

ESF II projekt Západočeské univerzity v Plzni

reg. č. CZ.02.2.69/0.0/0.0/18_056/0013239

Elektromechanické přístroje

Přednáška KET/ELM

J. Švarný



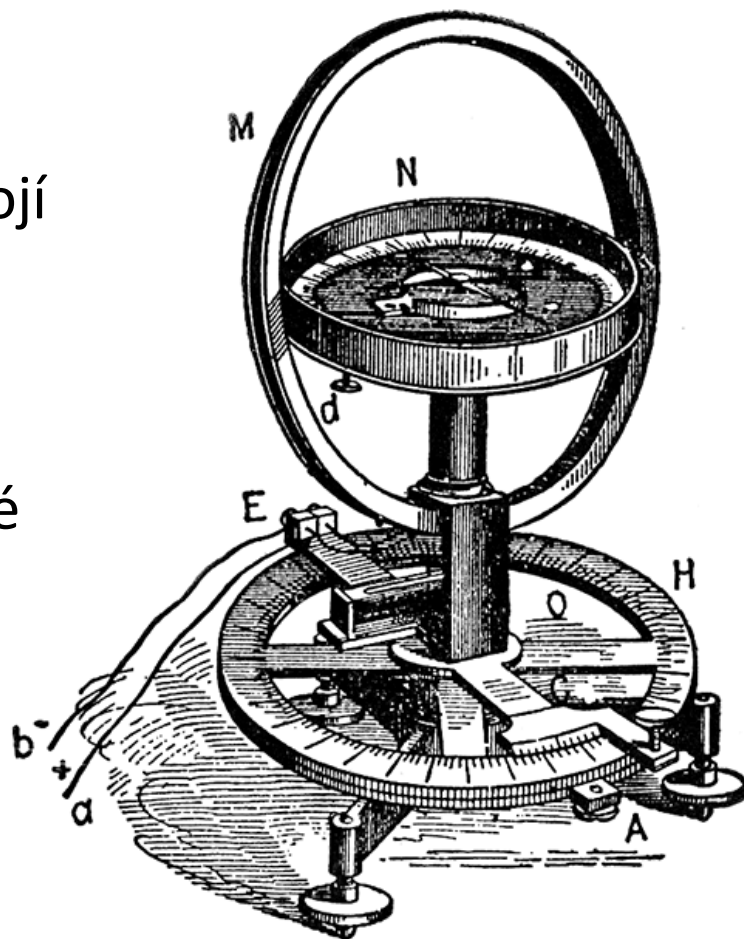
EVROPSKÁ UNIE
Evropské strukturální a investiční fondy
Operační program Výzkum, vývoj a vzdělávání

MŠMT
MINISTERSTVO ŠKOLSTVÍ
MLÁDEŽE A TĚLOVÝCHOVY

Elektromechanické přístroje

Obsah:

- Princip elektromechanického ústrojí
- Magnetoelektrické přístroje
- Elektromagnetické přístroje
- Elektrodynamické a ferodynamické přístroje
- Indukční přístroje
- Tepelné přístroje
- Literatura

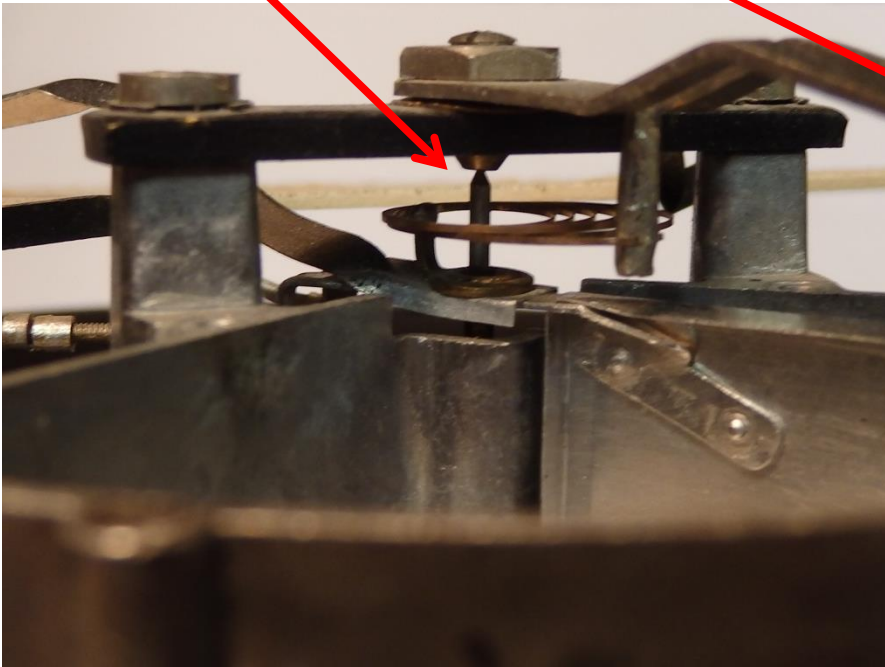


Střelkový galvanometr z 19. stol.

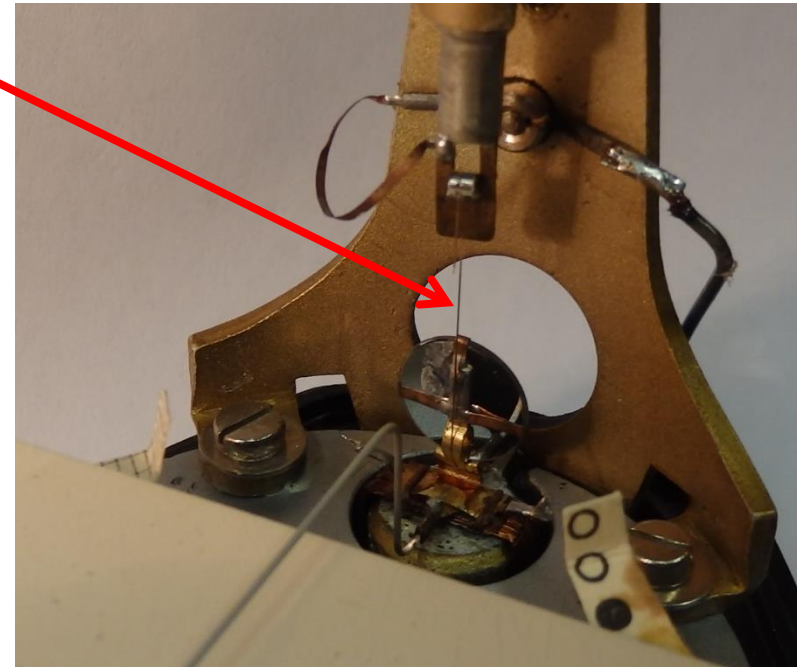
(<http://www.gutenberg.org/files/49769/49769-h/images/f524.png>)

Princip elektromechanického ústrojí

- Elektromechanické přístroje využívají magnetických, dynamických nebo tepelných účinků elektrického proudu.
- Ústrojí se skládá ze dvou celků: pohyblivá a nepohyblivá část. Vzájemné uložení obou částí může být ložiskové (většinou hrotové) nebo závěsné.



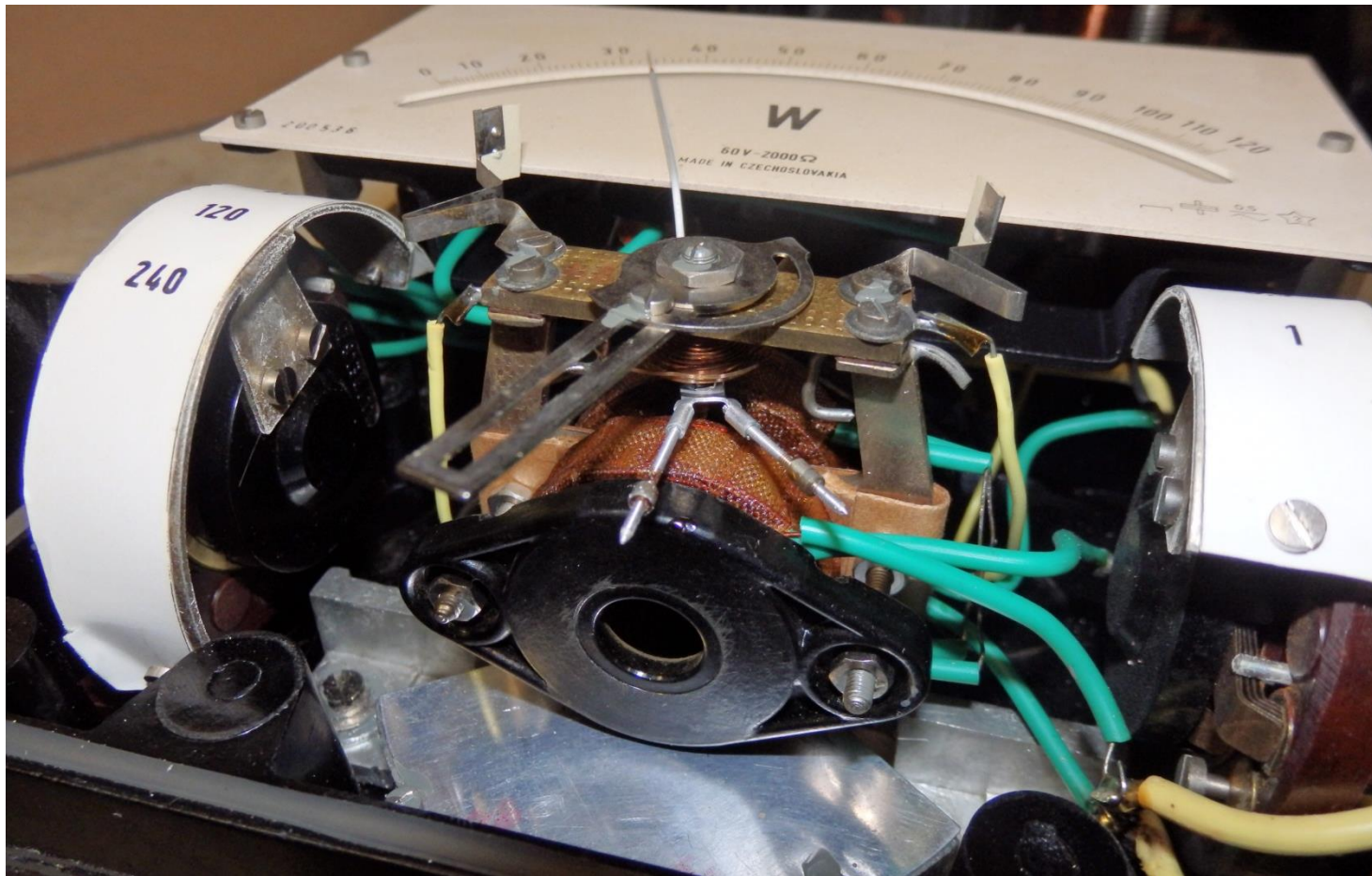
Ložiskové hrotové uložení



Závěsné uložení

Princip elektromechanického ústrojí

- Další součásti mechaniky ústrojí: ručka, stupnice, nulovací mechanismus, vyvažovací část, pružné dorazy, tlumicí systém, direktivní pružina (viz níže).



