



Vhodno-izhodne naprave (VIN)

Predavanja

5.,6. Električne povezave in odboji

Robert Rozman

rozman@fri.uni-lj.si

Vsebina

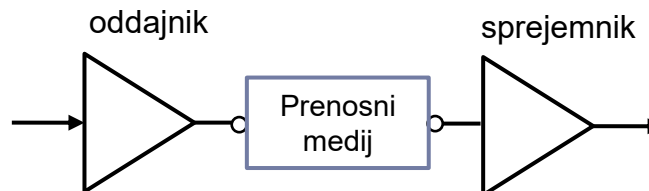
1. Prenosni mediji in lastnosti
2. Električna povezava - Asimetrični in simetrični prenos
3. Model linije, karakteristična impedanca (Z_0)
4. Odboji (ang. Reflection)
 1. Analiza odbojev
 2. Vpliv časa vzpona signala t_r na odboje
 3. Omejitev odbojev

Vir:

- AN-807 Reflections: Computations and Waveforms
https://www.ti.com/lit/an/snla027b/snla027b.pdf?ts=1616002929270&ref_url=https%253A%252F%252Fwww.google.com%252F

5.1 Uvod

Prenosni medij



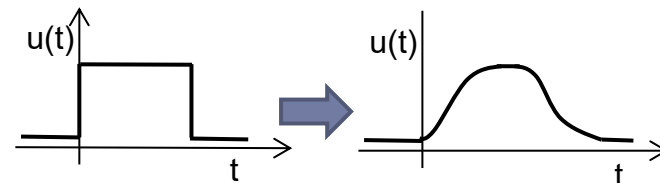
- Oddajnik zagotavlja vhodni signal, sprejemnik pa sprejme izhodni signal

Ponovitev :

- **Slabljenje signala – A [dB]** (angl. Attenuation)
 - nanaša se na **zmanjšanje moči signala pri prenosu**.
- **Pasovna širina – B [Hz]** (angl. Bandwith)
 - je v računalništvu in računalniških komunikacijah **količina podatkov, ki se lahko prenesejo v določenem času**.
- **Šum** (angl. Noise)
 - označuje **motilne vplive**, ki se pojavijo na prenosnem mediju oz. je **neželen, dodan električni signal**, ki poslabša kvaliteto signala.

Dodatne lastnosti :

- **Popačenje** (angl. Distortion)
 - na **obliko signala** vplivajo: slabljenje (A), pasovna širina (B), šum (N)
 - In časovna disperzija (razpršitev zaradi različnih zakasnitev glede na frekvenco)
 - največja **frekvenca f_{max}** , ki jo je pri prenosu še smiselno upoštevati je
$$f_{max} = \frac{0,5}{t_r} \left[\frac{1}{s} \right],$$
 kjer je t_r čas vzpona signala (ang. rise time)
- **Karakteristična impedanca - Z_0 [Ω]** (angl. Characteristic Impedance)
- **Zakasnitev - δ [ns/m]** (angl. Delay)

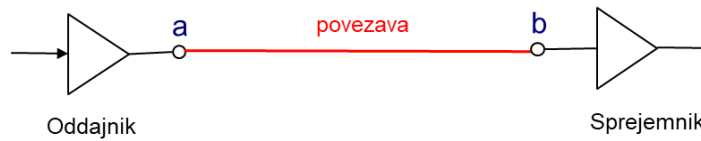


5.2 Električna povezava

u_v napetost vira (angl. u_v)
 u_b napetost breme (angl. u_L)

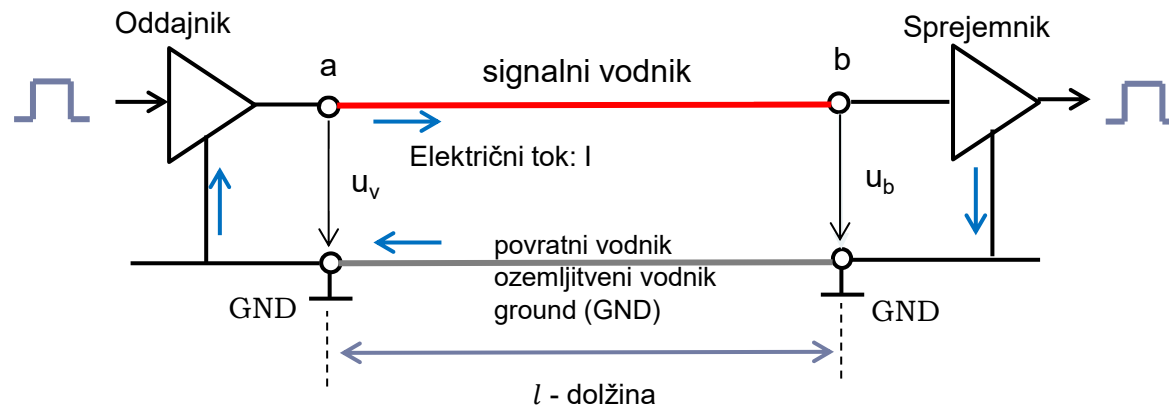
□ Digitalna vezja

- **Logična predstavitev** električne povezave.



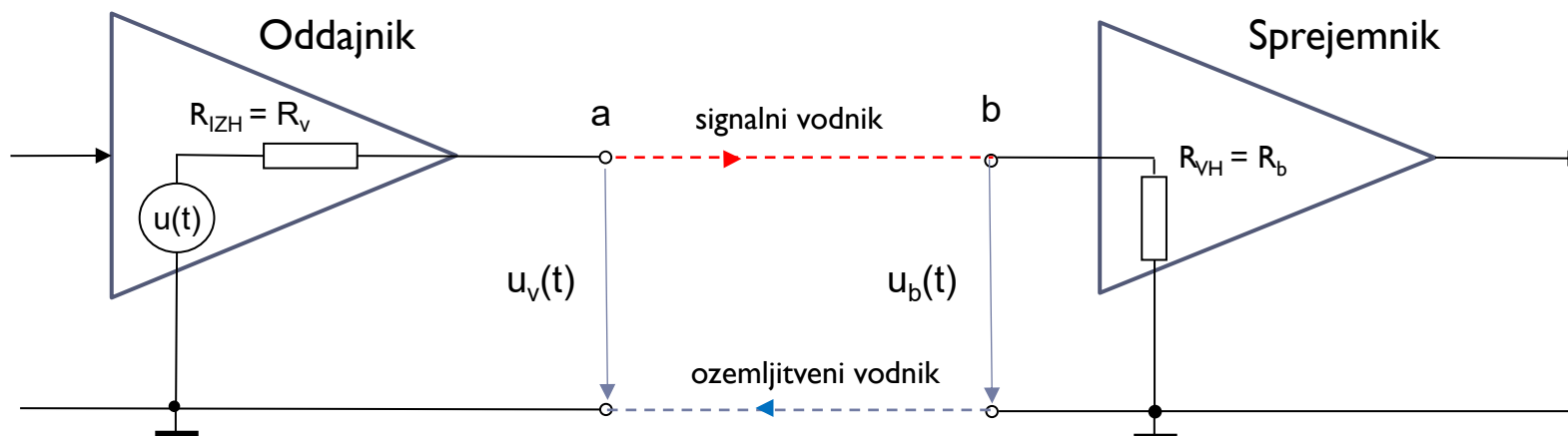
- **Električna predstavitev** električne povezave.

- Električni tok, ki je zato potreben, teče v zaključenem tokokrogu.
- Potrebna je povratna vezava.
- Stanji signala, 0 in 1 sta predstavljeni z napetostnima nivojema:
 - u_v (napetost vira) – na izhodu oddajnika oz na vhodu v povezavo (med točko a in ozemljitvijo)
 - u_b (napetost bremena) - na izhodu iz povezave oz na vhodu v sprejemnik (med točko b in ozemljitvijo)



Tipična praktična situacija:

- ❑ **Oddajnik:** generator napetosti $u(t)$ z **notranjo upornostjo** $R_{IZH} = R_v$
 - ❑ ki mora biti **čim nižja**, da gre čim večji del signala $u(t)$ na izhod oddajnika.
- ❑ **Sprejemnik:** vhodna upornost $R_{VH} = R_b$ (za povezavo predstavlja breme),
 - ❑ mora biti **čim višja** (manjša poraba, večja obremenljivost)



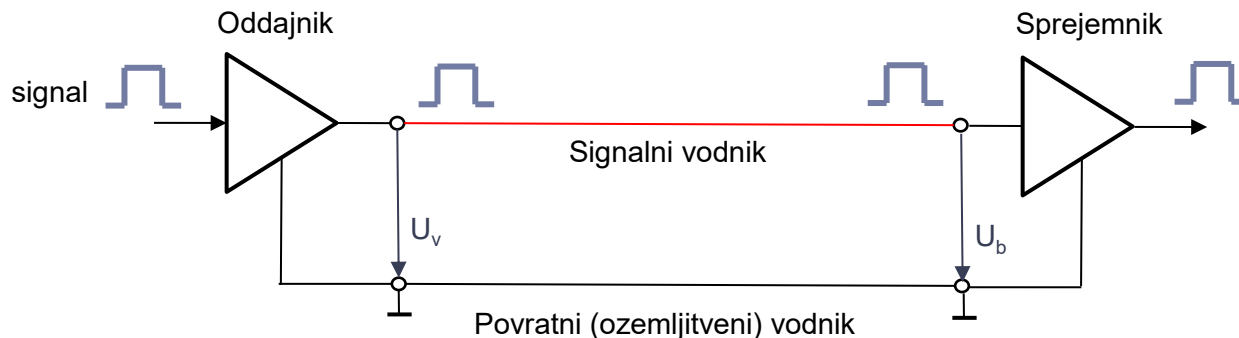
- ❑ **Dogovor:**
 - z velikimi tiskanimi črkami označujemo enosmerni tok in napetost,
 - z malimi pa tok in napetost, ki se s časom spreminjata.

5.2.1 Asimetrični prenos (ang. single-ended)

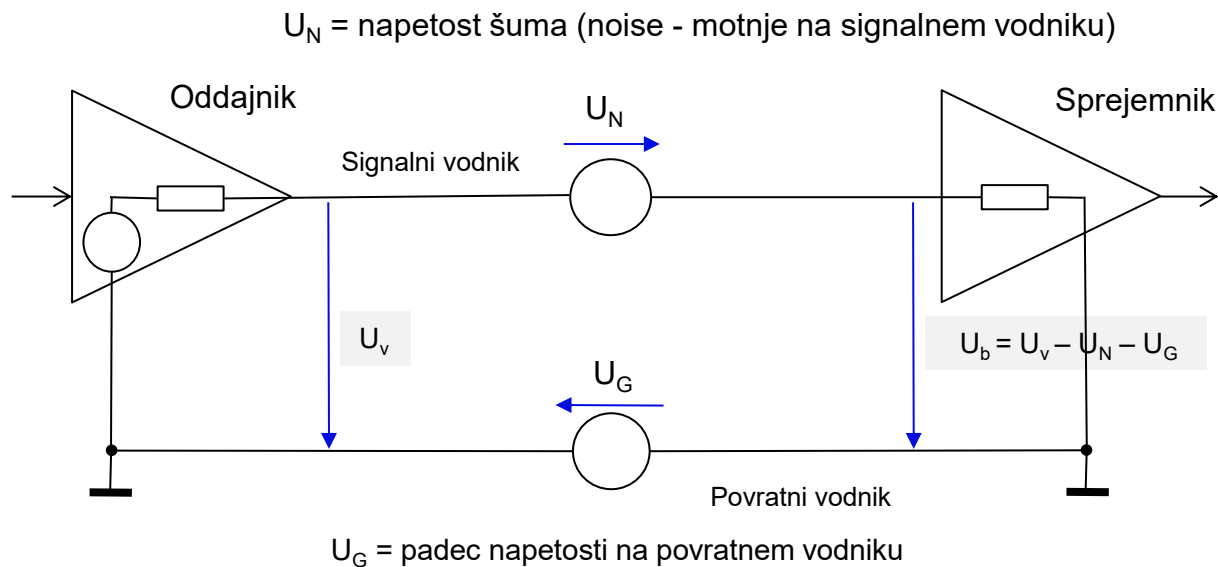
- ❑ Se imenuje tudi neuravnotežen (ang. unbalanced).



- ❑ Potreben je **en signalni vodnik** in en povratni vodnik.
- ❑ Za več signalnih vodnikov je lahko samo en povratni vodnik.
- ❑ Povezava je enostavna in poceni.
- ❑ Stanje signala na izhodu oddajnika, na vhodu sprejemnika, in kjerkoli na liniji je definirano z napetostjo signalnega vodnika proti ozemljitvenemu vodniku.
- ❑ Povezava je zaradi občutljivosti na šum uporabna za nizke hitrosti prenosa, kjer je nizka cena pomembnejša od hitrosti.



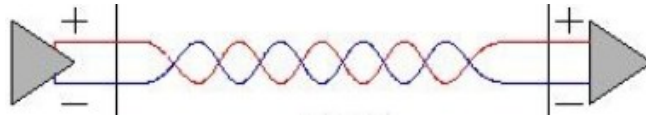
□ Model prenosa



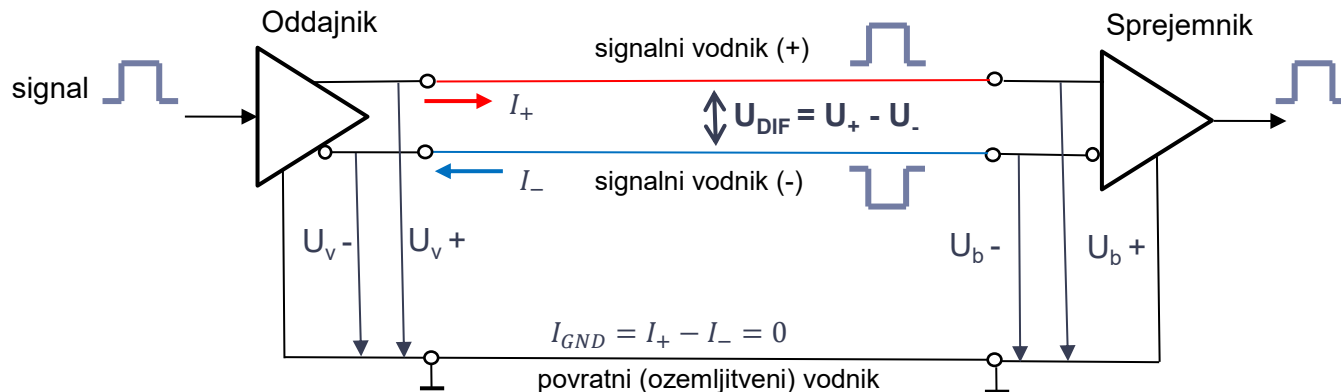
- Povezava ima slabo odpornost proti šumu U_N (vse vrste motenj: presluh, elektromagnetne interference – EMI).
- Masa je del sistema, zato vse spremembe tokov vplivajo na potencial mase U_G in s tem na napetost na vhodu sprejemnika U_b .
- Za večje razdalje, ko imamo daljši signalni vodnik, mora imeti vsak signalni vodnik svoj povratni vodnik, to pomeni, da je primerna uporaba parice.

5.2.2 Simetrični, diferencialni prenos (ang. differential)

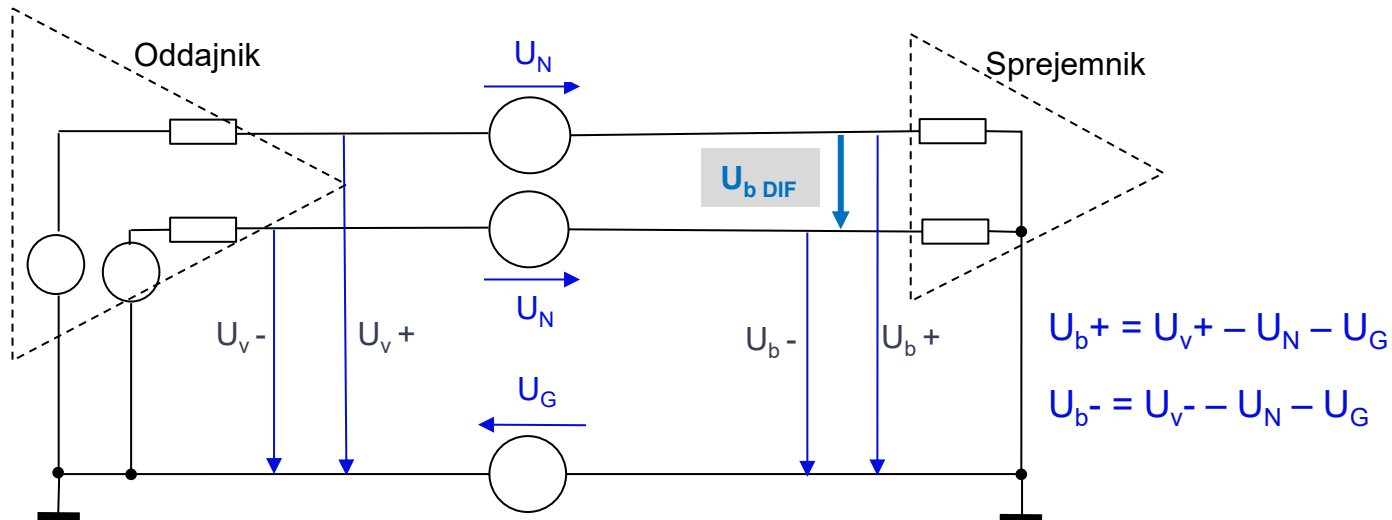
- Se imenuje tudi uravnovežen (ang. balanced).



- Potrebna sta **dva signalna vodnika** in en povratni ozemljitveni vodnik ter posebni diferencialni oddajniki in sprejemniki
- Povezava je dražja.
- Stanje signala na izhodu oddajnika in na vhodu sprejemnika je definirano z razliko napetosti signalnih vodnikov proti ozemljitvenemu vodniku - $U_{DIF} = U_+ - U_-$.
- Šum vpliva na oba signalna vodnika, zato se U_{DIF} ne spremeni.



Model prenosa



$$U_{b+} = U_{V+} - U_N - U_G$$

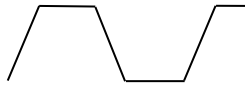
$$U_{b-} = U_{V-} - U_N - U_G$$

$$\begin{aligned} U_{b \text{ DIF}} &= (U_{b+}) - (U_{b-}) = \\ &= [(U_{V+}) - U_N - U_G] - [(U_{V-}) - U_N - U_G] = U_{V+} - U_{V-} \end{aligned}$$

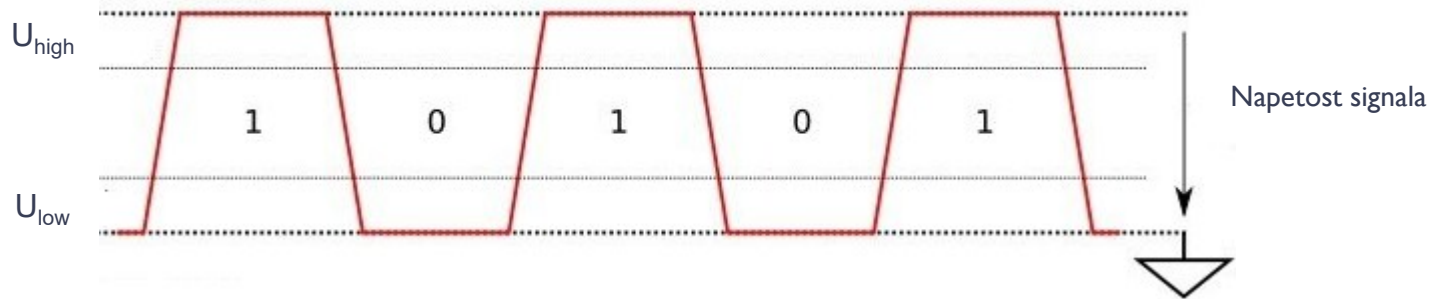
- ❑ Zunanje motnje U_N (šum, presluh, elektromagnetne interference – EMI) vplivajo na oba signalna vodnika enako, zato se spremenita obe napetosti proti masi, diferencialna U_{DIF} pa ostane enaka.
- ❑ Simetrična povezava je mnogo manj občutljiva na šum in je primerna za višje hitrosti prenosa in večje razdalje povezav.
- ❑ Presluh na sosednje povezave se izniči, ker sta signala v nasprotni fazi.

Primeri prenosov

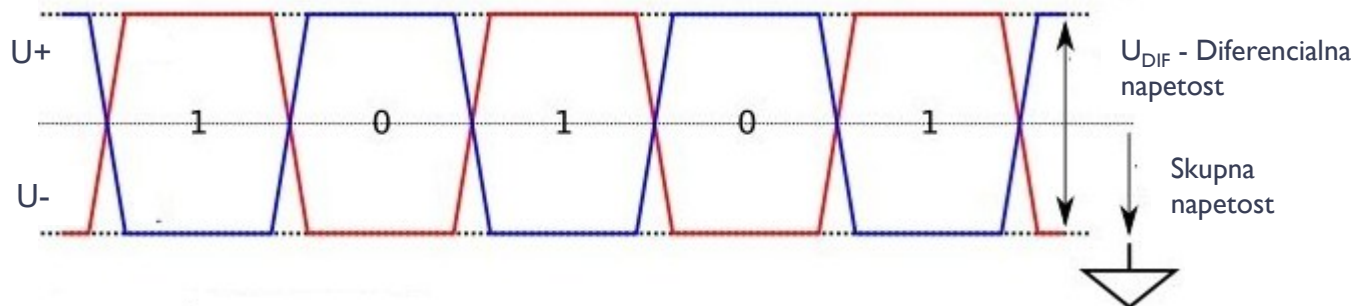
- Realni vhodni signal na sprejemniku



- Asimetrični prenos (RS232, I2C, SPI, ...)



- Simetrični prenos (CANBUS, RS485, USB, LVDS, ...)



Realni primer simetričnega prenosa

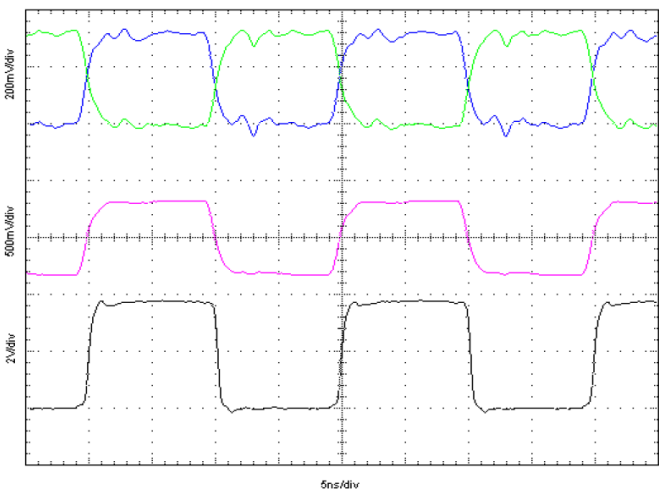


Figure 6: LVDS Channel #3 Waveforms - 1m Cable Interconnect

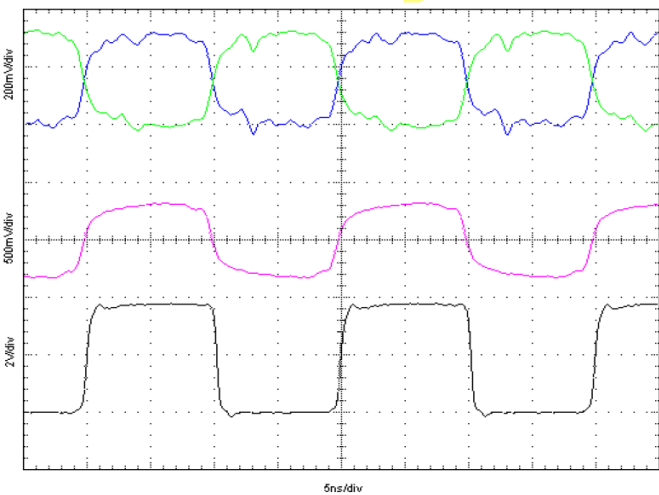


Figure 7: LVDS Channel #3 Waveforms - 5m Cable Interconnect

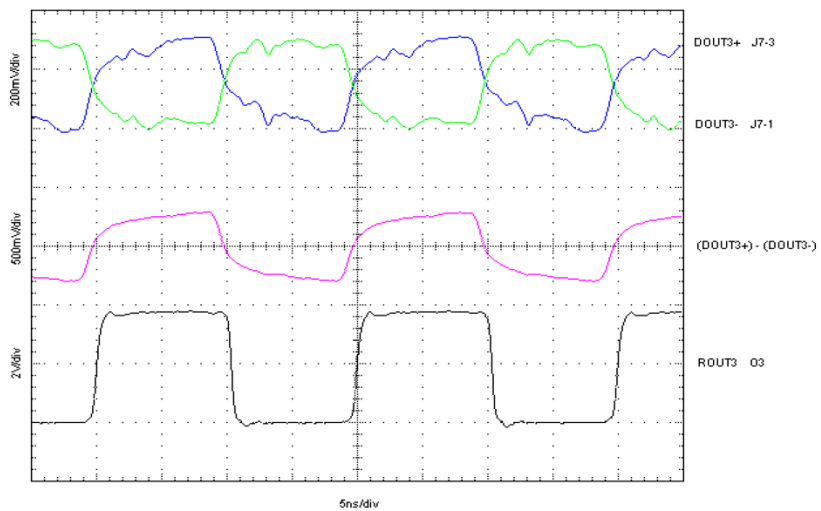
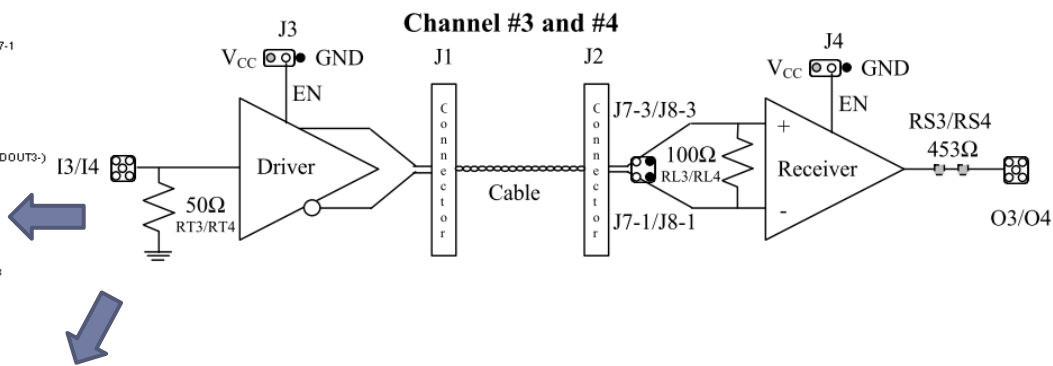


Figure 8: LVDS Channel #3 Waveforms - 10m Cable Interconnect

□ Primerjava: simetrični vs. asimetrični prenos

Simetrični prenos :

- ✓ odpornost na zunanji EMI in presluh
- ✓ manjše emisije EMI in presluha
- ✓ manjši pomen GND
- ✓ nižja razlika v nap. nivojih
- ✓ nižja napajalna napetost
- ✓ manjša poraba
- ✓ višja frekvenca prenosa

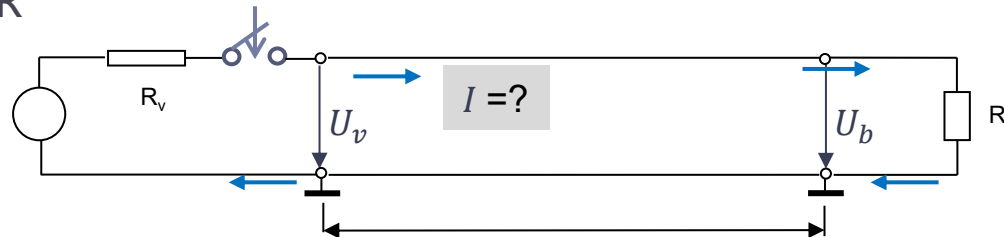
Asimetrični prenos:

- ✓ nižja cena
- ✓ manj povezav

5.3 Model linije

□ Idealna linija

- čas potovanja signala po liniji se predpostavi, da je zanemarljivo kratek, njegova oblika pa je na sprejemni strani enaka kot na oddajni. Predpostavka:
 - upornost linije je 0Ω ,
 - hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja (električnega signala) je neskončna.
- Izračun toka I po povezavi in napetosti U_b na koncu povezave (v točki b):
- Ohmov zakon: $U = I R$



- Zaporedna vezava upornosti R_v in R_b

$$U = I \cdot (R_v + R_b) \rightarrow$$

$$I = \frac{U}{R_v + R_b}$$

Napetost v točki b

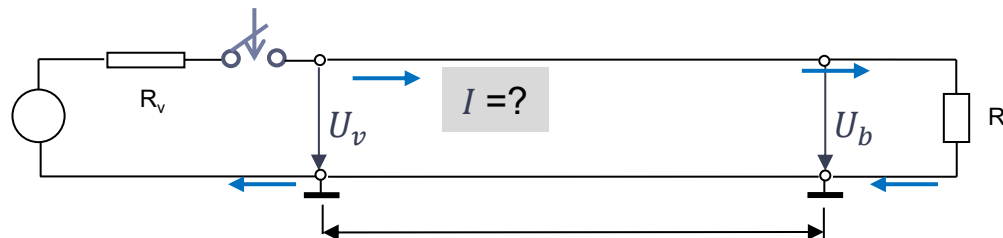
$$U_b = I \cdot R_b = \frac{U}{R_v + R_b} R_b$$

- To velja, če je povezava idealna.

5.3 Model linije

□ Realna linija

- Hitrost širjenja elektromagnetnega valovanja v materialu je enaka približno 2/3 svetlobne hitrosti (200.000 km/s)
- Električni signal za razdaljo l m potrebuje 5 – 7 ns, odvisno od povezave.
- Ko ob $t = 0$ sklenemo stikalo,
 - še ne vemo kakšna je upornost R_b na koncu povezave, ker sprememba signala pripotuje v točko b šele po določenem času.



