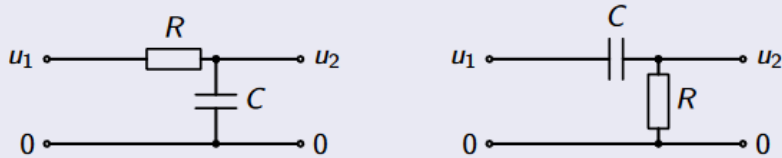


Přechodové jevy na RC, RL, RLC a vedení

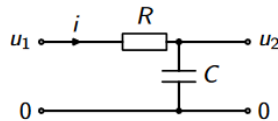
- Přechodové jevy na RC článku

- Přechodový jev = přechod z jednoho ustáleného stavu do jiného
- Příklad: Nabíjení parazitní kapacity spojů mezi logickými členy při přechodu logic0 → logic1 (skoková změna napětí na vstupu).

RC články (integrační, derivační)



- Řešení nezátíženého RC článku:
 - změny v čase (Transient Analysis)
 - frekvenční charakteristika (AC Analysis) — bude později
- Rovnice a jejich řešení — integrační RC článek



Rovnice popisující obvod:

$$i(t) = C \frac{du_2(t)}{dt} \quad u_2(0) = 0$$

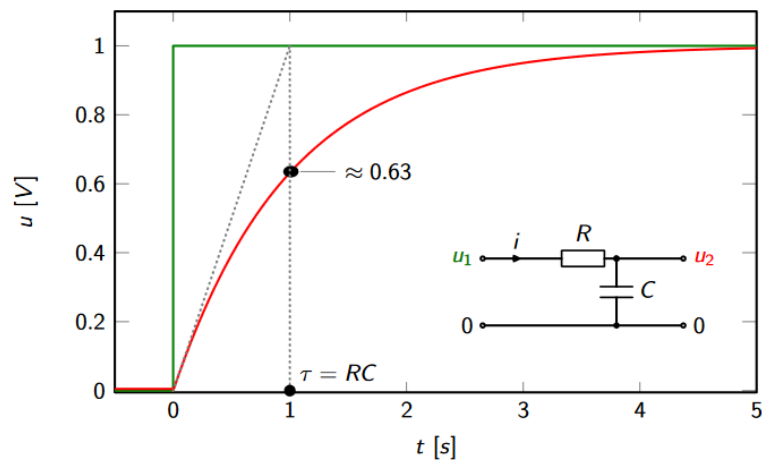
$$u_R(t) = R i(t)$$

$$u_1(t) = u_R(t) + u_2(t)$$

Řešení pro jednotkový skok ($u_1(t) = 1$ pro $t \geq 0$):

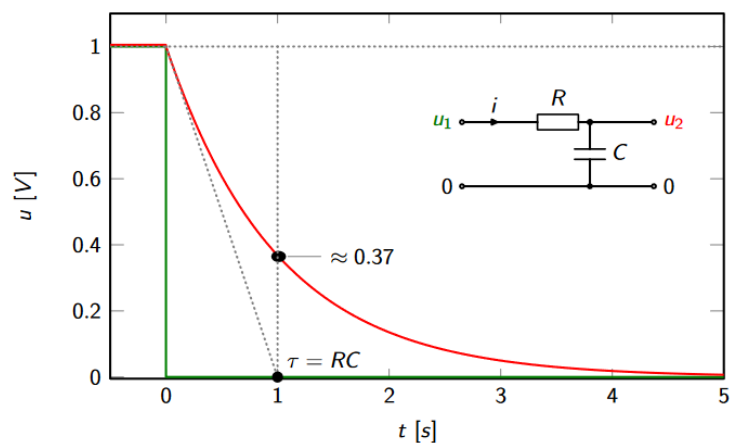
$$u_2(t) = u_1(1 - e^{-\frac{t}{RC}}) = 1 - e^{-\frac{t}{RC}}$$

Průběh napětí pro skok $0 \rightarrow 1$ ($R = 1\Omega$, $C = 1F$)

