

# TECHNIKA VYSOKÝCH NAPĚTÍ

Měření vysokých napětí a velkých proudů

# Vysokonapěťová měření

- Měření vysokých napětí (high voltage measurement) vyžaduje speciální techniky, jejichž nároky rostou s amplitudou měřených napětí (jednotky kV až jednotky MV)
- Měření vysokých napětí:
  - Střídavých
  - Stejnoseměrných
  - Impulzních
  - Přechodových dějů (transients) (monitoring)
- Měření vysokých napětí ve vn laboratořích nebo v provozní praxi vyžadují různé přístupy

# Měřicí kulová jiskřiště (sphere gaps)

- Klasická metoda pro měření vrcholové hodnoty střídavých, stejnosměrných a impulzních napětí
- Jednoduchá a spolehlivá zařízení, která se využívají zejména jako kalibrační měřidla s omezenou přesností (limited accuracy)
- Skládá se ze dvou identických kulových elektrod oddělených mezerou se vzduchovou izolací
- Nedávají nám přímo měřenou hodnotu tu stanovíme na základě vzdálenosti (distance) elektrod při přeskoku (flashover) s ohledem na atmosférické podmínky (atmospheric conditions)

# Měřicí kulová jiskřiště

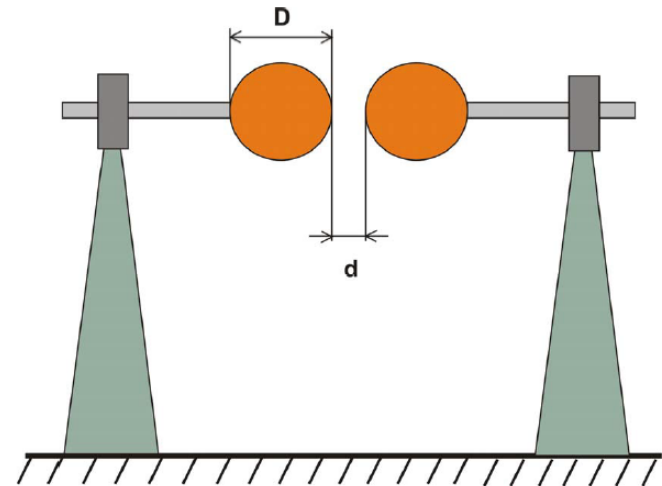
Vrcholová hodnota přesokového napětí [kV] kulového jiskřiště při atmosférickém tlaku 1013 hPa (760 torr) a teplotě 20°C.

Doskok [cm]	Ø 2 cm		Ø 10 cm		Doskok [cm]	Ø 50 cm		Ø 150 cm	
	≡ (-)	(+)	≡ (-)	(+)		≡ (-)	(+)	≡ (-)	(+)
0,05	2,8				2,0	59,0			
0,10	4,7				2,2	64,5			
0,15	6,4				2,4	70,0			
0,20	8,0				2,6	75,5			
0,25	9,6				2,8	81,0			
0,30	11,2				3,0	86,0			
0,40	14,4				3,5	99,0			
0,50	17,4		16,8		4,0	112			
0,60	20,4		19,9		4,5	125			
0,70	23,2		23,0		5,0	138		138	
0,80	25,8		26,0		5,5	151		151	
0,90	28,3		28,9		6,0	164		164	
1,0	30,7		31,7		6,5	177		177	
1,2	(35,1)		37,4		7,0	189		190	
1,4	(38,5)		42,9		7,5	202		203	
1,5	(40,0)		45,5		8,0	214		215	
1,6			48,1		9,0	239		241	
1,8			53,5		10,0	263		266	
2,0			59,0		11	286	287	292	
2,2			64,5		12	309	311	318	
2,4			69,5	70,0	13	331	334	342	
2,6			74,5	75,5	14	353	357	366	
2,8			79,5	80,5	15	373	380	390	
3,0			84,0	85,5	16	392	402	414	
3,5			95,0	97,5	17	411	422	438	
4,0			105	109	18	429	442	462	
4,5			115	120	19	445	461	486	
5,0			123	130	20	460	480	510	
5,5			(131)	(139)	22	489	510	560	
6,0			(138)	(148)	24	515	540	610	
6,5			(144)	(156)	26	(540)	570	655	
7,0			(150)	(163)	28	(565)	(595)	700	
7,5			(155)	(170)	30	(585)	(620)	745	
					32	(605)	(640)	790	
					34	(625)	(660)	835	
					36	(640)	(680)	875	880
					38	(665)	(700)	915	925
					40	(670)	(715)	955	965
					45			1030	1060
					50			1130	1150
					55			1210	1240
					60			1280	1310
					65			1340	1380
					70			1390	1430
					75			1440	1480
					80			(1490)	(1530)
					85			(1540)	(1580)
					90			(1580)	(1630)
					100			(1660)	(1720)
					110			(1730)	(1790)
					120			(1800)	(1860)