- Zaporedna vezava upornosti R_v in R_b

$$U = I \cdot (R_v + R_b) \rightarrow$$

$$I = \frac{U}{R_v + R_b}$$

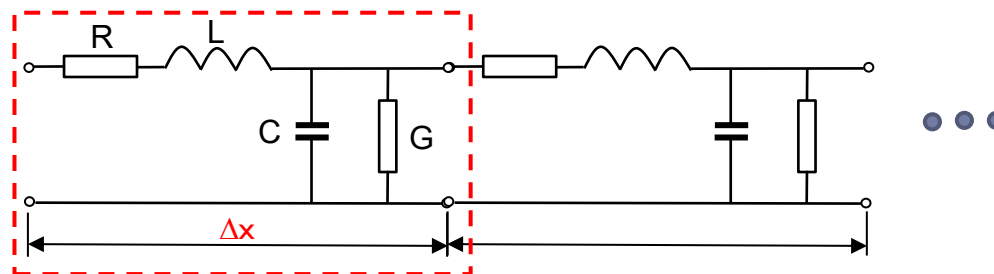
Napetost v točki b

$$U_b = I \cdot R_b = \frac{U}{R_v + R_b} R_b$$

- To velja, če počakamo dovolj dolgo (ko odboji prenehajo)

Karakteristična impedanca linije (Z_0)

- ❑ Z Ohmovim zakonom iz prejšnjega razloga ne moremo izračunati toka, ki teče v povezavo ob času $t=0$, ker se za električne signale, ki se hitro spreminjajo s časom povezava obnaša kot prenosna linija.
- ❑ Za izračun toka in napetosti na vходу v prenosno linijo moramo poznati vhodno impedanco ali upornost te linije, to je **karakteristična impedanca linije (Z_0)**.
- ❑ Poenostavljen model električne prenosne linije Linijo sestavlja množica kratkih odsekov dolžine (Δx)



- Določajo jo:

- R ... upornost na enoto dolžine [Ω/m] - upornost linije (določena z materialom vodnikov).
- L ... induktivnost na enoto dolžine [H/m] - induktivnost linije (določena z materialom vodnikov).
- C ... kapacitivnost na enoto dolžine [F/m] - kapacitivnost med vodnikoma linije (vplivamo z razdaljo med njima).
- G ... prevodnost na enoto dolžine [S/m] - prevodnost med vodnikoma linije (odvisna od izolacije med njima).

Karakteristična impedanca linije (Z_0)

Karakteristična impedanca linije Z_0 je vhodna impedanca neskončno dolge linije, ki je:

- Enaka vzdolž cele linije
- Predstavlja razmerje med napetostjo in tokom v vsaki točki linije
- Splošna enačba za izračun karakteristične impedance linije Z_0 je

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}},$$

kjer je $\omega = 2\pi f$, ω - krožna frekvenca [rad], f – frekvenca signala $j = \sqrt{-1}$

Poenostavitev izraza :

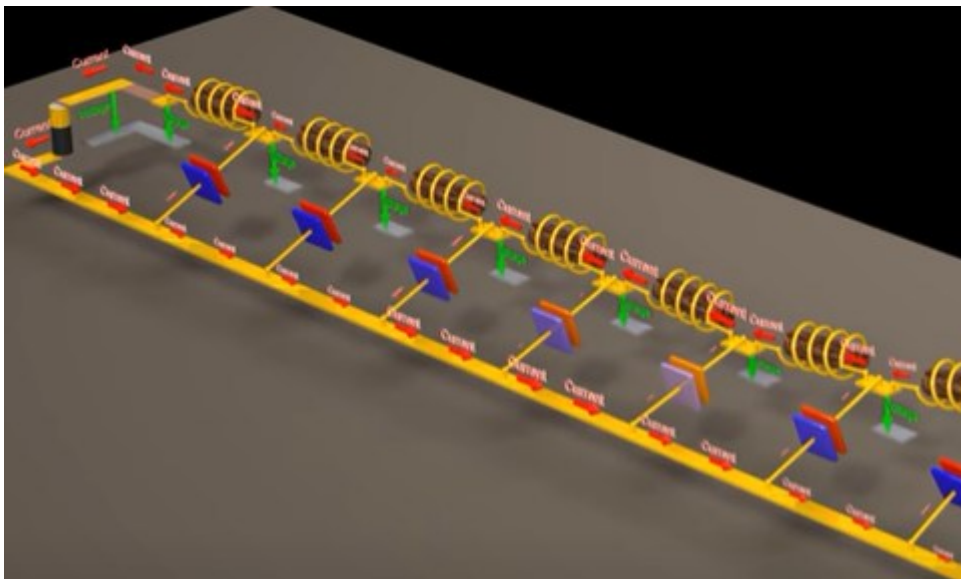
- če idealna linija in sta $R = 0$ in $G = 0$ ali pa
- če R in G nista enaka 0, sta pri dovolj visoki frekvenci ($f \geq 100$ KHz) člena $j\omega L$ in $j\omega C$ veliko večja od R in G in se izraz za Z_0 poenostavi v:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R+j\omega L}{G+j\omega C}} \approx \sqrt{\frac{L}{C}} \quad [\Omega],$$

ker sta $R \ll |j\omega L|$ in $G \ll |j\omega C|$

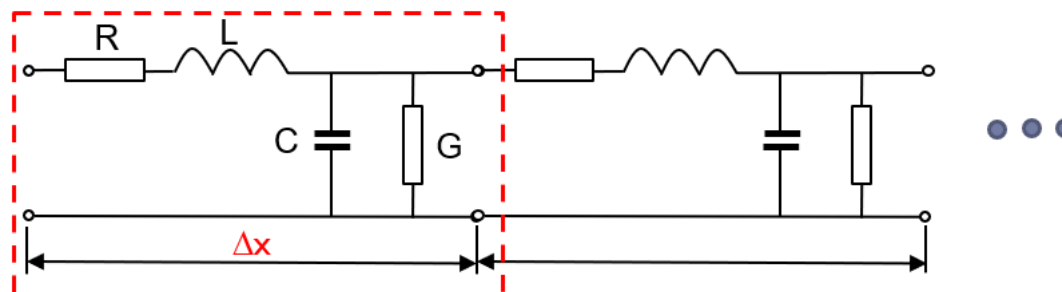
Karakteristična impedanca linije (Z_0)

- Poenostavljen model električne prenosne linije – video prikaz
 - Linijo sestavlja množica kratkih odsekov dolžine (Δx)



Transmission Lines - Signal Transmission and Reflection
758,454 views

From
https://www.youtube.com/watch?v=ozeYaikl11g&ab_channel=PhysicsVideosbyEugeneKhutoryansky



Čas potovanja signala (τ)

- **Čas potovanja signala (τ)** (ang. transfer time) – čas, ki je potreben za potovanje signala po prenosni liniji od oddajnika do sprejemnika.

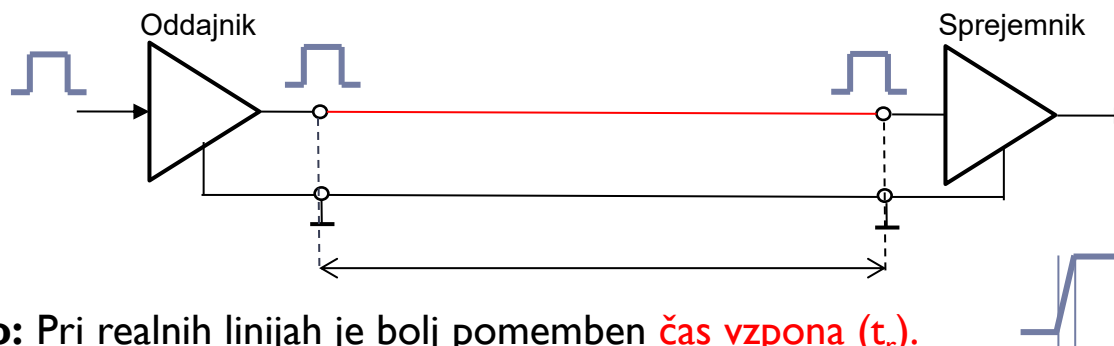
$$\tau = \delta \cdot l$$

l – dolžina prenosne linije

δ - **zakasnitev signala na enoto dolžine**, ki je podana v [ns/m]

(ang. propagation delay): $\delta = \sqrt{LC} \left[\frac{ns}{m} \right]$

Primer: Čas potovanja signala po prenosni liniji



Pomembno: Pri realnih linijah je bolj pomemben **čas vzpona (t_r)**.

Pravilo: Če je povezava daljša od $1/6$ dolžine, ki jo signal prepotuje v času vzpona (t_r), jo moramo obravnavati kot **prenosno linijo**.

Primer uporabe pravila:

Podana sta čas vzpona signala $t_r = 1 \text{ ns}$ in zakasnitev signala na liniji $\delta = 7 \text{ ns/m}$.

1. Kakšno **dolžino (l)** prepotuje signal po liniji v času vzpona $t_r = 1 \text{ ns}$?
2. Kakšna je **minimalna dolžina**, ko je potrebno povezavo obravnavati kot prenosno linijo?

Rešitev:

δ - zakasnitev signala na enoto dolžine ($l = 1 \text{ [m]}$)

$\tau = \delta \cdot l$ - čas potovanja signala po liniji dolžine l

1. Dolžina l , ki jo signal prepotuje po liniji v času vzpona $t_r = 1 \text{ ns}$?

$$\tau = t_r, l = \frac{\tau}{\delta} = \frac{1 \text{ ns}}{7 \text{ ns/m}} = \frac{1}{7} = 0,0142 \text{ m} = 14,2 \text{ cm}$$

2. Minimalna dolžina, ko je potrebno povezavo obravnavati kot prenosno linijo?

$$l_{min} = \frac{1}{6} l = \frac{14,2 \text{ cm}}{6} = 2,4 \text{ cm}$$

Vsako **povezavo, ki je daljša od 2,4 cm** moramo obravnavati kot prenosno linijo.

Primeri realnih parametrov:

Tipične vrednosti – primer linije

- Karakteristična impedanca Z_0 resničnih linij
 - Linije na tiskanem vezju $Z_0 = 50\Omega \div 120\Omega$ (širša ozemljitvena povezava manjša Z_0)
 - Koaksialni kabel: $Z_0 = 50\Omega$
 - Koaksialni antenski kabel: $Z_0 = 75\Omega$
 - UTP Cat 5e: $Z_0 = 100\Omega \pm 5\Omega$
 - USB: $Z_0 = 90\Omega \pm 15\%$



SuperCat5_24_U_UTP_Install
22.07.2009
Page 2 of 2

SuperCat 5 24 Cat.5e

Electrical Properties

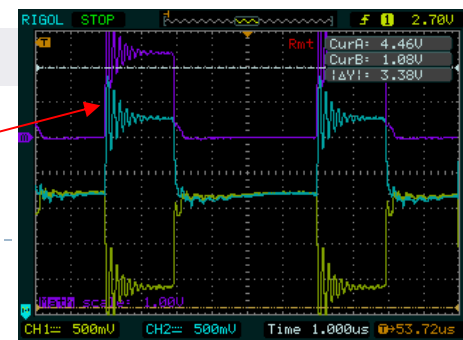
at 20°C

DC loop resistance		$\leq 188\Omega/\text{km}$
Resistance unbalance		$< 2\%$
Characteristic impedance	1 - 100MHz	$100 \pm 15\Omega$
Insulation resistance	(500V)	$\geq 5000\text{M}\Omega \times \text{km}$
Capacitance	at 800 Hz	Nom. 52 nF/km
Capacitance unbalance	(pair to ground)	Nom. $< 300\text{pF}/\text{km}$
Nominal Characteristic impedance	at 100 MHz	$100 \pm 5\Omega$

Tipične zakasnitve signala δ

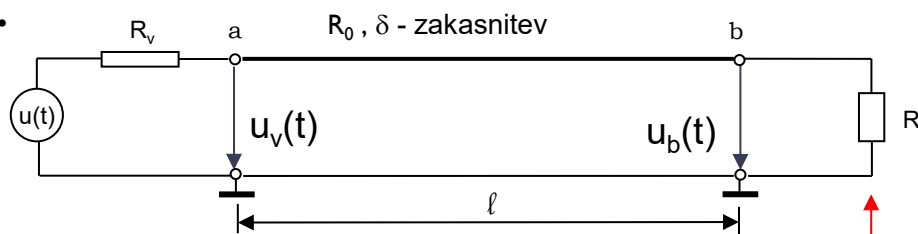
- Linije na tiskanem vezju $\delta = 5 \div 6\text{ ns/m}$
- Dvostransko tiskano vezje $\delta = 6 \div 7\text{ ns/m}$
- Koaksialni kabel $\delta < 5\text{ ns/m}$
- UTP Cat 5e $\delta > 5,6\text{ ns/m}$ pri $f = 1\text{ MHz}$

6. Odboji (ang. Reflections)



Zakaj se pojavi? - Zakon o ohranitvi energije

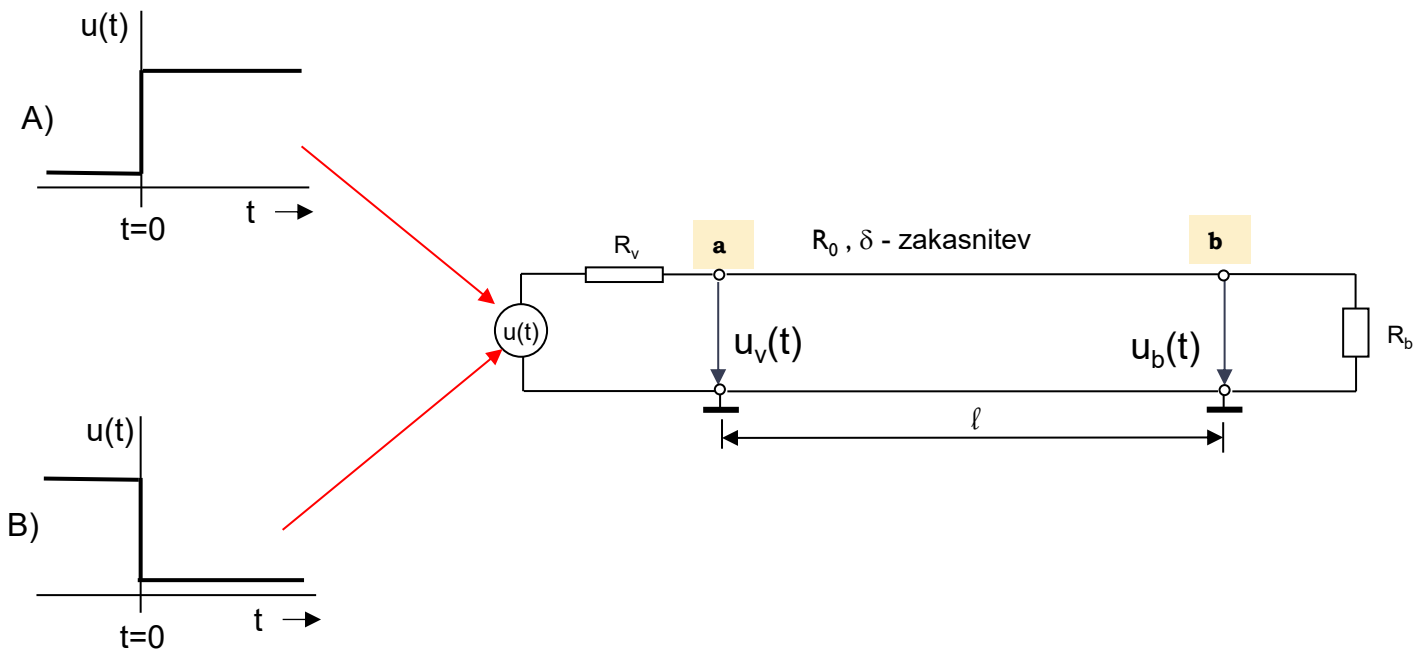
- ❑ Karakteristična impedanca linije Z_0 (ali karakteristična upornost R_0) določa razmerje med tokom in napetostjo na liniji (Ohmov zakon). Ker je Z_0 (R_0) enaka vzdolž cele linije, sta tudi tok I in napetost U vzdolž cele linije enaka.
- ❑ Produkt toka in napetosti vzdolž linije je moč $P = U \cdot I$.
- ❑ Če pa ta moč pripotuje do točke b, kjer se potem upornost spremeni (npr. $R_b \neq R_0$), tudi razmerje toka in napetosti ni več pravo, zato **se del moči, ki pripotuje, odbije in potuje nazaj.**



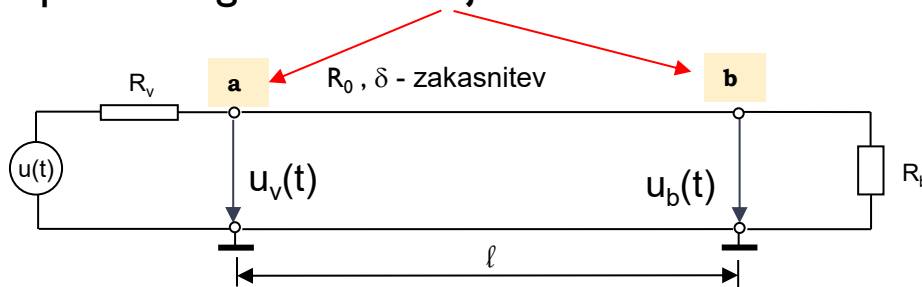
$$\left\{ \begin{array}{l} \text{Moč, ki pripotuje} \\ \text{na konec linije} \end{array} \right\} = \left\{ \begin{array}{l} \text{Moč, ki se porabi} \\ \text{na bremenu } R_b \end{array} \right\} + \left\{ \begin{array}{l} \text{Moč, ki je breme} \\ \text{ne porabi} \end{array} \right\}$$

Odbita moč, ki se vrača nazaj

- Digitalni signal – na vhodu v linijo, v točki (a) imamo dve možnosti:



□ Kolikšen del napetosti signala se odbije?



▪ Odboj določa **napetostni odbojni koeficient**? (Kirchoffov zakon)

- u_r – napetost odbitega signala (r - reflection)
- u_p – napetost pripotujočega signala po liniji (p - propagation)

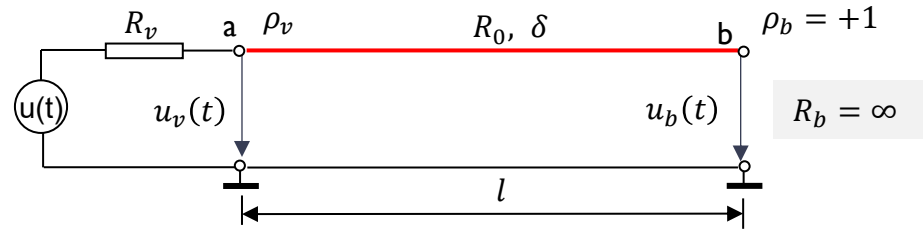
$$\rho = \frac{u_r}{u_p} \rightarrow \rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0} \quad -1 \leq \rho_v \leq +1;$$

$$\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} \quad -1 \leq \rho_b \leq +1$$

Izračun odbojnega koeficienta ρ_b za izhod prenosne linije

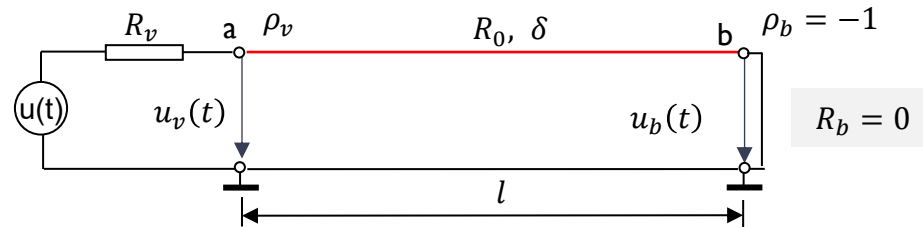
- $R_b = \infty$ (povezava ni zaključena)

$$\rho_b = \frac{\infty - R_0}{\infty + R_0} = +1$$



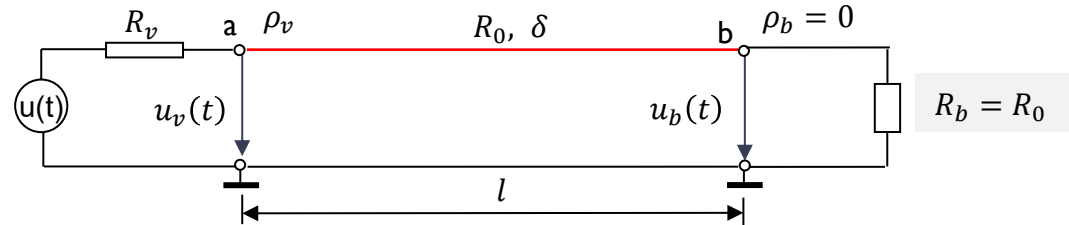
- Kratka zaključitev - $R_b = 0$

$$\rho_b = \frac{0 - R_0}{0 + R_0} = -1$$

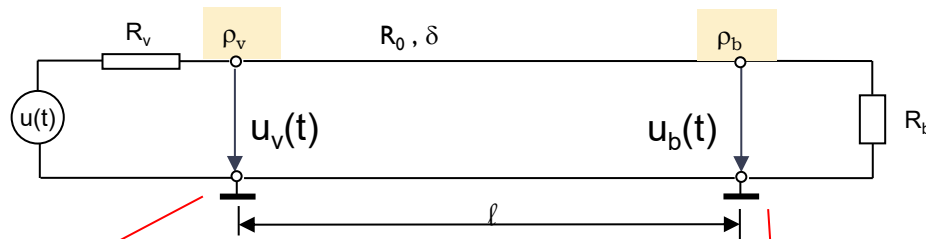


- Breme $R_b = R_0$

$$\rho_b = \frac{R_0 - R_0}{R_0 + R_0} = 0$$



Možne vrednosti odbojnih koeficientov



R_v	ρ_v	Opis
R_0	0	Odboja ni, ker je $R_v = R_0$ in signal, ki pripotuje, ne čuti nobene spremembe
0	-1	Ves signal se odbije z obratnim predznakom
∞	+1	Ves signal se odbije s pozitivnim predznakom

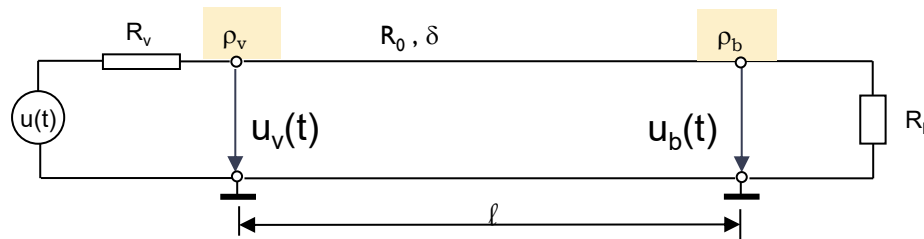
R_b	ρ_b	Opis
R_0	0	$R_b = R_0$ Odboja ni, ker ni spremembe
0	-1	Ves signal se odbije z obratnim predznakom
∞	+1	Ves signal se odbije s pozitivnim predznakom

Praksa :

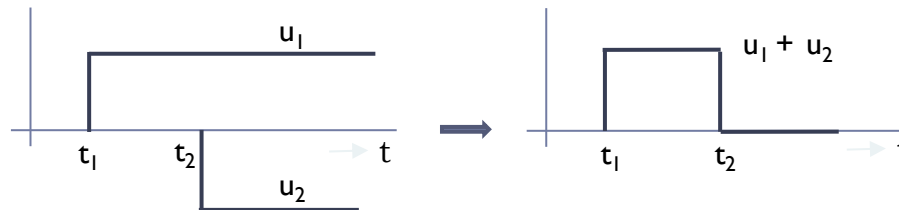
R_v čimmanjši

R_b čimvečji

Izračun poteka napetosti : Načelo superpozicije



- Pri analizi odbojev uporabljamo **načelo superpozicije**, ki velja za vse linearne sisteme (linearna odvisnost vhoda in izhoda).
 - Napetost v neki točki linije ob času t je enaka vsoti vseh napetosti, ki so do časa t pripotovale v to točko.
 - Primer superpozicije signalov u_1 in u_2 :



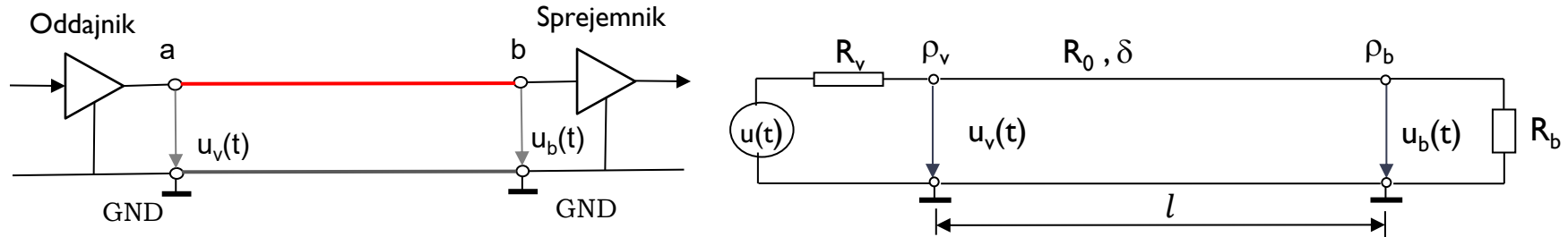
- **Prvotnemu signalu moramo prišteti vse odboje (kolikor jih pač je), da dobimo dejanski signal v neki točki in času.**

Skupno izhodišče za izračun poteka napetosti (odbojev)

Električna povezava



Model linije s podatki za analizo



$u_v(t)$ - napetost signala na vhodu v linijo (izhodna napetost oddajnika) v odvisnosti od časa t

$u_b(t)$ - napetost signala na izhodu iz linije (vhodna napetost sprejemnika) v odvisnosti od časa t

R_0 [Ω] - karakteristična upornost linije: od 30 [Ω] do 600 [Ω]; linije imajo pogosto okrog 100 [Ω]

δ [$\frac{ns}{m}$] - zakasnitev signala na enoto dolžine: od 5 [ns/m] do 7 [ns/m]

$\tau = \delta \cdot l$ [ns] - čas potovanja signala po liniji dolžine l

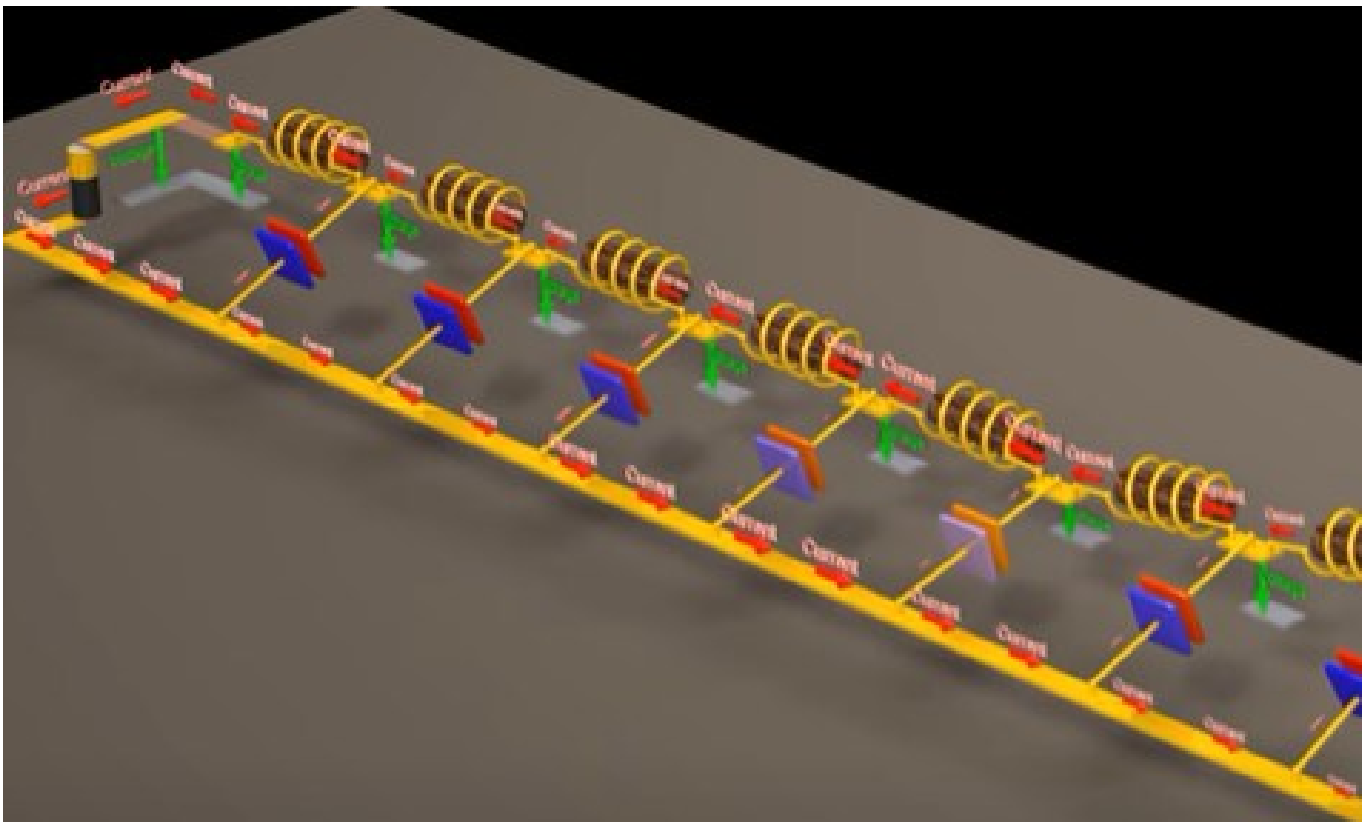
$\rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0}$ - napetostni odbojni koeficient na vhodu v linijo, R_v je izhodna upornost oddajnika

$\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0}$ - napetostni odbojni koeficient na vhodu v linijo, R_b je vhodna upornost sprejemnika

6.1 Analiza odbojev

Vizualizacije :

