

Zdroje vysokých napětí

Napěťové namáhání (voltage stress)

- S nárůstem přenášeného elektrického výkonu (transmitted power) roste i hladina potřebného napětí (voltage level)
- V současné době je většina výkonu přenášena střídavými systémy (a.c. system) s jmenovitým napětím 400 kV (rated voltage)
- Zároveň roste i podíl HVDC (high-voltage direct current) systémů (stávají se ekonomicky atraktivními) s nejčastějšími jmenovitými napětími ± 800 kV

Napěťové namáhání (voltage stress)

- Provozní napětí (operating voltage) vážně nenamáhá izolační systém (insulation system), nicméně určuje jeho rozměry (dimensions)
- Napěťové namáhání nastává při různých přepětích (overvoltages), jejichž velikost může být závislá (spínací přepětí – switching overvoltages) nebo nezávislá (atmosférická přepětí - lightning overvoltages) na jmenovitém napětí
- Při návrhu izolačního systému je důležité stanovit:
 - Jakému napěťovému namáhání bude systém vystaven
 - Jaká bude odezva systému (system response) při působení takového namáhání

Napěťové zkoušky

- Izolační systém musí být testován během vývoje (during its development) zařízení a před uvedením do provozu (before commissioning)
- Typy napěťových zkoušek
 - Napěťová zkouška střídavým napětím síťové frekvence (power frequency voltage test)
 - Napěťová zkouška atmosférickým impulzem (lightning impulse voltage test)
 - Napěťová zkouška spínacím impulzem (switching impulse voltage test)
 - Napěťová zkouška stejnosměrným napětím (d.c. voltage test)
- Volba testu a hodnota zkušebního napětí závisí na druhu zařízení a jeho jmenovitém napětí

Zkušebny vysokých napětí

- Základní vybavení:
 - VN zdroj (HV generator) – DC, AC, impulz
 - Testovaný objekt (test object) – má zpravidla kapacitní charakter, jeho parametry jsou důležité především při použití rezonančního obvodu
 - VN měřicí systém (HV measuring system) – určování hodnoty napětí na testovaném objektu
- Často se ve zkušebnách nacházejí také systémy pro měření dielektrických parametrů (dielectric measurement) nebo částečných výbojů (partial discharge measurement)

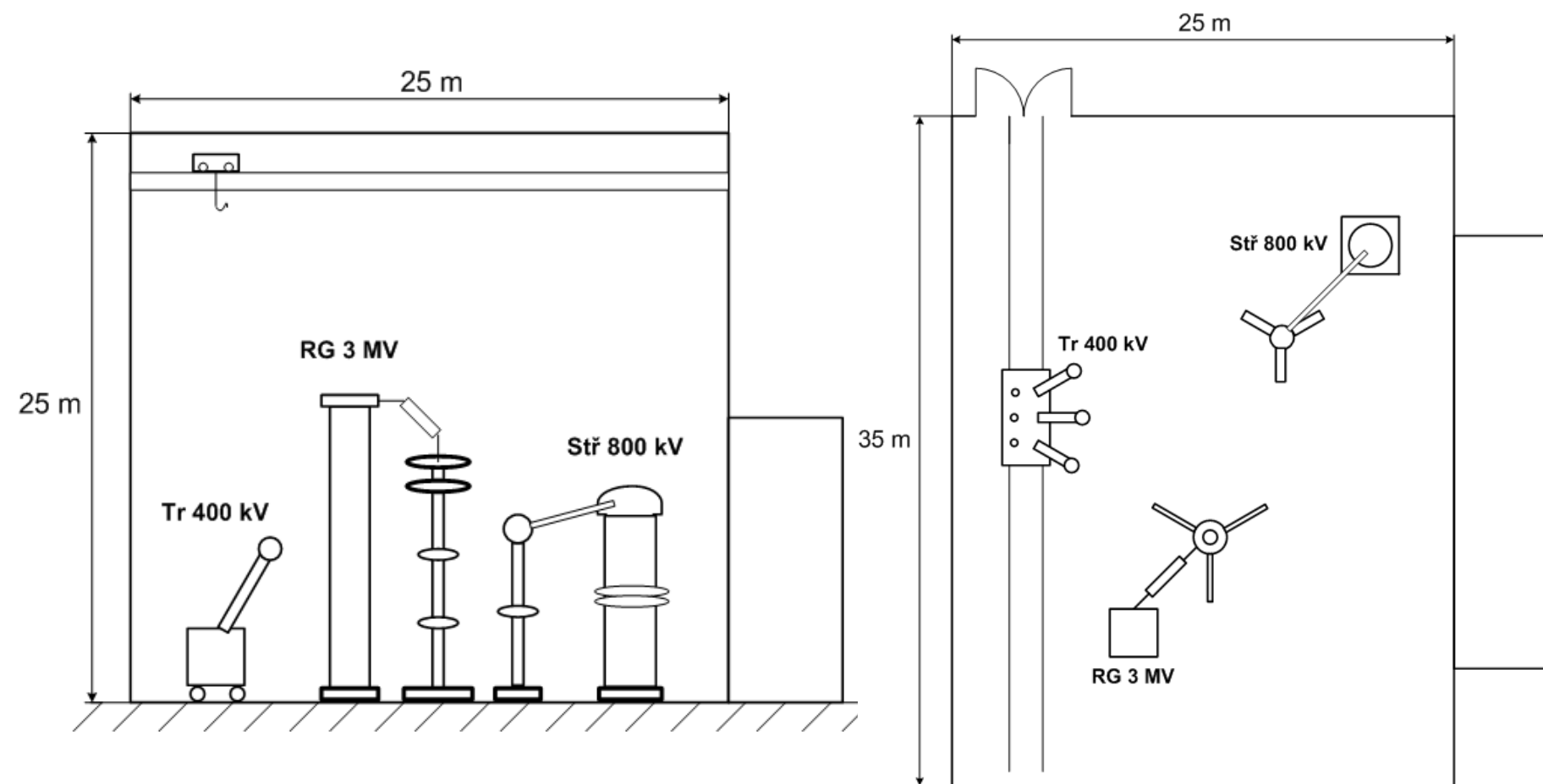
Zkušebny vysokých napětí

- VN zdroje (power supply units) jsou běžně napájeny ze sítě (230/400 V), v případě on site (in situ) zkoušek je energie dodávána diesel generátorem
- V současné době se preferuje model ovládání laboratoře pomocí počítačů (computer control)
 - Lze tak z jednoho místa předvolit zkušební metodu (včetně hodnot napětí), spustit a regulovat VN zdroj, odečíst data, vyhodnotit je a sepsat zkušební protokol (test record).
 - Výstupy z měření pak lze pomocí LAN či Internetu zasílat zákazníkům a provádět tak např. vzdálenou obsluhu (remote service)

