



STŘEDNÍ ŠKOLA, HAVÍŘOV-ŠUMBARK, SÝKOROVA 1/613

příspěvková organizace

ELEKTRICKÁ MĚŘENÍ

VYBRANÉ KAPITOLY PRO
ŽÁKY SŠ

Ing. Tomáš Kostka

Havířov, 2008 - aktualizováno duben 2013

Tento materiál nenahrazuje knihu nebo zápis z vyučovacích hodin.

Obsah

1. Hodnoty základních periodických průběhů
2. Nauka o měření - metrologie
3. Chyby měření, rušivé vlivy
4. Obecné vlastnosti analogových měřících přístrojů
5. Značky na měřících přístrojích
6. Magnetoelektrická měřící soustava
7. Měření a regulace proudu, ampérmetry
8. Měření a regulace napětí, voltmetry
9. Měření odporu přímou a Ohmovou metodou
10. Měření odporu porovnávací a můstkovou metodou
11. Měření kmitočtu, vibrační měřící soustava
12. Měření vlastní indukčnosti - Ohmova metoda
13. Měření vlastní indukčnosti - Maxwell-Wienův můstek a rezonanční metoda
14. Měření kapacity - Ohmova metoda, přímá metoda
15. Měření kapacity - de Sautyho a Wienův můstek, rezonanční metoda
16. Wattmetr, elektrodynamická měřící soustava
17. Měření elektrického výkonu
18. Měření elektrické práce, indukční měřící soustava
19. Analogový osciloskop
20. Měření zemního a izolačního odporu
21. Rozšíření rozsahu měřících přístrojů

1. Hodnoty základních periodických průběhu

Okamžitá hodnota

- značí se malým písmenem u, i, p, \dots
- je to hodnota, která se mění spojitě s časem
- v každém časovém okamžiku je okamžitá hodnota jiná
- např. pro sinusové napětí platí: $u = U_m \cdot \sin(2 \cdot \pi \cdot f \cdot t)$

Maximální hodnota

- značí se velkým písmenem s indexem „m“ U_m, I_m, P_m, \dots
- jinými slovy amplituda
- je to největší hodnota z okamžitých hodnot v obou polaritách
- např.: v elektrické zásuvce je maximální hodnota 325 V, 50 Hz

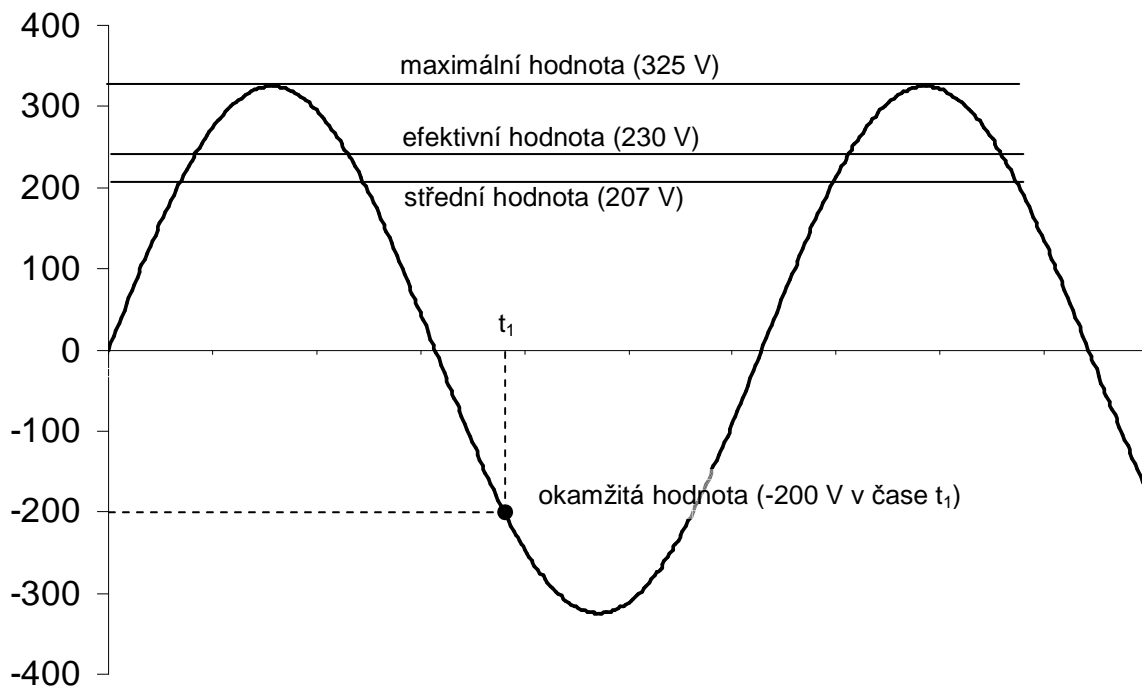
Efektivní hodnota

- značí se velkým písmenem U, I, P, \dots
- je nejpoužívanější hodnota ve střídavých obvodech
- efektivní hodnotu měří většina elektrických přístrojů
- efektivní hodnota střídavého proudu se rovná myšlené hodnotě stejnosměrného proudu, který vyvolá za stejnou dobu stejné tepelné účinky, jako uvažovaný střídavý proud
- např.: v elektrické zásuvce je efektivní hodnota 230 V, 50 Hz
- pro sinusové napětí platí: $U = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$
pro obdélníkové napětí platí: $U \cong U_m$

Střední hodnota

- značí se velkým písmenem s indexem „S“ U_S, I_S, P_S, \dots
- je nejméně používaná hodnota ve střídavých obvodech
- střední hodnota střídavého proudu se rovná myšlené hodnotě stejnosměrného proudu, který přenesení za stejnou dobu stejný náboj, jako uvažovaný střídavý proud
- např.: v elektrické zásuvce je střední hodnota 207 V, 50 Hz
- např. pro sinusové napětí platí: $U_S = \frac{2}{\pi} \cdot U_m$

Vyznačení hodnot pro napětí o amplitudě 325 V



2. Nauka o měření - metrologie

Metrologie je obor, který se zabývá měřením, měřícími jednotkami a metodami, technikou měření a měřidly. Tento obor pak nachází uplatnění téměř ve všech oblastech lidské činnosti.

V ČR je nejvyšší institucí působící v oblasti metrologie Ministerstvo průmyslu a obchodu ČR. Pod ním jsou další čtyři instituce: Úřad pro technickou normalizaci, metrologii a státní zkušebnictví (ÚNMZ), Český metrologický institut (ČMI), a Český institut pro akreditaci (ČIA).

Měření fyzikální veličiny je určení její velikosti v určených jednotkách.

Veličina – přiřazuje se ke každému fyzikálnímu jevu, který lze číselně určit.

Jednotka – pevně zvolené nebo stanovené množství fyzikální veličiny; jednotka musí být jednoznačná a kontrolovatelná

Základní jednotky SI soustavy: metr (m), kilogram (kg), sekunda (s), ampér (A), kelvin (K), kandela (cd) a mol (mol).

Pomocí těchto základních jednotek se dají odvodit ostatní jednotky.

3. Chyby měření, rušivé vlivy

Chyby měření

1. Chyby podle výskytu

- soustavné
- nahodilé
- omyly

2. Chyby podle vzniku

- chyba metody
- chyba měřicího přístroje
- chyba obsluhy
- chyba dalších částí měřicího obvodu
- chyba rušivými vlivy

3. Matematické vyjádření chyb

- absolutní chyba

$$\Delta a = N - S \quad (\text{v jednotkách měřené veličiny})$$

kde N ... naměřená hodnota
S ... skutečná hodnota

Absolutní chyba nemá pro člověka nezasvěceného do daného měření žádnou vypovídací hodnotu. Chyba 7 cm - je to hodně nebo málo? Při měření vany, která se sotva vejde do koupelny je to určitě chyba velká, zatímco při měření vzdálenosti Praha-Paříž jde o chybu naprosto zanedbatelnou. Z těchto důvodů zavádíme chybu relativní.

- relativní chyba

$$\delta = \frac{|N - S|}{S} \cdot 100 \quad (\%)$$

Příklad: Obvodem protéká proud 52 mA. Ampérmetrem bylo změřeno 53,6 mA. Určete absolutní a relativní chybu.

$$\Delta a = N - S = 53,6 - 52,0 = 1,6 \text{ mA} \quad \delta = \frac{|N - S|}{S} \cdot 100 = \frac{|\Delta a|}{S} \cdot 100 = \frac{1,6}{52} \cdot 100 = 3,07 \%$$

Rušivé vlivy

1. Mechanické vlivy

- tření v ložiskách
- poloha přístroje
- otřesy

opatření: hrotové uložení otočné části, dodržování polohy přístroje, otřesuvzdorné přístroje

2. Teplotní vlivy

S rostoucí teplotou se mění geometrické rozměry součástí, odpor měřící cívky, odpor předřadníků a bočníků, magnetická indukce trvalých magnetů

opatření: použití materiálu s malou teplotní závislostí odporu, vyjmutí zdroje tepla z měřícího přístroje, teplotní kompenzace - termistor

3. Přechodový odpor

Přechodový odpor vzniká v místě rozebíratelného spojení dvou vodičů. Jeho velikost bývá běžně kolem 10^{-4} až $10^{-2} \Omega$, může však dosáhnout i jednotek ohmů.

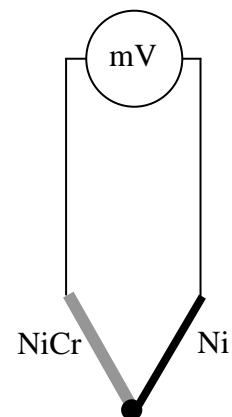
opatření: zapojení měřících přístrojů nebo rezistorů pomocí dvou dvojic svorek

4. Termoelektrické napětí

Termoelektrické napětí vzniká v místě spojení dvou různých kovů při zahřátí místa spojení. Velikost napětí je jednotky a stovky mV.

opatření: měření při obou polaritách proudu, použití jednoho kovu

Termočlánek (viz obrázek) lze však také využít k měření teploty nebo k měření efektivní hodnoty proudu libovolného tvaru signálu.



5. Vnější elektrické pole

Elektrické pole vzniká mezi dvěma vodivými místy o různé potenciálu.

opatření: elektrické stínění – vodivý obal přístroje se uzemní a indukovaný náboj se odvádí do země

6. Vnější magnetické pole

Magnetické pole vzniká kolem každého vodiče s proudem. Dalším zdrojem je magnetické pole Země.

opatření: a) feromagnetické stínění – přístroj se vloží do feromagnetického obalu, který odvede magnetický tok mimo přístroj
b) elektromagnetické stínění – přístroj se vloží do vodivého obalu ve kterém vnější magnetické pole indukuje vířivé proudy. Jejich magnetické pole ruší pole vnější.

4. Obecné vlastnosti analogových měřících přístrojů

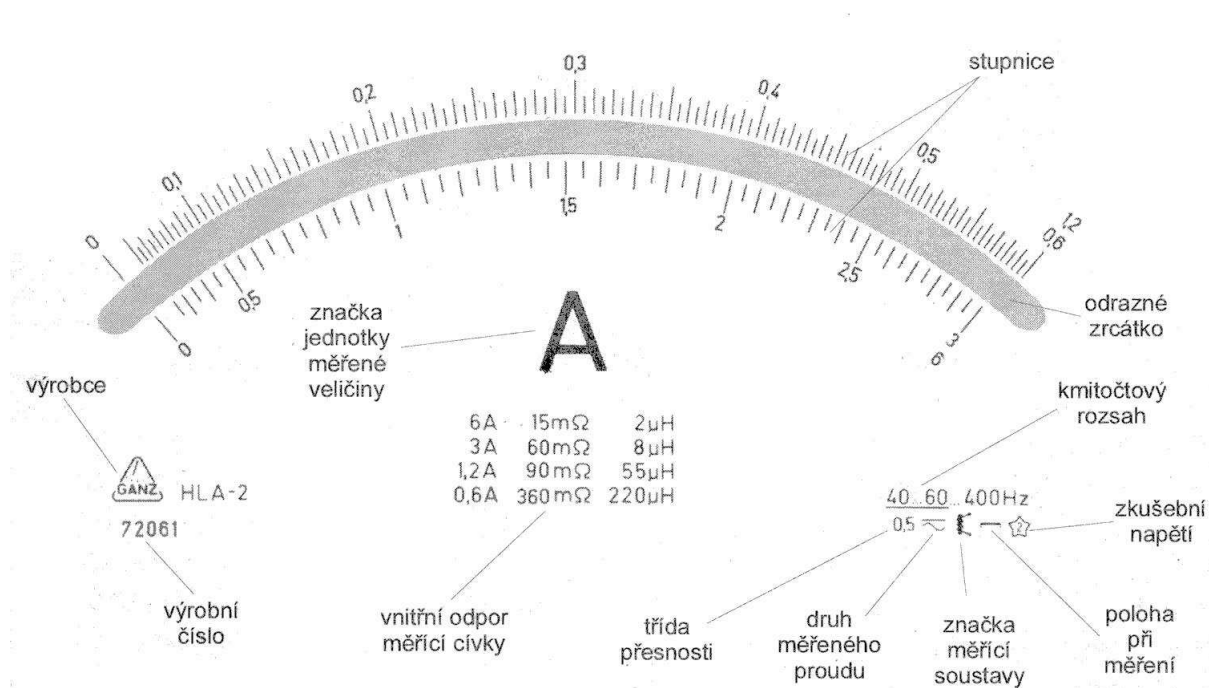
Ukazatel, číselník, stupnice

Ukazatel (nebo také ručka) je pevně uchycen na hřídelce otočné části přístroje. Ručka musí mít malou hmotnost, malý moment setrvačnosti a musí být vyrobena z nemagnetických materiálů. Ručička by měla být užší, než nejmenší dílek na stupnici. Vhodným materiálem pro výrobu ručky je hliník a sklo.

Každý ručkový přístroj musí být vybaven šroubem k nastavení nulové polohy – ručka musí ukazovat na nultý dílek stupnice.

Číselník analogového měřícího přístroje je rovná plocha, na níž je zakreslena stupnice, značky, logo výrobce a výrobní číslo, popřípadě další údaje.

Stupnice je soustava čárek číslic na číselníku a slouží k odečítání měřené veličiny. Stupnice může být lineární (každý dílek má stejnou šířku) nebo nelineární. Stupnice nemusí vždy začínat nulou.



Aretace a tlumení

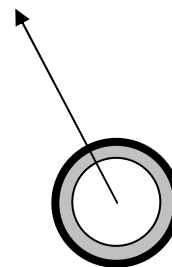
Aretace je znehybnění otočné části měřícího ústrojí. Používá se u transportu přístroje nebo k měření v špatně dostupných místech.

Tlumení otočného ústrojí se provádí proto, abychom dosáhli co nejrychlejšího ustálení ručky. U přístrojů bez tlumení dochází k dlouhému kmitání ručky kolem správné výchylky.

Tlumení magnetické – přebytečnou pohybovou energii ručky mění na teplo vířivé proudy, které se indukují v hliníkovém plíšku. Plíšek se pohybuje spolu s ručkou v poli permanentního magnetu.

Tlumení vzduchové – kývání ručky zabraňuje křídélko z tenkého hliníkového plíšku. Při pohybu ručky se křídélko pohybuje v komůrce, kde stlačuje vzduch.

Tlumení kapalinové – ručka přístroje je spojena s vnitřním válcem, který je umístěn ve větším válci. Prostor mezi válci vyplňuje hustá kapalina. Při pohybu ručky se vnitřní válec tře o kapalinu a tlumí tak její pohyb.



Konstanta a citlivost

Konstanta přístroje je číslo, kterým je nutno vynásobit výchylku ručky v dílcích, abychom dostali hodnotu měřené veličiny. Konstanta udává jak velké množství měřené veličiny připadá na jeden dílek stupnice. Konstanta se udává vždy jako zlomek.

$$K = \frac{M}{\alpha_M} \quad (\text{jednotka měřené veličiny/dílek})$$

kde M ... maximální hodnota měřícího rozsahu přístroje
 α_M ... maximální výchylka ručky

Citlivost definujeme jako převrácenou hodnotu konstanty. Je to číslo, které udává, kolik dílků výchylky připadá na jednotku měřené veličiny.

$$C = \frac{1}{K} = \frac{\alpha_M}{M}$$

Třída přesnosti

Třída přesnosti zahrnuje všechny dílčí chyby a definuje tak maximální relativní chybu v celém měřícím rozsahu přístroje. Třída přesnosti je tedy maximální relativní chyba měřícího přístroje zaručená výrobcem při vztažných podmínkách.

Řada třídy přesnosti: 0,05 0,1 0,2 0,5 1 1,5 2,5 5 (nejhorší)

Vztažné podmínky (při dodržení garantuje výrobce třídu přesnosti):

- | | |
|---------------------------|--------------------------------------|
| a) teplota | $(23 \pm 10) \text{ }^\circ\text{C}$ |
| b) vnější magnetické pole | max. 0,5 mT |
| c) poloha přístroje | max. $\pm 5^\circ$ |
| d) frekvence | $\pm 10 \%$ od jmenovité hodnoty |

Vlastní spotřeba měřících přístrojů





Vlastní spotřebou měřícího přístroje máme namysli příkon, který přístroj spotřebuje k tomu, aby dosáhl plné výchylky. U stejnosměrných přístrojů se udává ve W, u střídavých přístrojů ve VA. Vlastní spotřeba se udává obvykle nepřímo velikostí odporu měřící cívky.