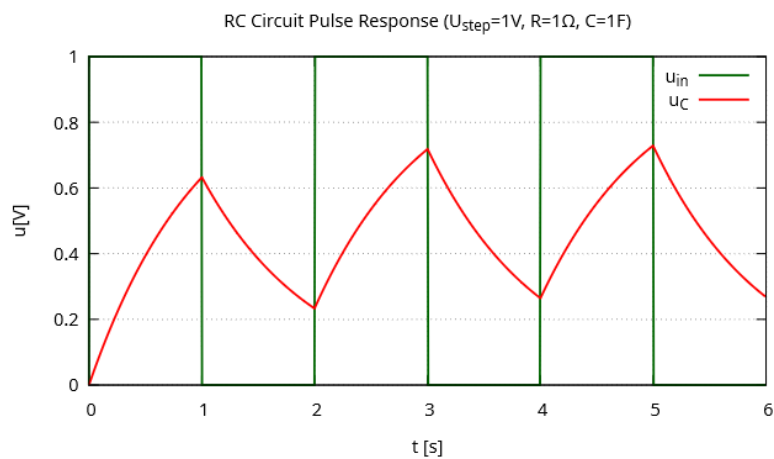


- Stejný obrázek pro všechny hodnoty (mění se jen stupnice)

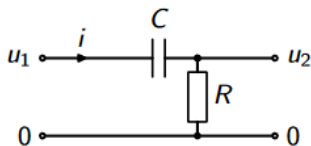
Průběh napětí pro skok $1 \rightarrow 0$ ($U_C(0) = 1V$)



Integrační RC článek — příklad



- Rovnice a jejich řešení – derivační RC článek



Rovnice:

$$i(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad u_C(0) = 0$$

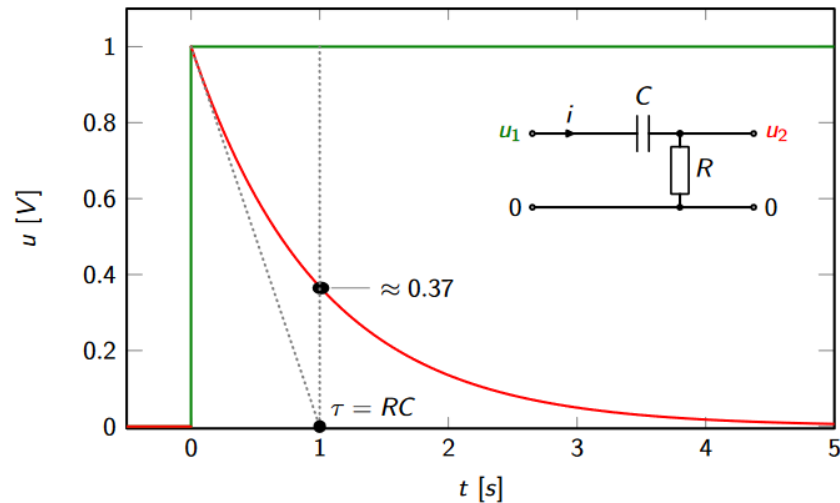
$$u_2(t) = Ri(t)$$

$$u_1(t) = u_C(t) + u_2(t)$$

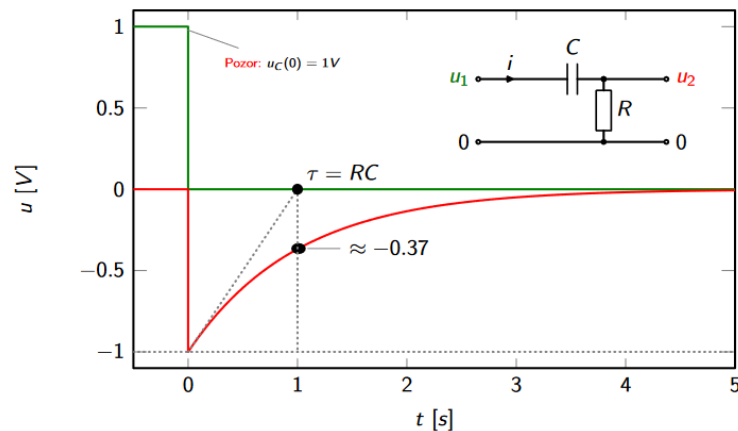
Řešení pro jednotkový skok ($u_1(t) = 1$ pro $t \geq 0$):

