

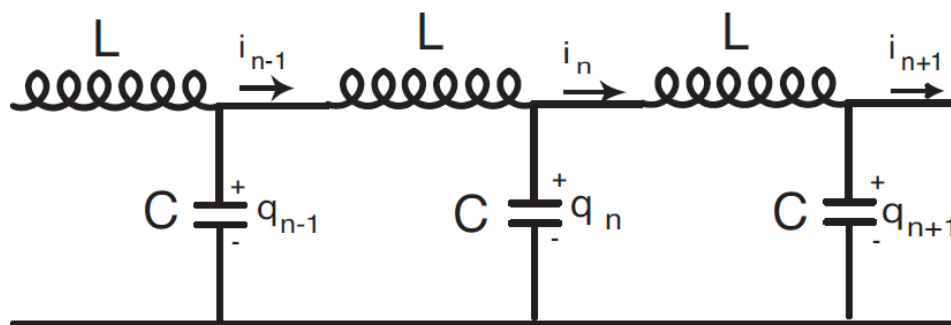
Realizacija elektronskih sklopov

Linijski pojavi in zaključitve linij

M. Jankovec

Hitrost potovanja signala

- Hitrost EM polja v vakuumu: $c = 3 \cdot 10^8$ m/s
- Idealno linijo na TIV lahko ponazorimo z LC vezjem



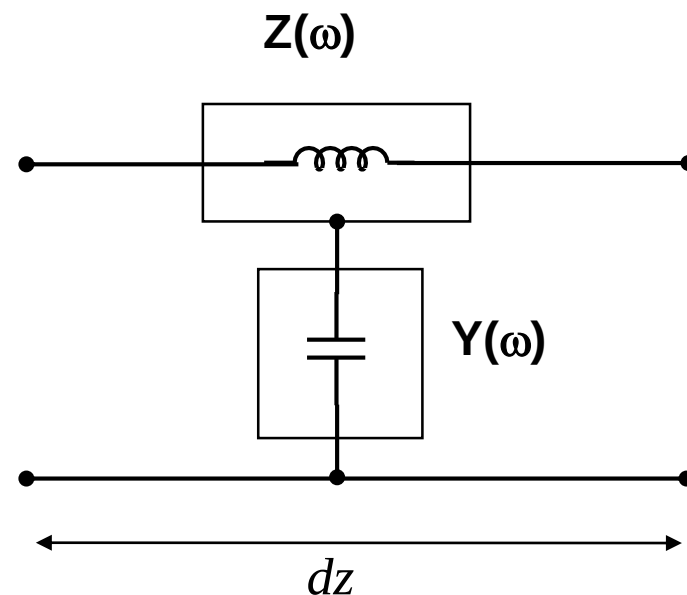
- Hitrost potovanja signala je enaka $v = \frac{1}{\sqrt{L'C'}}$
 - L' in C' sta izraženi na dolžinsko enoto
- Ker je permabilnost laminata PCB enaka 1, lahko hitrost potovanja signala v PCB izrazimo kot $v = \frac{c}{\sqrt{\epsilon_r}}$

Karakteristična impedanca

- Košek linije lahko ponazorimo s serijsko impedanco in paralelno admitanco

$$\square Z(\omega) = R + j\omega L$$

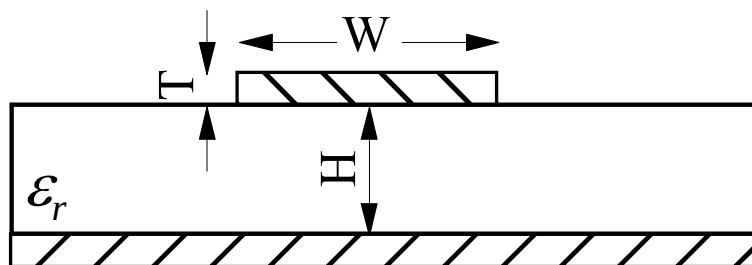
$$\square Y(\omega) = G + j\omega C$$



- Idealna linija je brezizgubna in zanjo velja $R = 0$ in $G = 0$
- Razmerje med napetostjo in tokom v neki točki linije je karakteristična impedanca. Za brezizgubno linijo je enaka:

$$Z_k = \frac{U}{I} = \sqrt{\frac{Z(\omega)}{Y(\omega)}} = \sqrt{\frac{L}{C}}$$

Lastnosti (mikro)trakaste linije

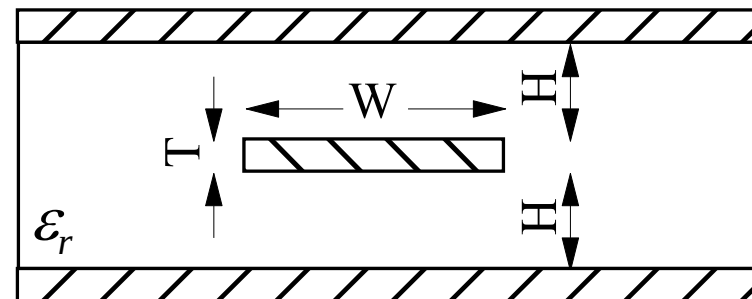


Mikrotrakasta linija

$$Z_k = \frac{87}{\sqrt{\epsilon_r + 1.414}} \ln \left(\frac{5.89H}{0.8W + T} \right)$$

$$t_{pd} = 33.5 \sqrt{0.47\epsilon_r + 0.67} \frac{\text{ps}}{\text{cm}}$$

$$C_0 = \frac{0.264(\epsilon_r + 1.41) \text{ pF}}{\ln \left(\frac{6H}{0.8W + T} \right) \text{ cm}}$$



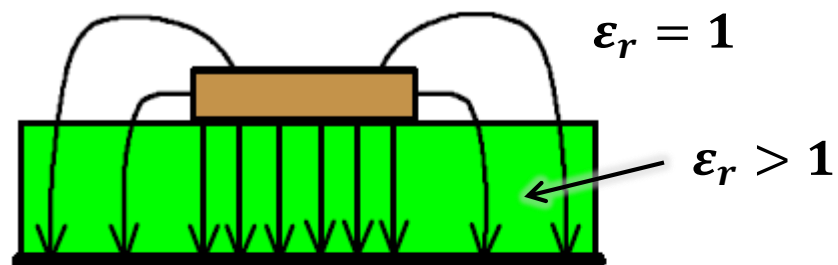
Trakasta linija

$$Z_k = \frac{60}{\sqrt{\epsilon_r}} \ln \left(\frac{1.9(2H+T)}{0.8W+T} \right)$$

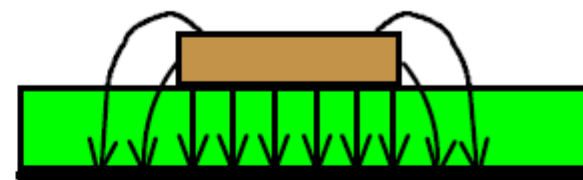
$$t_{pd} = 33.5 \sqrt{\epsilon_r} \frac{\text{ps}}{\text{cm}}$$

$$C_0 = \frac{0.555\epsilon_r \text{ pF}}{\ln \left(\frac{3.81H}{0.8W + T} \right) \text{ cm}}$$

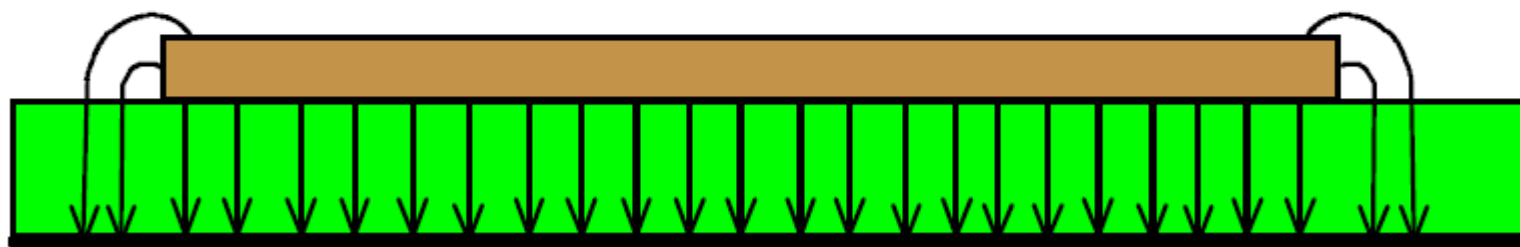
Hitrost potovanja signala



(a)