Příklad: Jaká je vlastní spotřeba stejnosměrného voltmetru s vnitřním odporem 5 k Ω /V s rozsahem 600 V.


$$P = \frac{U^2}{R} = \frac{600^2}{5000 \cdot 600} = 0,12 \text{ W}$$

5. Značky na měřicích přístrojích




a) druh proudu

	stejnoseměrný proud
	střídavý proud
	stejnoseměrný a střídavý proud
	trojfázový přístroj





b) měřicí ústrojí

	magnetoelektrický přístroj	ampérmetry, voltmetry
	feromagnetický přístroj	ampérmetry, voltmetry
	elektrodynamický přístroj stíněný	wattmetry
	rezonanční přístroj	kmitoměry
	indukční přístroj	elektroměry
	elektrostatický přístroj	vysokonapěťové voltmetry



c) poloha stupnice

	číselník ve svislé poloze – kolmo k podložce
	číselník ve vodorovné poloze
	číselník se sklonem 60° vůči vodorovné rovině




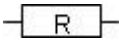
d) elektrická pevnost

	zkušební napětí 500 V
	zkušební napětí 2 kV (podle číslice uvnitř hvězdy)
	zkouška elektrické pevnosti se neprováděla
	elektrická pevnost přístroje nevyhovuje předpisům

e) třída přesnosti

1,5	třída přesnosti (např. 1,5) vyjádřená z největší hodnoty měřicího rozsahu
	třída přesnosti (např. 1,5) vyjádřená z délky stupnice
	třída přesnosti (např. 1,5) vyjádřená ze skutečné hodnoty

f) ostatní značky

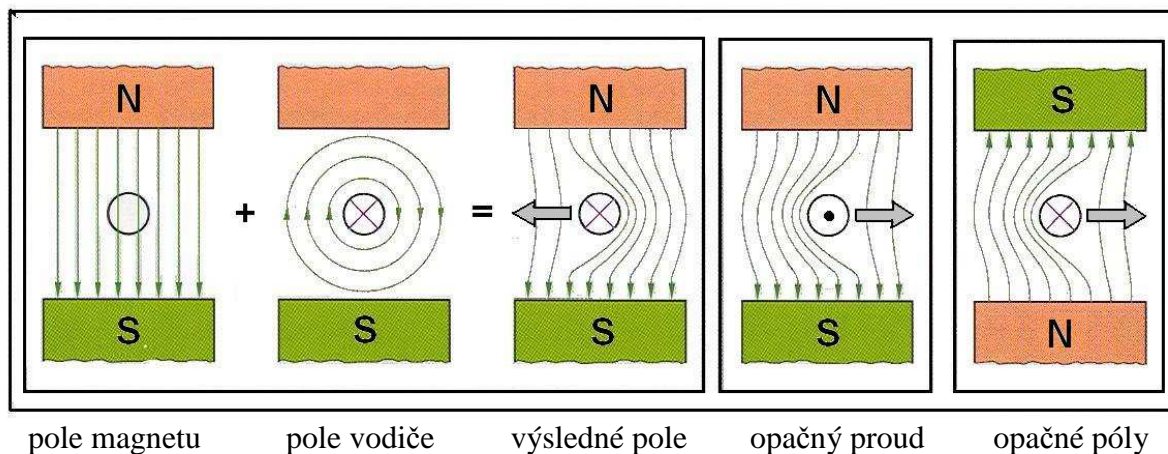
	uzemňovací svorka
	upozornění – viz dokumentace přístroje
	bočník
	předřadník

6. Magnetoelektrická měřící soustava

Značka:

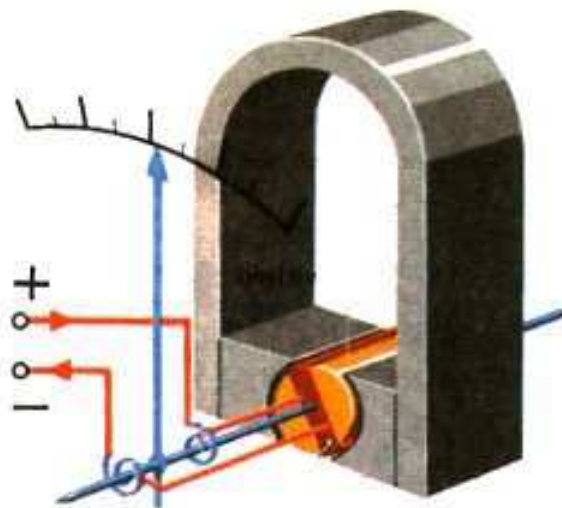


Fyzikální princip: pohyb vodiče protékaného proudem v magnetickém poli



Nachází-li se vodič protékaný proudem v magnetickém poli, působí na něj vychylující síla $F(N)$

Konstrukce: mezi póly permanentního magnetu je uložena otočná cívka s mnoha závity tenkého měděného drátu. Ručka měřícího přístroje je pevně spojena s hřídelkou. Při průchodu měřeného proudu působí na cívku síla, která se přenáší na ručku. Proti otočnému momentu cívky působí řídicí moment pružiny.

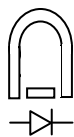


Vlastnosti:

- měření stejnosměrných proudů a napětí
- lineární stupnice
- tlumení magnetické

Magnetoelektrická soustava s usměrňovačem

Značka:

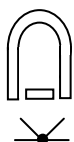


Pro měření střídavých veličin musíme opatřit magnetoelektrický přístroj např. můstkovým usměrňovačem. Magnetoelektrická soustava s usměrňovačem má menší přesnost vlivem úbytku napětí na diodách. Přístroj je také citlivější na proudové přetížení.

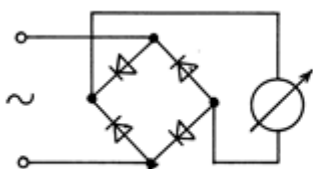
Magnetoelektrická soustava s usměrňovačem měří střední hodnoty, ale stupnice je cejkovaná v efektivních hodnotách. Měří pouze sinusové průběhy střídavých veličin.

Magnetoelektrická soustava s termočlánkem

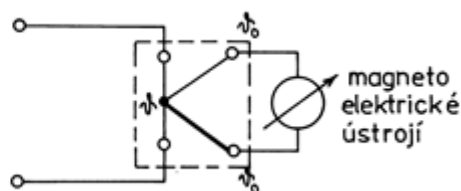
Značka:



Měřený střídavý proud zahřívá pevný konec termočlánku, na jeho koncích je termoelektrické napětí, které měří magnetoelektrický přístroj. Magnetoelektrická soustava s termočlánkem má menší přesnost vlivem větší vlastní spotřeby. Přístroj měří efektivní hodnotu i nesinusových veličin.



magnetoelektrická soustava
s usměrňovačem



magnetoelektrická soustava
s termočlánkem

7. Měření a regulace elektrického proudu

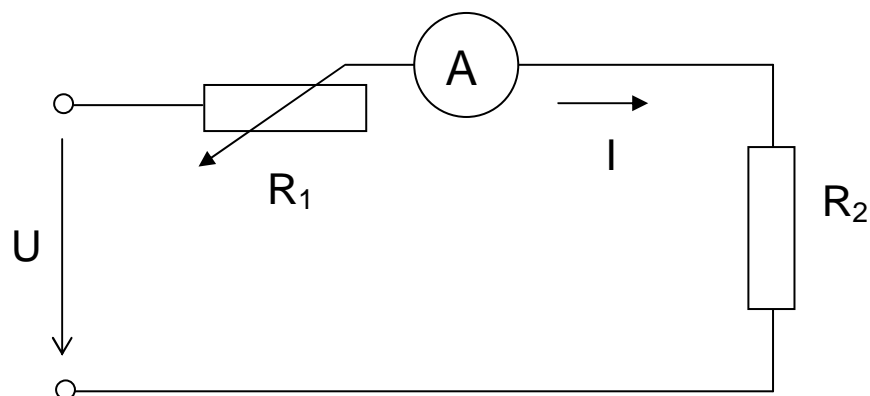
Elektrický proud

- elektrický proud I (ampér A) \longrightarrow
- elektrický proud je **usměrněný tok volných elektronů**,
- představujeme si, že „teče“ od + k – pólu,
- „teče“ jen mezi dvěma místy s různým potenciálem, která jsou vodičě spojená,
- aby elektrický proud „tek“ musí být splněny dvě podmínky:
 - uzavřený obvod
 - rozdíl potenciálů,
- elektrický proud může způsobit úraz.

Měření

- elektrický proud měříme ampérmetrem,
- ampérmetr se do obvodu zapojuje vždy sériově,
- ampérmetr má velmi malý vnitřní odpor \Rightarrow zapojení ampérmetru paralelně znamená zkrat,
- regulaci proudu provádíme reostatem, tedy změnou odporu $I = \frac{U}{R}$.

Schéma zapojení



Regulace proudu reostatem

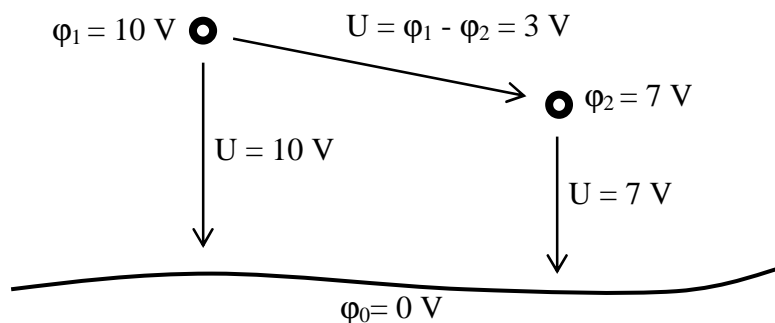
K regulaci proudu dochází změnou odporu reostatu. Čím větší je hodnota odporu R_1 , tím menší je proud v obvodu a naopak. Změna odporu se provádí změnou účinné délky odporové dráhy (jezdce).

Hodnota odporu je dána vztahem $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$. Změnou délky l se mění odpor R reostatu.

8. Měření a regulace elektrického napětí

Elektrické napětí, elektrický potenciál

- elektrické napětí U (volt V) \longrightarrow
- elektrický napětí **vzniká mezi dvěma místy s různým potenciálem**;
- hodnota napětí je tedy dána rozdílem potenciálů $U = \varphi_1 - \varphi_2$ (V);
- každý hmotný bod má určitý potenciál

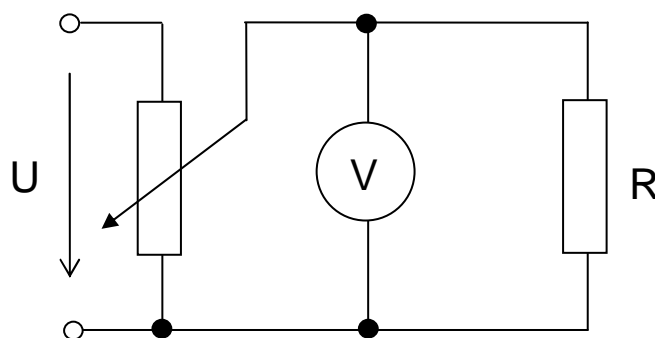


- potenciál φ (V) je úměrný **množství práce potřebné pro přenesení elektrického náboje** z místa s nulovým potenciálem do daného místa;
- jako místo s nulovým potenciálem volíme zem (kostru, kolej, ...);
- napětí „neteče“; zjednodušeně napětí buď „je“ nebo „není“;
- elektrické napětí nemůže způsobit úraz.

Měření

- elektrické napětí měříme voltmetrem,
- voltmetr se do obvodu zapojuje vždy paralelně,
- voltmetr má velmi velký vnitřní odpor \Rightarrow zapojení voltmetru sériově znamená přerušování elektrického obvodu,
- regulaci napětí provádíme potenciometrem, který pracuje na principu děliče napětí.

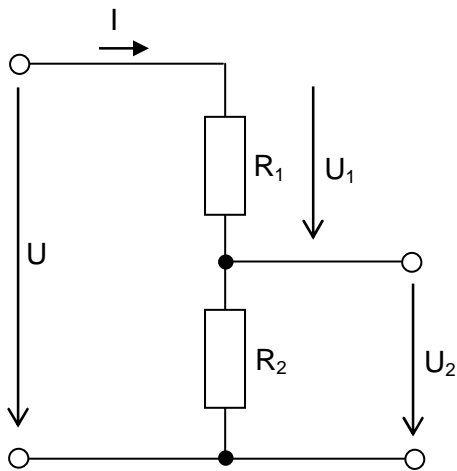
Schéma zapojení



Regulace napětí potenciometrem

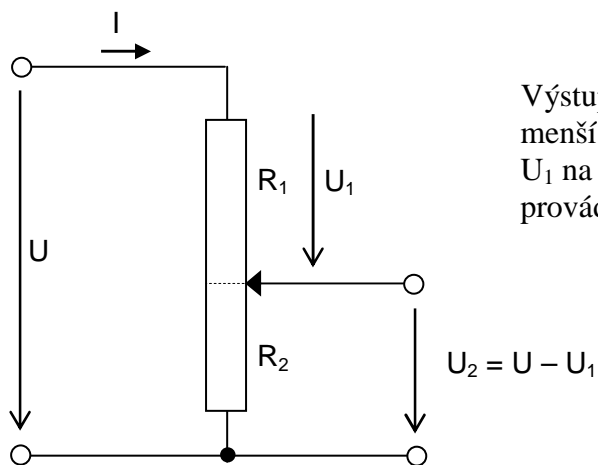
Potenciometr pracuje na principu děliče napětí.

Dělič napětí



$$I = \frac{U}{R_c} = \frac{U}{R_1 + R_2}$$
$$U_2 = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U$$

Potenciometr



Výstupní napětí U_2 (úbytek na odporu R_2) je menší oproti napájecímu napětí U o úbytek napětí U_1 na rezistoru R_1 . Změnu výstupního napětí provádíme posunováním jezdce.

Poznámka:

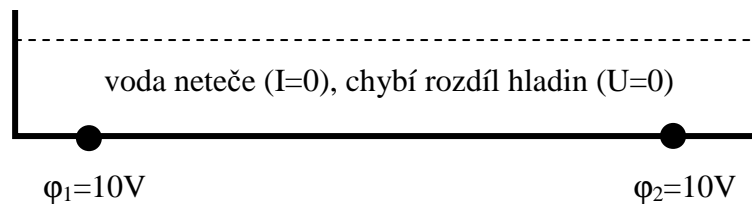
Pro lepší pochopení a přiblížení **elektrického proudu a napětí** si můžeme uvést analogii na proud vody:

Elektrický proud nabitých částic si lze představit jako **proud vody** v potrubí.

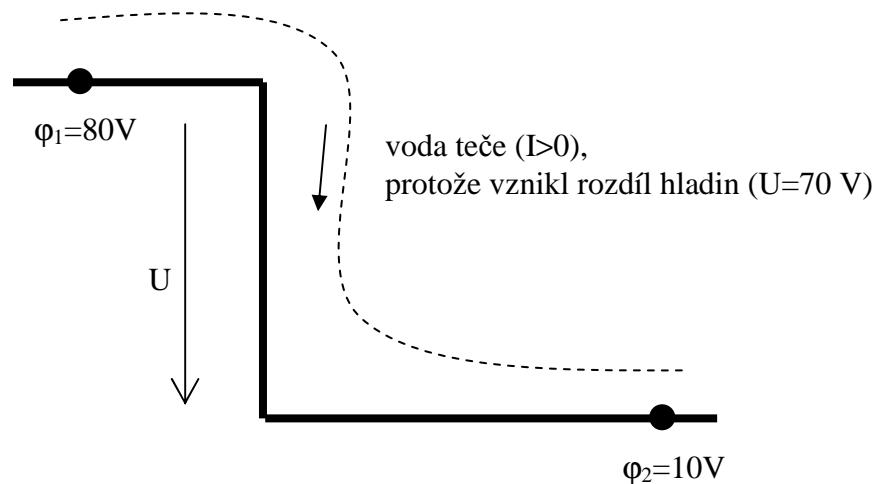
Rozdíl dvou potenciálů (napětí) si lze představit jako **rozdíl dvou výšek** – hladin.

Mezi dvěma místy se stejným potenciálem elektrický proud neteče. Analogicky např. v jezírku voda neteče, protože chybí rozdíl hladin.

Naopak mezi dvěma propojenými místy s velkým rozdílem potenciálů teče velký proud. Analogicky u vodopádu je rozdíl výšek velký.



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = 0 \text{ V}$$



$$U = \varphi_1 - \varphi_2 = 70 \text{ V}$$

Příčinou toku vody v korytě řeky je rozdíl výšek (teče z míst s větší nadmořskou výškou k místům s menší nadmořskou výškou).

Příčinou toku elektrického proudu ve vodiči je rozdíl potenciálů (proud teče z místa s větším potenciálem k místu s menším potenciálem).

9. Měření odporu přímou a Ohmovou metodou

Elektrický odpor

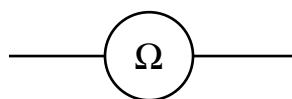
- elektrický odpor R (ohm Ω)
- elektrická vodivost G (siemens S) $G = \frac{1}{R}$
- fyzikální princip: Volné elektrony při průchodu krystalovou mříží naráží na jádra atomů. Při srážce ztrácí část své energie \Rightarrow materiál se zahřívá. Na opětovný uspořádaný pohyb potřebují novou energii \Rightarrow úbytek napětí. Různé materiály mají různou krystalovou mříž \Rightarrow různé materiály mají různý odpor.
- výpočet odporu vodiče $R = \rho \cdot \frac{l}{S}$ pro $20\text{ }^\circ\text{C}$
kde ρ ... rezistivita (obvykle $\mu\Omega\text{m}$)
 l ... délka vodiče (m)
 S ... průřez (mm^2)
- závislost odporu na teplotě $R_{\vartheta} = R_{20} \cdot [1 + \alpha(\vartheta - 20)]$
kde R_{20} ... odpor při teplotě $t = 20\text{ }^\circ\text{C}$ (Ω)
 α ... součinitel teplotní závislosti odporu (K^{-1})
 ϑ ... teplota (jiná než $20\text{ }^\circ\text{C}$)

kovy – s rostoucí teplotou odpor vodiče roste
polovodič, izolant – s rostoucí teplotou odpor klesá

- Ohmův zákon $R = \frac{U}{I}$

Přímé měření odporu

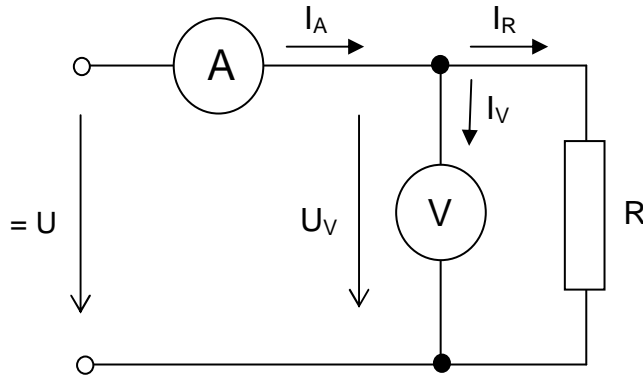
Elektrický odpor měříme ohmmetry. Ohmmetr je přístroj přímo ukazující hodnotu odporu. Ručkové ohmmetry mají na začátku stupnice obvykle ∞ a na konci 0. Přístroj se zapojuje přímo k neznámému odporu (paralelně), který nesmí být v měřeném obvodu pod napětím. Ohmmetry vyžadují zdroj elektrického napětí (nejčastěji baterie).