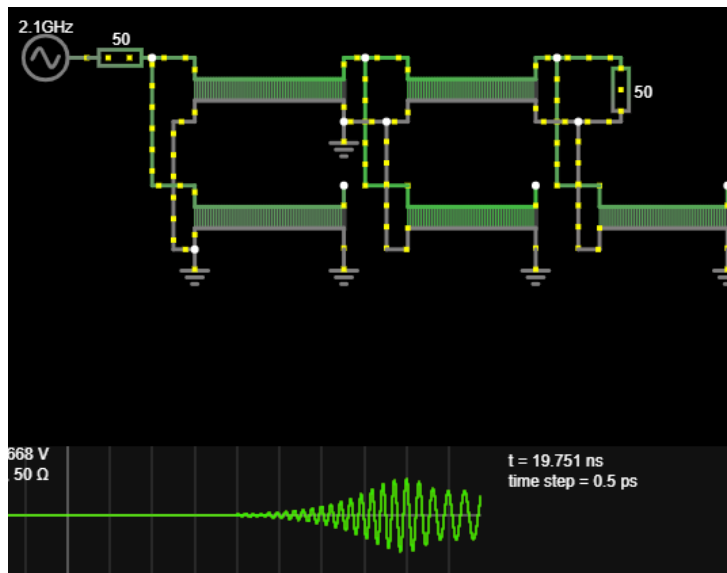
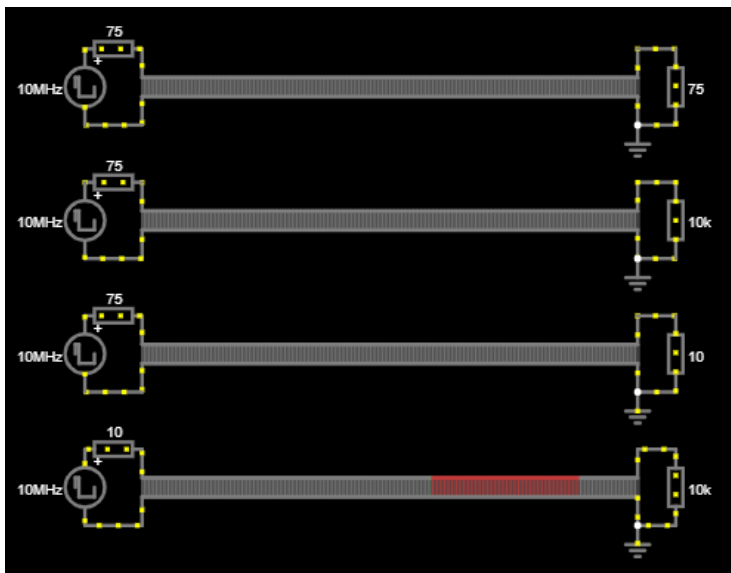
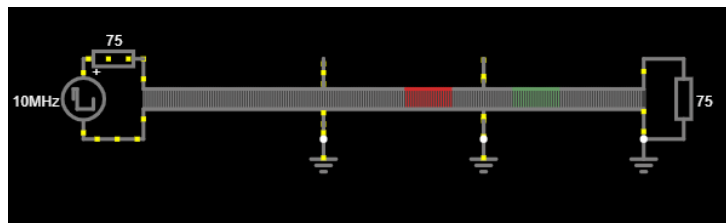
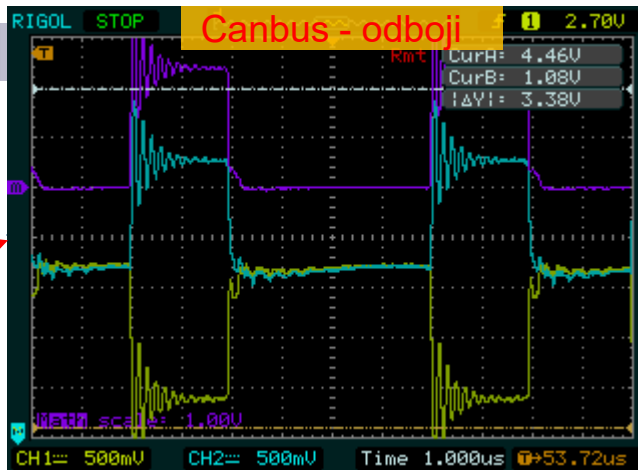
- Video: prenos signala in odboj
 - <https://www.youtube.com/watch?v=ozeYaikIIlg>



6.1 Analiza odbojev

Vizualizacije :

- ▶ osciloskopska analiza - CANBUS
- ▶ <https://www.falstad.com/circuit/>
 - ▶ Circuits -> Transmission lines
 - Termination
 - Low-pass Filter
 - Mismatched Lines (Pulse)



6.1 Analiza odbojev

Analiza frekvenčne sestave signala brez in z odboji zaradi nezaključitve linije

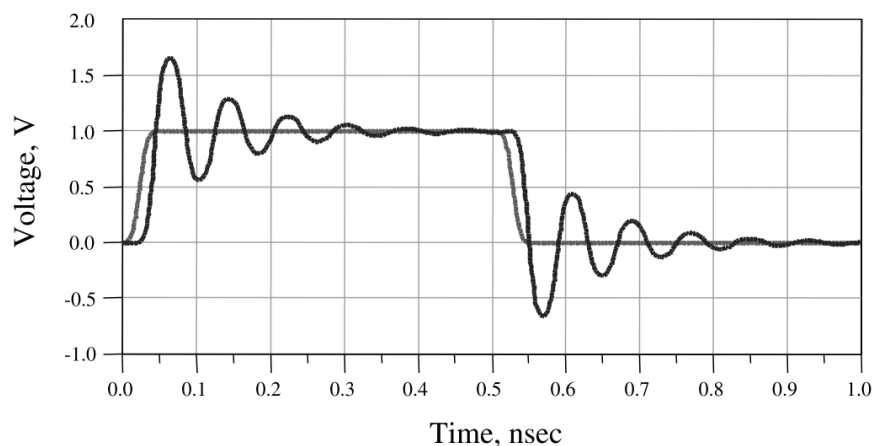
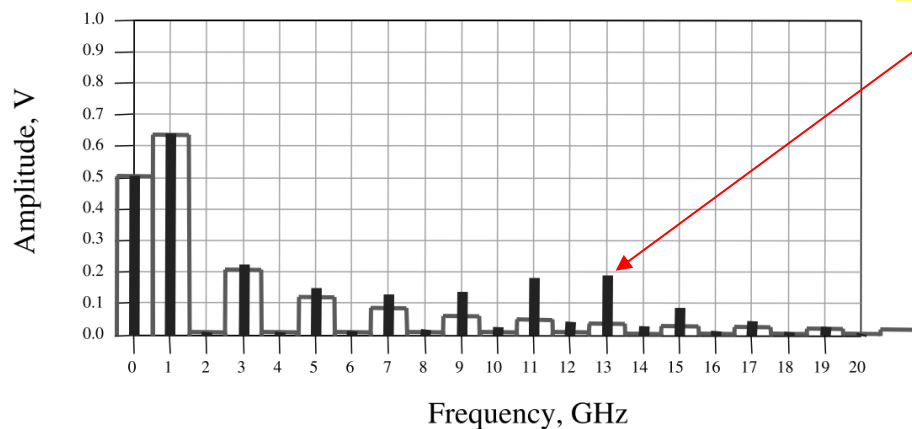
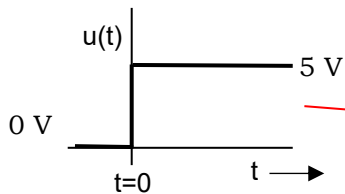


Figure 2-13 Top: The time-domain waveform of a near-square wave and one that has significant ringing due to poor termination. Bottom: the resulting DFT spectrum of these two waves, showing the effect of the ringing on the spectrum. The wide bars are for the ideal waveform while the narrow bars are for the ringing waveform.

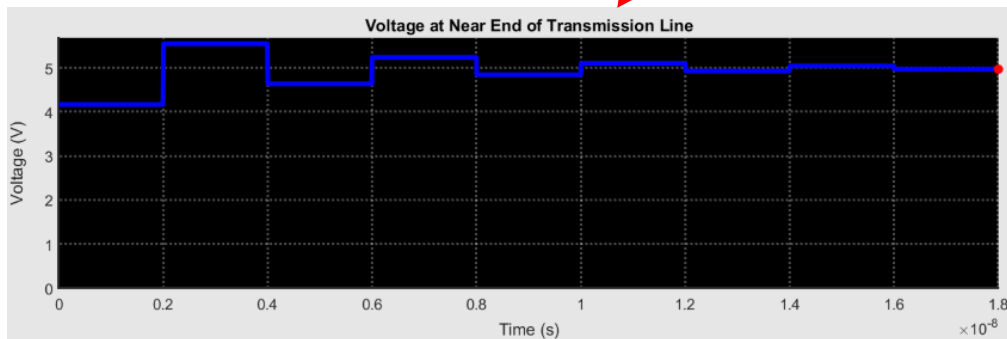
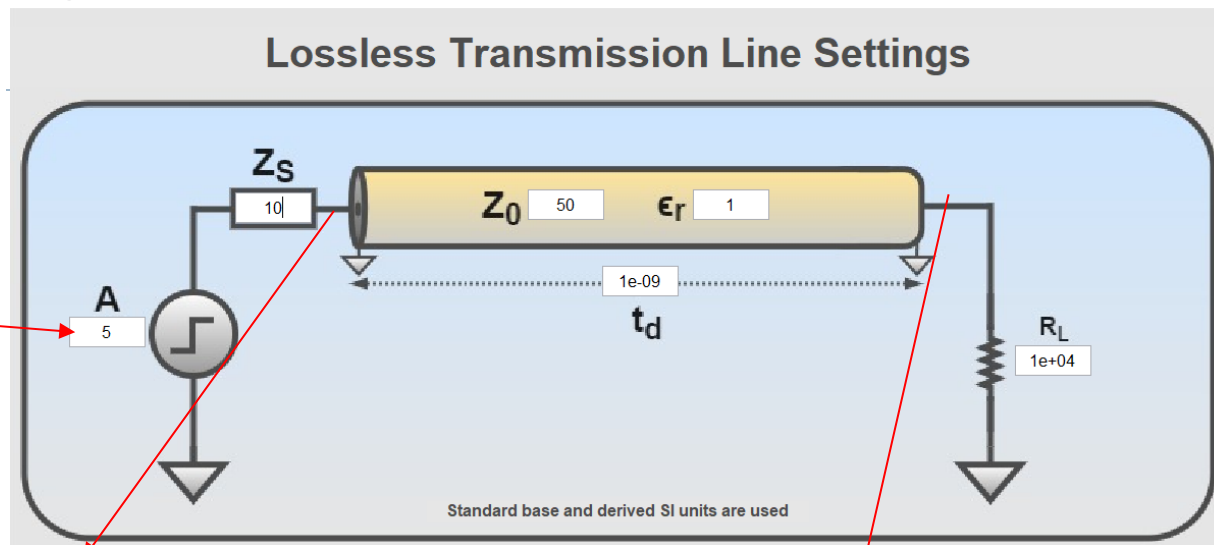


6.1 Analiza odbojev

Simulacija :

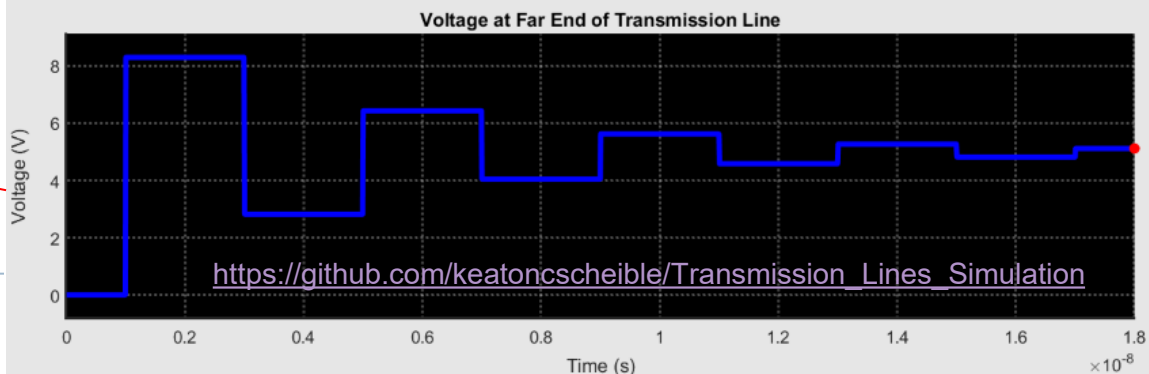
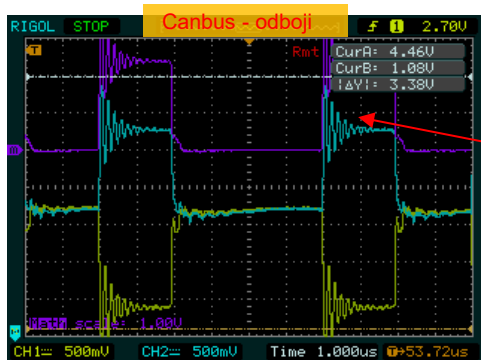


Prehod signala iz 0 v 1



Animation Settings

Animation Speed 5
Stop Time 18e-09



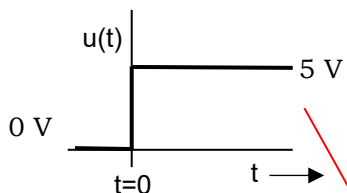
6.1 Analiza odbojev

https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

Transmission Line Reflections

Dynamic Impedance Matching, $V_{in} = 5V$ Step

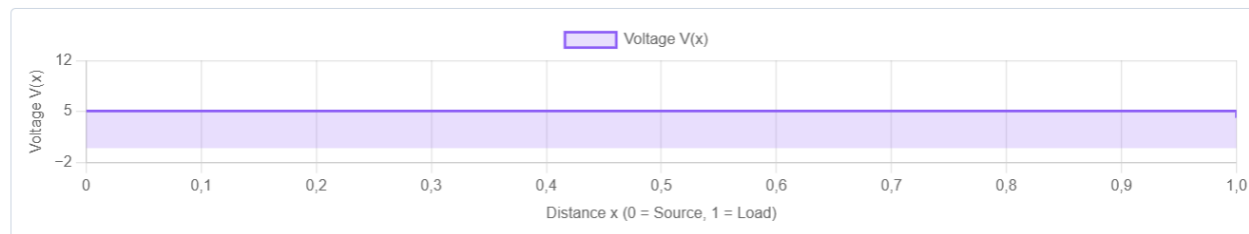
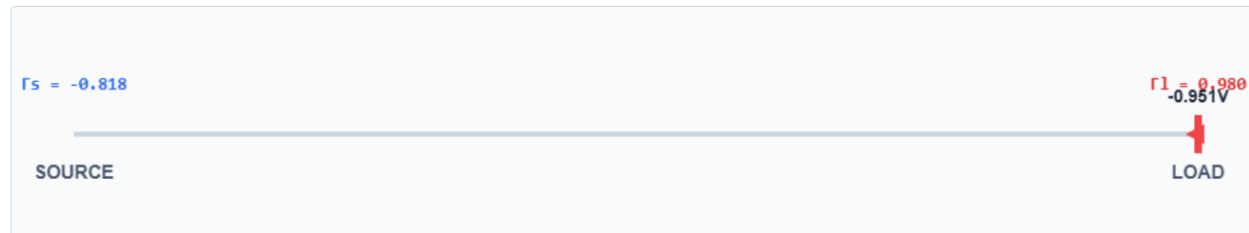
Simulacija :



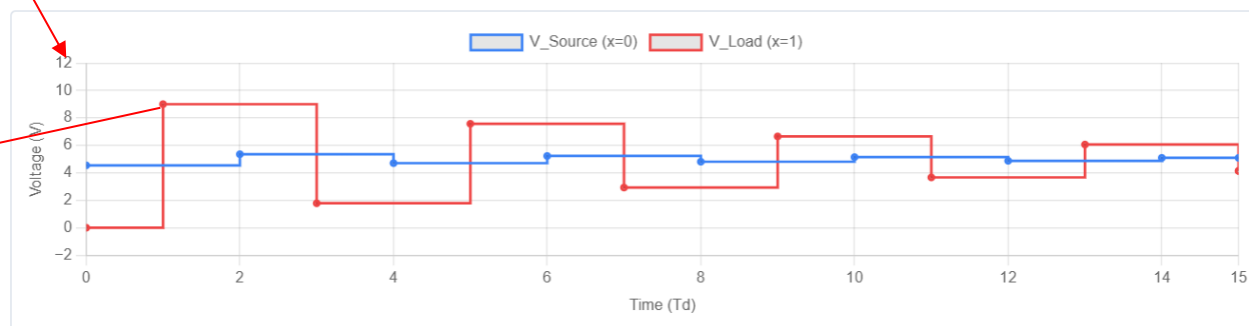
Prehod signala iz 0 v 1

Simulation controls:

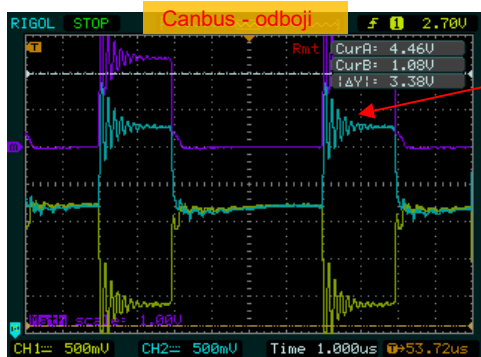
- SOURCE Z_s (Ω): 10
- LINE Z_0 (Ω): 100
- LOAD Z_L (Ω): 10000
- ANIM SPEED: 2.4x



Simulation buttons: **Play** and **Reset**

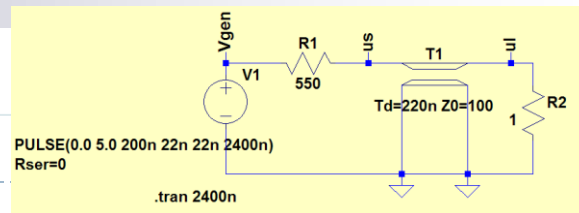


Potek odbojev v praksi – nezaključena linija CANBus



(AV1) – Simulacije odbojev na liniji

Primerjava: Simulacija (LTSpice)



SPICE Simulacije slik iz osciloskopa: UTP kabel, $R_S = 50..550 \Omega$, $R_L = 1..500 \Omega$

Napetost se že pravilno porazdeli, z zakasnitvijo 1τ se pojavi tudi na izhodu.

$R_0 = 100\Omega$
 $R_L, R_S = 0,50,500\Omega$

$R_L > R_0$, $R_L = 500\Omega$
 $\rho_L = 0.666$ (poz. odboj)

$R_L = R_0$
 $\rho_L = 0$ (ni odboja)

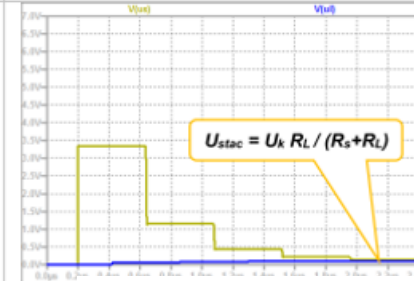
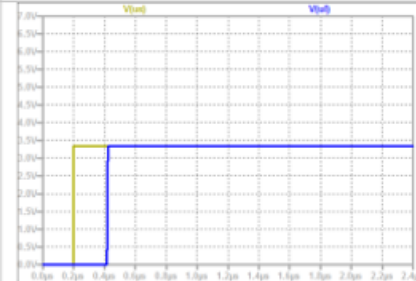
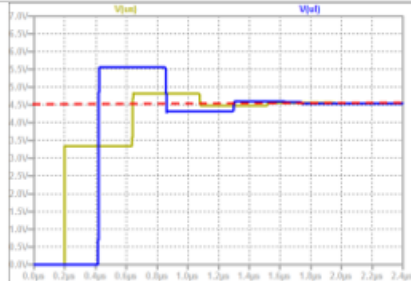
$R_L < R_0$, $R_L = 1\Omega$
 $\rho_L = -0.98$ (neg. odboj)

Višje potujobe napetosti!

$R_S < R_0$

$R_S = 50 \Omega$
 $\rho_S = -0.333$

[0.5V/razdelek]

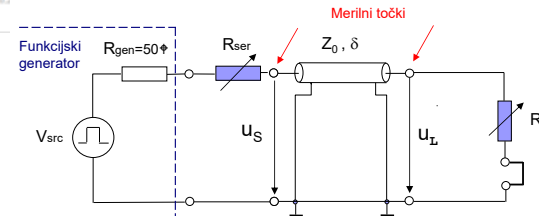


(LV2) - Merjenje odbojev na liniji

Primerjava: Meritve z osciloskopi

Slike osciloskopa: UTP kabel, $R_S = 50..550 \Omega$, $R_L = 1..500 \Omega$ ($R_{gen} = 50 \Omega$) UTP

Napetost se že pravilno porazdeli, z zakasnitvijo 1τ se pojavi tudi na izhodu.



$R_0 = 100\Omega$
 $R_L, R_S = 0,50,500\Omega$

$R_L > R_0$, $R_L = 500\Omega$
 $\rho_L = 0.666$ (poz. odboj)

$R_L = R_0$
 $\rho_L = 0$ (ni odboja)

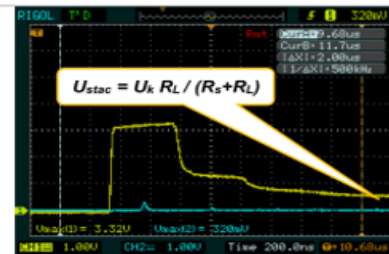
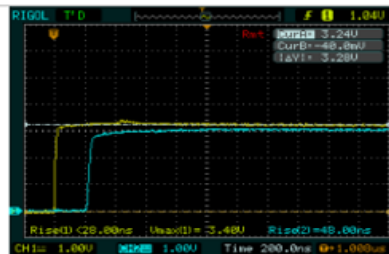
$R_L < R_0$, $R_L = 1\Omega$
 $\rho_L = -0.98$ (neg. odboj)

Višje potujobe napetosti!

$R_S < R_0$

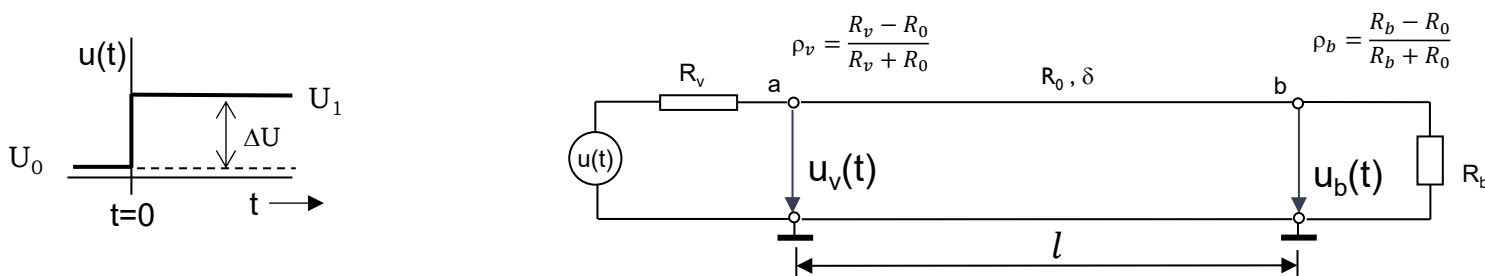
$R_S = 50 \Omega$
 $\rho_S = -0.333$

[1V/razdelek]



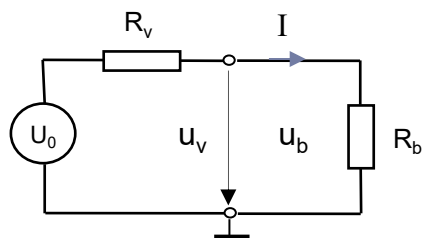
6.1 Analiza odbojev

- Za linijo dolžine l poznamo: R_v , R_0 , R_b , δ , ρ_v , ρ_b , $u_v(t)$, $u_b(t)$
- Ob času $t = 0$ preide signal iz $0 \rightarrow 1$
(napetost za stanje 0 je U_0 , napetost za stanje 1 je U_1)



- **Začetek:** pred časom $t=0$ je napetost na vhodu v linijo enaka napetosti na izhodu iz linije, to je na bremenu, kar je stacionarno stanje logične 0.

čas označimo kot $t = 0 -$



$$u_v(0 -) = u_b(0 -) = U_0 \cdot \frac{R_b}{R_v + R_b}$$

Izračun napetosti u_v :

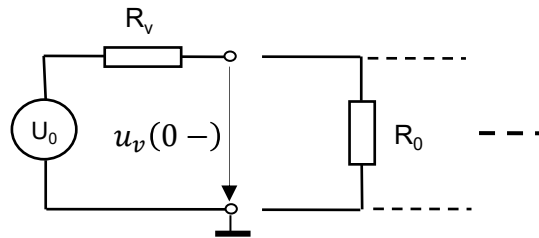
$$U_0 - u_v - u_b = 0$$

$$U_0 - R_v \cdot I = R_b \cdot I$$

$$I = \frac{U_0}{R_v + R_b}$$

$$u_v = u_b = I \cdot R_b = \frac{U_0}{R_v + R_b} \cdot R_b = U_0 \cdot \frac{R_b}{R_v + R_b}$$

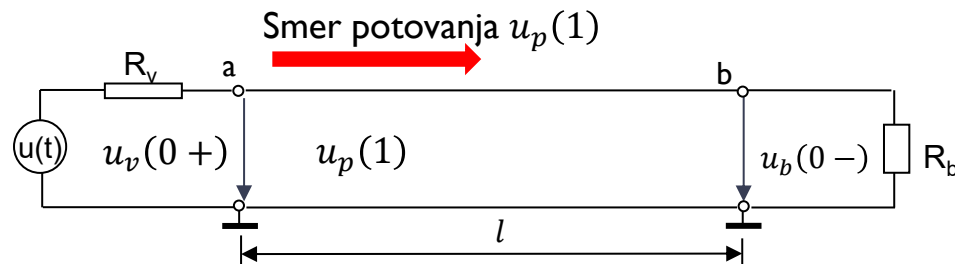
- **Ob preklopu iz stanja 0 v stanje I** (ob času $t = 0$), signal na vhodu v linijo takoj občuti karakteristično upornost R_0 .
čas označimo kot $t = 0 +$



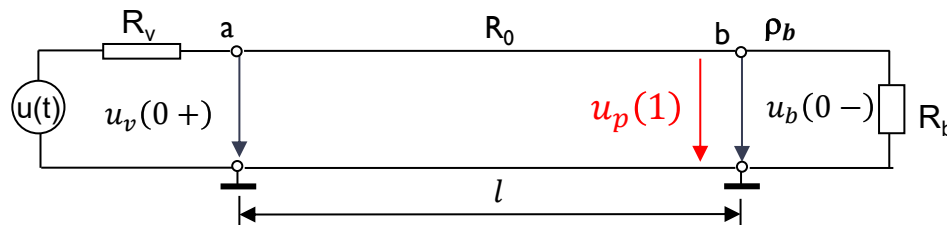
$$u_v(0+) = u_v(0-) + \Delta U \cdot \frac{R_0}{R_v + R_0} = u_v(0-) + u_p(1)$$

V linijo potuje samo sprememba signala, to je $u_p(1)$, ker je napetost $u_v(0-)$ na liniji in tudi na bremenu obstajala že pred časom $t = 0+$, torej pred preklopom.

Izračunana napetost signala $u_p(1)$ je prvi potujoči val.



- $u_p(1)$ potuje po liniji in po času τ pripotuje na konec (točka b), kjer je že od prej napetost $u_b(0-)$. Tam naleti na upornost bremena R_b , ki je različna od karakteristične upornosti R_0 . Zato se del signala, ki je pripotoval na konec linije, odbije. Odbojni koeficient ρ_b določa kolikšen del signala se odbije.

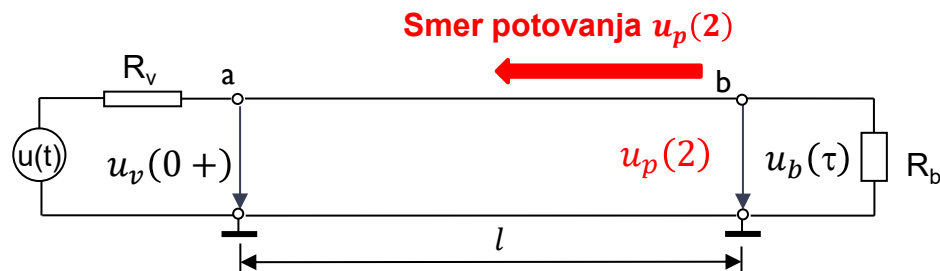


Napetost signala v točki b izračunamo v času τ .

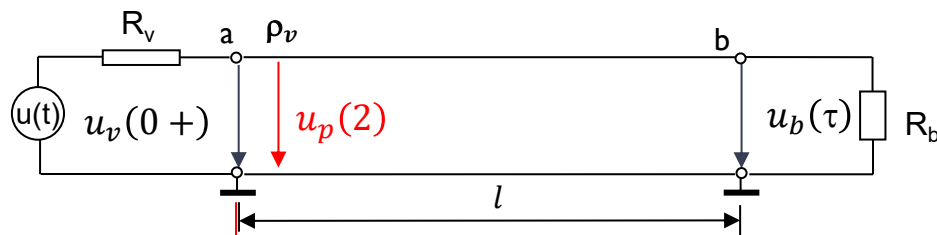
$$u_b(\tau) = u_b(0-) + u_p(1) + u_p(1) \cdot \rho_b$$

$$u_p(1) \cdot \rho_b = u_r(1) \quad (\text{r-reflection}),$$

Odbiti del signala $u_r(1)$ potuje nazaj proti vходу linije (točka a), zato je to drugi potujoči val, označen z $u_p(2) = u_r(1)$.



- $u_p(2)$ potuje po liniji in po času τ pripotuje nazaj na vhod (točka a), to je ob času (2τ) .

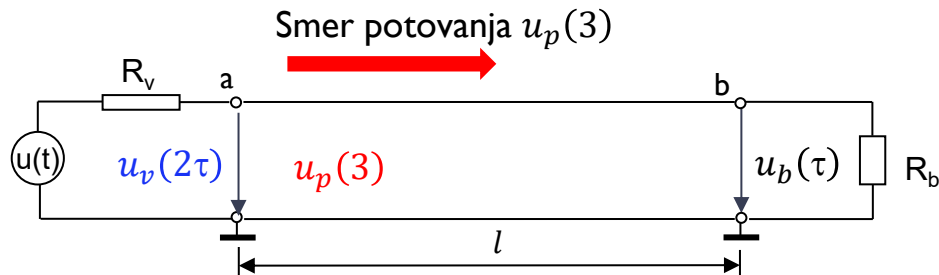


Napetost signala v točki a izračunamo v času 2τ .

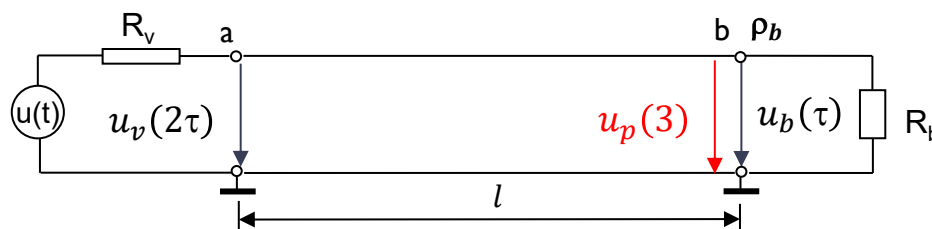
$$u_v(2\tau) = u_v(0+) + u_p(2) + u_p(2) \cdot \rho_v$$

$$u_p(2) \cdot \rho_v = u_r(2)$$

Odbiti del signala $u_r(2)$ potuje proti koncu linije (točka b), zato je to tretji potujoči val, označen z $u_p(3) = u_r(2)$.



- $u_p(3)$ **potuje** po liniji in po času τ **pripotuje** na konec (točka b), to je ob času (3τ) .

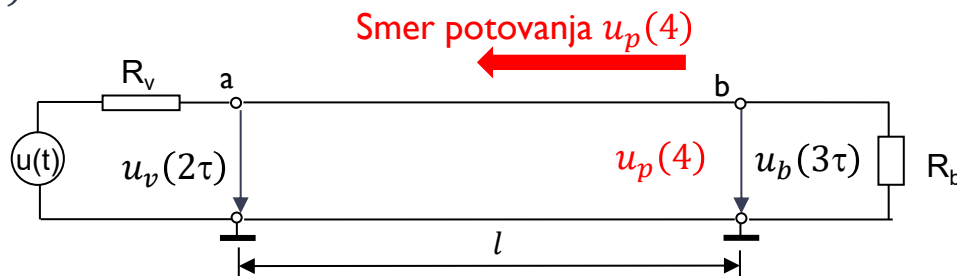


Napetost signala v točki b izračunamo v času 3τ .