~	střídavé napětí
=	stejnoseměrné napětí obou polarit
(-)	polovinové impulzní napětí - <u>záporné</u>
(+)	polovinové impulzní napětí - <u>kladné</u>

(uvádí se jen tehdy, je-li odlišné od přesokového napětí při záporné polaritě)



# Korekce na atmosférické podmínky

- Referenční podmínky  $t_0=20^\circ\text{C}$ ,  $p_0=101,3\text{ kPa}$ ,  $v_a=8,5\text{ g/m}^3$
- Hustota vzduchu (air density)

$$\delta = \frac{p}{p_0} \cdot \frac{273 + t_0}{273 + t}$$

- Vrcholová hodnota měřeného napětí

$$U = U_N \delta \quad \text{v rozsahu} \quad 0,95 < \delta < 1,05$$

- Korekce na vlhkost (humidity correction)

$$k_v = 1 + 0,002 \left( \frac{v}{\delta} - 8,5 \right)$$

# Elektrostatický voltmetr

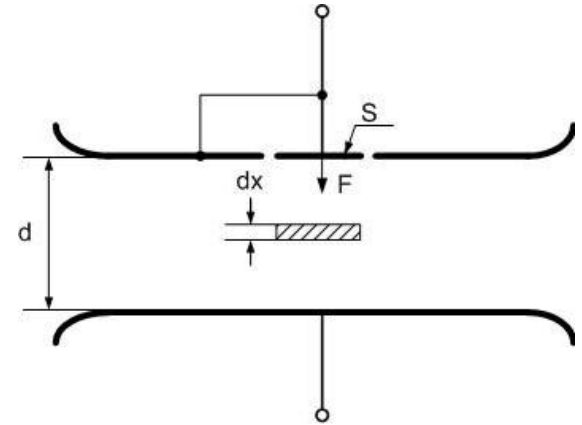
- Přímé měření vysokých potenciálů typicky od stovek voltů po stovky kV
- Měří střídavé i stejnosměrné napětí
- Vykazují velký vnitřní odpor (internal resistance)
- Vysoký horní limit frekvence měřeného napětí, několik MHz (omezeno seriovou rezonancí indukčnosti obvodu a kapacitou měřicího systému)
- Jako izolační plyn (insulation gas) se nejčastěji užívá vzduch, pro vyšší napětí lze využít plyn SF<sub>6</sub> (do 1MV, přesnost 0.1%).
- Přesnost je u speciálních konstrukcí do 1% pro běžné aplikace do 2%