Měření elektrického odporu Ohmovou metodou

Schéma zapojení

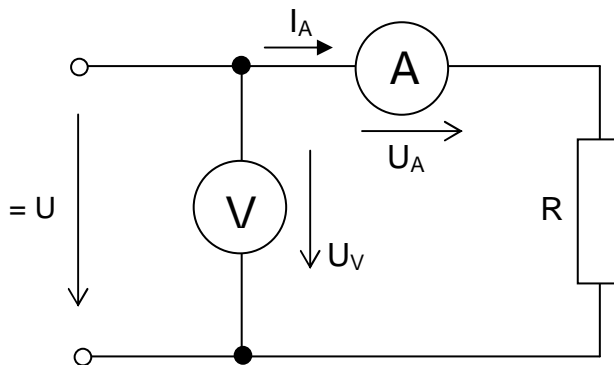
a) měření malých odporů



$$R = \frac{U_V}{I_R} = \frac{U_V}{I_A - I_V} = \frac{U_V}{I_A - \frac{U_V}{R_V}}$$

Metodu je možné použít jen pro malé odpory, protože ampérmetr měří proud protékající nejen rezistorem, ale i voltmetrem. Bude-li odpor malý, poteče proud rezistorem a jen zanedbatelné množství voltmetrem (má velký odpor). Bude-li ale odpor velmi vysoký, bude ampérmetr měřit proud nejen rezistorem, ale i voltmetrem, což výrazně ovlivní výpočet odporu.

b) měření velkých odporů



$$R = \frac{U_R}{I_A} = \frac{U_V - U_A}{I_A} = \frac{U_V - R_A \cdot I_A}{I_A}$$

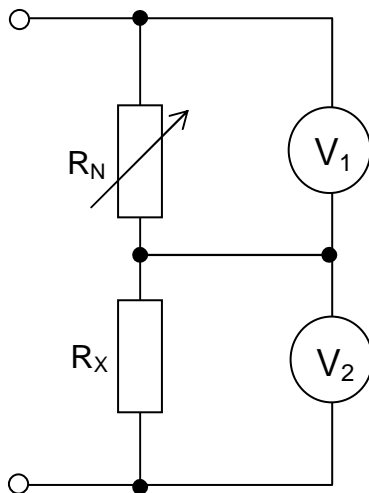
Metodu je možné použít jen pro velké odpory, protože voltmetr měří úbytek napětí nejen na rezistoru, ale i na ampérmetru. Bude-li odpor velký, bude úbytek napětí především na rezistoru a jen zanedbatelný na ampérmetru (má malý odpor). Bude-li ale odpor velmi malý, voltmetr změří úbytek na rezistoru a na ampérmetru, což výrazně ovlivní výpočet odporu.

Hraniční odpor $R_H = \sqrt{R_A \cdot R_V}$ (Ω)

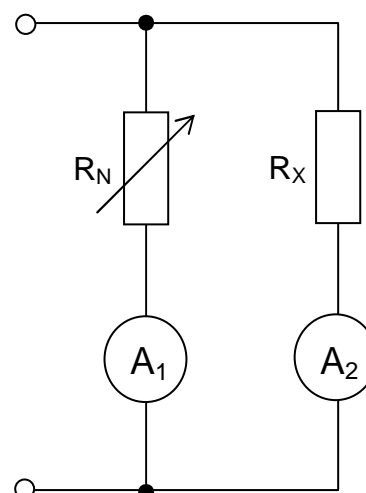
10. Měření odporu porovnávací a můstkovou metodou

Porovnávací metoda

a) malé rezistory



b) velké rezistory



R_N ... odporová dekáda, známý normálový odpor

R_X ... neznámý měřený odpor

Měníme hodnotu odporové dekády R_N tak dlouho, až se rovnají úbytky napětí na rezistorech u první metody nebo až se rovnají protékané proudy u druhé metody. Hodnotu neznámého odporu pak přímo odečteme na odporové dekádě.

Nemáme-li vhodné dekády, můžeme neznámý odpor vypočítat (pak se nejedná o metodu porovnávací, ale o metodu náhradní).

Napětí na rezistorech v sérii se rozdělí
Podle velikosti odporů

$$\frac{R_N}{R_X} = \frac{U_1}{U_2}$$

Z toho tedy pro R_X :

$$R_X = R_N \cdot \frac{U_2}{U_1}$$

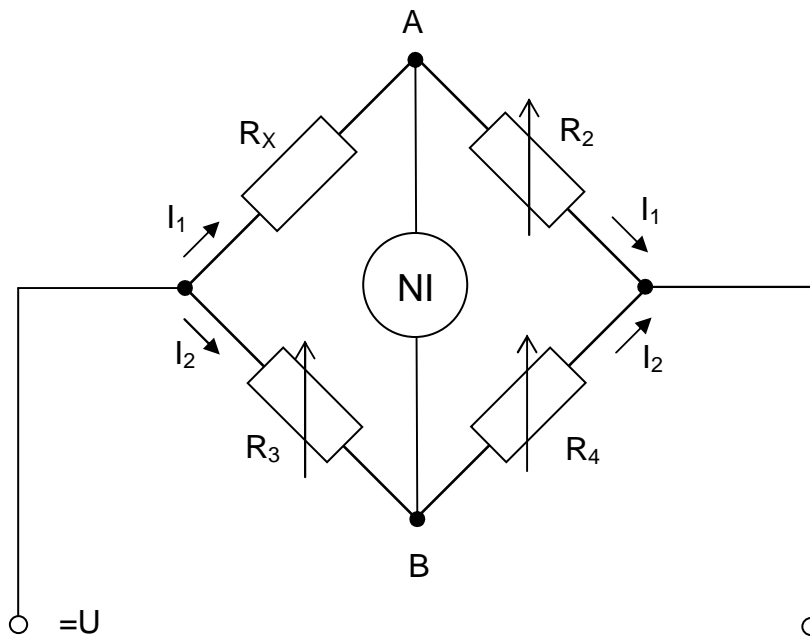
Proudy se rozdělí podle poměru
odporů:

$$\frac{R_X}{R_N} = \frac{I_1}{I_2}$$

Z toho tedy pro R_X :

$$R_X = R_N \cdot \frac{I_1}{I_2}$$

Wheatstoneův můstek



R_X ... neznámý měřený odpor
 R_2, R_3, R_4 ... odporové dekády
NI ... nulový indikátor (ss voltmetr, ss miliampérmetr, galvanometr)

Wheatstoneův můstek vychází z teorie obecného můstku (str. 24), kdy pro rezistor platí, že $Z = R$. Proměnnými rezistory R_2 , R_3 a R_4 uvedeme můstek do vyváženého stavu. Pomocí rezistorů R_3 a R_4 skokově, rezistorem R_2 se jemně doladí vyvážený stav. To znamená, že mezi body A a B je nulové napětí a neprotéká proud. Tento stav indikuje nulový indikátor (galvanometr nebo elektronický voltmetr).

Pro vyvážený stav můžeme psát:

$$I_1 \cdot R_X = I_2 \cdot R_3$$

$$I_1 \cdot R_2 = I_2 \cdot R_4$$

Podělením obou rovnic dostaneme:

$$\frac{R_X}{R_2} = \frac{R_3}{R_4}$$

Výsledný vztah pro neznámý odpor:

$$R_X = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

11. Měření kmitočtu, vibrační měřicí soustava

Kmitočtet (frekvence)

- kmitočtet f (hertz Hz)
- obě půlvlny střídavého signálu nazýváme jeden kmit
- kmitočtet udává počet kmitů za jednu sekundu
- čas potřebný k jednomu kmitu se nazývá perioda T (sekunda s) $T = \frac{1}{f}$
- síťový kmitočtet v Evropě, Asii a Austrálii je 50 Hz; v Americe a v Japonsku je 60 Hz

Měření

Kmitočtet měříme kmitoměrem. Tyto měřicí přístroje se zapojují do obvodu vždy paralelně a mají velmi vysoký vnitřní odpor.

Používají se kmitoměry

- vibrační
- ručkové
- číslicové

V současné době se pro orientační ověření kmitočtu používají kmitoměry vibrační, pro laboratorní měření kmitočtu výhradně číslicové. Kmitočtet lze měřit také čítačem nebo pomocí osciloskopu.

Vibrační měřicí soustava

Značka:



Fyzikální princip: rezonance části přístroje s kmity měřené střídavé veličiny

Konstrukce: v elektromagnetickém poli cívky je řada jazýčků z feromagnetického materiálu (např. ocel, železo, nikl, kobalt apod.). Jazýčky mají různou délku. Proud o neznámé frekvenci rozkmitá svým magnetickým polem pouze ten jazýček, jehož mechanická frekvence je v rezonanci s frekvencí magnetického pole.

Vlastnosti:

- používá se výhradně k měření kmitočtu
- přístroj nemá ukazatel, pružiny ani tlumení
- měřicí rozsah 15 až 1000 Hz, obvykle ale jen do 120 Hz (omezeno délkou jazýčků)
- třída přesnosti obvykle 0,5
- teplota má rušivý vliv – změna vlastní frekvence jazýčků

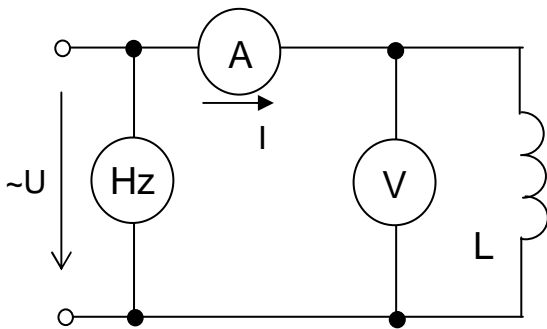
12. Měření vlastní indukčnosti Ohmovou metodou

Vlastní indukčnost

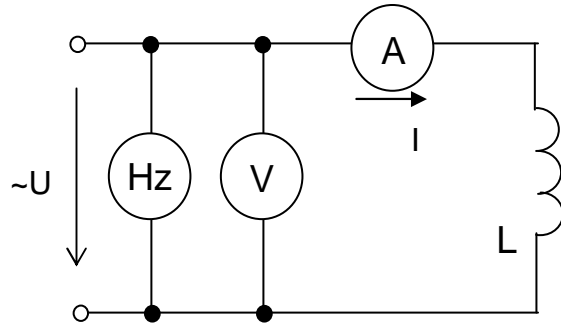
- vlastní indukčnost L (henry H);
- vlastní indukčnost je schopnost cívky indukovat ve svých závitech napětí (vyjadřuje schopnost cívky změnit elektrickou energii na energii magnetického pole);
- indukčnost je fyzikální veličina, vyjadřující velikost magnetického indukčního toku Φ kolem cívky při jednotkovém elektrickém proudu (1 A) procházejícím cívkou;
- prochází-li cívkou s indukčností 1 H elektrický proud 1 A, vznikne kolem cívky magnetický indukční tok 1 Wb;
- cívka je pasivní, lineární a frekvenčně závislá součástka.

Schéma zapojení

a) měření malých indukčností



b) měření velkých indukčností



Změříme

- I (mA), U (V), f (Hz), činný odpor cívky R (Ω)

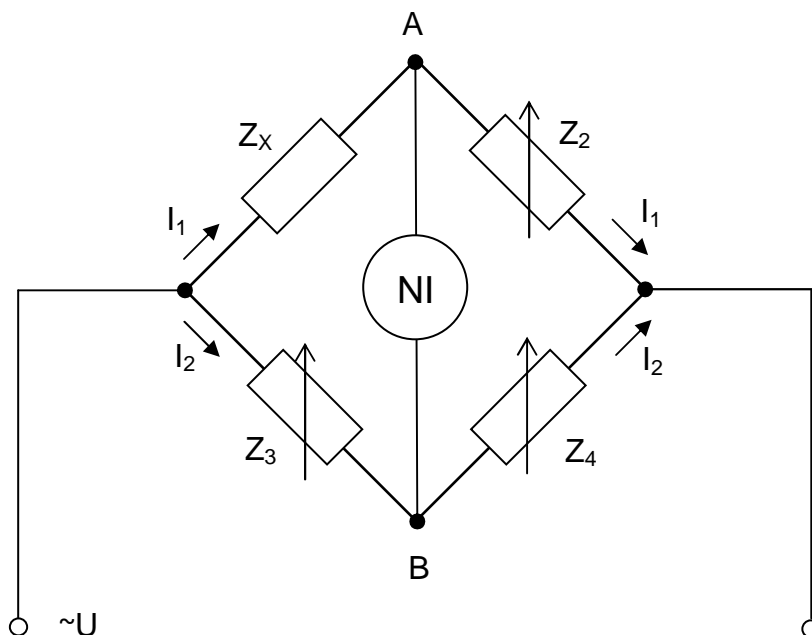
Vypočítáme

- impedanci cívky $Z = \frac{U}{I}$ (Ω)
- induktivní reaktanci $X_L = \sqrt{Z^2 - R^2}$ (Ω)
- indukčnost $X_L = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot L \Rightarrow L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f}$

$$L = \frac{X_L}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{Z^2 - R^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} = \frac{\sqrt{\frac{U^2}{I^2} - R^2}}{2 \cdot \pi \cdot f} \quad (\text{H})$$

13. Měření vlastní indukčnosti - můstková a rezonanční metoda

Teorie obecného můstku



Z_X ... neznámá impedance
 Z_2, Z_3, Z_4 ... proměnné impedance
 NI ... nulový indikátor (ss voltmetr, ss miliampérmetr, galvanometr)

Proměnnými impedancemi Z_2 , Z_3 a Z_4 uvedeme můstek do vyváženého stavu. To znamená, že mezi body A a B je nulové napětí a neprotéká proud. Tento stav indikuje nulový indikátor (galvanometr nebo elektronický voltmetr).

Pro vyvážený stav můžeme psát:

$$\begin{aligned} \Delta U &= \Delta U \\ I_1 \cdot Z_X &= I_2 \cdot Z_3 \\ I_1 \cdot Z_2 &= I_2 \cdot Z_4 \end{aligned}$$

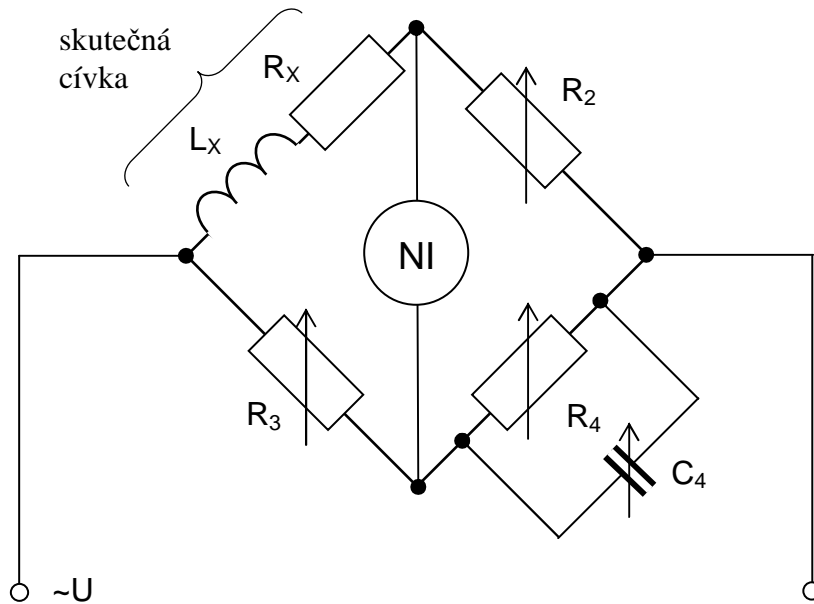
Podělením obou rovnic dostaneme:

$$\frac{Z_X}{Z_2} = \frac{Z_3}{Z_4} \quad \text{nebo také platí} \quad Z_X \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

Výsledný vztah pro neznámou impedaci:

$$Z_X = Z_2 \cdot \frac{Z_3}{Z_4}$$

Maxwell-Wienův můstek



$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

$$L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot C_4$$

Použití: měření vlastních indukčností všech hodnot; měření odporu vinutí

Maxwell-Wienův můstek vychází z teorie obecného můstku, kdy za jednotlivé impedance ve větvích můstku dosadíme (viz část pro zájemce). Kromě Maxwell-Wienova můstku lze pro měření vlastní indukčnosti použít také Owenův můstek, který je zvláště vhodný pro měření velkých indukčností.



