

TECHNIKA VYSOKÝCH NAPĚTÍ

Zdroje vysokých napětí

Zkušebny a laboratoře vysokých napětí

- 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 atraktivní) s nejčastějšími jmenovitými napětími ± 800 kV

Napětové namáhání (voltage stress)

- Provozní napětí (*operating voltage*) vážně nenamáhá izolační systém (*insulation system*), nicméně určuje jeho rozměry (*dimensions*)
- Napětové 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 napětovému namáhání bude systém vystaven
 - Jaká bude odezva systému (*system response*) při působení takového namáhání

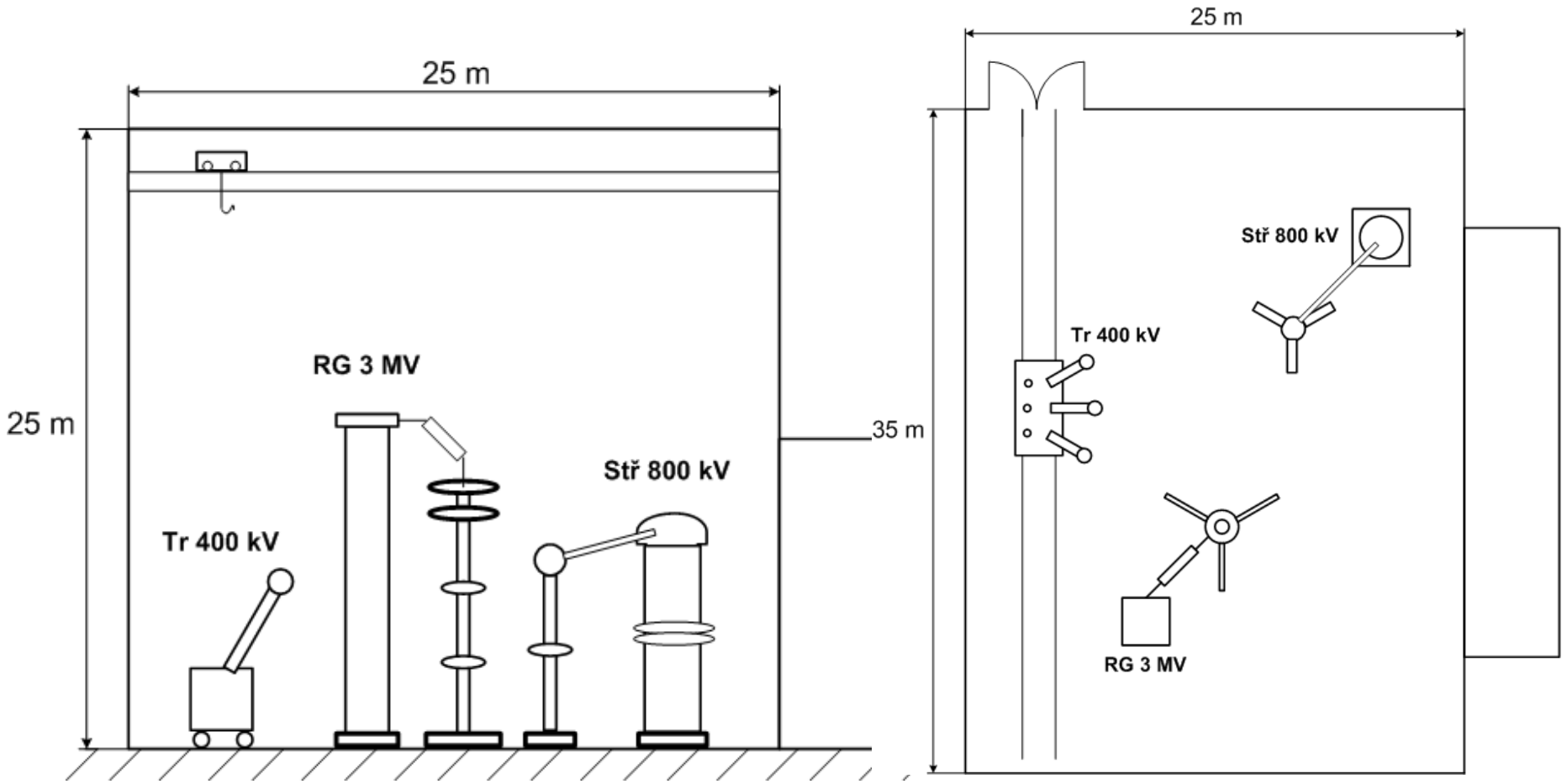
Napěťové zkoušky

- 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

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

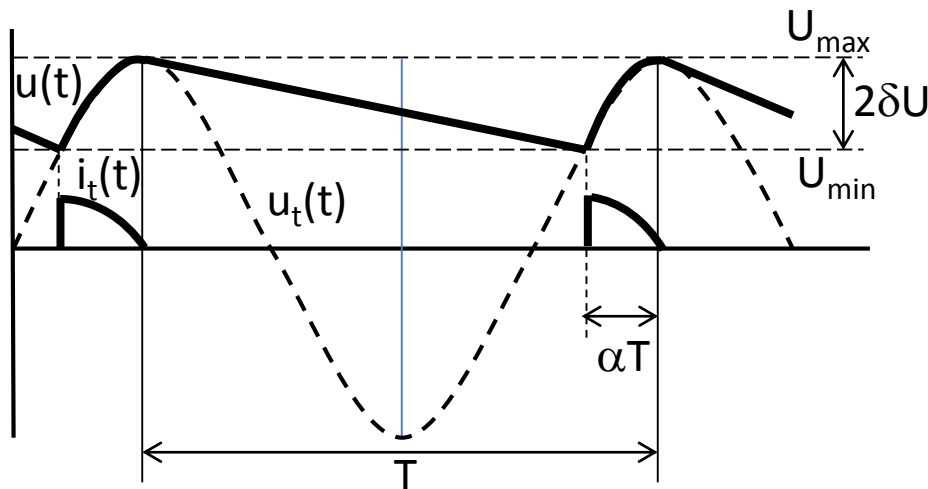
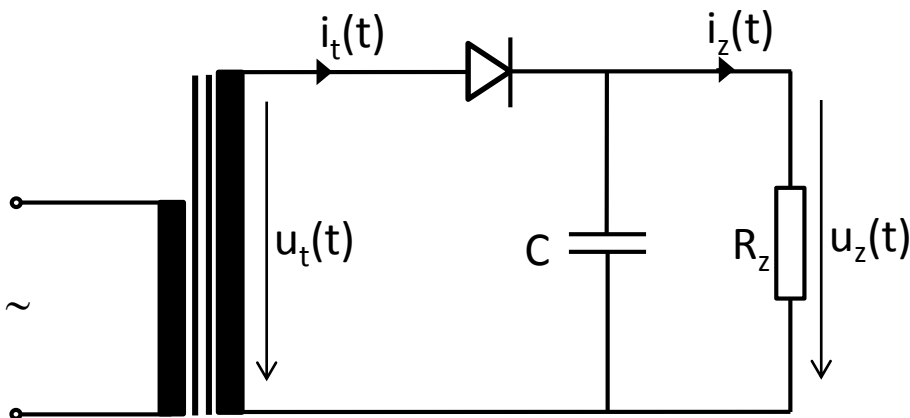


