

# 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)

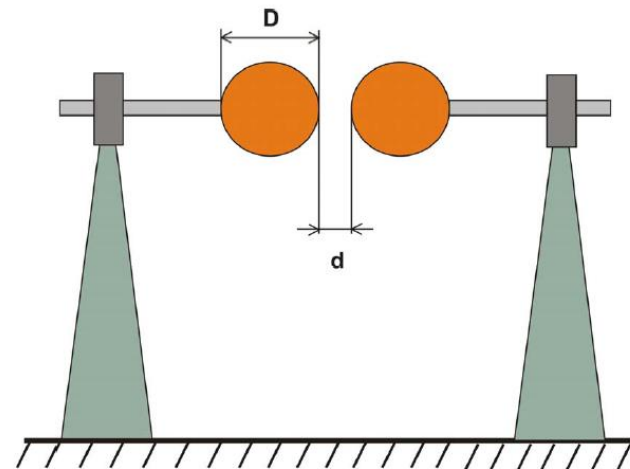
- Klasická metoda pro měření vrcholové hodnoty střídavých, stejnosměrných a impulzních napětí
- Jednoduchá a spolehlivá zařízení, která se využívají zejména jako kalibrační měřidla s omezenou přesností (limited accuracy)
- Skládá se ze dvou identických kulových elektrod oddělených mezerou (gap) se vzduchovou izolací
- Neudávají 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 přeskovového 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	
~ střídavé napětí					32	(605)	(640)	790	
= stejnosměrné napětí obou polarit					34	(625)	(660)	835	
⌋ polovinové impulzní napětí - záporné					36	(640)	(680)	875	880
⌋ polovinové impulzní napětí - kladné					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)

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



# Korekce na atmosférické podmínky

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

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

- Vrcholová hodnota (peak value) měřeného napětí

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

- Korekce na vlhkost (humidity correction)

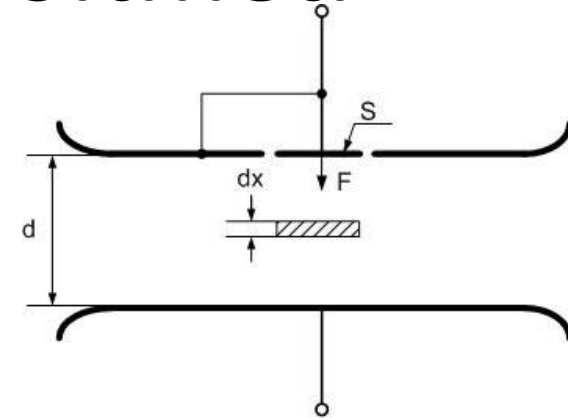
$$k_v = 1 + 0,002 \left( \frac{v}{\delta} - 8,5 \right)$$

# Elektrostatický voltmetr (electrostatic voltmeter)

- 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 sériovou rezonancí indukčnosti obvodu a kapacity měřicího systému)
- Jako izolační plyn (insulating gas) se nejčastěji užívá vzduch, pro vyšší napětí lze využít plyn SF<sub>6</sub> (do 1 MV, 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)*

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

*Energie v elementu dx*

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

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

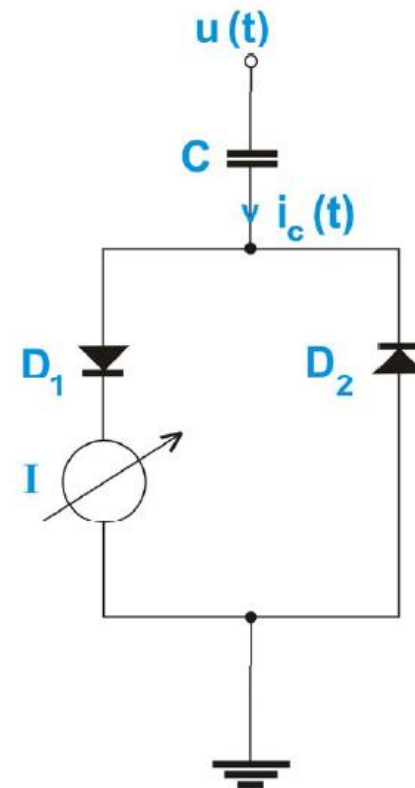
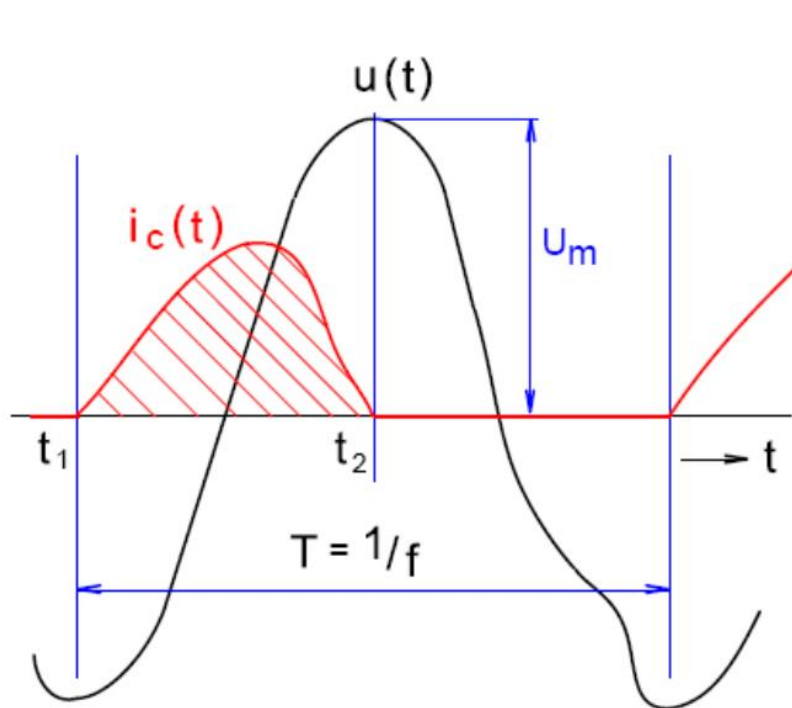
$$F = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{2} \varepsilon S E^2 = \frac{1}{2} \varepsilon S \frac{U^2}{d^2}$$