Část pro zájemce

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

$$(R_x + j\omega \cdot L_x) \cdot \frac{1}{\frac{1}{R_4} + j\omega \cdot C_4} = R_2 \cdot R_3$$

$$R_x + j\omega \cdot L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot \left(\frac{1}{R_4} + j\omega \cdot C_4 \right)$$

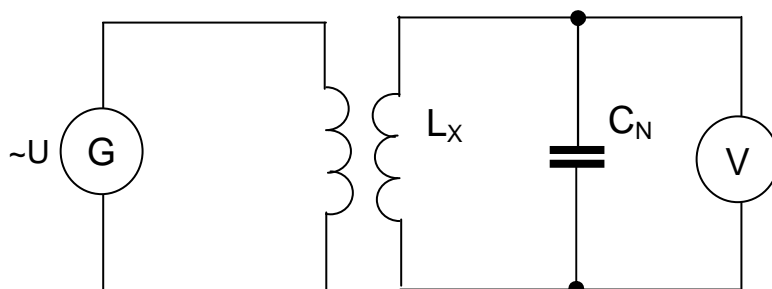
$$R_x + j\omega \cdot L_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4} + j\omega \cdot R_2 R_3 C_4$$

Pro reálnou (činnou) složku platí: $R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$

Pro imaginární (jalovou) složku platí: $L_x = R_2 \cdot R_3 \cdot C_4$



Rezonanční metoda



G ... generátor střídavého napětí s proměnnou frekvencí

L_X ... neznámá vlastní indukčnost

C_N ... známá normálová kapacita

Změnou frekvence generátoru se obvod $L_X C_N$ uvede do paralelní rezonance, při které je nejvyšší napětí, které indukuje voltmetr. Voltmetr tedy slouží pouze k indikaci rezonančního stavu.

V rezonanci platí:

$$X_L = X_C$$

$$2 \cdot \pi \cdot f \cdot L_X = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C_N}$$

$$4 \cdot \pi^2 \cdot f^2 \cdot L_X \cdot C_N = 1$$

$$f^2 = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot L_X \cdot C_N}$$

$$f = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L_X \cdot C_N}}$$

Pro neznámou indukčnost platí

$$L_X = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_N^2 \cdot C_N} \quad (\text{H})$$

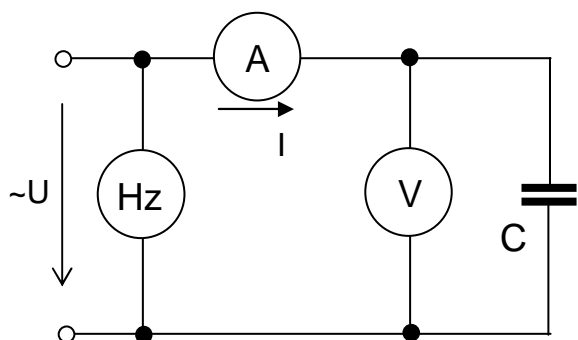
14. Měření kapacity Ohmovou metodou

Kapacita

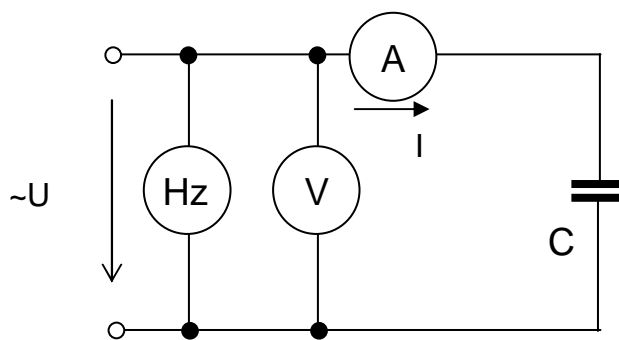
- kapacita C (farad F);
- kapacita deskového kondenzátoru $C = \varepsilon_0 \varepsilon_r \frac{S}{d}$ kde ε ... permitivita
 S ... plocha elektrod
 d ... tloušťka dielektrika
- kapacita je schopnost kondenzátoru uchovávat náboj;
- kondenzátor je pasivní, lineární a frekvenčně závislá součástka;
- po připojení kondenzátoru na stejnosměrné napětí se kondenzátor nabíjí; po nabití proud kondenzátorem už neprochází a kondenzátor se chová jako nekonečně velký odpor.

Schéma zapojení

a) měření velkých kapacit



b) měření malých kapacit



Změříme

- I (mA), U (V), f (Hz)

Vypočítáme

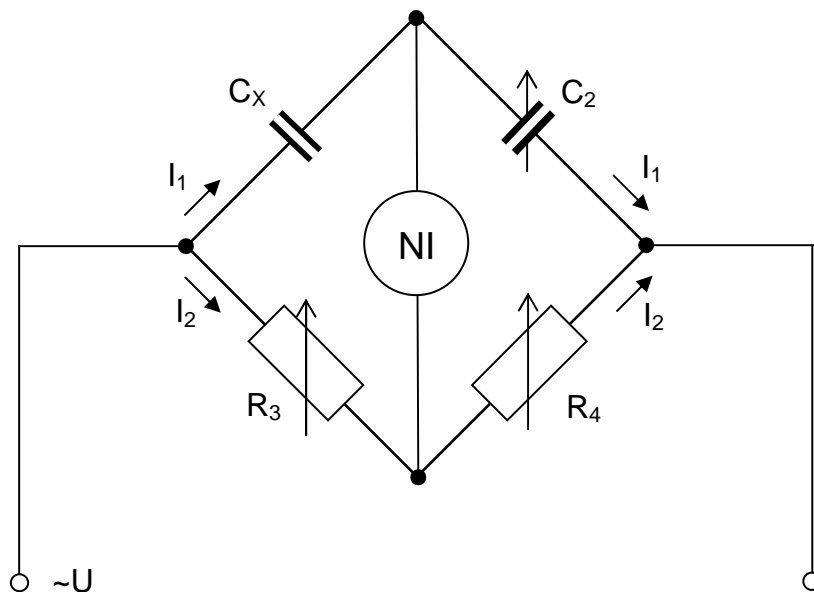
- kapacitní reaktanci $X_C = Z = \frac{U}{I}$ (Ω) předpokládáme ideální kondenzátor
- kapacitu $X_C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \Rightarrow C = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot X_C}$

za X_C dosadíme z Ohmova zákona

$$C = \frac{I}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot U} \quad (\text{F})$$

15. Měření kapacity - můstková a rezonanční metoda

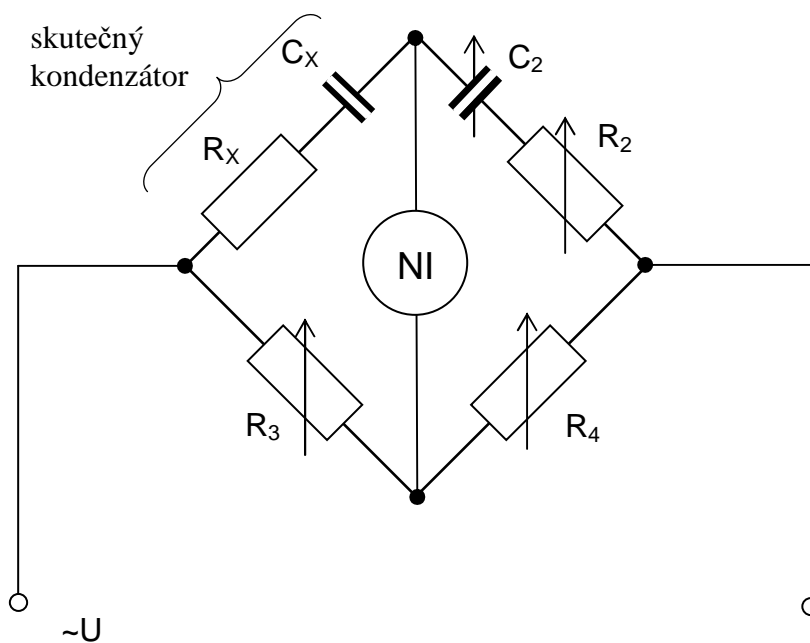
de Sautyho můstek



$$C_x = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

Použití: měření kondenzátorů s kvalitním dielektrikem (ideální kondenzátory)

Wienův můstek



Rezistor R_x v náhradním schématu představuje ztráty kondenzátoru.

$$C_x = C_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$$

$$R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$$

Použití: měření reálných kondenzátorů

Obě můstkové metody vychází z teorie obecného můstku (str. 24).



Část pro zájemce – Wienův můstek

$$Z_x \cdot Z_4 = Z_2 \cdot Z_3$$

$$\left(R_x + \frac{1}{j\omega \cdot C_x} \right) \cdot R_4 = \left(R_2 + \frac{1}{j\omega \cdot C_2} \right) \cdot R_3$$

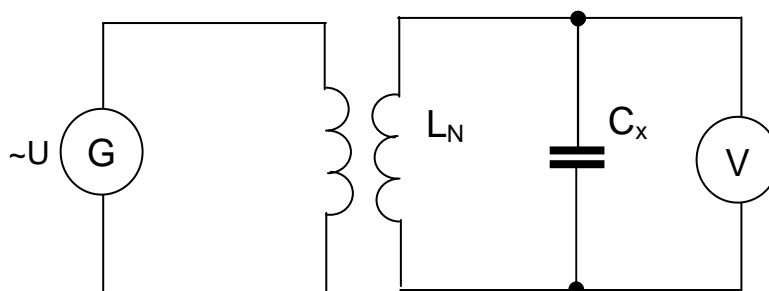
$$R_x \cdot R_4 + \frac{R_4}{j\omega \cdot C_x} = R_2 \cdot R_3 + \frac{R_3}{j\omega \cdot C_2}$$

Pro reálnou (činnou) složku platí: $R_x = R_2 \cdot \frac{R_3}{R_4}$

Pro imaginární (jalovou) složku platí: $C_x = R_2 \cdot \frac{R_4}{R_3}$



Rezonanční metoda



G ... generátor střídavého napětí s proměnnou frekvencí

L_N ... známá normálová vlastní indukčnost

C_x ... neznámá kapacita

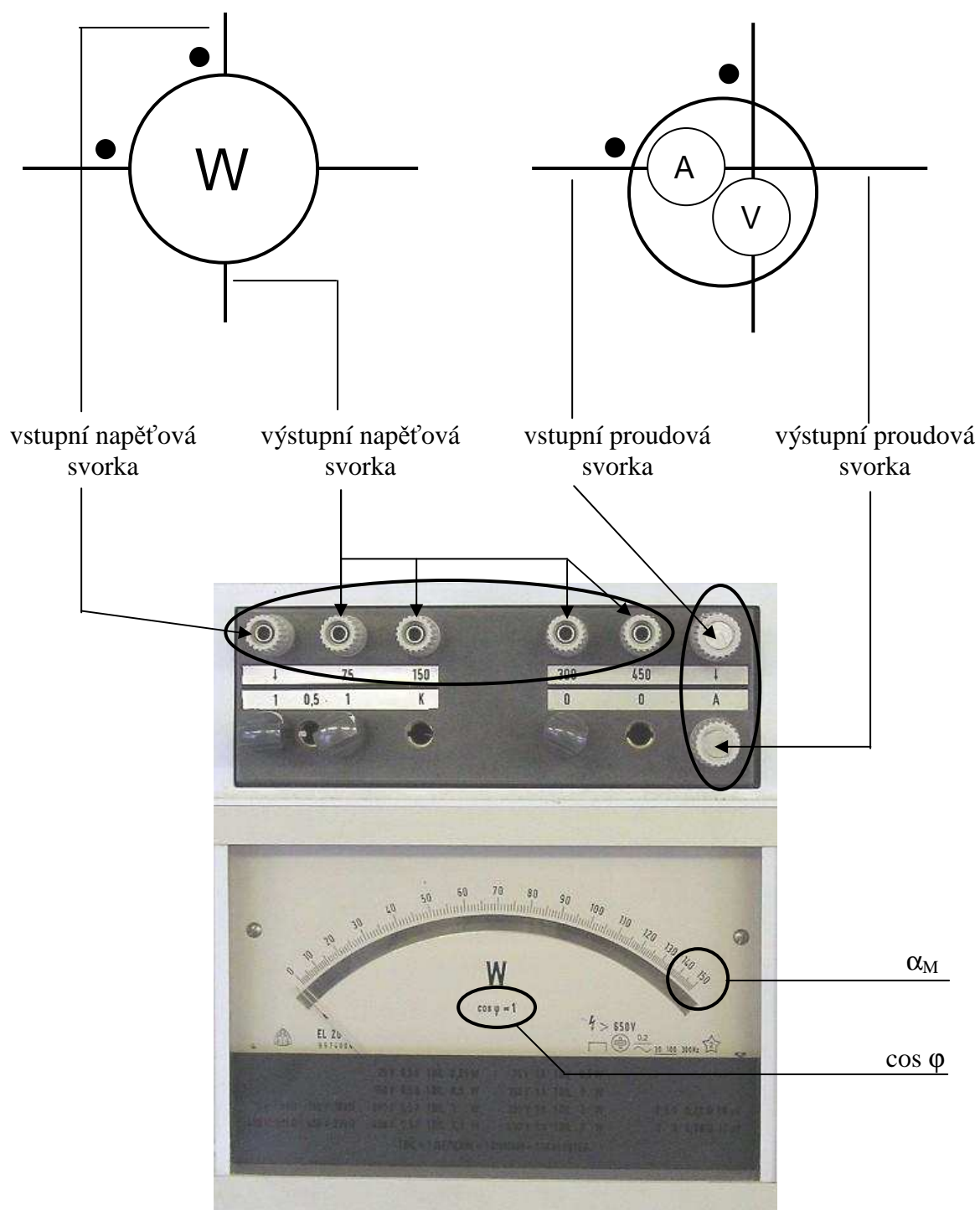
Změnou frekvence generátoru se obvod $L_N C_x$ uvede do paralelní rezonance, při které je nejvyšší napětí, které indikuje voltmetr. Voltmetr tedy slouží pouze k indikaci rezonančního stavu.

Pro neznámou kapacitu platí

$$C_x = \frac{1}{4 \cdot \pi^2 \cdot f_N^2 \cdot L_N} \quad (\text{F})$$

16. Wattmetr, elektrodynamická měřicí soustava

Wattmetr je přístroj pro měření stejnosměrného a střídavého činného výkonu. Wattmetr si můžeme představit jako ampérmetr a voltmetr v jednom přístroji. Zapojuje se tedy do obvodu pomocí dvou dvojic svorek. Jedna měřicí cívka je proudová, zapojuje se do obvodu sériově a má malý vnitřní odpor. Druhá cívka je napěťová, zapojuje se do obvodu paralelně a má velký vnitřní odpor.



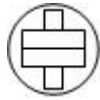
Konstanta wattmetru

$$K_w = \frac{M_U \cdot M_I \cdot \cos\varphi}{\alpha_M}$$

- kde M_U ... maximální hodnota měřicího rozsahu napěťové cívky wattmetru
 M_I ... maximální hodnota měřicího rozsahu proudové cívky wattmetru
 $\cos\varphi$... účinník wattmetru
 α_M ... maximální výchylka ručky

Elektrodynamická měřící soustava

Wattmetry se nejčastěji konstruují jako elektrodynamické měřící přístroje.



Značka:

Fyzikální princip: pohyb vodiče protékaného proudem v magnetickém poli

Konstrukce: Dvě cívky, jedna pevná s malým počtem závitů, druhá pohyblivá v jádře pevné s velkým počtem závitů. Proud v pevné cívce vytváří magnetické pole, ve kterém je pohyblivá cívka s vlastním polem. Vzniklá síla se přenáší na ručku. Pevná cívka je proudová a pohyblivá cívka je napěťová.

Vlastnosti:

- měření stejnosměrných i střídavých proudů a napětí (používá se málo)
- měření stejnosměrného a činného střídavého výkonu
- stupnice kvadratická pro měření U a I a lineární pro měření P
- mezní frekvence 1 kHz
- třída přesnosti obvykle 0,2 (mohou být 0,1 a 0,5)
- tlumení vzduchové

17. Měření elektrického výkonu

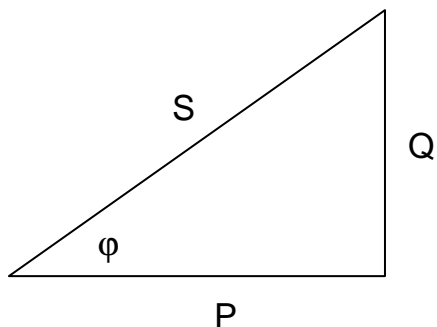
Elektrický výkon

- výkon ss proudu $P = U \cdot I$ (W)
- výkon st proudu
 - a) jednofázový
 - činný výkon $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (W)
 - jalový výkon $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (VAr, var)
 - zdánlivý výkon $S = U \cdot I$ (VA)
 - b) trojfázový
 - činný výkon $P = 3 \cdot U_F \cdot I \cdot \cos \varphi$ (W)
 $P = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I \cdot \cos \varphi$ (W)
 - jalový výkon $Q = 3 \cdot U_F \cdot I \cdot \sin \varphi$ (var)
 $Q = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I \cdot \sin \varphi$ (var)
 - zdánlivý výkon $S = 3 \cdot U_F \cdot I$ (VA)
 $S = \sqrt{3} \cdot U_S \cdot I$ (VA)

$\cos \varphi$... účinník; $\langle -1; 1 \rangle$
 U_F ... fázové napětí; napětí mezi fázovým vodičem a středním pracovním (L a N)
 U_S ... sdružené napětí; napětí mezi fázovými vodiči (L a L)

- Činný výkon se přeměňuje na užitečnou práci.
- Jalový výkon se spotřebuje na vytvoření elektrostatického nebo elektromagnetického pole.
- Zdánlivý výkon je celkový výkon odebíraný spotřebičem

Trojúhelník výkonů



$$S^2 = P^2 + Q^2$$

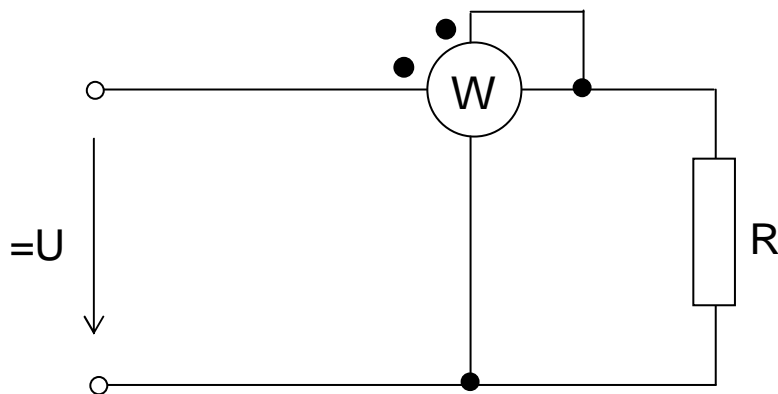
$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

