

Měření výkonu elektrického proudu

Výkon elektrického proudu

- Výkon elektrického proudu je práce vykonaná za jednotku času
 $P = A / t$ [W; J, s]
- Výkon stejnosměrného proudu
 $P = U \cdot I$ [W; V, A]
- V obvodech střídavého proudu rozlišujeme výkon:
 - činný $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ [W; V, A]
 - jalový $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ [var; V, A]
 - zdánlivý $S = U \cdot I$ [VA; V, A]
- V trojfázových obvodech dále rozlišujeme napětí a proudy fázové a sdružené
 $U_S = U = \sqrt{3} \cdot U_f$
 $P = \sqrt{3} \cdot U \cdot I \cdot \cos \varphi$
- Výkon dodávaný do spotřebiče se nazývá příkon

Měření výkonu stejnosměrného proudu

Výkon určujeme výpočtem:

$$P = U \cdot I \quad [W; V, A]$$

- Měření je zatíženo chybou způsobenou vlastní spotřebou jednoho měřících přístrojů - chybou metody ΔP .
- Skutečný výkon:
 $P = U \cdot I - \Delta P$
- Spolehlivě lze určit pouze vlastní spotřebu voltmetru:
 $P_V = U^2_V / R_V$
- Podle poměru chyb metody k měřenému výkonu rozlišujeme zapojení **pro měření velkých výkonů** a **zapojení pro měření malých výkonů** - při správné volbě metody lze chybu metody zanedbat.

Měření velkých výkonů v obvodech stejnosměrného proudu

- ampérmetr měří i proud odebíraný voltmetrem:

$$I_A = I_V + I_Z$$

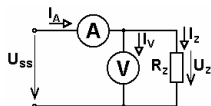
- spotřeba voltmetru:

$$\Delta P_V = U_Z^2 / R_V$$

- skutečný příkon zátěže:

$$P = U \cdot I - \Delta P_V = U \cdot I - U_Z^2 / R_V$$

- při znalosti vnitřního odporu voltmetru lze jeho vlastní spotřebu vypočítat
- pro velké proudy, kde $I_Z \gg I_V$ je chyba metody menší než přesnost měření



Měření malých výkonů v obvodech stejnosměrného proudu

- voltmetr měří i úbytek napětí na ampérmetru:

$$U_V = \Delta U_A + U_Z$$

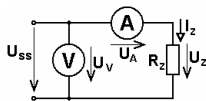
- spotřeba ampérmetru:

$$\Delta P_A = R_A \cdot I_Z^2$$

- skutečný příkon zátěže:

$$P = U_V \cdot I_Z - \Delta P_A = U_V \cdot I_Z - R_A \cdot I_Z^2$$

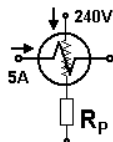
- odpor ampérmetru se výrazně mění s teplotou, proto nelze vlastní spotřebu přesně určit
- pro velká napětí, kde $U_Z \gg \Delta U_A$ je chyba metody menší než přesnost měření



Měření činného výkonu v obvodech střídavého proudu

K měření výkonu používáme wattmetr

- wattmetr má dvě cívky
 - proudovou - zapojovanou do série se zátěží
 - napěťovou - zapojovanou paralelně k zátěži
- začátky obou vinutí se označují ↓, * nebo •
- při otočení jednoho z konců vinutí je výchylka wattmetru záporná

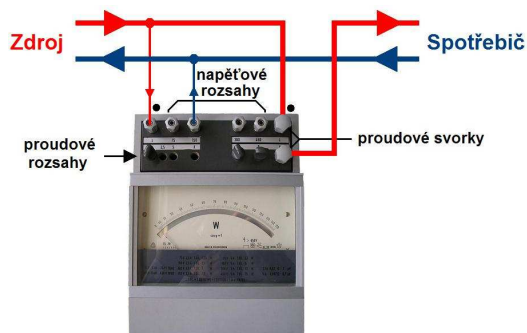


Konstanta wattmetru:

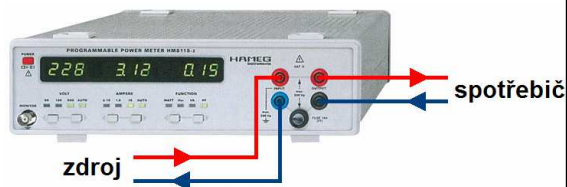
$$k_w = \frac{X_w}{\alpha_s} = \frac{X_i \cdot X_u}{\alpha_s} \cos \varphi \quad [W / \text{dílek}; A, V, \text{dílký}]$$