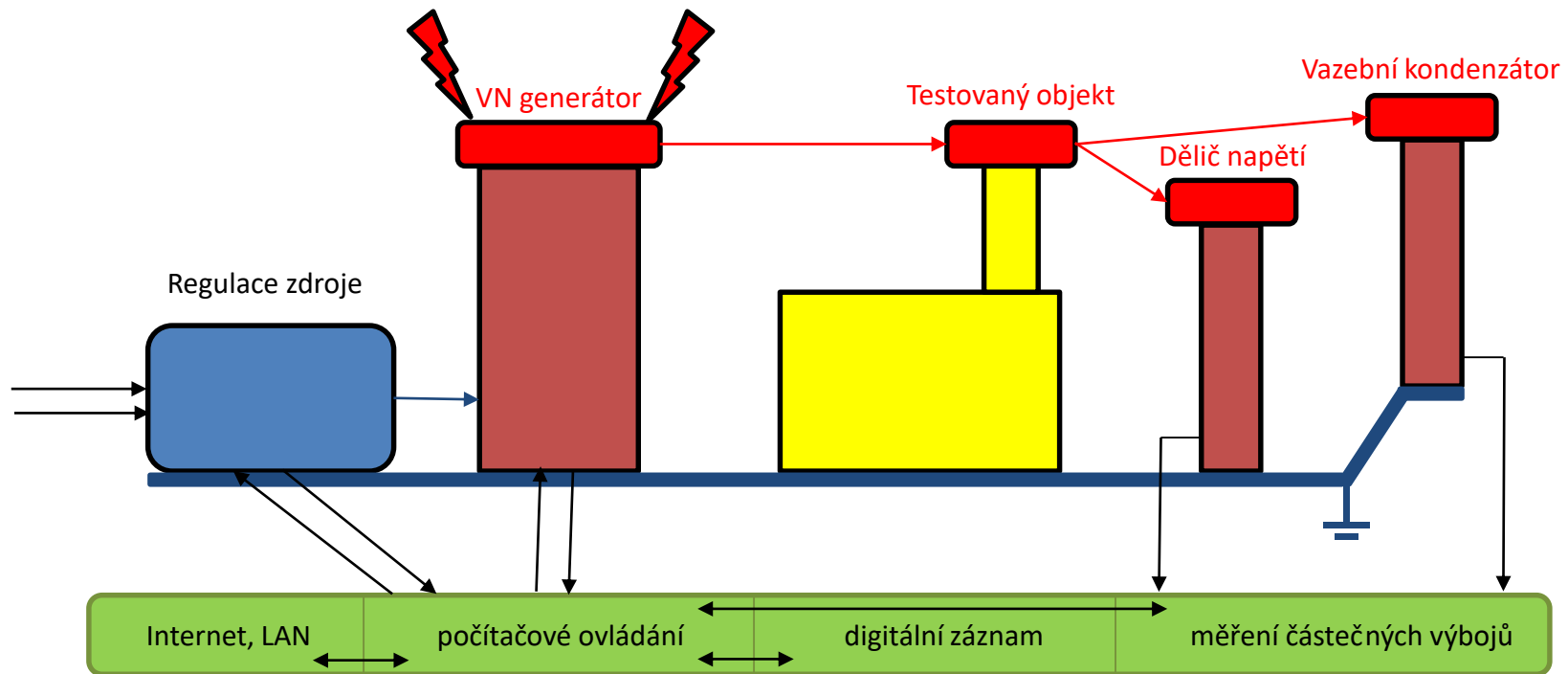
Zkušebny vysokých napětí

Nejvyšší napětí	Střídavé napětí	Atmosférický impuls	Spínací impuls	Minimální vzdálenost
(kV)				(m)
36	70	170	-	0,4
123	230	550	-	1,2
245	460	1050	-	2,5
420	510	1425	1050	5
525	630	1550	1175	8
765	850	2100	1550	12
1200	1400	2550	2100	20
1600	1900	3150	2550	30

Zkušebny vysokých napětí

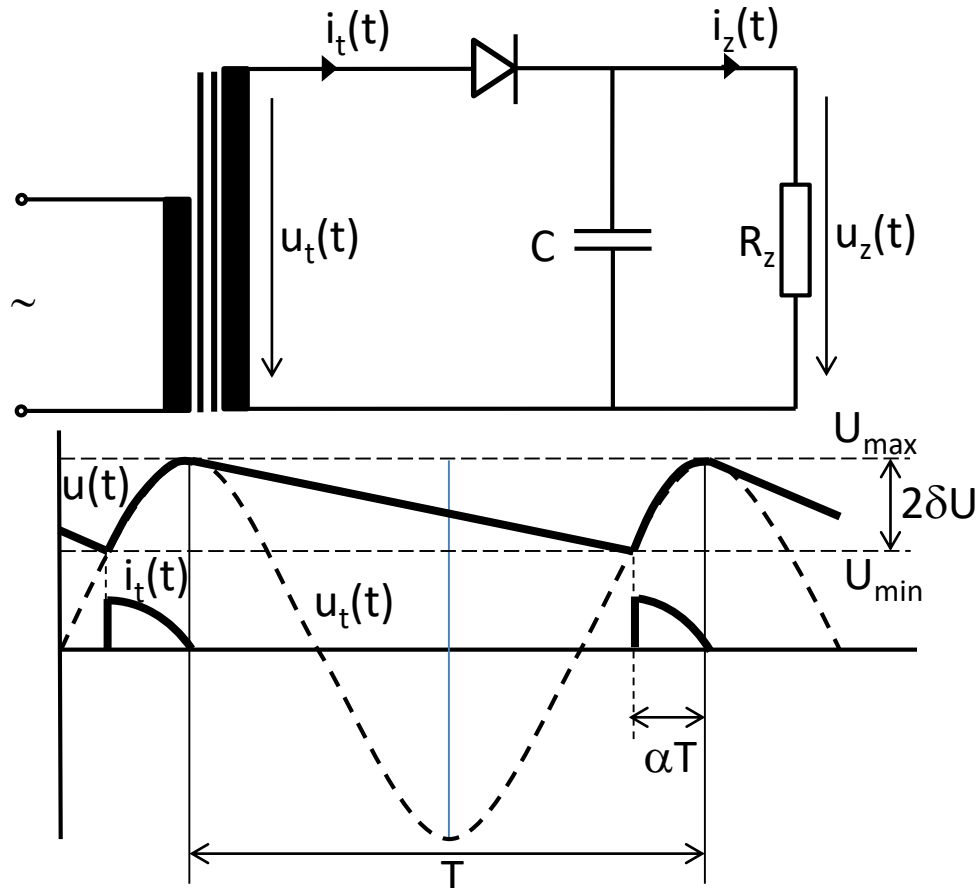


Zkušebny vysokých napětí



Zdroje stejnosměrného napětí

- Transformací ze střídavého napětí - usměrňovače (rectifiers)



Náboj (*charge*) přenesený do zátěže R_z za periodu T :

$$Q = \int_T i_z(t) dt = \frac{1}{R_z} \int_T u_z(t) dt = I_z T = \frac{I_z}{f}$$

kde I_z je střední hodnota proudu (*mean value*), dále platí že

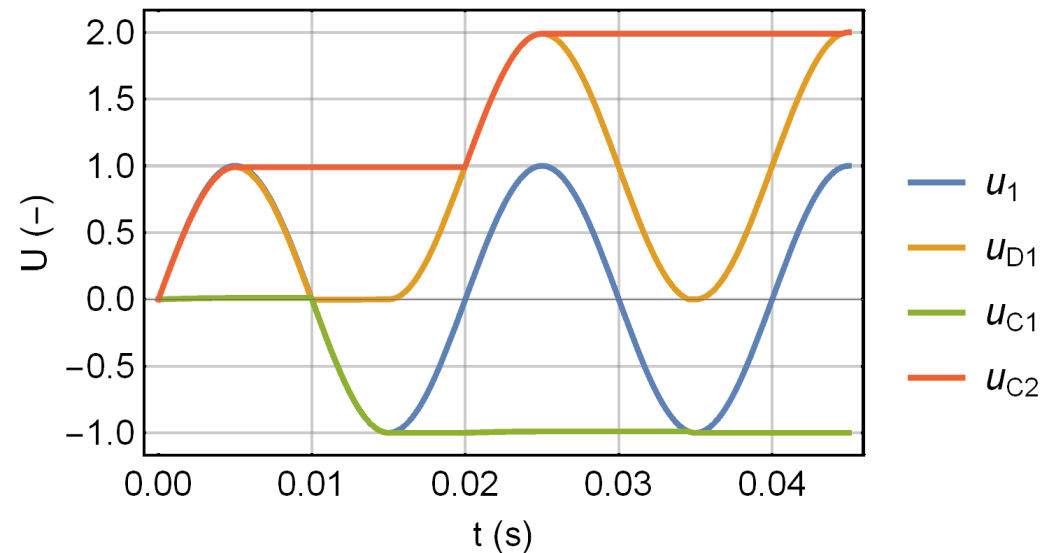
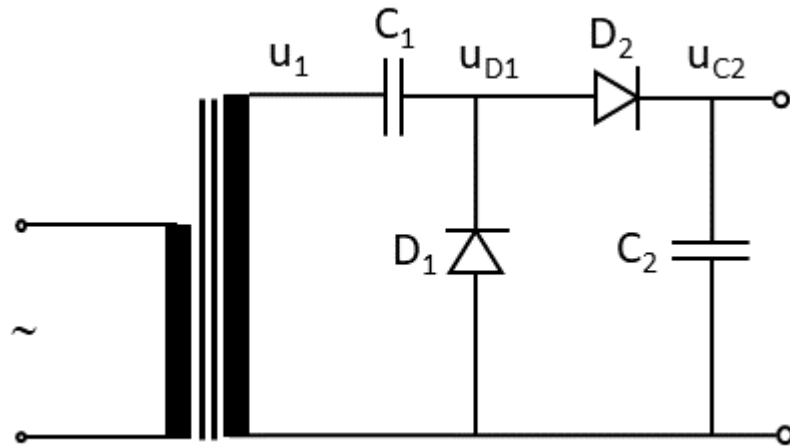
$$Q = \int_{\alpha T} i_t(t) dt = \int_T i_z(t) dt$$