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

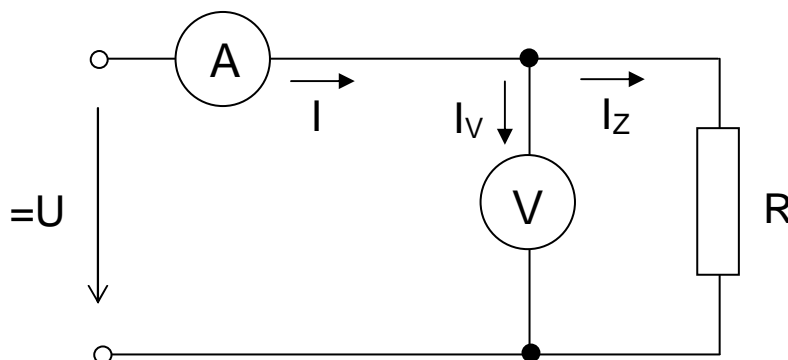
Měření stejnosměrného výkonu

V obvodu stejnosměrného proudu je výkon na zátěži dán vztahem $P = U \cdot I$ (W)

Přímé měření



Nepřímé měření



Ampérmetr měří nejen proud tekoucí zátěží I_Z , ale i proud tekoucí voltmetrem I_V . Proud voltmetrem je sice malý a většinou ho můžeme zanedbat, ale v případě že má zátěž velký odpor (měření malých výkonů) musíme provést korekci:

$$P = U \cdot I_Z = U \cdot (I - I_V) = U \cdot I - U \cdot I_V = U \cdot I - \Delta P_V$$

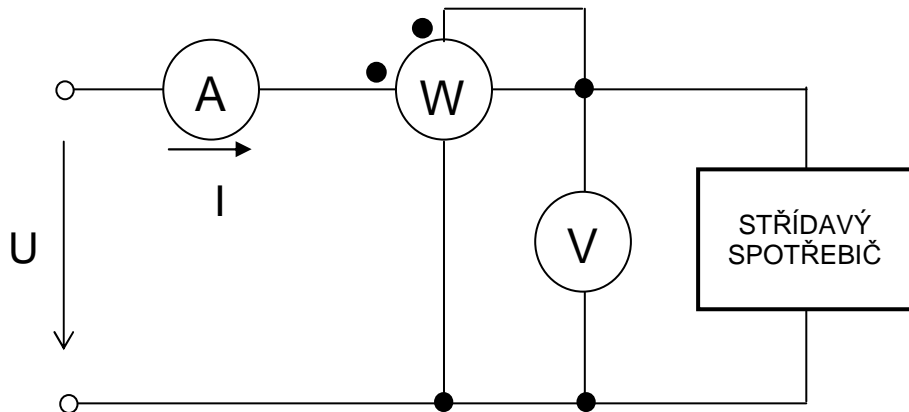
ΔP_V ... korekce výkonu, výkon ztracený ve voltmetru (W)

$$\Delta P_V = \frac{U^2}{R_V}$$

Abychom se vyhnuli početní korekci, stačí umístit sériově k voltmetru spínač. Při odečítání proudu voltmetr odpojíme. Ampérmetr pak ukazuje proud tekoucí přímo zátěží.

Měření střídavého výkonu a měření střídavých veličin

Měření na obecném jednofázovém spotřebiči



Zadáno: U_N, f_N (štítkové hodnoty)

Změříme: U, I, P , případně f

Vypočítáme: $S, \cos \varphi, Q, Z, R, X, I_C, I_I$

• zdánlivý výkon $S = U \cdot I$ (VA)

• účinník $P = U \cdot I \cdot \cos \varphi$ (W)

$$\cos \varphi = \frac{P}{U \cdot I} = \frac{P}{S} \quad (-)$$

• jalový výkon $Q = U \cdot I \cdot \sin \varphi$ (VA_r, var)

nebo

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2}$$

$$Q = \sqrt{S^2 - P^2}$$

• impedance $Z = \frac{U}{I}$ (Ω)

- složky impedance

- odpor $R = Z \cdot \cos \varphi$ (Ω)

- reaktance $X = Z \cdot \sin \varphi$ (Ω)

- musí platit: $Z = \sqrt{R^2 + X^2}$ (Ω)

- složky proudu

- činný proud $I_c = I \cdot \cos \varphi$ (A)

- jalový proud $I_j = I \cdot \sin \varphi$ (A)

- musí platit: $I = \sqrt{I_c^2 + I_j^2}$ (A)

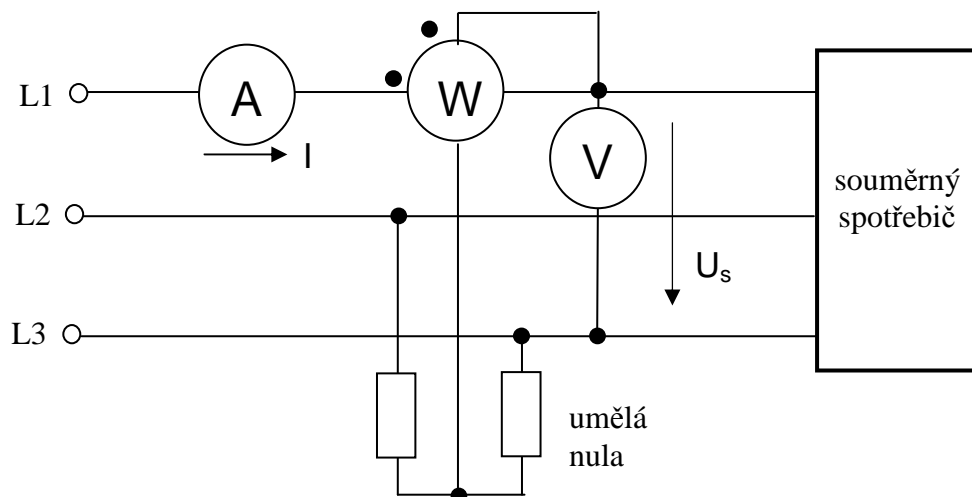
Činný proud je proud rezistorem a způsobuje činný výkon $P = U \cdot I_c$

Jalový proud je proud cívku a kondenzátorem a způsobuje jalový výkon $Q = U \cdot I_j$

Měření činných výkonů v 3f soustavě se souměrnou zátěží

Souměrná zátěž – je-li síť zatížena souměrným spotřebičem, protéká v každé fázi stejný proud (např. motor). Naopak nesouměrný spotřebič odebírá v každé fázi jiný proud (např. oblouková pec).

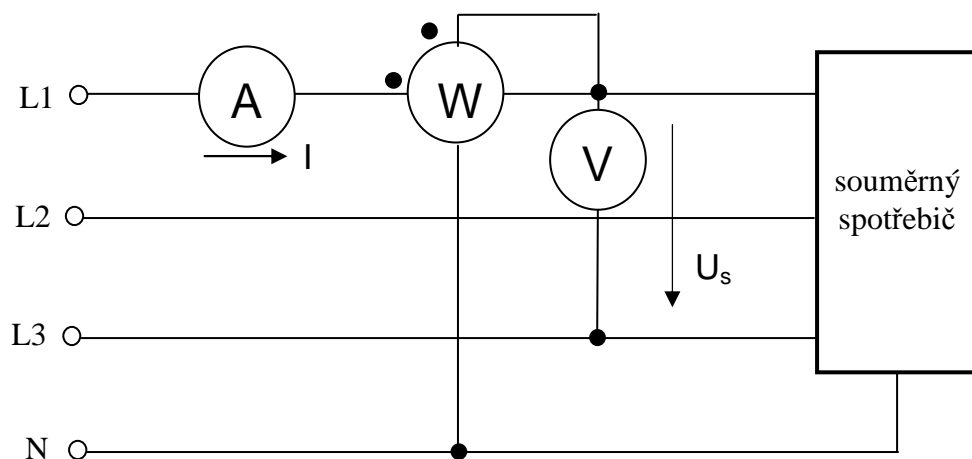
a) měření v třívodičové soustavě



$$\text{celkový činný výkon } P_c = 3 \cdot P_1 \quad (\text{W})$$

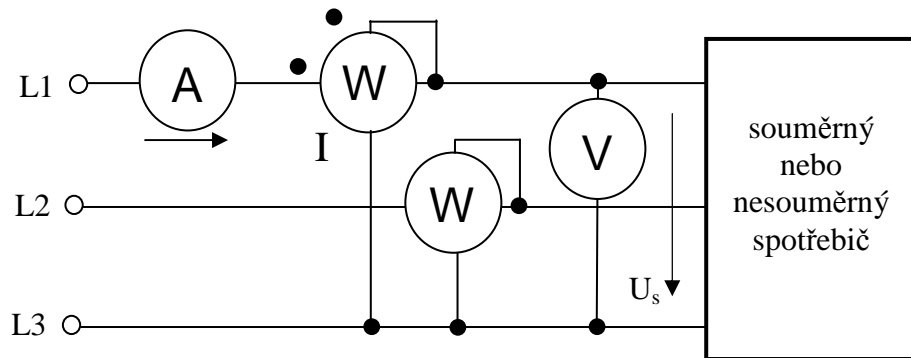
Umělou nulu vytvoříme pomocí dvou rezistorů, jejichž odpor musí být stejný jako vnitřní odpor napěťové cívky wattmetru.

b) měření ve čtyřvodičové soustavě



$$\text{celkový činný výkon } P_c = 3 \cdot P_1 \quad (\text{W})$$

c) měření dvěma wattmetry – tzv. Aronovo zapojení



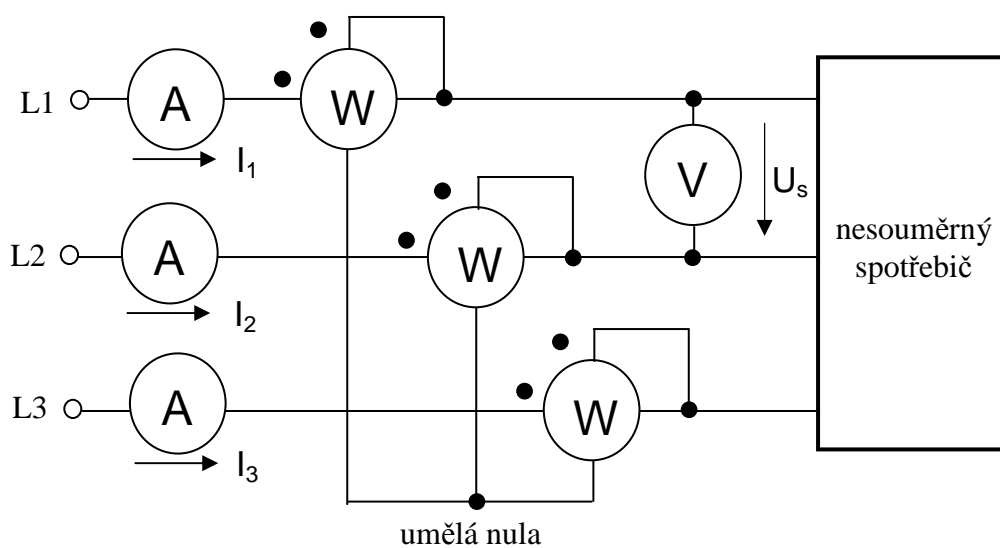
$$\text{celkový činný výkon } P_c = P_1 + P_2 = K_w \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (\text{W})$$

Aronovo zapojení využívá tzv. Blondelova teorému: Pro měření činného výkonu v n-fázové soustavě stačí (n-1) wattmetrů. Napět'ové cívky wattmetrů připojíme na sdružené napětí. Wattmetry neukazují výkon, ale součet výchylek vynásobený konstantou dává celkový činný výkon spotřebiče.

Měření činného výkonů v 3f soustavě s nesouměrnou zátěží

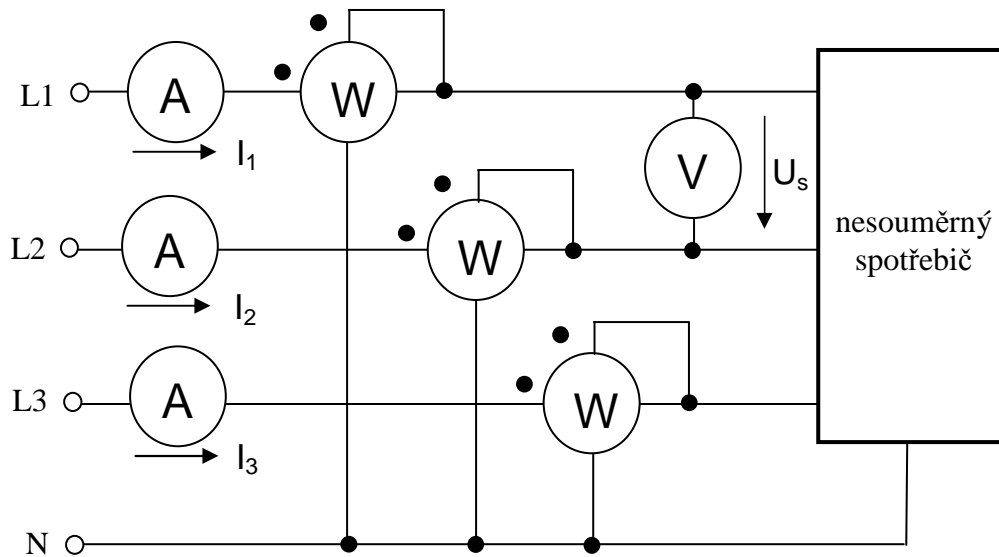
Nesouměrná zátěž – je-li síť zatížena nesouměrným spotřebičem, protéká v každé fázi jiný proud (např. oblouková pec, tři jednofázové bytové jednotky apod.).

a) měření v třívodičové soustavě



$$\text{celkový činný výkon } P_c = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{W})$$

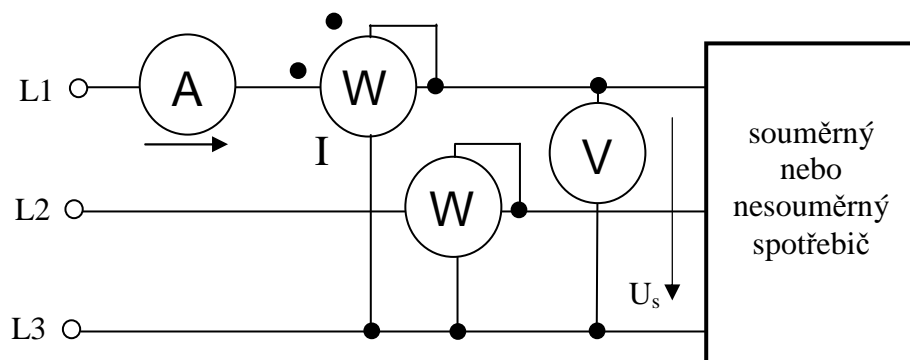
b) měření ve čtyřvodičové soustavě



$$\text{celkový činný výkon } P_c = P_1 + P_2 + P_3 \quad (\text{W})$$

Výkon se měří podobně jako u souměrné zátěže, ale v každé fázi je nutné měřit proud a výkon zvlášť. V třívodičové soustavě vytvoříme umělou nulu spojením výstupních napěťových svorek wattmetrů do uzlu. Je nutné, aby všechny tři wattmetry měly stejný odpor napěťových cívek. Rozsahy proto přepínáme současně.

c) měření dvěma wattmetry – tzv. Aronovo zapojení



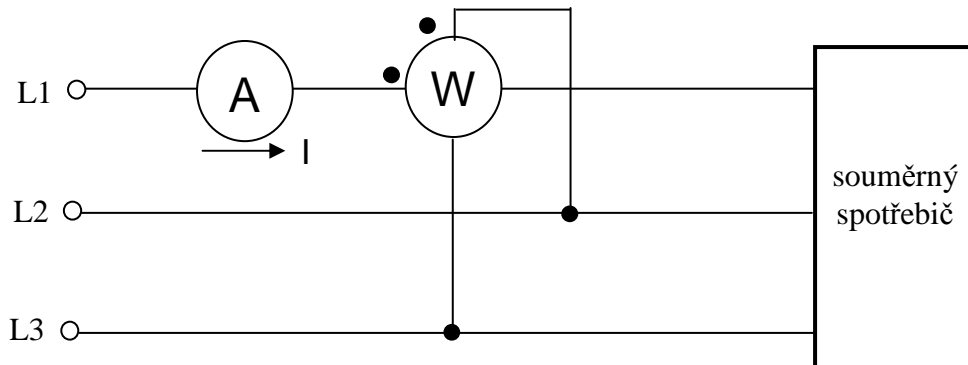
$$\text{celkový činný výkon } P_c = P_1 + P_2 = K_w \cdot (\alpha_1 + \alpha_2) \quad (\text{W})$$

Aronovo zapojení využívá tzv. Blondelova teorému: Pro měření činného výkonu v n-fázové soustavě stačí (n-1) wattmetrů. Napěťové cívky wattmetrů připojíme na sdružené napětí. Wattmetry neukazují výkon, ale součet výchylek vynásobený konstantou dává celkový činný výkon spotřebiče.