Princip elektromechanického ústrojí

Na pohyblivou část působí různé momenty sil.

V ustáleném stavu:

$$\sum_i M_i = 0 \quad \text{tj.} \quad M_d + M_p = 0 \quad \text{resp.} \quad |M_p| = |M_d|$$

M_p ...pohybový moment (vyvolaný měřenou veličinou)

M_d ...direktivní moment (protiváha pohybovému momentu vyvolaná pružinou nebo zkrutem závěsu)

$$M_p = k_p x, \quad M_d = -k_d \beta, \quad k_p x - k_d \beta = 0, \quad \beta = \frac{k_p}{k_d} x$$

x ...měřená veličina

k_p ...pohybová konstanta (Nm/x)

β ...úhlová výchylka pohyblivé části vůči nepohyblivé (rad)

k_d ...direktivní konstanta (Nm/rad)

Princip elektromechanického ústrojí

V přechodném stavu (změna měř. veličiny, připojení do obv. ...):

$$\sum_i M_i = 0 \quad tj. \quad M_J + M_b + M_d + M_p = 0$$

M_p ...pohybový moment

M_d ...direktivní moment

M_b ...brzdící moment (působení tlumicího ústrojí)

M_J ...moment setrvačných sil (pohyblivá část něco váží)

$$M_p = k_p x, \quad M_d = -k_d \beta, \quad M_b = -k_b \frac{d\beta}{dt}, \quad M_J = -J \frac{d^2 \beta}{dt^2}$$

x ...měřená veličina

k_p ...pohybová konstanta (Nm/x)

β ...úhlová výchylka pohyblivé části vůči nepohyblivé (rad)

k_d ...direktivní konstanta (Nm/rad)

k_b ...brzdící konstanta (Nms/rad)

J ...moment setrvačnosti (kg/m²)

Princip elektromechanického ústrojí

$$-J \frac{d^2 \beta}{dt^2} - k_b \frac{d\beta}{dt} - k_d \beta + k_p x = 0$$

...

$$\beta(t) = \frac{k_p}{k_d} x + k_1 e^{-p_1 t} + k_2 e^{-p_2 t}$$

k_1, k_2 ...konstanty

p_1, p_2 ...kořeny charakteristické rovnice:

$$Jp_{12}^2 + k_b p_{12} + k_d = 0$$

Velikost konstant k_1, k_2 a velikost a charakter kořenů p_1, p_2 určují dynamiku elektromechanického ústrojí.

Princip elektromechanického ústrojí

Z hlediska dynamiky existují tři typické případy chování systému:

- **Podkritické** (nedostatečné) tlumení

Kořeny p_1, p_2 jsou imaginární a platí: $k_b < 2\sqrt{Jk_d}$

Systém reaguje periodickým tlumeným pohybem ručky.

- **Nadkritické** (příliš vysoké) tlumení

Kořeny p_1, p_2 jsou reálné, různé a platí: $k_b > 2\sqrt{Jk_d}$

Systém reaguje aperiodickým pohybem ručky.

- **Kritické** (optimální) tlumení

Kořeny p_1, p_2 jsou reálné, shodné a platí: $k_b = 2\sqrt{Jk_d}$

Systém reaguje pohybem ručky na mezi aperiodicity.

Požadované chování je dáno nastavením **tlumicího systému**.

Princip elektromechanického ústrojí

Vzduchové tlumení

Hliníková lopatka (spojená s pohyblivou částí) tlačí vzduch v uzavřené komoře.

Rychlejší pohyb = větší odpor vzduchu = silnější tlumení.



*Vzduchové tlumení
(uzavřená komora)*

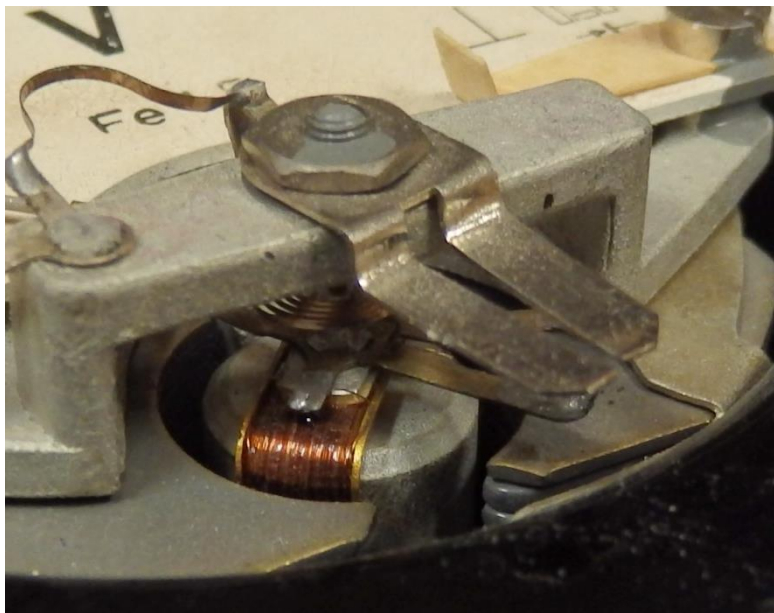


*Vzduchové tlumení
(otevřená komora)*

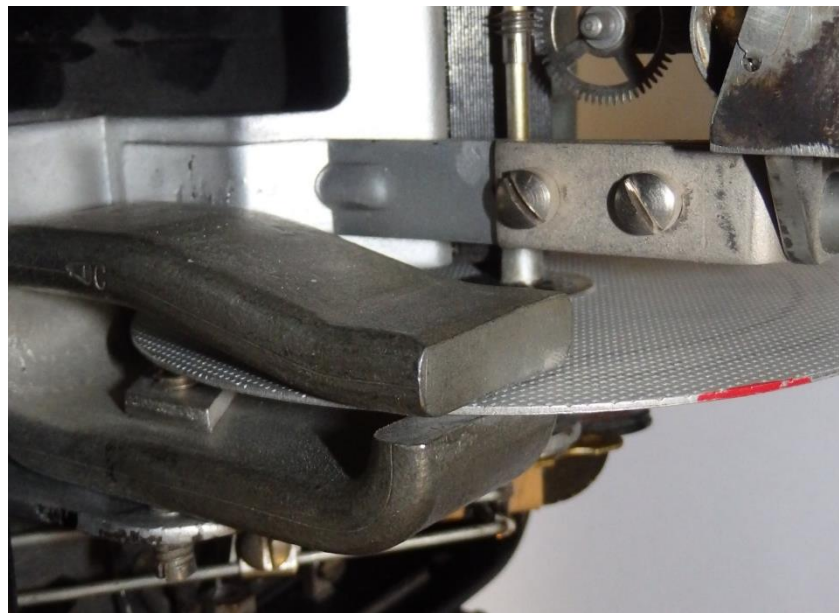
Princip elektromechanického ústrojí

Magnetické tlumení

Kovový plíšek spojený s pohyblivou částí se pohybuje v poli perm. magnetu, který je součástí nepohyblivé části. Při pohybu se do plíšku indukují vířivé proudy. Proudů se uzavírají tak, aby vlastním magn. polem působili proti příčině svého vzniku. Rychlejší pohyb = větší proudy = silnější tlumení.



*Magnetické tlumení
(kovový rámeček cívky)*



*Magnetické tlumení
(hliníkový kotouček)*

Magnetoelektrický přístroj

Deprez- d'Arsonval systém - konec 19. stol.



