

Vysokonapěťové zkušebnictví

Zkušebny vysokých napětí

- S nárůstem přenášeného výkonu rostou i napěťové hladiny přenosových vedení
- Při transportu výkonů na dlouhé vzdálenosti narůstá podíl stejnosměrných systémů (HVDC), většina přenosu je však realizována střídavým systémem
- Zkušebny vysokých napětí ověřují, zda izolační systém vydrží předepsaná napěťová namáhání

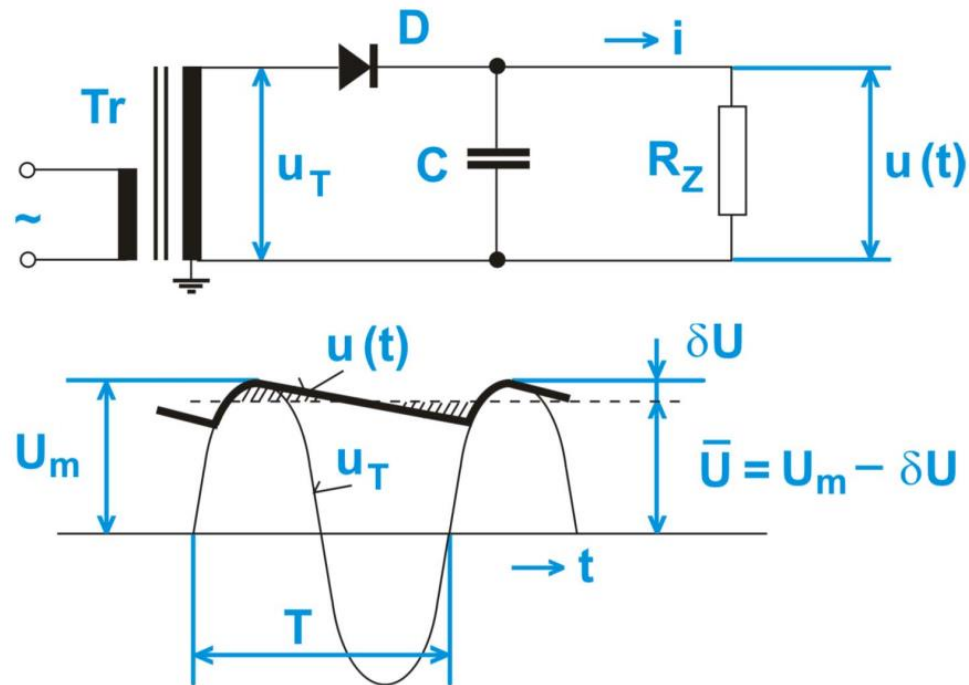
Zkušebny vysokých napětí

- Izolační systém je při zkouškách namahán pomocí napěťových zkoušek
 - Napěťová zkouška střídavým napětím síťové frekvence
 - Napěťová zkouška atmosférickým impulzem
 - Napěťová zkouška spínacím impulzem
- Velikosti napětí a typ napěťového namáhání závisí na typu zařízení a jeho jmenovité hladině

Zkušebny vysokých napětí

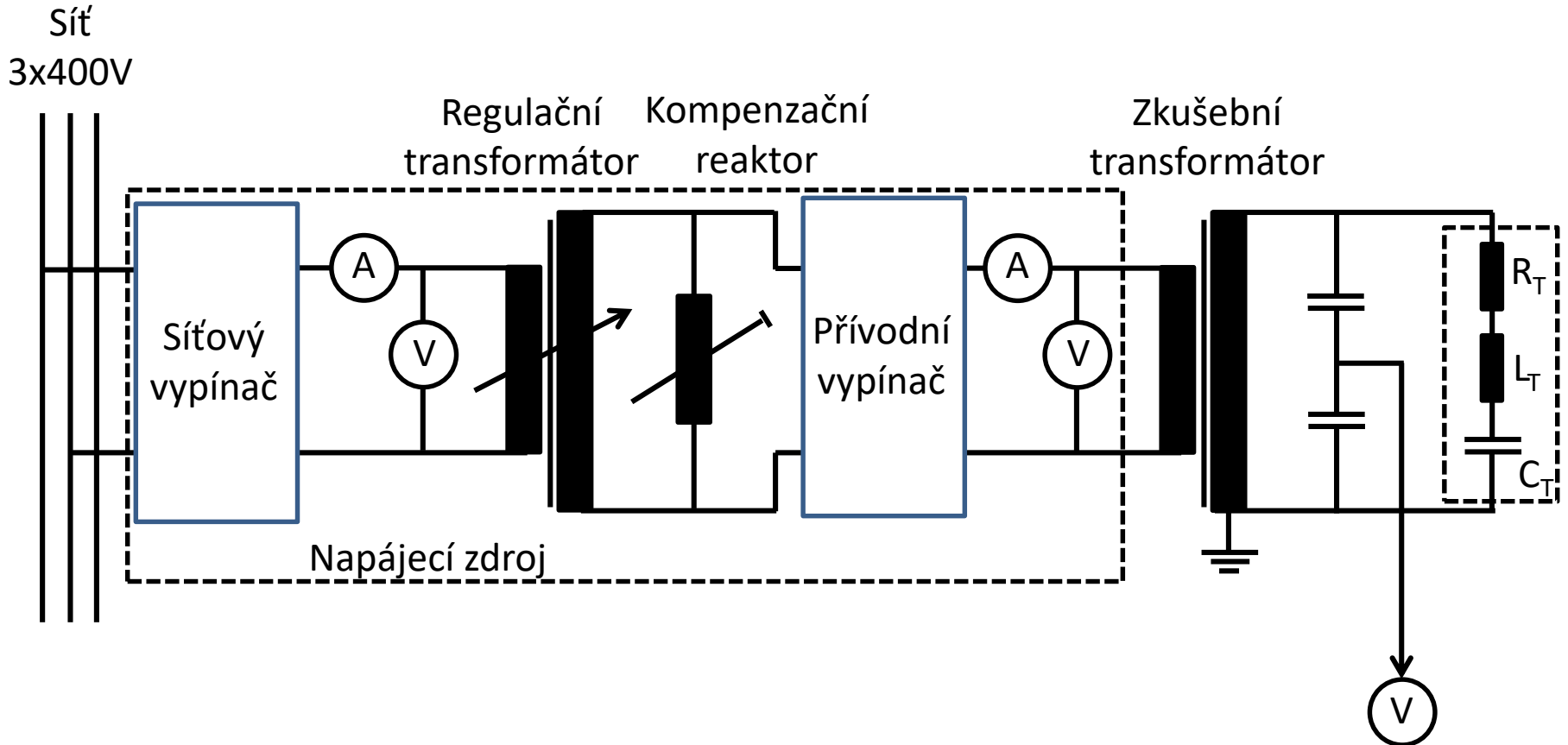
- Zkušebny vysokých napětí musí být vybaveny příslušnými zdroji vysokých napětí:
 - Stejnoseměrné zdroje vysokých napětí
 - Střídavé zdroje vysokých napětí
 - Impulzní zdroje vysokých napětí