Exaktní řešení je složité. Předpokládáme, že $\alpha=0$ pak zvlnění (*ripple*) δU lze vyjádřit ze vztahu

$$Q = 2\delta U C \rightarrow \delta U = \frac{Q}{2C} = \frac{I_z}{2Cf}$$

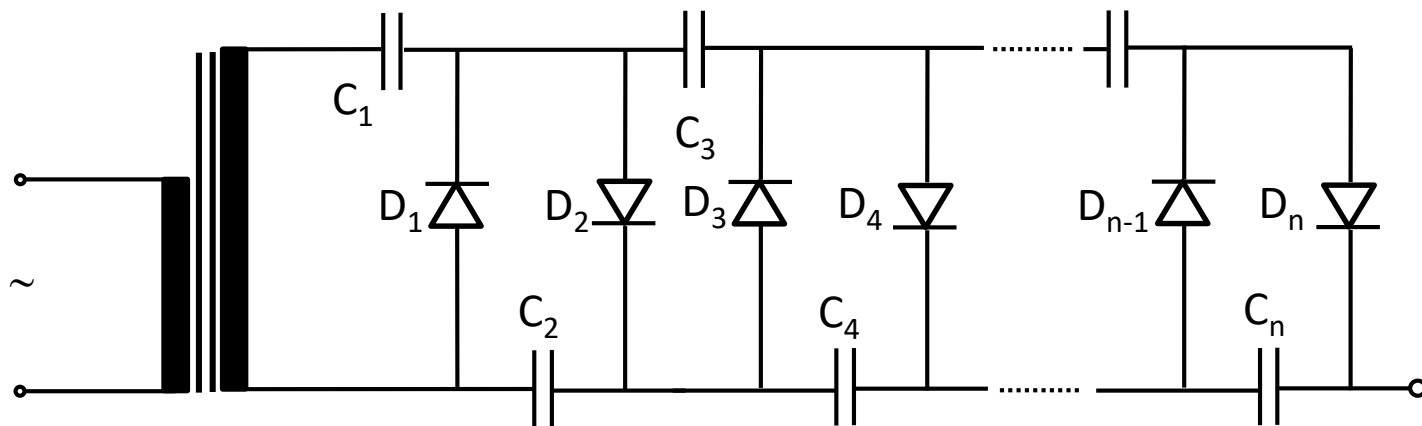
Zdroje stejnosměrného napětí

- Napěťový násobič (Greinacher doubler)



Zdroje stejnosměrného napětí

- Napěťový násobič Cockcroft-Walton (voltage multiplier)



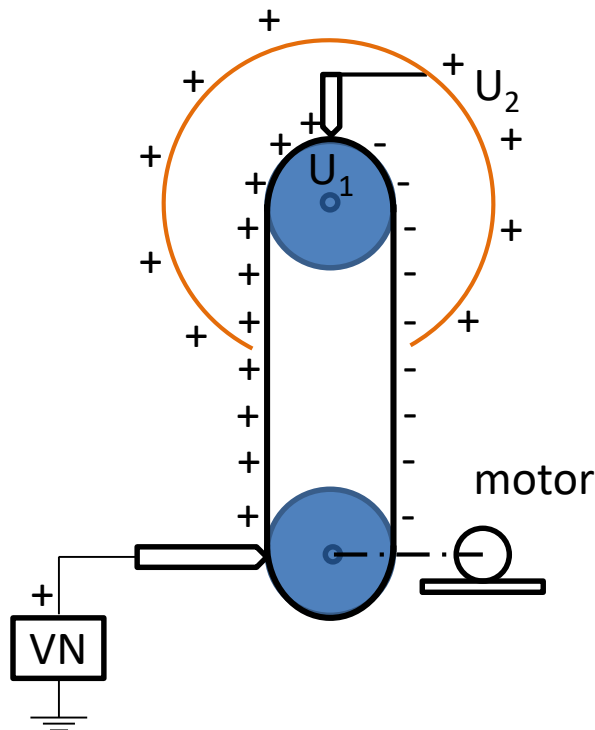
Napěťový násobič Cockcroft-Walton



Photograph by [Mike Peel](http://www.mikepeel.net) (www.mikepeel.net).

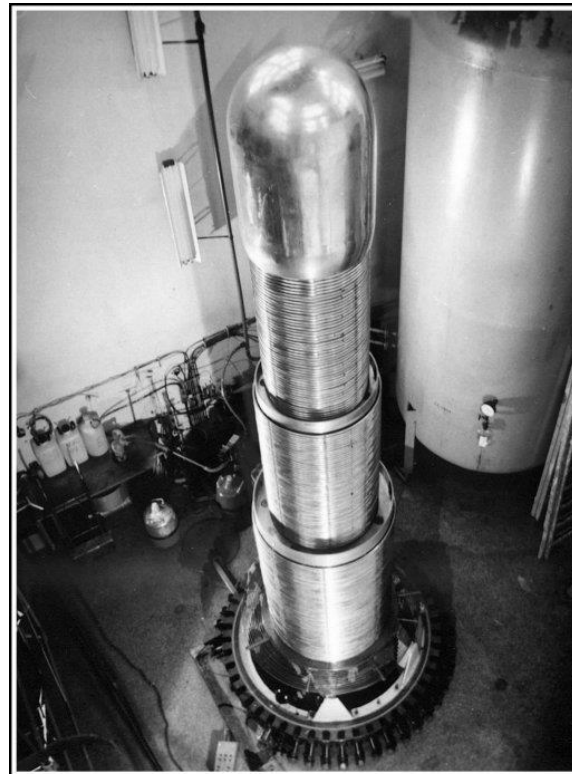
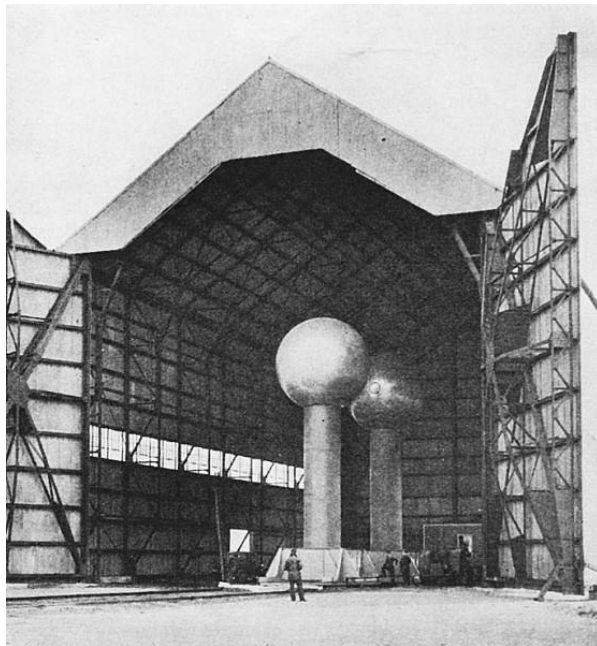
Zdroje stejnosměrného napětí

- Elektrostatické generátory - Van de Graaffův generátor



- Lze dosáhnout extrémně vysokých hodnot stejnosměrného napětí (až 8 MV)
- Velkého náboje na kulové elektrodě (sphere electrode) je dosaženo kontinuální akumulací náboje z pásu pomocí sběrače (from belt by collector)
- Náboj přechází z vyššího potenciálu (higher potential) U_1 do nižšího potenciálu (lower potential) U_2

Van de Graaffův generátor



5 MV Van de Graaff accelerator
in Nucl. Phys. Inst. of the Acad. of Sci. of the Czech Rep., Řež



Zdroj: <https://teslaresearch.iimdo.com/articles-interviews/possibilities-of-electro-static-generators-by-nikola-tesla-scientific-american-march-1934/>

Zdroj: <http://www.ntm.cz/aktualita/van-de-graaffuv-generator>

Zdroje střídavého napětí

- Zkušební zdroje jsou obvykle jednofázové (usually single phase)
- Tvar musí pokud možno odpovídat čisté sinusovce (pure sinusoidal)
- Poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou (peak and rms value) napětí musí být $\sqrt{2} \pm 5\%$
- Při testování vysokonapěťové izolace je zátěž (load) vždy kapacitního charakteru, výkon zdroje je pak stanoven jako