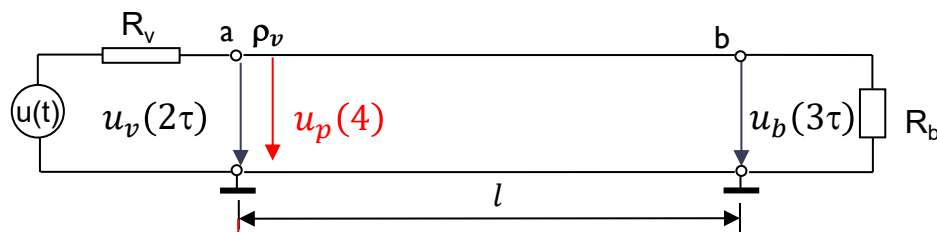
$$u_b(3\tau) = u_b(\tau) + u_p(3) + u_p(3) \cdot \rho_b$$

$$u_p(3) \cdot \rho_b = u_r(3)$$

Odbiti del signala $u_r(3)$ **potuje** nazaj proti vходу linije (točka a), zato je to četrti potujoči val označen z $u_p(4) = u_r(3)$.



- $u_p(4)$ **potuje** po liniji in po času τ **pripotuje** nazaj na vhod (točka a), to je ob času (4τ) .

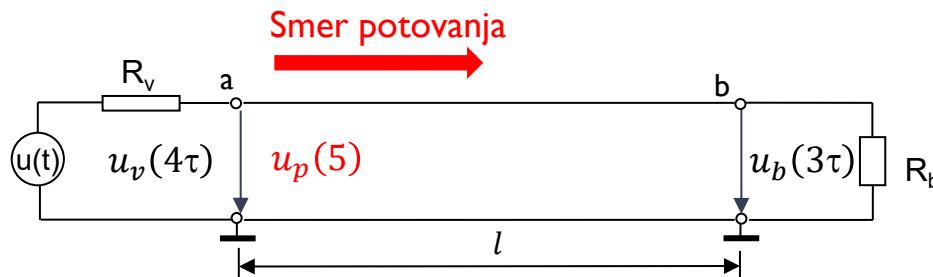


Napetost signala v točki a izračunamo v času 4τ .

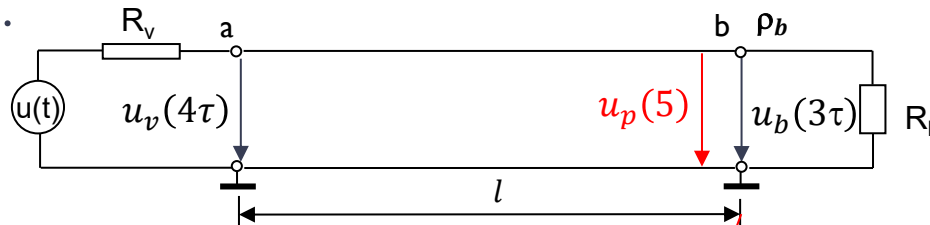
$$u_v(4\tau) = u_v(2\tau) + u_p(4) + u_p(4) \cdot \rho_v$$

$$u_p(4) \cdot \rho_v = u_r(4)$$

Odbiti del signala $u_r(4)$ **potuje** proti izhodu linije (točka b), zato je to peti potujoči val označen z $u_p(5) = u_r(4)$.



- $u_p(5)$ potuje po liniji in po času τ pripotuje na konec (točka b), to je ob času (5τ).



Napetost signala v točki b izračunamo v času 5τ .

$$u_b(5\tau) = u_b(3\tau) + u_p(5) + u_p(5) \cdot \rho_b$$

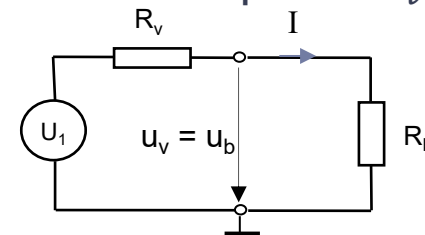
...

- Ponavljamo postopek izračuna napetosti odbojev na liniji v točkah a in b, vse dokler smatramo, da odboji vplivajo na signal (v praksi do $\approx 10\tau$).

- Ko dosežemo **stacionarno stanje I** lahko izračunamo končno napetost $u_v(x\tau)$ po Ohmovem zakonu (v praksi $n \geq 10\tau$).

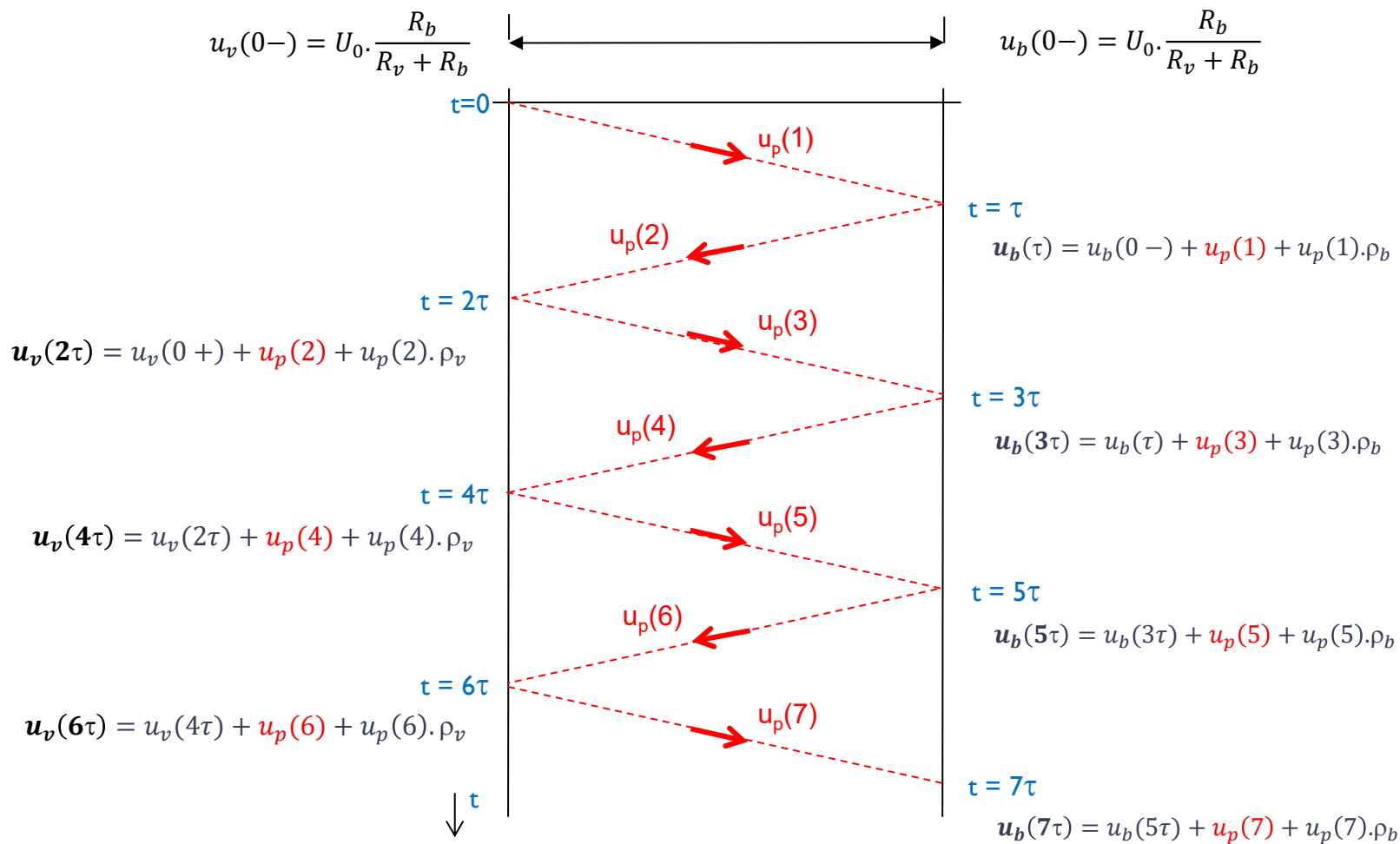
$$u_v(x\tau) = u_b(x\tau) = \frac{U_1}{R_v + R_b} R_b$$

x – število potovanj pri upoštevanju odbojev



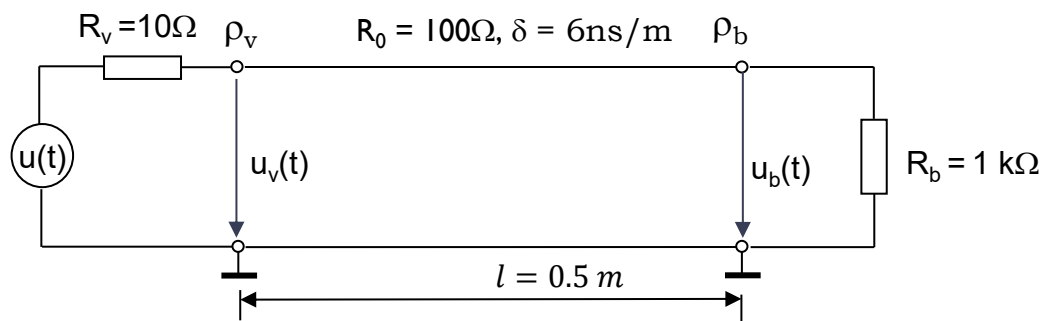
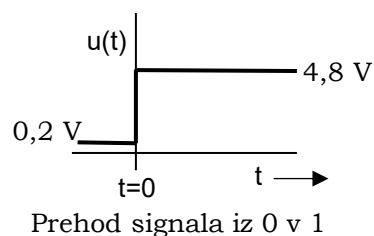
□ Mrežni diagram odbojev za $n = 7$ potovanj (od $t = 0$ do $t = 7\tau$)

$\tau = \delta l$... čas potovanja = karakt. zakasnitev * dolžina linije



Primer: Izračun odbojev

- Določimo potek signalov $u_v(t)$ na vhodu (a) in $u_b(t)$ na izhodu (b) do časa $t = 7\tau$ linije dolžine $l=0,5$ m. Signal se na oddajniku ob času $t = 0$ spremeni iz nizkega (0) v visoko stanje (1). Karakteristična upornost linije $R_0 = 100 \Omega$, izhodna upornost oddajnika $R_{IZH} = 10 \Omega$, vhodna upornost sprejemnika $R_{VH} = 1 \text{ K} \Omega$, zakasnitev signala na liniji $\delta = 6 \text{ ns/m}$.



- Upornosti: R_v , R_b, R_0
- Čas potovanja signala po liniji: $\tau = l \cdot \delta = 0,5 \text{ [m]} \cdot 6 \text{ [ns/m]} = 3 \text{ ns}$
- Odbojna koeficienta ρ_v in ρ_b :

$$\rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0} = \frac{10 - 100}{10 + 100} = -0,82,$$

$$\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} = \frac{1000 - 100}{1000 + 100} = 0,82$$

Napetost na vhodu v linijo pred časom $t=0$ je enak napetosti na izhodu iz linije

$$u_v(0-) = u_b(0-) = \frac{U_0}{R_v + R_b} R_b = \frac{0,2 \cdot 1000}{10 + 1000} = 0,2 \text{ [V]}$$

$$u_v(0+) = u_v(0-) + \frac{\Delta U}{R_v + R_0} R_0 = 0,2 + \frac{4,6 \cdot 100}{10 + 100} = 0,2 + 4,18 = 4,38 \text{ [V]}$$

$$u_p(1) = 4,18 \text{ [V]}$$

$$u_b(\tau) = u_b(0-) + u_p(1) + u_p(1) \cdot \rho_b = 0,2 + 4,18 + 4,18 \cdot 0,82 = \\ = 0,2 + 4,18 + 3,43 = 7,81 \text{ [V]}$$

$$u_p(2) = 3,43 \text{ [V]}$$

$$u_v(2\tau) = u_v(0+) + u_p(2) + u_p(2) \cdot \rho_v = 4,38 + 3,43 + 3,43 \cdot -0,82 = \\ = 4,38 + 3,43 - 2,81 = 5,00 \text{ [V]}$$

$$u_p(3) = -2,81 \text{ [V]}$$

$$u_b(3\tau) = u_b(\tau) + u_p(3) + u_p(3) \cdot \rho_b = 7,81 - 2,81 - 2,81 \cdot 0,82 = \\ = 7,81 - 2,81 + 2,30 = 2,70 \text{ [V]}$$

$$u_p(4) = -2,30 \text{ [V]}$$

$$u_v(4\tau) = u_v(2\tau) + u_p(4) + u_p(4) \cdot \rho_v = 5,00 - 2,30 + (-2,30) \cdot (-0,82) =$$
$$= 5,00 - 2,30 + 1,89 = 4,59 \text{ [V]}$$

$$u_p(5) = 1,89 \text{ [V]}$$

$$u_b(5\tau) = u_b(3\tau) + u_p(5) + u_p(5) \cdot \rho_b = 2,70 + 1,89 + 1,89 \cdot 0,82 =$$
$$= 2,70 + 1,89 + 1,55 = 6,14 \text{ [V]}$$

$$u_p(6) = 1,55 \text{ [V]}$$

$$u_v(6\tau) = u_v(4\tau) + u_p(6) + u_p(6) \cdot \rho_v = 4,59 + 1,55 + 1,55 \cdot (-0,82) =$$
$$= 4,59 + 1,55 - 1,27 = 4,87 \text{ [V]}$$

$$u_p(7) = -1,27 \text{ [V]}$$

$$u_b(7\tau) = u_b(5\tau) + u_p(7) + u_p(7) \cdot \rho_b = 6,14 - 1,27 + (-1,27) \cdot 0,82 =$$
$$= 6,14 - 1,27 - 1,04 = 3,83 \text{ [V]}$$

$$u_p(8) = -1,04 \text{ [V]}$$

$$u_v(8\tau) = u_v(6\tau) + u_p(8) + u_p(8) \cdot \rho_v = 4,87 - 1,04 + (-1,04) \cdot (-0,82) =$$
$$= 4,87 - 1,04 + 0,85 = 4,68 \text{ [V]}$$

$$u_p(9) = 0,85 \text{ [V]}$$

$$\begin{aligned}
 u_b(9\tau) &= u_b(7\tau) + u_p(9) + u_p(9) \cdot \rho_b = 3,83 + 0,85 + 0,85 \cdot 0,82 = \\
 &= 3,83 + 0,85 + 0,7 = 4,93 \text{ [V]} \\
 u_p(10) &= 0,7 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$

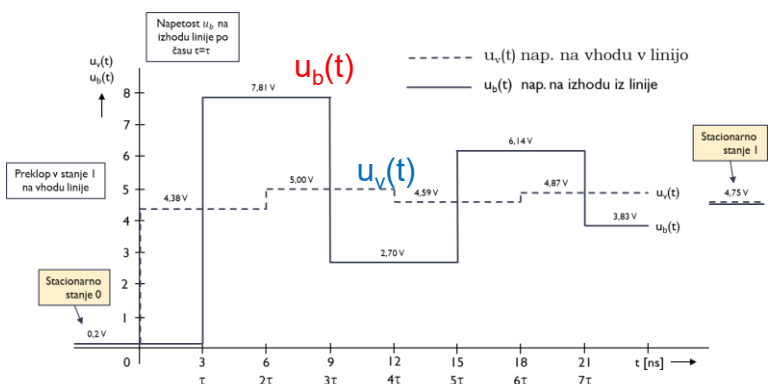
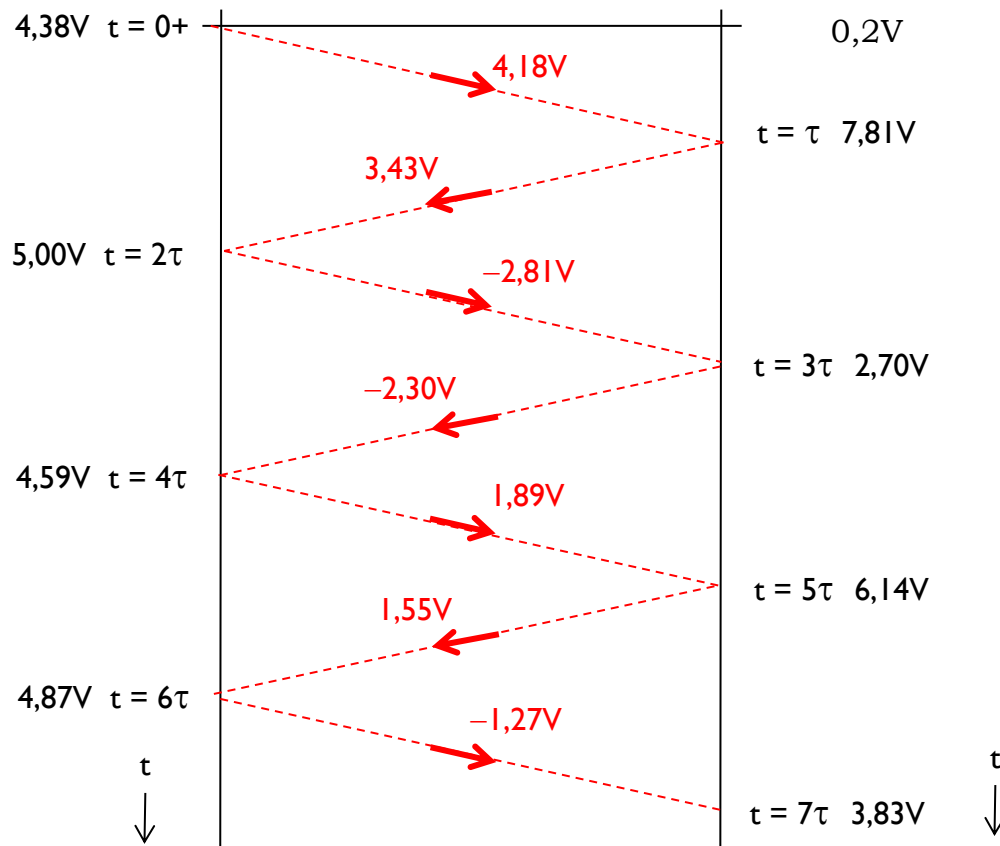
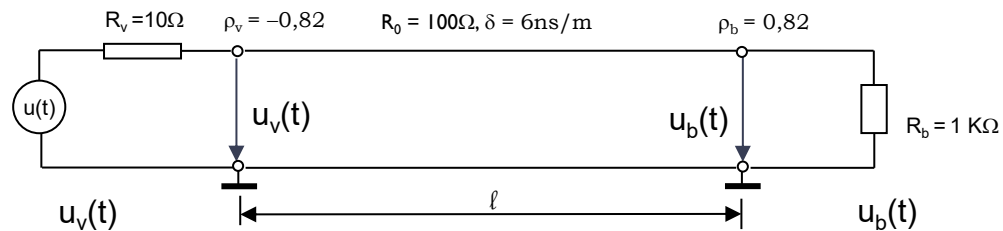
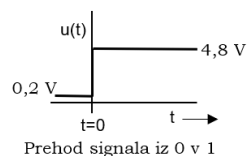
$$\begin{aligned}
 u_v(10\tau) &= u_v(8\tau) + u_p(10) + u_p(10) \cdot \rho_v = 4,68 + 0,7 + 0,7 \cdot (-0,82) = \\
 &= 4,68 + 0,7 - 0,57 = 4,81 \text{ [V]} \\
 u_p(11) &= -0,57 \text{ [V]}
 \end{aligned}$$

... po času $t = 10\tau$ lahko smatramo, da odboji ne vplivajo več in izračunamo

$$u_v(10\tau) = u_b(10\tau) = \frac{U_1}{R_v + R_b} R_b = \frac{4,8 \text{ [V]}}{10 + 1000} \cdot 1000 = 4,75 \text{ [V]}$$

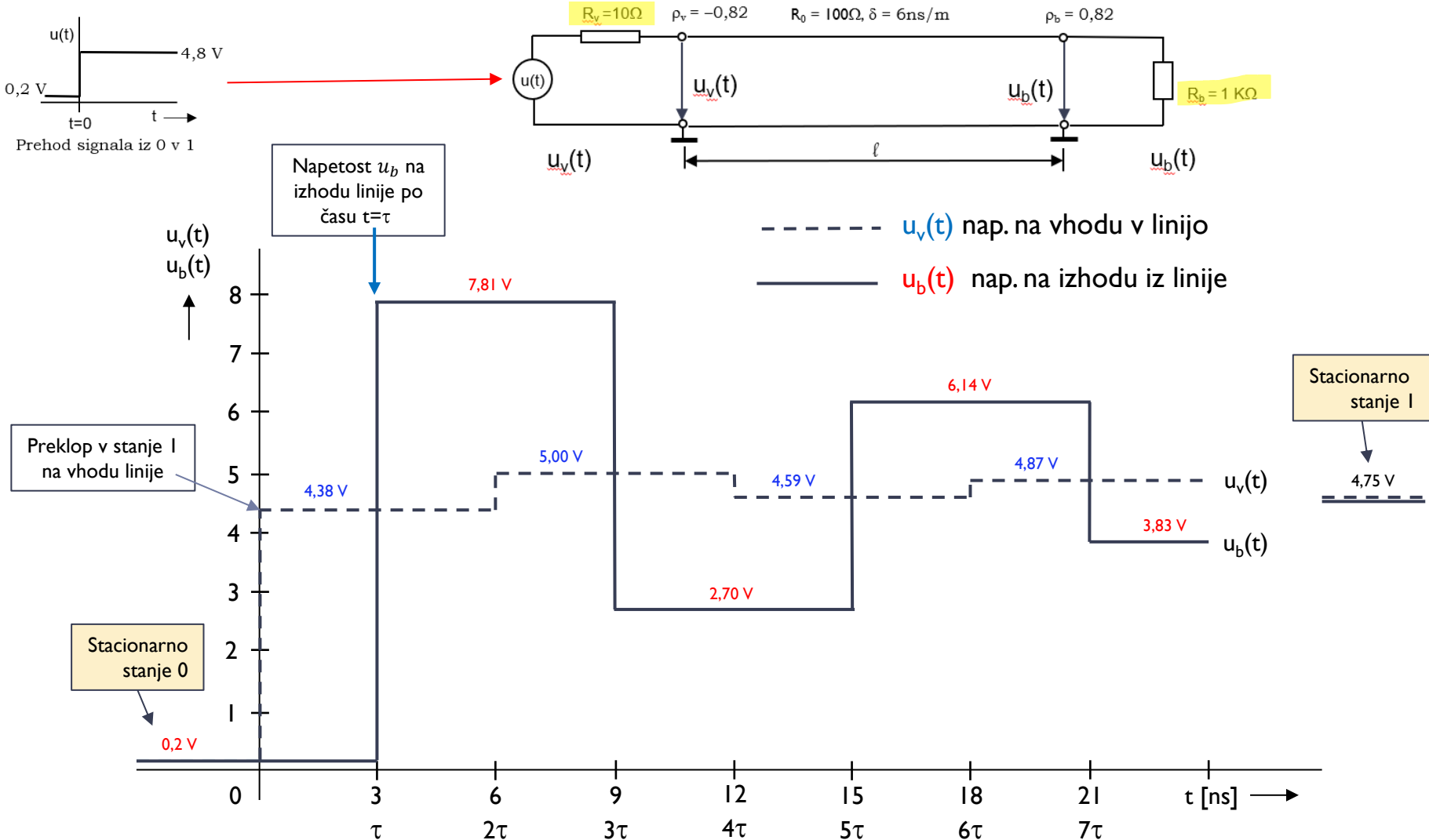
Primer: Izračun odbojev (grafični prikaz)

Mrežni diagram – prikazuje odbite, to je 'potujoče' valove, $u_p(t)$ ki potujejo po liniji v eno in drugo smer v odvisnosti od časa.



Primer: Izračun odbojev

(Časovni diagram poteka napetosti na vhodu in izhodu iz linije do časa $t = 7\tau$)



Primer: Izračun odbojev

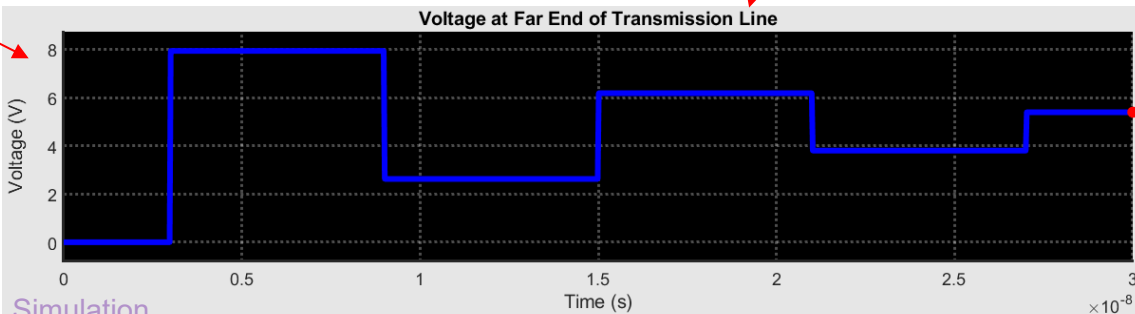
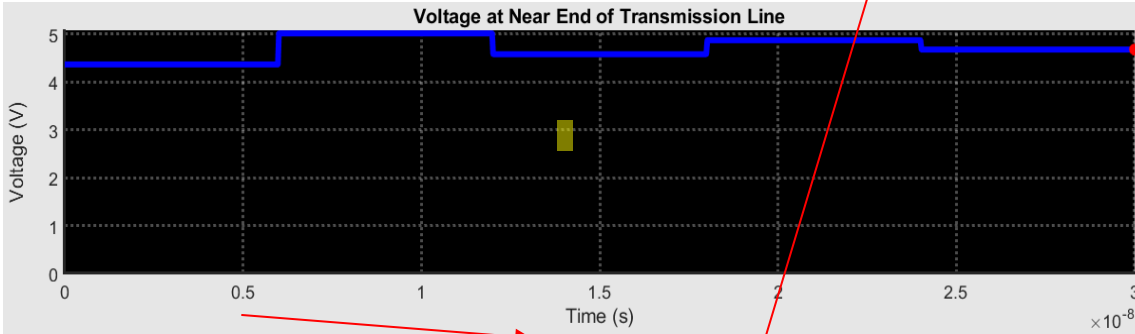
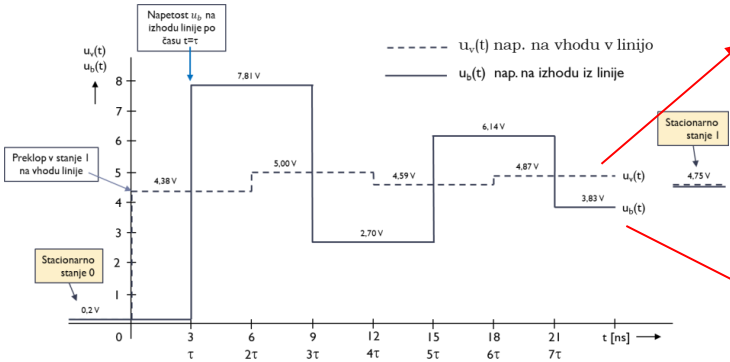
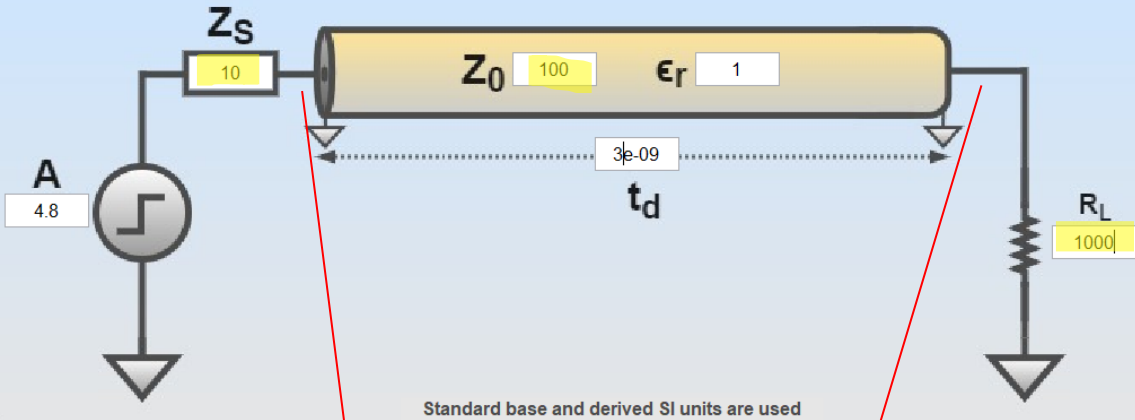
Simulacija :

Animation Settings



Animation Speed

Stop Time



https://github.com/keatoncscheible/Transmission_Lines_Simulation

Primer: Izračun odbojev

https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

Simulacija :