Stejnoseměrné zdroje vysokých napětí



- Zvlnění se snižuje se zvyšujícím se odporem zátěže R_Z , s velikostí kapacity C a frekvence napájecího stř. napětí

Střídavé zdroje vysokých napětí



Střídavé zdroje vysokých napětí

**Zkušební transformátor s
kovovou nádobou**



- Lepší podmínky pro chlazení (může být vybaven radiátory)
- Protože je nádoba uzemněna, transformátor nemusí být vzdálen od zdí a ostatních objektů – úspora místa
- Vhodná konstrukce pro venkovní vysokonapěťové testy

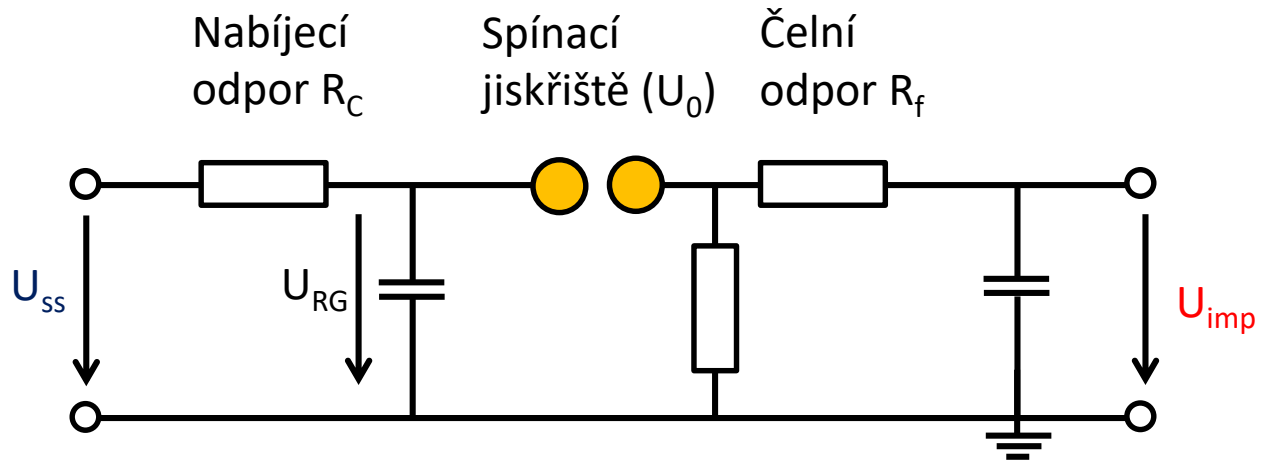
**Zkušební transformátor s
izolační válcovou nádobou**



- Nepotřebují průchodku (nádoba je z izolačního materiálu)
- Jsou vhodné pro transformátorové kaskády (až 1500MV)
- Pouze pro vnitřní laboratoře, krátké napěťové zkoušky

