# 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 namahání

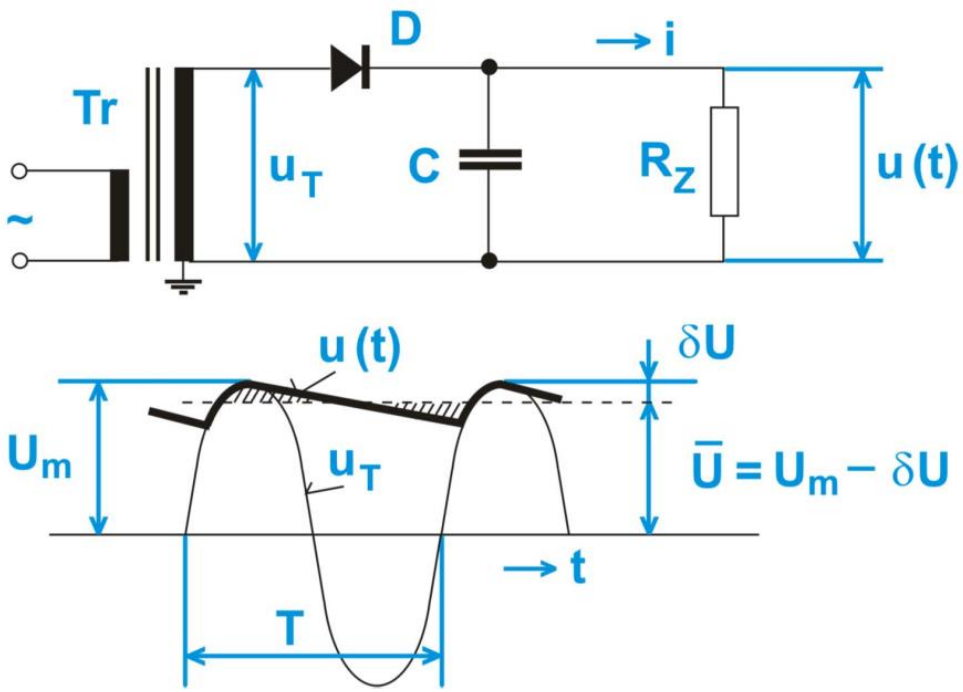
# Zkušebny vysokých napětí

- 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 namahání zavisí na typu zařízení a jeho jmenovité hladině

# Zkušebny vysokých napětí

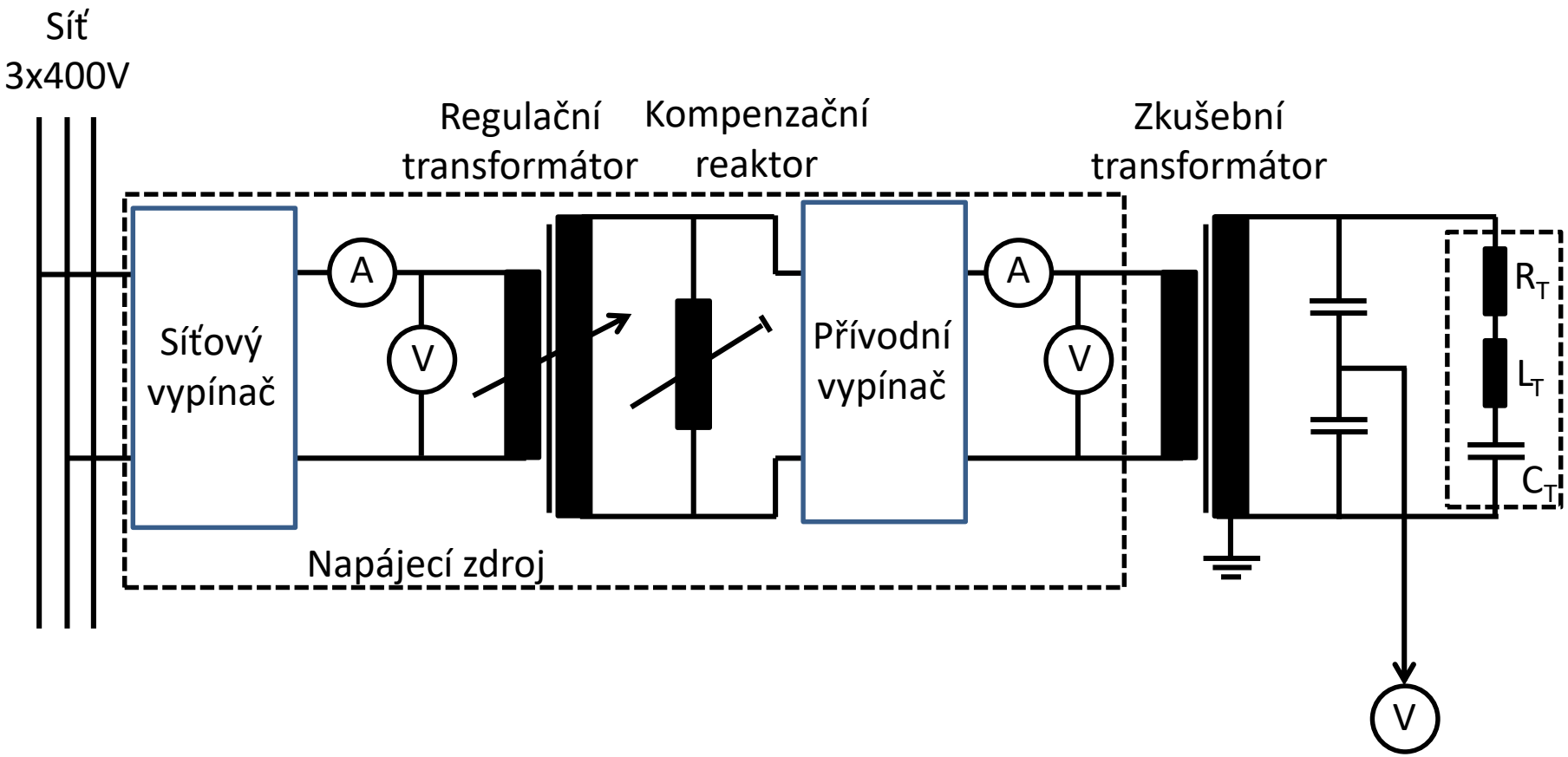
- Zkušebny vysokých napětí musí být vybaveny příslušnými zdroji vysokých napětí:
  - Stejnosměrné zdroje vysokých napětí
  - Střídavé zdroje vysokých napětí
  - Impulzní zdroje vysokých napětí