*Střední hodnota (mean value) síly pro časově proměnné napětí*

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

# 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)

- Skládají se z kombinace pasivních prvků (odporů a kapacit)
- Rozměry děliče jsou úměrné maximálnímu aplikovanému napětí (applied voltage)
- Horní elektroda bývá opatřena korónovým prstencem (grading ring; potlačení koróny -> vyšší přesnost)
- Výstupní proud by měl být menší než 10 mA (tomu odpovídá impedance 1 M $\Omega$  na 10 kV jmenovitého napětí)

# Děliče napětí

- Při měření je nutné navrhnout obvod tak, aby se na vstupu do osciloskopu neobjevilo napětí vyšší než 50 V
- Výstupní napětí je dáno dělicím poměrem

Dělicí poměr (divider ratio):

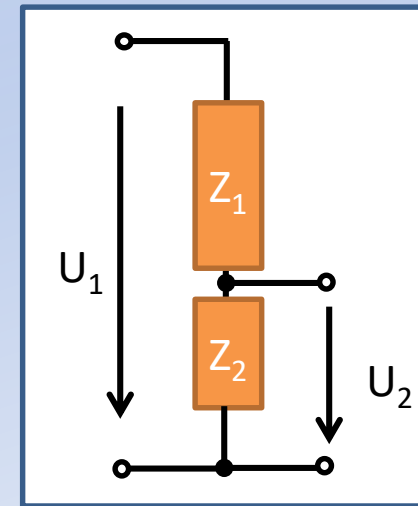
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{Z_2}{Z_1 + Z_2}$$

Odporový dělič

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

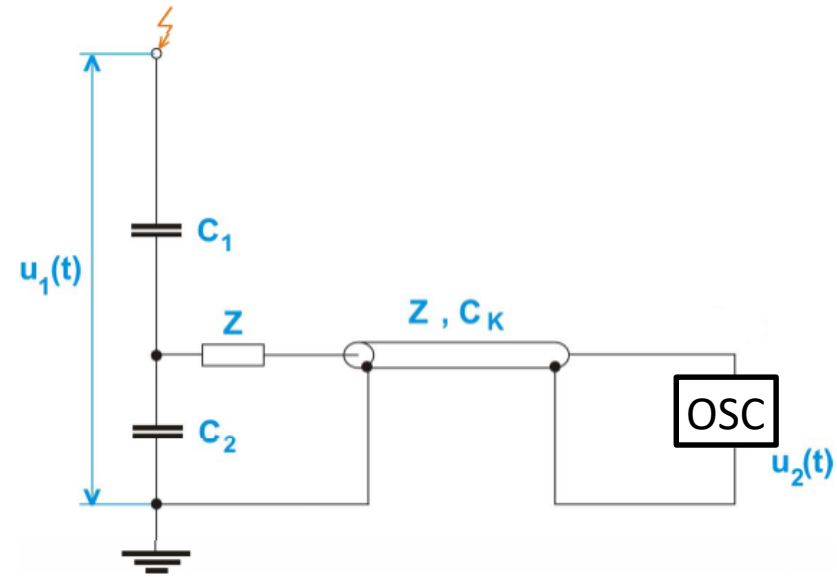
Kapacitní dělič

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



# Kapacitní dělič

- Pro střídavá a impulzní napětí
- Nejvyšší napětí jednoho kondenzátoru je zpravidla 300 kV, poté již dochází ke značným úbytkům vlivem parazitních kapacit
- Pro napětí vyšší než 300 kV se jednotlivé kondenzátory spojují do svazků (stacked capacitors)



# Kapacitní dělič – parazitní kapacity

- Vysokonapěťová část (HV arm) sestává ze dvou kondenzátorů  $C_{11}$  a  $C_{12}$ . Kovové stínění (shielding) je na potenciálu dolních elektrod příslušných kondenzátorů.
- Přes parazitní kapacitu (stray capacity)  $C_e$  teče proud  $I_e$ . Velikost  $C_e$  je dána rozměry a permitivitou jako:

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left\{\frac{2l}{d} \sqrt{\frac{4h+l}{4h+3l}}\right\}} \approx 26 \text{ pF}$$