Impulzní zdroje vysokých napětí

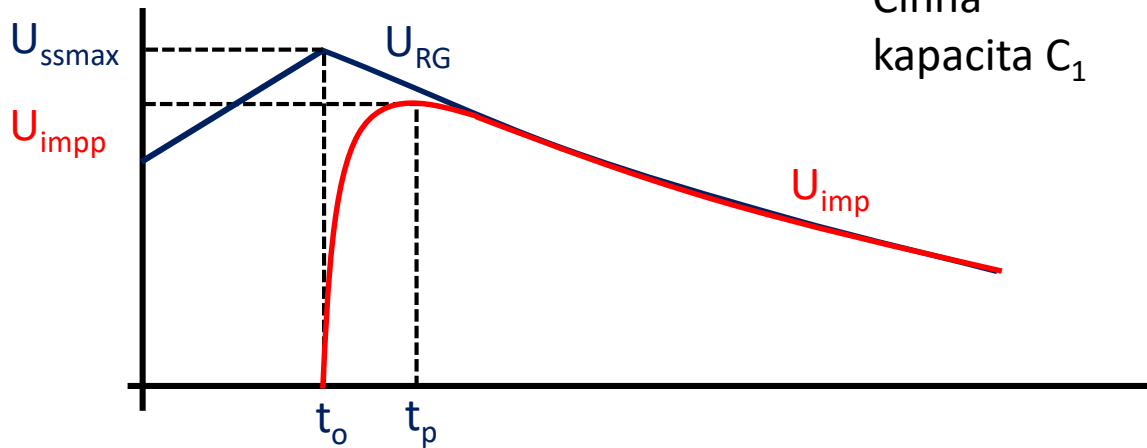
Jednostupňový rázový generátor



Činná kapacita C_1

Týlní odpor R_t

Zatěžovací kapacita C_2

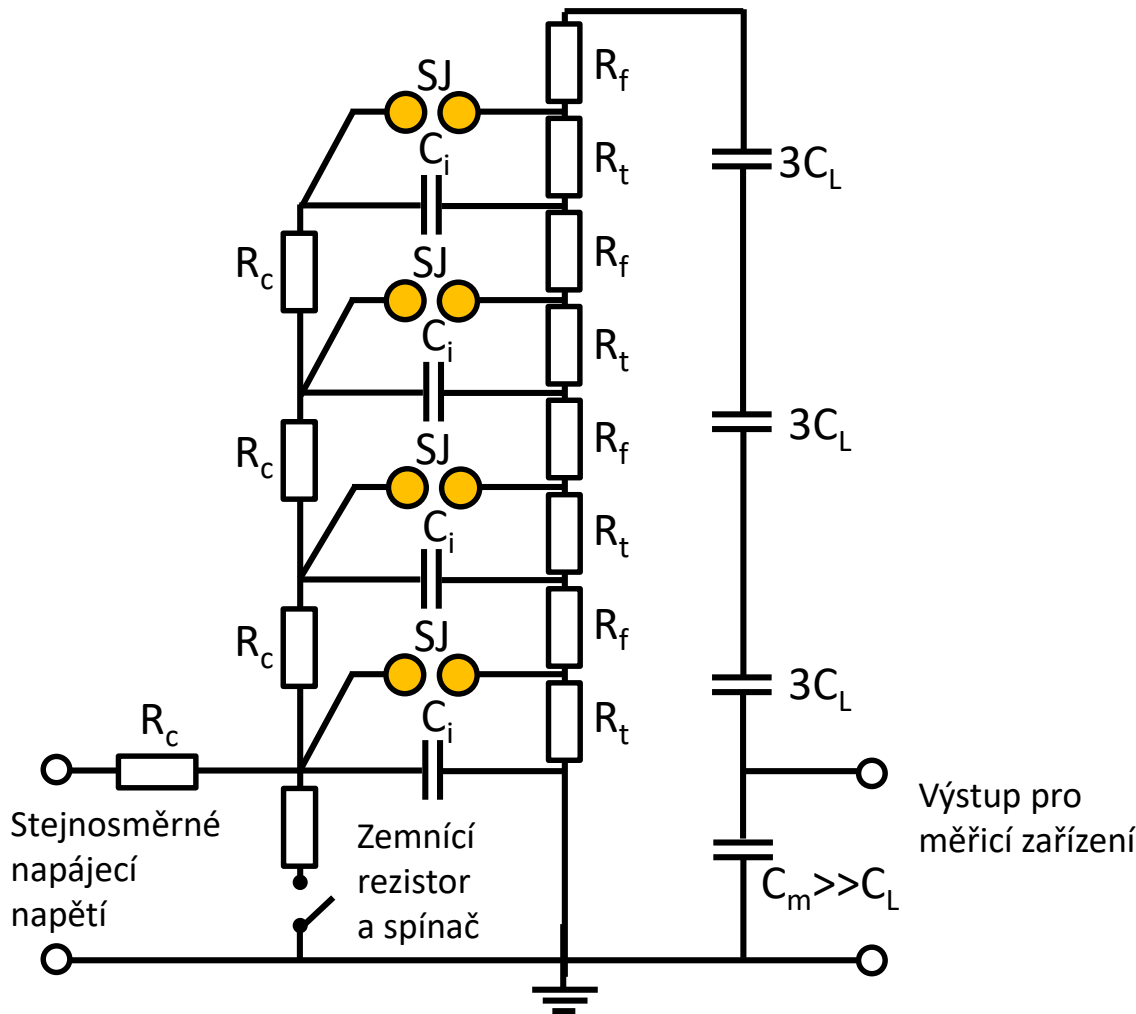


Činitel využití RG

$$\eta = \frac{U_{impp}}{U_{ssmax}} < 1$$

Impulzní zdroje vysokých napětí

Vícestupňový rázový generátor

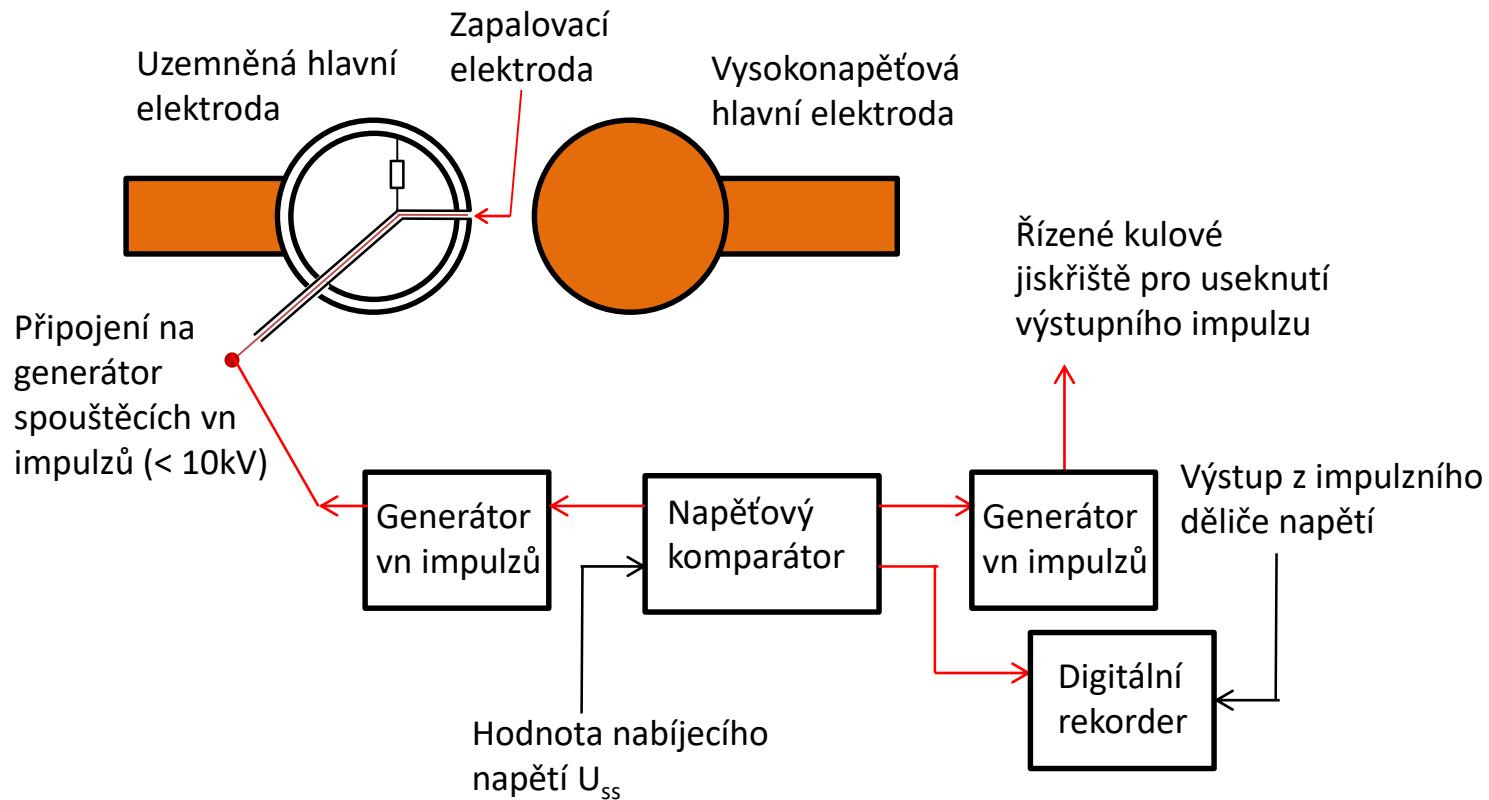


SGSA Impulzní generátor Haefely Hipotronics

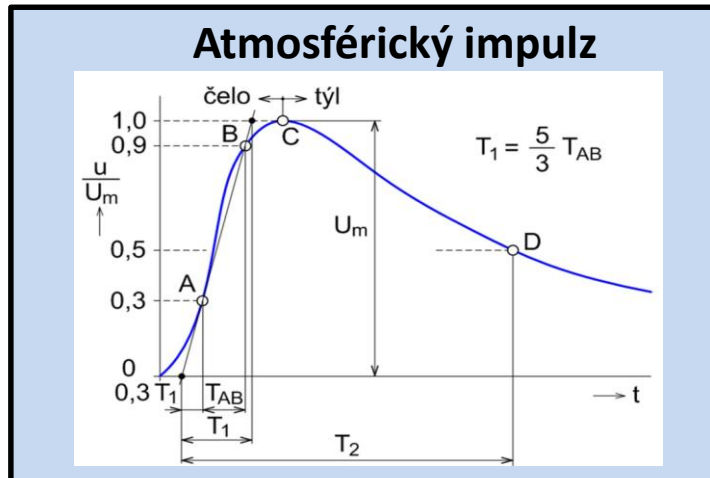
Výstupní napětí U_{imp} pro n-stupňový generátor s činitelem využití η a napájecím napětím U_0 :

$$U_{imp} = n\eta U_0$$