Marcel Deprez (1843-1918)

(<https://mieux-se-connaître.com/2015/09/la-houille-blanche/>)



Jacques-Arsene d'Arsonval(1851-1940)

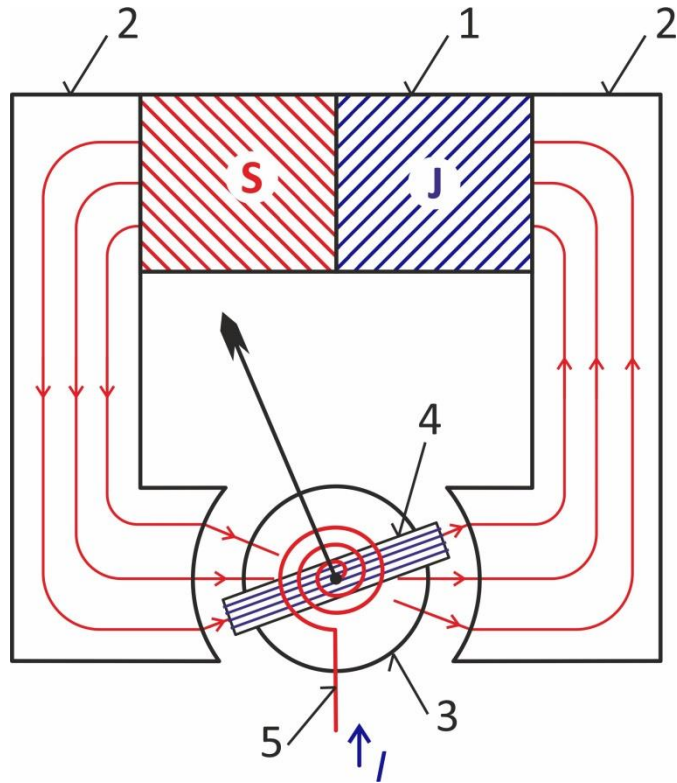
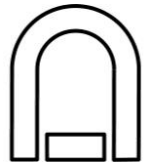
(<https://en.wikipedia.org>)



*Původní konstrukce galvanometru
systému Deprez- d'Arsonval*

(<https://artsandculture.google.com/asset/deprez-d-arsonval-galvanometer-jules-carpentier/JgGG9G9WIFn0uQ>)

Magnetoelektrický přístroj



Princip: Využívá vzájemného silového působení pole perm. magnetu a cívky, kterou prochází měřený proud.

Použití: Měření DC proudů a napětí. (AC veličiny je možné měřit pouze s vhodným převodníkem.)

$$M_p = k_p I = 2NB l r I$$

- 1...permanentní magnet
- 2...pólové nástavce
- 3...středový váleček
- 4...cívka
- 5...direktivní pružina

- N ...počet závitů cívky
- B ...indukce v mezeře
- l ...výška cívky
- r ...střední poloměr vzduchové mezery

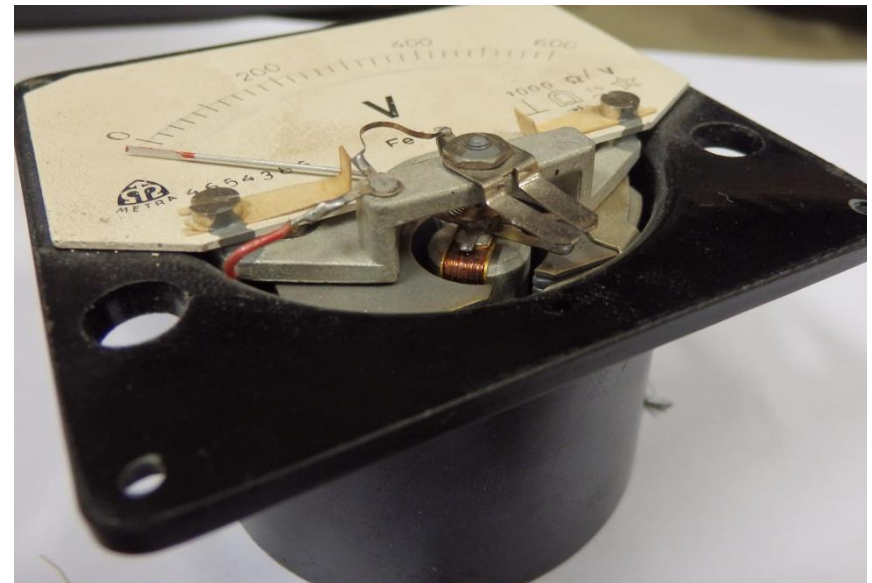
Magnetoelektrický přístroj

- Průběh stupnice:

$$\beta_u = \frac{2NBlr}{k_d} I \Rightarrow \textit{lineární}$$

- Pro velmi nízké kmitočty ($f < f_{lim}$) kde f_{lim} (mezní mechanická frekvence) měří okamžitou hodnotu.
- Při vyšších kmitočtech ($f > f_{lim}$) měří střední hodnotu a platí:
$$M_p = k_p I_{av}$$
- Samostatné ústrojí má rozsah cca $\sim 10 \mu A$ resp. $\sim 10 mV$

- Magnetoelektrický A-metr a V-metr vznikne přidáním bočníku resp. předřadníku.
- Tlumení je magnetické vířivými proudy indukovanými do nosného rámečku cívky nebo přímo do vinutí cívky.



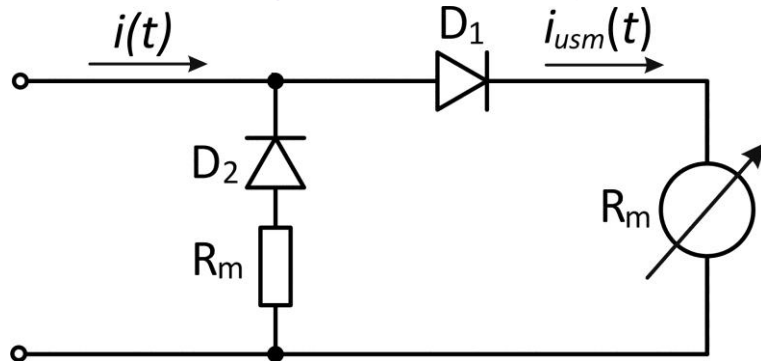
Magnetoelektrický přístroj



Magnetoelektrický přístroj s usměrňovačem

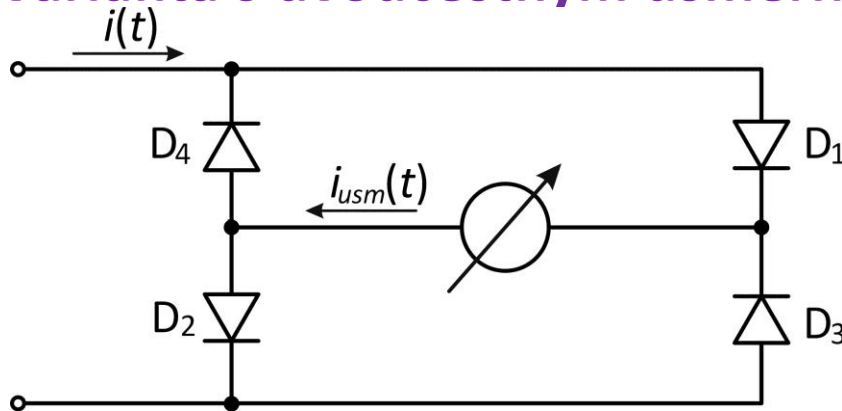
Usměrňovač zajistí nenulovou střední hodnotu proudu.

Varianta s jednocestným usměrňovačem



$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{usm}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^{T/2} |i(t)| dt$$

Varianta s dvoucestným usměrňovačem



$$I_{av} = \frac{1}{T} \int_0^T i_{usm}(t) dt = \frac{1}{T} \int_0^T |i(t)| dt$$

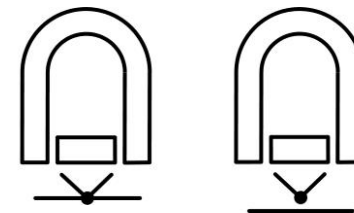
Problém: Vliv tvaru průběhu, Vliv nelinearity usměrňovačů

Frekvenční rozsah: ~10 Hz až ~10 kHz

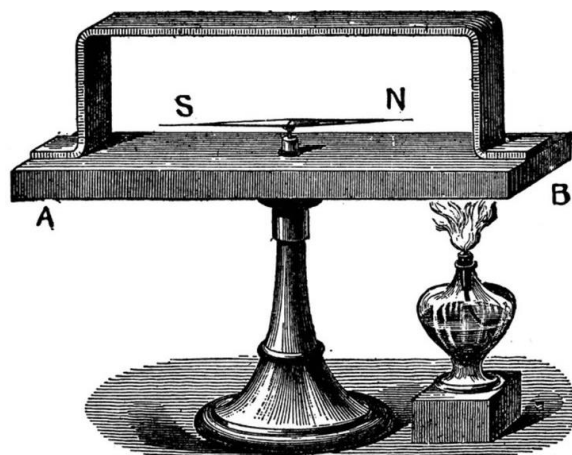
Magnetoelektrický přístroj

Magnetoelektrický přístroj s termočlánkem

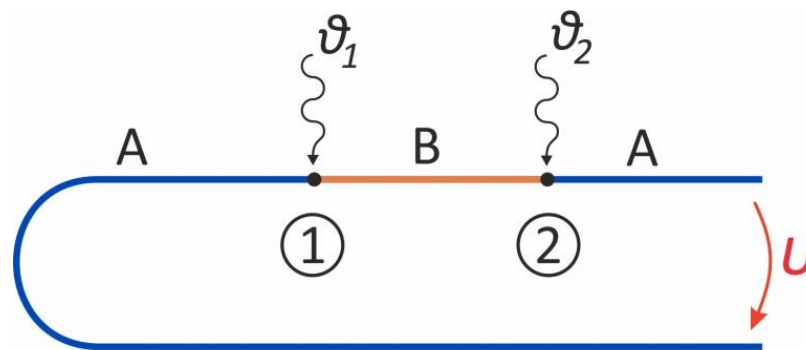
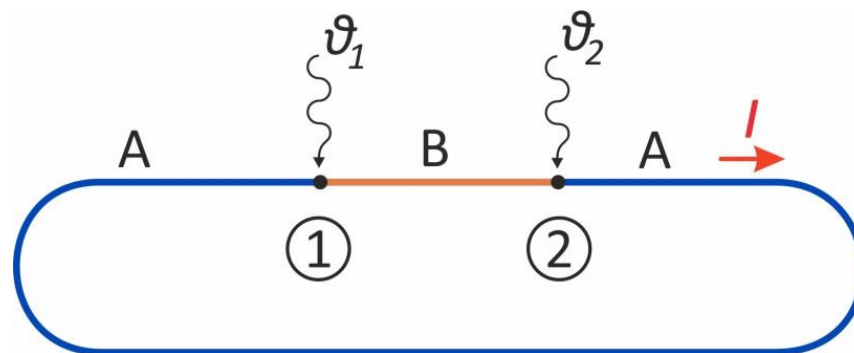
Je určen k měření střídavého proudu bez ohledu na tvar průběhu a využívá 1. termoelektrického jevu (Seebeckův jev - 1821)