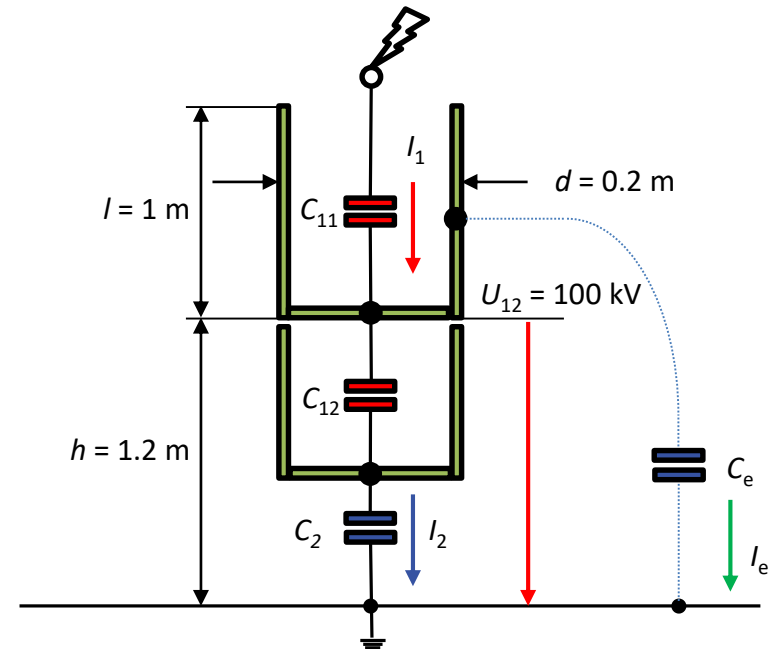
- Pokud uvažujeme  $f = 50 \text{ Hz}$ ,  $C_{11} = C_{12} = 200 \text{ pF}$ , získáme hodnoty:

$$I_{12} = I_2 = 2\pi f \cdot U_{12} \cdot C_{12} \approx 6.28 \text{ mA}$$

$$I_e = 2\pi f \cdot U_{12} \cdot C_e \approx 0.81 \text{ mA}$$

- Celkový proud horní kapacitou je pak:

$$I_1 = I_2 + I_e \approx 7.09 \text{ mA}$$



- Místo skutečných 200 kV naměříme na VN části děliče napětí:

$$U = U_{12} + \frac{I_1}{2\pi f C_{11}} \approx 213 \text{ kV}$$

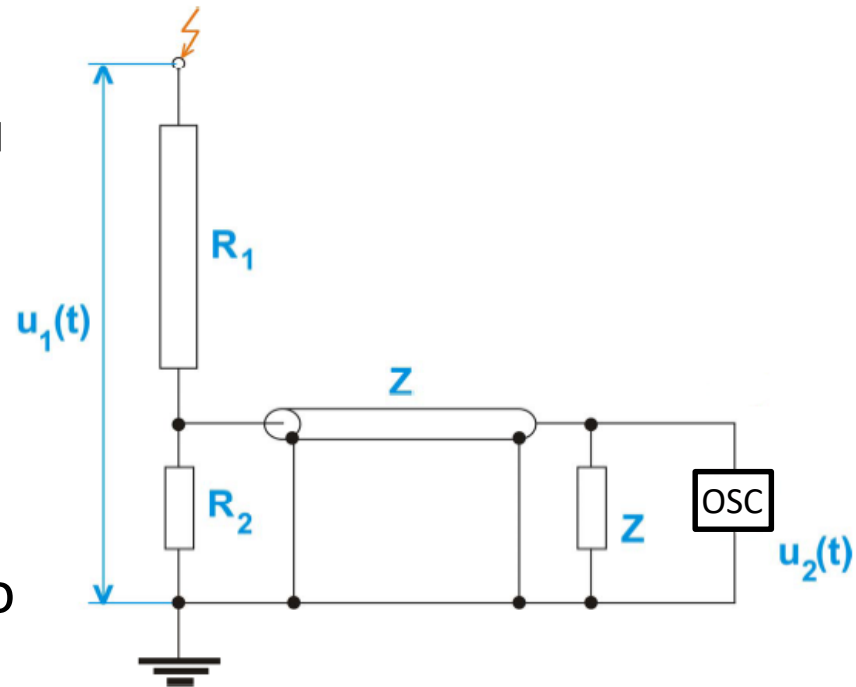
- Obecně lze pak uvažovat efektivní kapacitu

$$C_1 \approx \frac{C_{1n}}{n} - \frac{n \cdot C_e}{6}$$

Kde  $n$  je počet svazků děliče

# Odporový dělič (resistive voltage divider)

- Měření **stejnoseměrných**, střídavých a impulzních napětí
- Velikost chyby je funkcí součinu kapacity vn a odporu děliče
- Proud minimálně 0.5 mA pro zachování dostatečné přesnosti měření (svodové proudy; leakage current)
- Ideálně je hodnota odporu co nejmenší (potlačení svodu), reálně je omezená výkonem zdroje a zahříváním odporů



# Odporový dělič

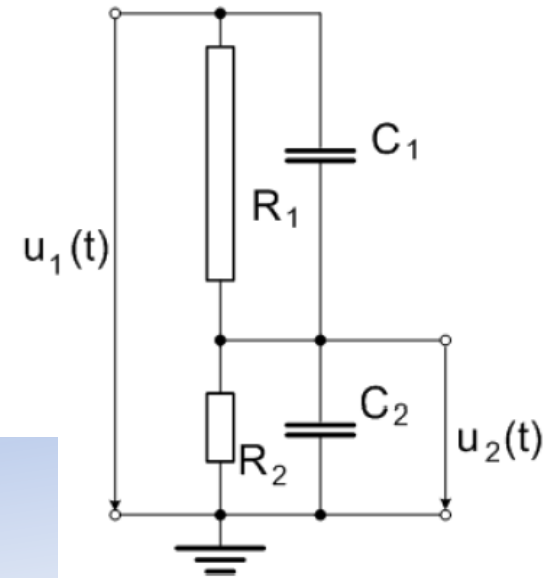
- Odpory jsou někdy navinuty ve šroubovici (helix) kolem izolačního válce (insulated cylinder) k redukci gradientu el. pole
- Typické hodnoty ( $U_n = 300$  kV): řetězec 300 odporů  $R = 2$  M $\Omega$ ,  $\Delta P = U^2/R = 150$  W,  $I = U/R = 0.5$  mA, přesnost měření (při vhodných úpravách): 0.003 % - pro kalibrace (calibration, reference measurement), < 3 % pro průmyslové použití (industrial tests)