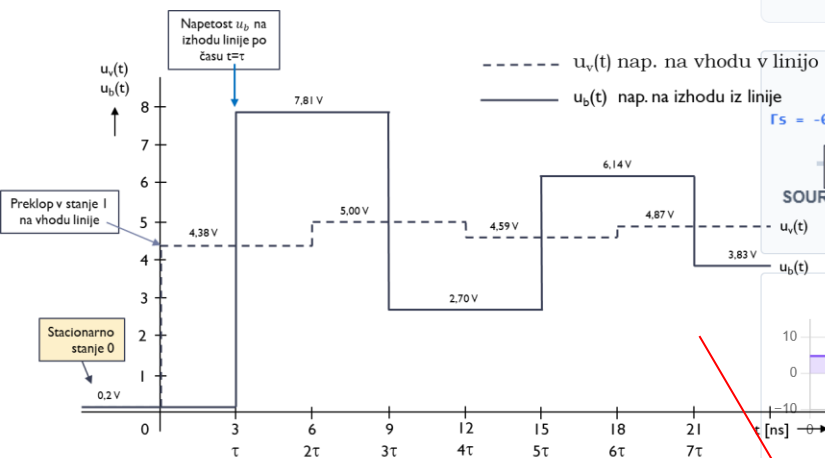
Transmission Line Reflections

Dynamic Impedance & Voltage Steps

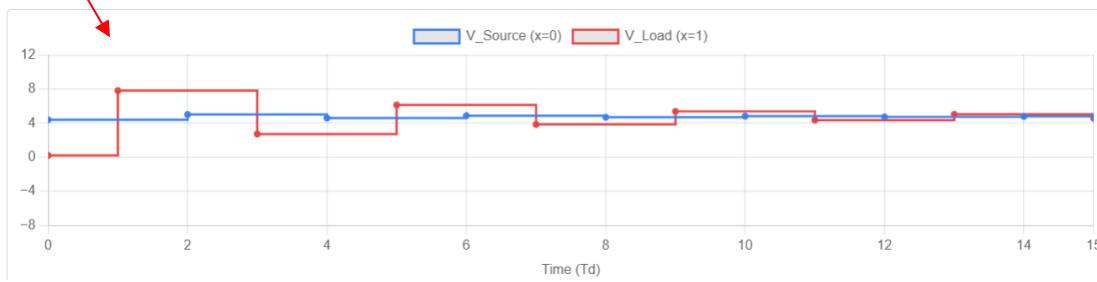
FINAL STEADY STATE V

4.752 V

V LOW (V) 0.2 V HIGH (V) 4.8 SOURCE Z₀ (Ω) 10 LINE Z₀ (Ω) 100 LOAD Z₀ (Ω) 1000 ANIM SPEED 1.9x

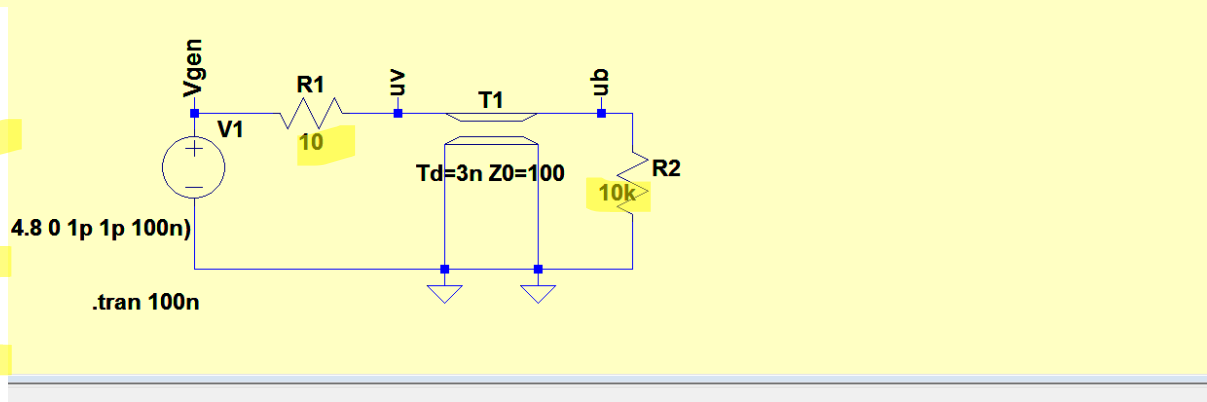
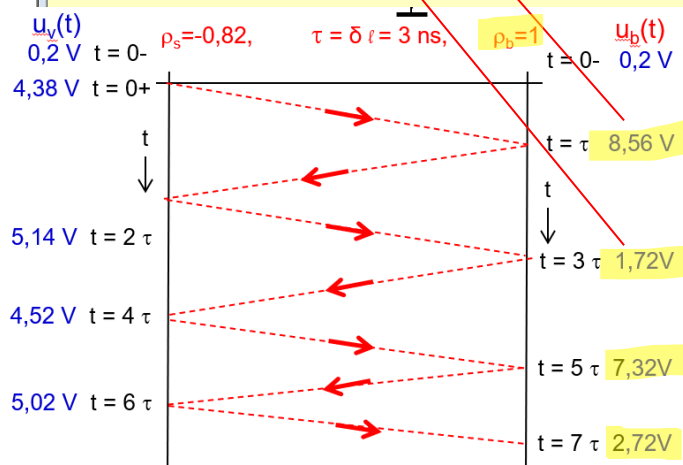
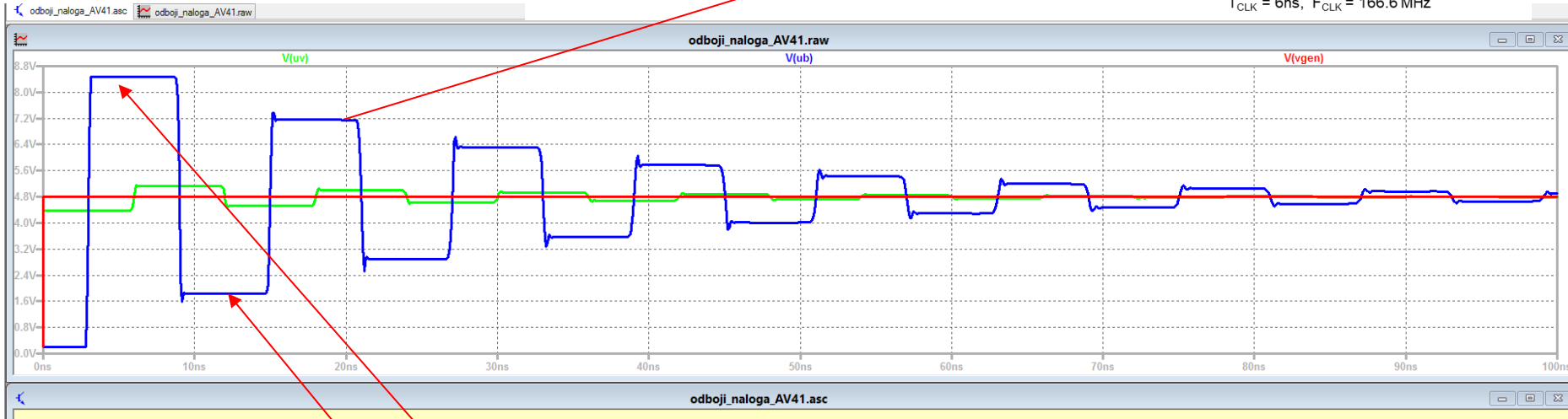
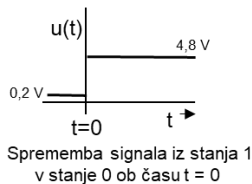
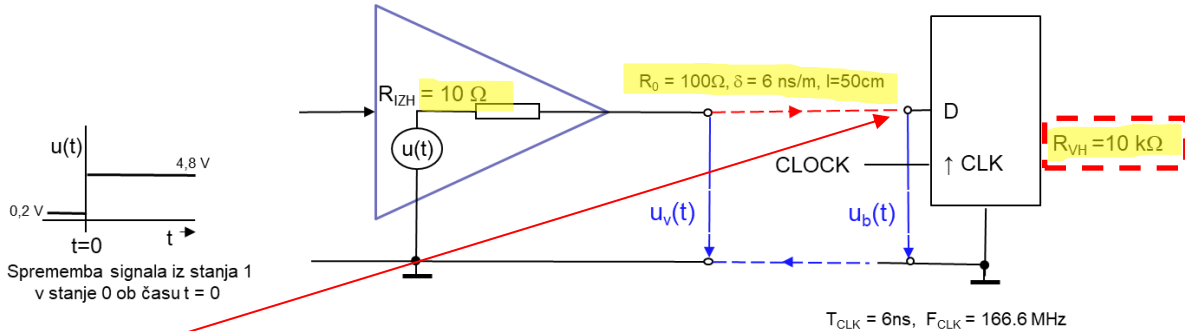


Play Reset



Primer: Izračun odbojev

Simulacija LTSpice:



Primer: Izračun odbojev

https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

Simulacija :

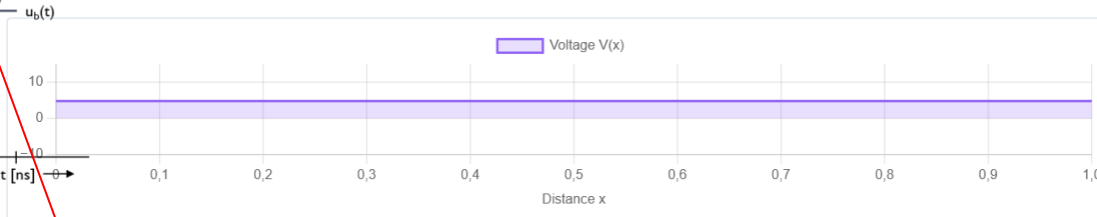
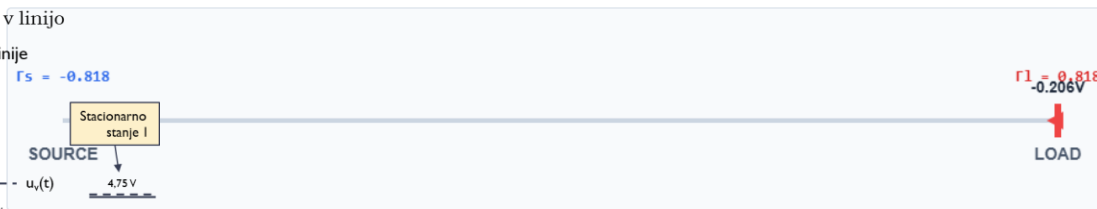
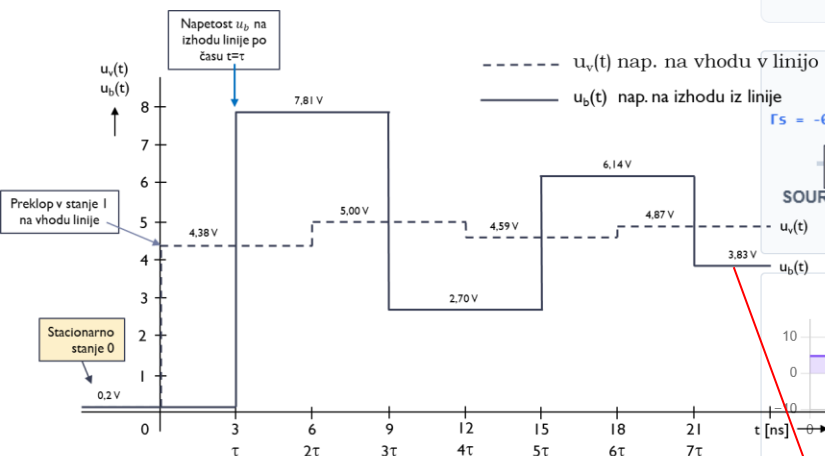
Transmission Line Reflections

Dynamic Impedance & Voltage Steps

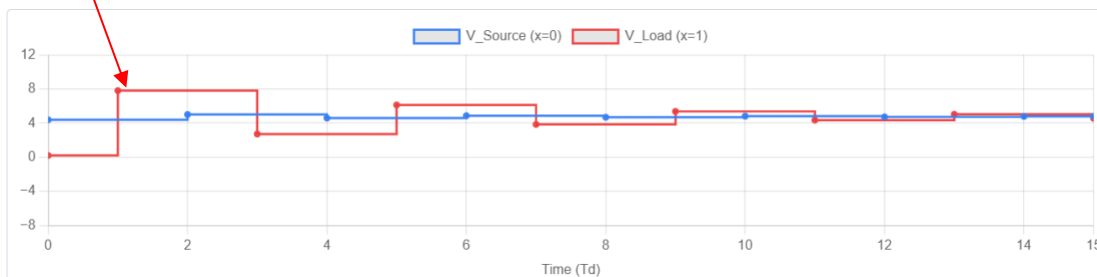
FINAL STEADY STATE V

4.752 V

V LOW (V) 0.2 V HIGH (V) 4.8 SOURCE Z₀ (Ω) 10 LINE Z₀ (Ω) 100 LOAD Z₀ (Ω) 1000 ANIM SPEED 1.9x

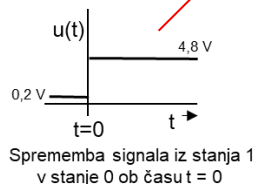


Play Reset



Primer: Izračun odbojev

Simulacija LTSpice:



Transmission Line Reflections

Continuous Time Oscilloscope View

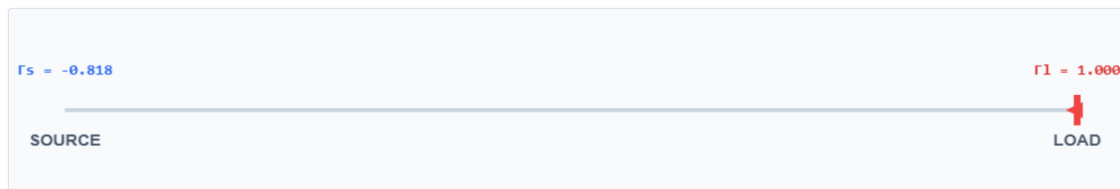
ACTIVE EDGE

-1.026 V

STEADY STATE V

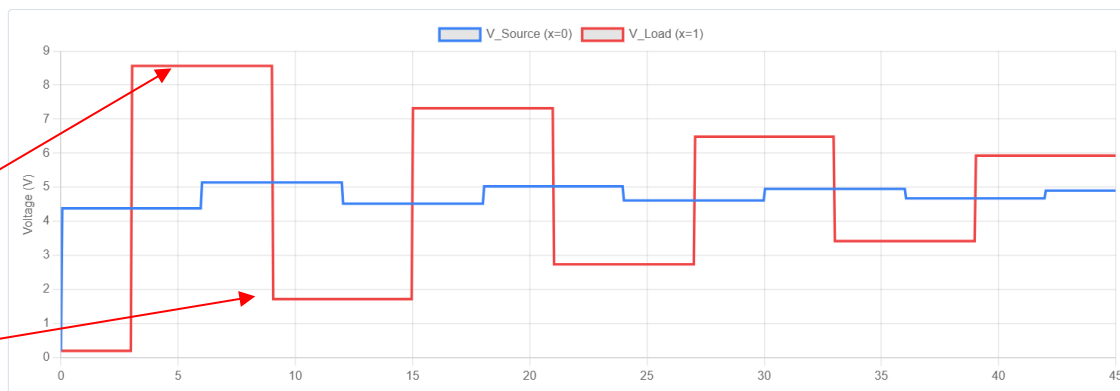
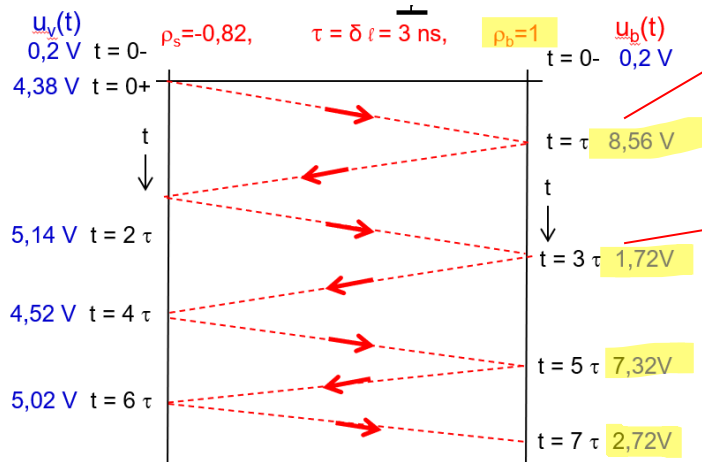
4.800 V

V LOW (V)	V HIGH (V)	SOURCE Z ₀ (Ω)	LINE Z ₀ (Ω)
0.2	4.8	10	100
LOAD Z ₀ (Ω)	DELAY TD (NS)	RISE TIME TR (NS)	ANIM SPEED
100000000	3	0	1.0x



Play

Reset



https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

Povzetek analize odbojev

□ V praksi se pogosto uporablja :

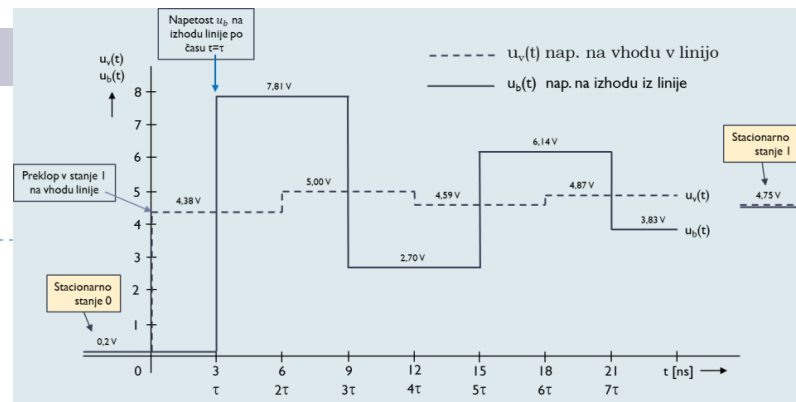
- $R_v < R_0$
 - izhodna upornost oddajnika je manjša od karakteristične upornosti linije.
- $R_b \gg R_0$
 - vhodna upornost sprejemnika je veliko večja od karakteristične upornosti linije.

□ Za zgornje upornosti je odbojni koeficient

- na vhodu linije negativen ($\rho_v \ll 0$)
- na izhodu linije pa pozitiven in blizu 1 ($\rho_b > 0$ in $\rho_b \approx 1$).

□ Pri analizi odbojev je treba upoštevati še

- hitrost (preklopne čase) čipov in
- hitrost spreminjanja signalov iz enega stanja v drugo (ang. rise/fall time).

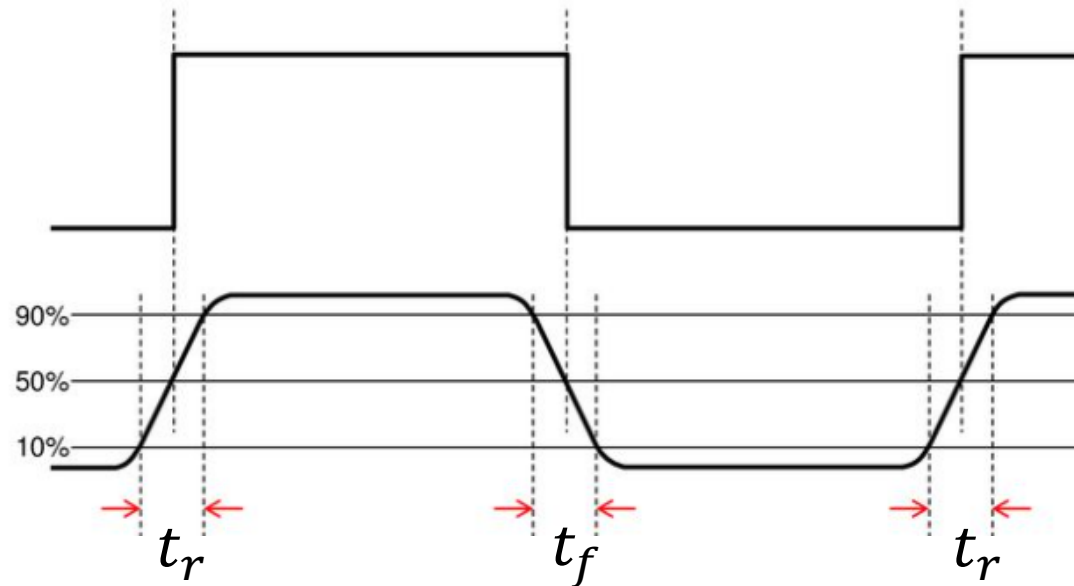


6.2 Vpliv časa vzpona signala (t_r) na odboje

- Čas vzpona (ang. rise time) - t_r se pojavi pri spremembi stanja iz 0 v 1.
 - običajno čas spremembe napetosti iz 10 % do 90%.
- Čas padca (ang. fall time) - t_f se pojavi pri spremembi stanja iz 1 v 0.
 - običajno čas spremembe napetosti iz 90 % do 10%.

Idealen signal

Realen signal



Poimenovanja (odboji):

ΔU je višja-nižja

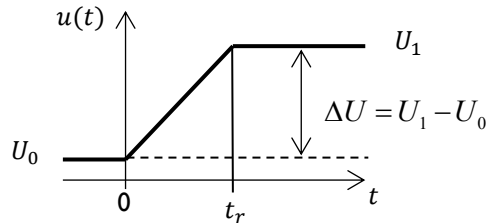
U_I je višja nap.

U_0 je nižja nap.

□ Signal je podan kot

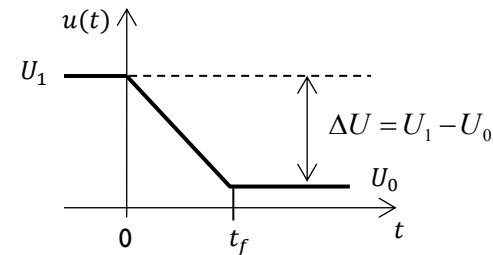
- Stacionarno stanje pred časom $t = 0$
- Linearno naraščajoča ali padajoča funkcija v času od 0 do t_r
- Stacionarno stanje od časa t_r dalje

sprememba signala iz 0 v 1



$$\begin{aligned} u(t) &= U_0 & t < 0 \\ u(t) &= U_0 + \Delta U \cdot \frac{t}{t_r} & 0 \leq t \leq t_r \\ u(t) &= U_1 & t > t_r \end{aligned}$$

sprememba signala iz 1 v 0



$$\begin{aligned} u(t) &= U_1 & t < 0 \\ u(t) &= U_0 + \Delta U \cdot \left(1 - \frac{t}{t_r}\right) & 0 \leq t \leq t_r \\ u(t) &= U_0 & t > t_r \end{aligned}$$

□ Vpliv časa vzpona t_r na odboje

- Daljše linije ($t_r \ll \tau$) – ne upoštevamo časa vzpona
- Kratke linije – potujoči val doseže maksimalno vrednost šele po času t_r

-
- Predpostavljali smo, da je čas vzpona signala mnogo manjši od časa potovanja signala po liniji $t_r \ll \tau$, oziroma $t_r = 0$.

Pri kratkih linijah zgornja trditev ne velja več.

- Pri računanju odbojev bomo upoštevali čas vzpona t_r , kar pomeni, da vsak potujoči val doseže svojo maksimalno vrednost šele po času t_r .

- Vzemimo prejšnji primer napetostno napajane linije ($R_v < R_0$ in $R_v \gg R_0$).

- Čas vzpona signala t_r naj bo enak naslednjim časom potovanja signala (τ) po liniji:

$$t_r = \tau$$

$$t_r = 2\tau$$

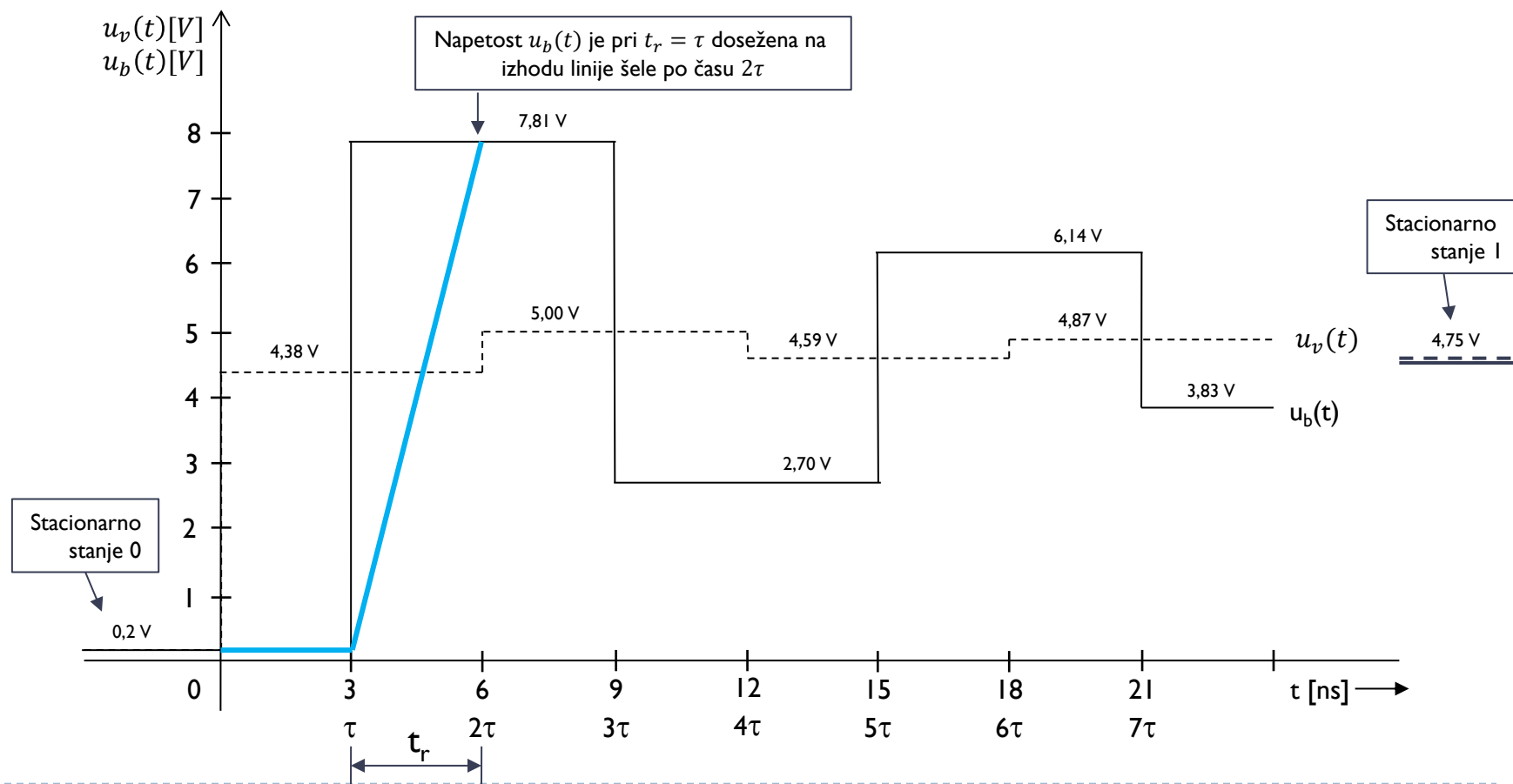
$$t_r = 3\tau$$

- Čas vzpona vpliva seveda na obliko signala $u_v(t)$ na vhodu v linijo in prav tako na obliko signala $u_b(t)$ na izhodu iz linije.

- Na slikah je prikazan z odboji samo potek signala $u_b(t)$ na izhodu iz linije, to je na vhodu v sprejemnik oziroma na bremenu.

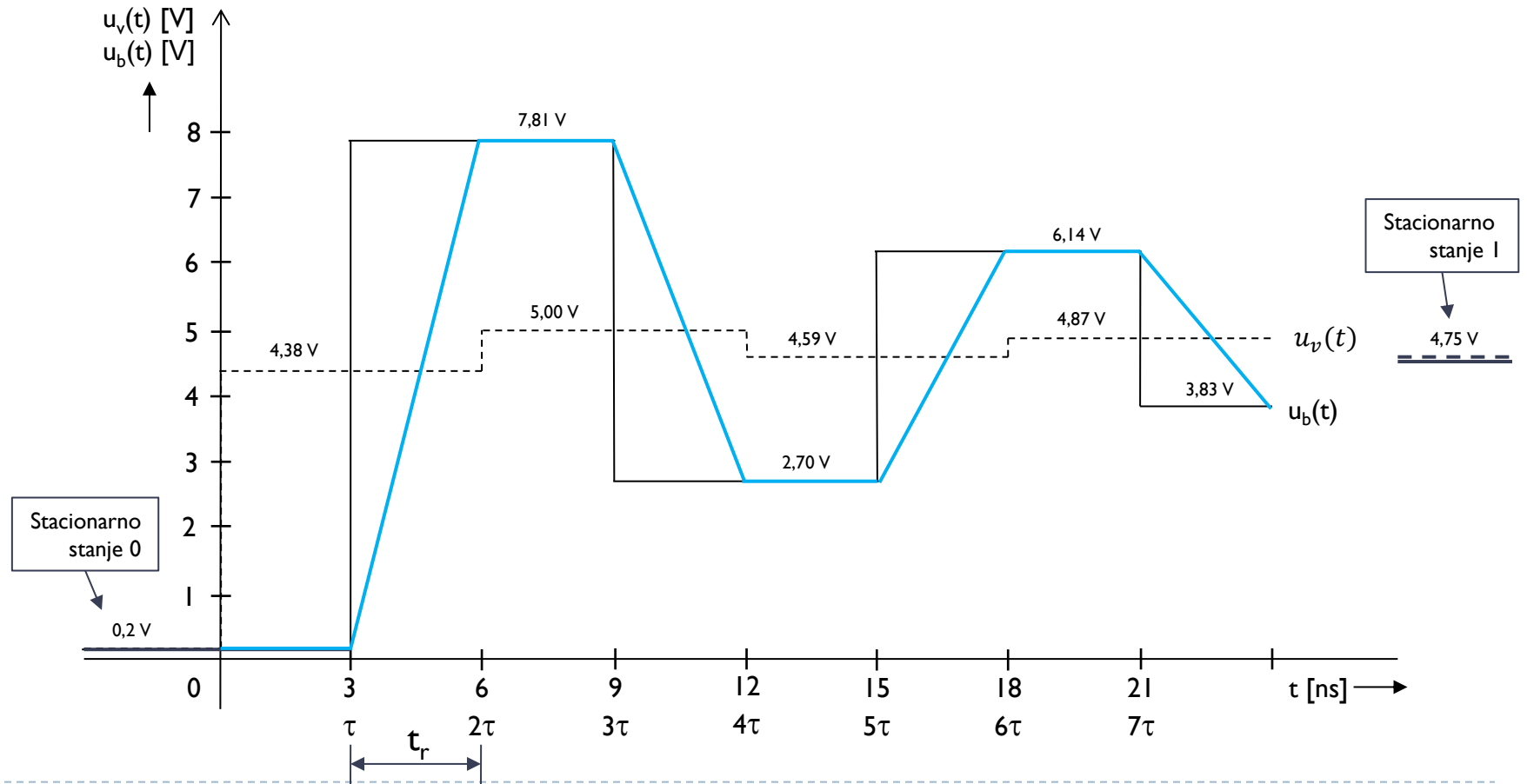
$t_r = \tau$: Čas vzpona signala t_r je enak času potovanja signala po liniji (τ)

- Vsak potujoči val doseže svojo končno vrednost na izhodu šele po času $t_r = \tau = 3$ [ns].
- V časovnem diagramu so prikazani: vhodni signal v linijo $u_v(t)$ - črtkana črta; idealni izhodni signal iz linije $u_b(t)$ - tanka polna črta; izhodni signal iz linije $u_b(t)$ pri $t_r = \tau$ - modra črta.