$$u_2(t) = u_1 e^{-\frac{t}{RC}} = e^{-\frac{t}{RC}}$$

Průběh napětí pro skok $0 \rightarrow 1$



Průběh napětí pro skok $1 \rightarrow 0$

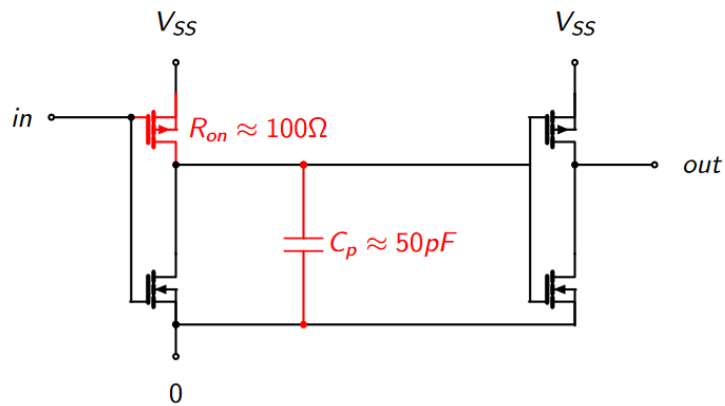


- Časová konstanta: $\tau = RC$
- Napětí na integračním RC článku v čase τ :
Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(\tau) = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} \approx 0.63V$
- Napětí na derivačním RC článku v čase τ :
Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(\tau) = e^{-1} \approx 0.37V$
- Napětí na derivačním RC článku v čase 5τ :
Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(5\tau) = e^{-5} \approx 0.007V$
- Příklady: viz simulace
- Test znalostí: RC článek zatížený odporem R_z

○ RC článek – shrnutí

- Časová konstanta: $\tau = RC$
- Napětí na integračním RC článku v čase τ :
 - Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(\tau) = 1 - e^{-1} = 1 - \frac{1}{e} \approx 0.63V$
- Napětí na derivačním RC článku v čase τ :
 - Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(\tau) = e^{-1} \approx 0.37V$
- Napětí na derivačním RC článku v čase 5τ :
 - Přechod $u_1 : 0 \rightarrow 1V$: $u_2(5\tau) = e^{-5} \approx 0.007V$
- Příklady: viz simulace
- Test znalostí: RC článek zatížený odporem R_z

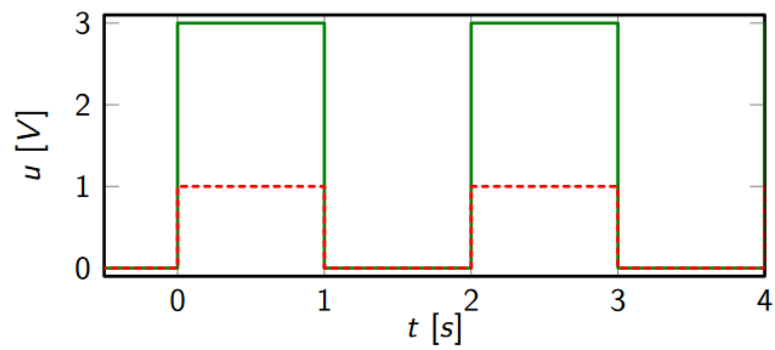
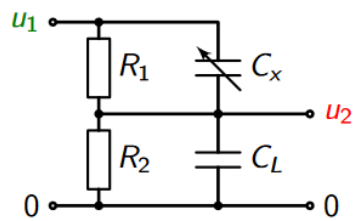
Příklad1: Zpoždění hradel CMOS



$$\tau = R_{on}C_p = 100 \cdot 50 \cdot 10^{-12} = 5 \cdot 10^{-9} = 5\text{ns}$$

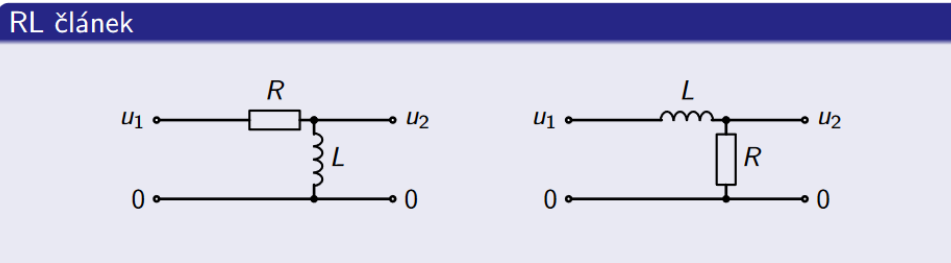
○

Příklad2: Kompenzovaný dělič napětí 1/3 (nastavení C_x)

