

# **Skripta**

**Školní rok : 2005/ 2006**

**Modul:**

**Elektrické měření  
skripta 3  
MĚŘENÍ VELIČIN**

**Obor:**

**26-46-L/001 - Mechanik elektronik**  
-----

**26-51 H/003 – Elektrikář**  
-----

**26-75-4 – Elektrotechnika**

**Ročník:**

**2. ročník - Mechanik elektronik**  
-----

**3. ročník - Elektrikář silnoprúd**  
-----

**2. ročník - Elektrotechnika**

**Zaměření:**

**Silnoprúd**  
-----

**Elektrotechnika**

## 1. MĚŘICÍ METODY ELEKTRICKÝCH VELIČIN

### 1.1. Základní měřicí metody elektrických veličin

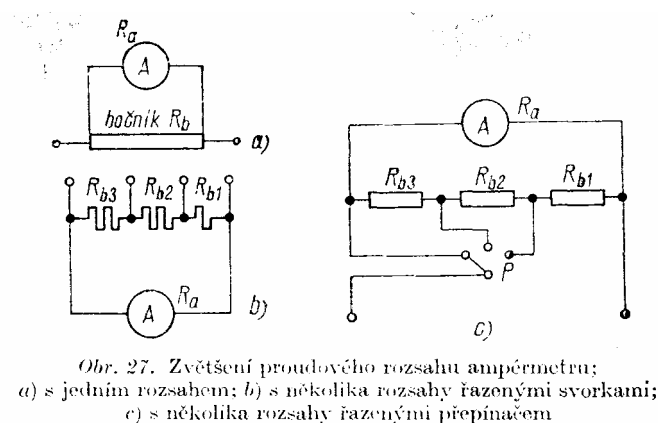
Elektrické veličiny měříme *přímými* nebo *nepřímými metodami*, buď měřicími přístroji, měřicími můstky, nebo měřicími soupravami. Proto při probírání metod měření jednotlivých veličin také současně probereme příslušné měřicí přístroje.

## 2. Měření elektrického proudu a napětí

Elektrické proudy a elektrická napětí měříme většinou ručkovými měřicími přístroji. Protože činnost měřicích přístrojů u těchto veličin je podstatě stejná a často se konstruují jako univerzální pro společné použití k měření proudu i napětí, popíšeme měření obou veličin společně. Dalším důvodem k tomu jsou buď stejné, nebo aspoň podobné zásady pro tato měření.

### 2.1. Ampérmetry a voltmetry

Přístroje k měření elektrického proudu (*ampérmetry*) mohou mít měřicí ústrojí všech soustav, které jsme probrali, kromě soustav elektrostatické a rezonanční. Ampérmetr se zapojuje do proudového obvodu tak, aby celý proud procházel přístrojem. Protože zapojením měřicího přístroje se mají poměry v měřeném obvodu změnit co nejméně, má mít ampérmetr co nejmenší vlastní odpor, aby na něm byl nepatrný úbytek napětí. Pro ampérmetry k měření stejnosměrných proudů vyhovuje tedy nejlépe soustava *magnetoelektrická* a to i pro měření malých střídavých proudů sinusového průběhu doplníme ji ovšem usměrňovačem. Doplní-li se termoelektrickým článkem, hodí se i pro nesinusové proudy.

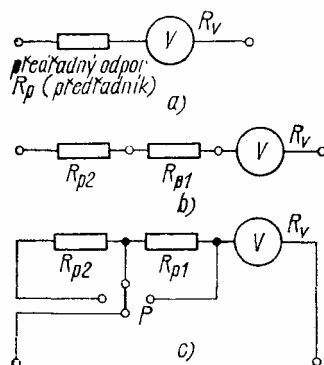


Ampérmetr má nejmenší proudový rozsah, je-li do proudového obvodu zapojeno jen měřicí ústrojí. Jelikož otočná cívka ústrojí je vinuta drátem nepatrného průřezu, jsou to proudy asi 1 mA, mohou to však být i mnohem menší (potom se přístroj nazývá *miliampérmetr*, *mikroampérmetr*). K cívkě ústrojí se (kromě odporů teplotní kompenzace) pro měření větších proudů připojuje *paralelně odpor, zvaný bočník* (obr. 27a).

Ampérmetry se konstruují buď pro jeden proudový rozsah, nebo mají proudových rozsahů několik a zapojují se buď pomocí svorek (obr. 27b), nebo *spolehlivým přepínačem* s nepatrným přechodovým odporem (obr. 27c). Chceme-li měřit velké střídavé proudy nízkých kmitočtů, zvětšíme rozsah *měřicími transformátory proudu*.

Měřicí přístroj pro měření elektrického napětí (*voltmetr*) může mít kteroukoli z probraných soustav *kromě soustav rezonanční*. Voltmetr zapojujeme vždy *paralelně*, a to buď ke zdroji (napětí tam vzniká), nebo ke spotřebiči (napětí se tam spotřebovává). Proud procházející voltmetrem má vliv na podmínky měření, proto má být co nejmenší. Chceme-li toho dosáhnout musí mít voltmetr *co největší vlastní odpor*, tedy právě *naopak než u ampérmetru*. Voltmetry s odporem 1 000 V/V, používané v praxi, zcela vyhovují. Pro měření stejnosměrných napětí mají soustavu magnetoelektrickou, měření střídavých sinusových napětí doplněnou usměrňovačem.

Nejmenší napěťový rozsah má voltmetr při přímém zapojení měřicího ústrojí (milivoltmetr). *Při měření větších napětí zařadíme do série s ústrojím předřadník* (schéma

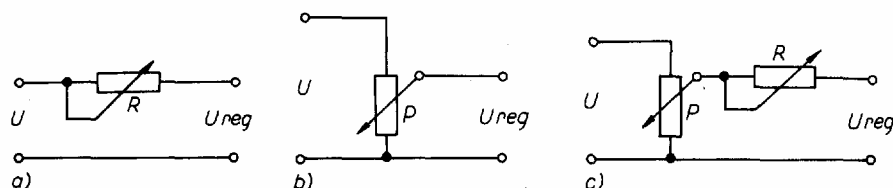


na obr. 28a). Voltmetry se konstruují buď s jedním rozsahem, nebo mnohou mít několik rozsahů, které se pak řadí tlačítkem, přepojováním pomocí svorek (obr. 28b), nebo přepínačem (obr. 28c). V dílenské nebo opravářské praxi se nejčastěji používají přístroje, které mohou měřit jak elektrický proud, tak i napětí.

## 3. MĚŘICÍ METODY ELEKTRICKÝCH VELIČIN

Při elektrických měřeních je třeba velmi často měnit velikost napětí nebo proudu, a to buď plynule anebo po určitých, předem zvolených hodnotách.

Stejnoseměrné i střídavé napětí u spotřebičů s větším odběrem proudu řídíme měnitelným odporem zapojeným do série se spotřebičem (obr. 354a). U spotřebičů s malým odběrem proudu zapojujeme měnitelný odpor podle obr. 354b jako potenciometr. Na obr. 354c je kombinace obou předešlých způsobů. Hrubá regulace se provádí potenciometrem, jemná odporem. Jemnost řízení závisí na správné volbě velikosti obou odporů.



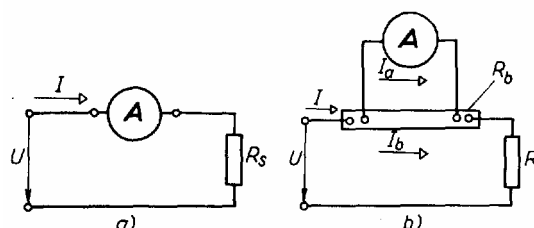
Střídavá napětí a proudy můžeme ještě regulovat transformátory, což je hospodárnější než regulace odpory.