Zdroje vysokých napětí (high voltage generators)

- Zdroje vysokých napětí se používají jak ve zkušebnách tak v celé řadě dalších aplikací
- Základní dělení (*classification*)
 - Zdroje stejnosměrného napětí
 - Zdroje střídavého napětí
 - Zdroje impulzní (tranzientní)

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

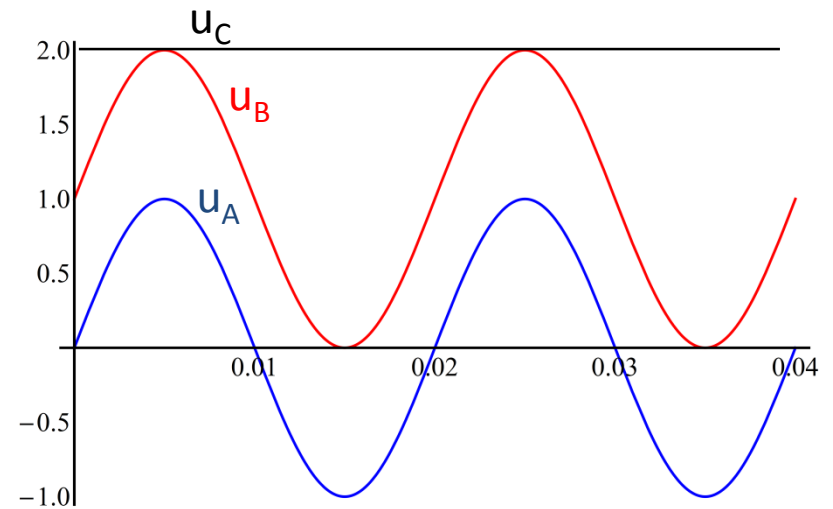
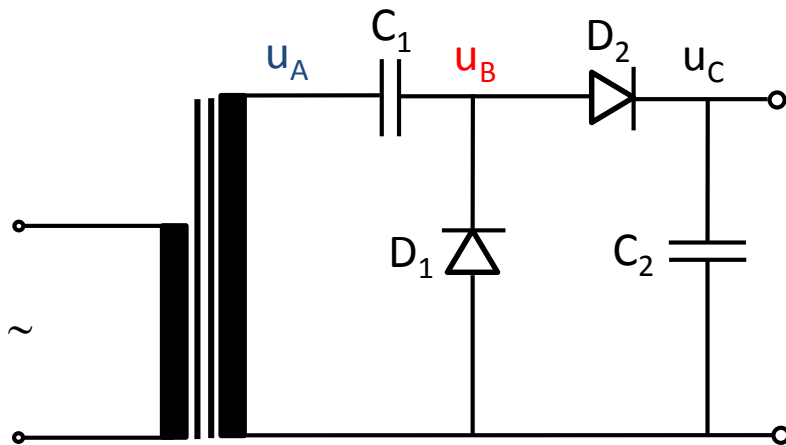
$$Q = \int_{\alpha T} i_t(t) dt = \int_T i_z(t) dt$$

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

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

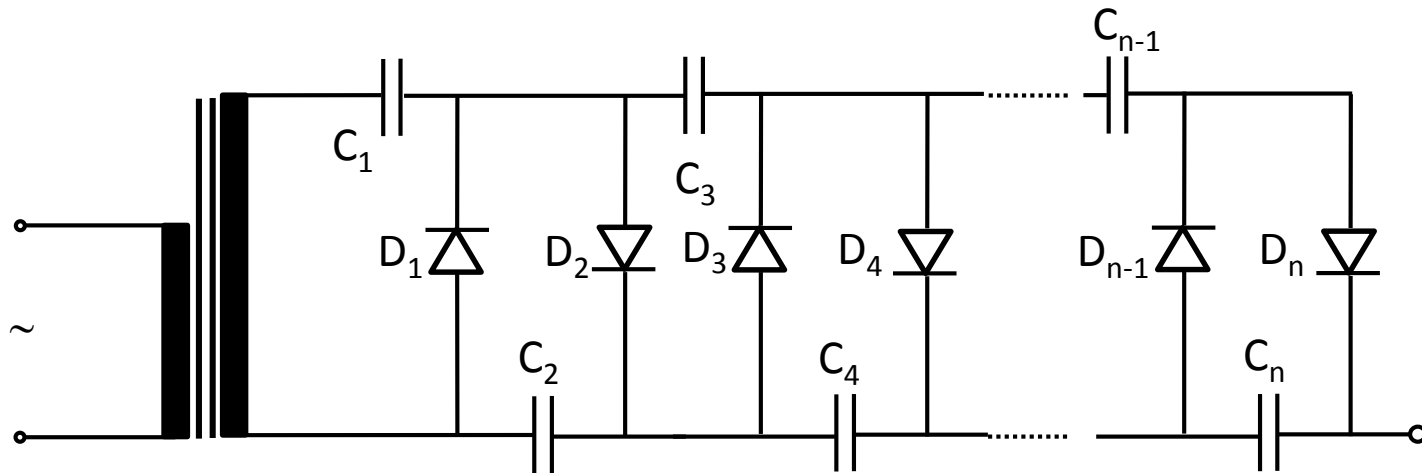
Zdroje stejnosměrného napětí

- Napěťový násobič (*Greinacher doubler*)