Měření jalového výkonů v 3f soustavě

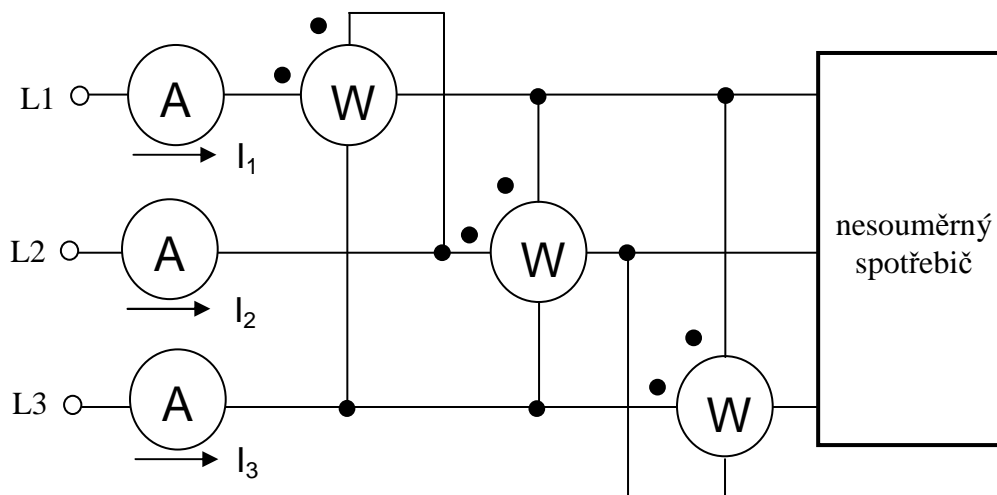
Jalový výkon Q (var) lze přímo měřit pomocí wattmetrů, určených k měření stejnosměrného a činného střídavého výkonu. Napěťové cívky wattmetru se však nepřipojují na fázové, ale na sdružené napětí.

a) měření souměrného spotřebiče



$$\text{celkový jalový výkon } Q_c = 3 \cdot \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot Q_1 = \sqrt{3} \cdot K_w \cdot \alpha \quad (\text{var})$$

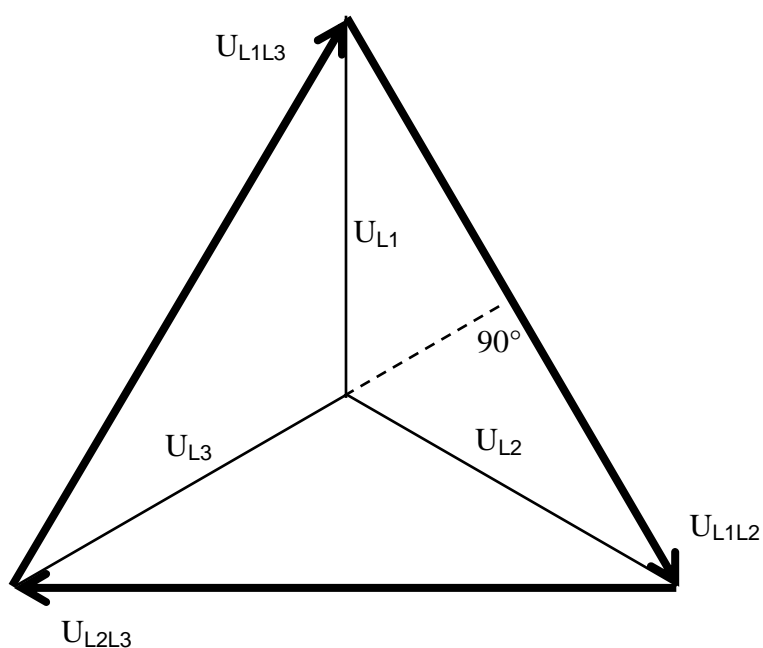
b) měření nesouměrného spotřebiče



$$\text{celkový jalový výkon } Q_c = Q_1 + Q_2 + Q_3 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot K_w \cdot (\alpha_1 + \alpha_2 + \alpha_3) \quad (\text{var})$$

Jalový výkon je dán vztahem $Q_c = U \cdot I \cdot \sin\varphi = U \cdot I \cdot \cos(90^\circ - \varphi)$.

Z uvedeného vyplývá, že jalový výkon lze měřit wattmetrem (ten měří $U \cdot I \cdot \cos\varphi$). Musíme pouze zajistit posunutí fázoru proudu nebo napětí o 90° . Toho dosáhneme jednoduchým trikem – chceme-li měřit jalový výkon ve fázi L3, připojíme napěťovou cívku wattmetru ve fázi L3 na sdružené napětí mezi první a druhou fází. Toto sdružené napětí U_{L1L2} je posunuté o 90° k fázovému napětí U_{L3} (viz obrázek). Sdružené napětí je však o $\sqrt{3}$ větší než fázové – to je nutné zohlednit ve vzorci.



V praxi se upřednostňuje nepřímé měření. Měříme zdánlivý a činný výkon a jalový výkon dopočítáváme.

18. Měření elektrické práce, indukční měřicí soustava

Práci elektrického proudu můžeme zjednodušeně určit jako součin výkonu a času:

$$W = P \cdot t$$

kde W ... elektrická práce (J nebo W.s)
 P ... výkon (W)
 t ... čas (s)

v praxi se častěji používá jednotka kWh

Pro měření elektrické práce používáme elektroměry. Jsou to měřicí přístroje podobné wattmetrům, mají také proudovou a napěťovou cívku.

Rozdělení elektroměrů:

- podle druhu proudu - stejnosměrné elektroměry
- střídavé elektroměry

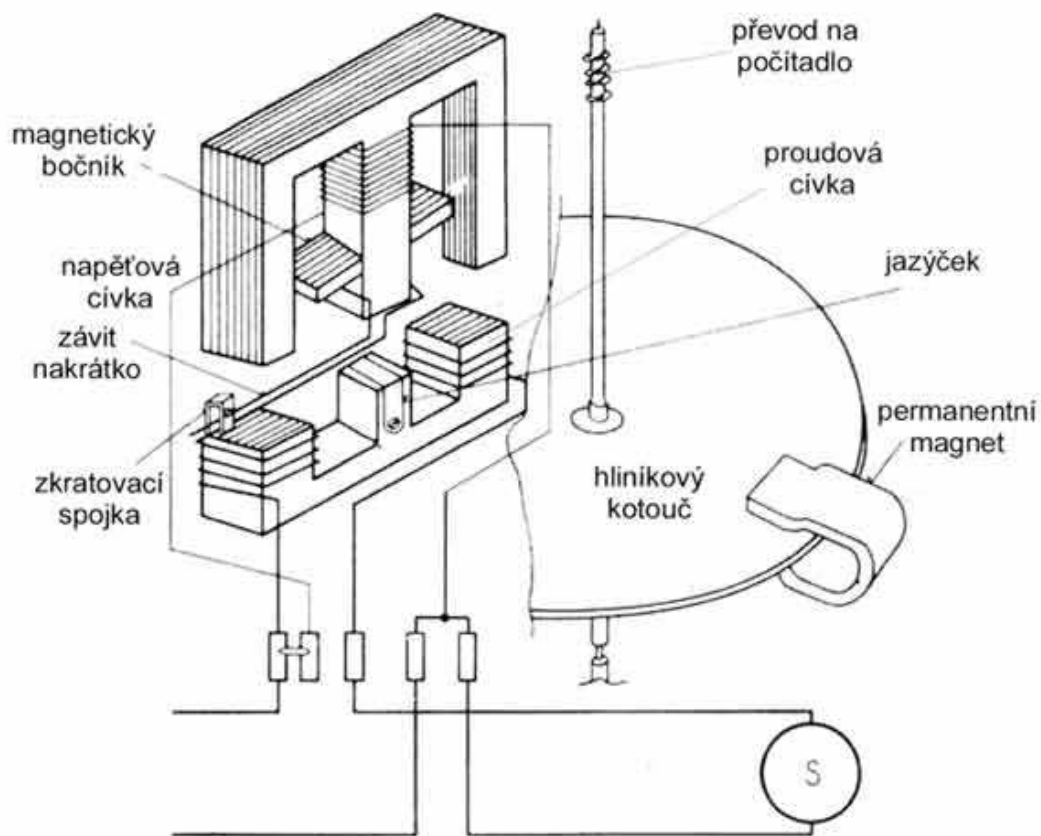
Střídavé elektroměry dělíme:

- podle počtu měřících ústrojí - jednofázové
- třífázové
- podle typu měřené práce - elektroměry pro měření činné práce
- elektroměry pro měření jalové práce
- elektroměry pro měření zdánlivé práce

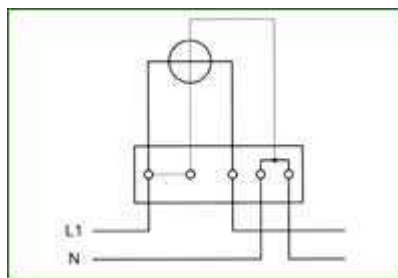
Elektroměry pro měření činné práce

Velikost práce střídavého proudu se v současné době určuje výhradně pomocí indukčních elektroměrů. Měřicí ústrojí se skládá ze dvou elektromagnetů s jádrem tvaru E. Horní napěťový elektromagnet nese napěťovou cívku tvořenou mnoha závity tenkého drátu. Napěťová cívka je navinutá na středním sloupku jádra. Spodní elektromagnet nese cívku proudovou s malým počtem závitů vinutých silným vodičem. Proudová cívka je rozdělena na dvě poloviny, každá z nich je navinutá na jednom krajním sloupku. Ve vzduchové mezeře mezi oběma elektromagnety se otáčí hliníkový kotouč. Jeho otáčky se přenáší pomocí šnekového kola na počítací mechanismus. Hliníkový kotouč elektroměru slouží jak pro vyvozování pohybového momentu, tak i pro vyvozování brzdicího (tlumicího) momentu. Brzdicí moment je vytvářen pomocí permanentního magnetu, jehož mezerou kotouč také prochází.

Střídavý jednofázový elektroměr



Zapojení proudových a napěťových obvodů elektroměru je podobné jako zapojení wattmetrů. Aby byla možnost chybného zapojení a následného chybného měření omezena na minimum, mají svorkovnice všech elektroměrů stejné (normalizované) uspořádání.



Práci trojfázového proudu měříme trojfázovými elektroměry. Podle toho, zda se používají ve čtyřvodičové či trojvodičové síti se vyrábějí se třemi nebo dvěma měřicími ústrojími.

V naší síti má trojfázová rozvodná soustava nízkého napětí vždy vyveden střední vodič, takže elektrickou práci měříme elektroměry se třemi měřicími ústrojími. Na společné hřídelce jsou umístěny dva kotouče, na dolní působí dvě měřicí ústrojí a na horní jedno. Počítadlo potom udává součet elektrické práce změřené ústrojími v jednotlivých fázích.

19. Analogový osciloskop

Osciloskop

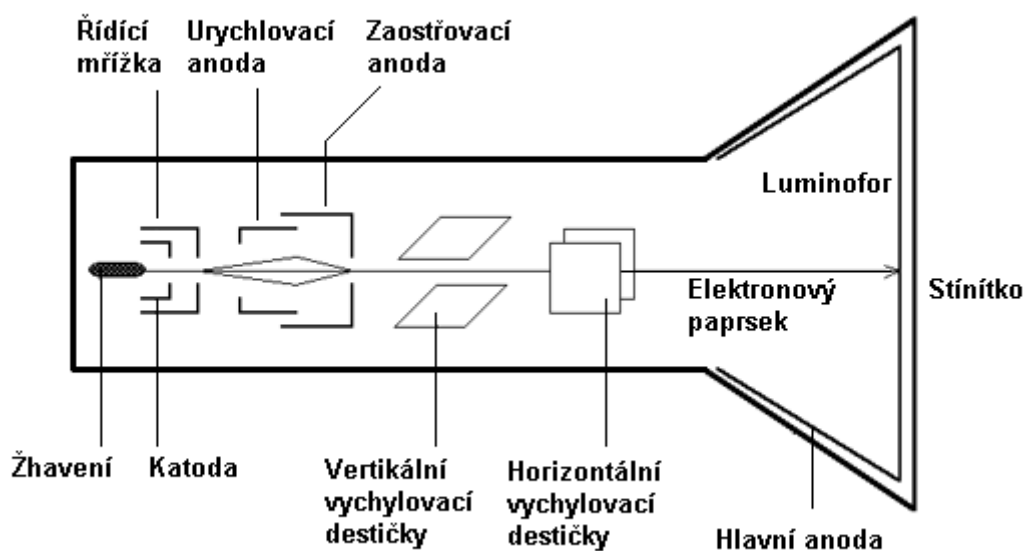
Osciloskop je elektronický měřicí přístroj s obrazovkou, který slouží k zobrazování napětí v závislosti na čase nebo k zobrazování napětí v závislosti na napětí.

Osciloskop tedy zobrazuje průběhy $U = f(t)$ nebo $U_1 = f(U_2)$

Typy osciloskopů

- analogové
 - klasické - univerzální
 - paměťové - používají paměťovou obrazovku pro uchování jednorázového nebo neperiodického průběhu
 - vzorkovací - pro zachycení velmi rychlého průběhu odebere z každé n-té periody vzorek posunutý oproti předchozímu vzorku. Z těchto vzorků je složen výsledný průběh stejného tvaru n-krát pomalejší
- digitální
 - mohou spolupracovat s osobním počítačem nebo plnit funkci paměťových a vzorkovacích osciloskopů

Obrazovka osciloskopu s elektrostatickým vychylováním

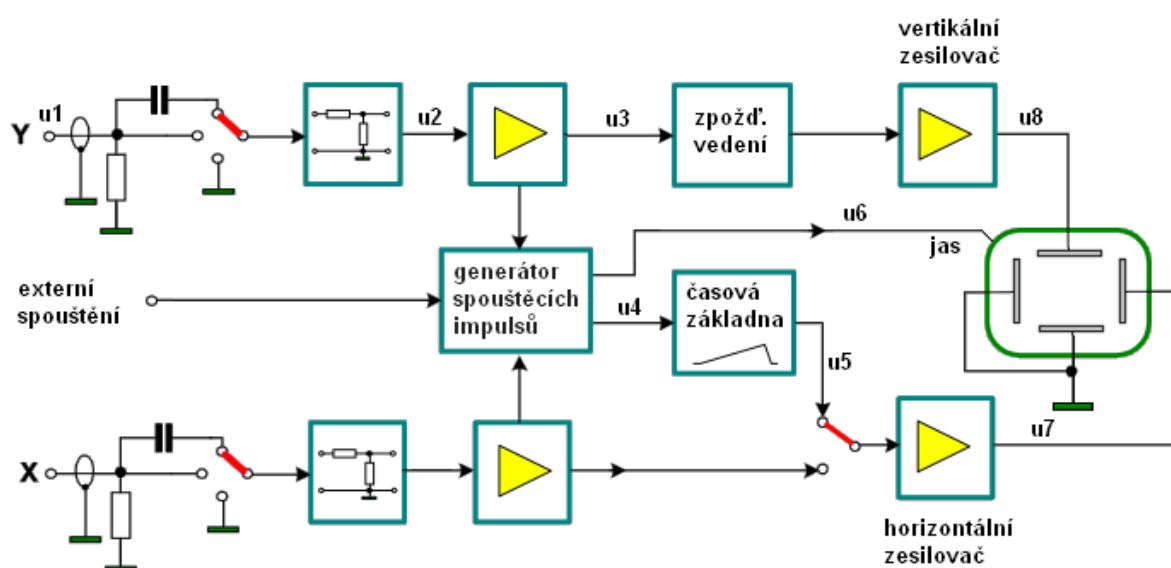


To, co vytváří obraz na obrazovce, jsou dopadající elektrony na stínítko. Svazek elektronů je v elektrickém poli zaostřen a urychlen. Elektron prolétává elektrickým polem vertikálních a horizontálních vychylovacích destiček. Do pole vlétá tak, že směr jeho rychlosti je kolmý na intenzitu elektrostatického pole destiček. V prostoru mezi destičkami je přitahován ke kladné destičce a jeho dráha je zakřivována. Po opuštění elektrického pole se opět pohybuje přímočaře.

U osciloskopu se používají dvojice destičky, jedny (vertikální) vychylují elektron nahoru-dolů, druhé (horizontální), které vychylují do stran. Úhel, o který mohou destičky vychýlit elektron, je poměrně malý. Proto je obrazovka osciloskopu malá a dlouhá. Nakonec elektron dopadne na stínítko obrazovky (luminofor).

Luminofor je látka, schopná uchovat dodávanou energii elektronu a následně ji vyzařovat ve formě světla (fotonu).

Blokové schéma jedнокanálového osciloskopu, princip činnosti

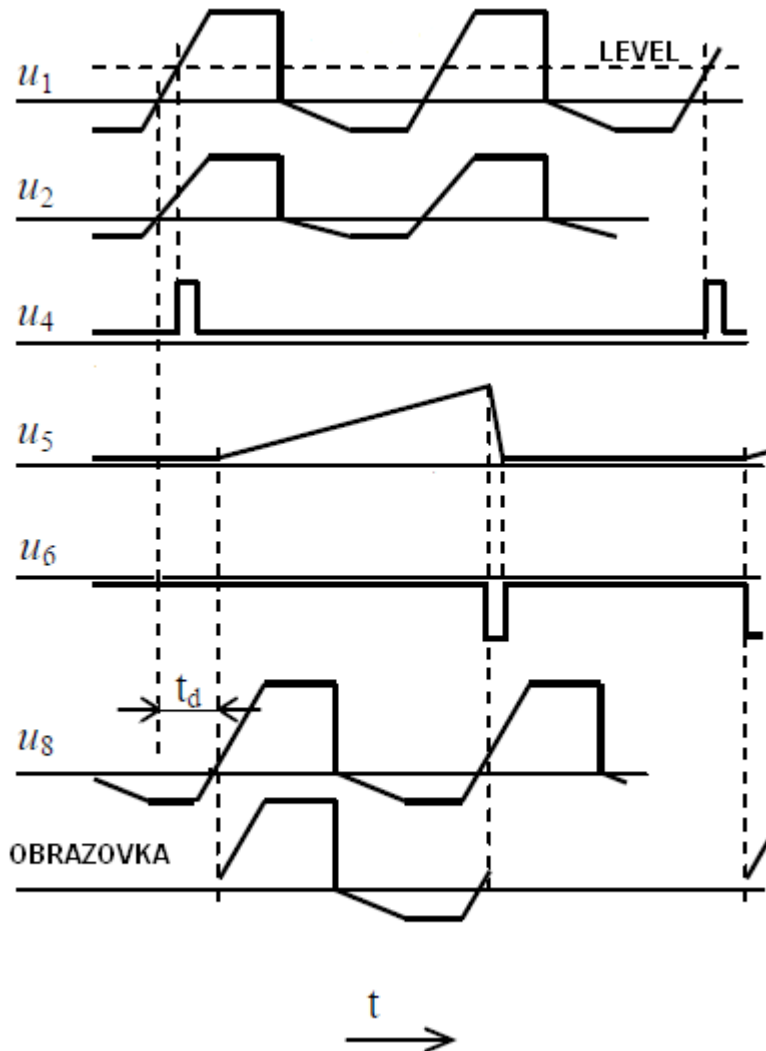


Napětí, které chceme zobrazit – vstupní napětí u_1 přivedeme na vertikální vstup **Y** osciloskopu. Toto napětí po dalším zpracování vychyluje paprsek na stínítku obrazovky ve vertikálním směru (ve směru osy y). Jeho velikost je upravena vstupním děličem (obvykle odporový dělič s paralelní kapacitou) na napětí u_2 a normalizována vertikálním předzesilovačem na napětí u_3 . Po zpoždění, realizovaném zpoždovací linkou a zesílení vertikálním výstupním zesilovačem, se napětí u_8 přivádí na vertikální vychylovací destičky obrazovky. Na obrazovce osciloskopu by se však zobrazila jen svislá čára. Signál je potřeba rozpohybovat v čase (osa x).