# Elektrostatický voltmetr

- Silové působení na volnou elektrodu

*Hustota energie (energy density)*

$$w_e = \frac{1}{2} \epsilon E^2$$



*Energie v elementu dx*

$$dw = w_e S dx = \frac{1}{2} \epsilon S E^2 dx$$

*Síla působící na volnou elektrodu (acting force on free elect.)*

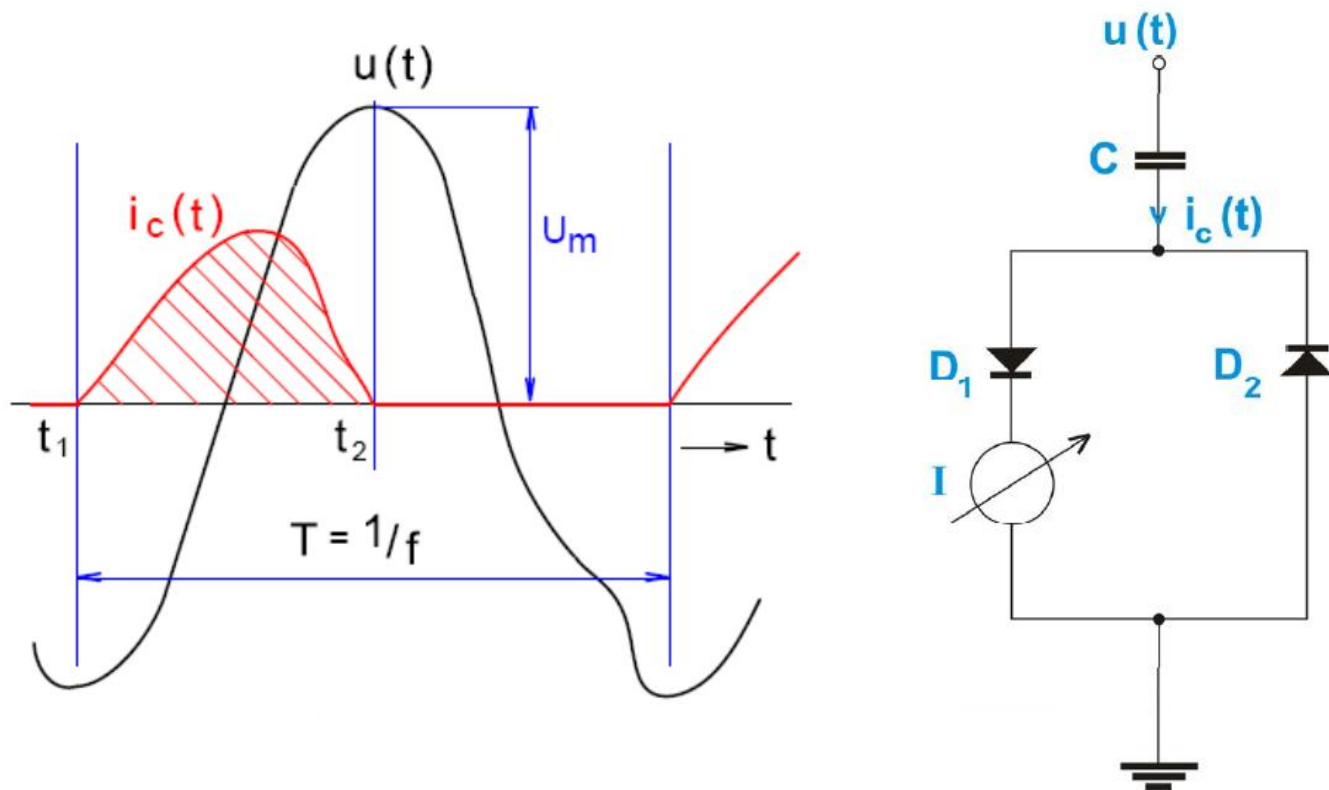
$$F = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{2} \epsilon S E^2 = \frac{1}{2} \epsilon S \frac{U^2}{d^2}$$

*Střední hodnota síly pro časově proměnné napětí*

$$\frac{1}{T} \int_0^T F(t) dt = \frac{\epsilon S}{2d^2 T} \int_0^T U^2(t) dt = \frac{\epsilon S}{2d^2} U_{RMS}^2$$

# Vrcholový voltmetr (Chubb-Fortescue method)

- Jednoduchá a přesná metoda měření vrcholové hodnoty střídavého napětí





# Vrcholový voltmetr (Chubb-Fortescue method)

*Proud kondenzátorem C:*

$$i_C = C \frac{du}{dt}$$

*Střední hodnota měřeného proudu:*

$$I = \frac{1}{T} \int_{t_1}^{t_2} i_C dt = \frac{C}{T} [u(t_2) - u(t_1)] = \frac{C}{T} U_{pp}$$

*Vrcholová hodnota měřeného napětí:*

$$U_m = \frac{I}{2Cf}$$

# Děliče napětí (voltage dividers)

- Mohou se skládat z kombinace pasivních prvků (odpor, kapacita, indukčnost)
- Rozměry děliče jsou úměrné maximálnímu aplikovanému napětí (applied voltage)

Dělicí poměr (divider ratio):

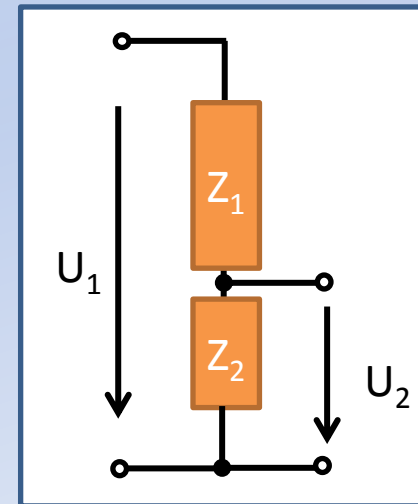
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Odporový dělič