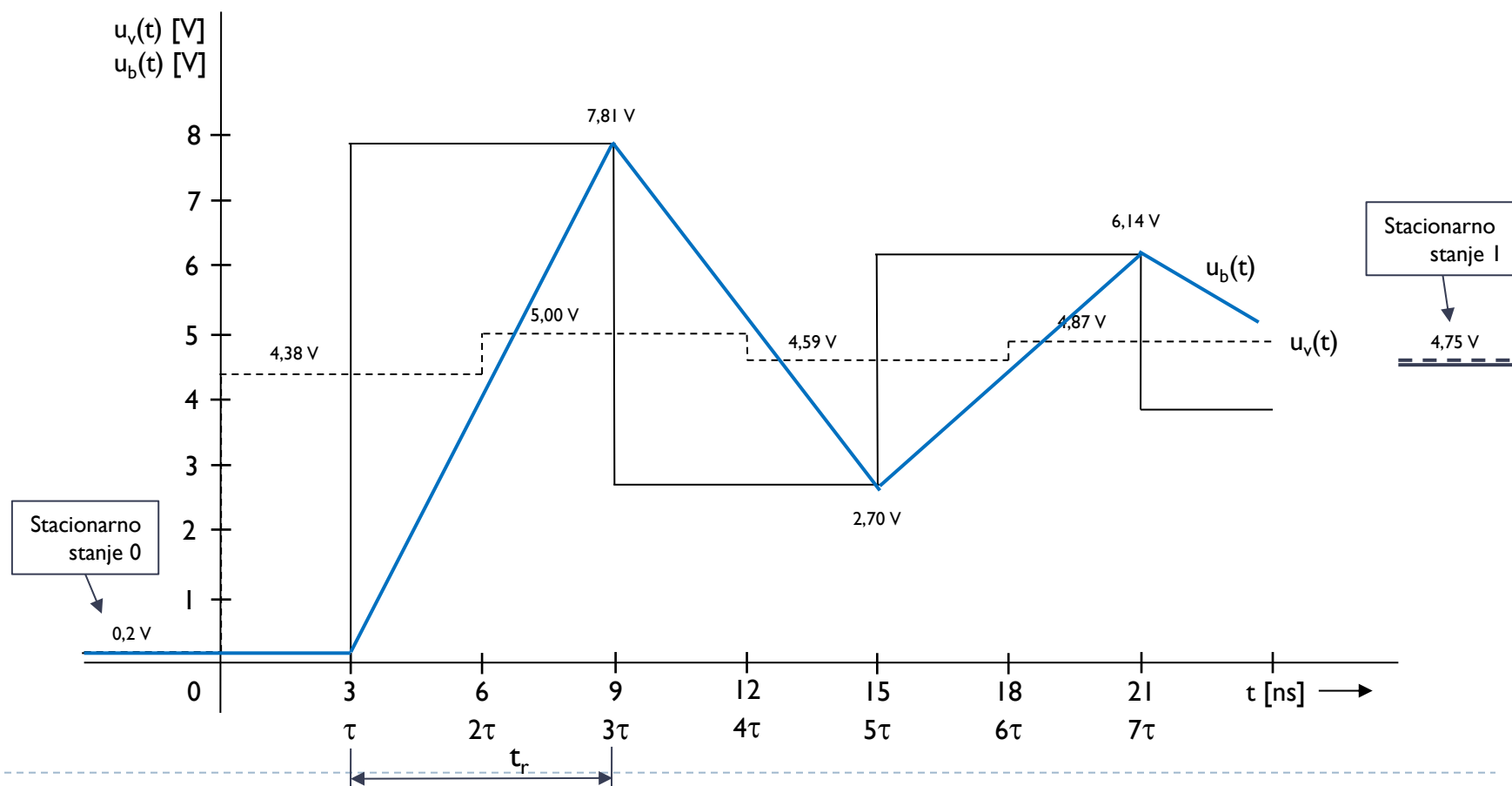
$t_r = \tau$: Čas vzpona signala t_r je enak času potovanja signala po liniji (τ)

- Izhodni signal za čas vzpona $t_r = \tau$



$t_r = 2\tau$: Čas vzpona signala t_r je enak dvojnemu času potovanja signala po liniji (2τ)

- vsak potujoči val dosegel svojo maksimalno vrednost v trenutku, ko bo prispel naslednji potujoči val – dobimo trikotne valove.
- Trajanje maksimalne vrednosti je omejeno samo na en trenutek pri $3\tau, 5\tau, \dots$



$t_r = 2\tau$: Čas vzpona signala t_r je enak dvojnemu času potovanja signala po liniji (2τ)

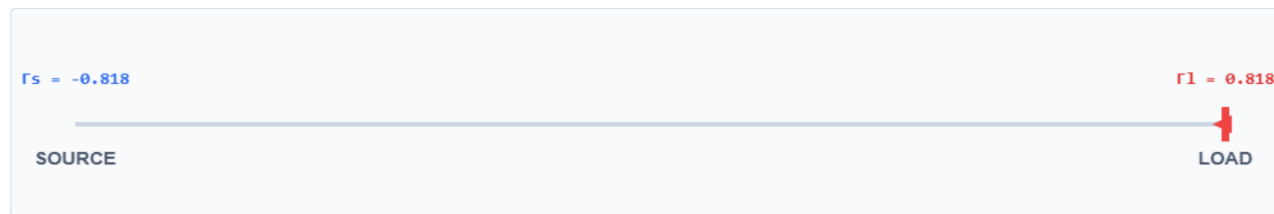
Transmission Line Reflections

Continuous Time Oscilloscope View

ACTIVE EDGE
-0.206 V

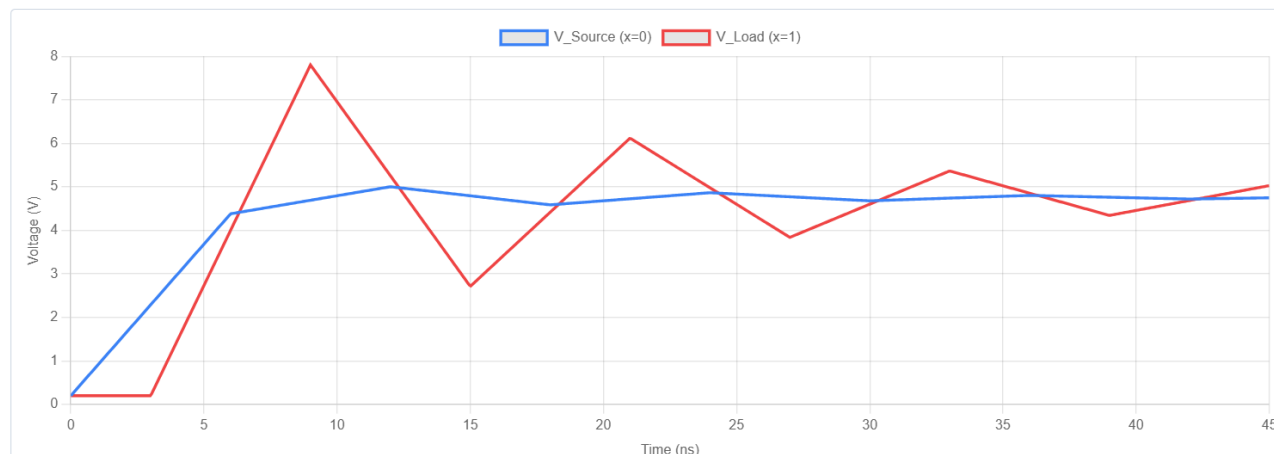
STEADY STATE V
4.752 V

V LOW (V) 0.2	V HIGH (V) 4.8	SOURCE Z _s (Ω) 10	LINE Z ₀ (Ω) 100
LOAD Z _L (Ω) 1000	DELAY TD (NS) 3	RISE TIME TR (NS) 6	ANIM SPEED 2.6x



Play

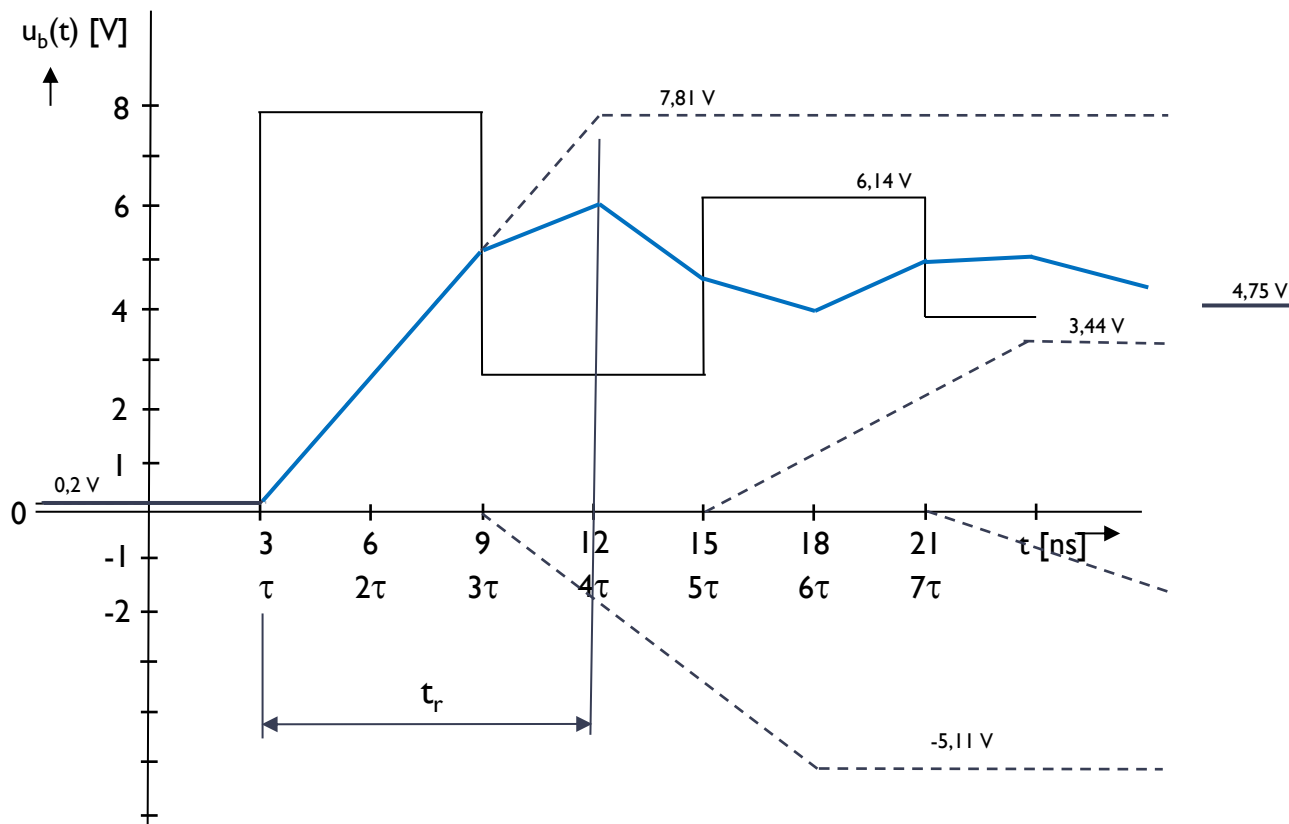
Reset



https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

$t_r = 3\tau$: Čas vzpona signala t_r je enak trojnemu času potovanja signala po liniji (3τ),
 ($t_r > 2\tau$)

- Vsak val doseže samo 2/3 svoje končne vrednosti, ko bo že prišel nov odbiti val (2τ).
- Prikazana je izhodna napetost $u_b(t)$



$t_r = 3\tau$: Čas vzpona signala t_r je enak trojnemu času potovanja signala po liniji (3τ): $t_r > 2\tau$

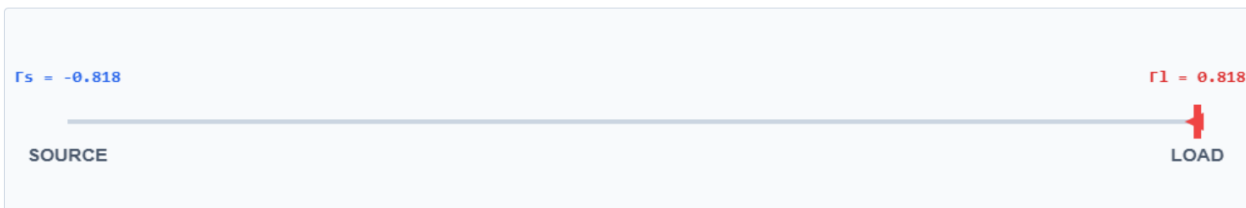
Transmission Line Reflections

Continuous Time Oscilloscope View

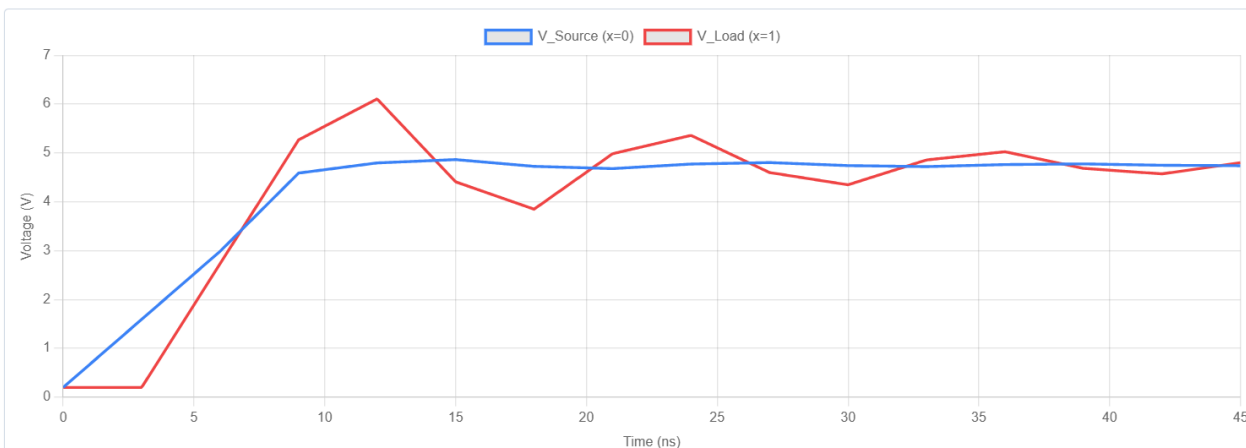
ACTIVE EDGE
-0.206 V

STEADY STATE V
4.752 V

V LOW (V) 0.2	V HIGH (V) 4.8	SOURCE Z, (Ω) 10	LINE Z ₀ (Ω) 100
LOAD Z, (Ω) 1000	DELAY TD (NS) 3	RISE TIME TR (NS) 9	ANIM SPEED 3.0x



Play Reset

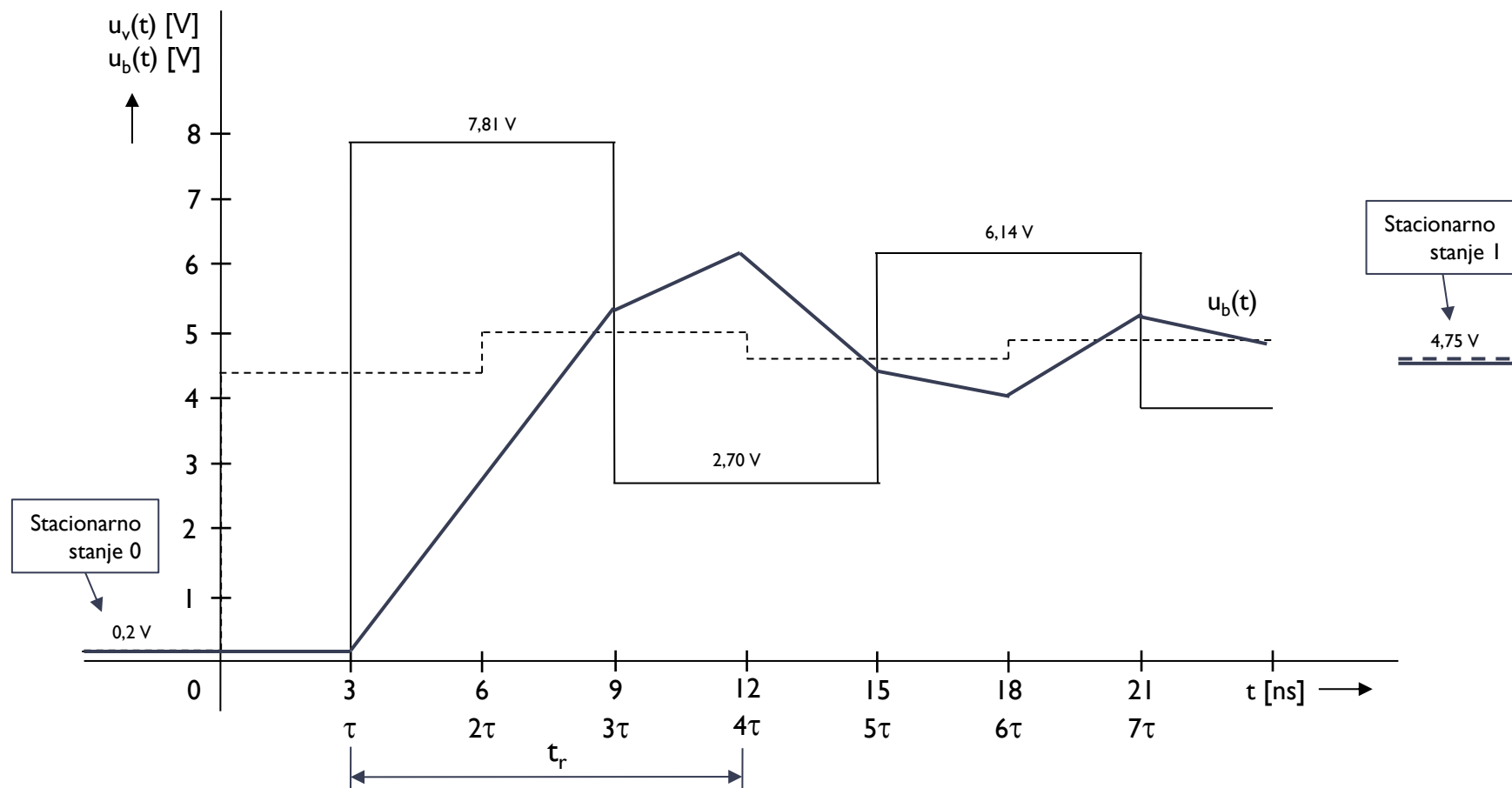


https://lapsylab.github.io/transmission_lines_reflections.html

$t_r = 3\tau$: Čas vzpona signala t_r je enak trojnemu času potovanja signala po liniji (3τ),

□ Rešitev je podana za čas vzpona $t_r = 3\tau$:

- Prikazani sta vhodna napetost $u_v(t)$ in izhodna napetost $u_b(t)$



Povzetek vpliva časa vzpona t_r na odboje

- ❑ Velikost (amplituda, trajanje) napetostnih sprememb se z večanjem **razmerja t_r / τ** manjša
 - ❑ amplituda samo za **$t_r > 2\tau$**
- ❑ Če **povečamo čas vzpona** na $t_r = 10 \tau$, postane **vpliv odbojev zanemarljiv** in linijo lahko smatramo kot idealno zaključeno (brez odbojev). Se pa zato čas v katerem signal doseže svojo končno vrednost zelo podaljša.
- ❑ Čas vzpona, ki je večji od 0, pomeni, da se ustrezni nivo signala na sprejemniku namesto po času τ , pojavi še kasneje.

To povečanje zakasnitve je pri digitalnih sistemih približno za $0,5 t_r$.
- ❑ Sprejemnik zazna spremembo signala šele po zakasnitvi ($\tau + 0,5 t_r$) – to pa zmanjšuje maksimalno hitrost prenosa po liniji.

-
- Pravila ožičenja za posamezne družine integriranih vezij, ki imajo različne čase vzpona, določajo maksimalno dolžino linije, da odboji niso preveliki in ne motijo delovanja logičnih vezij.

- Običajno se zahteva, da je $t_r > 3\tau$, to je $t_r > 3 l \delta$
- Pri tipični zakasnitvi na tiskanih vezjih $\delta = 6,5$ [ns/m] lahko za standardna TTL integrirana vezja s časom vzpona $t_r = 6$ do 8 [ns] izračunamo maksimalno dolžino povezave:

$$l_{max} = \frac{t_r}{3 \delta} = \frac{6 \text{ [ns]}}{3 \cdot 6,5 \left[\frac{\text{ns}}{\text{m}}\right]} = 0,3 \text{ [m]}$$

- To pomeni, da bodo pri povezavah, ki so krajše (ali enake) $0,3$ [m], odboji tako majhni, da ne bodo vplivali na pravilno delovanje.
- Pri daljših povezavah pa je potrebno odboje upoštevati.
- Pri hitrejših vezjih, ki imajo manjši čas vzpona t_r , je seveda maksimalna dolžina linij krajša.

6.3 Omejevanje odbojev

□ V digitalnem sistemu je na tiskanem vezju:

- $R_{IZH} = R_v < R_0$ - izhodna upornost oddajnika je manjša od karakteristične upornosti linije in
- $R_{VH} = R_b \gg R_0$ - vhodna upornost sprejemnika je veliko večja od karakteristične upornosti linije.

□ Problem:

Odboji, ki pri taki konfiguraciji nastanejo, lahko povzročijo **napačno delovanje vezja**.

- Napačni biti na podatkovnih ali naslovnih linijah
- Napačni krmilni signali
- Napačno proženje vezij za prenos urinih signalov

□ Rešitev je v **omejevanju odbojev**, ki jih lahko dosežemo:

- **z večanjem razmerja t_r / τ** (že prikazani primeri za $t_r = \tau, 2\tau, 3\tau$)
- **z zaključitvijo linije** (primeri so v nadaljevanju)

Zaključitev = prilagoditev (izenačenje) upornosti oddajnika in/ali sprejemnika karakteristični upornosti linije

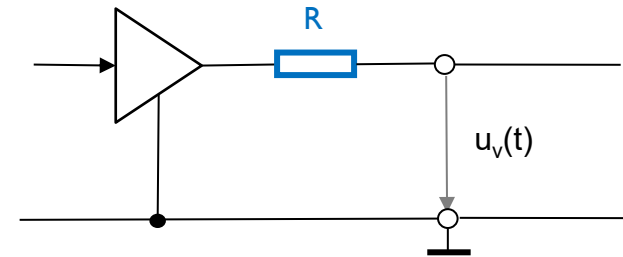
Vrste zaključitev: serijska, paralelna, izmenična (AC), Theveninova, diodna

□ Serijska zaključitev

- Prilagoditveni upor (R) vežemo med izhod oddajnika in vhod v linijo.

- Na vhodu v linijo** želimo doseči, da je **odbojni koeficient** $\rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0} = 0$

- To lahko dosežemo tako, da je $R_v = R_0$,
to pomeni, da je $R_{IZH} + R = R_0$ oziroma
$$R = R_0 - R_{IZH}$$



- Ugotovitve:**

- Na linijo gre samo polovica signala (pol na $R_{IZH} + R$ in pol na R_0)
- Na sprejemni strani je običajno $\rho_b = 1$ (vhodna upornost sprejemnika je visoka $R_b \gg R_0$)
- Odboj je 100 % → napetost se na izhodu linije podvoji in imamo v času $t = \tau$ poln signal)
- Odbiti val iz sprejemne strani sicer potuje nazaj na vhod, kjer ni več odboja.

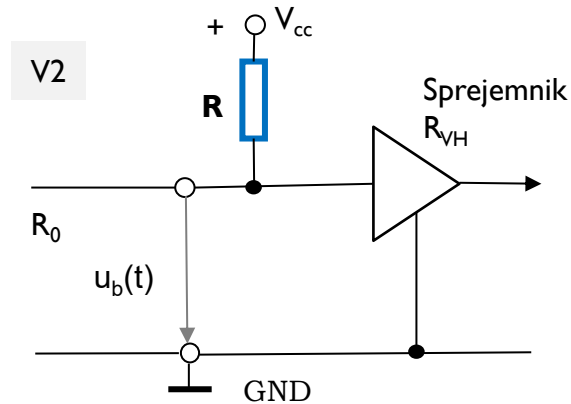
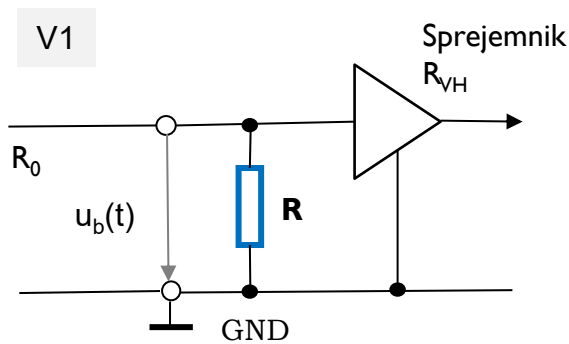
- Prednost:** Takšna zaključitev najmanj obremenjuje oddajnik → potrebujemo en upor za vsako linijo.

- Slabosti:**

- Nelinearni oddajniki: R_{IZH} je različna za stanji 0 in 1 → izbira upora R je problematična.
- Pri linijah z odcepi → polno napetost dobimo šele v času $t = 2\tau$.

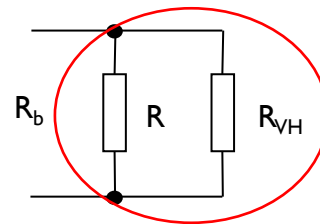
Paralelna zaključitev :

- Na izhodu iz linije želimo doseči, da je odbojni koeficient $\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} = 0$
- Paralelna zaključitev** - zaključitveni upor R poveže izhod linije na maso (ang. pull down) ali na napajalno napetost (ang. pull-up)



$$R_b = \frac{R_{vh} \cdot R}{R_{vh} + R}$$

- vhodno upornost sprejemnika (R_{VH}) prilagodimo karakteristični upornosti linije R_0 .
- Če je $R_{VH} \gg R_0$ ($R_{VH} \rightarrow \infty$) in želimo, da je $\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} = 0$, potem mora biti upornost $R = R_0$



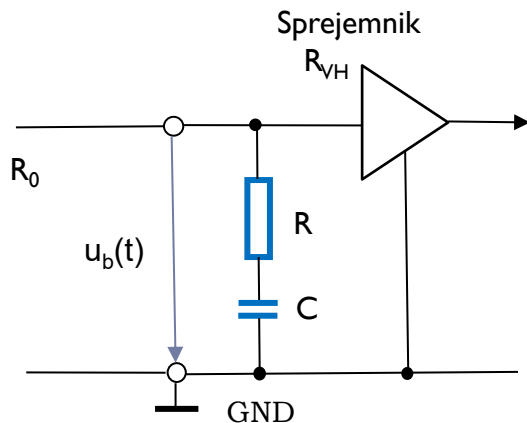
upornosti v paralelni vezavi za $R_{VH} \rightarrow \infty$

$$\frac{1}{R_b} = \frac{1}{R_{VH}} + \frac{1}{R} = \frac{1}{\infty} + \frac{1}{R} = \frac{1}{R} \rightarrow R_b = R$$

- Prednost:** enostavna zaključitev.
- Slabost:** velika enosmerna poraba energije v stanju 1 (shema V1) ali v stanju 0 (shema V2)

□ Izmenična (AC) zaključitev

- Na koncu linije sta zaporedno vezana upor R , ki služi za prilagoditev ($R=R_0$) in kondenzator C , ki blokira enosmerno napetost (statična poraba).



$$R_b = \frac{R_{VH} \cdot R}{R_{VH} + R}$$

- Pri obremenjeni liniji je čas za polnjenje kondenzatorja $T = R \cdot C > 2\tau$, $C > \frac{2 \cdot \tau}{R}$
- Primer:

$$\tau = 0,6 \text{ [ns]} \quad R = 70 \text{ } \Omega, \quad C > \frac{2 \cdot 0,6}{70} = \frac{1,2 \text{ [ns]}}{70 \text{ } [\Omega]} = 0,017 \text{ [nF]} = 17 \text{ [pF]}$$

- Prednost:** zmanjša se poraba \rightarrow kondenzator C blokira enosmerno komponento signala (stacionarno stanje), njegova izbira pa omogoča oblikovanje signala na izhodu.
- Slabost:** dolgo zaporedje enakih bitov nabije kondenzator na višjo napetost kot en sam in v tem primeru se po preklopu, ko se polariteta zamenja, kondenzator dalj čas prazni.

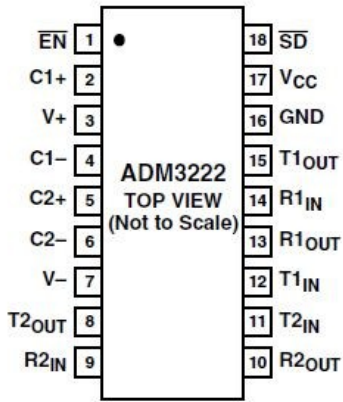
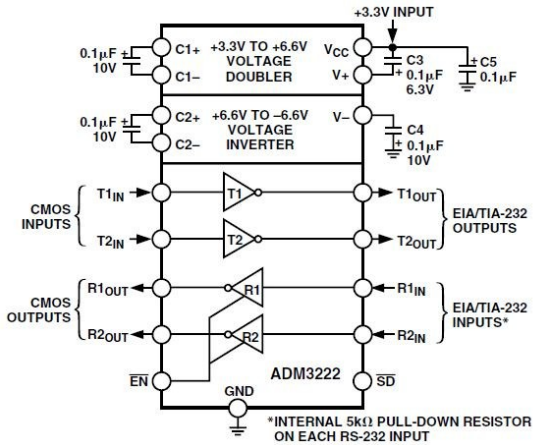
Primeri meritev odbojev – večanje časa vzpona/padca



Prikaz vpliva večanja razmerja t_r / τ

Primer: Omejitev časa vzpona/padca (RS232)

RS-232 oddajnik/sprejemnik - ADM 3222



Slew Rate: max 30V/us



ADM3202/ADM3222/ADM1385—SPECIFICATIONS

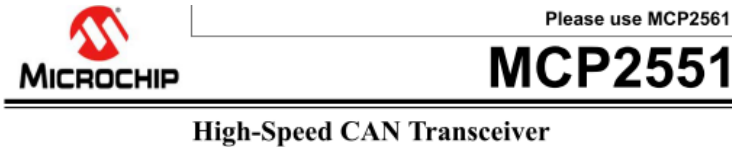
($V_{CC} = +3.3\text{ V} \pm 0.3\text{ V}$, C1–C4 = 0.1 μF . All specifications T_{MIN} to T_{MAX} unless otherwise noted.)

Parameter	Min	Typ	Max	Unit	Test Conditions/Comments
DC CHARACTERISTICS					
Operating Voltage Range	3.0	3.3	5.5	V	No Load $R_L = 3\text{ k}\Omega$ to GND
V_{CC} Power Supply Current		1.3	2.1	mA	
Shutdown Supply Current		8	10	mA	
		0.01	0.5	μA	
LOGIC					
Input Logic Threshold Low, V_{INL}			0.8	V	T_{IN} T_{IN}
Input Logic Threshold High, V_{INH}	2.0			V	
CMOS Output Voltage Low, V_{OL}			0.4	V	$I_{OUT} = 1.6\text{ mA}$
CMOS Output Voltage High, V_{OH}	$V_{CC} - 0.6$			V	$I_{OUT} = -1\text{ mA}$
Input Leakage Current		0.01	± 1	μA	$T_{IN} = \text{GND to } V_{CC}^*$ Receivers Disabled
Output Leakage Current			± 10	μA	
RS-232 RECEIVER					
EIA-232 Input Voltage Range	-30		+30	V	
EIA-232 Input Threshold Low	0.6	1.2		V	
EIA-232 Input Threshold High		1.6	2.4	V	
EIA-232 Input Hysteresis		0.4		V	
EIA-232 Input Resistance	3	5	7	k Ω	
RS-232 TRANSMITTER					
Output Voltage Swing (RS-232)	± 5.0	± 5.2		V	$V_{CC} = 3.3\text{ V}$. All Transmitter Outputs Loaded with 3 k Ω to Ground
Output Voltage Swing (RS-562)	± 3.7			V	
Transmitter Output Resistance	300			Ω	$V_{CC} = 3.0\text{ V}$
RS-232 Output Short Circuit Current		± 15		mA	$V_{CC} = 0\text{ V}$, $V_{OUT} = \pm 2\text{ V}$
Output Leakage Current			± 25	μA	
TIMING CHARACTERISTICS					
Maximum Data Rate	460			kbps	$V_{CC} = 3.3\text{ V}$, $R_L = 3\text{ k}\Omega$ to 7 k Ω , $C_L = 50\text{ pF}$ to 1000 pF. One Tx Switching
Receiver Propagation Delay					
TPHL		0.4	1	μs	$R_L = 3\text{ k}\Omega$, $C_L = 1000\text{ pF}$
TPLH		0.4	1	μs	
Transmitter Propagation Delay		300	750	ns	
Receiver Output Enable Time		200		ns	
Receiver Output Disable Time		200		ns	
Transmitter Skew		30		ns	
Receiver Skew		300		ns	
Transition Region Slew Rate					Measured from +3 V to -3 V or -3 V to +3 V, $V_{CC} = +3.3\text{ V}$ $R_L = 3\text{ k}\Omega$, $C_L = 1000\text{ pF}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$ $R_L = 3\text{ k}\Omega$, $C_L = 2500\text{ pF}$, $T_A = +25^\circ\text{C}$
	6	10	30	V/ μs	
	4	10	30	V/ μs	

*ADM1385: Input leakage current typically -10 μA when $T_{IN} = \text{GND}$.
Specifications subject to change without notice.