J. T. Seebeck (1770-1831)



Dobový náčrt Seebeckova experimentu

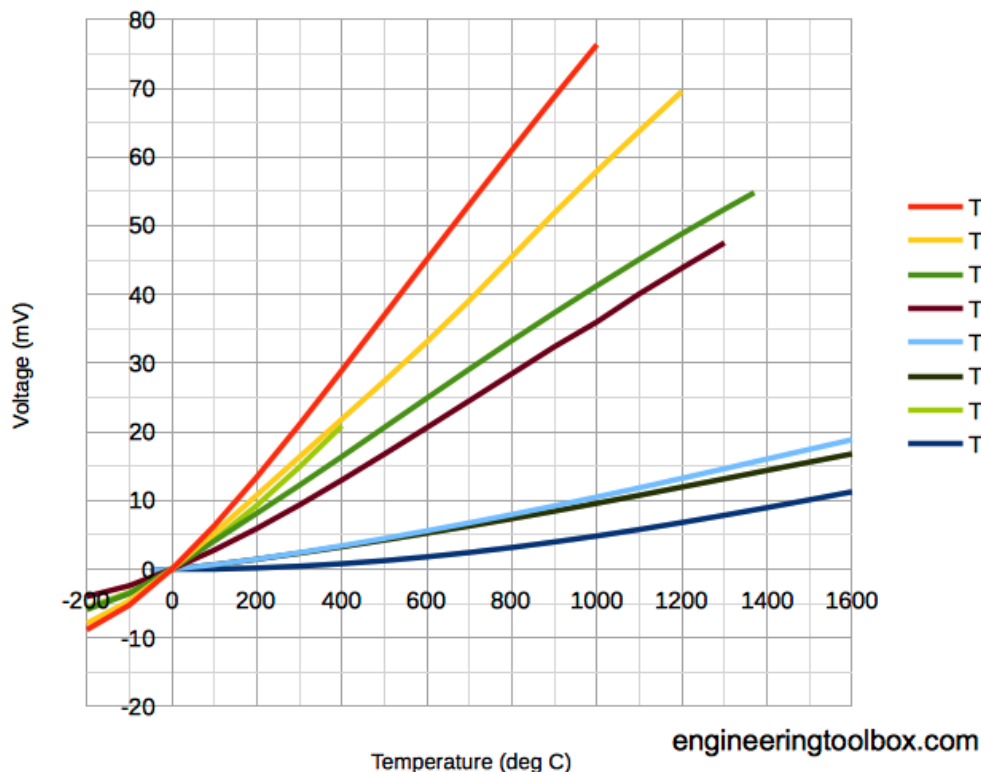


$$\vartheta_1 \neq \vartheta_2$$

Magnetoelektrický přístroj

Magnetoelektrický přístroj s termočlánkem

Různé kombinace kovů generují různá termoelektrická napětí.



Napětí generovaná různými typy termočlánků

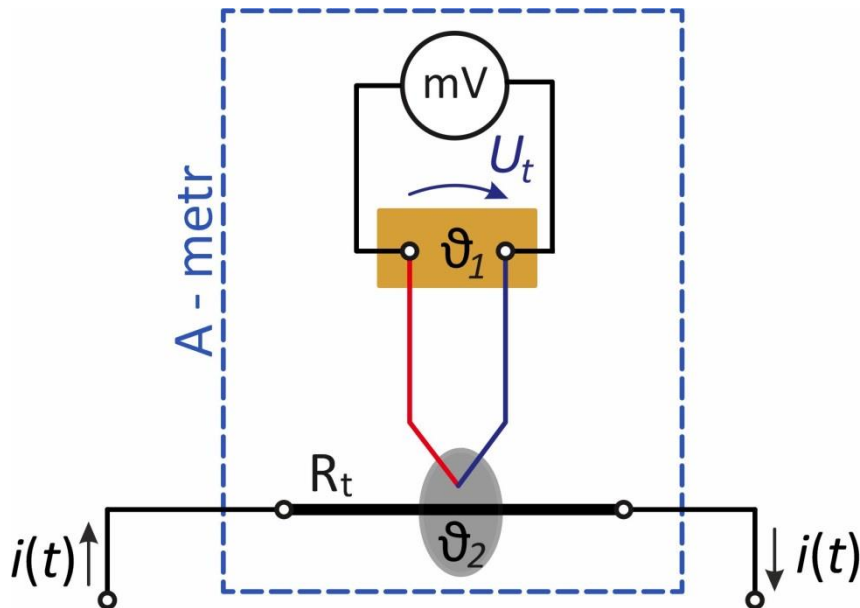
(převzato z: https://www.engineeringtoolbox.com/thermocouples-d_496.html)

Typ	Kombinace materiálů		S_{AB} ($\mu V / ^\circ C$) @ 20°C
	+vývod	-vývod	
E	Ni-Cr	Cu-Ni (Konstantan)	62
J	Fe	Cu-Ni (Konstantan)	51
K	Ni-Cr	Ni-Al	41
N	Ni-Cr-Si (Nicrosil)	Ni-Si-Mg (Nisil)	38
R	Pt-13%Rh	Pt	12
S	Pt-10%Rh	Pt	11
T	Cu	Cu-Ni (Konstantan)	40
B	Pt-30%Rh	Pt-6%Rh	8

S_{AB} ...Seebeckova konstanta ($\mu V / ^\circ C$)

Magnetoelektrický přístroj

Magnetoelektrický přístroj s termočlánkem



$$U_t = S_{AB}(\vartheta_2 - \vartheta_1) \cong S_{AB}\vartheta_2 = \\ = S_{AB}kR_t I_{RMS}^2$$

R_t ...odpor topného drátu

k ...konstanta vztahu mezi příkonem topného drátu a teplotou teplého konce T.C.

Princip: Termočlánek je vyhříváný topným drátem, kterým prochází měřený AC proud a generuje malé DC napětí. Toto napětí je měřeno magnetoel. systémem.

Vlastnosti:

- Měří přímo RMS hodnotu proudu (bez ohledu na tvar průběhu)
- Rozmezí měřicích rozsahů: ~ 1 mA až ~ 1 A
- Frekv. rozs.: DC až ~ 10 MHz
- Vyšší vlastní spotřeba
- Nelineární stupnice

Magnetoelektrický přístroj

Příklad: MX1, Metrix, [2]:

- V_{DC} rozs.: 150 mV až 1,5 kV

Vnitřní odpor: 20 k Ω /V, TP : 2

- V_{AC} rozs.: 5 V až 1,5 kV

Frekv. rozs.: 16 Hz až 1 kHz

Vnitřní odpor: 6,32 k Ω /V, TP : 2,5

- A_{DC} rozs.: 50 μ A až 10 A

Úbytek (p.v.): 0,5 V až 1,2 V, TP : 2

- A_{AC} rozs.: 500 μ A až 10 A

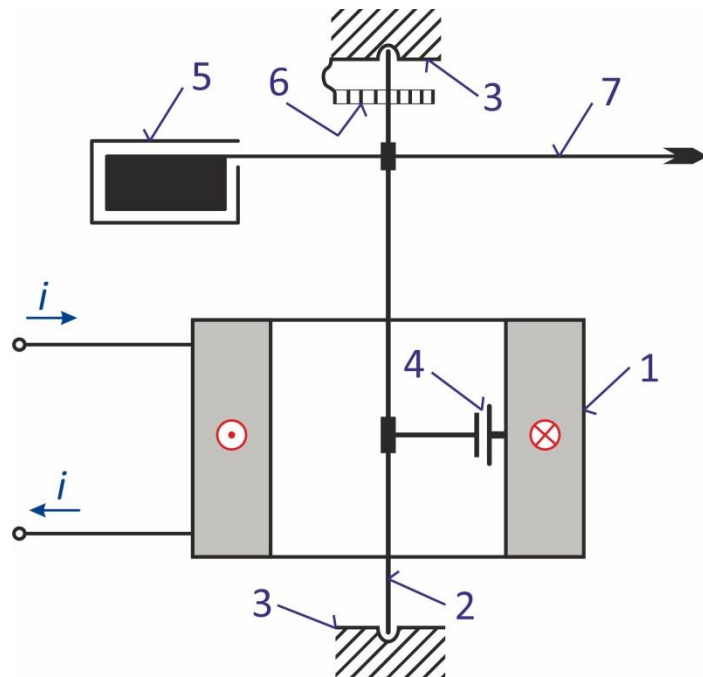
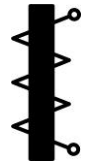
Frekv. rozs.: 16 Hz až 1 kHz

Úbytek (p.v.): 0,5 V až 1,2 V, TP : 2,5



Multimetr MX1 (Metrix)

Elektromagnetický přístroj



- 1...nepohyblivá cívka
- 2...osička pohyblivé části
- 3...uložení
- 4...feromagnetické plíšky
- 5...vzduchové tlumení
- 6...direktivní pružina
- 7...ručka (ukazovatel)

Princip: Využívá vzájemného silového působení zmagnetizovaných feromag. plíšků. Plíšky jsou magnetizovány polem vyvolaným měřeným proudem, který prochází nepohyblivou cívkou.

$$M_p = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\beta} I^2$$

Použití: Měření AC proudů a napětí.

Průběh stupnice:

$$\beta_u = \frac{1}{2k_d} \frac{dL}{d\beta} I^2 \Rightarrow \textit{kvadratická}$$

Tlumení: vzduchové.