Při měření stejnosměrným proudem musíme dbát na polaritu, tj. kladný pól zdroje spojíme s kladnou svorkou přístroje, záporný pól se zápornou svorkou. U přístrojů s třemi svorkami je střední svorka kladná. U přístrojů se dvěma svorkami bývá pravá svorka kladná.

### 3.1. Měření elektrického proudu

Proud v obvodu měříme ampérmetrem (obr. 355), miliampérmetrem, mikroampérmetrem nebo galvanometrem. Měřicí rozsahy ampérmetrů pro přímé měření jsou od 0,5 do 100 A, výjimečně do 600 A, miliampérmetrů do 500 mA a mikroampérmetrů do 250  $\mu$ A. Pro měření stejnosměrných proudů se hodí magnetoelektrické ampérmetry. Těmito ampérmetry lze měřit i střídavé proudy sinusového průběhu po doplnění kuproxidovým usměrňovačem, který bývá vestavěn do přístroje. Jsou-li doplněny tepelným článkem, možno jimi měřit střídavé proudy nesinusového průběhu.

Obr. 356. Schéma zapojení ampérmetru: a) přímo do obvodu; b) pomocí bočníku



Ampérmetr zapojujeme do obvodu do série se spotřebičem elektrické energie, aby jím procházel celý měřený proud (obr. 356a). Jestliže měřicí rozsah ampérmetru nestačí k změření proudu, zvětšíme jej bočníkem, který zapojujeme do série se spotřebičem a paralelně k ampérmetru (obr. 356b). Bočníky jsou přesné odpory zhotovené z manganinových drátů nebo plechů, zapájené stříbrem v měděných patkách. Jsou do 6000 A, výjimečně i pro větší rozsahy. Jsou opatřeny jednak proudovými svorkami pro zapojení obvodu, jednak napětíovými svorkami pro připojení ampérmetru. Svorky se při zapojování nesmějí zaměnit, poněvadž by to ovlivnilo přesnost měření.

Připojíme-li ampérmetr o odporu  $R_a$  paralelně k bočníku o odporu  $R_b$ , rozdělí se měřený proud  $I$  mezi ně nepřímo úměrně k jejich odporům

$$\frac{I_b}{I_a} = \frac{R_a}{R_b}$$

Označíme-li číslo, kolikrát chceme zvětšit rozsah ampérmetru, písmenem  $n$ , prochází bočníkem proud  $(n - 1)$  krát větší než ampérmetrem a bočník musí mít odpor  $(n - 1)$  krát menší, než je odpor ampérmetru. Odpor bočníku

$$R_b = \frac{R_a}{n - 1}$$

Velké střídavé proudy měříme pomocí měřicích transformátorů proudu. Jejich převod je

$$p = \frac{I_1}{5}$$

kde  $I_1$  je proud v primárním vinutí.

Primární vinutí transformátoru se zapojuje do série se spotřebičem a na svorky sekundárního vinutí se připojí ampérmetr do 5 A (obr. 163). Jsou-li příводы k ampérmetru dlouhé, používáme ampérmetr s rozsahem do 1 A. Primární svorky měřicího transformátoru jsou označeny písmeny K - L, sekundární svorky písmeny k - l. Protože má ampérmetr velmi malý odpor, je výstupní strana měřicího transformátoru spojena při měření nakrátko; proto se nesmí při měření ampérmetr odpojit až tehdy, když se sekundární vinutí spojí se spínačem nakrátko.

Velikost měřeného proudu v obvodu se rovná primárnímu proudu měřicího transformátoru  $I$ , takže

$$I_1 = p I_2$$

kde  $I_2$  je údaj ampérmetru v ampérech.

Na sekundární svorky můžeme připojit i ampérmetr o větším rozsahu než 5 A, ale potom musíme určit převodovou konstantu transformátoru, jak je dále uvedeno.

Rozváděčové ampérmetry určené pro připojení přes měřicí transformátor proudu mají už stupnici cejchovanou pro hodnotu primárního (měřeného) proudu. Musí však být připojeny přes transformátor předepsaného převodu.

K rychlému měření střídavého proudu ve vedení slouží klešťový ampérmetr (obr. 357). Při otevřených čelistích nasuneme kleště na vodič a čelisti uzavřeme. Na stupnici čteme přímo velikost měřeného proudu, neboť kleště jsou v podstatě měřicím transformátorem proudu.

Primární vinutí transformátoru tvoří vodič, kterým prochází měřený proud. Kolem vodiče je střídavé magnetické pole, které se uzavírá přes sevřené čelisti tvořící jádro měřicího transformátoru se sekundárním vinutím. Výhodou klešťového ampérmetru je to, že umožňuje měřit proud bez přerušení obvodu za provozu a i v nepřístupných místech, neboť přístroj je opatřen aretační ručičkou, takže její výchylku lze v libovolném místě stupnice zaaretovat, tj. nehybně zajistit. Přístroj je vhodný zejména pro elektromontéry, údržbáře a opraváře. Měřený rozsah proudu je do 10-30-100-300-1000-3000A. Na všech rozsazích kromě rozsahu do 3000 A lze měřit trvale.

**Příklad 1.** Určete proud procházející jednou fází trojfázové sítě, jestliže je na měřicí transformátor s primárním vinutím do 500 A a sekundárním vinutím do 5 A připojen:

a) ampérmetr do 5 A a ukazuje proud 4,2 A,

b) ampérmetr do 15 A, který má stupnici rozdělenou na 100 dílků, a ukazuje výchylku 28,1 dílku.

Při měření ampérmetrem do 5 A je převod transformátoru

$$p = \frac{I_1}{I_2} = \frac{500}{5} = 100$$

Velikost proudu v měřené fázi

$$I_1 = pI_2 = 100 \cdot 4,2 = 420 \text{ A}$$

Při měření ampérmetrem do 15 A je převod transformátoru stejný  $p = 100$ .

Konstanta ampérmetru

$$k_A = \frac{15}{100} = 0,15 \text{ A/dílek}$$

Převodní konstanta transformátoru

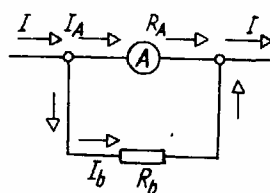
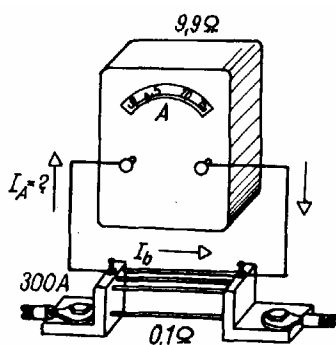
$$k_T = pk_A = 100 \cdot 0,15 = 15 \text{ A/dílek}$$

Velikost proudu v měřené fázi

$$I_1 = k_T I_2 = 15 \cdot 28,1 = 421,5 \text{ A}$$

Rozdíl v měření 1,5 A byl způsoben tím, že jsme u ampérmetru s rozsahem 15 A měřili v první třetině stupnice.

**Příklad 2.** Ampérmetr podle obr. 7.3 má vnitřní odpor  $R_A = 9,9 \Omega$  a jeho bočník má odpor  $0,1 \Omega$ . V jakém poměru se rozdělí měřený proud 300 A v přístroji s bočníkem?



Úlohu vyřešíme pomocí I. Kirchhoffova zákona.

$$I = I_A + I_b$$

$$I_A : I_b = R_b : R_A$$

Proud ve vedení je

$$300 \text{ A} = I_A + I_b$$

$$I_A : I_b = 0,1 : 9,9$$

Proud 300 A se rozdělí v

převráceném poměru  $300 \text{ A} = I_A + I_b$  odporů.

$$I_A : I_b = 1 : 99$$

$$I_A = \frac{1}{99} I_b$$

$$300 \text{ A} = \frac{1}{99} I_b + I_b$$

$$I_b \left( 1 + \frac{1}{99} \right) = 300 \text{ A}$$

$$I_b = \left( \frac{300}{100} \cdot 99 \right) \text{ A}$$

Z druhé rovnice vypočteme proud  $I_A$  a dosadíme do první rovnice.