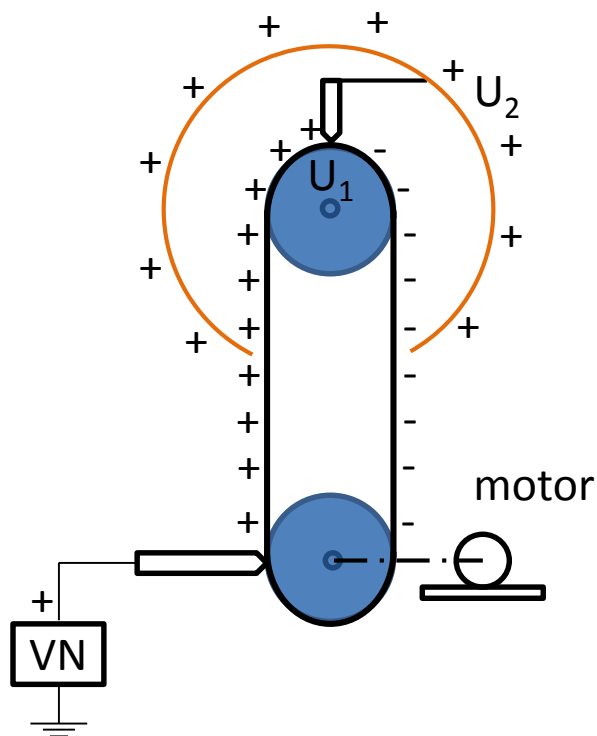
Zdroje stejnosměrného napětí

- Napěťový násobič Cockcroft-Walton (*voltage multiplier*)



Zdroje stejnosměrného napětí

- Elektrostatické generátory - Van de Graaffův generátor



- Lze dosáhnout extrémních hodnot stejnosměrného napětí (až 8MV)
- 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

Zdroje střídavého napětí

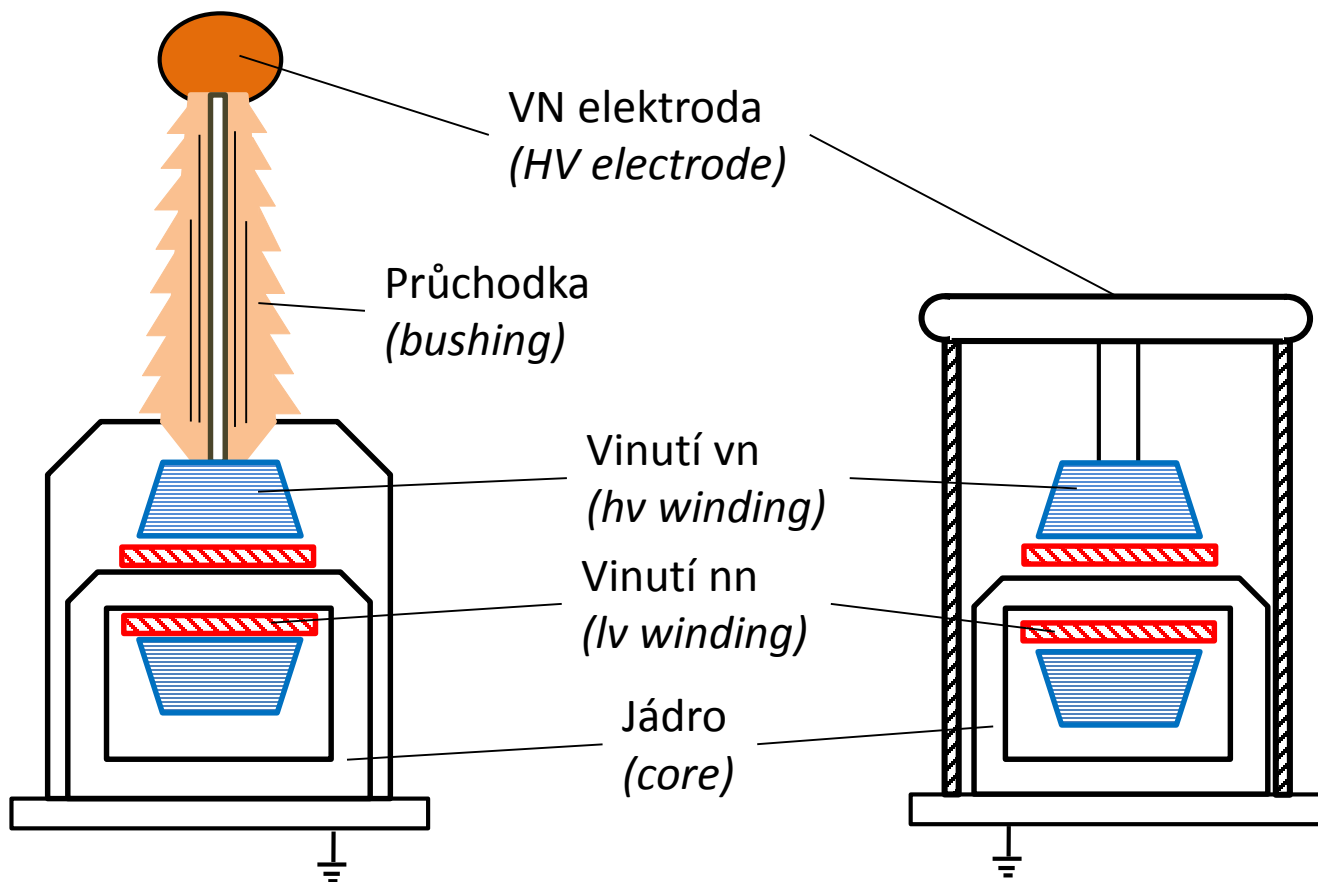
- Zkušební zdroje jsou obvykle jednofázové (*usually single phase*)
- Tvar musí pokud možno odpovídat čisté sinusovce (*pure sinusoidal*)
- Poměr mezi vrcholovou a efektivní hodnotou (*peak and rms value*) napětí musí být $\sqrt{2} \pm 5\%$
- Při testování vysokonapěťové izolace je zátěž (*load*) vždy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