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

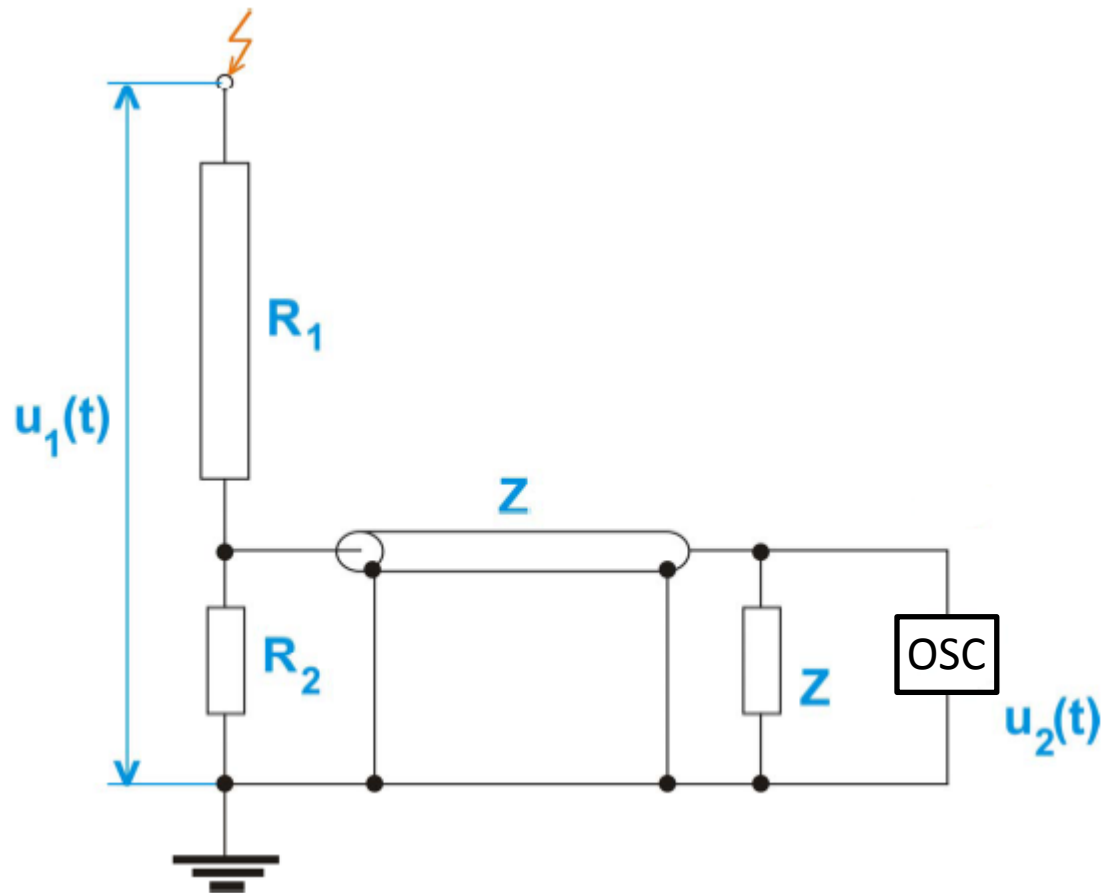
Kapacitní dělič

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{C_1}{C_1 + C_2}$$



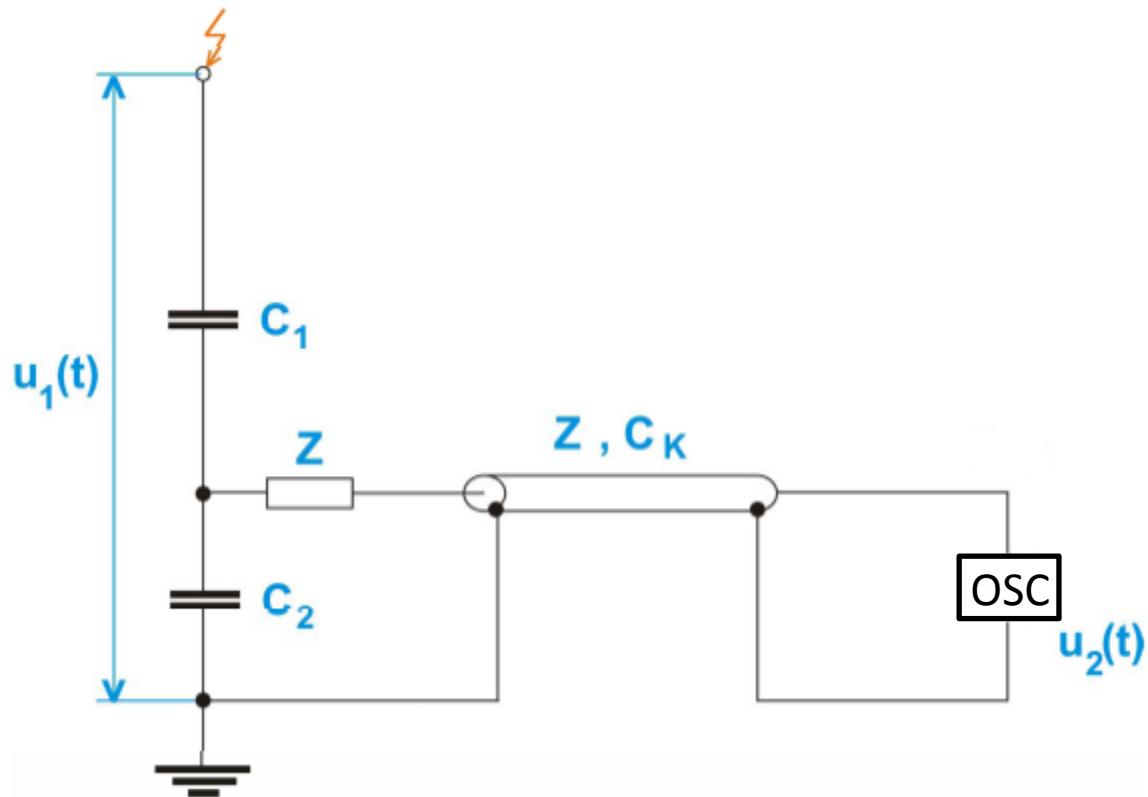
# Odporový dělič

- Měření stejnosměrných, střídavých a impulzních napětí
- Velikost chyby je funkcí součinu kapacity vn a odporu děliče



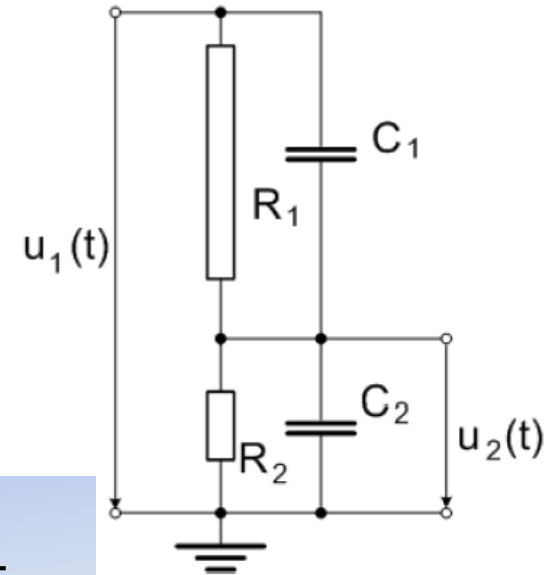