# Stejnosměrné zdroje vysokých napětí




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

# Střídavé zdroje vysokých napětí



# Střídavé zdroje vysokých napětí

**Zkušební transformátor s kovovou nádobou**

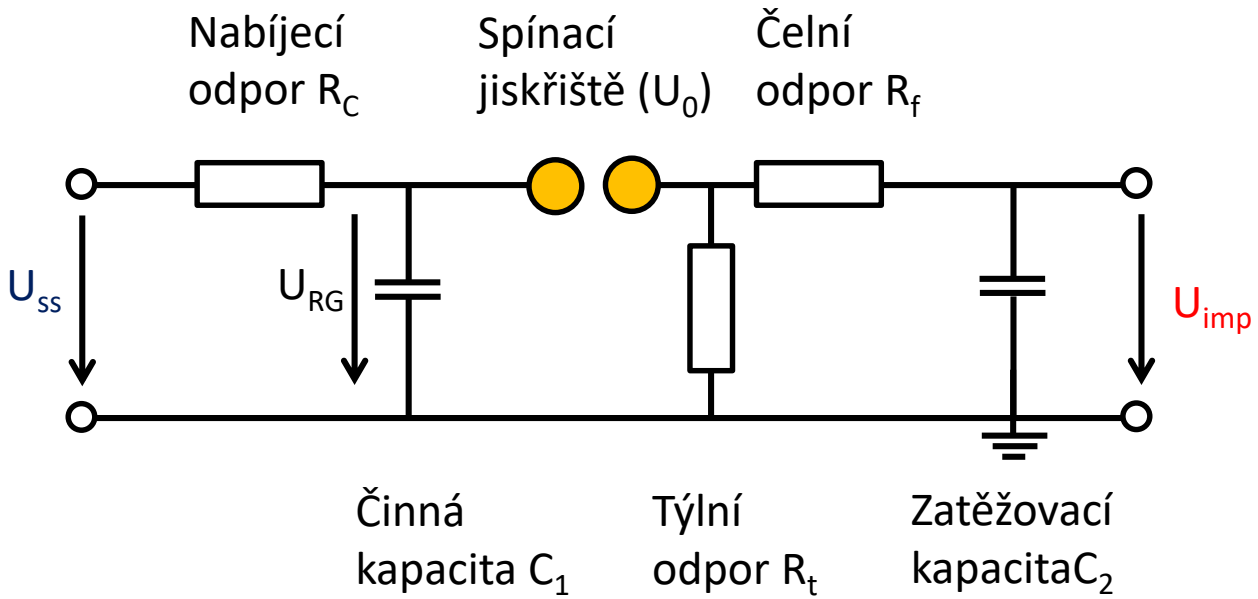
- Lepší podmínky pro chlazení (může být vybaven radiátory)
- Protože je nádoba uzemněna, transformátor nemusí být vzdálen od zdí a ostatních objektů – úspora místa
- Vhodná konstrukce pro venkovní vysokonapěťové testy