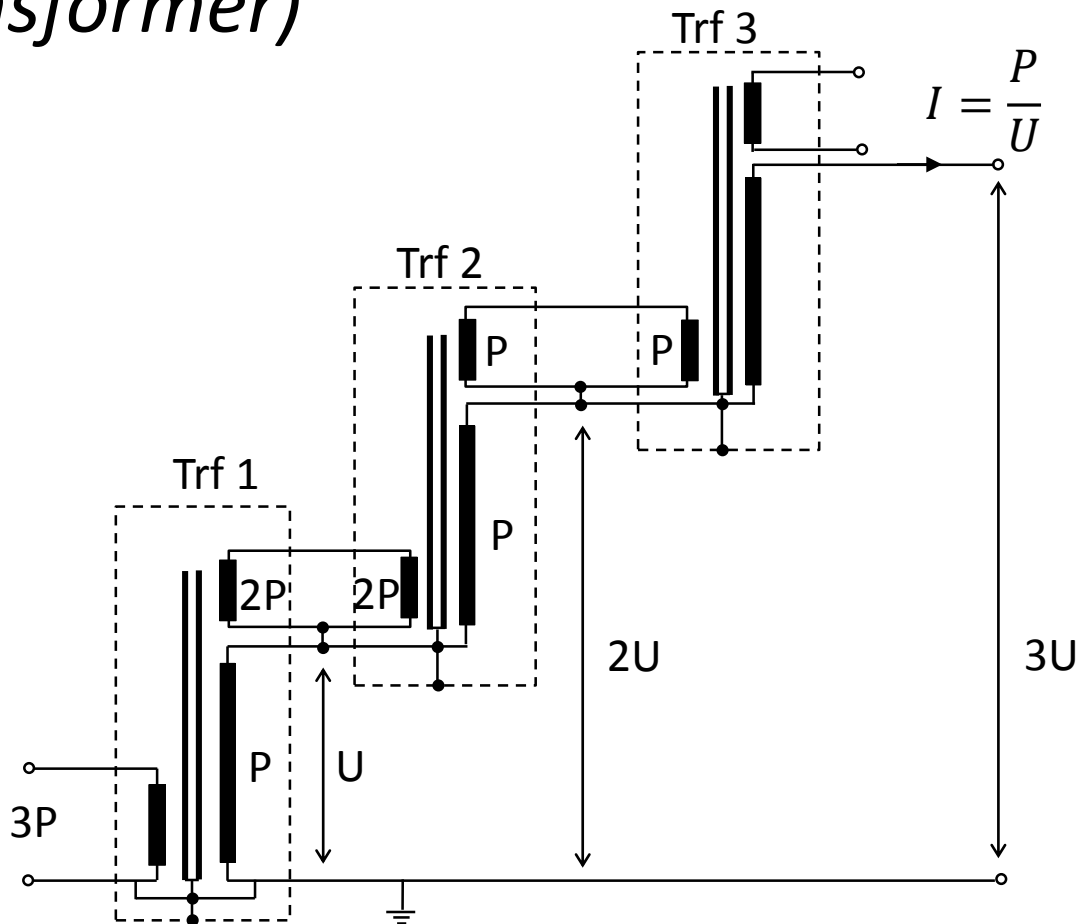
Zdroje střídavého napětí

- Zkušební transformátor (*testing transformers*)



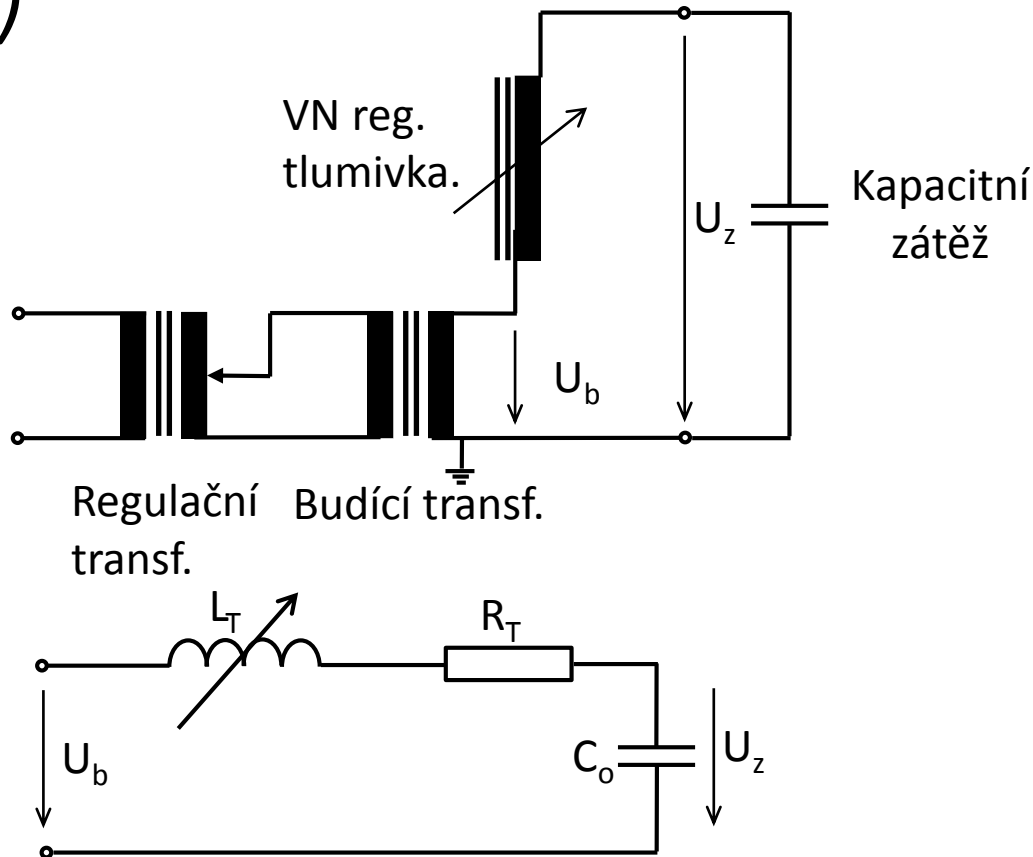
Zdroje střídavého napětí

- Transformátorová kaskáda (*cascaded transformer*)