# Kapacitní dělič

- Měření střídavých a impulzních napětí
- Jednodušší a reprodukuje věrněji než odporový dělič



# Kompenzovaný odporový dělič

- Při rychlých jevech (fast transients) se chová jako kapacitní, při pomalých jako odporový dělič
- Frekvenční nezávislost (kompenzace) (frequency independent)



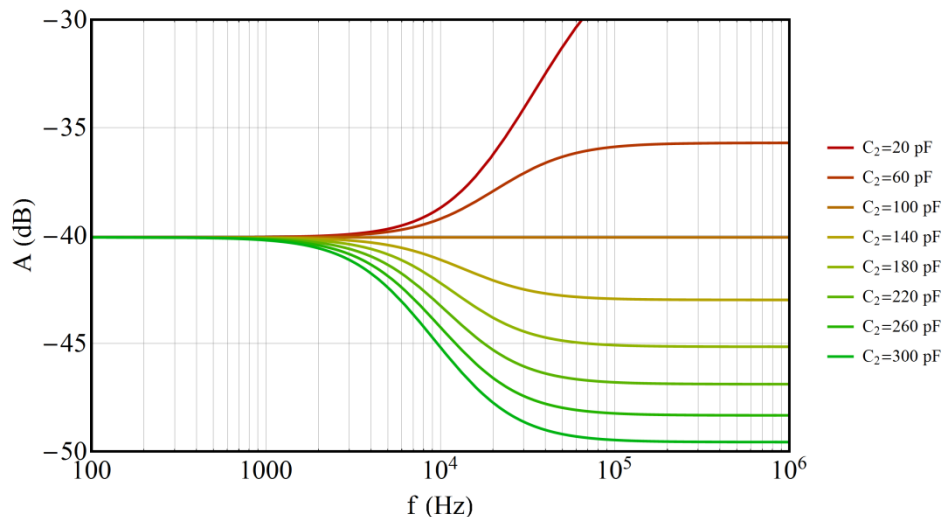
$$Z_1 = \frac{R_1}{1 + j\omega C_1 R_1} \quad Z_2 = \frac{R_2}{1 + j\omega C_2 R_2}$$