Elektromagnetický přístroj

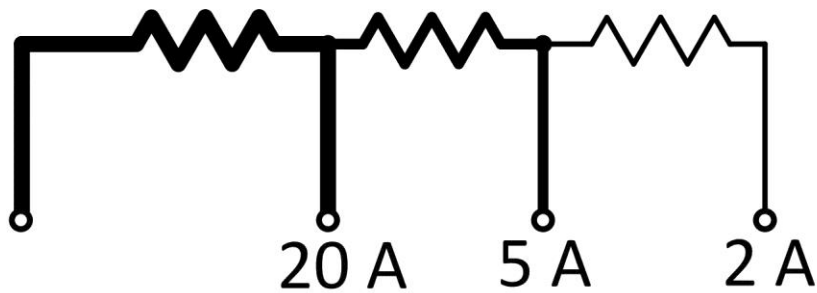
- Pro měření DC proudů a napětí nevhodné (remanance).
- Pro velmi nízké kmitočty ($f < f_{lim}$), kde f_{lim} je mezní mechanická frekvence, sleduje okamžitou hodnotu druhé mocniny střídavého proudu tj. $i^2(t)$.
- Při vyšších kmitočtech ($f > f_{lim}$) měří efektivní hodnotu bez ohledu na tvar průběhu (v rámci frekvenčního rozsahu):

$$M_p = \frac{1}{2} \frac{dL}{d\beta} I_{RMS}^2$$

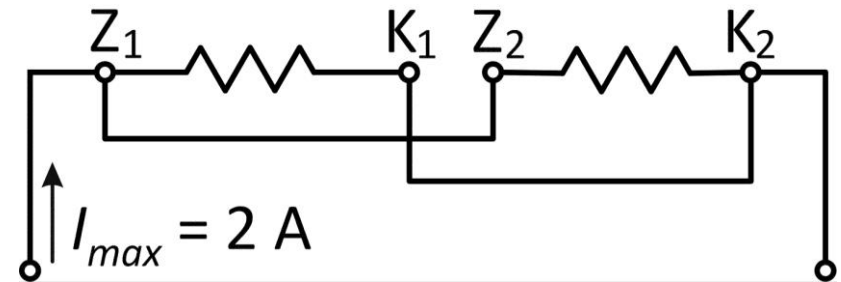
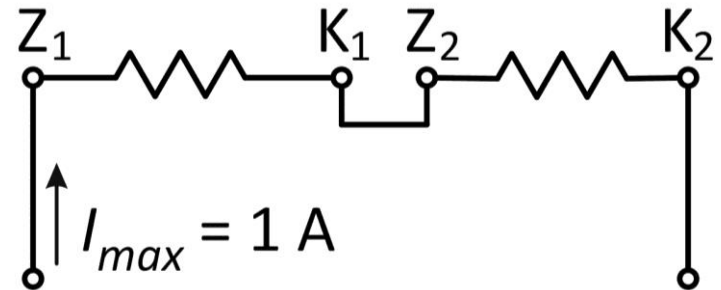
Elektromagnetický přístroj

Elektromagnetický A-metr

- “holé” ústrojí = A-metr
- Změna rozsahu:



Změna rozsahu odbočkami



Změna rozsahu řazením částí vinutí

- Dosažitelné rozsahy: ~100 mA až ~100 A
- Frekvenční rozsah: ~10 Hz až ~100 Hz

Elektromagnetický V-metr

- Přidáním předřadníku k “holému” ústrojí vznikne voltmetr.
- Dosažitelné rozsahy: ~10 V až ~100 V (obvykle max. 4 rozsahy)
- Frekvenční rozsah: ~10 Hz až ~100 Hz

Elektromagnetický přístroj

Příklad: Panelový A-metr
Fb96-1, Metra Blansko, [3]

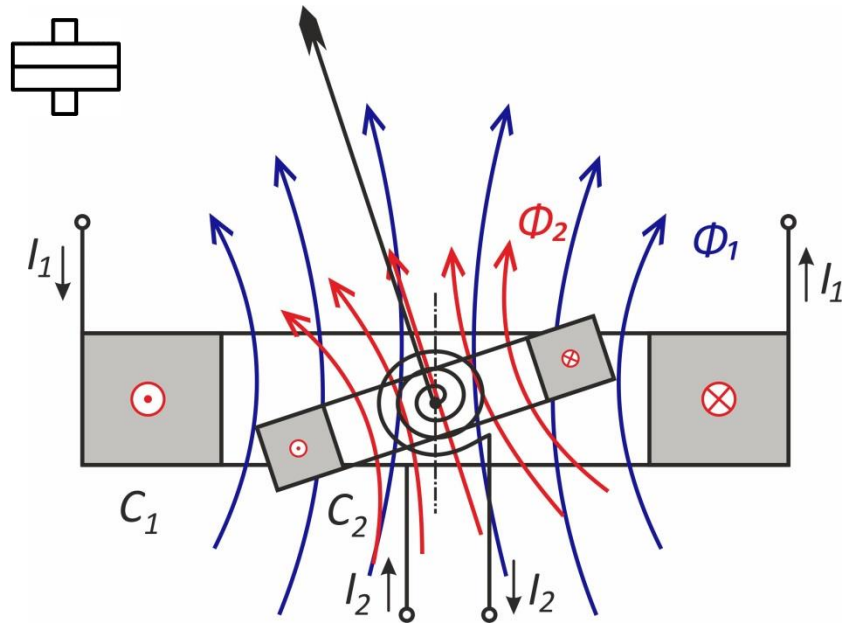
Vlastnosti:

- Rozsahy: 100, 200 mA, ..., 5 A
(x/1A, x/5A s měřicím transformátorem)
- $TP = 1,5$ (2,5 nižší rozsah)
- Prac. Frekv.: 15 Hz – 400 Hz
- Vl. spotřeba: < 0,5 VA

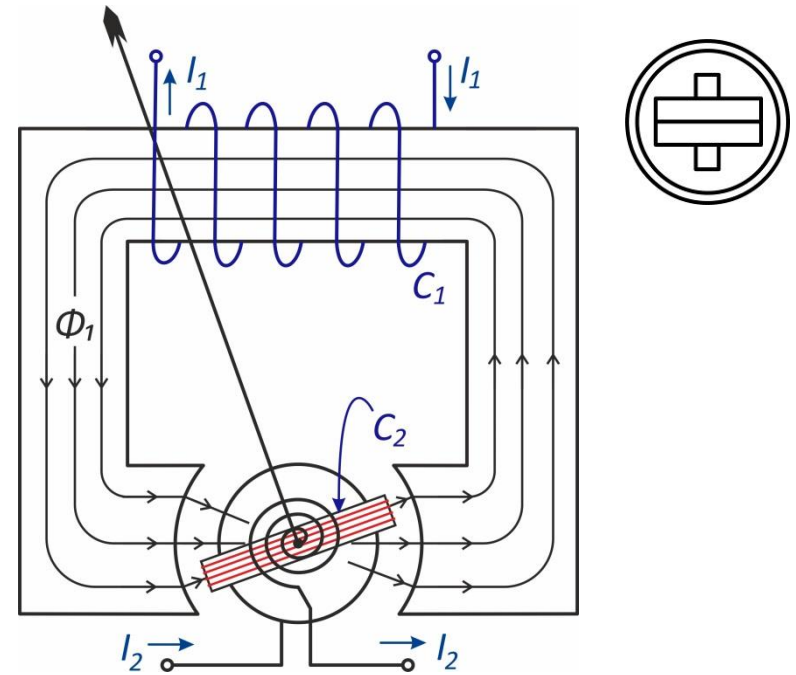


Fb96-1, Metra Blansko

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj



Elektrodynamické ústrojí



Ferodynamické ústrojí

Princip: Využívají vzájemného silového působení magnetických polí pevné a pohyblivé cívky.

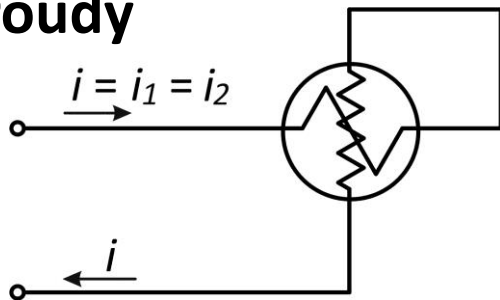
$$M_p = \frac{dM}{d\beta} I_1 I_2$$

Použití: Dle způsobu zapojení mohou měřit napětí, proud nebo výkon. Hlavní význam – wattmetr.