Proud procházející bočníkem je

$$I_b = 297 \text{ A}$$

Proud procházející měřicím přístrojem je

$$I_A = I - I_b = 300 \text{ A} - 297 \text{ A} = 3 \text{ A}$$

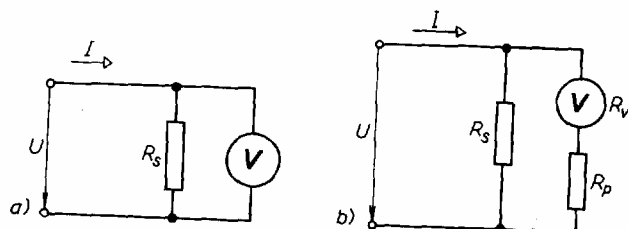
Z celkového měřeného proudu projde ampérmetrem proud  $I_A = 3 \text{ A}$  a bočníkem projde proud  $I_b = 297 \text{ A}$ . Ampérmetr bude mít stupnici na 300 A, i když výchylka bude způsobena proudem o velikosti jen 3 A.

Měřený proud 300 A se rozdělí v nepřímém poměru odporů: kde je větší odpor, tam bude procházet menší proud.

Protože odpor ampérmetru je 99krát větší než odpor bočníku, bude bočníkem procházet 99krát větší proud ( $297 : 3 = 99$ ) než cívkou přístroje.

## 3.2. Měření elektrického napětí

Elektrické napětí měříme voltmetrem nebo milivoltmetrem, který připojujeme paralelně ke zdroji nebo ke spotřebiči, na nichž chceme napětí měřit (obr. 359a). Pro měření střídavého napětí musí být magnetoelektrický voltmetr doplněn usměrňovačem. Voltmetry mají buď jeden nebo několik rozsahů, které se zapojují přepínačem na přístroji. Měřicí rozsahy pro přímé zapojení mají rozsah od 6 V až do 600 V



Obr. 359. Schéma zapojení voltmetru: a) přímo; b) pomocí předřadného odporu

Pro měření vyšších stejnosměrných napětí zvětšíme rozsah voltmetru předřadníkem, tj. odporem, který zařadíme do série s

voltmetrem (obr. 359b). Předřadník je buď vestavěn do voltmetru a do obvodu se zařazuje přepínačem na přístroji, nebo tvoří samostatný přístroj, jenž se s voltmetrem spojuje pomocí propojovacích vodičů a svorek. Napětí na voltmetru  $U_v$  a napětí na předřadném odporu  $U_p$  jsou v přímém poměru odporů voltmetru  $R_v$  a předřadného odporu  $R_p$ .

$$\frac{U_v}{U_p} = \frac{R_v}{R_p}$$

Potřebujeme-li rozsah voltmetru zvětšit  $n$ -krát, musí mít předřadník odpor  $(n - 1)$ krát větší, než je odpor voltmetru.

$$R_p = (n - 1) R_v$$

Čím větší je vnitřní odpor voltmetru, tím je kvalitnější. Pro měření v praxi mívá voltmetr odpor 1000  $\Omega/V$ .

Měřicí rozsah voltmetru pro měření střídavých napětí zvětšujeme měřicím transformátorem napětí. Primární vinutí připojíme paralelně k spotřebiči nebo k zdroji napětí a na svorky sekundárního vinutí připojíme voltmetr do 100 V. Primární strana má svorky označené M - N, sekundární m-n (obr. 163).

Převod měřicího transformátoru napětí

$$P_v = \frac{U_1}{100}$$

kde  $U_1$  je primární napětí.

Velikost měřeného napětí

$$U_1 = p_v U_v$$

kde  $U_v$  je údaj voltmetru ve voltech.

Je-li na výstup měřicího transformátoru připojen voltmetr s jiným rozsahem než 100 V, musí se stanovit převodová konstanta transformátoru  $k_T$ . Voltmetry připojené na rozváděcích přes měřicí transformátory mají už stupnice cejkované přímo ve voltech nebo kilovoltech.

Elektrické napětí můžeme měřit také klešťovým ampérvoltmetrem, který má dva rozsahy do 300 V a 600 V. Měřené napětí se přivede zkušebními vodiči ke vstupním svorkám umístěným v rukojeti přístroje.

**Příklad 3.** Určete, jak velké je napětí v síti, když na měřicím transformátoru napětí 6000/100V je připojen;

a) voltmetr do 100 V a ukazuje 63,5 V,

b) voltmetr do 120 V se stupnicí rozdělenou na 60 dílků a ukazuje 31 3/4 dílku.

Při měření voltmetrem do 100 V je převod transformátoru

$$p_v = \frac{U_1}{100} = \frac{6000}{100} = 60$$

Napětí v síti:

$$U_1 = p_v U_v = 60 \cdot 63,5 = 3810 \text{ V}$$

Při měření voltmetrem do 120 V je převod transformátoru také

$$p_v = 60$$

Konstanta voltmetru

$$k_v = \frac{120}{60} = 2 \text{ V/dílek}$$

Převodová konstanta transformátoru:

$$k_T = p_v k_v = 60 \cdot 2 = 120 \text{ V/dílek}$$

Napětí v síti:

$$U_1 = k_T U_v = 120 \cdot 31,75 = 3810 \text{ V}$$

## 3.3. Měření elektrického odporu

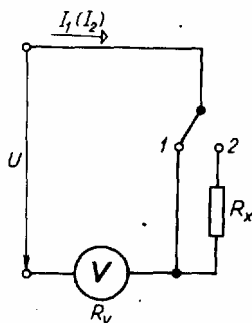
Elektrický odpor můžeme měřit četnými metodami. Vysvětlíme pouze ty nejjednodušší, kterých se používá v technické praxi nejčastěji.

a) **Měření elektrického odporu voltmetrem.** Neznámý odpor  $R$  zapojíme podle schématu na obr. 360. Nejprve zapneme přepínač do polohy 1 a obvodem prochází proud  $I_1$ . Potom přepneme přepínač do polohy 2 a obvodem prochází proud  $I_2$ .

$$I_1 = \frac{U}{R_v}; \quad I_2 = \frac{U}{R_v + R_x}$$

Poměr:

$$\frac{I_1}{I_2} = \frac{\frac{U}{R_v}}{\frac{U}{R_v + R_x}} = \frac{R_v + R_x}{R_v}$$

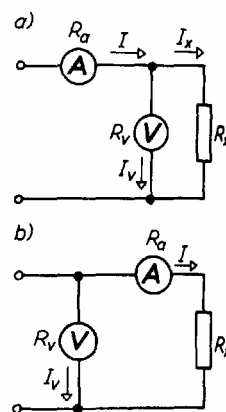


Obr. 360. Měření činného odporu voltmetrem

Z toho:

$$R_x = R_v \left( \frac{I_1}{I_2} - 1 \right)$$

Protože jsou proudy  $I_1, I_2$  úměrné výchylkám ručky, můžeme je nahradit výchylkami  $\alpha_1, \alpha_2$



Obr. 361. Měření činného odporu ampérmetrem a voltmetrem:  
a) měření malých odporů;  
b) měření velkých odporů



$$R_x = R_v \left( \frac{\alpha_1}{\alpha_2} - 1 \right)$$

Je samozřejmé, že musí být obě výchylky přečteny na stejném rozsahu voltmetru.

b) **Měření elektrického odporu ampérmetrem a voltmetrem.** Toto měření se zakládá na Ohmově zákonu. Oba měřicí přístroje můžeme zapojit podle obr. 361a, b.

Neznámý odpor

$$R_x = \frac{U}{I}$$

V obou případech se dopouštíme určité chyby. Podle schématu na obr. 361a počítáme s proudem  $I_1$ ; správně bychom měli uvažovat proud  $I_x$ . Podle obr. 361b uvažujeme napětí  $U$ , tj. včetně úbytku napětí na ampérmetru.