Zdroj: Universal Resistive/Capacitive Reference Voltage Divider, katalog HighVolt

# Kompenzovaný odporový dělič

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



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

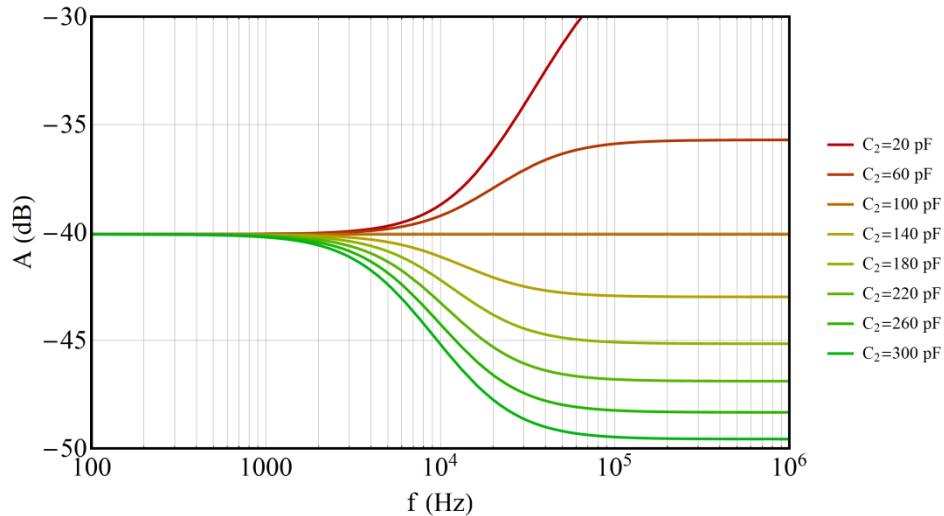
$$\frac{U_2}{U_1} = \frac{\omega C_1 R_1 - jR_2}{\omega R_1 R_2 (C_1 + C_2) - j(R_1 + R_2)}$$