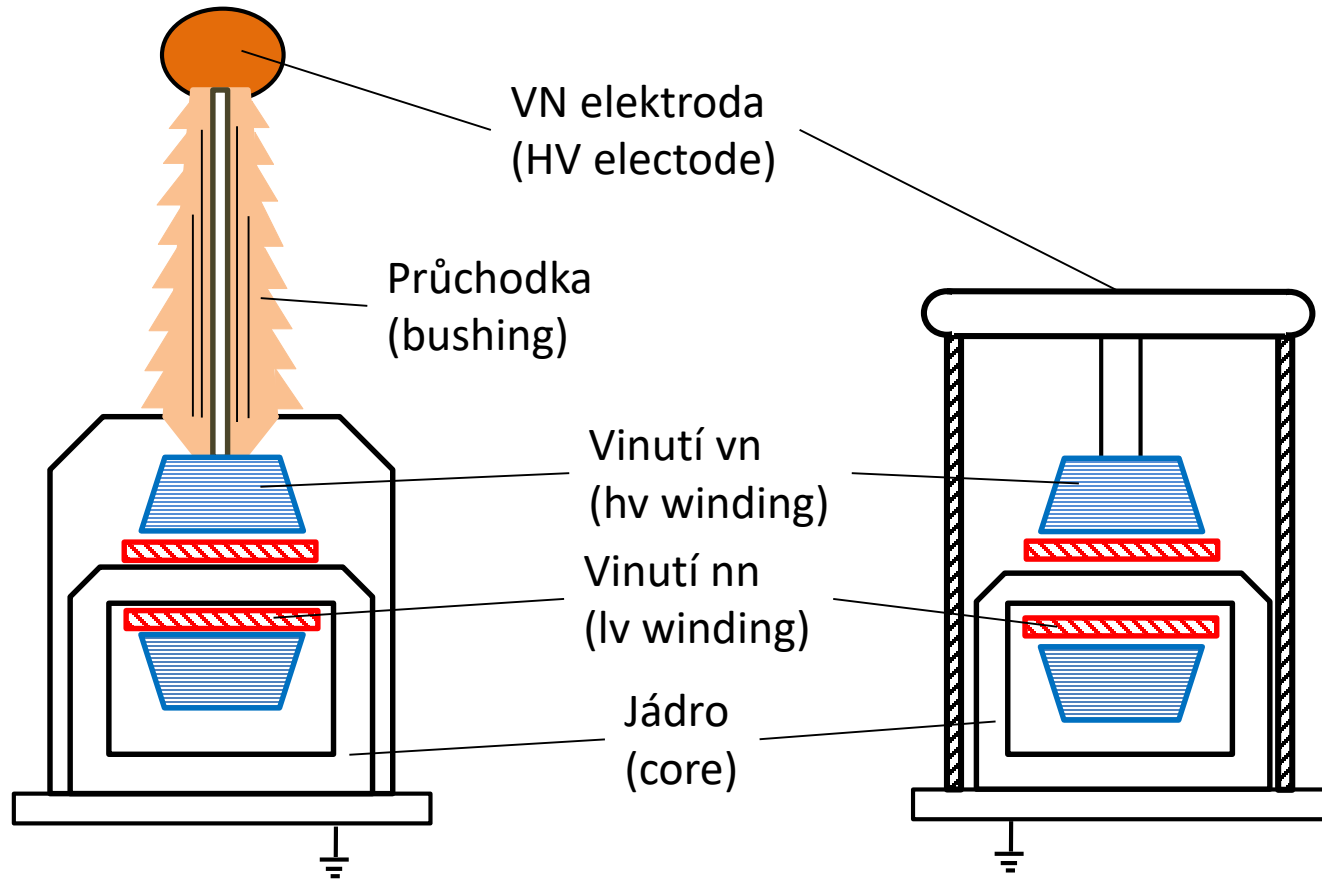
$$P = kU_n^2 \omega C_t$$

kde $k \geq 1$ je konstanta zohledňující ostatní kapacity zkušebního obvodu a C_t je kapacita testovaného objektu

Zdroje střídavého napětí

- Zkušební transformátory (test transformers)
 - S uzemněnou (kovovou) nádobou (metal-tank type)
 - Možnost využití radiátorů pro lepší chlazení
 - Úspora místa (na nádobě je nulový potenciál)
 - Lze použít pro venkovní měření
 - S izolační válcovou nádobou (cylinder type/in insulating tube)
 - Není zapotřebí průchodka (bushing)
 - Vhodné pro transformátorové kaskády
 - Pouze pro měření uvnitř

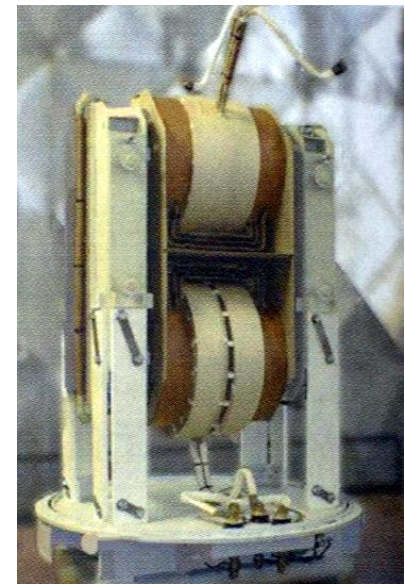
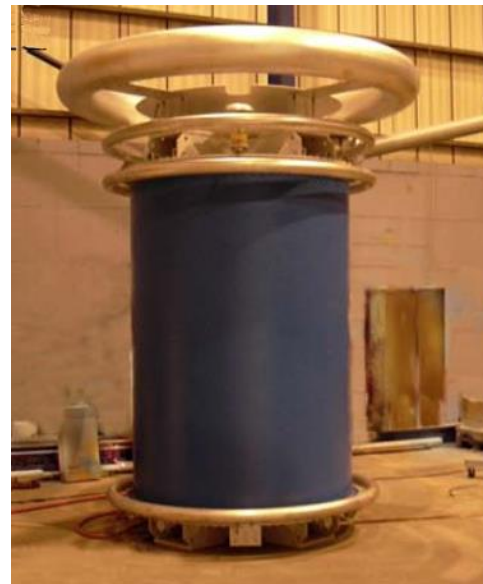
Zkušební transformátory