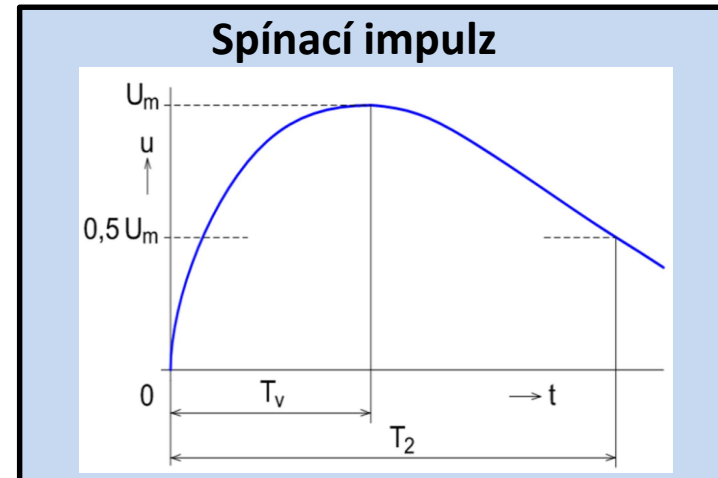
Řízené spouštění impulzního generátoru (trigatron)



Výstupní napětí z rázového generátoru



- Polarita a vrcholová hodnota impulzu U_m je dána normou podle jmenovitého napětí zkoušeného zařízení
- Dovolená odchylka vrcholové hodnoty 3 %
- Doba čela $T_1 = 1,2 \mu\text{s} \pm 30\%$
- Doba půltýlu $T_2 = 50 \mu\text{s} \pm 20\%$



- Polarita a vrcholová hodnota impulzu U_m je dána normou podle jmenovitého napětí zkoušeného zařízení
- Dovolená odchylka vrcholové hodnoty 3 %
- Doba do vrcholu $T_v = 250 \mu\text{s} \pm 20\%$
- Doba půltýlu $T_2 = 2500 \mu\text{s} \pm 60\%$