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

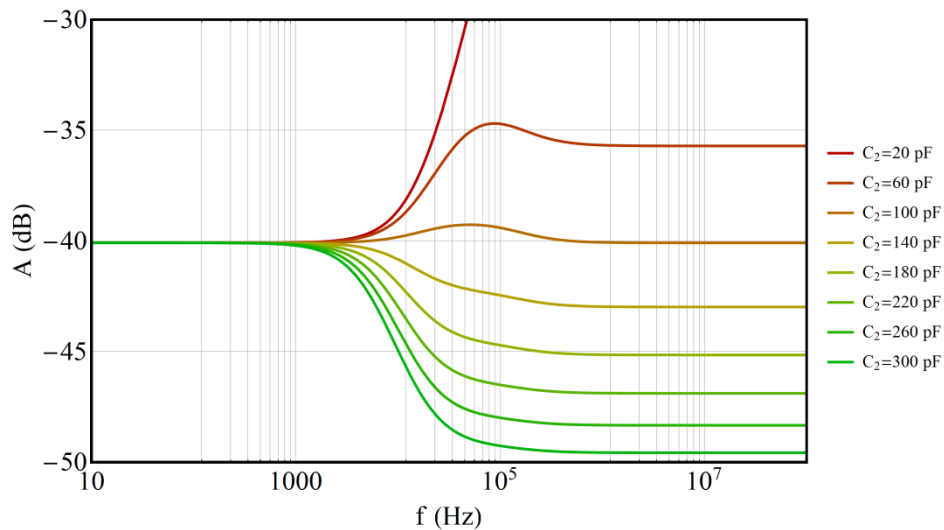
$$\Rightarrow C_1 R_1 = C_2 R_2$$



# Kompenzovaný RC dělič



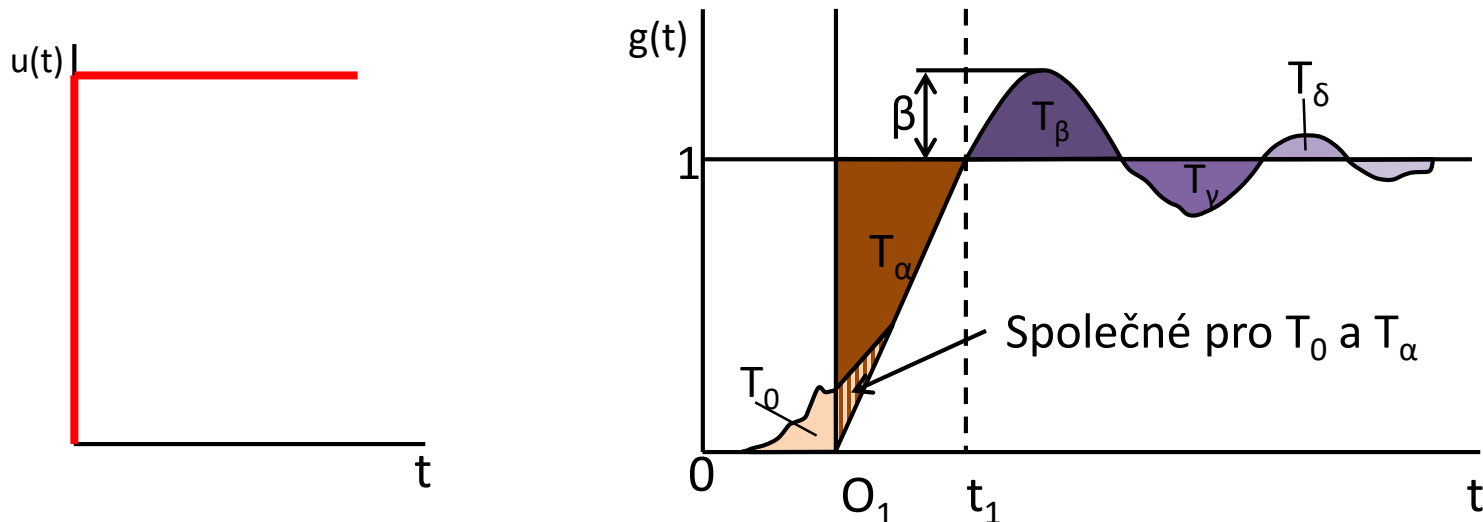
Útlum (attenuation) kombinovaného děliče pro různé kapacity  $C_2$ , dělič je plně kompenzován pro  $C_2 = 100 \text{ pF}$



Útlum kombinovaného děliče s parazitní indukčností  $1 \text{ mH}$

# Dynamická odezva vn děličů

- Nejčastěji se zjišťuje experimentálně pomocí aplikace skokového napětí a odečtení normalizované odezvy děliče  $g(t)$



- Počátek odezvy  $O_1$**  je definován jako okamžik, kdy odezva poprvé vykazuje monotónní nárůst nad hodnotu amplitudy šumu v blízkosti nulové hladiny ( lze přibližně stanovit jako průsečík prodloužení čela odezvy s časovou osou)
- Doba odezvy děliče** (response time) je dána integrálem:

$$T = \int_{O_1}^{\infty} (1 - g(t)) dt = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - T_\delta + \dots$$

# Dynamická odezva vn děličů

- **Experimentální doba odezvy  $T_N$**  je doba odezvy děliče pro  $t=2t_{\max}$

$$T_N = \int_{0_1}^{2t_{\max}} (1 - g(t)) dt$$

- Jmenovitá doba – pro atmosférické plné a v týle useknuté impulzy  $t_{\min} = 0,8 \mu\text{s}$  a  $t_{\max} = 1,8 \mu\text{s}$ , pro spínací impulzy  $t_{\min} = 150 \mu\text{s}$  a  $t_{\max} = 500 \mu\text{s}$

- **Dílčí doba odezvy  $T_\alpha$**  je hodnota integrálu odezvy v čase  $t_1$ , kdy  $g(t)$  poprvé dosáhne jednotkové hodnoty

$$T_\alpha = \int_{0_1}^{t_1} (1 - g(t)) dt$$

# Dynamická odezva vn děličů

- **Překmit normalizované odezvy na skok  $\beta$**  rozdíl mezi maximem  $g(t)$  a jednotkou v procentech

$$\beta = (\text{Max}(g(t)) - 1) \cdot 100\%$$

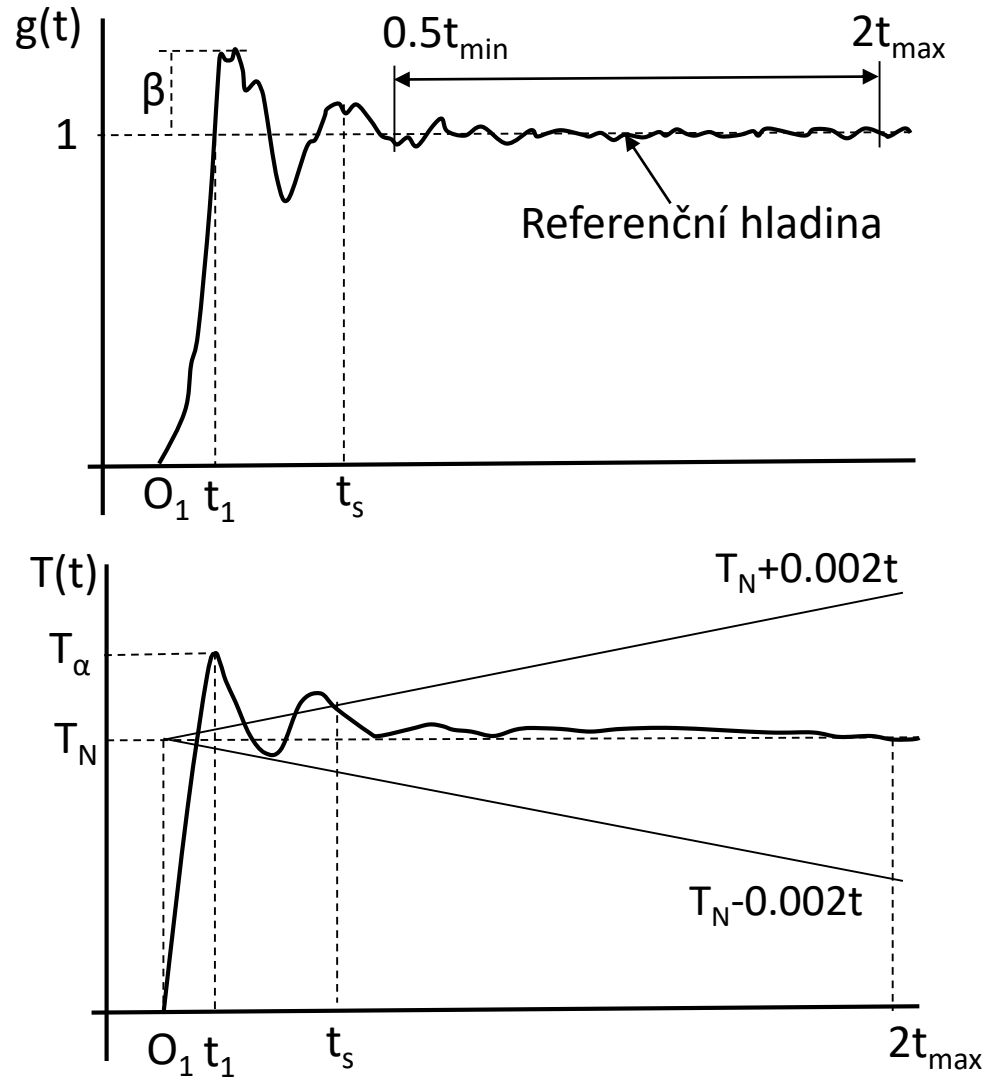
- **Zbytková doba odezvy  $T_R(t_i)$**  rozdíl mezi dobou odezvy a hodnotou integrálu odezvy na skok v daném čase  $t_i$

