezistor s odporem 14,5 k Ω , bude s ním možné měřit napětí do 15 V a stupnici můžeme pro tento rozsah přímo ocejchovat.

Předřadníky určené k zabudování do přístroje se zhotovují ve tvaru malých cíveček. Navíjejí se z manganinového drátu, aby se změnami teploty nedocházelo ke změnám jejich odporu (manganin má velmi malý teplotní součinitel odporu a pro teplotní rozmezí přicházející do úvahy při běžných měřeních lze změnu odporu vlivem teploty zanedbat). Předřadníky určené pro voltmetry na střídavý proud se musí vinout bezindukčně (používá se bifilární vinutí – viz obr. 2.8).

V měřicím přístroji musí být předřadníky uloženy odděleně od měřicího ústrojí, protože měřicí cívka je vinutá z měděného vodiče a při jejím zahřátí ztrátovým teplem předřadníků by mohlo docházet k chybným měřením, zejména při měření napětí do 10 V. Předřadníky se proto vkládají do přední strany přístroje a v čelním krytu jsou vyvrátány větrací otvory. Do vlastního přístroje se umísťují předřadníky pro rozsahy asi do 750 V, pro měření vyšších napětí je třeba použít externích předřadníků.

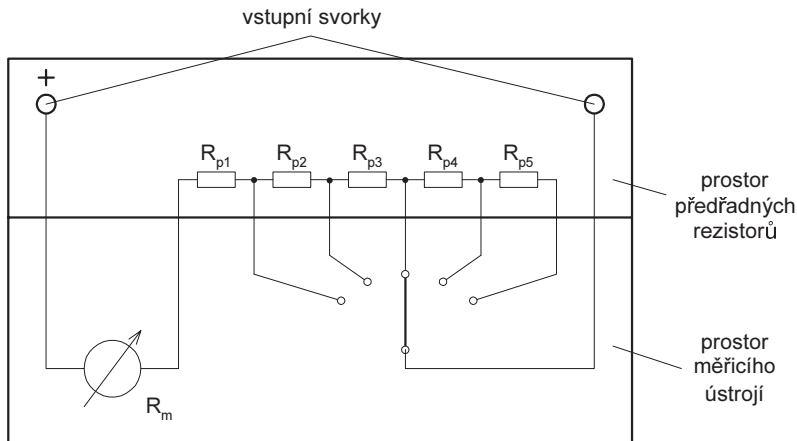
Přepínání rozsahů lze provádět přímo na vstupních svorkách, viz obr. 5.4. Pro n rozsahů má potom přístroj $n + 1$ vstupních svorek.

Obr. 5.4
Přepínání rozsahu voltmetru
na vstupních svorkách

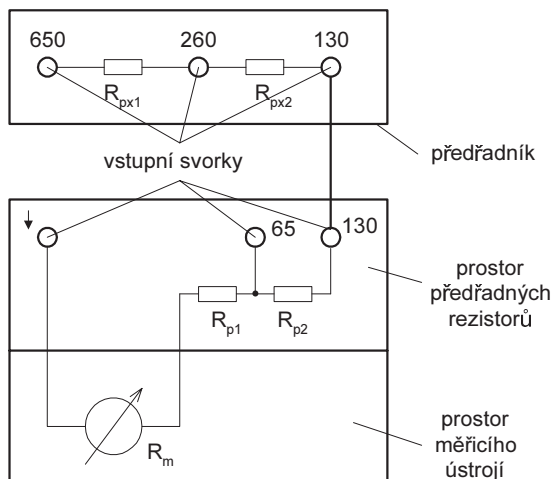


Má-li mít voltmetr více rozsahů než čtyři, nebylo by možné na jeho kryt tolik svorek přehledně umístit a proto se pro změnu rozsahu používají otočné přepínače. Principiální schéma zapojení voltmetru s otočným přepínačem je na obr. 5.5. Změna rozsahu je snadná a bezpečná, protože je možné měnit rozsahy pod napětím a není třeba manipulovat s přívodními vodiči ke svorkám přístroje.