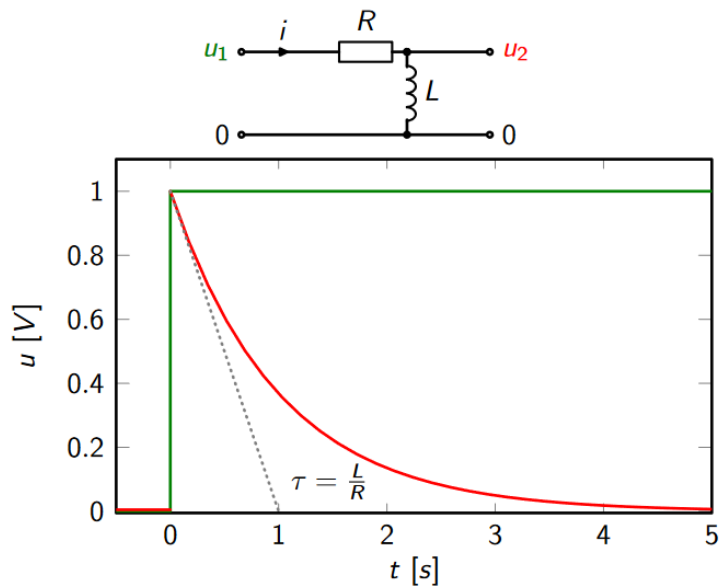


○

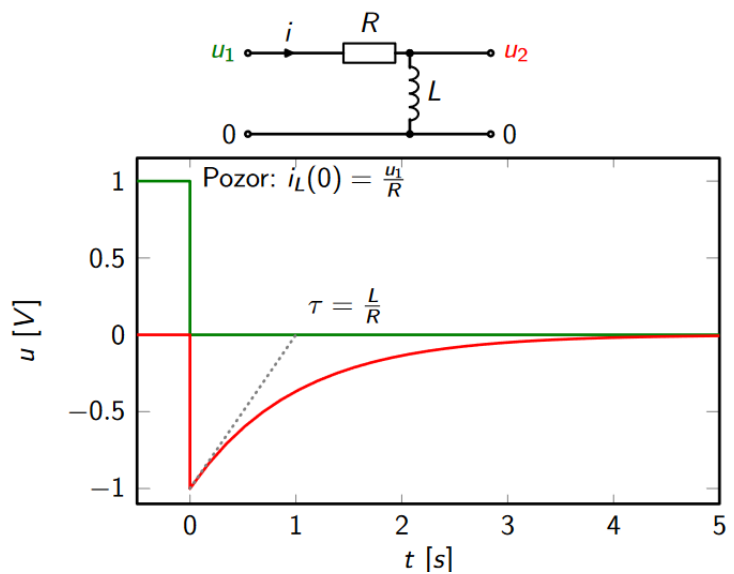
- Článek RL



Průběh napětí na RL pro skok $0 \rightarrow 1$ ($R = 1\Omega, L = 1H$)