$$T_R(t_i) = T_N - T(t_i)$$

- **Čas ustálení  $t_s$**  (settling time) nejkratší čas, za který se zbytková doba odezvy stane a zůstane menší než 2% z  $t$

$$|T_N - T(t)| \leq 0.02 t$$

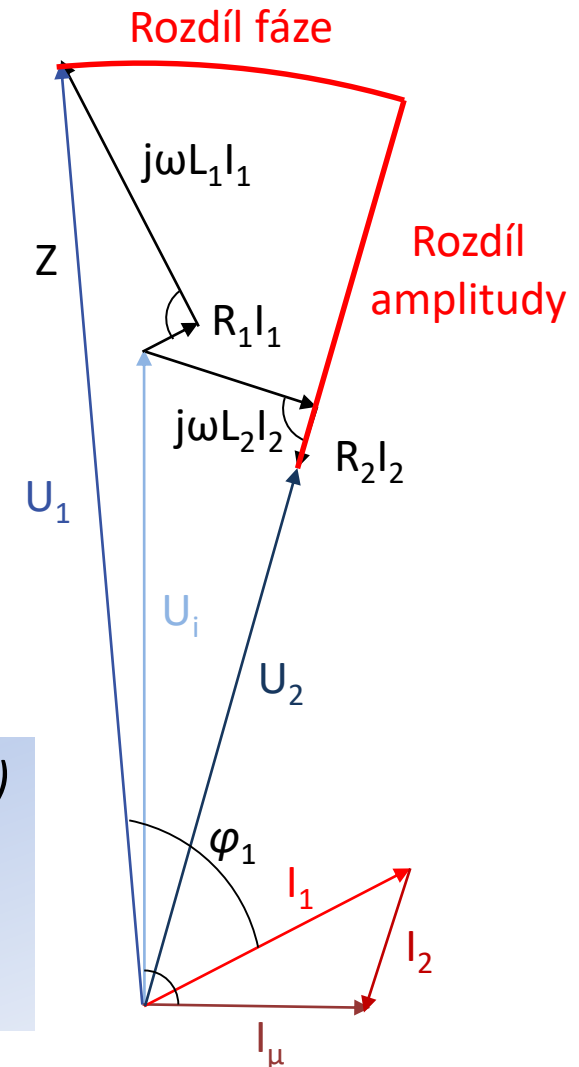
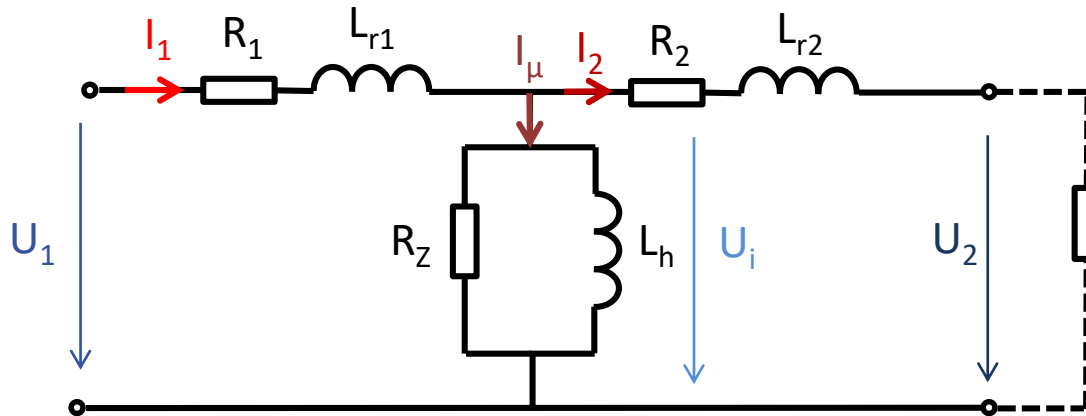
# Dynamická odezva vn děličů