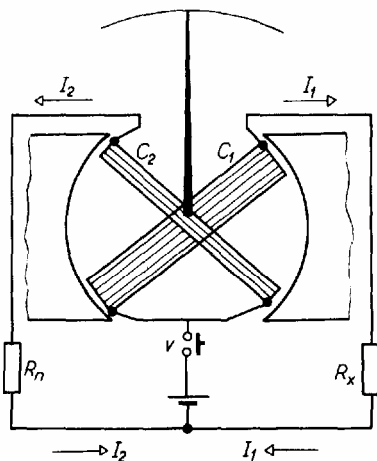
Pro přesnější měření odporů do  $100 \Omega$  používáme zapojení podle obr. 361a a neznámý odpor  $R_x$  vypočítáme ze vzorce

$$R_x = \frac{U}{I - I_v} = \frac{U}{I - \frac{U}{R_v}}$$

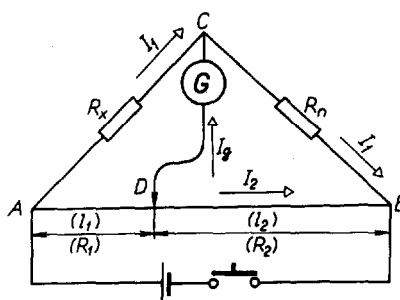
Při měření větších odporů než  $100 \Omega$  zapojujeme přístroje podle obr. 361b a neznámý odpor

$$R_x = \frac{U}{I} - R_a$$

c) **Měření elektrického odporu poměrovým ohmmetrem.** Poměrový ohmmetr podle schématu na obr. 362 je založen na magnetoelektrické poměrové soustavě. Obě cívky jsou paralelně připojeny na stejnosměrný zdroj napětí, jedna přes neznámý odpor  $R_x$ , druhá přes porovnávací odpor  $R_n$ . Stlačením tlačítka  $v$  se uzavře proudový obvod, cívkami projdou proudy, tím vznikne točivý moment, cívky se natočí a ručka na stupnici ukáže velikost odporu  $R$ . Stupnice ohmmetru je nerovnoměrná. Výhodou ohmmetru je, že přesnost měření nezávisí na kolísání napětí zdroje.



Obr. 362. Podstata poměrového magnetoelektrického ohmmetru



Obr. 363. Schéma drátového odporového můstku

d) **Měření elektrického odporu odporovým můstkem** Odporový můstek je to v podstatě odporový můstek s poměrovým drátem (obr. 363). Drátový můstek se skládá z drátu (struny) z odporové slitiny o délce  $l = l_1 + l_2$ . Drát délky  $l_1$  má odpor  $R_1$  a délky  $l_2$  odpor  $R_2$ . Neznámý odpor  $R_x$  a známý odpor  $R_n$  jsou spojeny do série a připojeny paralelně k drátu. Na konce drátu A, B je přivedeno napětí stejnosměrného zdroje a mezi body C, D je připojen galvanometr. Poloha bodu D se dá měnit posuvným běžcem. Odporem  $R_x$  a  $R_n$  prochází proud  $I_1$  a drátem proud  $I_2$ . Posouváním běžce lze dosáhnout toho, že galvanometrem neprochází



žádný proud, tzn.  $I_g = 0$ . Napětí mezi body AC se rovná napětí mezi body AD. Stejně je též mezi body CB a BD. V tomto případě platí vztah

$$R_x I_1 = R_1 I_2 \quad \text{a} \quad R_n I_1 = R_2 I_2$$

**Poměr**

$$\frac{R_x I_1}{R_n I_1} = \frac{R_1 I_2}{R_2 I_2}$$

z toho

$$R_x = R_n \frac{R_1}{R_2} = \frac{\varrho \frac{l_1}{S}}{\varrho \frac{l_2}{S}}$$

**a neznámý odpor**

$$R_x = R_n \frac{l_1}{l_2}$$

Poměr délek se přečte na stupnici pod drátem, takže neznámý odpor  $R_x$ , snadno určíme.

### 3.4. Měření indukčnosti

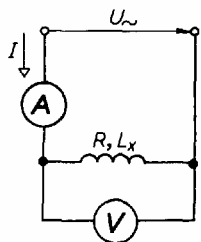
Indukčnost cívek můžeme určit několika metodami. Nejjednodušší je pomocí ampérmetru a voltmetru, je však poměrně málo přesná, asi  $\pm 5\%$ . Pro měření indukčnosti existují též různé měřicí můstky, založené na stejném principu, jako je drátový můstek na měření elektrického odporu. Rozdíl je v tom, že je můstek napájen ze střídavého zdroje, místo  $R$  je normál indukčnosti  $L$  a místo galvanometru je telefonní sluchátko. Po vyrovnaní můstku vypočítáme neznámou indukčnost ze vzorce

$$L_x = L_n \frac{l_1}{l_2}$$

K měření malých indukčností od 0,1 až do 100 mH je vhodná rezonanční metoda, která poskytuje spolehlivé výsledky. Je založena na Thomsonově vzorci

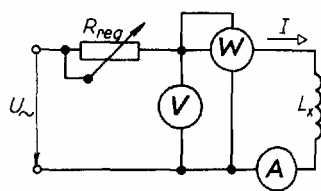
$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

Paralelní obvod cívky a kondenzátoru o známé kapacitě se přivede do rezonance kmitočtem z oscilátoru a měřená indukčnost se odečte na stupnici ladicího kondenzátoru, která je cejchována přímo v jednotkách indukčnosti.



Obr. 367. Měření indukčnosti cívky ampérmetrem a voltmetrem

Obr. 368. Měření indukčnosti cívky se železným jádrem



- a) **Měření indukčnosti cívky bez jádra ampérmetrem a voltmetrem.** Schéma zapojení je na obr. 367. Odpor cívky  $R$  určíme některou metodou popsanou dříve. Impedance (zdánlivý odpor) cívky

$$Z = \frac{U}{I}$$

Indukční odpor

$$X_L = \sqrt{Z^2 - R^2} = \omega L_x$$

z toho

$$L_x = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2\pi f}$$

Pro měření je třeba použít voltmetr o velkém vnitřním odporu vzhledem k odporu cívky R. Metoda se hodí pro přibližné měření.

### b) Měření indukčnosti cívky se železným jádrem ampérmetrem, voltmetrem a wattmetrem.

Indukčnost cívky se železným jádrem není konstantní, protože závisí na magnetickém toku čili na proudu procházejícím cívkou.

Schéma zapojení měřicích přístrojů je na obr. 368. Měříme tak, že odporem  $R_{\text{reg}}$  nastavíme proud např. po 0,25 A a čteme proud I, napětí U a příkon P (ztráty ve vinutí a v železe). Z naměřených hodnot vypočítáme impedanci cívky

$$Z = \frac{U}{I}$$

Činný odpor cívky

$$R_\xi = \frac{P}{I^2}$$

Indukčnost

$$L_x = \frac{\sqrt{Z^2 - R_\xi^2}}{2\pi f}$$

Indukčnost lze také vypočítat ze vztahu

$$Z = \frac{U}{I} = \sqrt{R_\xi^2 + \omega^2 L_x^2} = \sqrt{\frac{P^2}{I^4} + \omega^2 L_x^2}$$

z toho

$$L_x = \frac{1}{\omega I^2} \sqrt{U^2 I^2 - P^2}$$

Z naměřených a vypočítaných hodnot nakreslíme potom graf funkce  $L_x = f(I)$  (tj. závislost indukčnosti na proudu).