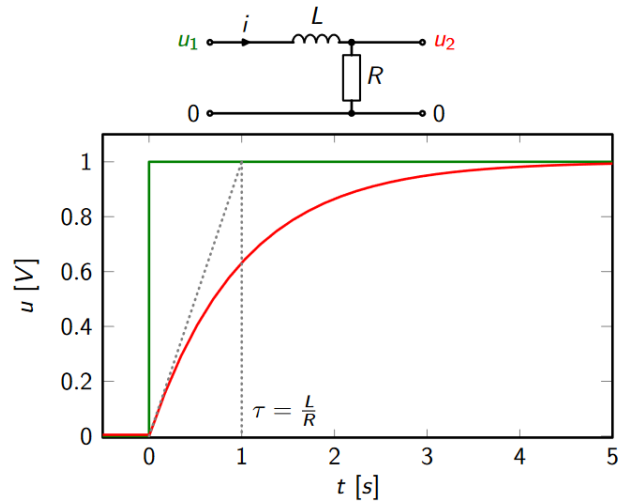


Průběh napětí na RL pro skok $1 \rightarrow 0$



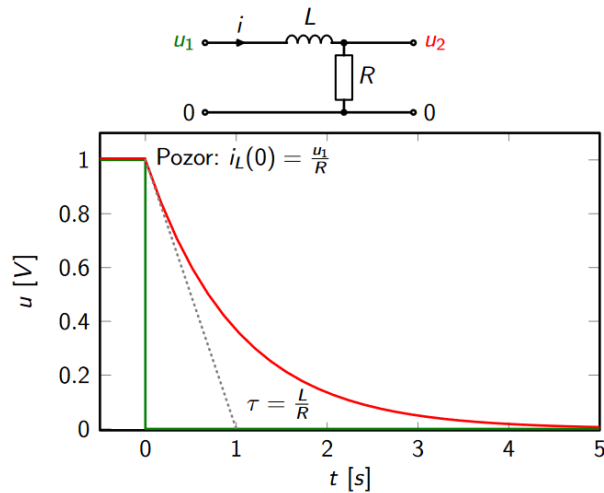
- Pozor při rozpojování obvodů s cívkou, snaží se udržet proud a tím způsobí že se snaží po odpojení vytvořit nekonečně velké napětí

Průběh napětí na RL pro skok 0 → 1



○

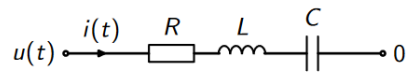
Průběh napětí na RL pro skok 1 → 0



○

- Nulový odpor (např. v supravodiči) způsobí že tam bude proud běžat do nekonečna (nekonečné tau)

- Sériový RLC obvod



Rovnice:

$$i_C(t) = C \frac{du_C(t)}{dt} \quad u_C(0) = 0 \quad (1)$$

$$u_L(t) = L \frac{di_L(t)}{dt} \quad i_L(0) = 0 \quad (2)$$

$$u_R(t) = R i_R(t) \quad (3)$$

$$u(t) = u_R(t) + u_L(t) + u_C(t) \quad (4)$$

$$i(t) = i_R(t) = i_L(t) = i_C(t) \quad (5)$$

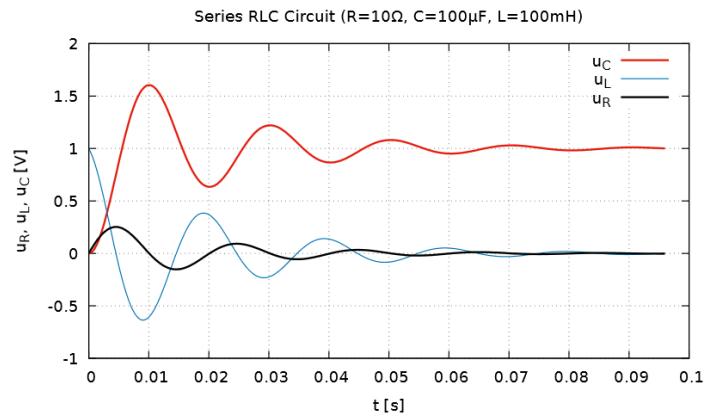
○

○ Řešení

- Jde o systém 2. řádu, existuje více možných tvarů řešení:
 - Bez tlumení ($R = 0$) — netlumené kmity
 - Malé tlumení — tlumené kmitání, ustálí se
 - Kritická mez tlumení — nepřekmitne, nejrychleji dosáhne rovnovážného stavu
 - Velké tlumení — nekmitá, ustálí se pomaleji
- Příklad:
- řešení pro jednotkový skok ($u(t) = 1$ pro $t \geq 0$, malé tlumení α):

- $i(t) = Be^{-\alpha t} \sin(\omega_d t + \varphi)$

Sériový RLC obvod — příklad (*underdamped*)

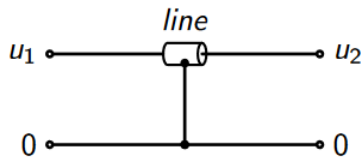


- Přechodové děje na RC, RL, RLC — shrnutí

- Použití RC článků: blokovací (decoupling, typicky 100nF, udržují stálé napětí v zdrojích, typicky jsou velmi blízko), vazební, časovací obvody.
- Příklady RC, RL, RLC: viz simulace
- Problém při velkých a rychlých změnách odběru (např. přepínání hradel) — na malém parazitním odporu a indukčnosti napájecích vodičů vzniká nezanedbatelné napětí. \Rightarrow Nutnost blokovat napájecí napětí velmi blízko u pouzder integrovaných obvodů — viz např. [Horowitz3/strana758].
- Přeslechy (crosstalk): Máme 2 vodiče s různými signály proti zemi a parazitní kapacitu C mezi vodiči = derivační RC článek. Vznikne problém při rychlých změnách signálu ve vedení1 a vysoké impedanci na koncích vedení2. (řešení: stínění nebo diferenciální signály.)