# 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

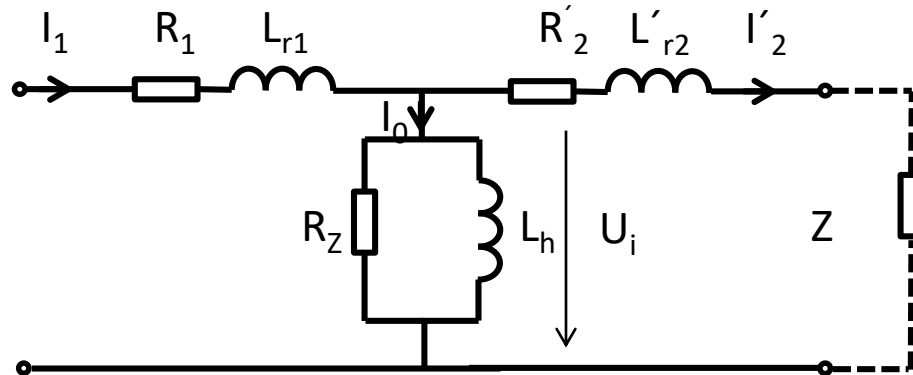
# Měřicí transformátor napětí



*Definice chyby napětí (voltage error)*

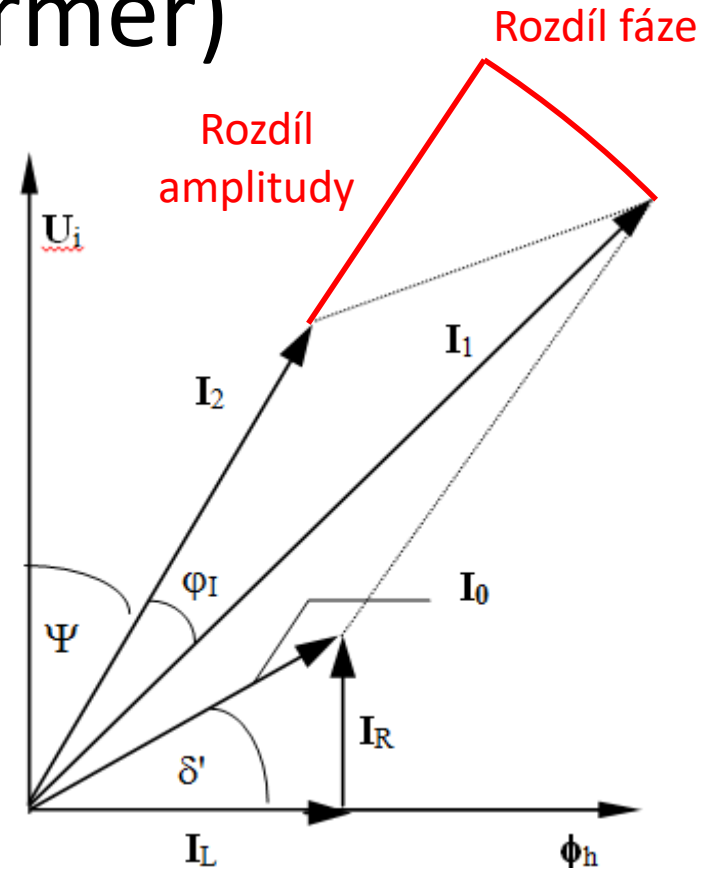
$$\varepsilon_U = \frac{p_U U_2 - U_1}{U_1} \cdot 100$$

# Měřicí transformátor proudu (Current transformer)



Definice chyby proudu

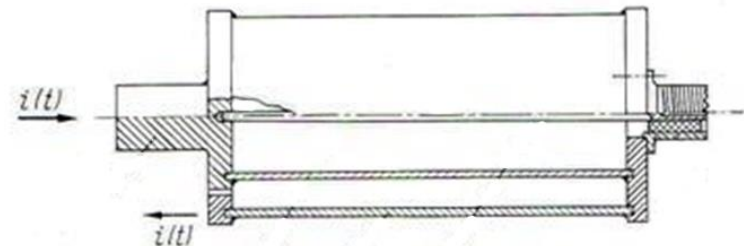
$$\varepsilon_I = \frac{p_I I_2 - I_1}{I_1} \cdot 100$$





# Odporové bočníky (shunts)

- Přesný rezistor protékaný měřeným proudem (ss, stř. nebo imp.).
- Indukčnost je potlačena zpětným tokem proudu (princip bifilárního vinutí/bilifar coil)
- Eliminace vlivu skin efektu při vyšších frekvencích - dosahuje se uspořádáním pásků z manganinu do válcové plochy (koaxiální bočník/coaxial shunt).
- Nevýhodou je galvanické propojení měřicího systému s měřeným obvodem a tepelné a mechanické namáhání (heat and mechanical stress) bočníku při měření velkých proudů