Vysokonapěťové děliče

- Obecně lze použít odporové, kapacitní, indukční a kombinované vysokonapěťové děliče
- Indukční děliče se využívají zejména pro kalibrační účely, pro velmi vysoká napětí jsou drahé
- Vrchní elektroda děličů je opatřena toroidními prstenci, které zabraňují vzniku částečných výbojů
- Proud děliči by měl být menší než 10 mA tj.
1 M Ω /10 kV

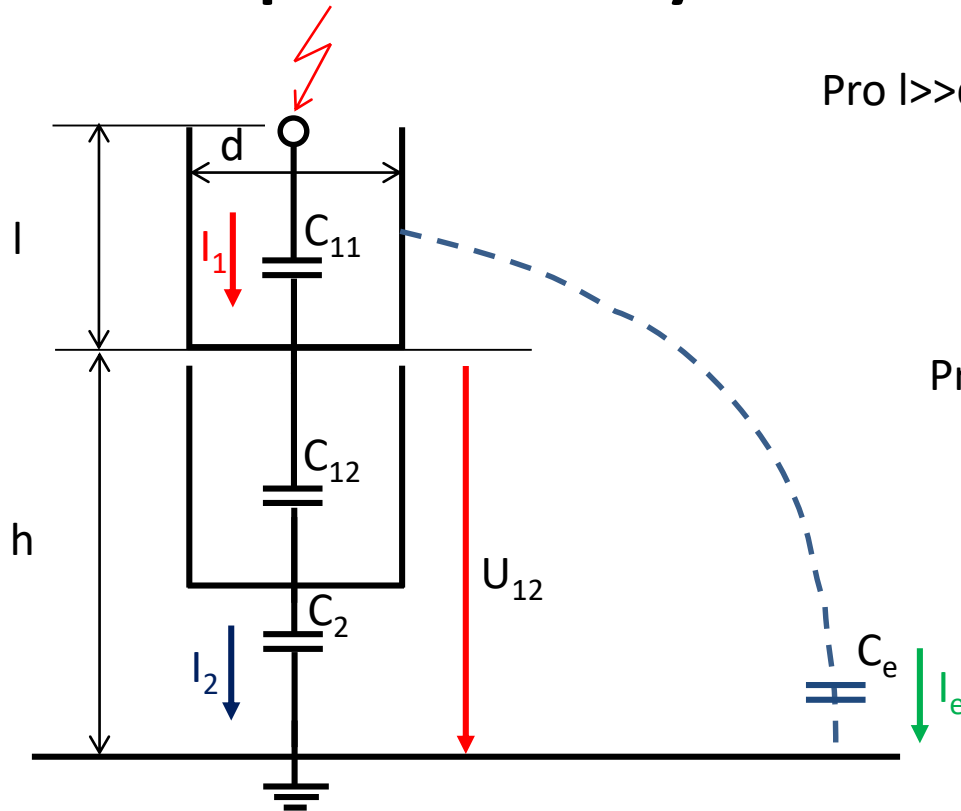
Kapacitní vysokonapěťové děliče

- Využívají se zejména pro měření střídavých napětí
- Vn část děliče je obvykle složena z několika kondenzátorů
- Měřené vysoké napětí U_1 lze odvodit z měřeného výstupního nízkého napětí U_2 podle vztahu

$$U_1 = U_2 \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$$

- Tento jednoduchý vztah však prakticky nelze použít vzhledem k nezanedbatelnému vlivu parazitních kapacit mezi válcem děliče a zemí

Kapacitní vysokonapěťové děliče



Pro $l \gg d$ platí pro C_e přibližný vztah:

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

Proud protékající C_{12} a také C_2 :

$$I_2 = \omega U_{12} C_{12}$$

Proud protékající parazitní kapacitou C_e mezi stíněním horního kondenzátoru a zemí:

$$I_e = \omega U_{12} C_e$$

Sečtením těchto dvou hodnot dostaneme celkový proud horním vn kondenzátorem:

$$I_1 = I_{12} + I_e$$

Úbytek na horním kondenzátoru je pak: $U_{11} = \frac{I_{11}}{\omega C_{11}}$

Kapacitní vysokonapěťové děliče

Kapacita C_e způsobuje redukci kapacity vn části děliče. Tento efekt se zvětšuje s rostoucím počtem n naskládaných kondenzátorů.

Efektivní kapacita C_1 vn části děliče, která je složena z n kondenzátorů o kapacitě C_{1n} , může být přibližně stanovena jako:

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

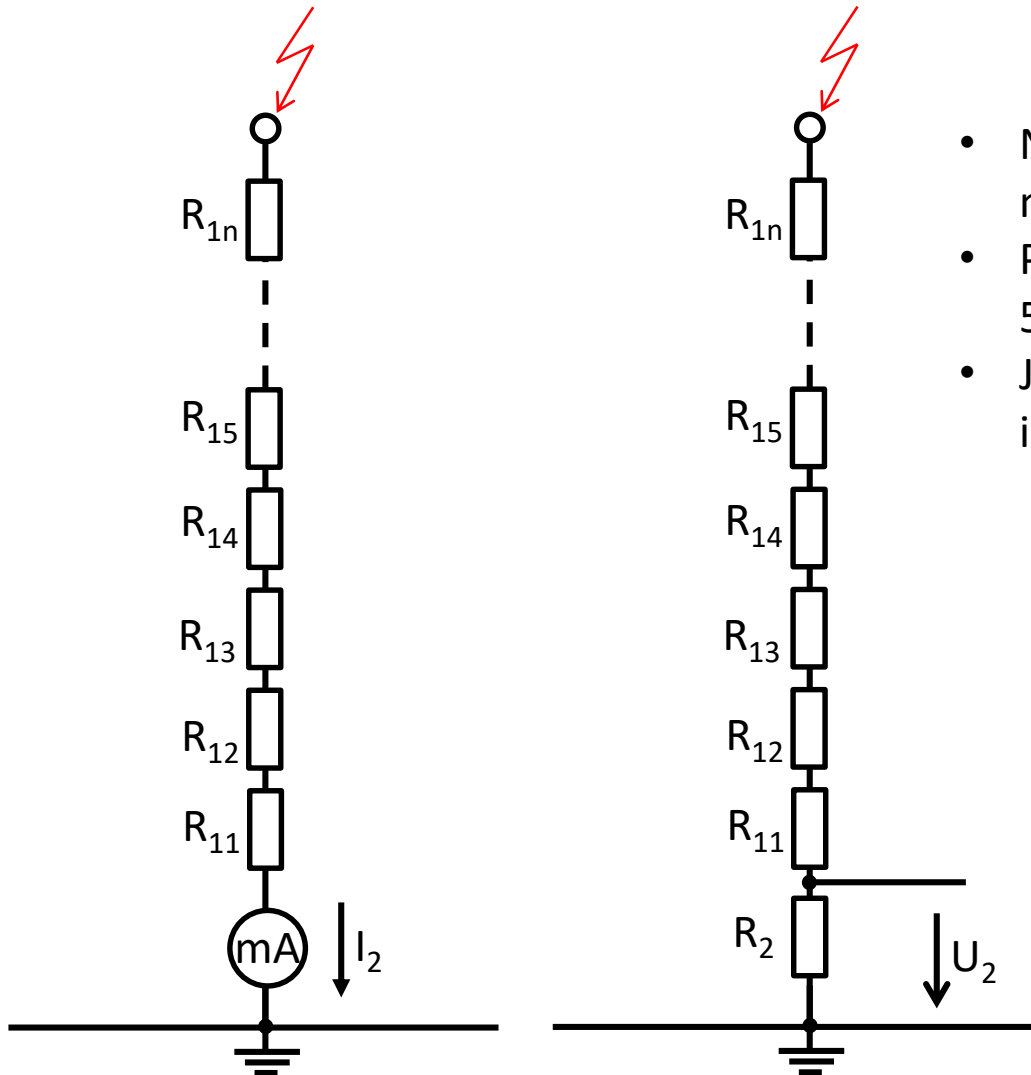
Jak se ukázalo z experimentů, kapacita k zemi C_e každého kondenzátoru závisí jen málo na jeho výšce h nad zemí, proto lze pro výpočet použít zjednodušený vztah:

$$C_e = \frac{2\pi\epsilon l}{\ln\left(\frac{2l}{d}\right)}$$

pak

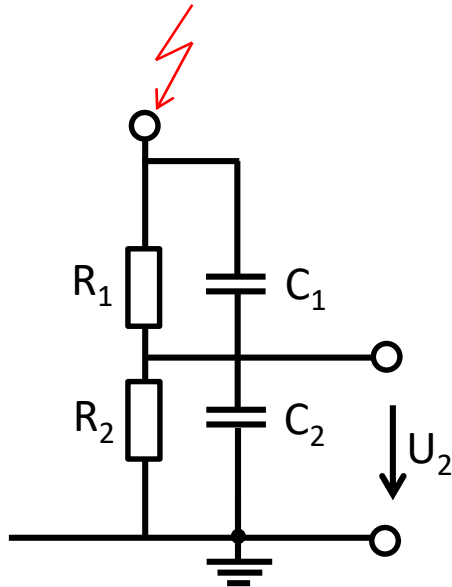
$$C_1 \approx \frac{C_{1n}}{n} - \frac{n\pi\epsilon l}{3\ln\left(\frac{2l}{d}\right)}$$

Odporové vysokonapěťové děliče

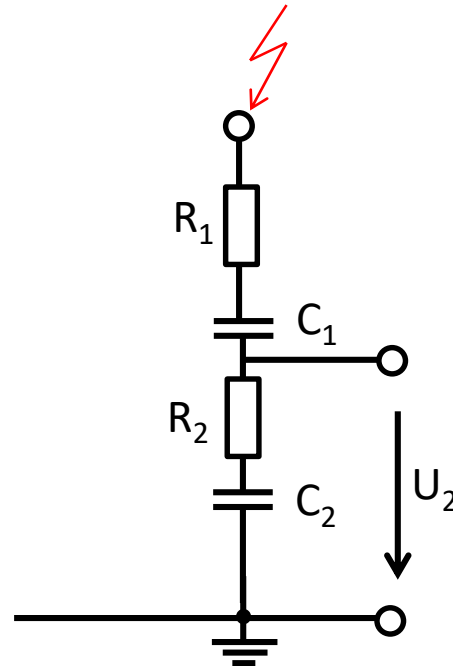


- Nejčastěji se využívá pro měření ss nebo impulzních napětí
- Proud děličem by neměl přesáhnout 5mA
- Jednotlivé rezistory jsou ovinuty kolem izolačního válce aby tvořily spirálu