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický ampérmetr

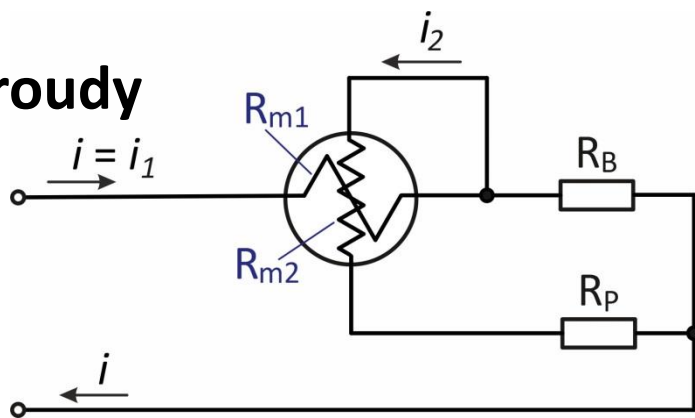
Malé proudy



$$\beta_u = \frac{1}{k_d} \frac{dM}{d\beta} I_{RMS}^2$$

\Rightarrow kvadratická stupnice

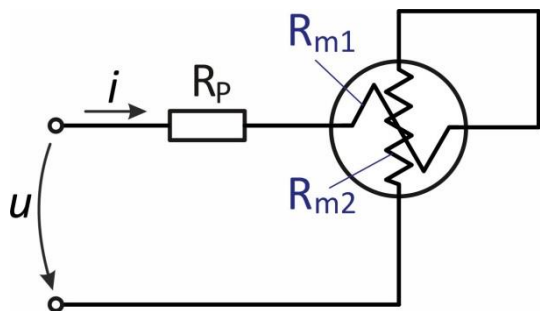
Velké proudy



$$\beta_u = \frac{k}{k_d} \frac{dM}{d\beta} I_{RMS}^2$$
$$k = f(R_P, R_B, R_{m2})$$

\Rightarrow kvadratická stupnice

Elektrodynamický/ ferodynamický voltmetr



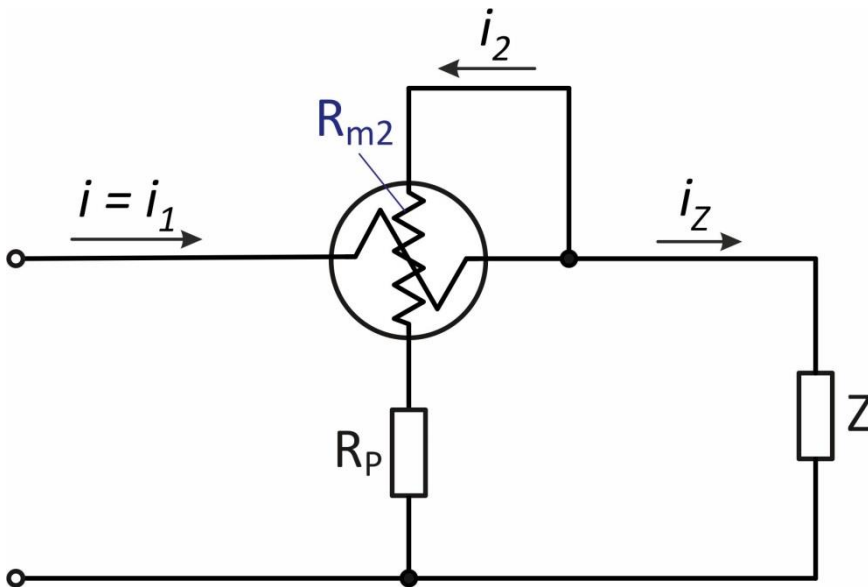
$$\beta_u = \frac{k}{k_d} \frac{dM}{d\beta} U_{RMS}^2$$
$$k = f(R_P, R_{m1}, R_{m2})$$

\Rightarrow kvadratická stupnice

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický wattmetr

Varianta zapojení I.



R_n ...odpor napětového vstupu

R_p ...odpor předřadníku

R_{m2} ...odpor napětové cívky

P_Z ...výkon na zátěži

P_n ...spotřeba napětové cívky

Průběh stupnice:

$$\beta_u = \frac{1}{k_d} \frac{1}{R_n} \frac{dM}{d\beta} (P_Z + P_n)$$

$$R_n = R_p + R_{m2}$$

\Rightarrow lineární stupnice

Hodnota měřená W-metrem:

$$P^* = k_w \alpha = P_Z + P_n$$

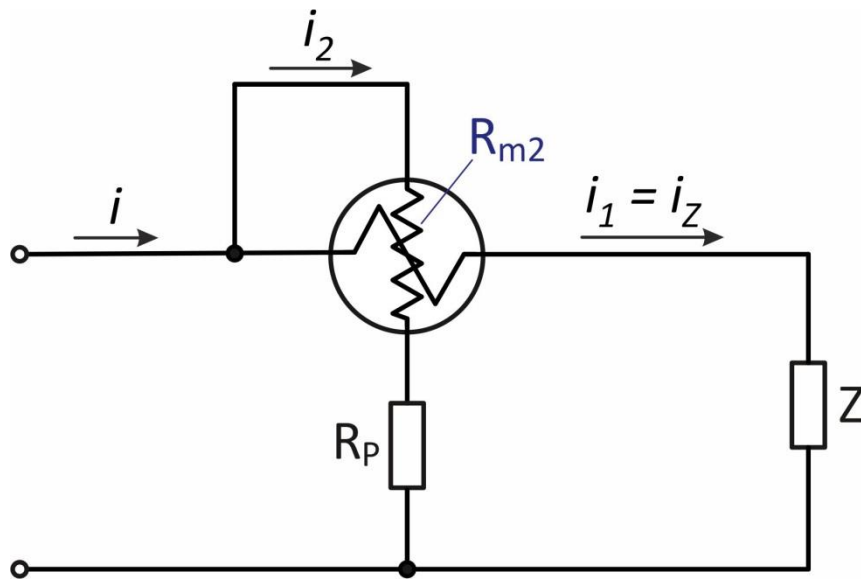
Výkon na zátěži:

$$P_Z = P^* - P_n$$

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický wattmetr

Varianta zapojení II.



R_n ...odpor napěťového vstupu

R_p ...odpor předřadníku

R_{m2} ...odpor napěťové cívky

P_z ...výkon na zátěži

P_p ...spotřeba proudové cívky

Průběh stupnice:

$$\beta_u = \frac{1}{k_d} \frac{1}{R_n} \frac{dM}{d\beta} (P_z + P_p)$$

$$R_n = R_p + R_{m2}$$

\Rightarrow lineární stupnice

Hodnota měřená W-metrem:

$$P^* = k_w \alpha = P_z + P_p$$

Výkon na zátěži:

$$P_z = P^* - P_p$$

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický wattmetr

Konstanta W-metru

$$k_w = \frac{U_n I_n}{\alpha_m} \cos \varphi_{jm} \quad (W/d)$$

U_n ...napěťový rozsah

I_n ...proudový rozsah

α_m ...maximální výchylka

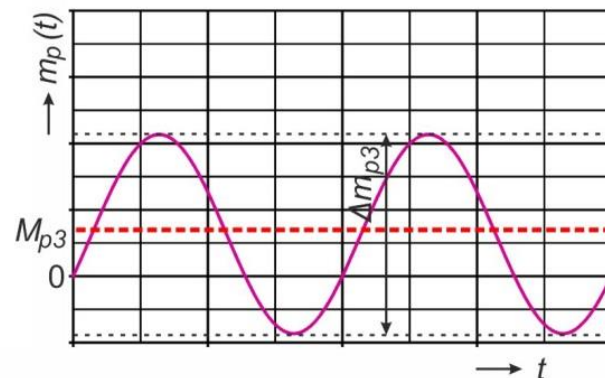
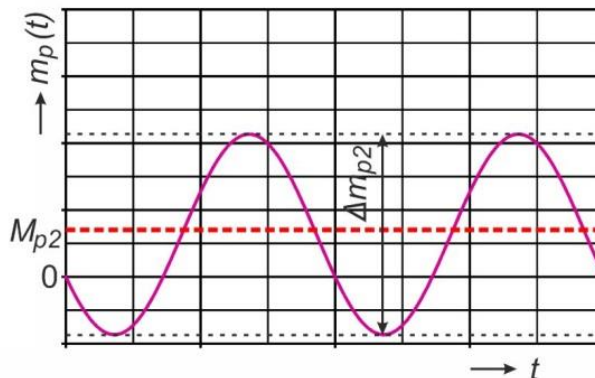
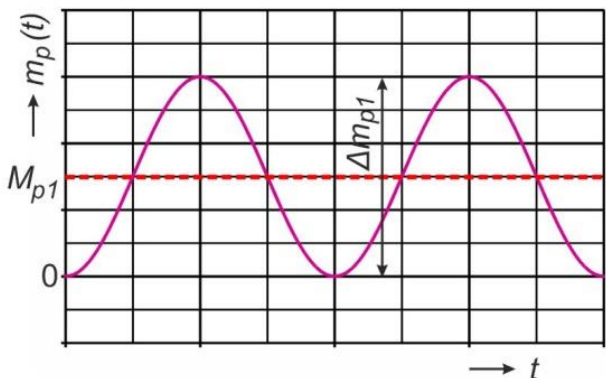
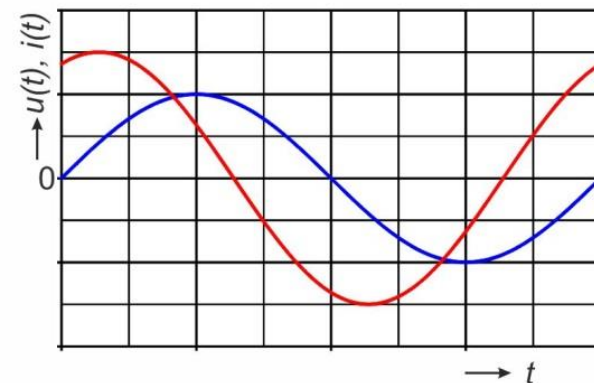
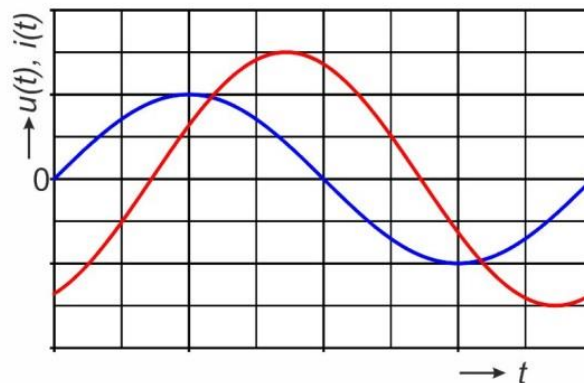
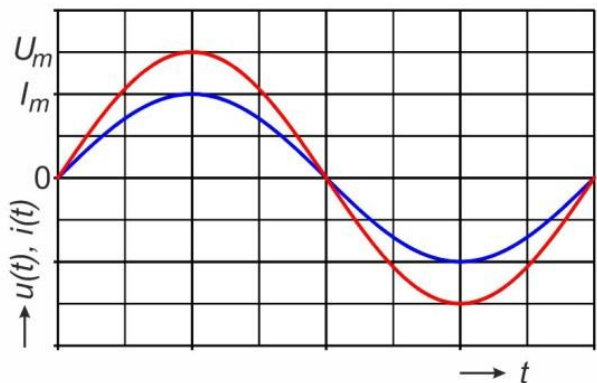
$\cos \varphi_{jm}$...jmenovitý účinník

Pozn.: W-metr je potřeba doplnit A-metrem a V-metrem, které budou poskytovat informace pro správnou volbu napěťového a proudového rozsahu W-metru.