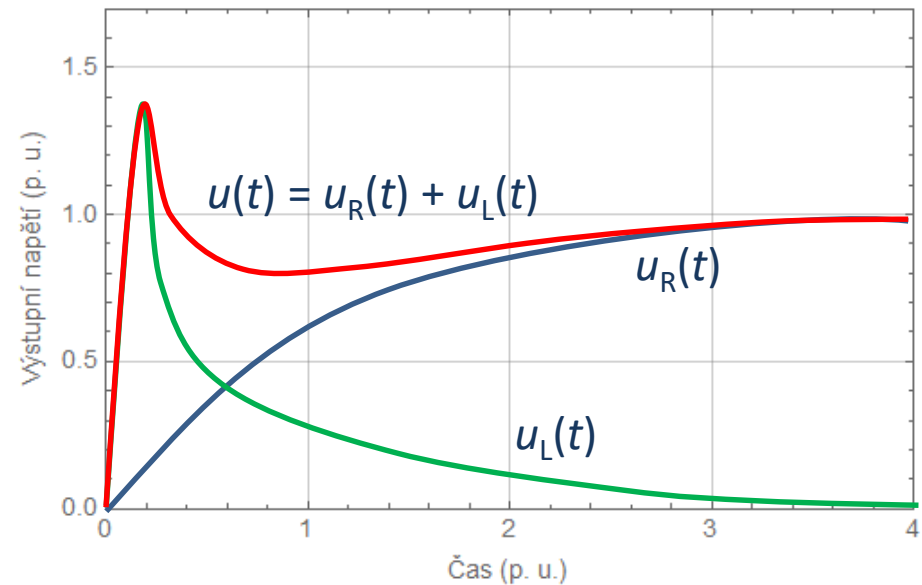


# Odporové bočníky

- Hodnota odporu bočníku se pohybuje v řádech miliohmů
- Při impulzních měřeních se projeví indukčnost indukční smyčky (inductive loop) mezi bočníkem a přívodem do měřáku ( $L_m \approx 10\text{-}100\text{ nH}$ )
- Výstupní napětí je pak dáno rovnicí:

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) = R_b \cdot i_b(t) + L_b \cdot \frac{di_b(t)}{dt}$$

kde  $R_b$  je odpor bočníku,  $L_b$  je indukčnost bočníku a  $i_b(t)$  je proud bočníkem.  
Nepřesnost měření je způsobena překmitem, viz graf



# Rogowského cívka (Rogowski coil)

- Zařízení pro měření velkých proudů pomocí magnetické vazby
- Časovou změnou proudu ve vodiči se v měřicí cívce indukuje napětí. Toto napětí je úměrné časové derivaci proudu a lze z něj pomocí integračního článku (integrator) vypočítat skutečný proud
- Využití primárně při měření velmi rychlých dějů (stovky kA/ $\mu$ s), díky jednoduché konstrukci a vysoké přesnosti se používá i pro pomalejší děje (stř.)



Zdroj: KECA 80 C85, katalog ABB

# Rogowského cívka (Rogowski coil)

Měřený proud lze vyjádřit jako:

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

kde  $M$  je vzájemná indukčnost (mutual inductance) mezi vodičem a vinutím (winding). Pro měřicí cívku kruhového průřezu (circular cross-section) je velikost  $M$ :

$$M = \frac{\mu_0 N}{2} (a + b - 2\sqrt{ab})$$

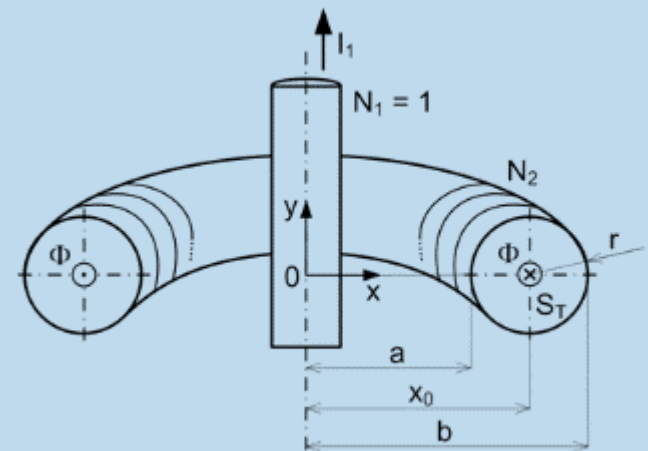
kde  $\mu_0$  je permeabilita vakua,  $N$  je počet závitů cívky (number of turns),  $a$  je vnitřní poloměr závitu cívky a  $b$  je vnější poloměr téhož.

Pro harmonický průběh proudu:

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

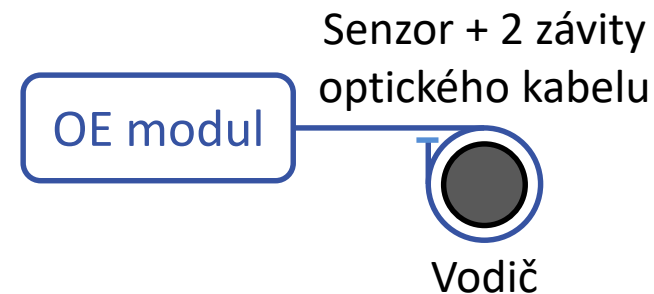
Konstantou integračního členu RC pak rozumíme:

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



# Optické senzory proudu (fiber optics current sensors)

- Princip Faradayova jevu – rotace polarizační roviny vlivem magnetického pole (lineární závislost)
- Optoelektrický modul vyše polarizovaný svazek světla do senzoru umístěného u vodiče
- Světlo se odrazí zpět a modul detekuje posun fáze (phase displacement) a vyhodnocuje velikost proudu
- Výhodné pro měření proudů při napětí přes 200 kV
- Galvanické oddělení obvodů (galvanic isolation)



Zdroj: Free Standing Fiber Optic Current Sensor FOCS-FS, katalog ABB