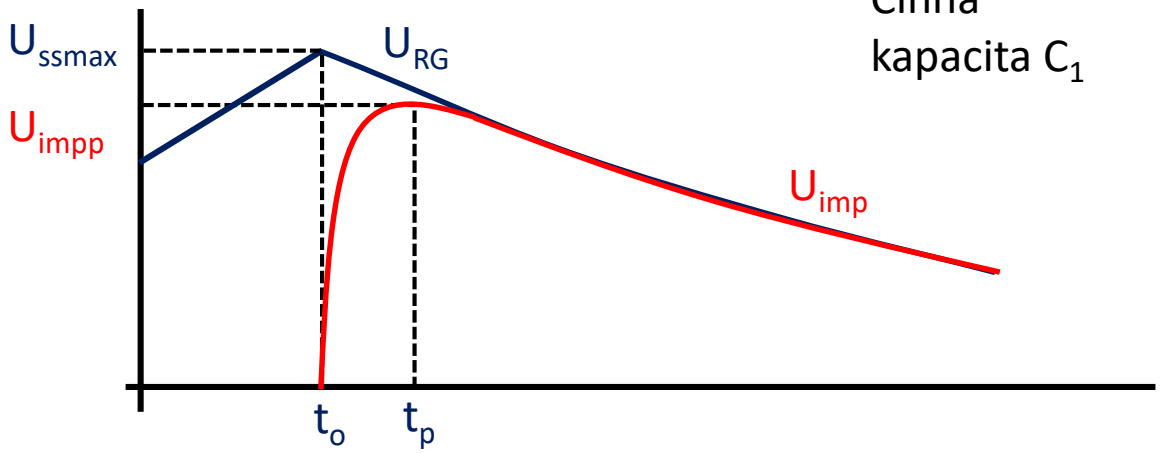
**Zkušební transformátor s izolační válcovou nádobou**