- **Vedení (Transmission line)**

- Vodiče pro přenos signálu
- Symetrické (dvojlinka) nebo asymetrické (koaxiální)
- Typické parametry vedení:
 - Délka (určuje útlum a zpoždění signálu)
 - Charakteristická impedance Z
 - L_m, C_m, R_m, G_m (vodivost mezi vodiči kabelu, budeme ji zanedbávat) na jednotku délky
- Příklady:
 - Televizní koaxiální kabel: $Z = 75\Omega$
 - TV dvojlinka: $Z = 300\Omega$
 - Ethernet kabel (Twisted Pair): $Z = 100\Omega$
 - Datové linky v HDMI kabelu: $Z = 100\Omega$
 - Některé spoje na deskách plošných spojů.
 - ...
- Nejjednodušší model vedení

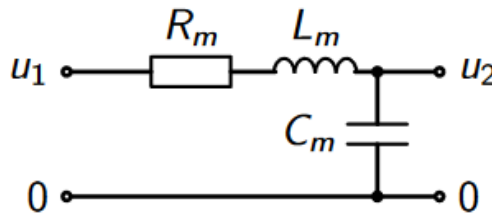


- Parametr: délka vedení l
- Zpoždění je dané délkou vedení a rychlostí světla c
- Ideální přenos signálu:

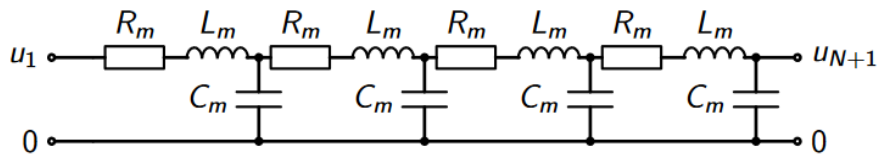
$$u_2(t) = u_1\left(t - \frac{l}{c}\right)$$

- Reálná vedení signál zeslabí (útlum, attenuation) a mají větší zpoždění
- Model reálného vedení

- Aproximace vedení RLC segmenty (G_m zanedbáme):

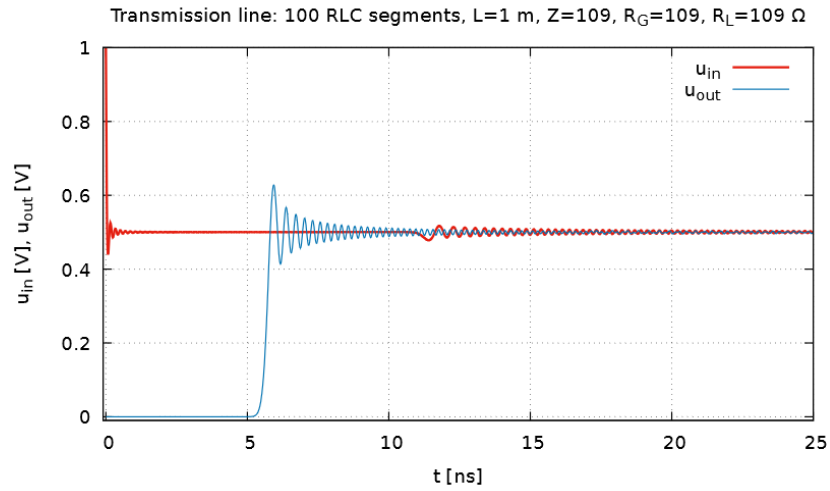


- Vedení: N segmentů za sebou (pro $N=4$):