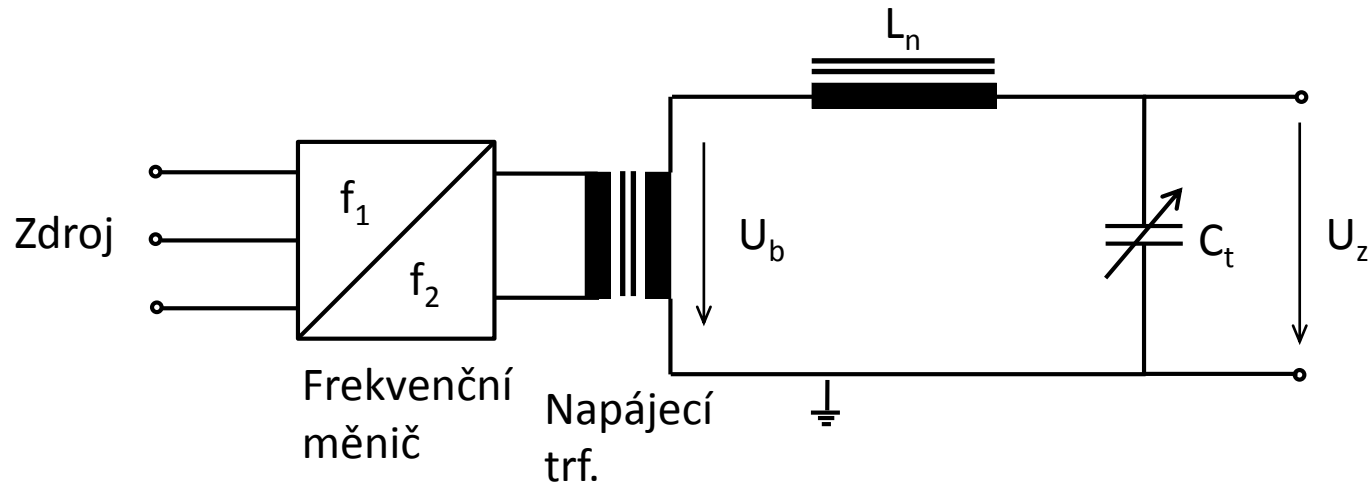
Zdroje střídavého napětí

- Seriové rezonanční obvody (*series resonant circuits*)



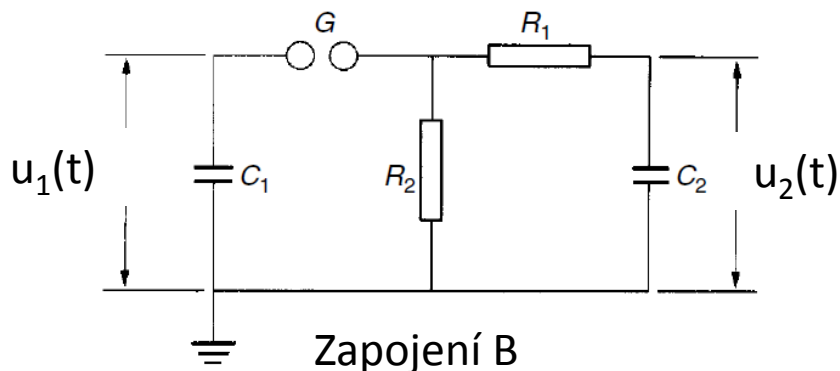
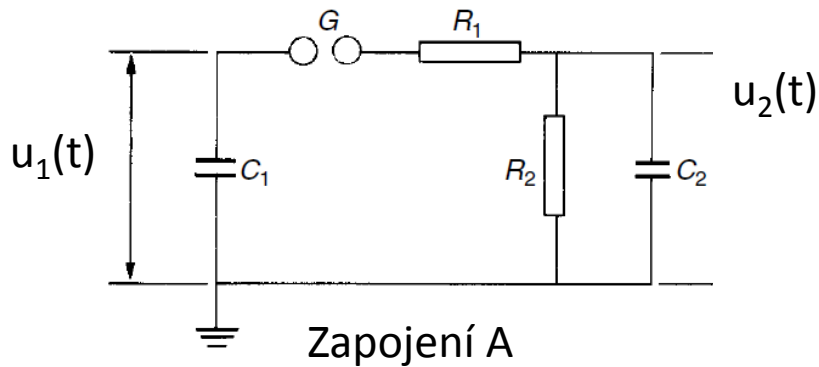
Zdroje střídavého napětí

- Rezonanční obvody s proměnnou frekvencí
(resonant circuits with variable test frequency)



Zdroje implulzních 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:

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

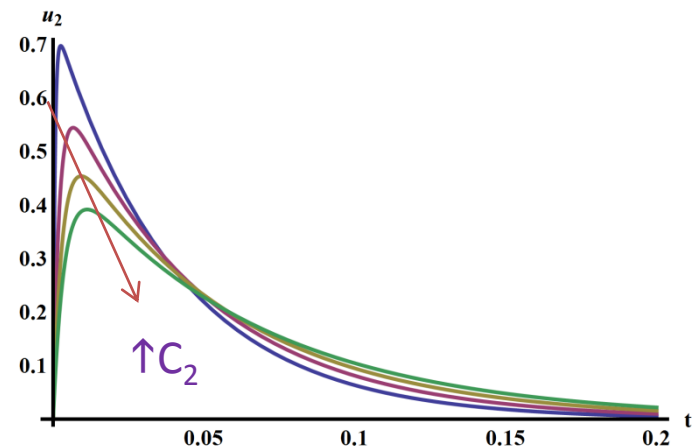
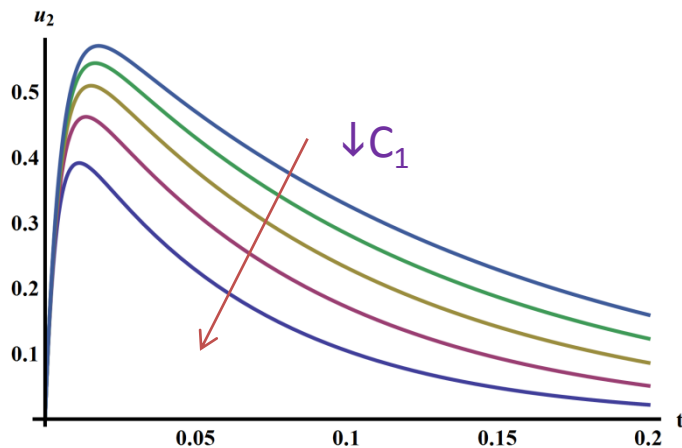
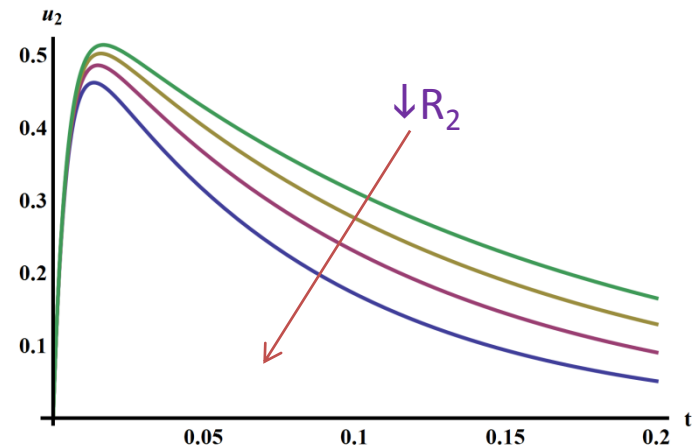
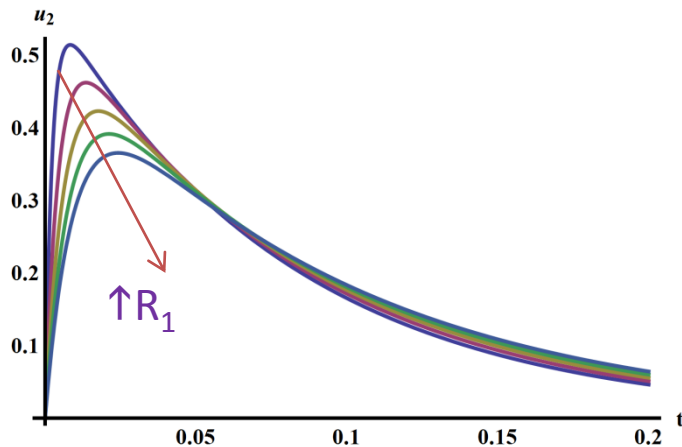
kde