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický wattmetr

Příklad: Vliv charakteru zátěže na velikost pohybového momentu



Odporová zátěž ($\varphi_{UI} = 0^\circ$)

R-C zátěž ($\varphi_{UI} = 65^\circ$)

R-L zátěž ($\varphi_{UI} = -65^\circ$)

$$\Delta m_{p1} = \Delta m_{p2}$$

$$M_{p2} < M_{p1}$$

$$\Delta m_{p1} = \Delta m_{p3}$$

$$M_{p3} < M_{p1}$$

Elektrodynamický a ferodynamický přístroj

Elektrodynamický/ ferodynamický wattmetr

Příklad: Elektrodynamický W-metr

C.A.404 (Chauvin Arnoux)

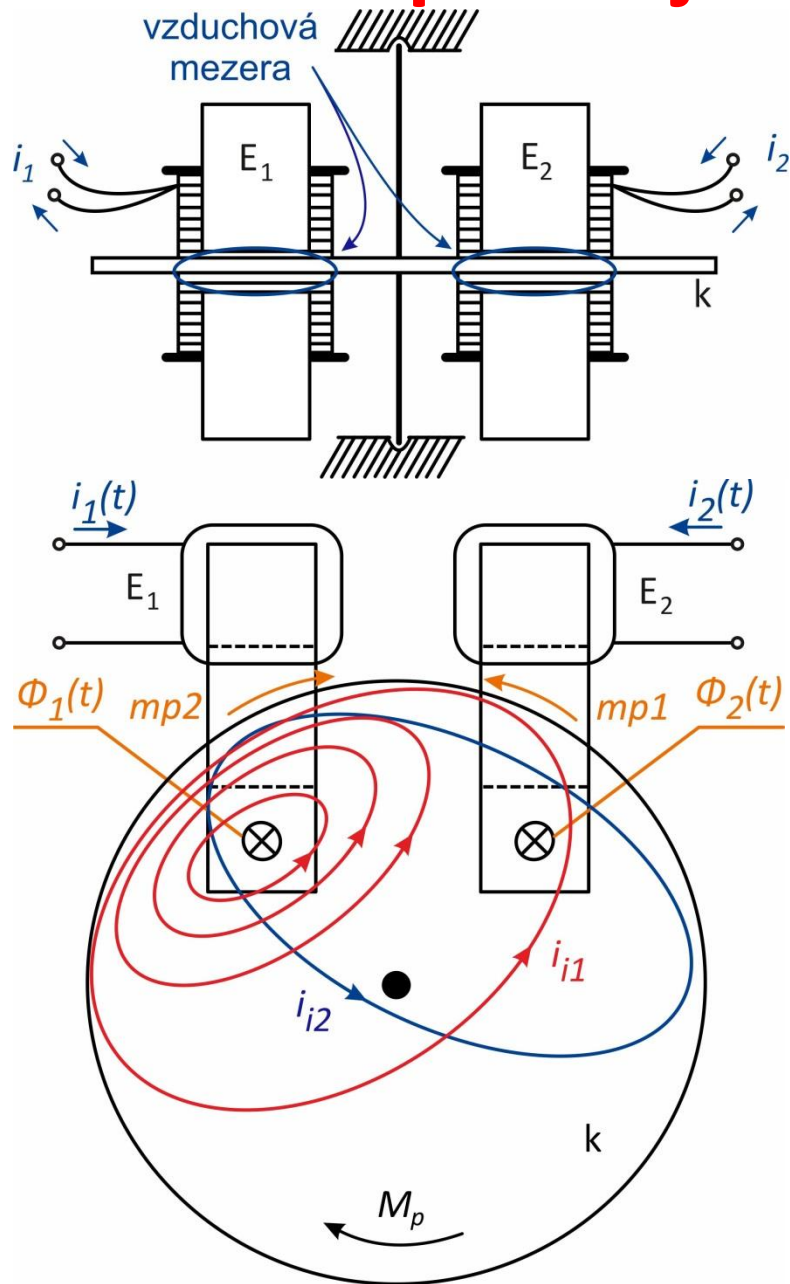
Parametry:

- Napěťové rozs.: 60 V; ...; 480 V
- Proudové rozsahy: 0,5 A; 1 A
- *TP*: 2,5 (DC); 1 (AC)
- Frekv. rozsah: DC až 500 Hz
- Jm. účinník: 1

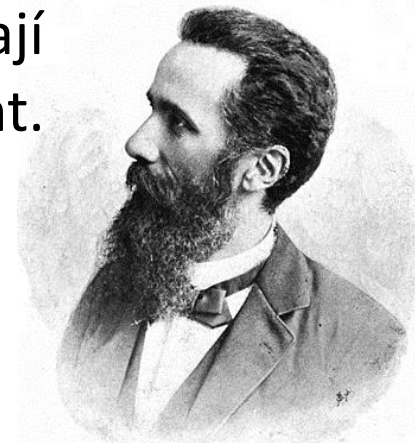


*Elektrodynamický W-metr C.A.404
(Chauvin Arnoux)*

Indukční přístroj



Princip: Cívky vytvářejí točivé magn. pole a indukují v otočném Al kotouči vířivé proudy. Magn. pole vířivých proudů spolu s magnetickými poli cívek pak vyvolávají pohybový moment. (Ferrarisův stroj)



Galileo Ferraris (1847-1897)

E_1, E_2 ...elektromagnety
 k ...vodivý (Al) kotouč
 i_{i1} ...vířivý proud od toku $\Phi_1(t)$
 i_{i2} ...vířivý proud od toku $\Phi_2(t)$

Indukční přístroj

Pohybový moment:

$$M_p = k^* \omega \Phi_{1m} \Phi_{2m} \sin \psi$$

k^* ...rozměry a odpor kotouče

ω ...úhlová frekvence toků $\Phi_1(t)$, $\Phi_2(t)$

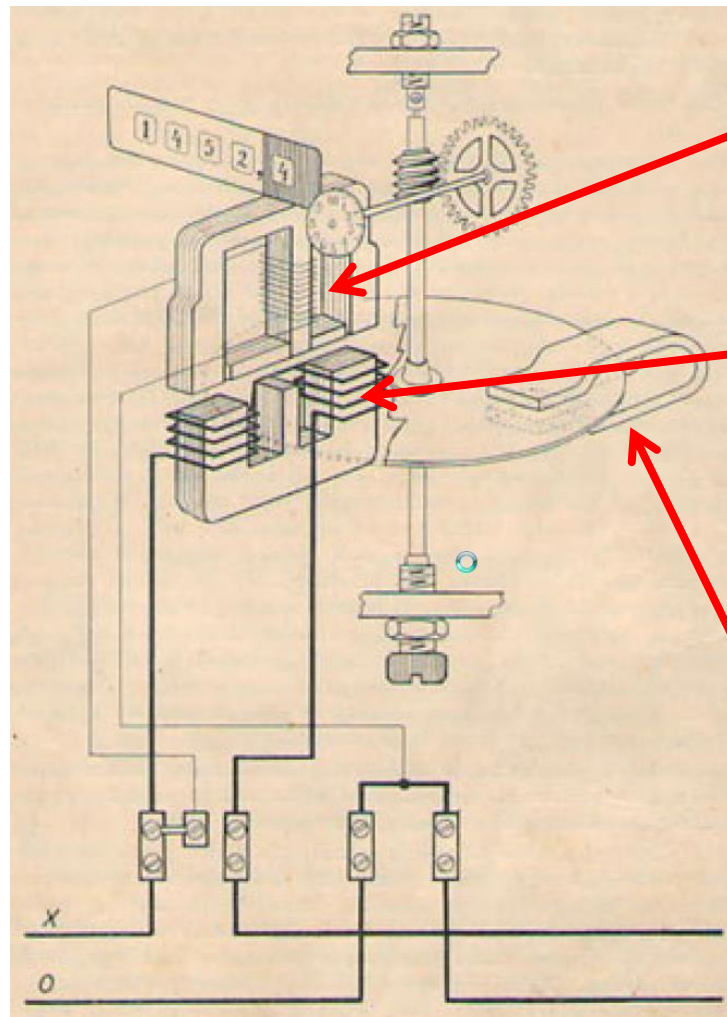
Φ_{1m} , Φ_{2m} ...amplitudy toků

ψ ...fázový posuv mezi toky $\Phi_1(t)$, $\Phi_2(t)$

Max. moment M_p nastává při $\psi = 90^\circ$

Použití: Měří jen AC veličiny (indukování vířivých proudů). Dle způsobu zapojení by bylo teoreticky možné měřit proud, napětí i výkon. Prakticky se používá pouze jako elektroměr tj. měřič energie (integrační wattmetr).