Horizontální kanál osciloskopu zajišťuje rovnoměrný pohyb svítícího bodu na stínítku obrazovky zleva doprava (ve směru osy x). Aby byl tento horizontální pohyb zajištěn, generuje obvod časové základny pilové napětí u_5 , které je po zesílení horizontálním výstupním zesilovačem přivedeno na horizontální vychylovací destičky obrazovky (u_7).

Obvod časové základny generuje též napětí obdélníkového průběhu u_6 , které je přivedeno na mřížku obrazovky – tzv. zatemňovací impuls (aby nebyl viděn zpětný běh paprsku). Pro zajištění stojícího obrazu na stínítku je časová základna opakovaně spouštěna obvodem SPOUŠTĚNÍ (= TRIGGER).

Spouštěcí impuls u_4 je generován pokaždé, když vstupní napětí spouštěcího obvodu dosáhne tzv. spouštěcí úrovně (v obrázku označena LEVEL). Časový interval t_d je zpoždění zpožd'ovacího vedení, aby mohl být pozorován i počátek zobrazovaného děje.



Legenda:

- u_1 – zobrazované napětí
- u_2 – napětí za děličem
- u_4 – spouštěcí impuls, vzniká překročí-li napětí u_1 úroveň LEVEL
- u_5 – pilovité napětí z časové základny
- u_6 – zatemňovací impuls při zpětném běhu paprsku
- u_8 – upravené a zpožděné zobrazované napětí
- t_d – zpoždění zpožd'ovacího vedení
- OBRAZOVKA – zobrazené napětí u_1

Měření napětí, proudu a fázového posunu osciloskopem

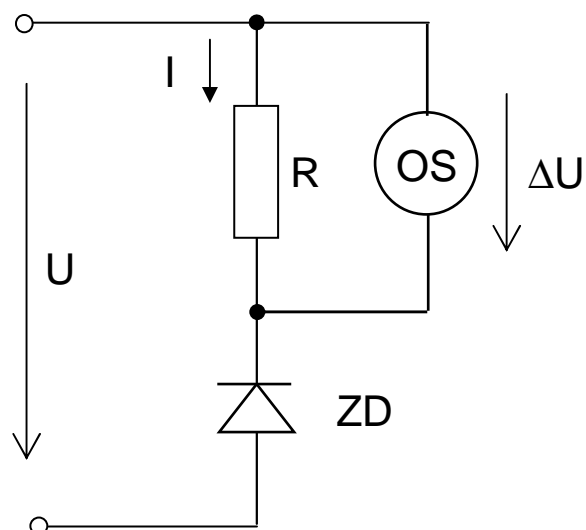
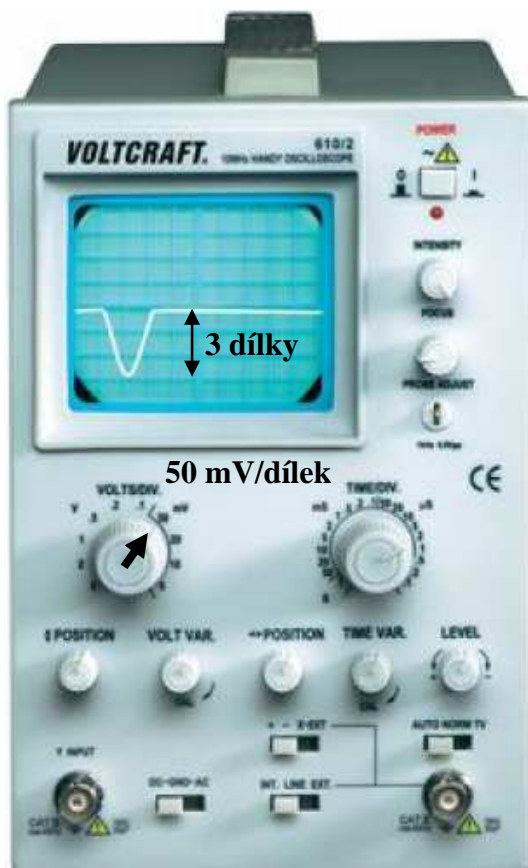
Měření napětí

Napětí, které chceme zobrazit a změřit připojíme na kanál Y analogového osciloskopu. Maximální hodnotu měřeného napětí U_m lze zjistit výpočtem. Na osciloskopu nastavujeme kolik voltů zobrazovaného signálu připadne na jeden dílek rastru (rozsah vertikálního vstupu – konstanta). Pomocí rastru na obrazovce odečteme počet dílků amplitudy signálu.

$$U_m = K \cdot d = 50 \cdot 3 = 150 \text{ mV}$$

Měření proudu

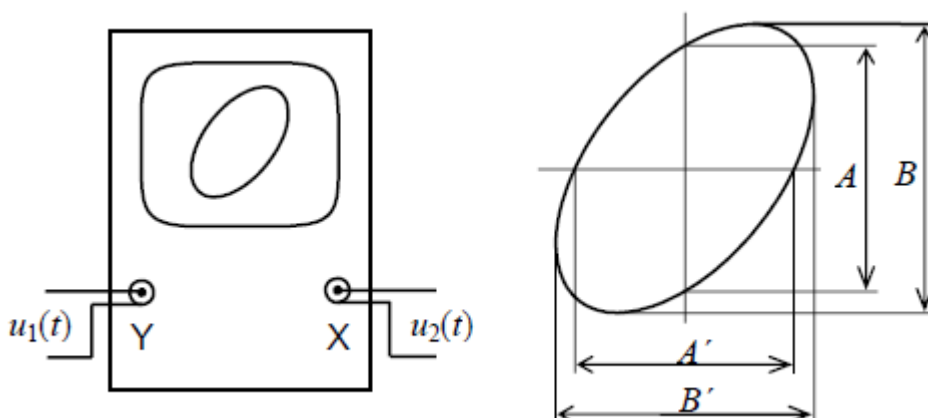
Osciloskop se do obvodu připojuje vždy paralelně. Přístroj umí zobrazit pouze napětí v závislosti na čase nebo napětí v závislosti na jiném napětí. Proud, který chceme zobrazit musíme nejprve pomocí malého normálového rezistoru převést na napětí. Měřený proud protéká rezistorem a vyvolává na něm úbytek napětí, který zobrazujeme. Tvar signálu úbytku napětí je shodný s tvarem proudu, který prochází rezistorem. Maximální hodnotu proudu lze vypočítat pomocí Ohmova zákona.



Zobrazení proudu ZD na osciloskopu

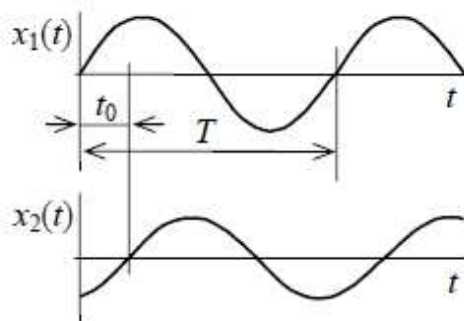
Měření fázového posuvu osciloskopem

a) v režimu X-Y (odpojená časová základna $u_1 = f(u_2)$)



$$\varphi = \arcsin \frac{A}{B} = \arcsin \frac{A'}{B'}$$

b) dvoukanálovým osciloskopem v časové oblasti $u = f(t)$



$$\varphi = \omega t_0 = 2\pi f t_0 = \frac{2\pi t_0}{T} \quad (\text{rad})$$

$$\varphi = \frac{360 t_0}{T} \quad (^\circ)$$

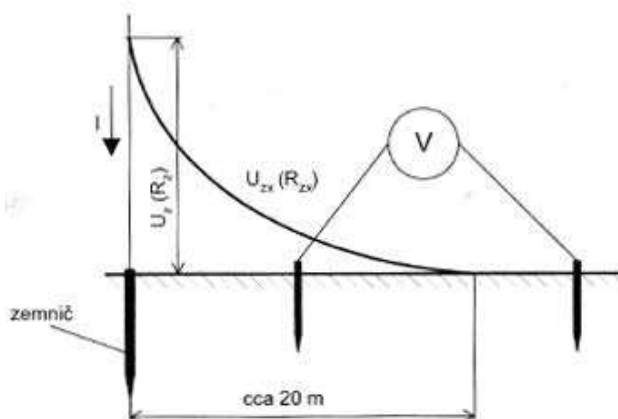
20. Měření zemního a izolačního odporu

Zemní odpor zemniče R_Z umístěného v zemi je výsledný činný odpor mezi přípojovací svorkou zemniče a některým z míst země ve vzdáleném okolí (neutrální zem).

Je to součet těchto sériově řazených odporů

- odpor přípojovací svorky
- odpor svodu
- odpor zemniče
- přechodový odpor mezi zemničem a půdou
- odpor půdy obklopující zemnič, až do vzdálenosti, kde se již vliv zemniče neuplatní

Kolem zemniče, kterým prochází proud do země se v půdě vytvoří elektrické pole. Napětí klesá nejprve velmi prudce, potom pozvolněji a v určité vzdálenosti od zemniče je již měřené napětí nulové a elektrické pole zemniče se zde již neuplatňuje. Pro zemniče běžných rozměrů je tato vzdálenost asi 20 m. V této vzdálenosti mluvíme o neutrální zemi.



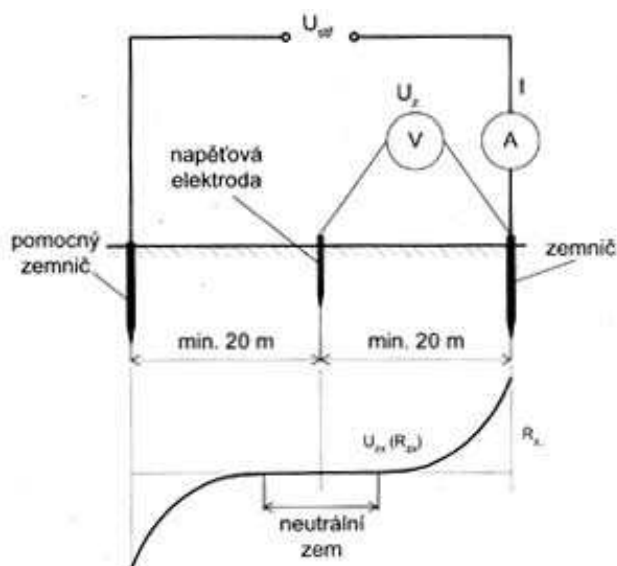
Zemní odpor zjištěný z měření napětí zemniče vzhledem k neutrální zemi ve vzdálenosti nejméně 20 m lze pokládat za celkový zemní odpor zemniče.

$$R_Z = \frac{U_Z}{I} \quad (\Omega)$$

Abychom mohli změřit proud I protékající měřeným zemničem a zemí, je nutné zarazit do země ještě další, pomocný zemnič a to ve vzdálenosti asi 40 m od zemniče, tedy 20 m od napěťové elektrody. To proto, aby nám proudová elektroda svým polem nenarušila neutrální zem.

Kontrolu, zda je napěťová elektroda v neutrální zemi a tedy naměřená hodnota zemního odporu je správná, provedeme tak, že změníme její polohu (obvykle o 6 m blíže a o 6 m dále).

Protože zem i její jednotlivé vrstvy jsou v podstatě elektrolyty, nesmí se při měření použít v žádném případě stejnosměrný proud. Pro měření se používá střídavý proud jiné frekvence než 50 Hz. Obvykle se používají kmitočty 38 až 42 Hz nebo 62 až 78 Hz.



Měření izolačního odporu el. spotřebičů je jedním ze způsobů zjišťování stavu a kvality izolace mezi živými a neživými částmi. Měření se provádí z důvodů posouzení kvality izolace elektrického zařízení. Izolační odpor má velký vliv na bezpečnost a provozuschopnost zařízení. Normy stanoví minimální hodnotu izolačních odporů, které musí zařízení mít, aby mohlo být uvedeno do provozu.

Kvalita izolace z hlediska bezpečnosti uživatele spotřebiče se zjišťuje měřením:

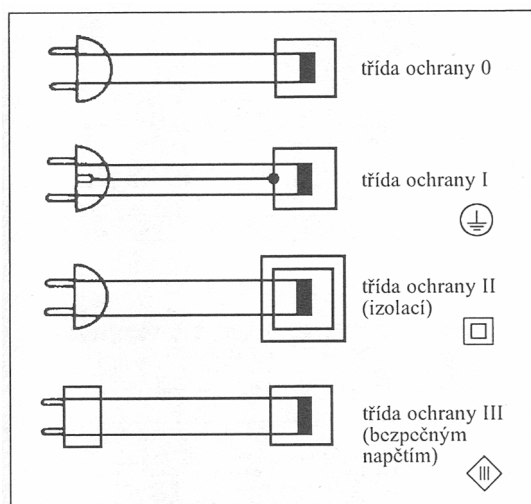
- izolačního odporu
- měřením unikajících proudů

Izolační odpor se měří zkušebním napětím 500 V po dobu 5 až 10 s. Izolační odpor nesmí být menší než

- u spotřebičů třídy I (držených v ruce) 2 M Ω
- u spotřebičů třídy II (držených v ruce) 7 M Ω
- u spotřebičů třídy III 0,25 M Ω
- u svítidel 4 M Ω
- u tepelných spotřebičů (nad 3,5 kW) 0,3 M Ω

Unikající proud nesmí být vyšší než 0,5 mA pro spotřebiče třídy II.

Unikající proud nesmí být vyšší než 3,5 mA pro spotřebiče třídy I a u tepelných odporových spotřebičů s příkonem vyšším než 3,5 kW nesmí být vyšší než 1 mA na 1 kW výkonu.



Odpor se měří speciálním ohmmetrem, měříme odpor mezi fázovým a středním pracovním vodičem, mezi fázovým a ochranným vodičem i mezi fázovými vodiči.

21. Rozšíření rozsahu měřících přístrojů - význam, využití, přehled

Pro běžná praktická měření se nehodí jednorozsahové přístroje, proto se výrobci snaží počet rozsahů měřících přístrojů zvýšit. Přesto se v praxi můžeme sami setkat s potřebou zvětšit rozsah měřícího přístroje.

Možnosti zvětšení rozsahu měřících přístrojů:

- 1) Voltmetry
- a) předřadník – zapojením předřadného rezistoru
 - b) měřící transformátor napětí
 - c) předřadný kondenzátor
 - d) odporový nebo kapacitní dělič

Předřadník je možné použít pro rozšíření rozsahu stejnosměrných i střídavých voltmetrů do 1200 V. Měřící transformátor je možné použít jen pro střídavé napětí. Předřadný kondenzátor, odporový a kapacitní dělič lze použít jen pro elektrostatické voltmetry.

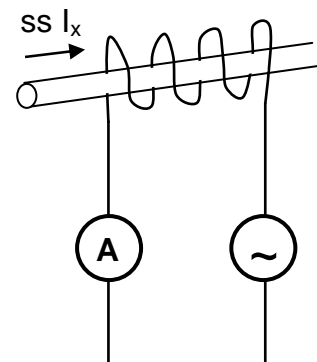
- 2) Ampérmetry
- a) bočník – zapojení paralelního rezistoru
 - b) měřící transformátor proudu
 - c) Hallova sonda
 - d) magnetorezistor
 - e) transduktor

Měřící transformátor proudu je nejrozšířenější, ale jen pro střídavé proudy. Bočník je možné použít pro rozšíření rozsahu střídavých i stejnosměrných ampérmetrů, ale jen do 3 kA. Pro velké stejnosměrné proudy je nutné použít tyto metody:

Hallova sonda – po vložení sondy do magnetického pole měřeného proudu v ní vznikne Hallovo napětí z něhož se dá určit velikost měřeného proudu. Hallovy články jsou polovodičové součástky, jejichž odpor (napětí) závisí na intenzitě magnetického pole.

magnetorezistor – je rezistor s odporem závislým na vnějším magnetickém poli. Vkládá se do magnetického pole měřeného proudu a z hodnoty odporu lze určit neznámý proud.

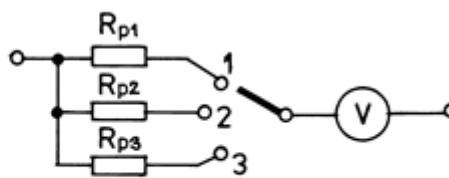
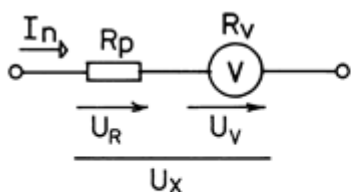
transduktor – umožňuje měřit velký stejnosměrný proud. Transduktor je vlastně tlumivka, jejíž indukčnost lze měnit předsycením feromagnetického jádra stejnosměrným proudem procházejícím primárním vinutím. Vodič, kterým prochází velký stejnosměrný měřený proud tvoří jádro cívky napájené střídavým napětím. Indukčnost cívky a tím i její impedance závisí na velikosti měřeného stejnosměrného proudu.