Kombinovaný RC vysokonapěťový dělič



Paralelně řazené prvky

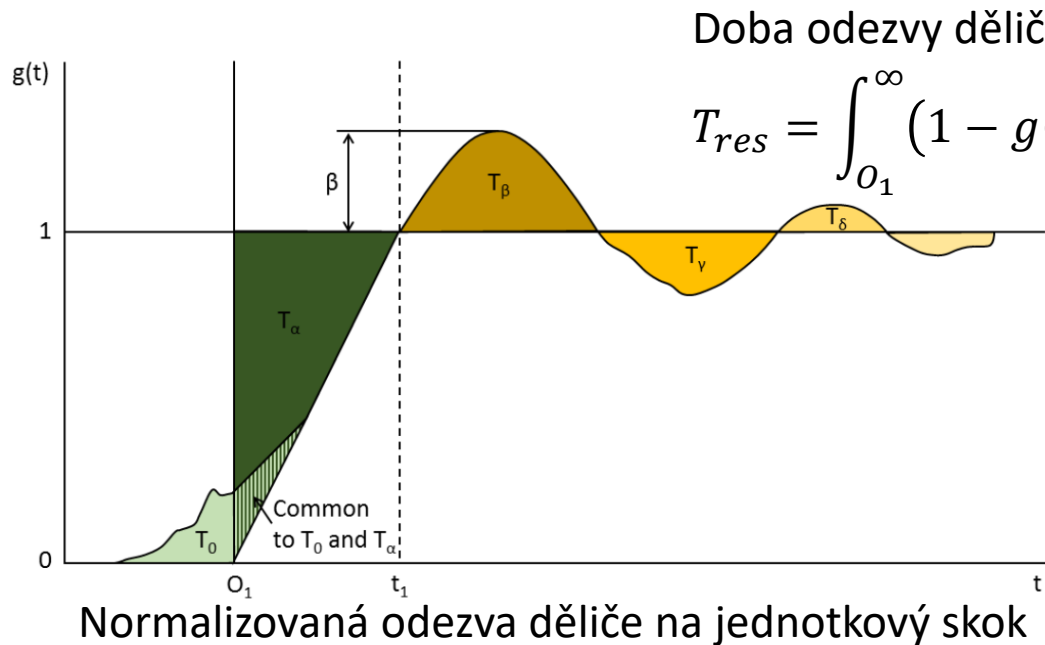


Seriově řazené prvky

- V paralelním zapojení se používá pro měření stř, ss nebo impulzních napětí, v seriovém pro stř a impulzní napětí

Dynamické chování vysokonapěťových děličů

- Pro měření atmosférických impulzních napětí, zejména useknutých v týle, je důležité ověřit dynamické chování vysokonapěťových děličů, zda splňují požadavky na frekvenční rozsah
- Ke zjišťování odezvy děliče na jednotkový skok se používá generátoru s dobou náběhu kolem několika ns a amplitudou stovek voltů



Elektrostatický voltmetr

- Přímá metoda měření vysokých stejnosměrných a střídavých napětí
- Elektrostatické voltmetry mohou být přímo připojeny do vysokonapěťových obvodů do 200 kV, pro vyšší napětí za použití napěťového děliče

Hustota energie el. pole mezi elektrodami

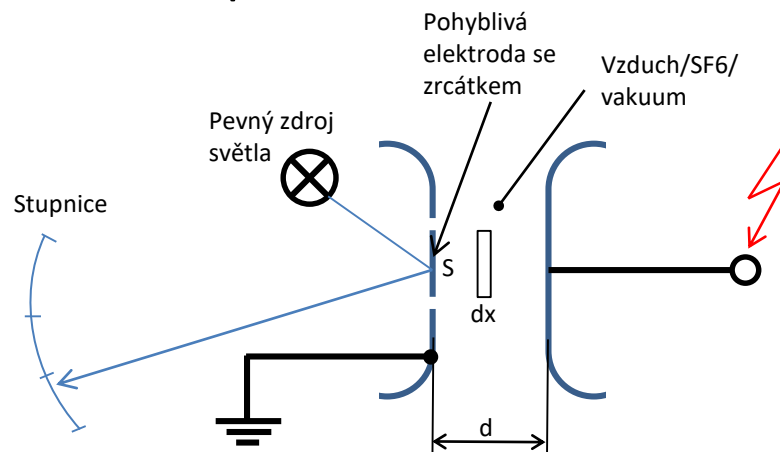
$$w_e = \frac{1}{2} \varepsilon E^2$$

Hustota energie v elementu dx

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

Síla působící na volnou elektrodu

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



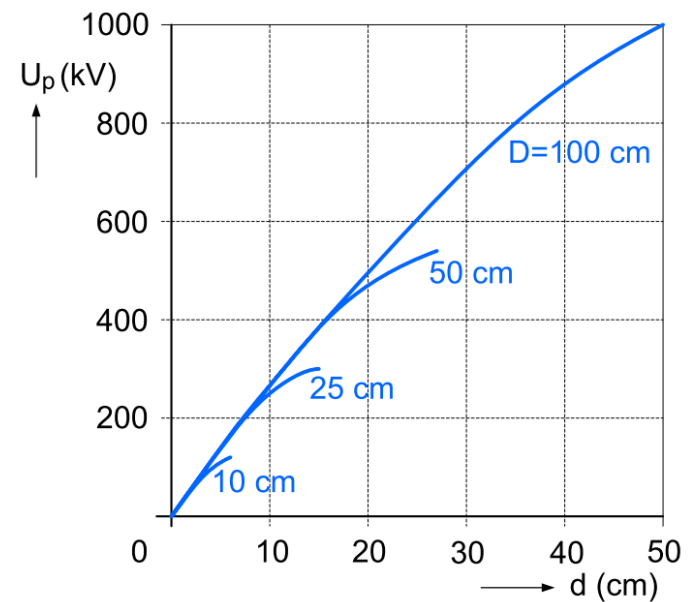
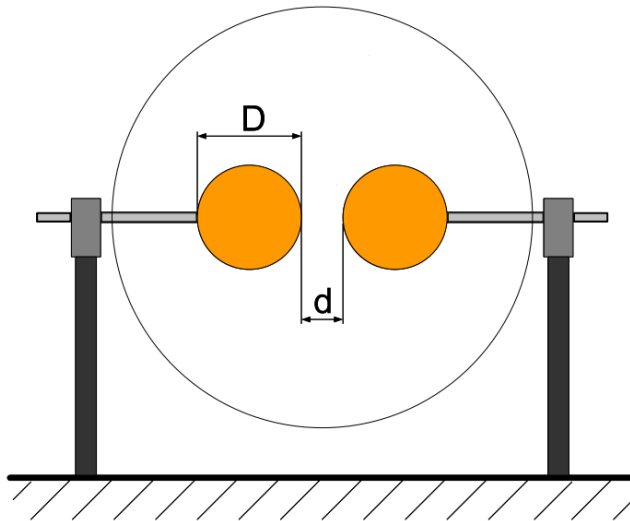
Střední hodnota síly pro časově proměnné napětí