Zkušební transformátory



Zkušební transformátor s
uzemněnou nádobou a
průchodkou

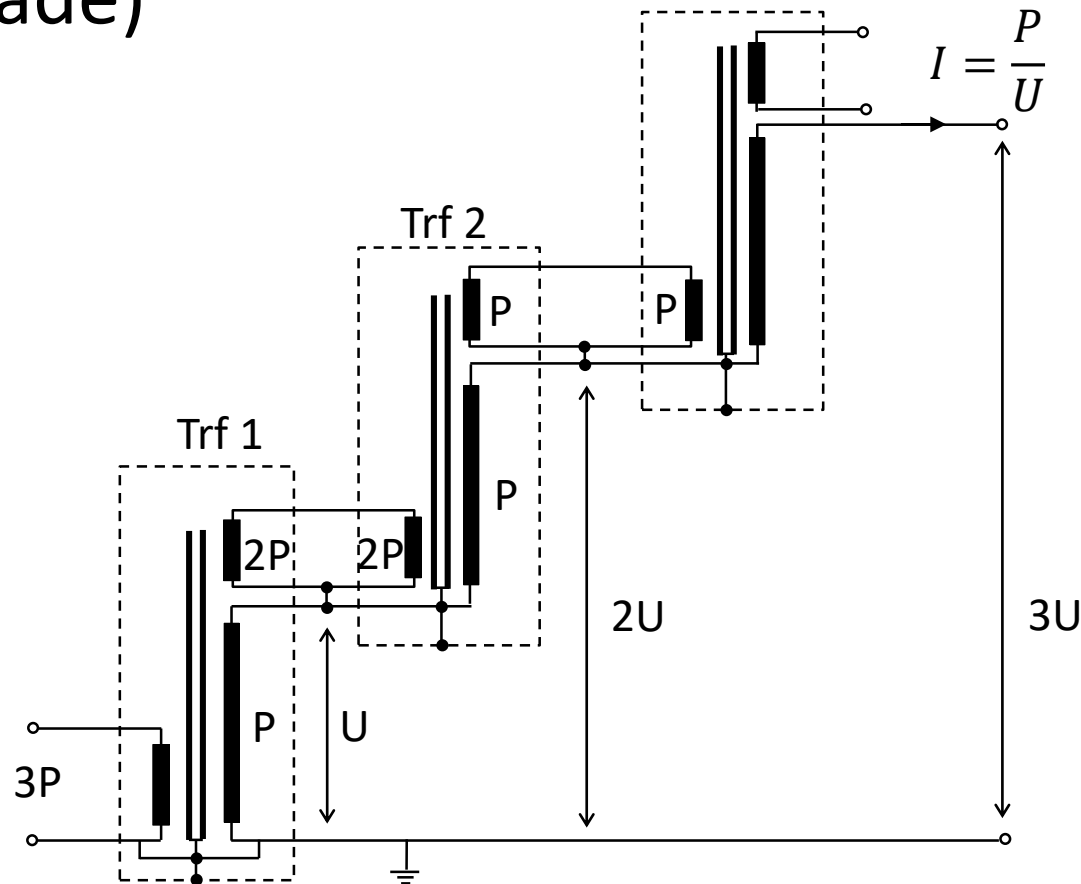


Zkušební transformátor s
izolovaným válcem

Zdroj: Hauschild, H.; Lemke, E. *High-Voltage Test and Measuring Techniques*

Zdroje střídavého napětí

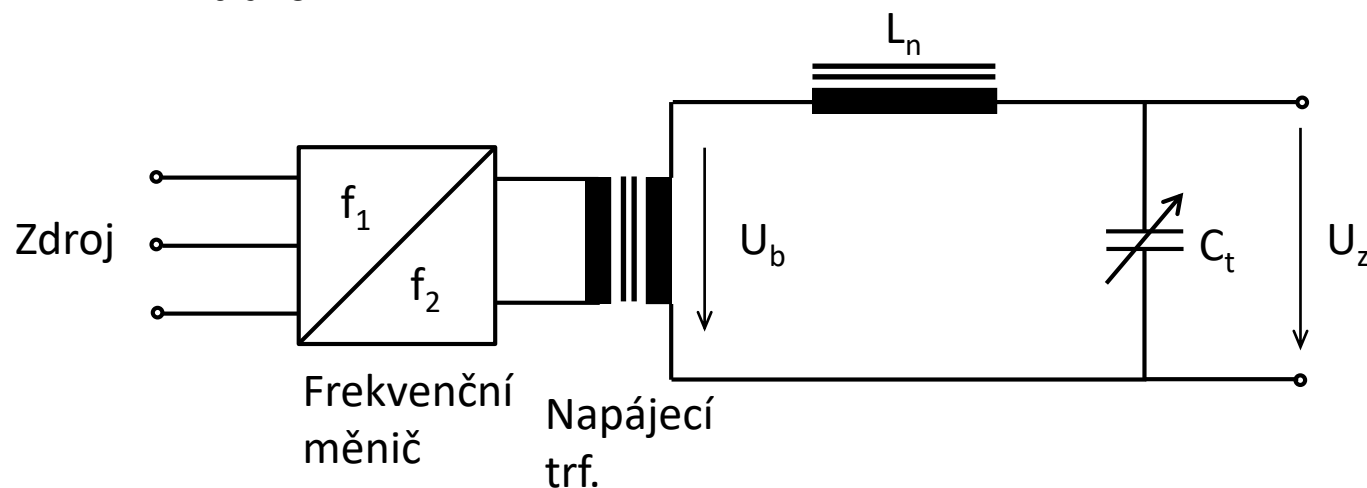
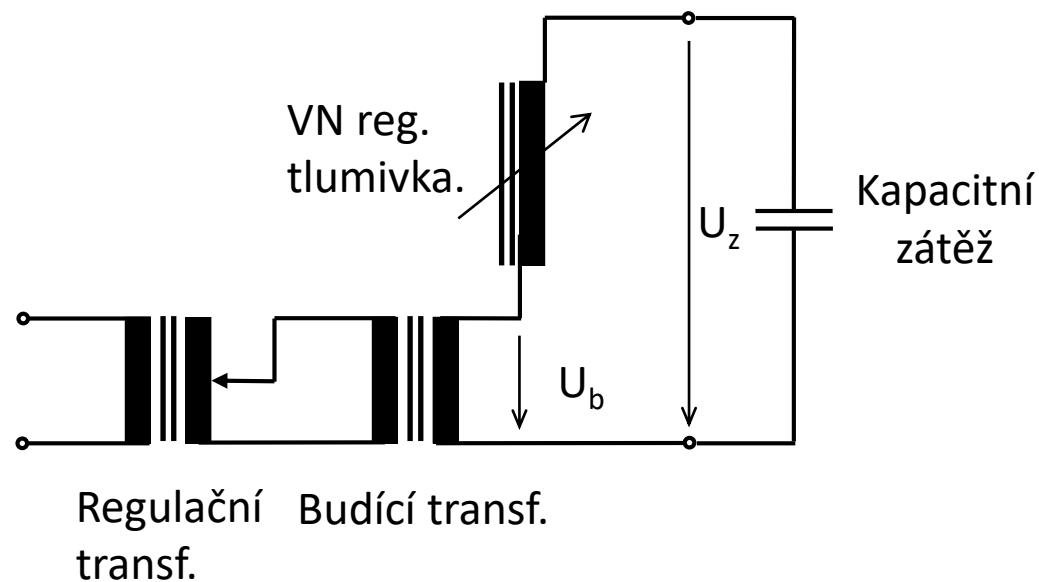
- Transformátorová kaskáda (test transformer cascade)



Zdroje střídavého napětí

- Sériové rezonanční obvody (series resonant circuits)
 - Vhodné pro on site testy objektů s vysokou kapacitou: kabelové systémy (cable runs), vypínací technika s plynou izolací (gas insulated switchgear)
 - Kabelové systémy na střední a vysoké napětí by například vyžadovaly zkušební transformátor o výkonu v řádu jednotek až stovek MVA, což je prakticky neproveditelné. V takovýchto případech je nutné použít sériové rezonanční obvody
 - Tyto obvody mají dvojí různé provedení:
 - S proměnnou indukčností (změna velikosti vzduchové mezery)
 - S proměnnou frekvencí (frekvenční měnič)

Sériové rezonanční obvody

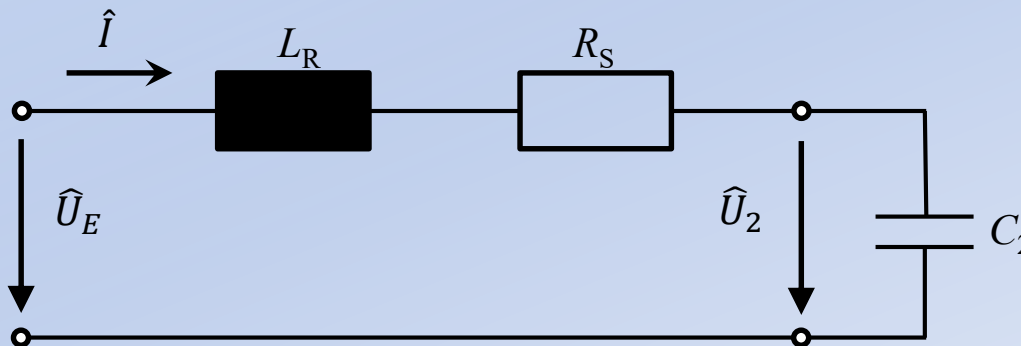


Sériové rezonanční obvody

- Skládají se z budícího transformátoru (exciter transformer) a v sérii zapojené reaktanční tlumivky (reactor)
- Dvě možnosti dosažení rezonance:
 - Výběr vhodné indukčnosti (inductance) L_R reaktoru pro zkoušený objekt s kapacitou C_2 tak, aby bylo dosaženo rezonance (tj. $\omega_0 = \omega$)
 - Změna frekvence pomocí frekvenčního měniče tak, aby bylo dosaženo $\omega = \omega_0$

Obecně lze vyjádřit veličinu rezonanční poměr (resonance ratio) η jako:

$$\eta = \frac{\hat{U}_2}{\hat{U}_E} = \frac{\frac{1}{j\omega C_2} \cdot \hat{I}}{\left(\frac{1}{j\omega C_2} + R_S + j\omega L_R\right) \cdot \hat{I}} = \frac{\frac{1}{j\omega C_2}}{\frac{1 + j\omega R_S C_2 - \omega^2 L_R C_2}{j\omega C_2}} = \frac{1}{1 + j\omega R_S C_2 - \omega^2 L_R C_2}$$



Při rezonanci pak platí:

$$\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_R C_2}}$$

$$\eta = \frac{1}{\omega_0 R_S C_2}$$

Sériové rezonanční obvody s variabilní indukčností (ACRL)

- Indukčnost se mění s velikostí vzduchové mezery sériově zapojené tlumivky podle vztahu:

$$L_R = \frac{k \cdot \mu_0 \cdot w^2 \cdot A}{a}$$

Kde k (-) je proporční faktor, μ_0 (H/m) je permeabilita vakua, w (-) je počet závitů (turns), A (m²) je průřez jádra a a (m) je velikost vzduchové mezery.