- 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**



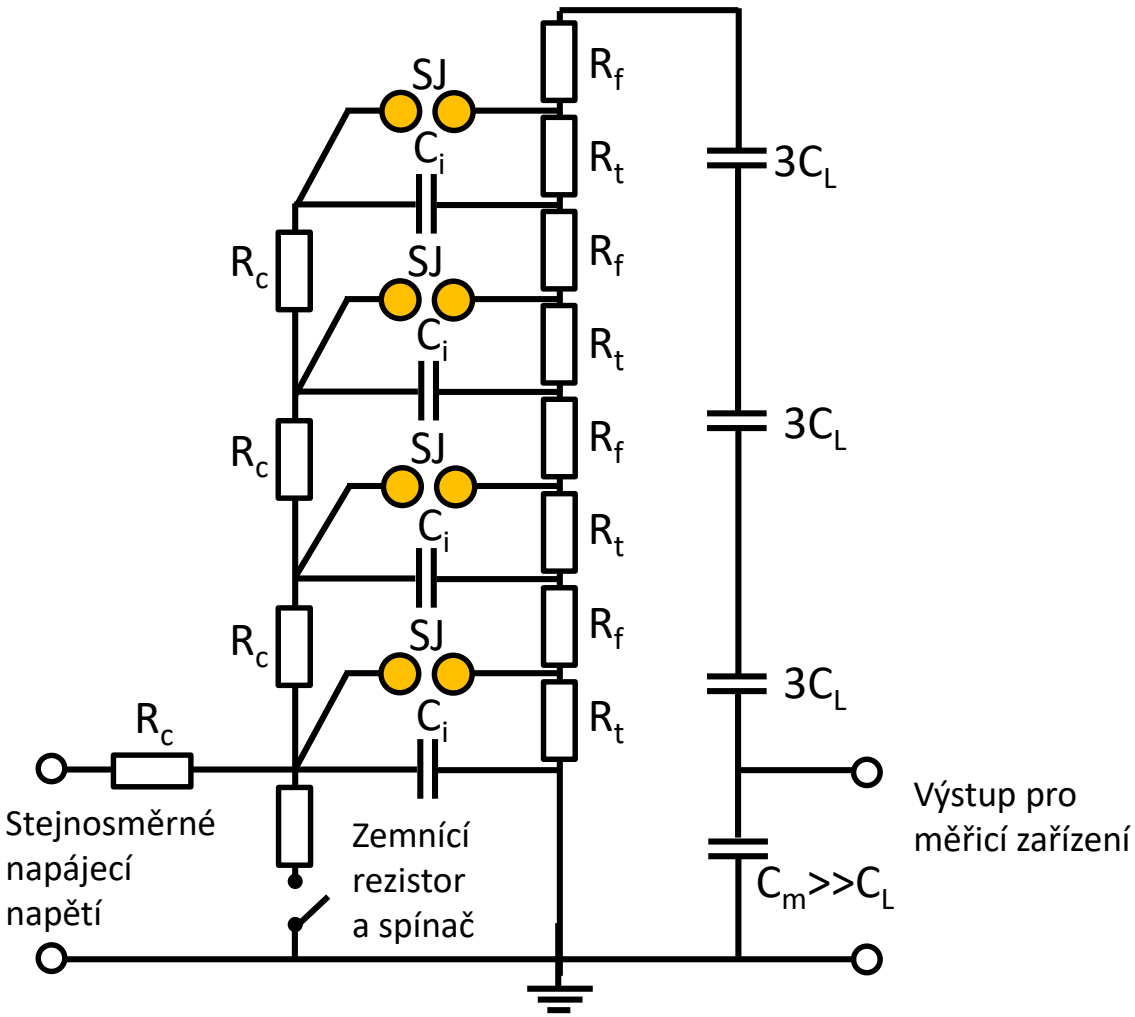




**Činitel využití RG**

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

# Impulzní zdroje vysokých napětí

**Vícestupňový rázový generátor**

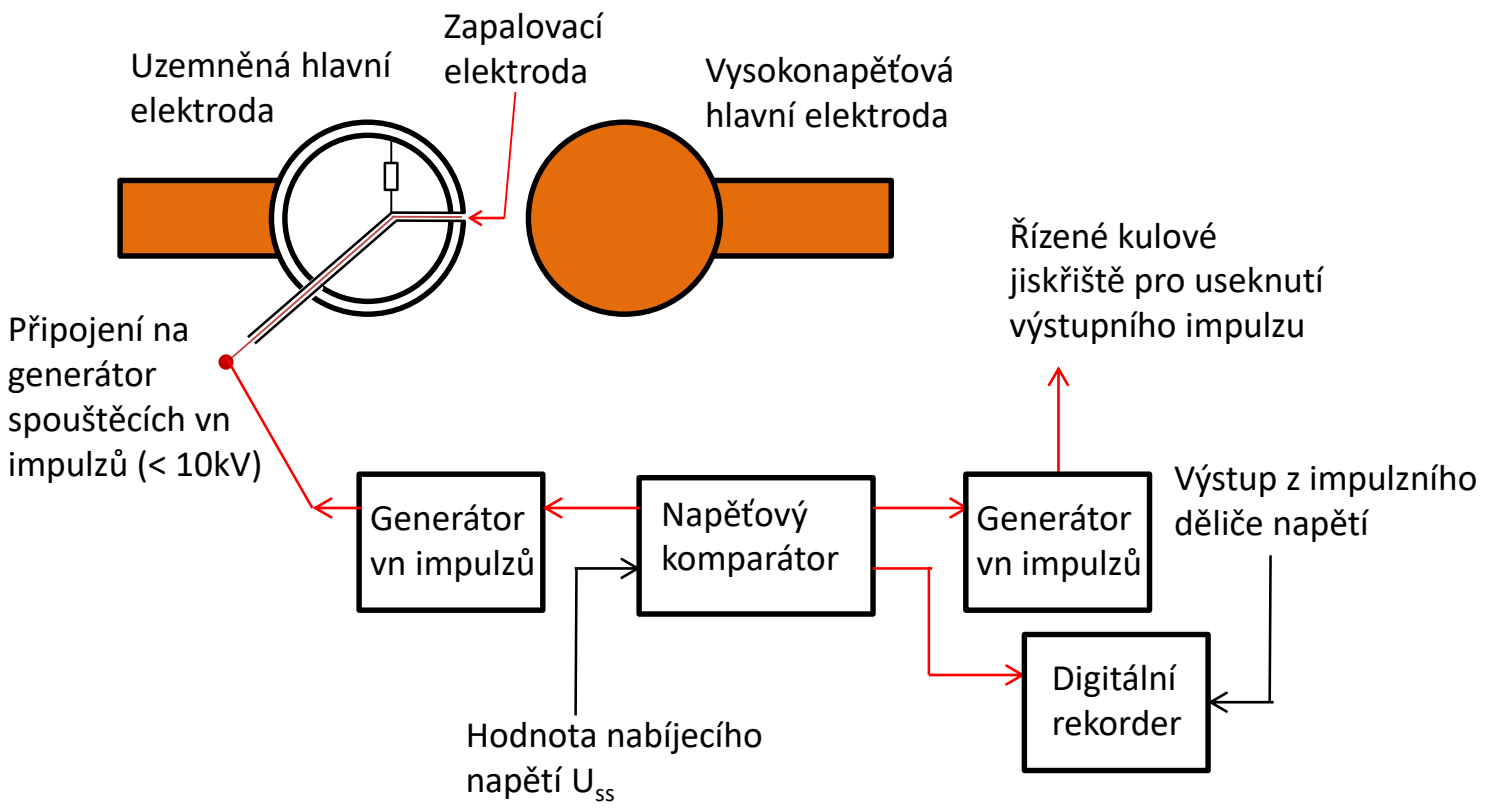


SGSA Impulsní generátor Haefely Hipotronics

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

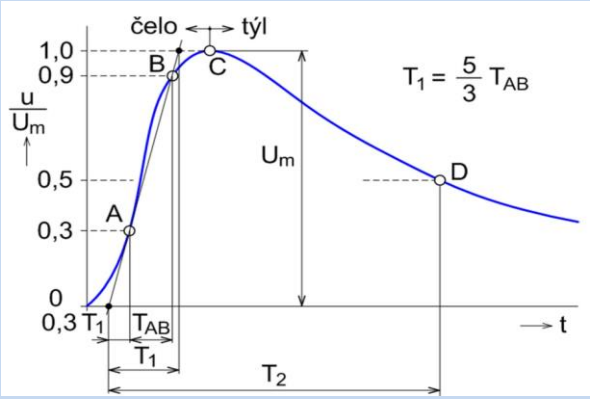
$$U_{imp} = n\eta U_0$$

# Řízené spouštění impulzního generáoru (trigatron)



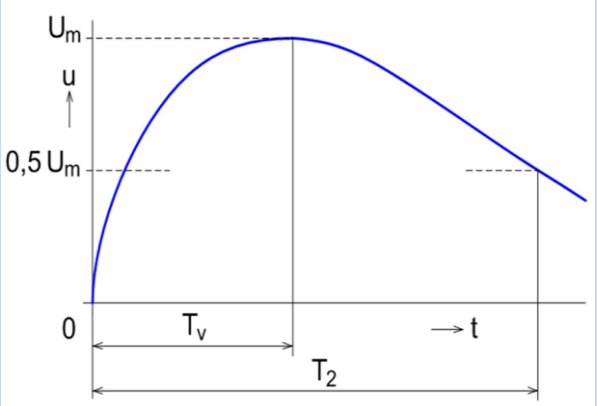
# Výstupní napětí z rázového generátoru

## Atmosférický impulz




- 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 µs ± 30%