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

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

Zdroje implulzních napětí

- Vliv parametrů RG na tvar výsledného impulzu



Zdroje implulzních napětí

- 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*)

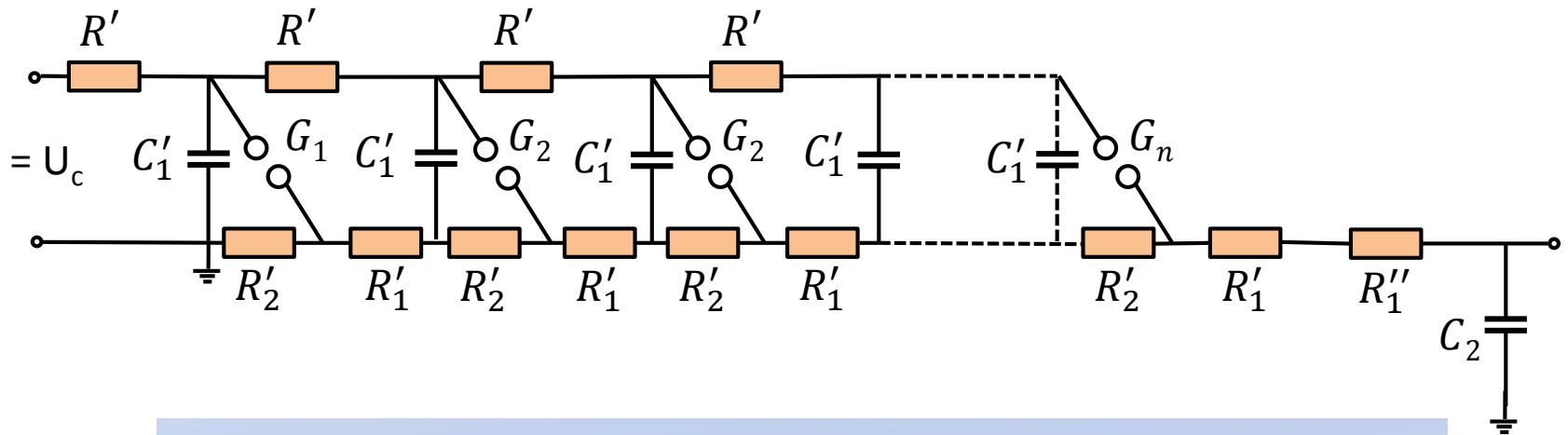
$$\frac{du_2}{dt} = 0$$

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

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

Zdroje impulzních napětí

- Vícestupňový RG (*multi-stage impulse generator*) – Marxovo zapojení

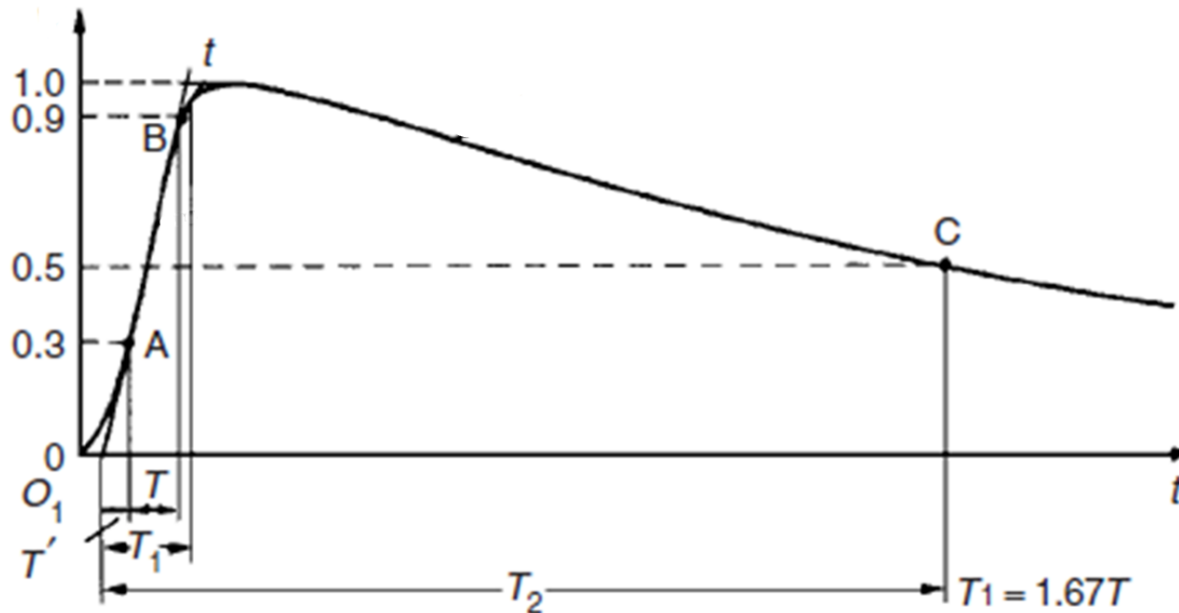


Celkové parametry RG lze vyjádřit jako:

$$\frac{1}{C_1} = \sum_n \frac{1}{C'_1}, R_1 = R'_1 + \sum_n R'_1, R_2 = \sum_n R'_2$$