Primer: Omejitev časa vzpona/padca (CAN Phy)

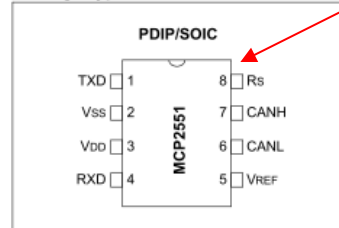
CANBUS oddajnik/sprejemnik - MCP 2551



Features

- Supports 1 Mb/s operation
- Implements ISO-11898 standard physical layer requirements
- Suitable for 12V and 24V systems
- Externally-controlled slope for reduced RFI emissions
- Detection of ground fault (permanent Dominant) on TXD input
- Power-on Reset and voltage brown-out protection
- An unpowered node or brown-out event will not disturb the CAN bus
- Low current standby operation
- Protection against damage due to short-circuit conditions (positive or negative battery voltage)
- Protection against high-voltage transients
- Automatic thermal shutdown protection
- Up to 112 nodes can be connected
- High-noise immunity due to differential bus implementation
- Temperature ranges:
 - Industrial (I): -40°C to +85°C
 - Extended (E): -40°C to +125°C

Package Types

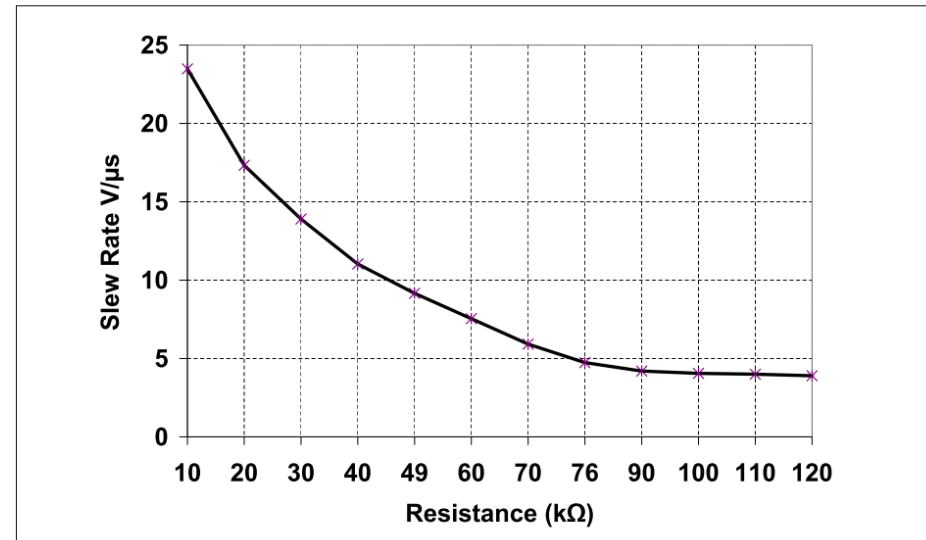


1.4.2 SLOPE-CONTROL

Slope-Control mode further reduces EMI by limiting the rise and fall times of CANH and CANL. The slope, or slew rate (SR), is controlled by connecting an external resistor (R_{EXT}) between R_S and V_{OL} (usually ground). The slope is proportional to the current output at the R_S pin. Since the current is primarily determined by the slope-control resistance value R_{EXT} , a certain slew rate is achieved by applying a specific resistance. Figure 1-1 illustrates typical slew rate values as a function of the slope-control resistance value.

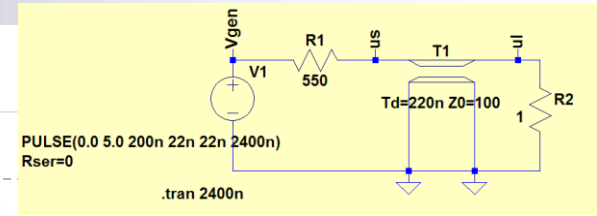
Rs vs. Slew rate

FIGURE 1-1: SLEW RATE VS. SLOPE-CONTROL RESISTANCE VALUE



Primer: Zaključitev linije

(AV1) – Simulacije odbojev na liniji



SPICE Simulacije slik iz osciloskopa: UTP kabel, $R_S = 50..550 \Omega$, $R_L = 1..500 \Omega$

Napetost se že pravilno porazdeli, z zakasnitvijo t_r se pojavi tudi na izhodu.

$R_0 = 100 \Omega$
 $R_L, R_S = 0,50,500 \Omega$

$R_L > R_0, R_L = 500 \Omega$
 $\rho_L = 0.666$ (poz. odboj)

$R_L = R_0$
 $\rho_L = 0$ (ni odboja)

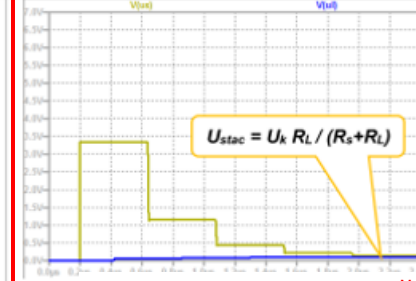
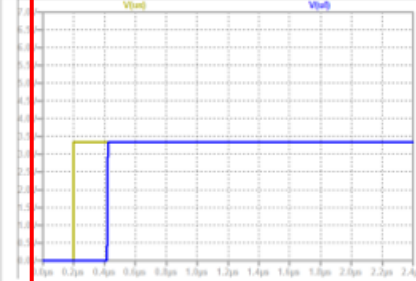
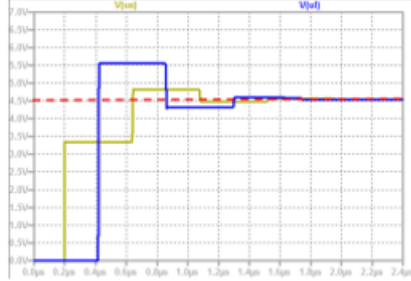
$R_L < R_0, R_L = 1 \Omega$
 $\rho_L = -0.98$ (neg. odboj)

Višje potujoče napetosti!

$R_S < R_0$

$R_S = 50 \Omega$
 $\rho_S = -0.333$

[0.5V/razdelek]

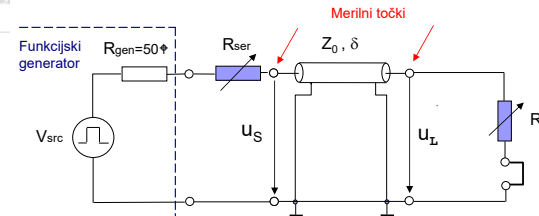


(LV2) - Merjenje odbojev na liniji

Primerjava: Meritve z osciloskopi

Slike osciloskopa: UTP kabel, $R_S = 50..550 \Omega$, $R_L = 1..500 \Omega$ ($R_{gen} = 50 \Omega$) UTP

Napetost se že pravilno porazdeli, z zakasnitvijo t_r se pojavi tudi na izhodu.



$R_0 = 100 \Omega$
 $R_L, R_S = 0,50,500 \Omega$

$R_L > R_0, R_L = 500 \Omega$
 $\rho_L = 0.666$ (poz. odboj)

$R_L = R_0$
 $\rho_L = 0$ (ni odboja)

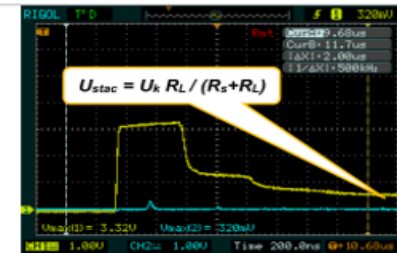
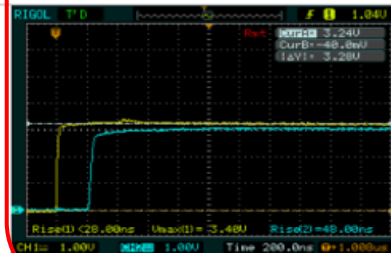
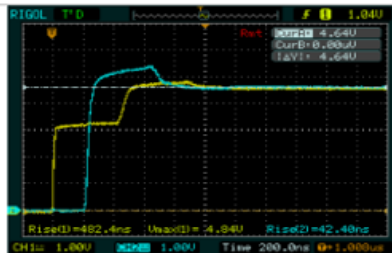
$R_L < R_0, R_L = 1 \Omega$
 $\rho_L = -0.98$ (neg. odboj)

Višje potujoče napetosti!

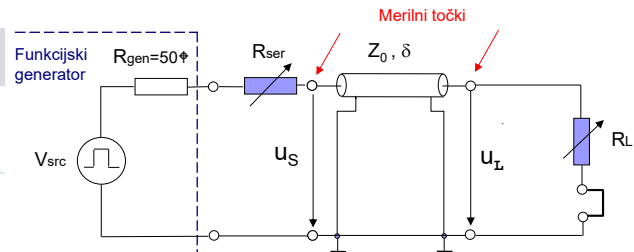
$R_S < R_0$

$R_S = 50 \Omega$
 $\rho_S = -0.333$

[1V/razdelek]



Primer: Zaključitev linije



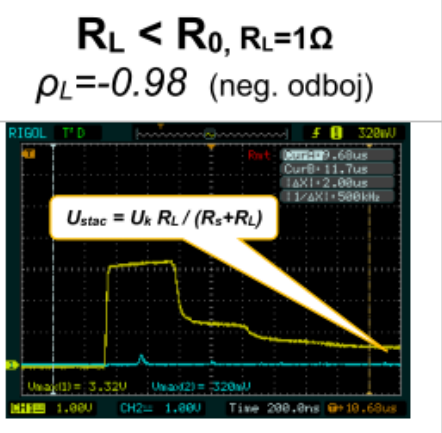
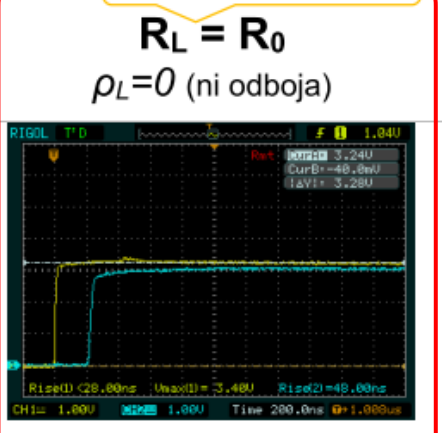
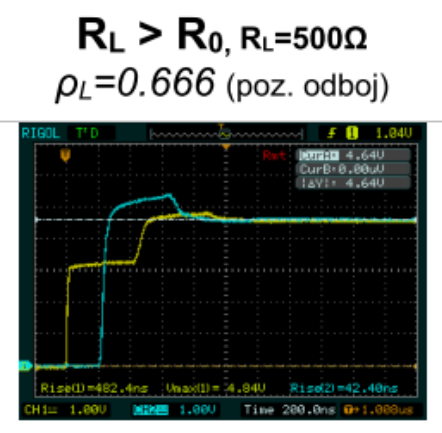
(LV2) - Merjenje odbojev na liniji - izbor Meritve z osciloskopi

Slike osciloskopa: UTP kabel, $R_S = 50..550 \Omega$, $R_L = 1..500 \Omega$ ($R_{gen}=50 \Omega$) UTP

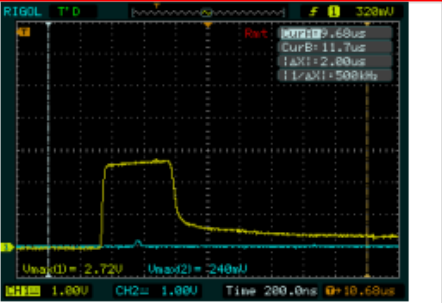
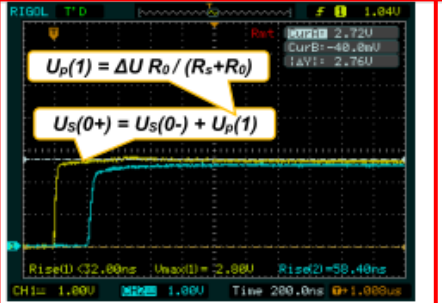
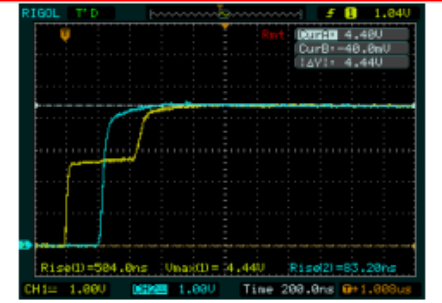
Napetost se že pravilno porazdeli, z zakasnitvijo 1τ se pojavi tudi na izhodu.

Višje potujoče napetosti

$R_0 = 100 \Omega$
 $R_L, R_S = 0,50,500 \Omega$
 $R_S < R_0$
 $R_S = 50 \Omega$
 $\rho_S = -0.333$
 [1V/razdelek]

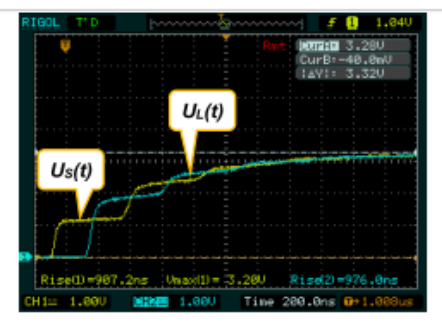


$R_S = R_0$
 $\rho_S = 0$
 [1V/razdelek]



Nizke potujoče napetosti

$R_S > R_0$
 $R_S = 550 \Omega$
 $\rho_S = 0.692$
 [1V/razdelek]



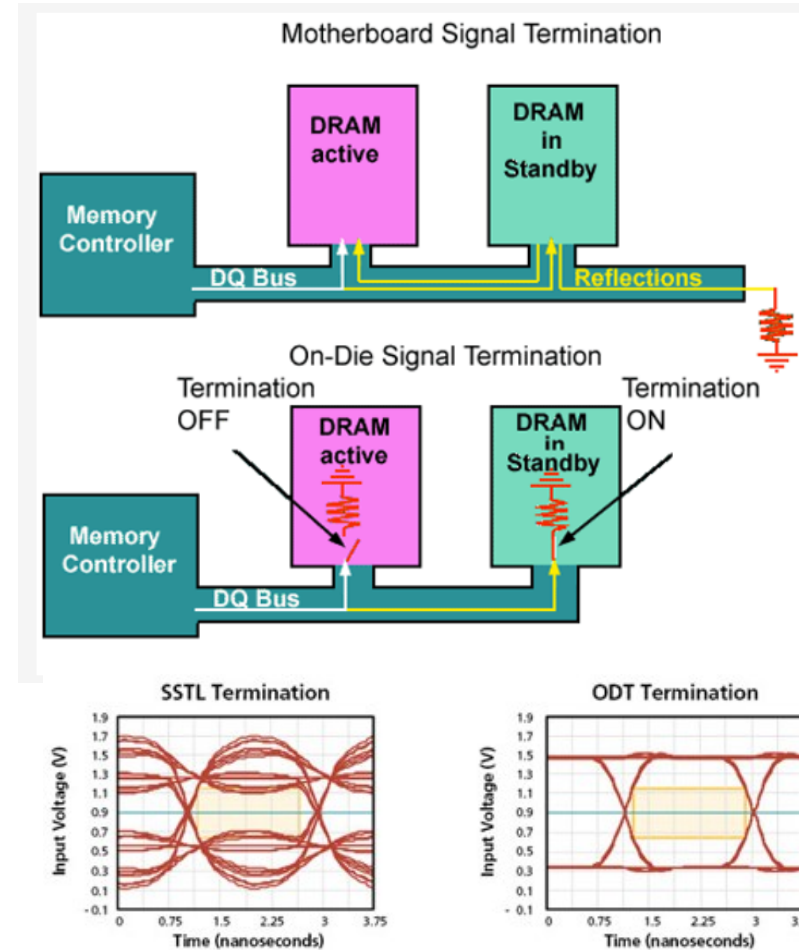
Dodatek I: CPE-SDRAM (zmogljiva povezava)

DRAM Termination

- ▶ **DDR (SSTL - mat. plošča)**
- ▶ **DDR2,3 (ODT – moduli):**
 - ▶ 50, 75, 150 Ohms (DDR2)
 - ▶ 40, 60, 120 Ohms (DDR3)

Priporočila Samsung (DDR2):

- ▶ Single memory module / channel : **150 ohms**
- ▶ Two memory modules / channels
 - ▶ DDR2-400 / 533 memory : **75 ohms**
 - ▶ DDR2-667 / 800 memory : **50 ohms**



Dodatek I: CPE-SDRAM (zmogljiva povezava)

Illustration showing termination off the die

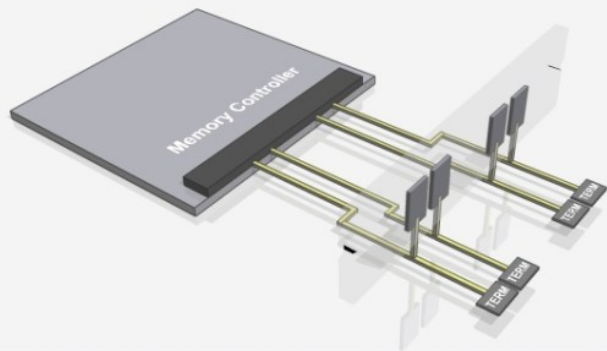
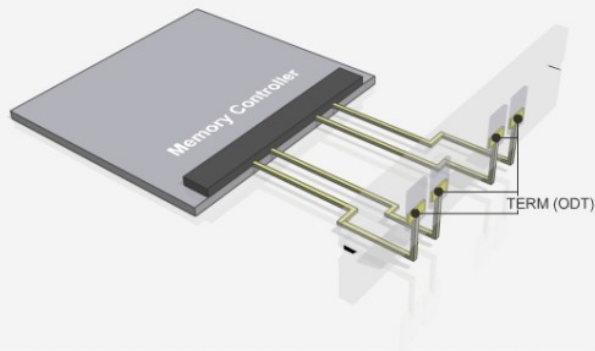
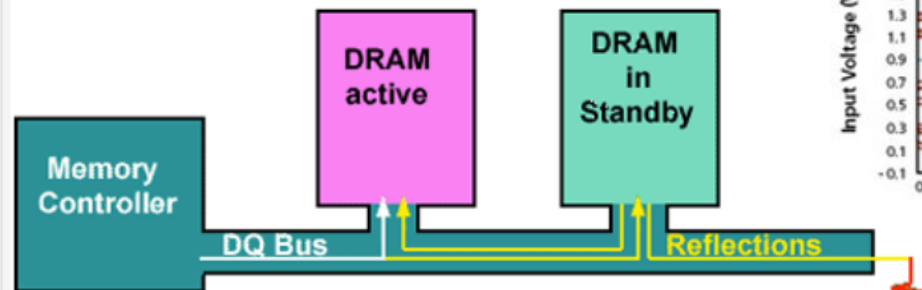


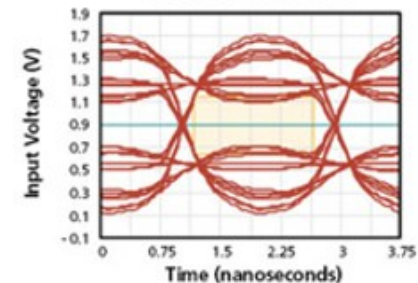
Illustration showing On Die Termination (ODT)



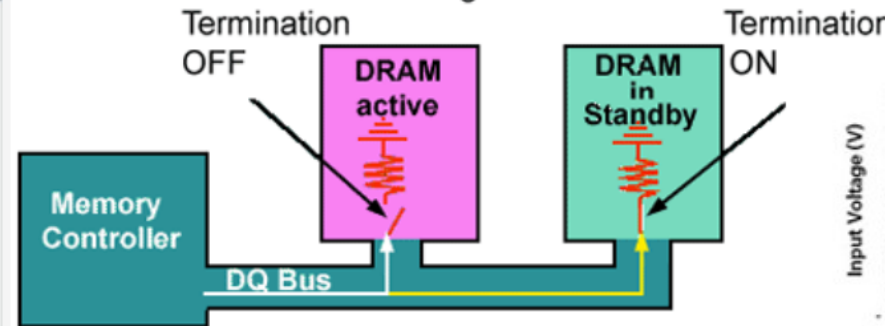
Motherboard Signal Termination



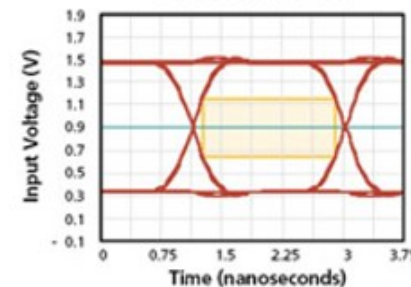
SSTL Termination



On-Die Signal Termination



ODT Termination



Dodatek II: Praktični primer CANBUS vodila

Navodila proizvajalca

INTEGRA BM SYSTEM

Bus length

Regarding bus length, two points must be considered:

1. Voltage drop

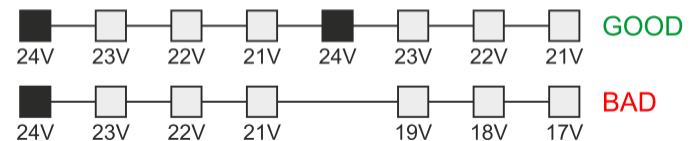
Wire resistance cause voltage drop, which depends of cable length, wire diameter and power consumption. **Cable must be selected** to ensure each module have at least the minimum specified voltage.

2. Signal delay

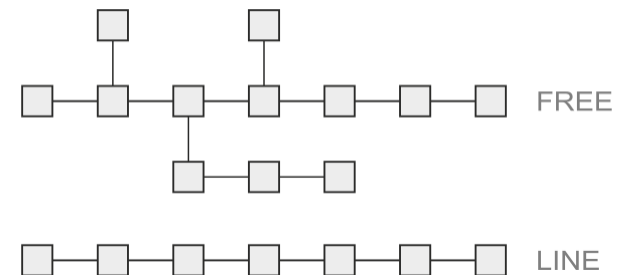
Communication speed is limited with propagation time and bus topology. With **default 100kbps baudrate, 100m is safe without restrictions**. For a longer distance, cable must be connected in **a line (without trunks) and properly terminated**.

Speed\Topology	FREE	LINE
100kbps	100m	300m
50kbps	200m	500m
20kbps	500m	1000m

Secondary power supply



Network topology



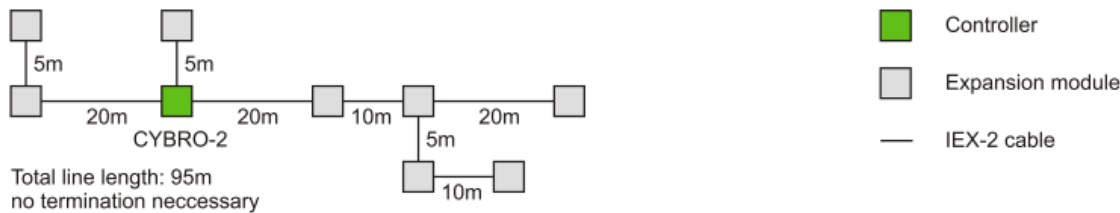
Dodatek II: Praktični primer CANBUS vodila

Navodila proizvajalca

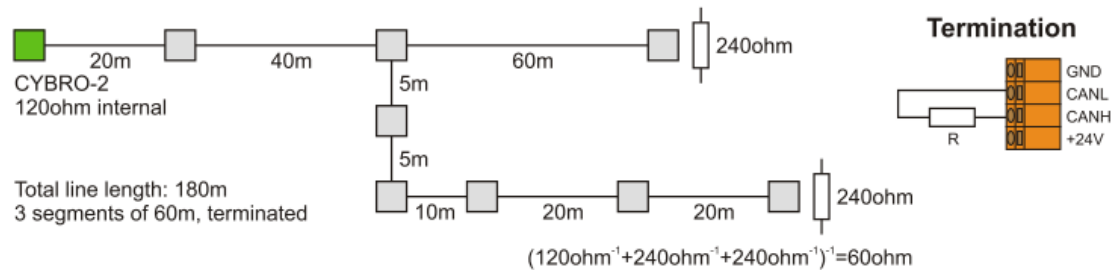
INTEGRA BM SYSTEM

Cabling topology & Termination

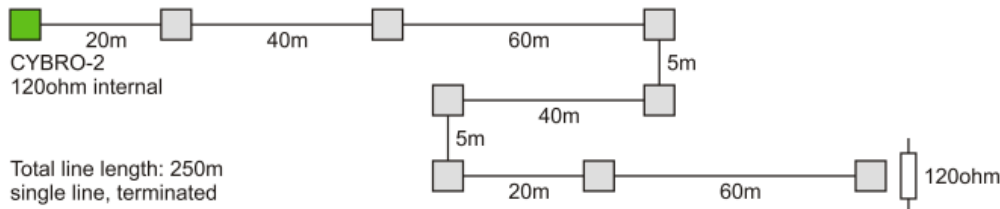
1) Total IEX-2 bus length <100m

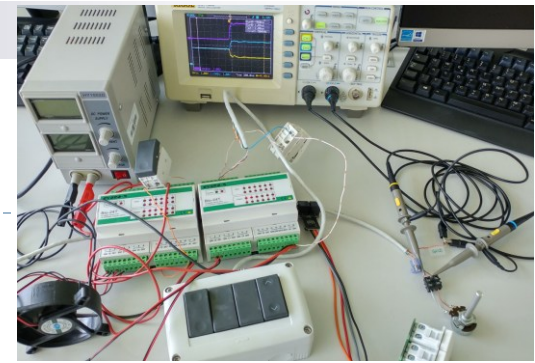


2) 100m < Total IEX-2 bus length <200m



3) 200m < Total IEX-2 bus length <300m





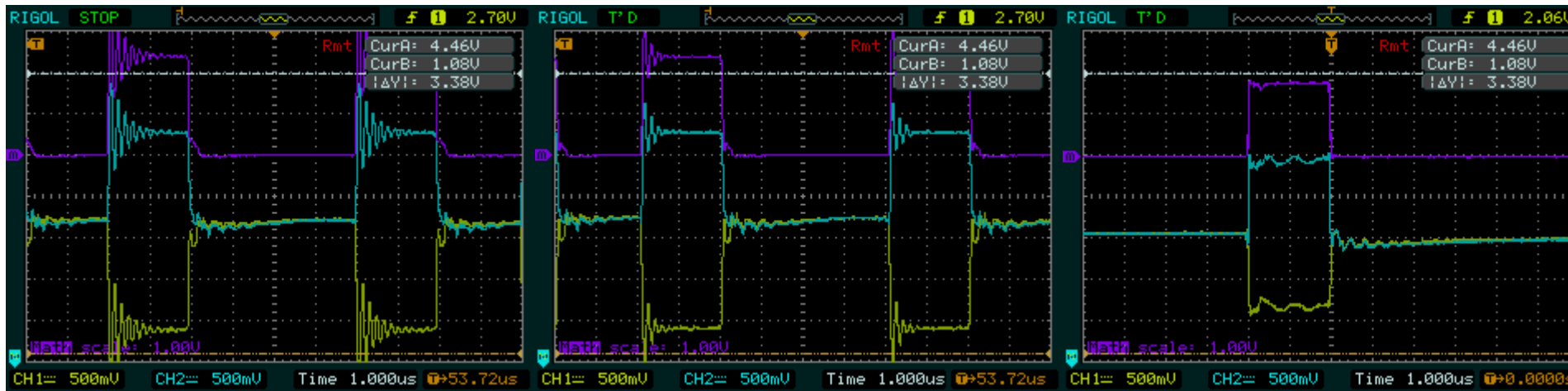
Primeri meritev odbojev - CANBUS

500kb/s: zaključevanje z različnimi upori

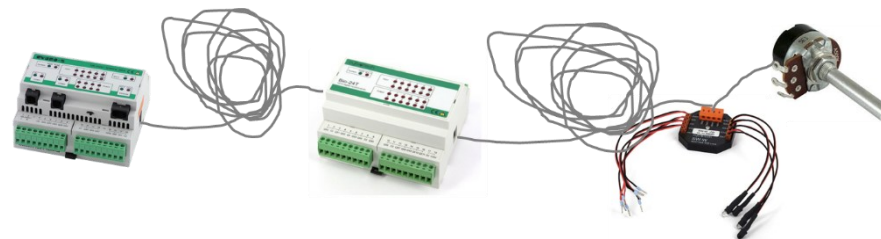
Odrpte sponke

500ohm

107ohm



3 zavitki UTP kabla s spojniki – cca 40m...