- Doba půltýlu $T_2$=50 µs ± 20%

## Spínací impulz




- 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 µs ± 20 %
- Doba půltýlu $T_2$=2500 µs ± 60 %

# Vysokonapěťové děliče

- Obecně lze použít odporové, kapacitní, induktivní a kombinované vysokonapěťové děliče
- Induktivní 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 MΩ/10 kV

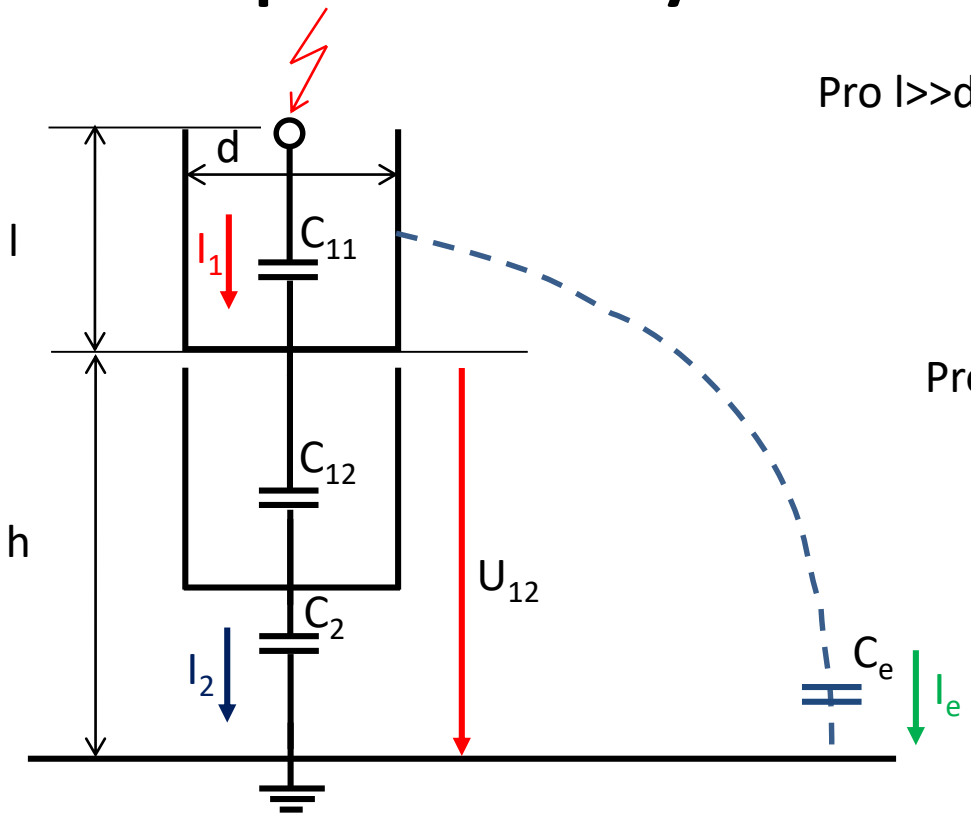
# Kapacitní vysokonapěťové děliče

- 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>>d platí pro $C_e$ přibližný vztah:

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

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:

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

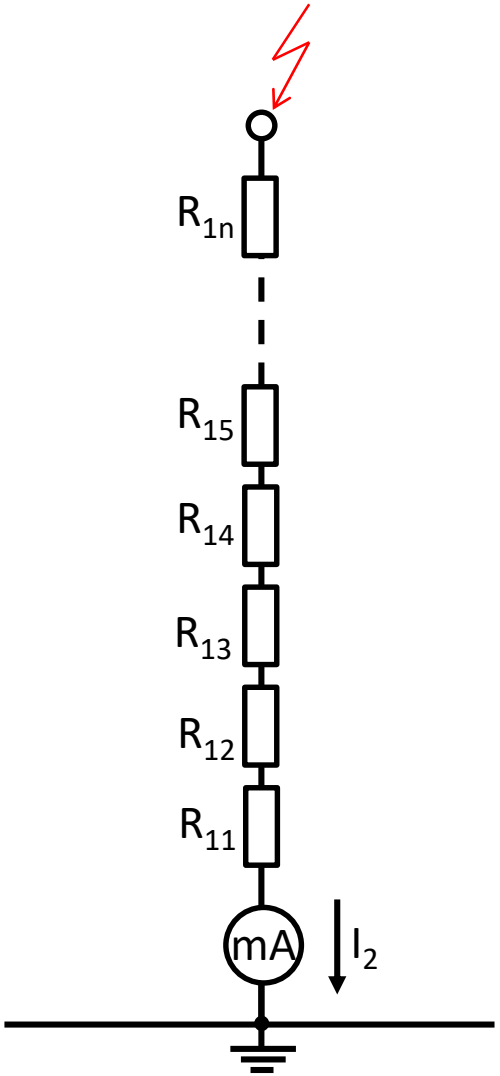
Jak se ukázalo z experimentů, kapacita k zemi $C_e$ každého kondenzátoru závisí jen málo na jeho výšce h nad zemí, proto lze pro výpočet použít zjednodušený vztah:

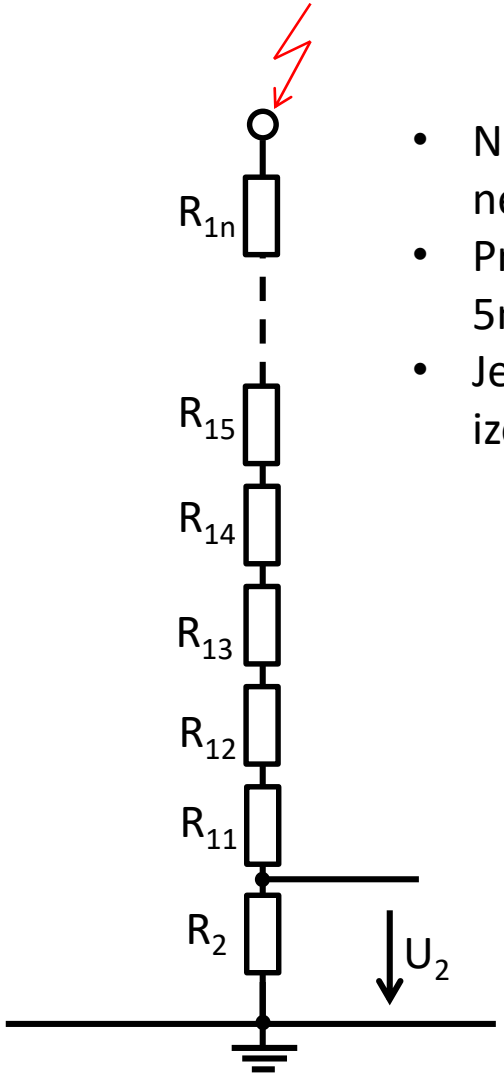
$$C_e = \frac{2\pi\varepsilon l}{ln\left(\frac{2l}{d}\right)}$$

pak

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

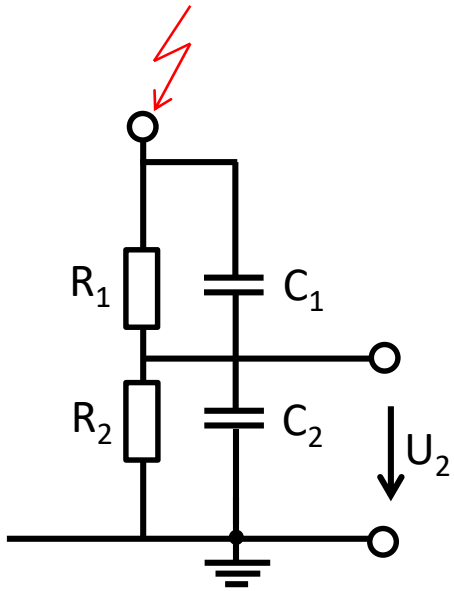
# Odporové vysokonapěťové děliče



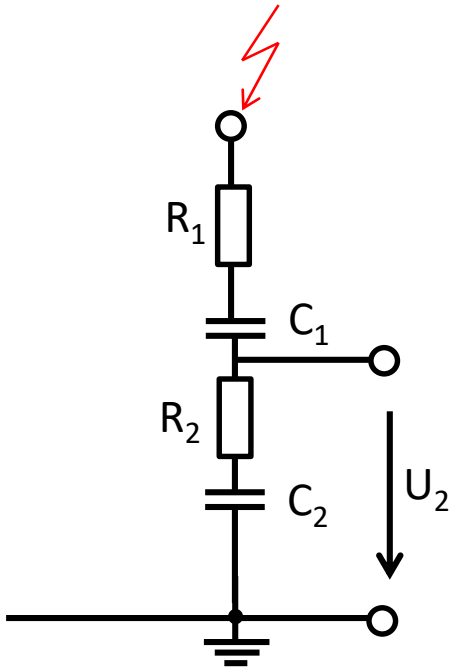




- Nejčastěji se využívá pro měření ss nebo impulzních napětí
- Proud děličem by neměl přesahnout 5mA
- Jednotlivé rezistory jsou ovinuty kolem izolačního válce aby tvořily sipirálu