$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega C_1 R_1 - jR_2}{\omega R_1 R_2 (C_1 + C_2) - j(R_1 + R_2)}$$

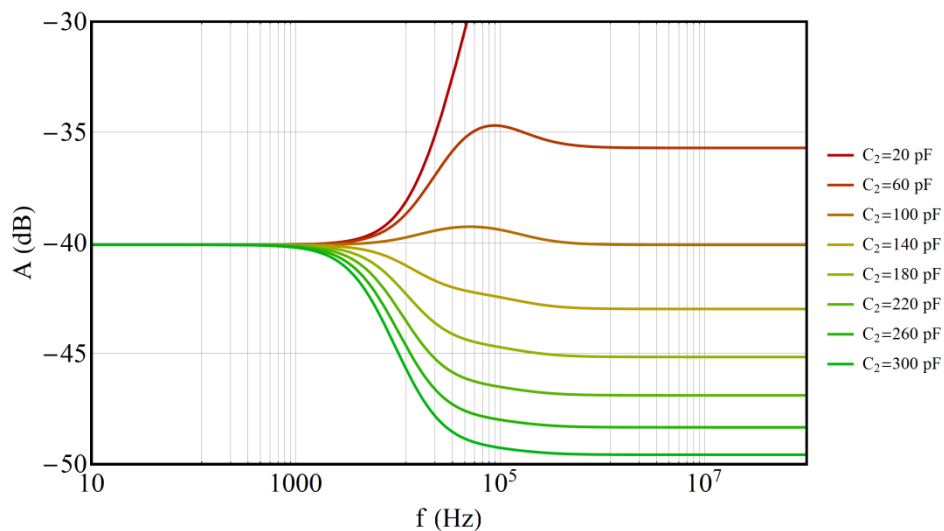
$$\operatorname{Im} \left( \frac{U_2}{U_1} \right) = \frac{\omega R_1 R_2 (C_1 R_1 - C_2 R_2)}{(R_1 + R_2)^2 + \omega^2 R_1^2 R_2^2 (C_1 + C_2)^2} = 0$$

$$\Rightarrow C_1 R_1 = C_2 R_2$$

# Kompenzovaný RC dělič



Útlum kombinovaného děliče pro různé kapacity  $C_2$ , dělič je plně kompenzován pro  $C_2=100\text{pF}$