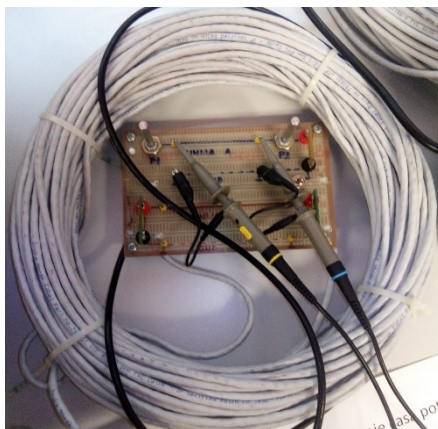


Dodatek III: Praktične meritve na LAB vajah

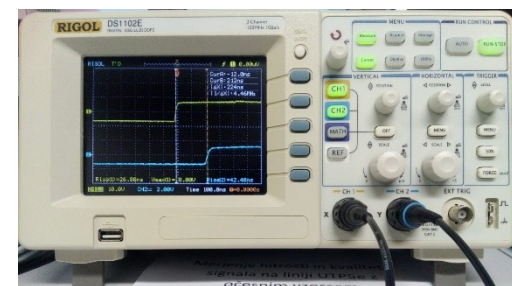
Shema meritev lastnosti prenosnih linij



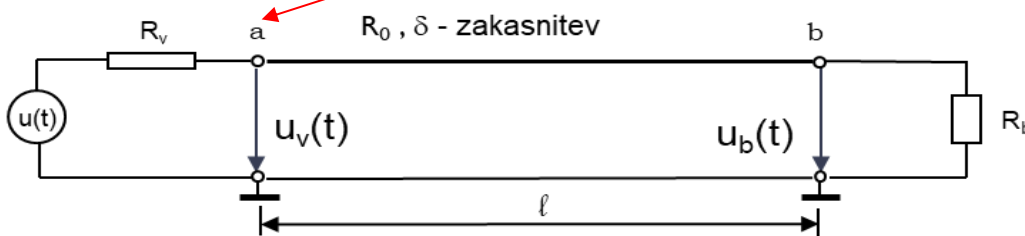
Generator pravokotnega signala



Prenosna linija (UTP, Coax)



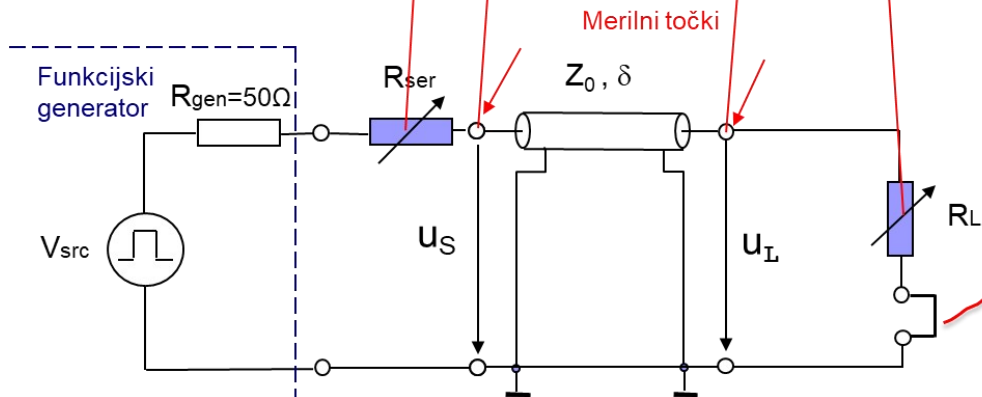
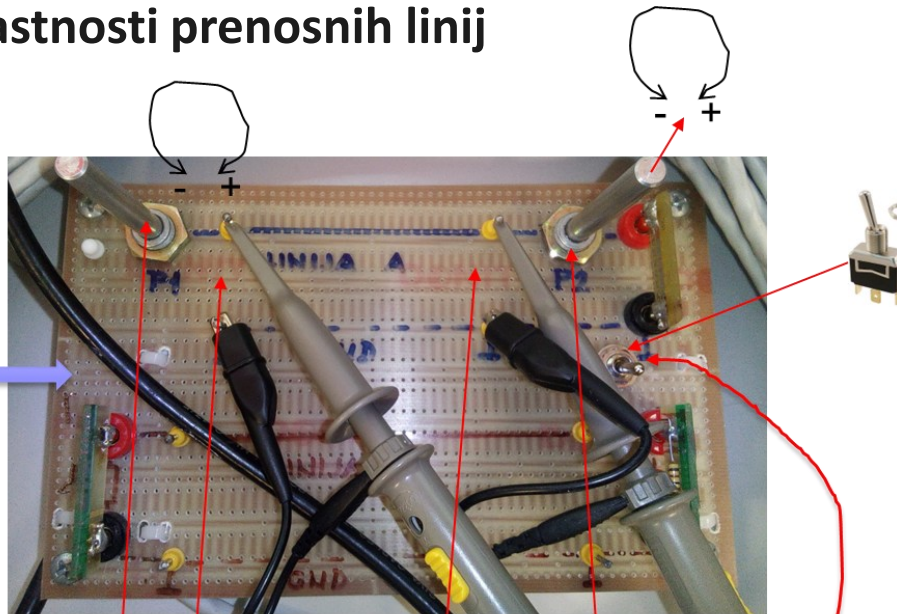
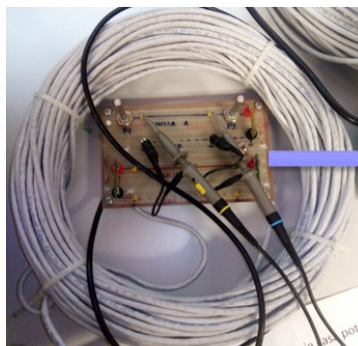
Osciloskop $U_v(t)$, $U_b(t)$



Dodatek III: Praktične meritve na LAB vajah

Shema meritev lastnosti prenosnih linij

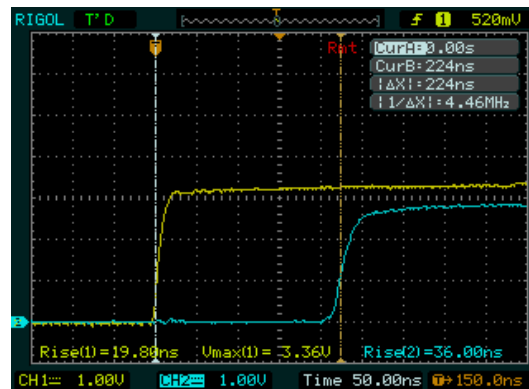
Prenosna linija
(UTP, Coax)



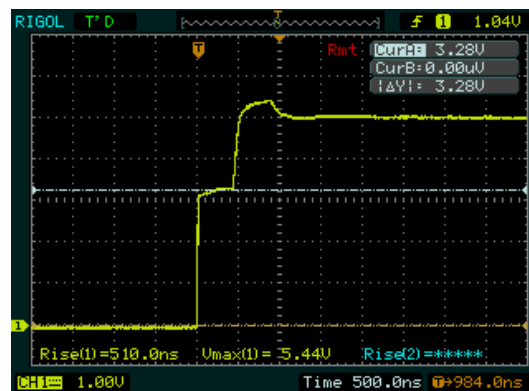
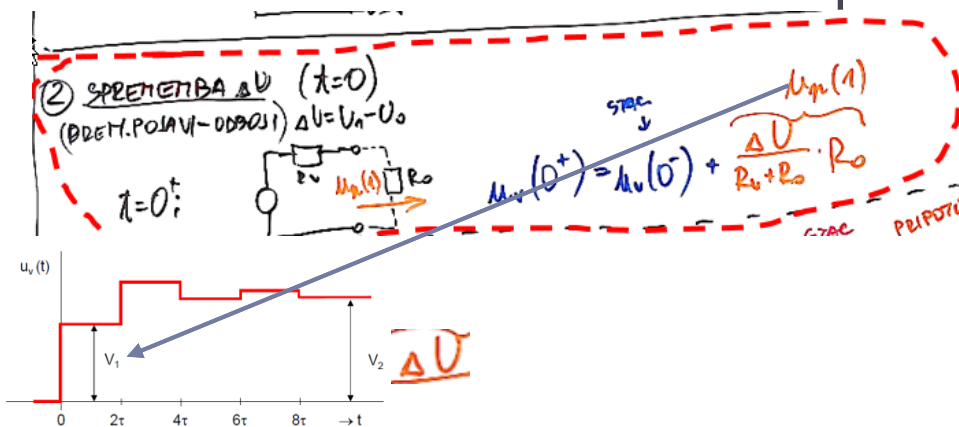
Dodatek III: Praktične meritve na LAB vajah

Laboratorijski vaji 7, 8 - LV1, LV2

7.1: LVI-1: Meritev dolžine linije (l)



7.2: LVI-2: Meritev karakteristične upornosti linije (R_0)



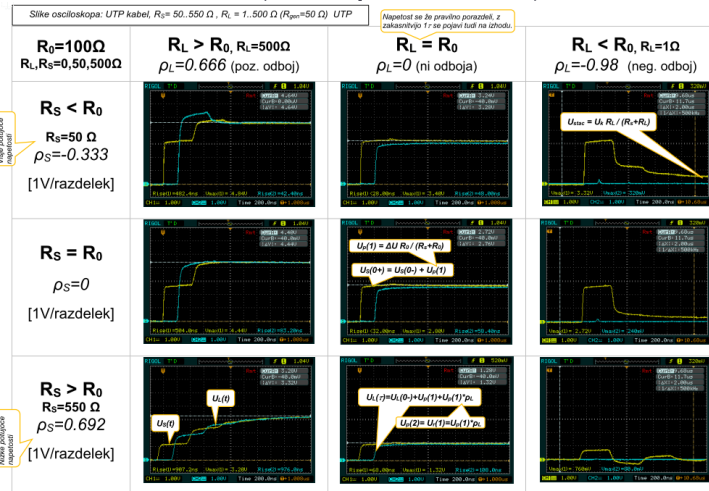
7.3: LVI-3: Izziv - Meritev karakteristične upornosti linije (R_0)



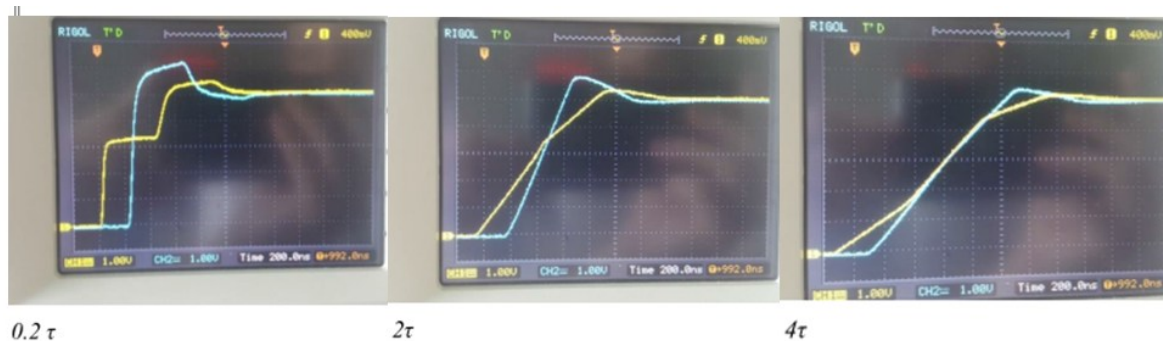
Dodatek III: Praktične meritve na LAB vajah

Laboratorijski vaji 7, 8 - LV1, LV2

8.1: LV2 : Meritve odbojev (razmerja R_v , R_b)



8.2: LV2 : Vpliv časa vzpona/padca – omejevanje odbojev



8.3: LV2 : Izziv – delovanje tipal

Naloga 1: Analiza odbojev

- Zanimajo nas napetosti na povezavi v točkah a ($u_v(t)$) in b ($u_b(t)$) do časa $t = 4\tau$, če se signal oddajnika spremeni iz nizkega stanja (0) v visoko stanje (1).

Podatki:

napetosti signala: $U_0 = 0.2 \text{ V}$, $U_1 = 4.8 \text{ V}$

dolžina linije: $l = 50 \text{ cm}$,

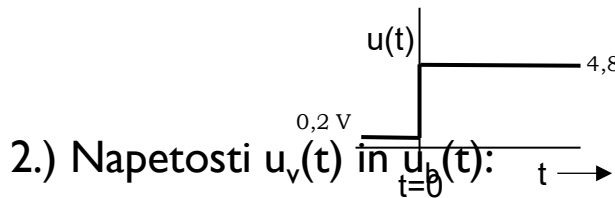
zakasnitev signala: $\delta = 6 \text{ ns/m}$

upornosti: $R_0 = 10 \ \Omega$, $R_v = 10 \ \Omega$, $R_b = 100 \ \Omega$

- Naloge:
 1. Narišite model povezave s podatki oddajnika, sprejemnika in linije ter časovni diagram preklopa stanja na izhodu oddajnika.
 2. Izračunane napetosti $u_v(t)$ in $u_b(t)$ zaokrožite na dve decimalni mesti.
 3. Narišite mrežni in časovni diagram.

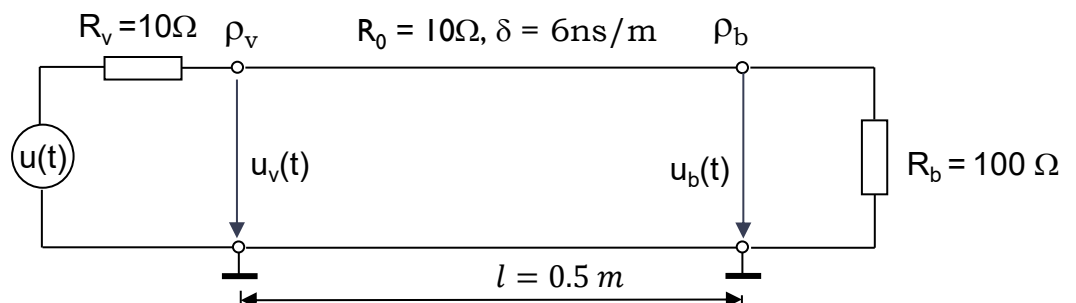
Rešitev

1.) $R_v = R_0$ in $R_b > R_0$



2.) Napetosti $u_v(t)$ in $u_b(t)$ in $\tau = 0$:

odbojna koeficienta ρ_v in ρ_b : $\rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0} = 0$, $\rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} = \frac{100 - 10}{100 + 10} = 0,82$



$$u_v(0^-) = u_b(0^-) = \frac{U_0}{R_v + R_b} R_b = \frac{0,2 \cdot 100}{10 + 100} = 0,18 \text{ [V]}$$

$$u_v(0^+) = u_v(0^-) + \frac{\Delta U}{R_v + R_0} R_0 = 0,18 + \frac{4,6 \cdot 10}{10 + 10} = 0,18 + 2,3 = 2,48 \text{ [V]}$$

$$u_p(1) = 2,3 \text{ [V]}$$

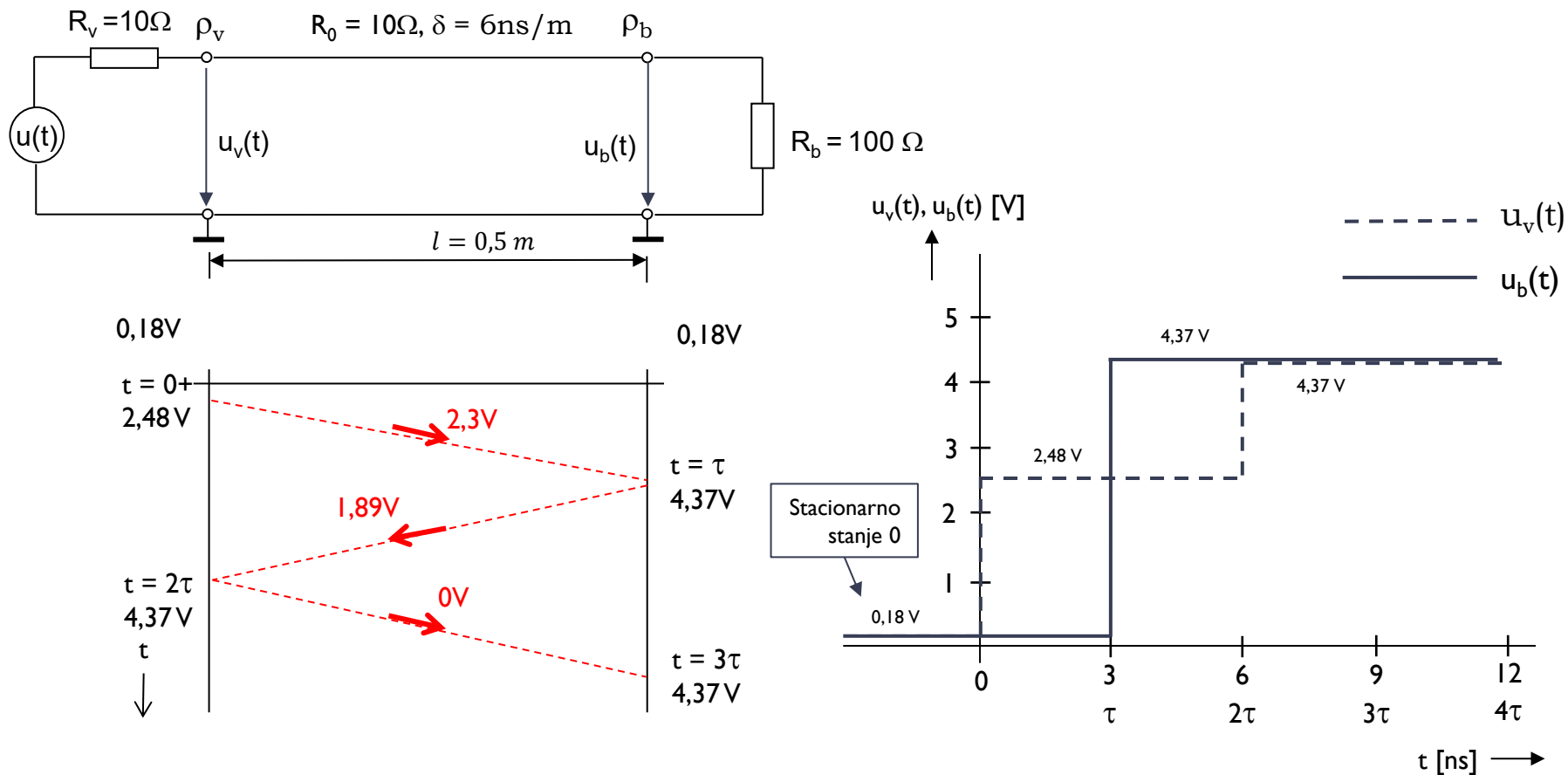
$$u_b(\tau) = u_b(0^-) + u_p(1) + u_p(1)\rho_b = 0,18 + 2,3 + 2,3 \cdot 0,82 = 2,48 + 1,89 = 4,37 \text{ [V]}$$

$$u_p(2) = 1,89 \text{ [V]}$$

$$u_v(2\tau) = u_v(0^+) + u_p(2) + u_p(2)\rho_v = 2,48 + 1,89 + 1,89 \cdot 0 = 4,37 \text{ [V]}$$

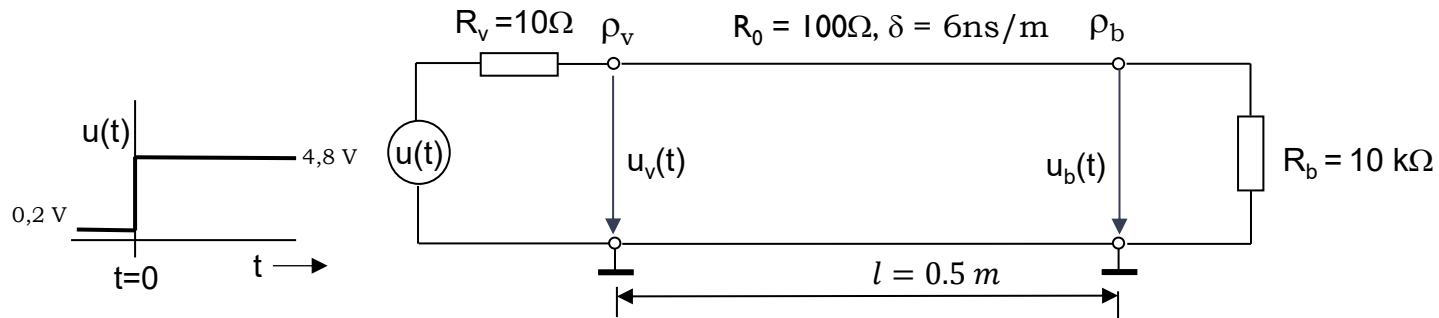
$$u_p(3) = 0 \text{ [V]}$$

3.) Mrežni in časovni diagram, če je čas potovanja signala $\tau = \delta \cdot l = 6\text{ns/m} \cdot 0,5\text{m} = 3\text{ns}$



Naloga 2: Analiza odbojev za $t_r = 3\tau$

- Za model električne linije so podane relacije upornosti: $R_v < R_0$ in $R_b > R_0$



Izračun napetostnega odbojnega koeficienta na:

$$\text{vhodu linije } (\rho_v) \quad \rho_v = \frac{R_v - R_0}{R_v + R_0} = \frac{10 - 100}{10 + 100} = -0.82,$$

$$\text{izhodu linije } (\rho_b) \quad \rho_b = \frac{R_b - R_0}{R_b + R_0} = \frac{10000 - 100}{10000 + 100} \approx 1$$

Napetosti na vhodu in izhodu linije v časih $t = 0-, 0+, \tau, 2\tau, 3\tau, \dots, 13\tau$

$$u_v(0-) = u_b(0-) = \frac{U_0}{R_v + R_b} R_b = \frac{0,2 \cdot 10000}{10 + 10000} = 0,198 = \boxed{0,2 \text{ [V]}}$$

$$u_v(0+) = u_v(0-) + \frac{\Delta U}{R_v + R_0} R_0 = 0,2 + \frac{4,6 \cdot 100}{10 + 100} = 0,2 + 4,18 = \boxed{4,38 \text{ [V]}}$$

$$u_p(1) = 4,18 \text{ [V]}$$

$$u_b(\tau) = u_b(0-) + u_p(1) + u_p(1)\rho_b = 0,2 + 4,18 + 4,18 \cdot 1 = 8,56 \text{ [V]}$$

$$u_p(2) = 4,18 \text{ [V]}$$

$$u_v(2\tau) = u_v(0+) + u_p(2) + u_p(2)\rho_v = 4,38 + 4,18 + 4,18 \cdot (-0,82) = 5,14 \text{ [V]}$$

$$u_p(3) = -3,42 \text{ [V]}$$

$$u_b(3\tau) = u_b(\tau) + u_p(3) + u_p(3)\rho_b = 8,56 - 3,42 - 3,42 \cdot 1 = 1,72 \text{ [V]}$$

$$u_p(4) = -3,42 \text{ [V]}$$

$$u_v(4\tau) = u_v(2\tau) + u_p(4) + u_p(4)\rho_v = 5,14 - 3,42 + (-3,42) \cdot (-0,82) = 4,52 \text{ [V]}$$

$$u_p(5) = 2,8 \text{ [V]}$$

$$u_b(5\tau) = u_b(3\tau) + u_p(5) + u_p(5)\rho_b = 1,72 + 2,8 + 2,8 \cdot 1 = 7,32 \text{ [V]}$$

$$u_p(6) = 2,8 \text{ [V]}$$

$$u_v(6\tau) = u_v(4\tau) + u_p(6) + u_p(6)\rho_v = 4,52 + 2,8 + 2,8 \cdot (-0,82) = 5,02 \text{ [V]}$$

$$u_p(7) = -2,3 \text{ [V]}$$

$$u_b(7\tau) = u_b(5\tau) + u_p(7) + u_p(7)\rho_b = 7,32 - 2,3 - 2,3 \cdot 1 = 2,72 \text{ [V]}$$

$$u_p(8) = -2,3 \text{ [V]}$$

$$u_v(8\tau) = u_v(6\tau) + u_p(8) + u_p(8)\rho_v = 5,02 - 2,3 + (-2,3) \cdot (-0,82) = 4,62 \text{ [V]}$$
$$u_p(9) = 1,9 \text{ [V]}$$

$$u_b(9\tau) = u_b(7\tau) + u_p(9) + u_p(9)\rho_b = 2,72 + 1,9 + 1,9 \cdot 1 = 6,52 \text{ [V]}$$
$$u_p(10) = 1,9 \text{ [V]}$$

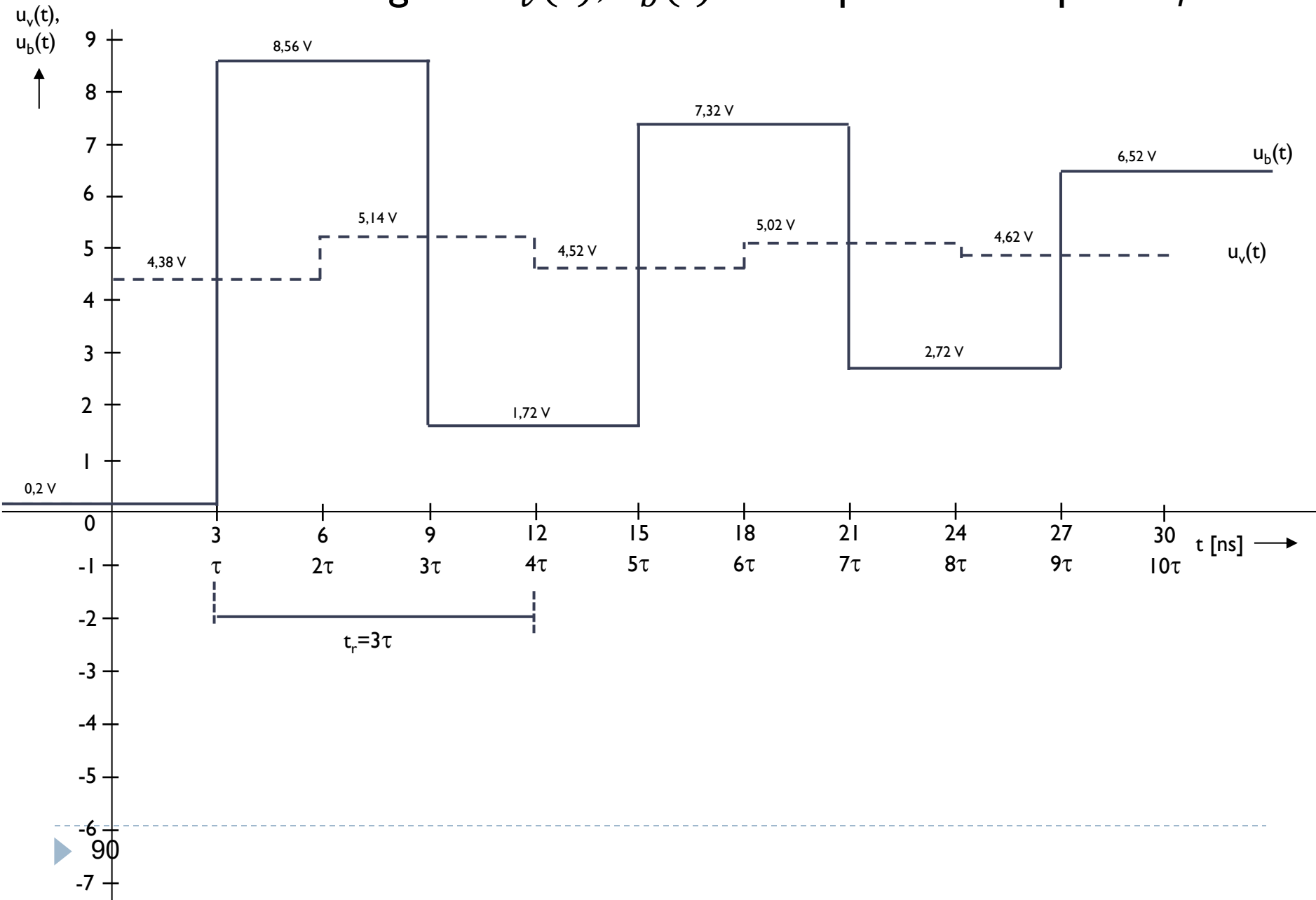
$$u_v(10\tau) = u_v(8\tau) + u_p(10) + u_p(10)\rho_v = 4,62 + 1,9 + 1,9 \cdot (-0,82) = 4,96 \text{ [V]}$$
$$u_p(11) = -1,56 \text{ [V]}$$

$$u_b(11\tau) = u_b(9\tau) + u_p(11) + u_p(11)\rho_b = 6,52 - 1,56 - 1,56 \cdot 1 = 3,4 \text{ [V]}$$
$$u_p(12) = -1,56 \text{ [V]}$$

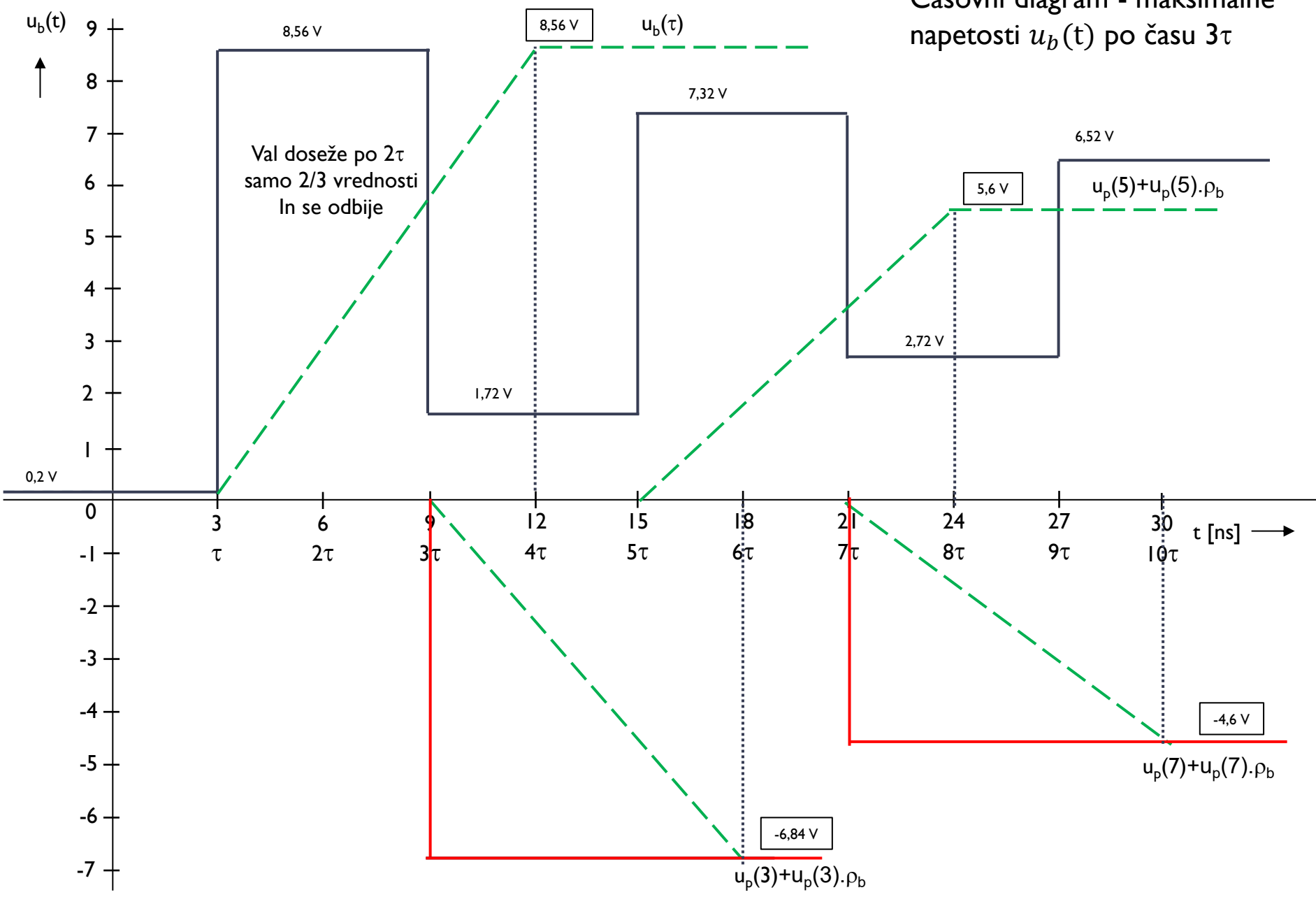
$$u_v(12\tau) = u_v(10\tau) + u_p(12) + u_p(12)\rho_v = 4,96 - 1,56 + (-1,56) \cdot (-0,82) = 4,68 \text{ [V]}$$
$$u_p(13) = 1,28 \text{ [V]}$$

$$u_b(13\tau) = u_b(11\tau) + u_p(13) + u_p(13)\rho_b = 3,4 + 1,28 + 1,28 \cdot 1 = 5,96 \text{ [V]}$$
$$u_p(14) = 1,28 \text{ [V]}$$

Časovni diagram $u_v(t)$, $u_b(t)$ brez vpliva časa vzpona t_r



Časovni diagram - maksimalne napetosti $u_b(t)$ po času 3τ



Časovni diagram napetosti $u_b(t)$ v odvisnosti od časa vzpona t_r