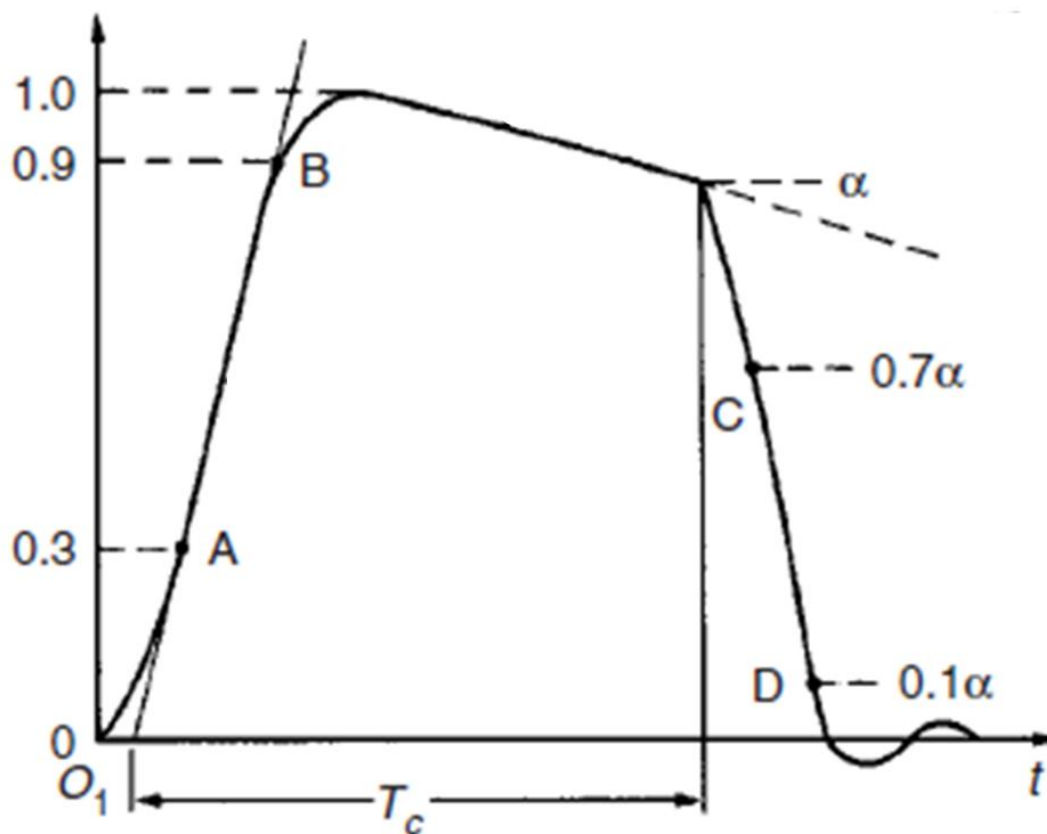
Zdroje implulzních napětí

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



Zdroje impulzních napětí

- Useknutý impulz (*chopped impulse*)



Návrh rázového generátoru

- Návrh parametrů RG (Angelini)

- pro všechna zapojení RG lze výstupní napětí vyjádřit vzorcem

$$\eta u = \frac{\alpha U_c}{\sqrt{\alpha^2 - 1}} \left[e^{\frac{-(\alpha - \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} - e^{\frac{-(\alpha + \sqrt{\alpha^2 - 1})t}{\Theta}} \right]$$

- Konstanty α , η , Θ pro zapojení RG A a B jsou uvedeny v tabulce

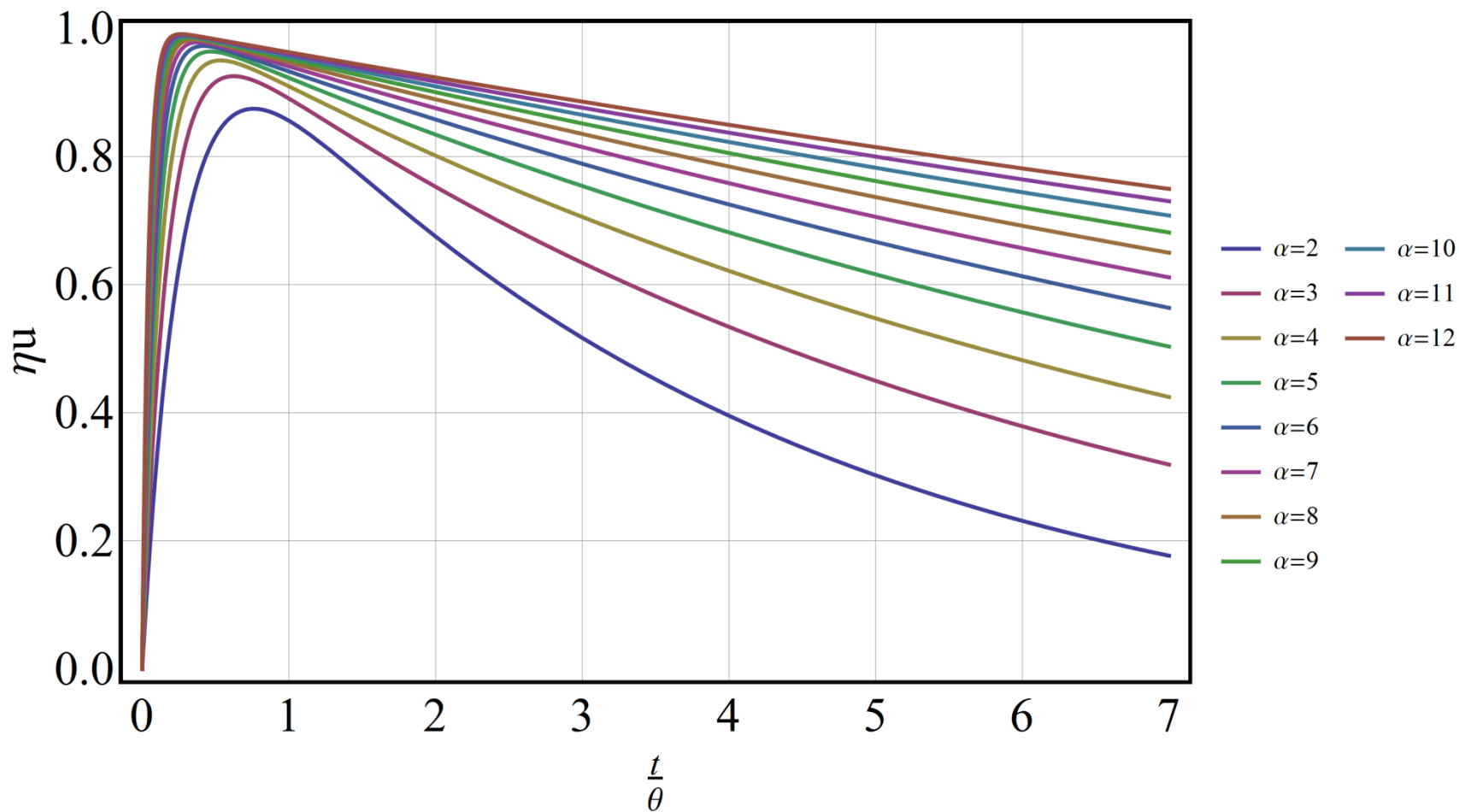
Zapojení	$\alpha =$	$\eta =$	$\Theta =$
A	$\frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}$	$1 + \frac{C_2}{C_1} + \frac{R_1}{R_2}$	$\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}$
B	$\frac{\eta}{2} \sqrt{\frac{R_2 C_1}{R_1 C_2}}$	$1 + \frac{C_2}{C_1} \left(1 + \frac{R_1}{R_2} \right)$	$\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}$