- aby nedošlo k přetížení obou měřících cívek musíme současně měřit i napětí voltmetrem a proud ampérmetrem
- měření je zatíženo chybou způsobenou vlastní spotřebou jedné z cívek wattmetru a voltmetru nebo ampérmetru
- obdobně jako u měření výkonu stejnosměrného proudu používáme dvě zapojení odlišující je vlivem vlastní spotřeby na přesnost měření

Zapojení analogového wattmetru



Zapojení číslicového laboratorního wattmetru



Zapojení klešťového wattmetru pro měření výkonu v jedné fázi



Měření malých výkonů v obvodech jednofázového proudu

Měření je ovlivněno vlastní spotřebou ampérmetru a proudové cívky wattmetru:

- napětí na voltmetru:

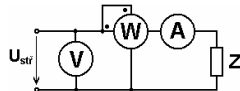
$$U_V = \Delta U_A + \Delta U_{WP} + U_Z$$

- skutečný příkon zátěže:

$$P = P_w - \Delta P_A - \Delta P_{WP} = P_w - R_A \cdot I_Z^2 - R_{WP} \cdot I_Z^2$$

P_w – wattmetrem změřená hodnota

- odpor proudových cívek se výrazně mění s teplotou, proto nelze vlastní spotřebu přesně určit
- pro velká napětí, kde $U_Z \gg (\Delta U_A + \Delta U_{WP})$ lze chybu metody zanedbat



Měření velkých výkonů v obvodech jednofázového proudu

Měření je ovlivněno vlastní spotřebou voltmetru a napěťové cívky wattmetru:

- proud ampérmetru:

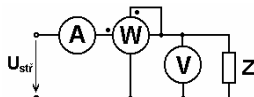
$$I = I_V + I_{WN} + I_Z$$

- skutečný příkon zátěže:

$$P = P_w - \Delta P_V - \Delta P_{WN} = P_w - U_V^2 / R_V - U_V^2 / R_{WN}$$

P_w – wattmetrem změřená hodnota

- při znalosti vnitřního odporu voltmetru R_V a napěťové cívky wattmetru R_{WN} lze vlastní spotřebu přístrojů vypočítat
- pro velké proudy, kde $I_Z \gg (I_V + I_{WN})$ lze chybu metody zanedbat



Měření činného výkonu trojfázového proudu

V trojfázových obvodech je obvykle vlastní spotřeba přístrojů výrazně menší než nepřesnost měření, proto se korekce na vlastní spotřebu přístrojů neprovádí.

V trojfázové soustavě rozlišujeme zátěž:

- **souměrnou** - proudy a výkony ve všech fázích jsou stejné
- **nesouměrnou** - proudy a výkony ve fázích jsou rozdílné

Trojfázové soustavy rozdělujeme na:

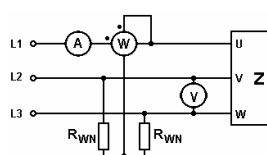
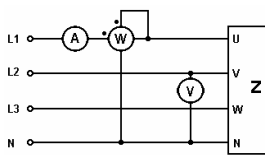
- soustavy **s vyvedeným středem** – s vodičem N (PEN)
- soustavy **bez vyvedeného středu** – pouze vodiče L₁, L₂ a L₃

Měření činného výkonu souměrné trojfázové zátěže

Zapojení pro soustavu:

s vyvedeným středem sítě

bez vyvedeného středu sítě



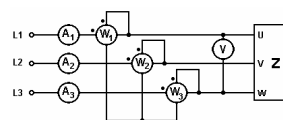
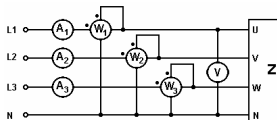
$$P = 3 \cdot P_1$$

Měření činného výkonu nesouměrné trojfázové zátěže

Zapojení pro soustavu:

s vyvedeným středem sítě

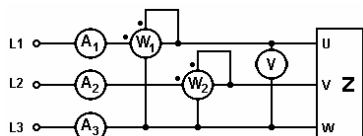
bez vyvedeného středu sítě



$$P = P_1 + P_2 + P_3$$

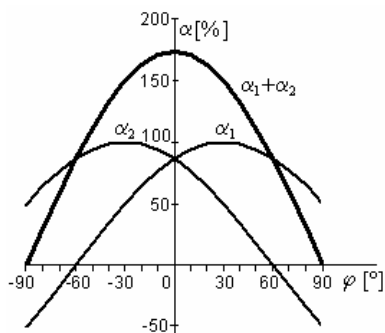
V soustavě bez vyvedeného středu musí být odpor napěťových cívek všech wattmetrů stejný

Měření činného výkonu Aronovým zapojením



- používá se v sítích bez vyvedeného středu
- celkový výkon:
 $P = P_1 + P_2$
- wattmetry musí mít stejný odpor napěťových cívek
- pro $\cos\varphi < 0,5$ je výchylka jednoho wattmetru záporná,
- při záporné výchylce zaměníme přívody k proudové cívice a hodnotu měřenou tímto wattmetrem dosazujeme do vzorce jako zápornou