# Kombinovaný RC vysokonapěťový dělič




Paralelně řazené prvky




Seriově řazené prvky

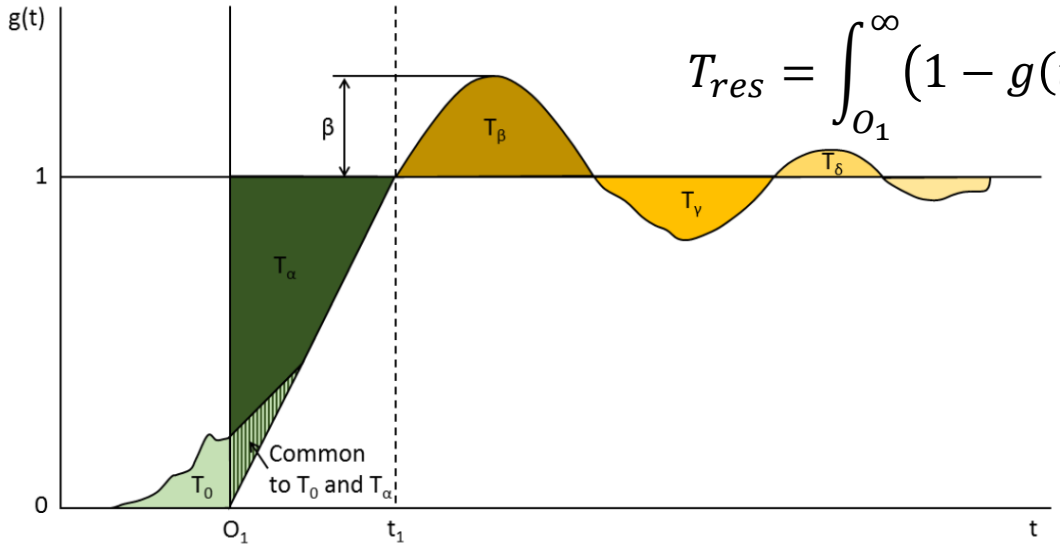
- V paralelním zapojení se používá pro měření stř, ss nebo impulzních napětí, v seriovém pro stř a impulzní napětí

# 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

Doba odezvy děliče:

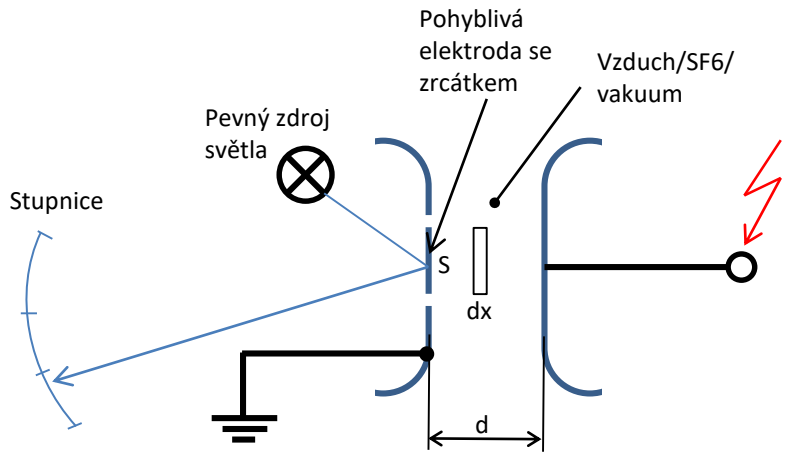
$$T_{res} = \int_{O_1}^{\infty} \big(1 - g(t)\big)dt = T_\alpha - T_\beta + T_\gamma - \cdots$$




Normalizovaná odezva děliče na jednotkový skok

# 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

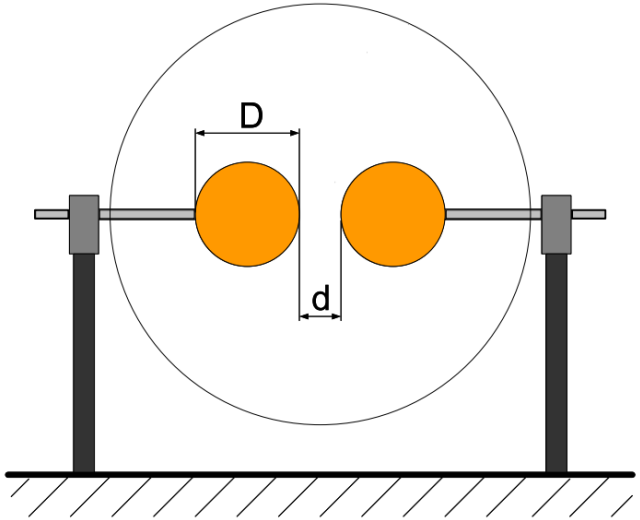
$$F = \frac{dw}{dx} = \frac{1}{2}\varepsilon S E^2 = \frac{1}{2}\varepsilon S \frac{U^2}{d^2}$$