Předřadník

Předřadník slouží ke změně rozsahu voltmetru. Předřadník je rezistor, který se zapojuje sériově s voltmetrem. Při měření ve stejnosměrných obvodech je to jediný možný způsob, jak rozsah voltmetru zvýšit.

Velké neznámé napětí U_X se rozdělí v poměru odporů předřadníku a voltmetru.



Pro proud z Ohmova zákona platí:

$$I = \frac{U_R}{R_p} = \frac{U_v}{R_v}$$

Z II. KHZ platí:

$$U_x = U_R + U_v$$

Pro odpor předřadníku můžeme psát:

$$R_p = R_v \cdot \frac{U_R}{U_v} = R_v \cdot \frac{U_x - U_v}{U_v} = R_v \cdot \left(\frac{U_x}{U_v} - 1 \right) = R_v \cdot (n - 1)$$

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

$\frac{U_x}{U_v} = n$... poměrné rozšíření rozsahu; kolikrát chceme zvětšit rozsah voltmetru

Použití: rozšíření rozsahu stejnosměrných i střídavých voltmetrů do 1200 V.

Příklad: Navrhněte odpor předřadníku pro voltmetr s maximálním rozsahem 200 V. V obvodu může být napětí až 600 V. Vnitřní odpor voltmetru je 15 k Ω .

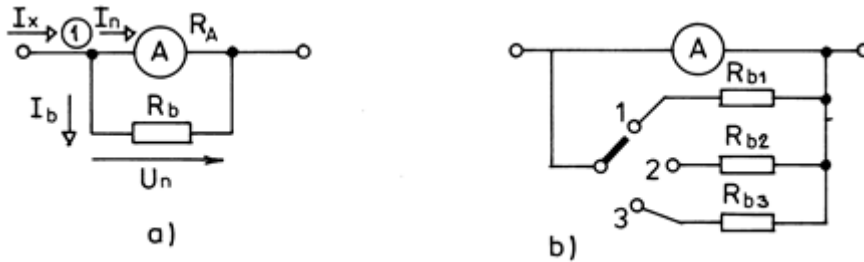
$$n = \frac{U_x}{U_v} = \frac{600}{200}$$

$$R_p = R_v \cdot (n - 1) = 15 \cdot (3 - 1) = 30 \text{ k}\Omega$$

Bočník

Bočník je zařízení, které slouží ke zvětšení měřícího rozsahu ampérmetrů. Bočník je rezistor, který se k ampérmetru připojuje paralelně.

Velký neznámý proud I_x se v uzlu rozdělí podle velikosti odporů bočníku a ampérmetru.



Pro napětí mezi uzlem 1. a 2. platí:

$$U_n = R_b \cdot I_b = R_A \cdot I_n$$

Pro uzel 1. z I. KHZ platí:

$$I_x = I_n + I_b$$

Pro odpor bočníku můžeme psát:

$$R_b = R_A \cdot \frac{I_n}{I_b} = R_A \cdot \frac{I_n}{I_x - I_n} = R_A \cdot \frac{1}{\frac{I_x}{I_n} - 1} = \frac{R_A}{n - 1}$$

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

$\frac{I_x}{I_n} = n$... poměrné rozšíření rozsahu; kolikrát chceme zvětšit rozsah ampérmetru

Použití: rozšíření rozsahu stejnosměrných i střídavých ampérmetrů do 3 kA.

Příklad: Navrhněte odpor bočníku pro ampérmetr s maximálním rozsahem 5 A. V obvodu může protékat proud až 20 A. Vnitřní odpor ampérmetru je 3 Ω .

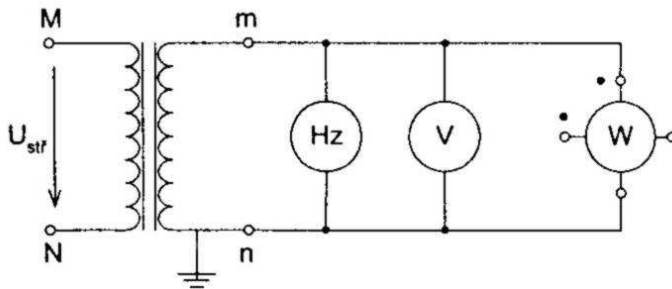
$$n = \frac{I_x}{I_n} = \frac{20}{5} = 4$$

$$R_b = \frac{R_A}{n - 1} = \frac{3}{4 - 1} = 1 \Omega$$

Měřicí transformátor napětí (MTN)

Měřicí transformátor napětí je přístroj, který slouží ke změně rozsahu střídavých voltmetrů a úpravě napětí pro ochrany a další elektronické prvky. Používá se převážně k úpravě napětí vyšších než 1 kV. Do obvodu se primární vinutí zapojuje jako voltmetr a na sekundární svorky se připojují paralelně přístroje (voltmetr, napěťové cívky wattmetru a ochran, kmitoměr, apod.).

Jedna ze sekundárních svorek měřicího transformátoru napětí se musí uzemnit, protože měřené vysoké napětí by při průrazu izolace transformátoru proniklo na sekundární stranu a mohlo by ohrozit obsluhu nebo poničit přístroje připojené na sekundární straně.

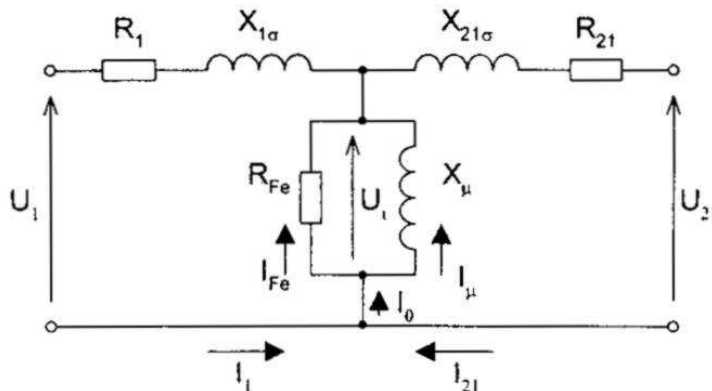


obr. 1. Zapojení přístrojového transformátoru pro měření napětí

Vstupní svorky (primární vinutí) měřicího transformátoru napětí se označují **M**, **N**, výstupní svorky (sekundární vinutí) **m**, **n**.

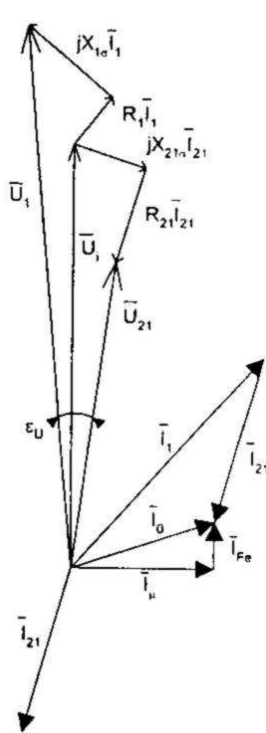
$$\text{Převod je definován jako poměr napětí naprázdno } p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{U_1}{U_{20}}$$

Je-li transformátor ve stavu naprázdno, neprotéká jeho sekundárním vinutím žádný proud a odpadají tedy úbytky napětí na R_{21} a $X_{\sigma 21}$ (obr. 2.). Tento stav by byl ideální, protože by v transformátoru docházelo pouze k minimálním ztrátám a transformátor by se choval téměř jako ideální převodník napětí.



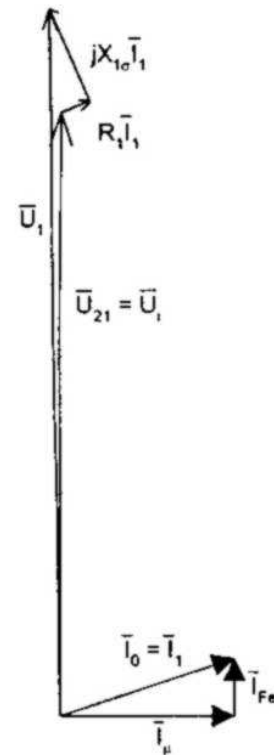
obr. 2. Náhradní schéma transformátoru

Ve skutečnosti však transformátor nikdy naprázdno nepracuje, protože jsou na jeho sekundárních svorkách připojeny přístroje, kterými jakýsi proud (byť malý) protéká.



◀ obr. 3. Fázorový diagram činného přístrojového transformátoru při zatížení

▶ obr. 4. Fázorový diagram přístrojového transformátoru ve stavu naprázdno



Protože při měření je transformátor vždy zatížen proudem přístrojů, nemůžeme jeho převod považovat za přesný poměr. Z fázorového diagramu vyplývá, že dochází nejen k chybě napětí (převodu), ale i k fázovému posunu mezi U_1 a U_{21} (úhel ϵ_u v obr. 3.). Tyto chyby se nazývají *chyba převodu* a *chyba úhlová*. Chyba bude tím větší, čím větší bude sekundární proud. PTN má být málo zatížený, musí tedy pracovat v blízkosti stavu naprázdno.

Celková spotřeba všech paralelně připojených měřících přístrojů na sekundární straně MTN nesmí přesáhnout tzv. *dovolené zatížení transformátoru*.

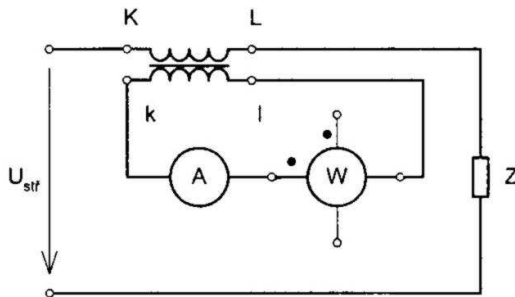
MTN se vyrábějí se jmenovitým zatížením (dle ČSN):	10 - 25 - 50 - 100 - 200 VA
MTN mají stanoveny i třídy přesnosti (dle ČSN):	0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 %
Chyba úhlu:	řádově několik desítek minut
Jmenovité sekundární napětí je normalizováno na	100 V

Převod MTN se vždy udává ve tvaru zlomku, např. $\frac{6000}{100}$, $\frac{35000}{100}$ nebo $\frac{110000}{100}$, atd.

POZOR! Při práci s MTN je nutno se vyvarovat zkratu na sekundárních svorkách transformátoru. Sekundární vinutí je dimenzováno pouze na malé hodnoty proudu a zkratový proud by mohl izolaci vinutí spálit a PT tak zničit.

Měřicí transformátor proudu (MTP)

Měřicí transformátor proudu je přístroj, který slouží ke změně rozsahu střídavých ampérmetrů a úpravě proudu pro ochrany a další elektronické prvky. Používá se jak ke zmenšení, tak i ke zvětšení proudu. Do obvodu se primární vinutí připojí do série se zátěží, kterou protéká měřený proud a na sekundární vinutí se připojují jednotlivé přístroje sériově (ampérmetr, proudové cívky wattmetru a ochran, elektroměr, atd.).

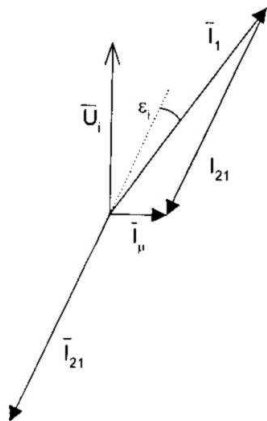


obr. 5. Zapojení přístrojového transformátoru pro měření proudu

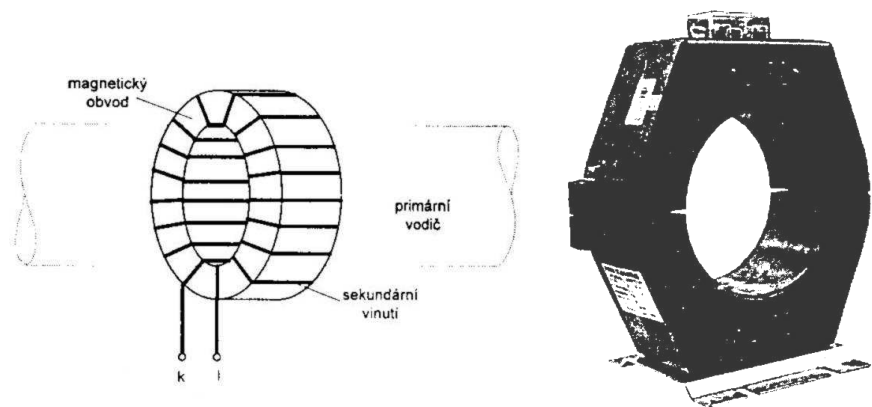
Vstupní (primární) svorky PTP se označují písmeny **K, L**, výstupní (sekundární) **k, l**.

$$\text{Převod PTP je dán } p = \frac{N_1}{N_2} = \frac{I_2}{I_1}$$

Podobně jako MTN má i MTP *chybu převodu* a *chybu úhlovou*. Z fázorového diagramu (obr. 6.) je zřejmé, že aby byla chyba co nejmenší, musí být co nejmenší magnetizační proud I_μ (proud I_{Fe} lze u MTP zanedbat). Proto musí být sekundární zatěžovací impedance co nejmenší, aby se při daném sekundárním proudu I_2 vystačilo s malým indukovaným napětím na sekundární straně. Malému indukovanému napětí U_i odpovídá malý magnetický tok Φ a tím i malý potřebný magnetizační proud I_μ . Aby malý magnetizační proud I_μ vytvořil potřebný magnetický tok Φ , musí být magnetický odpor jádra co nejmenší \Rightarrow dostatečný průřez, kvalitní feromagnetický materiál, velká permeabilita, bez vzduchové mezery.



obr. 6. Fázorový diagram



obr. 7. Prstencové provedení PTP a) princip b) provedení

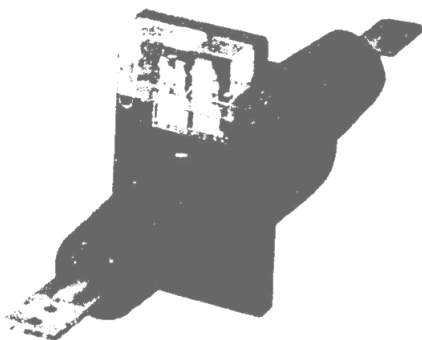
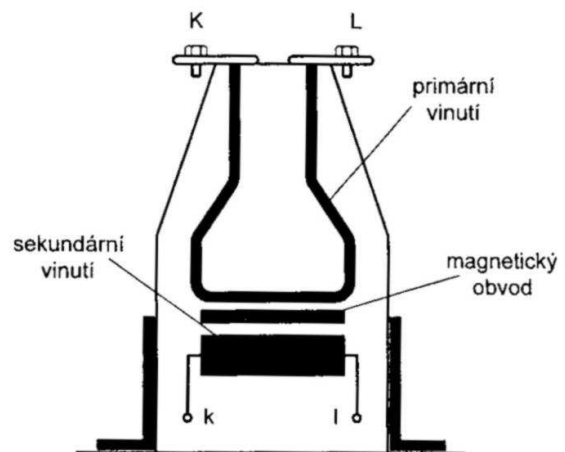
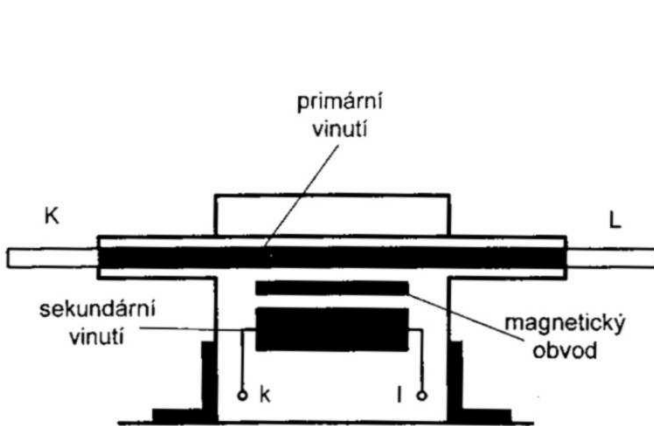
Celková spotřeba všech přístrojů připojených na sekundární vinutí nesmí přesáhnout *dovolené zatížení* MTP. Pokud toto dovolené zatížení překročíme, přestane transformátor pracovat v blízkosti stavu nakrátko, změní se převod a vznikne značná chyba.

PTP se vyrábějí se jmenovitým zatížením (dle ČSN): 2,5 - 5 - 10 - 15 - 30 - 60 - 120 VA
 PTP mají stanoveny i třídy přesnosti (dle ČSN): 0,1 - 0,2 - 0,5 - 1 - 3 %
 Chyba úhlu: řádově několik desítek minut
 Jmenovitý sekundární proud je normalizován na 5 A (výjimečně 1A)

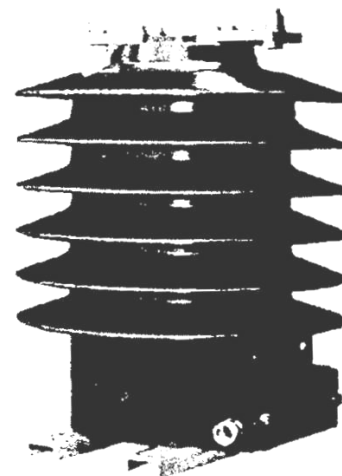
Převod PTP se vždy udává ve tvaru zlomku, např. $\frac{20}{5}$, $\frac{100}{5}$ nebo $\frac{20}{1}$, atd.

POZOR! U MTP nikdy nesmí dojít k rozpojení sekundárního obvodu. Při normálním chodu tvoří magnetizační proud jen velmi malou část primárního proudu. Pokud sekundární obvod rozpojíme ($I_{20}=0$), dojde k tomu, že celý proud primárního vinutí se stane proudem magnetizačním ($I_{\mu} = I_1$) a v sekundárním vinutí se bude indukovat značně vysoké napětí, které může způsobit poškození izolace vinutí nebo způsobit úraz obsluhy. Proto jsou všechny MTP vybaveny tzv. *spojovačem nakrátko*.

Provedení: tyčové, v podpěrné konstrukci (v izolátoru), prstencové, násuvné



obr. 8. Tyčové provedení



obr. 9. Princip a provedení v podpěrné konstrukci