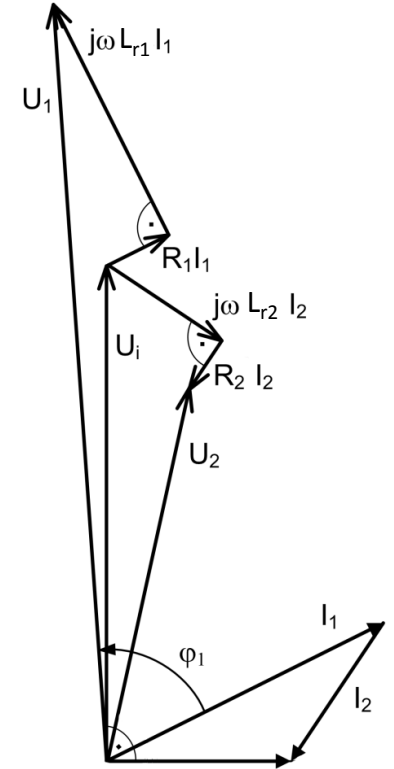
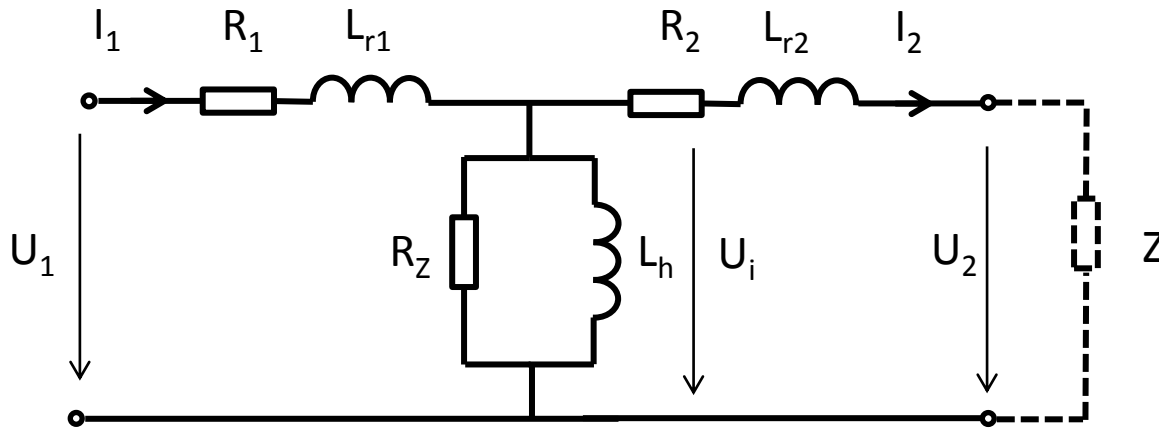


Útlum kombinovaného děliče s parazitní indukčností 1 mH

# Měřicí transformátor napětí (Instrument voltage transformer)

- Jednofázové transformátory
- V elektrizační soustavě plní funkci měřicí (informativní, fakturační) a jistící (vstupy pro elektrické ochrany)
- Galvanicky oddělují vysokonapěťový obvod od měřicích přístrojů