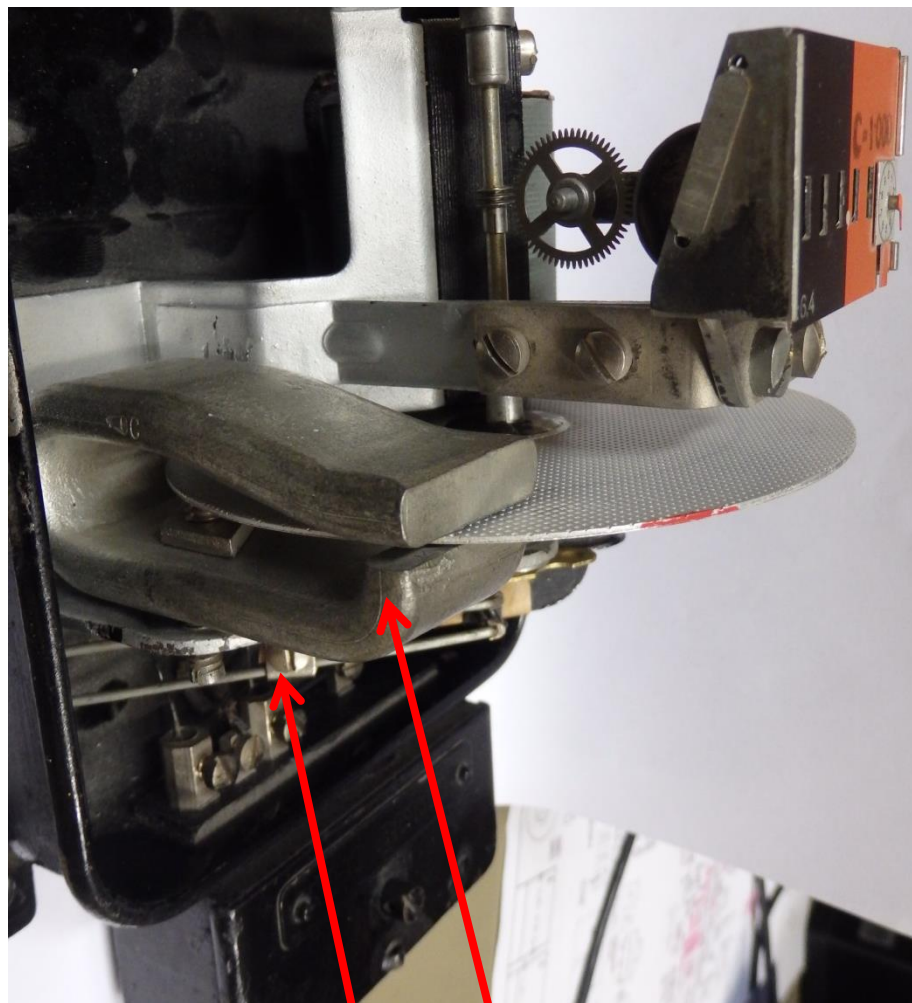
Indukční přístroj



Indukční elektroměr: Jedna cívka je napěťová, druhá je proudová. Napěťová cívka má velký počet závitů tenkým vodičem (vysoká indukčnost). Proudová cívka má malý počet závitů silným vodičem a je vinuta tak, aby měla záměrně nízkou indukčnost. Tím je zajištěno dosažení nenulového ψ pro vyvolání pohybového momentu. Dostavení požadované hodnoty se provádí nastavením odporu závitů nakrátko na sloupku napěťového elektromagnetu. Brzdný moment je vyvoláván permanentním magnetem (kompenzace teplotních vlivů).

*Zapojení jednofázového elektroměru
(převzato z [4])*

Indukční přístroj



Permanentní magnet a zkratovací propojka

Vlastnosti indukčních elektroměrů:

- Pouze AC měření
- Relativně vysoká spotřeba (s ohledem na přenášené výkony zanedbatelná)
- Kmitočtová závislost (při použití v síti nevadí)
- Teplotní závislost (částečně kompenzována)
- Relativně nízká přesnost
- Robustnost
- Vysoká přetížitelnost
- Snadná údržba

Indukční přístroj

Příklad: Indukční elektroměr
ET426, Křižík, [4]

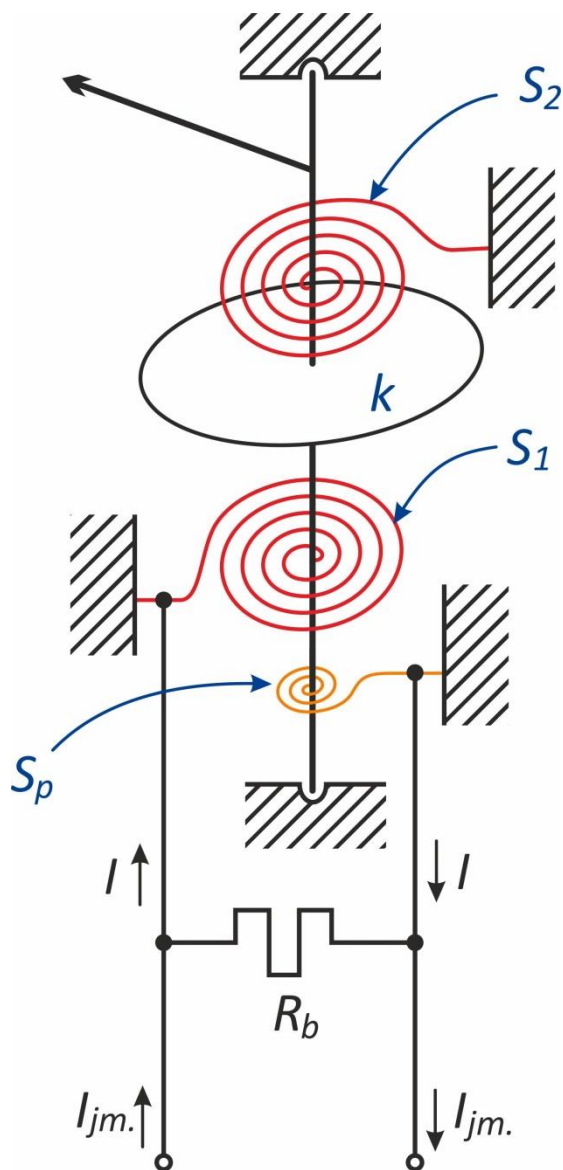
Vlastnosti:

- 120 ot/kWh (konstanta)
- Třífázový
- $TP = 2$



ET426, Křižík

Tepelný přístroj

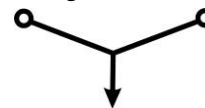


S_1 ...aktivní bimetalová spirála
 S_2 ...kompenzační bim. spirála
 k ...tepelná izolace
 S_p ...přívodní Ag drátek

Princip: Využívá tepelné roztažnosti vodiče zahříváného průchodem měřeného proudu. Změna rozměrů vodiče je přenášena na výchylku ukazovatele.

Dle konstrukce existují 2 typy:

- Tepelné ústrojí s drátem (zastaralé)



- Tepelné ústrojí s bimetalem



Použití: Rozvaděčové A-metry

Tepelný přístroj

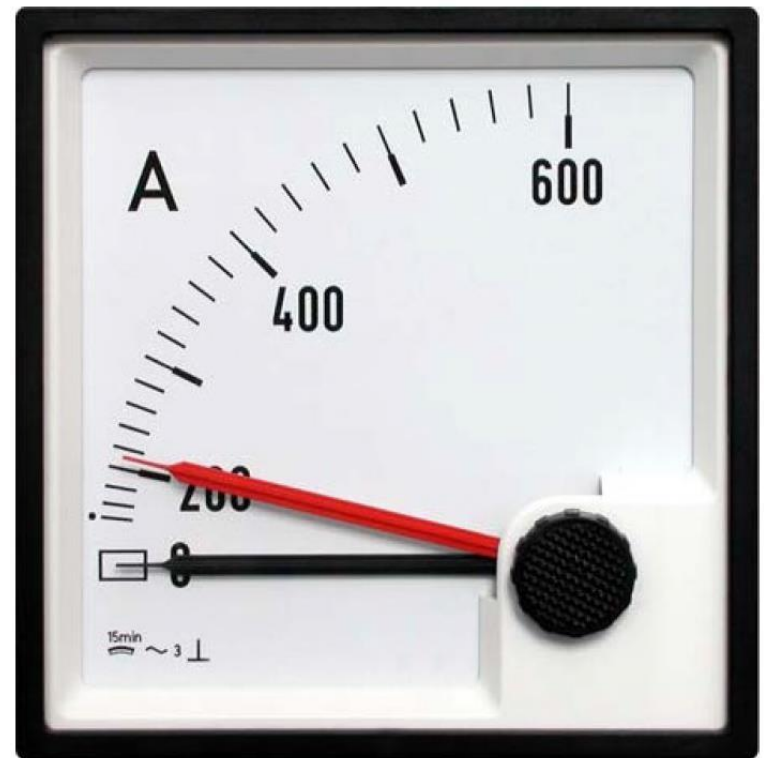
Vlastnosti:

- Měří efektivní hodnotu
- Velký pohybový moment
- Kvadratická stupnice
- Jeden rozsah
- Tlumení není potřeba (měří průměrnou RMS hodnotu)
- Nízká přesnost (chyba $\sim 1\%$)

Příklad: BQ96, Klaus Pötter, [6]

- 1 rozsah (1 A nebo 5A)
- Použití ve spojení s MTI
- Výměnná stupnice dle prim. proudu MT
- TP: 3

- VI. Spotřeba: 1,8 VA (rozs. 1 A)
2,8 VA (rozs. 5 A)
- Indikace dosaženého maxima (červená ručka)



BQ96, Klaus Pötter, [6]

Literatura

- [1] Haasz V.: Elektrická měření – přístroje a metody, ČVUT 2018
- [2] Metrix: MX 1 Multimeter, Data Sheet, X02917B00 - Ed. 04 - 03/13, 2013 www.chauvin-arnoux.com
- [3] Metra Blansko: Rozvaděčové přístroje – katalog, www.metra.com
- [4] Pražská energetika, a. s.: Elektroměry - historie a současnost, listopad 2009, www.pre.cz
- [5] Křížík: Trojfázové elektromechanické elektromery ET32./ET42., Katalogový list, 2001
- [6] Klaus Pötter mbH: Analogue Panel Instruments, Data Sheet, www.klauspoetter.com