Na obr. 5.6 je znázorněno připojení odděleného, externího předřadníku k voltmetru. Tyto předřadníky se používají zpravidla pro měření vyšších střídavých napětí do cca 750 V. Pro měření vyšších napětí je vhodnější použít měřicí transformátor napětí. Oddělené předřadníky se používají nejčastěji ve spojení s fero-magnetickými voltmetry, které mají malý vnitřní odpor, jejich vinutím tedy protéká relativně velký proud. Pokud by byl



Obr. 5.5
Přepínání rozsahu
voltmetru pomocí
otočného přepínače



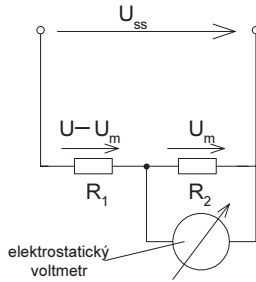
Obr. 5.6
Připojení odděleného
předřadníku k voltmetru

v takovém přístroji vestavěn větší počet předřadníků, vyvíjeli by při měření velké množství tepla, které by mohlo ohrozit přesnost měření (ohřívají se direktivní pružinky). Proto se feromagnetické voltmetry vyrábějí obvykle pouze jako dvourozsaňové.

5.3.2 Odporový dělič

Odporový dělič napětí (obr. 5.7) se používá pro změnu rozsahu při měření stejnosměrného napětí elektrostatickým voltmetrem. Protože elektrostatický voltmetr má velký vnitřní odpor, je dělič prakticky nezatížen a pro napětí na rezistoru R_2 (toto napětí měří voltmetr) můžeme psát

$$\frac{U_m}{R_2} = \frac{U - U_m}{R_1} \Rightarrow R_1 = R_2 \left(\frac{U}{U_m - 1} \right).$$



Obr. 5.7
Odporový dělič

Zavedeme-li si poměrné zvětšení rozsahu

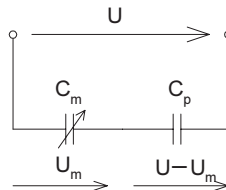
$$n = \frac{U}{U_m},$$

dostaneme pro poměr velikosti odporů děliče vztah

$$R_1 = R_2(n - 1).$$

5.3.3 Předřadný kondenzátor

Tento způsob zvětšení rozsahu voltmetru se používá také pouze u elektrostatických voltmetrů, schéma zapojení kondenzátoru do obvodu je na obr. 5.8.



Obr. 5.8
Připojení sériového
kondenzátoru do obvodu
elektrostatického voltmetru

Kapacita měřicího ústrojí C_m je ve schématu zakreslena jako proměnná, protože při různých výchylkách je překrytí pevných a pohyblivých desek měřicího ústrojí jiné, tedy i vnitřní kapacita přístroje se mění.

Má-li ústrojí při plné výchylce kapacitu C_m , můžeme psát (oba kondenzátory jsou v sérii, na jejich deskách je tedy stejný náboj):

$$C_p(U - U_m) = C_m U_m,$$

$$C_p = C_m \frac{U_m}{U - U_m} = C_m \frac{1}{\frac{U}{U_m} - 1}.$$

Zavedeme si poměrné zvětšení rozsahu

$$n = \frac{U}{U_m}$$

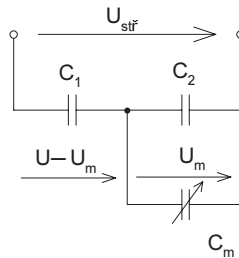
Pro velikost předřadného kondenzátoru tedy platí

$$C_p = \frac{C_m}{n - 1}$$

Předřadné kondenzátory se používají pouze zřídka, protože změna kapacity C_m v závislosti na výchylce způsobuje při zařazení předřadného kondenzátoru C_p změnu průběhu stupnice. Na číselníku přístroje je tedy potom více stupnic – jedna základní a další pro jednotlivé předřadné kondenzátory.

5.3.4 Kapacitní dělič

Pro měření vysokých stejnosměrných i střídavých napětí je vhodnější ke změně rozsahu místo předřadného kondenzátoru použít kapacitní dělič napětí.



Obr. 5.9
Kapacitní dělič pro
elektrostatický voltmetr

Schéma zapojení je na obr. 5.9. Pro velikost poměru kapacit bychom si mohli odvodit vztah:

$$C_1 = \frac{n(C_2 + C_m)}{1 - n}$$

5.3.5 Měřicí transformátor napětí

Měřicí transformátor napětí je přístroj, který slouží ke změně rozsahu střídavých voltmetrů, případně ke galvanickému oddělení obvodů měřících přístrojů od obvodů vysokého napětí. Používají se k měření napětí vyšších než 1 kV. Do měřícího obvodu se zapojuje jeho primární vinutí jako voltmetr a na jeho sekundární svorky se připojují měřící přístroje paralelně (např. voltmetr, napěťová cívka wattmetru, kmitoměr, ...) – viz obr. 5.10.

Jedna ze sekundárních svorek měřícího transformátoru napětí se musí uzemnit, protože měřené vysoké napětí by při průrazu izolace transformátoru proniklo na sekundární stranu a mohlo ohrozit obsluhu.