# Měřicí transformátor napětí

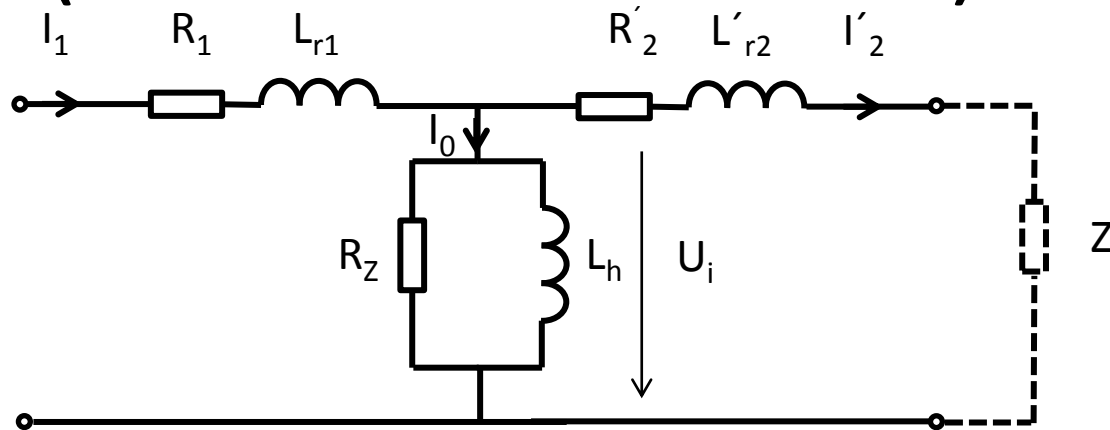


*Definice chyby napětí*

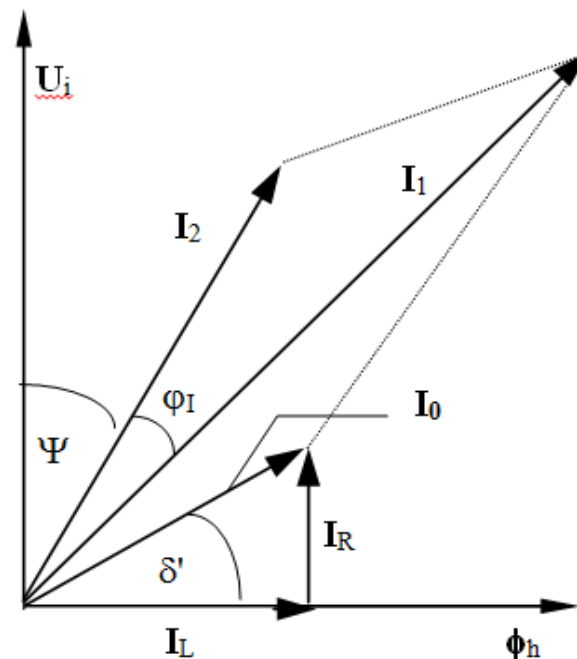
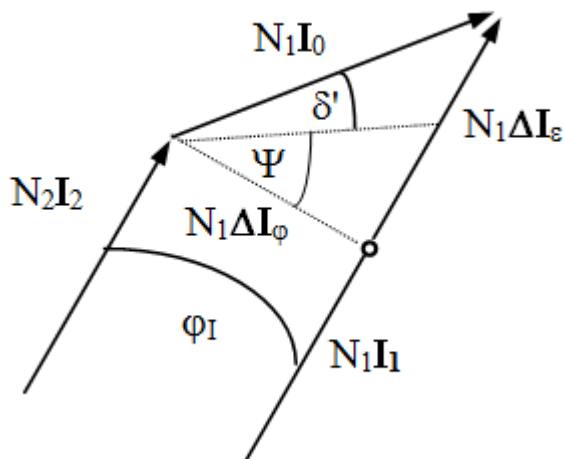
$$\varepsilon_U = \frac{p_U U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100$$



# Měřicí transformátor proudu (Current transformer)



Za podmínky malých chyb MTP platí  $I_0 \ll I_1$ , resp.  $I_0 \ll I_2$   
lze považovat koncové části fázorů  $I_1$  a  $I_2$  za rovnoběžné.



# Chyba proudu MTP

*Definice chyby proudu*

$$\varepsilon_I = \frac{p_I I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100$$

*Ze zjednodušeného fázorového diagramu ji můžeme vyjádřit jako*

$$\varepsilon_I = \frac{N_2 I_2 - N_1 I_1}{N_1 I_1} = \frac{N_1 \Delta I_\varepsilon}{N_1 I_1} = -\frac{N_1 I_0}{N_1 I_1} \sin(\delta' + \psi)$$

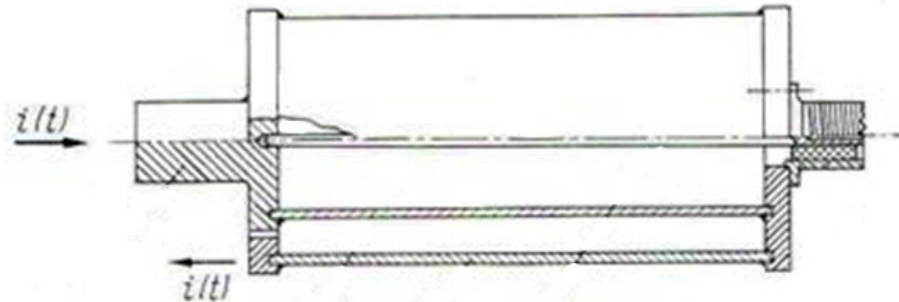
*kde magnetické napětí  $N_1 I_0 = Hl = \frac{Bl}{\mu_0 \mu_r}$ , pak chybu proudu a fáze lze vyjádřit jako:*

$$\varepsilon_I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu_r N_1 I_1} \sin(\delta' + \psi)$$

$$\varphi_I \approx \operatorname{tg} \varphi_I = \frac{Bl}{\mu_0 \mu_r N_1 I_1} \cos(\delta' + \psi)$$

# Odporové bočníky (shunty)

- Přesný rezistor protékaný měřeným proudem (ss, stř. nebo imp.).
- Eliminace vlivu skin efektu při vyšších frekvencích - dosahuje se uspořádáním pásků z manganinu do válcové plochy (koaxiální bočník).
- Nevýhodou je galvanické propojení měřicího systému s měřeným obvodem a tepelné a mechanické namáhání bočníku při měření velkých proudů



# Rogowského cívka

Měřený proud lze vyjádřit jako:

$$i(t) = \frac{1}{M} \int_0^T u(t) dt$$

kde  $M$  je vzájemná indukčnost mezi vodičem  $N_1$  a snímacím vinutím  $N_{RC}$

Pro harmonický průběh proudu:

$$I_1(\omega) = \frac{U_i(\omega)}{j\omega M}$$

Konstantou  $RC$  pak rozumíme:

$$k_{RC} = \frac{U_i}{\omega I}$$