Při tomto měření se dají také určit ztráty v železném jádru a účinník

$$P_{\text{Fe}} = P - RI^2$$

kde R je odpor cívky určený stejnosměrným proudem. Účinník

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

### c) Měření vzájemné indukčnosti.

Při měření vzájemné indukčnosti dvou cívek postupujeme takto:

Nejprve určíme indukčnost obou cívek některou metodou popsanou v předešlém článku. Potom obě cívky spojíme do série tak, aby se jejich magnetické toky sčítaly a změříme (určíme) indukčnost obou cívek  $L_1 + 2$  Pak cívky přepojíme tak, aby jejich magnetické toky působily proti sobě a opět určíme jejich indukčnost

Energie magnetického pole cívek při indukčnosti  $L_1 + 2$  je

$$W_{1+2} = \frac{1}{2} L_{1+2} I^2 = \frac{1}{2} I^2 (L_1 + L_2 + 2M)$$

V zapojení proti sobě je energie magnetického pole

$$W_{1-2} = \frac{1}{2} L_{1-2} I^2 = \frac{1}{2} I^2 (L_1 + L_2 - 2M)$$

Z těchto rovnic

$$L_{1+2} = L_1 + L_2 + 2M$$

$$L_{1-2} = L_1 + L_2 - 2M$$

Odečteme-li obě rovnice, dostaneme vztah

$$L_{1+2} - L_{1-2} = 4M$$

Z toho vzájemná indukčnost

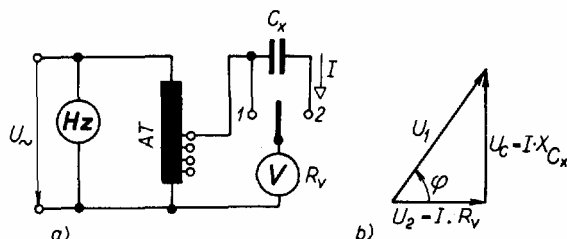
$$M = \frac{L_{1+2} - L_{1-2}}{4}$$

Činitel vazby

$$k = \frac{M}{\sqrt{L_1 L_2}}$$

### 3.5. Měření kapacity

Kapacitu kondenzátorů měříme různými metodami obdobně jako u indukčnosti. Metoda se volí podle toho, s jak velkou přesností potřebujeme určit kapacitu kondenzátoru.



Obr. 369. Měření kapacity  
voltmetrem;  
a) schéma zapojení;  
b) fázorový diagram

- a) **Měření kapacity kondenzátoru voltmetrem.** Tato metoda je velmi jednoduchá, ale při měření zanedbáváme ztráty v dielektriku a při přesnějším měření je třeba měřit i kmitočet. Schéma zapojení je na obr. 369V Při měření zjistíme napětí zdroje  $U_1$ , napětí  $U_2$  když je přepínač v poloze 2. **Kapacitní odpor kondenzátoru**

$$X_c = \frac{1}{\omega C_x}$$

a z toho

$$C_x = \frac{1}{\omega X_c}$$

Z fázorového diagramu

$$X_c = \frac{U_c}{I}$$

takže

$$C_x = \frac{1}{\omega \frac{U_c}{I}} = \frac{I}{\omega U_c} = \frac{\frac{U_2}{R_v}}{\omega \sqrt{U_1^2 - U_2^2}} = \frac{U_2}{\omega R_v \sqrt{U_1^2 - U_2^2}}$$

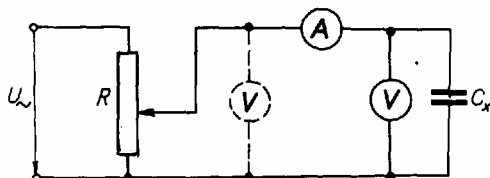
kde  $R_v$  je odpor voltmetru.

**b) Měření kapacity kondenzátoru ampérmetrem a voltmetrem.**

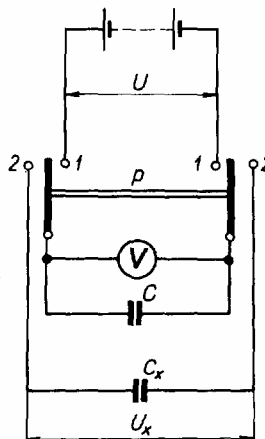
Odporem  $R$  (obr. 370) nařídíme proud  $I$  tak, aby výchylka voltmetru byla co největší; přitom však nesmíme překročit provozní napětí kondenzátoru. **Neznámou kapacitu vypočteme ze vztahu**

$$C_x = \frac{I}{2\pi f U}$$

Voltmetr zapojíme podle velikosti proudu buď za ampérmetr, nebo před něj.



Obr. 370. Měření kapacity ampérmetrem a voltmetrem



Obr. 371. Měření kapacity rozdělením elektrického náboje

**c) Měření kapacity rozdělením elektrického náboje.**

Kapacitu kondenzátoru  $C$  známe (obr. 371) a při poloze I přepínače  $p$  jej nabijeme na napětí  $U$  a náboj  $Q$ . Potom přepneme přepínač do polohy 2; tím se neznámá kapacita  $C$  připojí paralelně ke kapacitě  $C$ . Náboj se rozdělí na oba kondenzátory a napětí  $U$  odečteme opět na voltmetru. Pro přepínač v poloze 1 platí, že  $Q = UC$  a v poloze 2, že  $Q = UC_x + U_x C_x$ . Z těchto dvou rovnic se vypočítá kapacita neznámého kondenzátoru

$$C_x = C \frac{U - U_x}{U_x}$$

K měření napětí musíme použít voltmetr elektrostatické soustavy

**3.6. Měření kmitočtu**

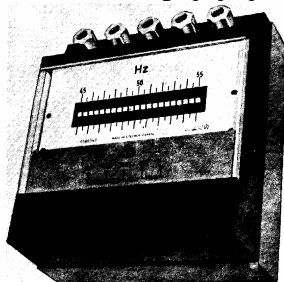
Střídavé proudy dělíme zhruba na nízkofrekvenční s kmitočtem do 20 kHz a vysokofrekvenční s kmitočtem přes 20 kHz.

Kmitočet určujeme různými metodami, které vyplývají ze vztahů

$$f = \frac{I}{2\pi CU} \quad \text{a} \quad f = \frac{U}{2\pi LI}$$

**V silnoproudé elektrotechnice měříme síťový kmitočet 50 Hz rezonančním kmitoměrem.**

Kmitoměr se zapojuje jako voltmetr (viz obr. 369) a jeho fotografie je na obr. 372.



Obr. 372. Laboratorní kmitoměr; výrobek Metra, n. p., Blansko

### 3.7. Měření účinníku

Účinník ( $\cos \varphi$ ) můžeme měřit buď nepřímo, to znamená, že změříme veličiny, pomocí kterých účinník vypočítáme, anebo přímo fázoměrem.

#### a) Měření účinníku ampérmetrem, voltmetrem a wattmetrem.

– Činný výkon jednofázového proudu

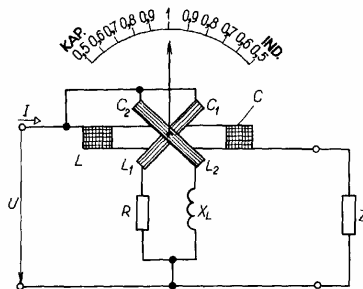
$$P = UI \cos \varphi$$

Změříme-li výkon wattmetrem, napětí voltmetrem a proud ampérmetrem, je účinník

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

#### b) Měření účinníku fázoměrem.

Na obr. 373 je znázorněno uspořádání elektrodynamického poměrového fázoměru. Cívka C má malý počet závitů z tlustého drátu, je pevná a zapojená do série se spotřebičem, takže jí prochází stejný proud jako spotřebičem. V dutině cívky C jsou uloženy otočně na hřídelíku dvě cívky C1 a C2, které mají velký počet závitů tenkého drátu a jsou upevněny pod vzájemným úhlem 90°. Do série s cívkou C1 je zapojen odpor R a v sérii s cívkou C2 indukční odpor XL. Tyto odpory volíme tak, aby cívkami C1 a C2 procházely proudy fázově posunuté o 90°. Cívky C1 a C2 jsou spojeny paralelně a jsou připojeny na napětí sítě.