Střední hodnota síly pro časově proměnné napětí

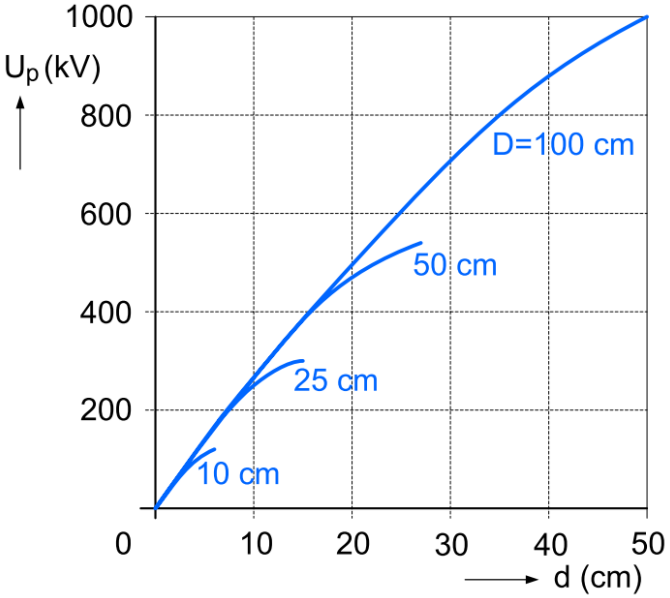
$$\frac{1}{T}\int_0^T F(t)dt = \frac{\varepsilon S}{2d^2 T}\int_0^T U^2(t) = \frac{\varepsilon S}{2d^2} U_{RMS}^2$$

# Kulová jiskřiště

- Přeskoková napětí v homogenním nebo málo nehomogením elektrickém poli, jako je napříkad 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 přeskokové 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 °C
  - Normální tlak $p_N$ = 101,3 kPa
  - Normální vlhkost $g_N$ = 11 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:

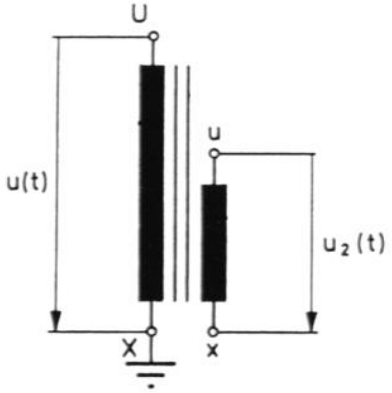
$$U_S = U_N \frac{k_h}{k_v} = U_N \delta$$

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

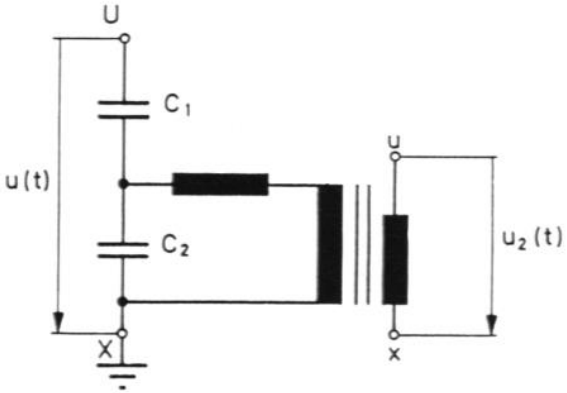
# Měřicí transformátory napětí

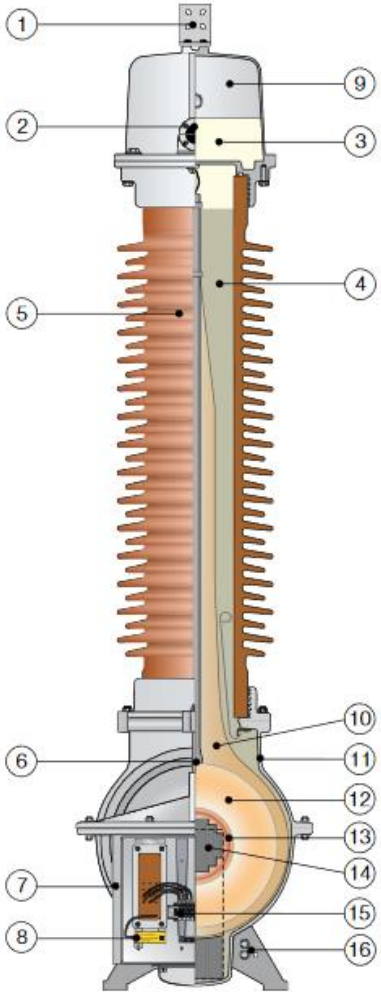
- Speciální transformátory, které jsou navrženy tak, aby transformovaly vysoké napětí na nízké napětí (obvykle 100 V) s danou přesností
- Mohou být v provedení jako induktivní (do 145kV) nebo kapacitní (nad 145kV)

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