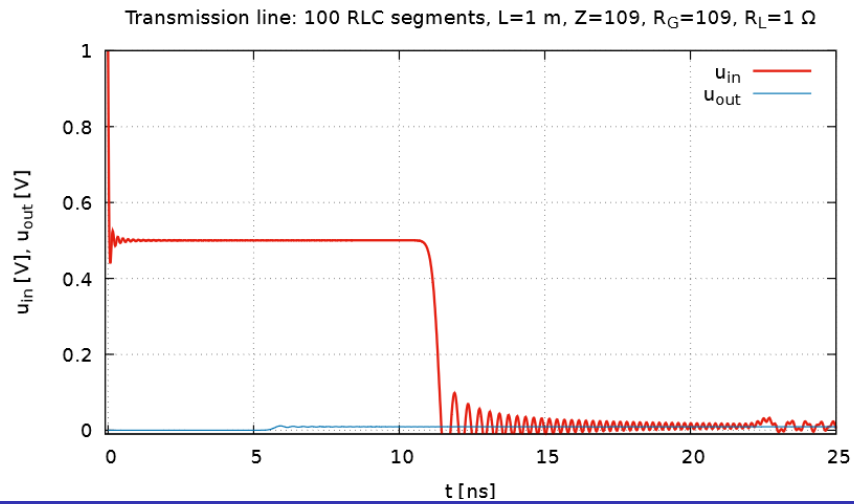


- Přesnost aproximace závisí na počtu segmentů
- řešení závisí na parametrech vedení, impedanci zdroje (R_G) a impedanci zátěže (R_L) — viz následující příklady.
- Signál se ve vedení odrazí, dá se tomu zabránit použitím rezistoru o stejné hodnoty jako impedance vedení a ten se tváří jako zbytek nekonečného vedení

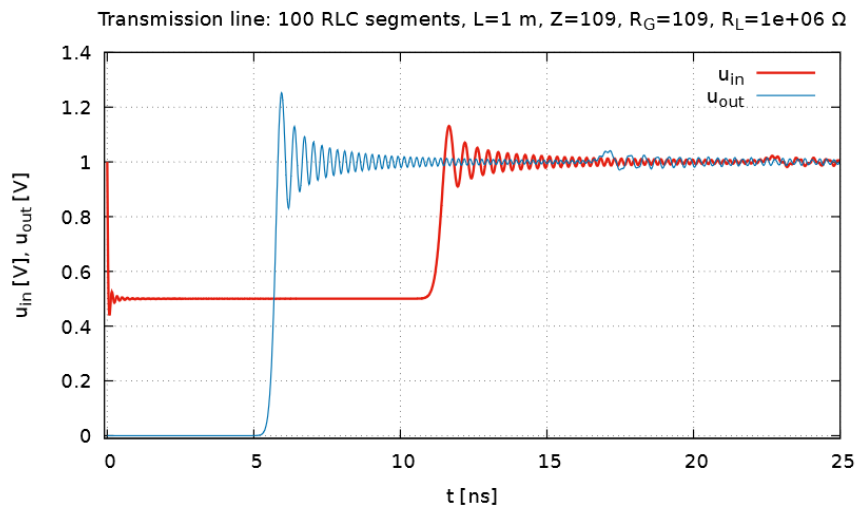
Numerické řešení pro jednotkový skok — přizpůsobeno



Řešení pro jednotkový skok — zkrat

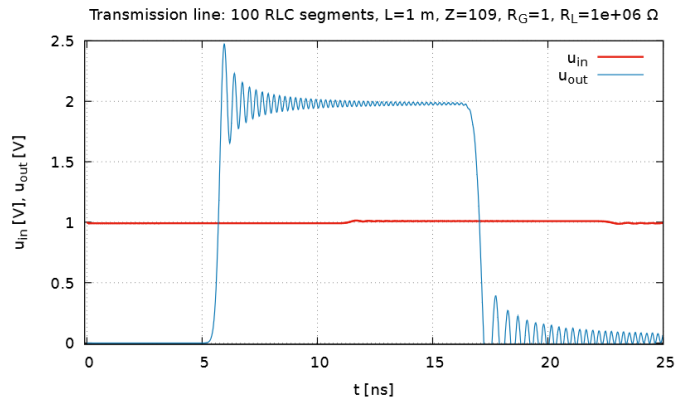


Řešení pro jednotkový skok — rozpojeno



- Musí se impedance zdroje přizpůsobit impedanci vedení (v signálových vedeních, v elektrické síti se snažíme odpor snížit co nejvíc), když se nepřizpůsobí:

Řešení pro jednotkový skok — tvrdý zdroj, rozpojeno



- - Charakteristická impedance bezeztrátového ($R_m = 0$) vedení:
 - $Z = \sqrt{\frac{L_m}{C_m}}$
 - Vliv impedance zdroje signálu a zátěže (viz příklady):
 - Zdroj signálu:
 - $R_g = Z$ (impedančně přizpůsobeno = bez odrazů)
 - $R_g \neq Z$ (odrazy na začátku vedení)
 - Zakončení:
 - $R_z = \infty$ (naprázdno, odraz na konci)
 - $R_z = Z$ (impedančně přizpůsobeno = bez odrazů)
 - $R_z = 0$ (nakrátko, odraz na konci)
 - Aplikace: zpoždění, generování impulsu, hledání místa přerušení, ...