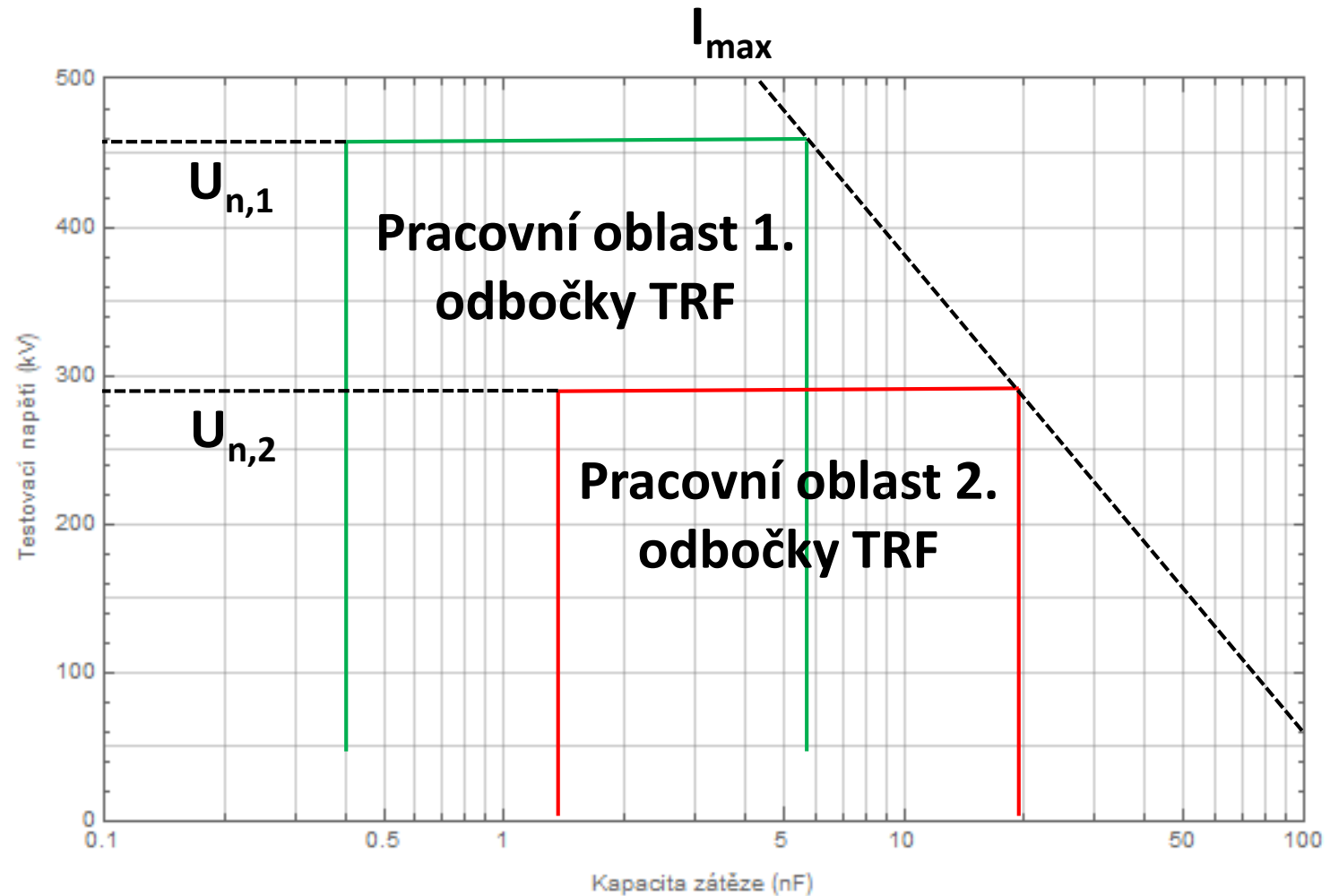
- Při zvětšování vzduchové mezery (air gap) dochází k nárůstu ztrát a rozptylových magnetických toků (magnetic stray flux) -> indukčnost lze prakticky zmenšovat pouze do určité hodnoty $L_{\min}$. Zmenšováním vzduchové mezery lze dosáhnout nejvyšší hodnoty indukčnosti $L_{\max}$. Obě tyto krajní meze lze definovat z rovnice:

$$\frac{C_{\max}}{C_{\min}} = \frac{L_{\min}}{L_{\max}} \approx \frac{a_{\max}}{a_{\min}}$$

Příčemž poměr $a_{\max}/a_{\min}$ bývá zpravidla maximálně 20.

- Čím má obvod vyšší činitel jakosti Q , tím vyšší a užší je rezonanční špička a je tak nutné zajistit vyšší přesnost nastavování velikosti vzduchové mezery

Sériové rezonanční obvody s variabilní indukčností



Sériové rezonanční obvody s variabilní frekvencí (ACFR)

- Na primární vinutí excitačního transformátoru se připojí frekvenční měnič (frequency converter; diodový usměrňovač + IGBT střídač)
- Operační oblast obvodu je dána frekvenčním omezením měniče:

$$\frac{C_{max}}{C_{min}} = \left(\frac{f_{max}}{f_{min}} \right)^2$$

frekvence zároveň definuje maximální odběrový proud I_{max} :

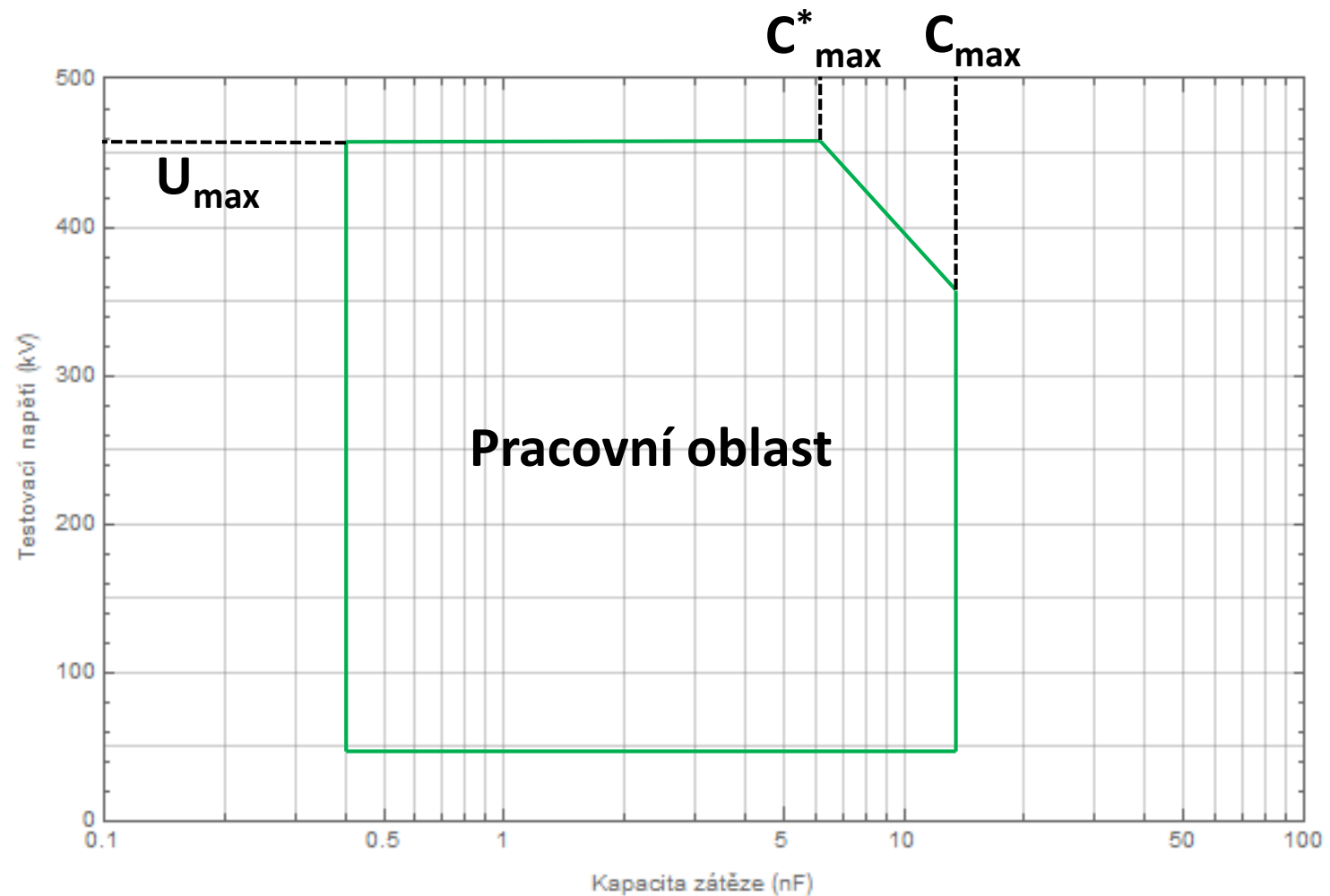
$$I_{max} = 2\pi f_{min} \cdot C_{max} \cdot U_T = U_T \sqrt{\frac{C_{max}}{L}}$$

kde U_T (V) je napětí na testovaném objektu.

Často se stává, že teoretický maximální odběrový proud I_{max} překročí maximální dovolenou hodnotu proudu I_{max}^* (danou maximálním oteplením). Proto je tedy nutné omezit operační oblast touto mezí.

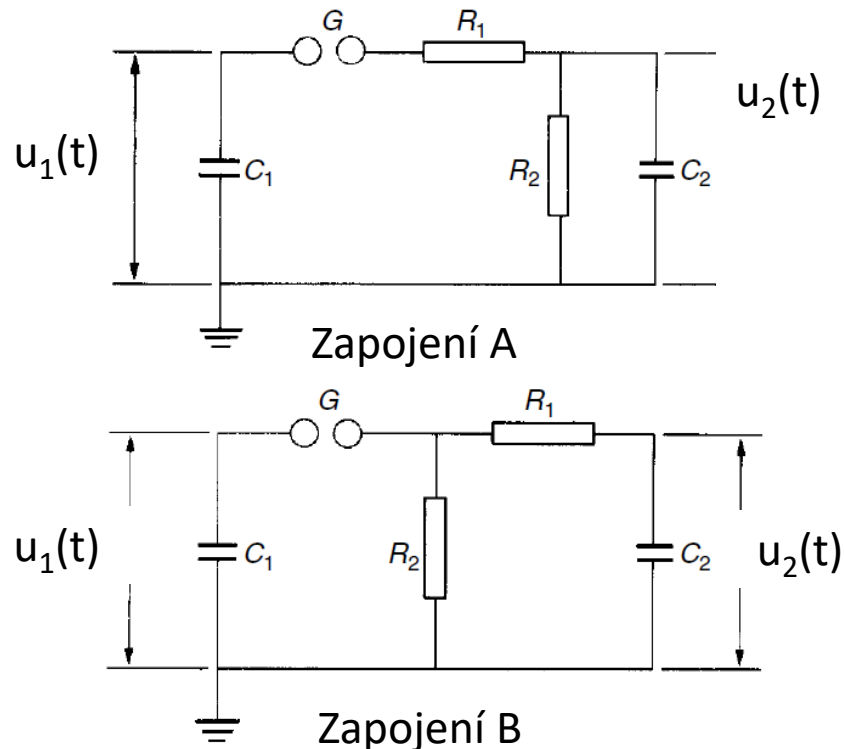
- Výhodou tohoto typu obvodu je vyšší činitel jakosti a tím i menší potřebný výkon usměrňovače a tlumivky.