Návrh rázového generátoru

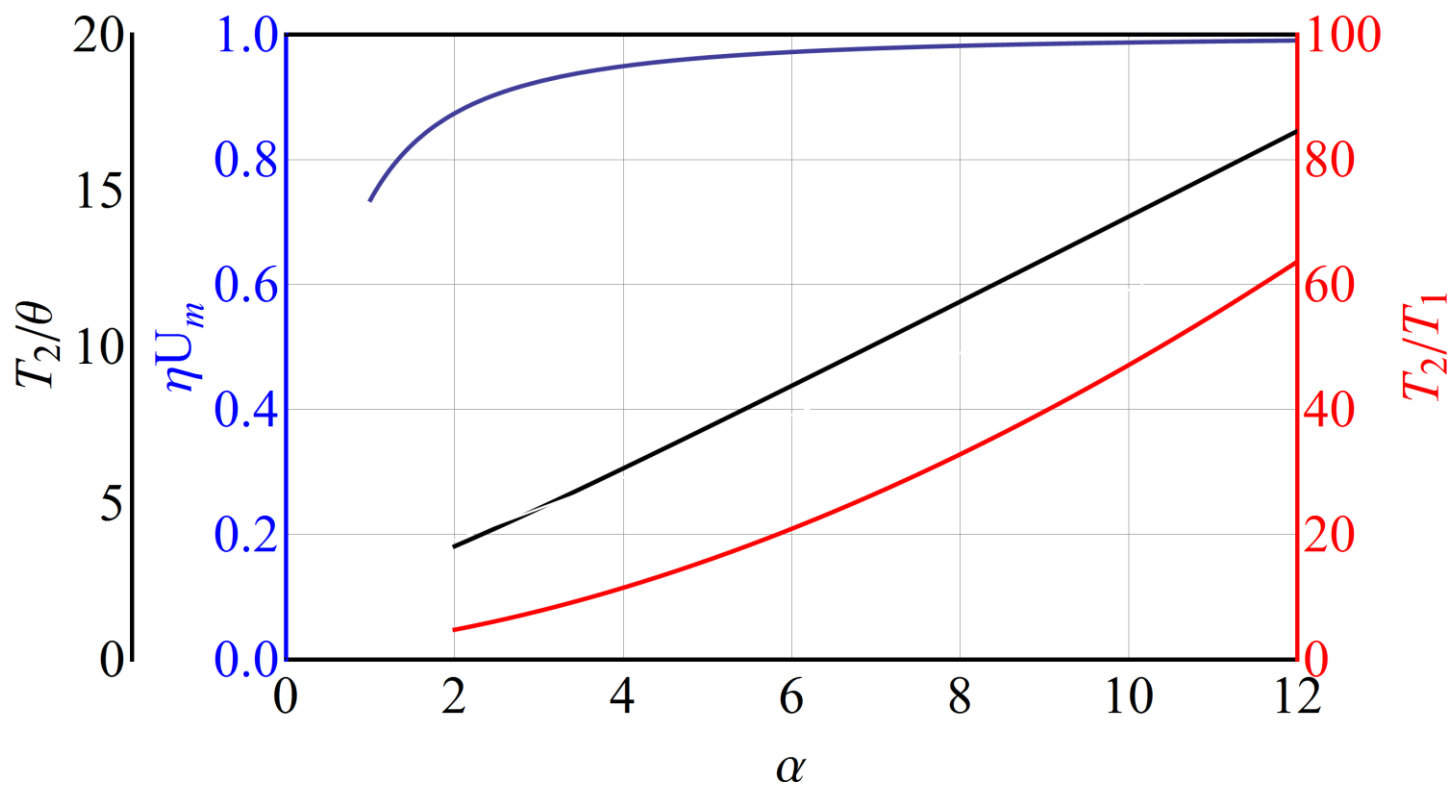
– vztahy pro stanovení konstant RG

Zapojení	$X=$	$R_1=$	$R_2=$
A	$\frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_1}{C_2} \right)$	$\frac{\alpha\Theta}{C_1} (1 - \sqrt{1 - X})$	$\frac{\alpha\Theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1 - X})$
B	$\frac{1}{\alpha^2} \left(1 + \frac{C_2}{C_1} \right)$	$\frac{\alpha\Theta}{C_2} (1 - \sqrt{1 - X})$	$\frac{\alpha\Theta}{C_1 + C_2} (1 + \sqrt{1 - X})$

Návrh rázového generátoru



Návrh rázového generátoru



Návrh rázového generátoru

- Při návrhu RG většinou známe časový průběh (*waveform*) požadovaného impulzního napětí (doby T_1 a T_2) a hledáme parametry R_1 , R_2 , C_1 a C_2
- Zvolíme jednu dvojici parametrů a druhou dopočítáme pomocí předchozího grafu
- Numerický způsob
 - Při návrhu k výpočtu parametrů využijeme numerických metod (*numerical methods*) řešení soustavy rovnic (*system of equations*) (viz nb v software Mathematica)