Obr. 373. Podstata poměrového fázoměru elektrodynamického

Fázoměr nemá pružinky, které by vytvářely řídicí moment a není-li na síť připojen žádný spotřebič, zaujímá ručka, která je pevně spojena s cívkami C1, C2, libovolnou polohu. Prochází-li cívkou C proud posunutý fázově proti napětí, vytváří v cívce dvě složky magnetického toku, které se skládají s magnetickými toky cívek C1 a C2. Točivé momenty cívek C1 a C2 závisí na velikosti příslušné složky magnetického toku cívky C. Cívka s větším momentem se začne otáčet a její moment klesá, zatímco moment druhé cívky se zvětšuje. Při rovnováze momentů obou cívek jejich natáčení ustane a ručka na stupnici ukazuje měřený účinník.

Stupnice fázoměru má jedničku uprostřed ( $\varphi = 0$ ,  $\cos \varphi = 1$ ). Výchylka ručky vpravo udává fázový posun způsobený indukčním zatížením, výchylka vlevo fázový posun způsobený kapacitním zatížením.

U trojfázového fázoměru je k cívce C2 rovněž připojen do série odpor R a fázového posunu proudů v cívkách C1, C2 se dosáhne připojením těchto cívek k různým vodičům trojfázové sítě.

### 3.8. Měření elektrického výkonu

Při měření elektrického výkonu rozlišujeme výkon stejnosměrného proudu a výkon střídavého proudu. U střídavého proudu jednofázového i trojfázového rozeznáváme výkon činný, jalový a zdánlivý.

#### a) Měření výkonu stejnosměrného proudu.

Výkon stejnosměrného proudu obvykle neměříme wattmetrem, ale tak, že změříme napětí U a proud I. Potom výkon

$$P = UI \quad [\text{W}; \text{V}; \text{A}]$$

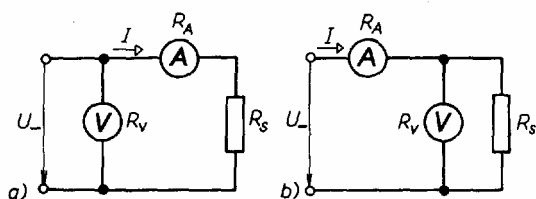
Voltmetr zapojujeme před ampérmetr (obr. 374a) při větším napětí a malém proudu. Za ampérmetr (obr. 374b) zapojujeme voltmetr, když měříme velké proudy a malé napětí. Jestliže jde o přesná měření, odečteme při měření podle obr. 374a ud výsledku vlastní spotřebu ampérmetru a při měření podle obr. 374b vlastní spotřebu voltmetru.

### Vlastní spotřeba ampérmetru

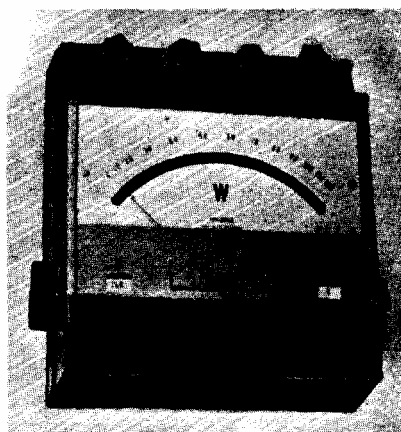
$$P_A = R_A I^2 \quad [\text{W}; \Omega; \text{A}]$$

### a vlastní spotřeba voltmetru

$$P_V = \frac{U^2}{R_V} \quad [\text{W}; \text{V}; \Omega]$$



Obr. 374. Měření výkonu stejnosměrného proudu ampérmetrem a voltmetrem; a) při malém proudu; b) při velkém proudu

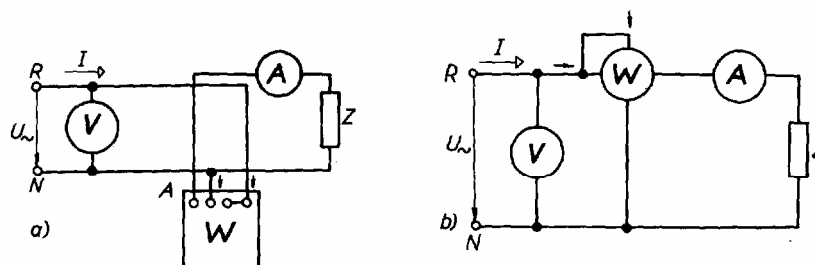


Obr. 375. Laboratorní wattmetr; výrobek Metra, n. p., Blansko

### b) Měření výkonu střídavého jednofázového proudu.

Výkon střídavého jednofázového proudu ( $P = UI \cos \varphi$ ) závisí též na účinnku, a proto jej vždy měříme wattmetrem. Wattmetry, kterými můžeme měřit i výkon stejnosměrného proudu, jsou buď elektrodynamické nebo ferodynamické (jenom pro měření střídavého výkonu, obr. 375). Wattmetr má dvě cívky, proudovou a napěťovou. Vnější svorky wattmetru jsou proudové, vnitřní napěťové. K správnému zapojení wattmetru se označují vstupní svorky proudové i napěťové šipkou. Zapojení wattmetru je na obr. 376a. b nebo na obr. 377a, b.

Při zapojení podle obr. 376 měří wattmetr příkon  $P$  spotřebiče i proudové cívky ampérmetru a wattmetru. Při přesném měření je skutečný příkon spotřebiče

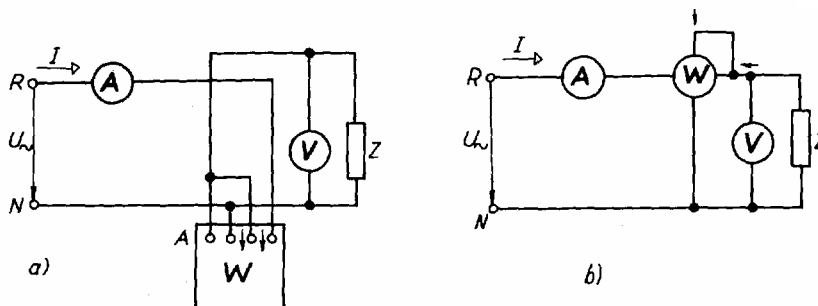


Obr. 376. Měření výkonu jednofázového střídavého proudu wattmetrem s napěťovou cívkou zapojenou před proudem: a) drátové schéma; b) normální schéma

$$P_s = P - R_A I^2 - R_{WA} I^2 \quad \text{kde } R_A \text{ je odpor proudové cívky ampérmetru,} \\ R_{WA} \text{ odpor proudové cívky wattmetru.}$$

Při zapojení wattmetru podle obr. 377 měříme příkon spotřebiče i napěťové cívkou voltmetru a wattmetru. Skutečný příkon spotřebiče

$$P_s = P - \frac{U^2}{R_v} - \frac{U^2}{R_{wv}} \quad \text{kde } R_v \text{ je odpor voltmetru,} \\ R_{wv} \text{ odpor napěťové cívky wattmetru.}$$



Obr. 377. Měření výkonu jednofázového střídavého proudu wattmetrem a napěťovou cívkou zapojenou za proudovou:  
a) drátové schéma; b) normální schéma

Poněvadž je zpravidla při měření výkonu střídavého proudu mezi proudem a napětím fázové posunutí, mohlo by dojít k přetížení proudové nebo napěťové cívky. Aby k tomu nedošlo, zapojujeme vždy při měření výkonu do obvodu pro kontrolu ampérmetr a voltmetr.

Konstanta wattmetru

$$k = \frac{\text{rozsah napětí} \times \text{rozsah proudu}}{\text{počet dílků stupnice}}$$

Naměřený výkon

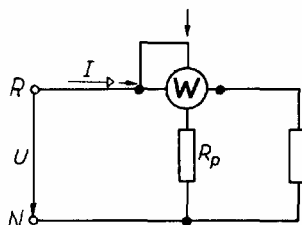
$$P = k\alpha$$

kde  $\alpha$  je výchylka ručky wattmetru.