Sériové rezonanční obvody s variabilní frekvencí



Zdroje impulzních napětí

- Jednostupňový rázový generátor (single-stage impulse generator)



Pro první obvod lze psát rovnice:

$$u_1 = u_2 - R_1 C_1 u'_1$$

$$-C_1 u'_1 = \frac{u_2}{R_2} + C_2 u'_2$$

Počáteční podmínky pro řešení

$$u_1(0) = U_c$$

$$u_2(0) = 0$$

Řešení:

$$u_2 = k U_c [e^{\alpha_1 t} - e^{\alpha_2 t}]$$

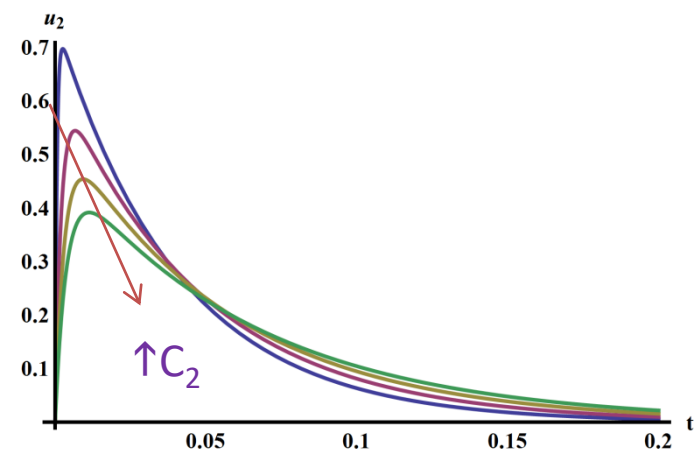
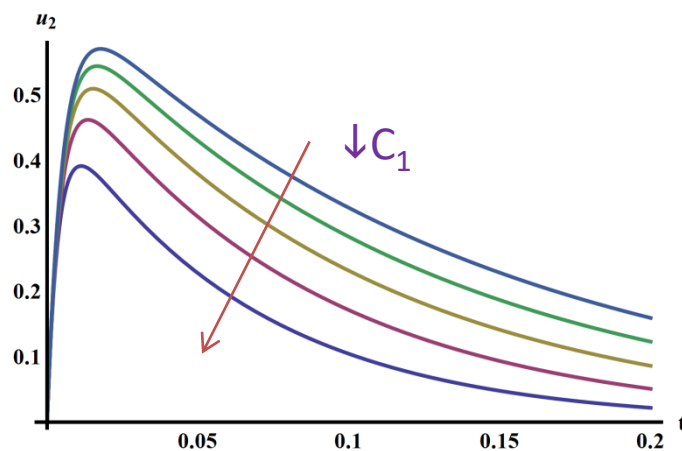
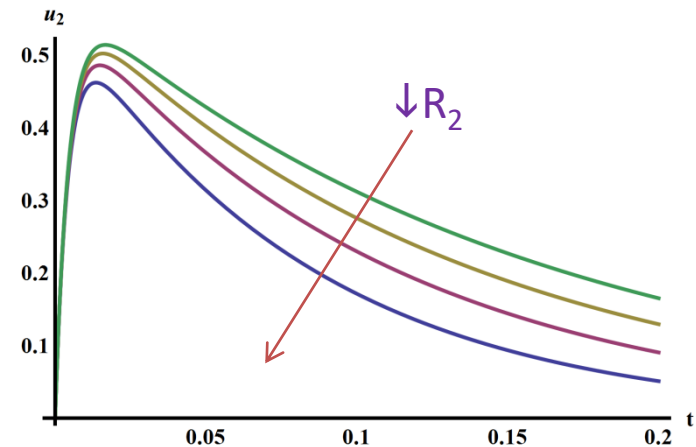
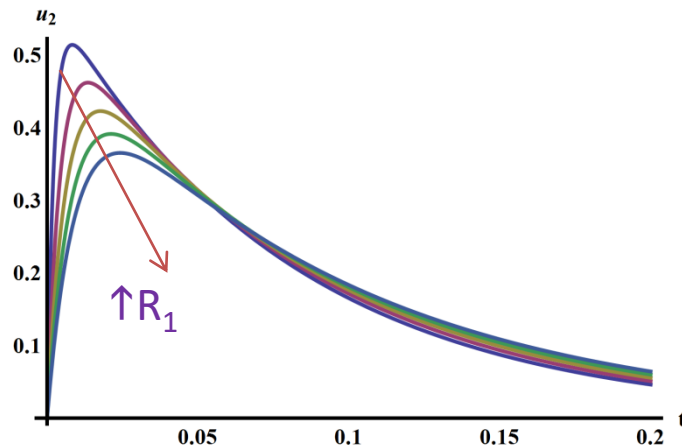
kde

$$k = \frac{C_1 R_2}{\sqrt{(C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2)^2 - 4 R_1 R_2 C_1 C_2}}$$

$$\alpha_{1,2} = \frac{C_1 R_1 - C_1 R_2 - C_2 R_2 \pm \sqrt{(C_1 R_1 + C_1 R_2 + C_2 R_2)^2 - 4 R_1 R_2 C_1 C_2}}{2 R_1 R_2 C_1 C_2}$$

Rázový generátor

- Vliv parametrů RG na tvar výsledného impulzu



Rázový generátor

- Účinnost RG (voltage efficiency)

Účinnost rázového generátoru můžeme stanovit ze vztahu:

$$\eta = \frac{U_p}{U_c} < 1$$

kde U_p je vrcholová hodnota (peak value) impulzu a U_c je nabíjecí napětí (charging voltage)

Pro vrcholovou hodnotu U_p platí:

$$U_p = u_2(t_{max})$$

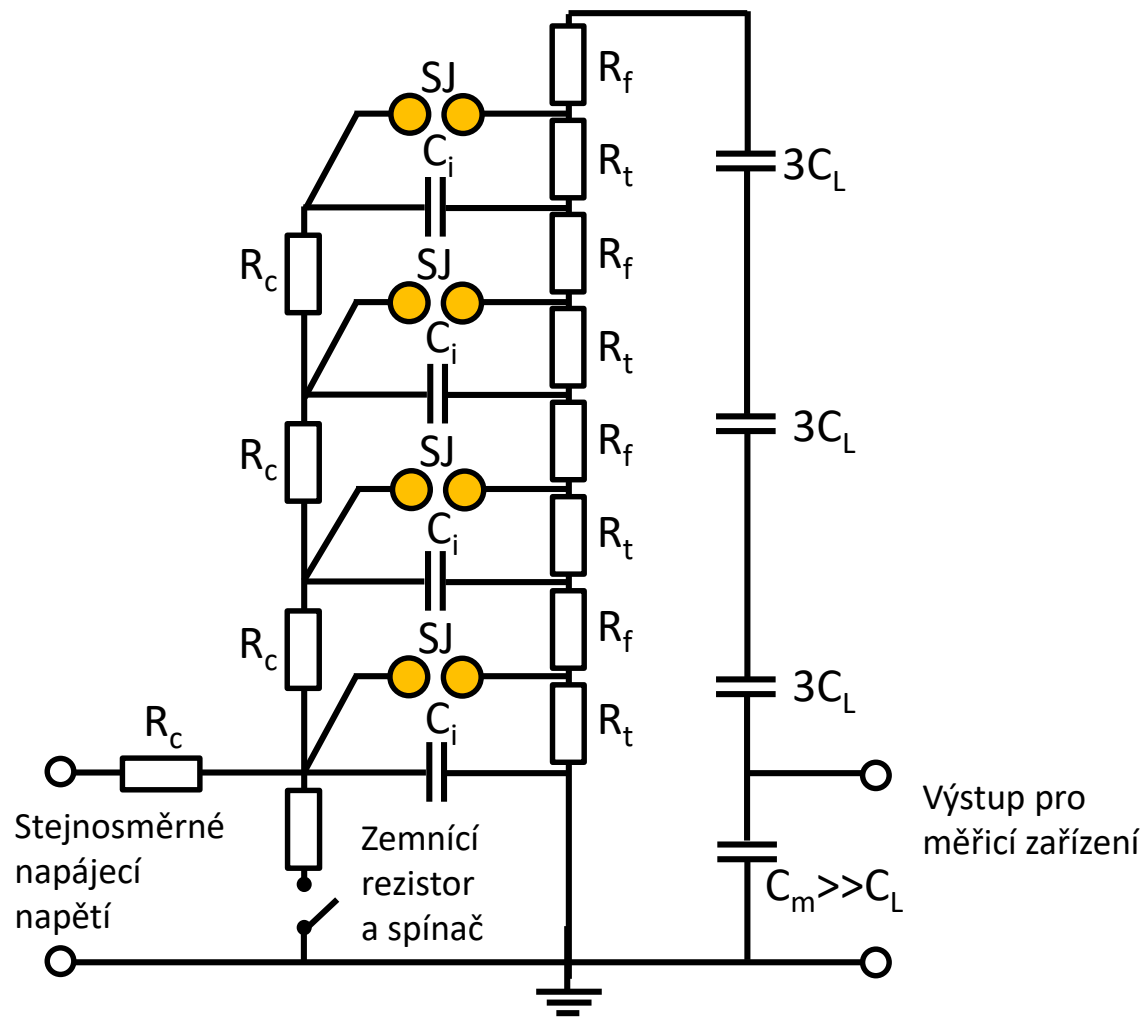
kde t_{max} nalezneme z podmínky (condition)