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

Kulová jiskřiště

- Přeskoková napětí v homogenním nebo málo nehomogenním elektrickém poli, jako je například mezi kulovými elektrodami ve vzduchu, vykazují vysokou stabilitu a malý rozptyl -> lze je využít k měření vrcholové hodnoty napětí
- Dnes již nejsou ve zkušebnách a laboratořích využívána pro denní měření, mohou být používána k ověření automatických měřicích systémů a testu linearity

Závislost přeskokového napětí na vzdálenosti elektrod d pro různé průměry elektrod D



Přepočet na atmosférické podmínky

- Při měření pomocí kulových jiskřišť se přesokové napětí stanoví na základě tabulek pro normální atmosférické napětí -> výsledky se musí korigovat na aktuální atmosférické podmínky
- Normální atmosférické podmínky
 - Normální teplota $t_N = 20 \text{ °C}$
 - Normální tlak $p_N = 101,3 \text{ kPa}$
 - Normální vlhkost $g_N = 11 \text{ g/m}^3$
- Hustota vzduchu

$$\delta = \frac{t_N + 273}{t_a + 273} \cdot \frac{p_a}{p_N}$$

- Skutečné měřené napětí U_s lze pak stanovit z tabulkové hodnoty U_N jako:

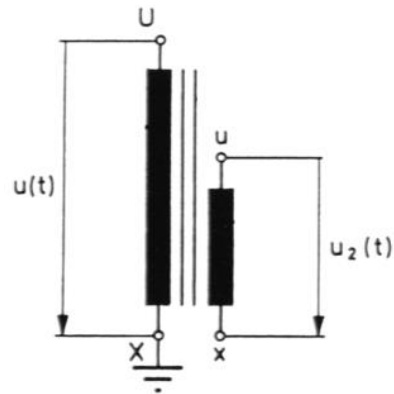
$$U_s = U_N \frac{k_h}{k_v} = U_N \delta$$

- Přičemž $k_h = \delta$ pro $0,95 < \delta < 1,05$ a $k_v = 1$

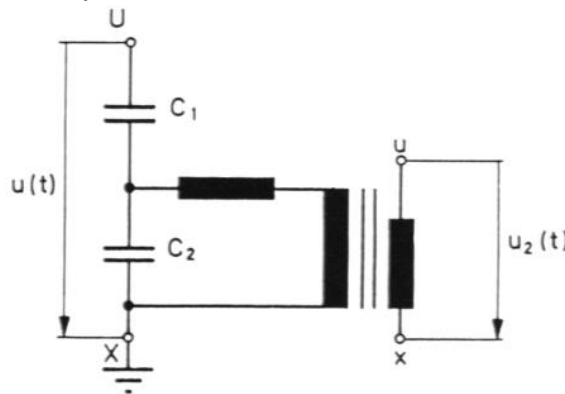
Měřicí transformátory napětí

- Speciální transformátory, které jsou navrženy tak, aby transformovaly vysoké napětí na nízké napětí (obvykle 100 V) s danou přesností
- Mohou být v provedení jako induktivní (do 145kV) nebo kapacitní (nad 145kV)

Induktivní měřicí transformátor



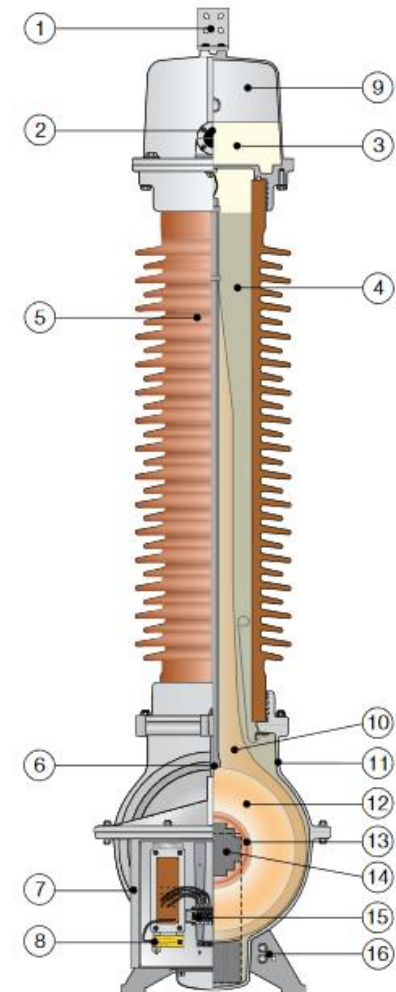
Kapacitní měřicí transformátor



- 1 – primární svorka,
- 2 – indikátor úrovně oleje
- 3 – olej
- 4 – křemenné plnivo
- 5 – izolátor

- 6 – závěsné oko
- 7 – svorkovnice sekundáru
- 8 – nulová svorka
- 9 – expanzní systém
- 10 – papírová izolace

- 11 – nádoba
- 12 – primární vinutí
- 13 – sekundární vinutí
- 14 – magnetické jádro
- 15 – sekundární svorky
- 16 – zemní svorka



ABB, Buyer's guide