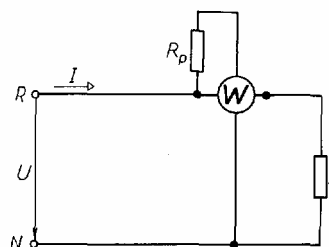
Z údajů měřicích přístrojů určíme také účinník

$$\cos \varphi = \frac{P}{UI}$$

Wattmetry mají často dva proudové rozsahy, které se přepínají přepínačem na přístroji. Rozsah napěťové cívky se zvětšuje předřadným odporem. Jednotlivé předřadné odpory jsou ve skříňce, na které jsou svorky a návod, které svorky se mají použít pro určitý rozsah napětí. Předřadný odpor se musí zapojit podle obr. 378. Podle obr. 379 je mezi proudovou a napěťovou cívkou wattmetru zbytečně velké napětí.



Obr. 378. Správné zapojení předřadného odporu k wattmetru



Obr. 379. Nesprávné zapojení předřadného odporu k wattmetru

Nejmenší napěťový rozsah wattmetrů bývá 30 V. Do 600 V se rozsah zvětšuje předřadným odporem. Nad 600 V se wattmetr připojuje přes měřicí transformátor napětí a proudovou cívku lze zapojit přes měřicí transformátor proudu už od 5 A.

Výkon jednofázového střídavého proudu o napětí 220 V můžeme měřit bez přerušení přívodu proudu klešťovým wattmetrem (obr. 380). Napětí se k přístroji přivede vodiči se

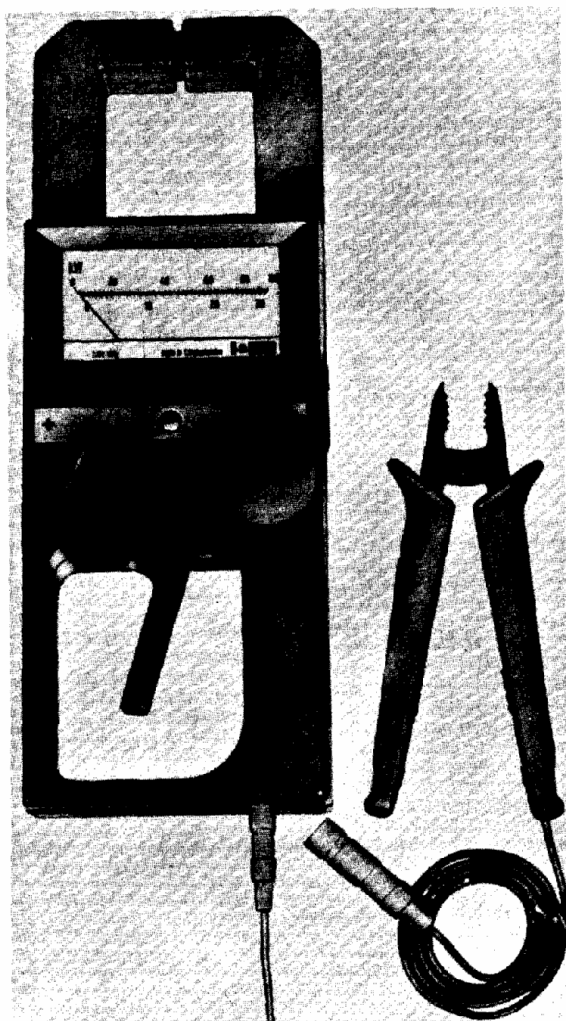


speciálními svorkami. Měřený rozsah výkonu je do 3-10-30-100-300 kW. Nejmenší rozsah lze zmenšit několikanásobným provlečením vodiče čelistmi; např. pro měření do 300 W pro plnou výchylku se navine na jádro 10 závitů.

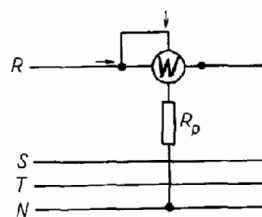
## c) Měření výkonu střídavého trojfázového proudu.

Při měření výkonu trojfázového proudu závisí způsob měření na tom, zda je síť čtyřvodičová nebo třívodičová a zda je zatížení souměrné či nesouměrné.

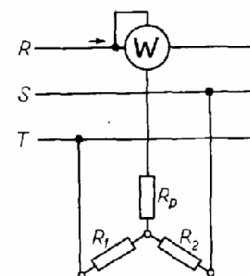
Měření výkonu trojfázového proudu při souměrném zatížení. Při souměrném zatížení, např. v přívodu k elektromotoru, je v každé fázi stejný proud;



Obr. 380. Klešťový wattmetr, výrobek Metra, n. p., Blansko



Obr. 381. Měření výkonu trojfázového proudu ve čtyřvodičové soustavě při souměrném zatížení jedním wattmetrem



Obr. 382. Měření výkonu trojfázového proudu v třívodičové soustavě při souměrném zatížení jedním wattmetrem

proti fázovému napětí má stejný fázový posun. Stačí tedy změřit výkon v jedné fázi a výkon trojfázového proudu dostaneme, když výkon jedné fáze násobíme třemi. Výkon jedné fáze

$$P_f = U_f I_f \cos \varphi = k\alpha$$

**Celkový výkon trojfázového proudu**

$$P = 3P_f = 3k\alpha$$

V čtyřvodičové síti se wattmetr zapojuje podle obr. 381, v třívodičové síti podle obr. 382. Protože nemá třívodičová síť nulový vodič, musíme si nulový bod vytvořit uměle, a to třemi stejnými odpory spojenými do hvězdy. Jedním z nich bývá odpor napěťové cívky

wattmetru s předřadníkem, přičemž se musí

$$R_{wv} + R_p = R_1 = R_2$$

**Měření výkonu trojfázového proudu při nesouměrném zatížení.**

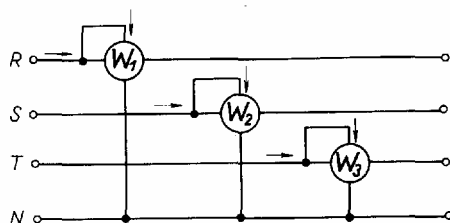
Při nesouměrném zatížení měříme výkon trojfázového proudu buď třemi nebo dvěma wattmetry

Při měření třemi wattmetry je celkový výkon roven součtu výkonů jednotlivých fází.

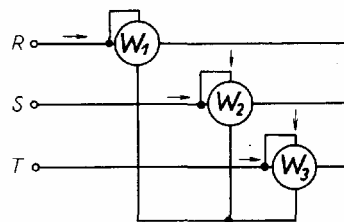
$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

$$P = k(\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$$

Zapojení tří wattmetrů v čtyřvodičové síti je na obr. 383, v třívodičové síti na obr. 384.



Obr. 383. Měření výkonu trojfázového proudu třemi wattmetry ve čtyřvodičové soustavě při nesouměrném zatížení



Obr. 384. Měření výkonu trojfázového proudu třemi wattmetry v třívodičové soustavě při nesouměrném zatížení

Jestliže měříme výkon trojfázového proudu dvěma wattmetry, zapojíme proudové cívky do dvou fázových vodičů a napěťové cívky připojíme na sdružené napětí mezi fázovými vodiči, ve kterém jsou zapojeny proudové cívky a zbývající volný fázový vodič (obr. 385).