$$\frac{du_2}{dt} = 0$$

pak $t_{max} = \frac{\ln\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2}\right)}{\alpha_2 - \alpha_1}$ a dosazením do výrazu pro u_2 a vztahu pro účinnost

$$\eta = k \left(\left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_1}{\alpha_2 - \alpha_1}} - \left(\frac{\alpha_1}{\alpha_2} \right)^{\frac{\alpha_2}{\alpha_2 - \alpha_1}} \right)$$

Vícestupňový rázový generátor

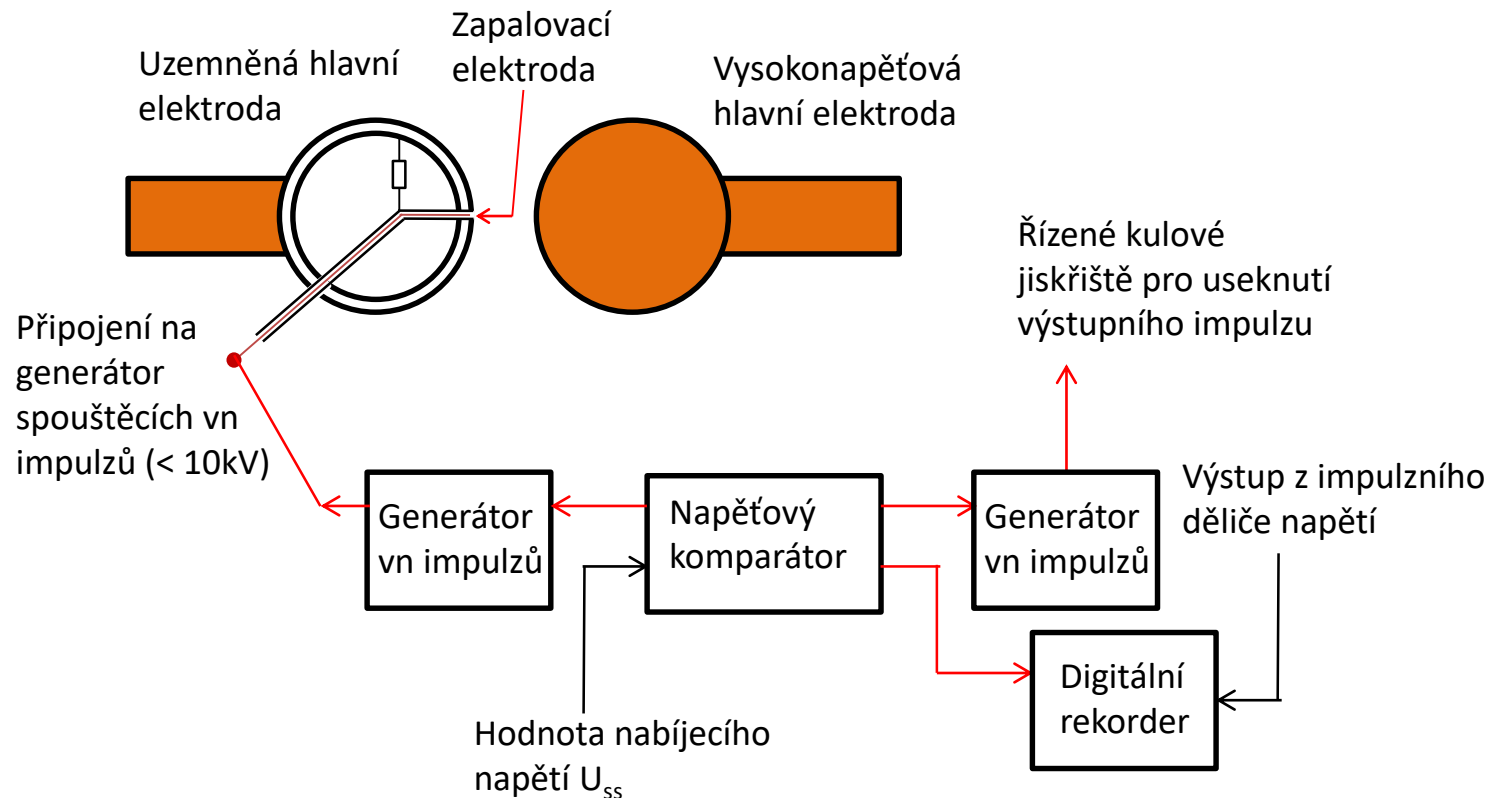


SGSA Impulsní generátor Haefely Hipotronics

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

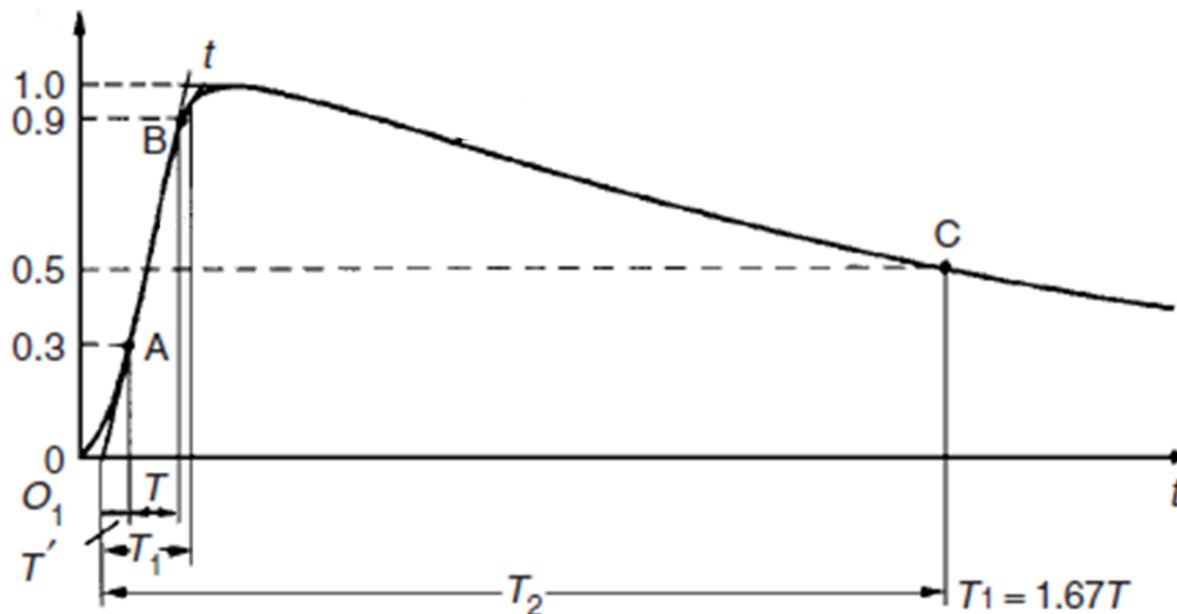
$$U_{imp} = n\eta U_0$$

Řízené spouštění impulzního generátoru (trigatron)



Rázový generátor

- Plný impulz (full impulse)
 - Atmosférický (lightning impulse)
 - $T_1 = 1,2 \mu s \pm 30 \%$, $T_2 = 50 \mu s \pm 20 \%$,
 - Spínací impulz (switching impulse)
 - $T_1 = 250 \mu s \pm 20 \%$, $T_2 = 2500 \mu s \pm 60 \%$



Rázový generátor

- Useknutý impulz (chopped impulse)