Závislost výchylek wattmetrů v Aronově zapojení na účinníku

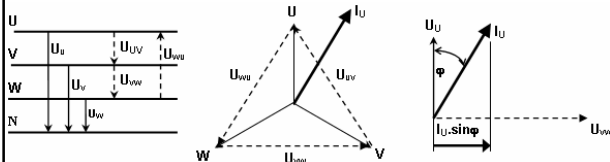


Měření jalového výkonu

- hodnotu jalového výkonu nejčastěji určujeme výpočtem:
 $Q = U \cdot I \cdot \sin\varphi$
 $Q = P \cdot \operatorname{tg}\varphi$
- pro měření v jednofázové síti se používá upravený wattmetr - **varmetr**
- do obvodu se varmetr zapojuje obdobně jako wattmetr při měření činného výkonu
- varmetr lze použít pouze pro jeden kmitočet - např. 50 Hz
- v trojfázových sítích se používají vhodná zapojení používající normální wattmetr, který pak měří jalový výkon

Měření jalového výkonu v obvodech trojfázového proudu

V trojfázové soustavě se k měření jalového výkonu používá wattmetr využívající vztahů mezi fázovým a sruženými napětím



Wattmetr měří součin napětí, proudu a účinníku ($U \cdot I \cdot \cos\varphi$)

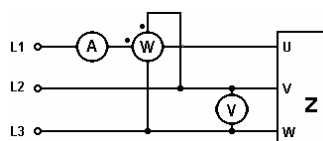
Je-li proudová cívka připojena na fázi U potom sružené napětí mezi fázemi V a U (U_{vw}) je kolmé na fázové napětí U_U

Takto zapojený wattmetr pak měří:

$$U_{vw} \cdot I_U \cdot \cos\varphi = \sqrt{3} \cdot U_U \cdot I_U \cdot \sin\varphi$$

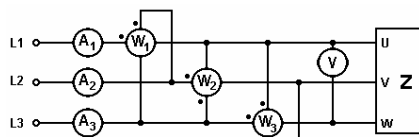
Změřenou hodnotu je pouze nutné vydělit $\sqrt{3}$, tj. 1,73

Měření jalového výkonu symetrické zátěže



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

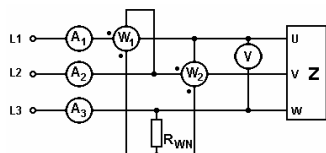
Měření jalového výkonu nesymetrické zátěže



$$Q = \frac{Q_1 + Q_2 + Q_3}{\sqrt{3}}$$

Protože napěťové cívky wattmetrů jsou připojeny na sružené napětí, musí se součet jalových výkonů dělit $\sqrt{3}$.

Aronovo zapojení pro měření jalového výkonu



$$Q = \sqrt{3} \cdot (Q_1 + Q_2)$$

Odpory napěťových cívek obou wattmetrů musí mít stejnou hodnotu jako odpor rezistoru R_{WN}

Měření zdánlivého výkonu

Zdánlivý výkon se určuje výpočtem ze změřeného napětí a proudu

- v obvodech jednofázového proudu:

$$S = U \cdot I \quad [\text{VA}; \text{V}, \text{A}]$$

- v obvodech trojfázové souměrné zátěže:

$$S = \sqrt{3} \cdot U \cdot I$$

$$S = 3 \cdot U_f \cdot I$$

kde: U - sdružené napětí, U_f - fázové napětí

- v obvodech trojfázové nesouměrné zátěže:

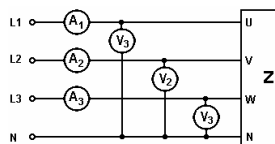
$$S = U_{f1} \cdot I_1 + U_{f2} \cdot I_2 + U_{f3} \cdot I_3$$

$$S = U_f \cdot (I_1 + I_2 + I_3)$$

$$S = 1/\sqrt{3} \cdot U \cdot (I_1 + I_2 + I_3)$$

Pro omezení vlivu spotřeby měřících přístrojů se používají zapojení pro malé a velké výkony

Měření zdánlivého výkonu v obvodech trojfázového proudu



$$S = U_1 \cdot I_1 + U_2 \cdot I_2 + U_3 \cdot I_3$$

V soustavě bez vyvedeného středu zapojíme voltmetry do hvězdy (vytvoříme umělý střed), při měření sdruženého napětí vydělíme výsledek $\sqrt{3}$.

V sítích s tvrdým zdrojem napětí postačí měřit napětí v jedné fázi.