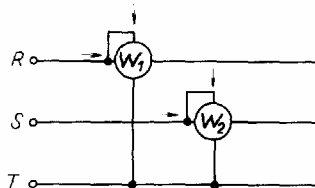
Tomuto zapojení wattmetrů říkáme „Aronovo zapojení“. Výkon trojfázového proudu

$$P = P_1 + P_2 = k(\alpha_1 + \alpha_2)$$

Výchylky obou wattmetrů jsou obecně různé. Stejně výchylky jsou při činném zatížení, kdy účinník  $\cos \varphi = 1$ . Při  $\cos \varphi = 0,5$  ukazuje jeden wattmetr nulu, při menším účinníku než 0,5 je výchylka tohoto wattmetru záporná. Aby tento wattmetr ukazoval správným směrem, musíme zaměnit přívody k jeho napěťové cívce. U některých wattmetrů je přepínač, takže není třeba přepojovat přívody na svorkách. Označíme-li výchylku ručky wattmetru po přepojení napěťové cívky  $\alpha_2$ , pak je výkon trojfázového proudu dán vztahem

$$P = P_1 - P_2 = k(\alpha_1 - \alpha_2)$$

Obr. 385. Měření výkonu trojfázového proudu dvěma wattmetry v třívodičové soustavě (Aronovo zapojení)

**d) Měření jalového výkonu střídavého proudu.****Jalový výkon jednofázového střídavého proudu**

$$Q = UI \sin \varphi \quad [\text{var; V, A, -}]$$

měříme jalovým wattmetrem. Tento wattmetr se liší od normálního tím, že je proud v napěťové cívce posunut o  $90^\circ$  proti napětí. Jinak jsou způsoby měření stejné jako při měření činného výkonu  $P$  wattmetrem.

Nemáme-li jalový wattmetr k dispozici, určíme jalový výkon jednofázového střídavého proudu z hodnot naměřených při měření činného výkonu, a to z veličin

$P$ ,  $U$  a  $I$ .

$$P = UI \cos \varphi$$

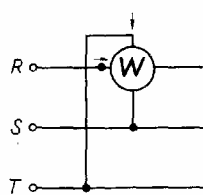
$$\cos \varphi = \sqrt{1 - \sin^2 \varphi}$$

$$P^2 = U^2 I^2 (1 - \sin^2 \varphi) = U^2 I^2 - U^2 I^2 \sin^2 \varphi$$

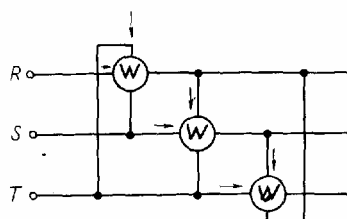
$$P^2 = U^2 I^2 - Q^2$$

$$Q = \sqrt{U^2 I^2 - P^2} \quad [\text{var; V, A, W}]$$

Jalový výkon trojfázového proudu můžeme měřit buď jalovými wattmetry stejně zapojenými jako wattmetry při měření činného výkonu, nebo wattmetry normálními, které však musíme zapojit na vhodné napětí.



Obr. 386. Měření jalového výkonu trojfázového proudu jedním wattmetrem při souměrném zatížení ve třívodičové soustavě



Obr. 387. Měření jalového výkonu trojfázového proudu třemi wattmetry při nesouměrném zatížení

Při souměrném zatížení měříme jalový výkon trojfázového proudu jedním wattmetrem zapojeným podle obr. 386. Napětíová cívka je připojena na sdružené napětí dvou fází, v nichž není zapojena proudová cívka.

Wattmetr měří výkon

$$Q_1 = \sqrt{3} Q_f$$

z toho

$$Q_f = \frac{Q_1}{\sqrt{3}}$$

### Jalový výkon trojfázového proudu

$$Q = 3Q_f = 3 \frac{Q_1}{\sqrt{3}} = \sqrt{3} Q_1 = \sqrt{3} k \alpha$$

tzn. údaj wattmetru musíme násobit  $\sqrt{3}k$ .

Při nesouměrném zatížení měříme jalový výkon třemi normálními wattmetry podle schématu na obr. 387. Napětíové cívky wattmetrů jsou opět připojeny na sdružené napětí, a proto je naměřený výkon  $\sqrt{3}$  krát větší než skutečný. Musíme proto součet údajů tří wattmetrů dělit  $\sqrt{3}$ .

$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}} = \frac{k}{\sqrt{3}} (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3)$$

### 3.9. Měření elektrické energie

**Elektrická energie je vlastně práce elektrického proudu a měříme ji elektroměrem.** Podle druhu proudu rozeznáváme elektroměry stejnosměrné a střídavé. Střídavé elektroměry jsou výhradně indukční přístroje, u kterých vzniká točivý moment působením magnetického pole na proudy indukované v hliníkovém kotouči otočného systému.

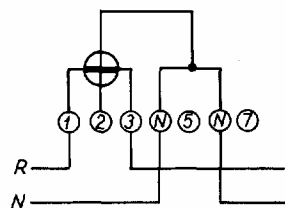
Elektroměry na střídavý proud dělíme na jednofázové a trojfázové. Trojfázové mohou být se dvěma měřicími soustavami k měření energie v trojvodičové síti nebo se třemi měřicími systémy pro čtyřvodičové sítě.

**Elektroměry slouží k měření činné, jalové a zdánlivé elektrické energie.**

Jednofázový elektroměr měří spotřebu elektrické energie v jednofázovém dvojvodičovém vedení střídavého proudu a jeho schéma zapojení je na obr. 388.

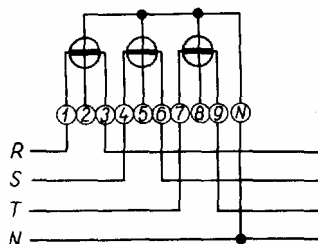
Ve čtyřvodičové síti se používají elektroměry se třemi měřicími soustavami; jejich zapojení je na obr. 389.

V třívodičové soustavě trojfázového proudu se používají elektroměry, které mají jen dvě měřicí soustavy a zapojují se podle obr. 390.



Obr. 388. Schéma zapojení jednofázového elektroměru

Na štítku elektroměru musí být kromě jiných údajů uvedena jeho konstanta (dříve se říkalo elektrický převod). Je to číslo udávající počet otáček kotouče připadajících na 1 kWh; např. 1 kWh = 2400 ot. Dále tam musí být



Obr. 389. Schéma zapojení trojfázového elektroměru ve čtyřvodičové soustavě

uveden násobitel číselníku (dříve se používalo názvu konstanta elektroměru); je to číslo, kterým musíme násobit údaj počítadla, aby výsledný údaj byl v kWh. U elektroměru pro přímé měření do 100 kW je násobitel 1 nebo 0,5. U elektroměrů nad 100 kW to může být každé celé číslo.

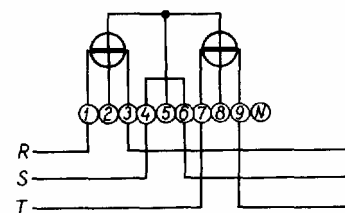
Trojfázové elektroměry se vyrábějí pro napětí do 3 x 500 V, 50 až 60 Hz a pro proudy 5; 10; 20; 50 a 100 A. Pro větší proudy a napětí se elektroměry připojují přes měřicí transformátory proudu a napětí. Jsou to tzv. převodové elektroměry, které jsou pro jmenovité sekundární napětí 100 V a proud 5 A.

K vyúčtování spotřeby elektrické energie podle dvou nebo tří různých sazeb se používají dvousazbové nebo trojsazbové elektroměry, které se co do konstrukce neliší od elektroměrů pro jednoduchou sazbu. Jsou však opatřeny dvojnásobnými nebo trojnásobnými počítacími strojky, jimiž je spotřeba v kilowatthodinách registrována při každé sazbě samostatně na patřičném číselníku. Jednotlivé počítací strojky se zapínají spínacími sazbovými hodinami.

Dvousazbové i trojsazbové elektroměry umožňují využití levného nočního proudu nebo také proudu v poledne, v době klidu v průmyslových závodech.

Elektroměry pro měření jalové nebo zdánlivé elektrické energie se liší od normálních elektroměrů tím, že jejich měřicí ústrojí reaguje na fázově posunutý proud.

Elektroměry jsou měřicí přístroje, podle kterých se vyúčtovává odběr elektrické energie, a proto musí být cejchovány.



Obr. 390. Schéma zapojení trojfázového elektroměru v třívodičové soustavě