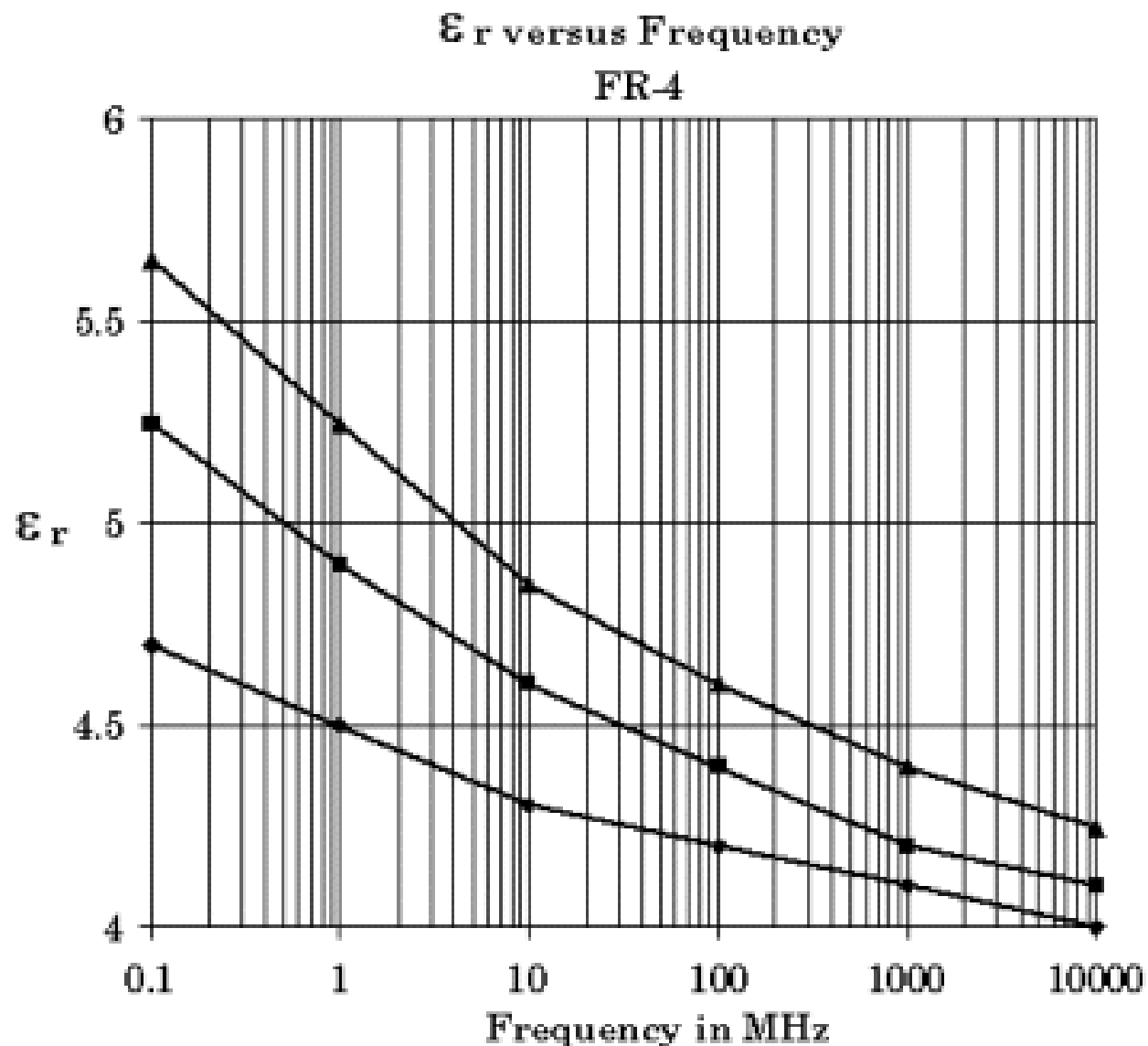
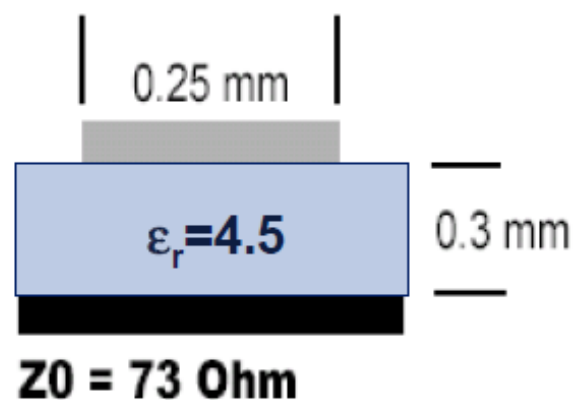
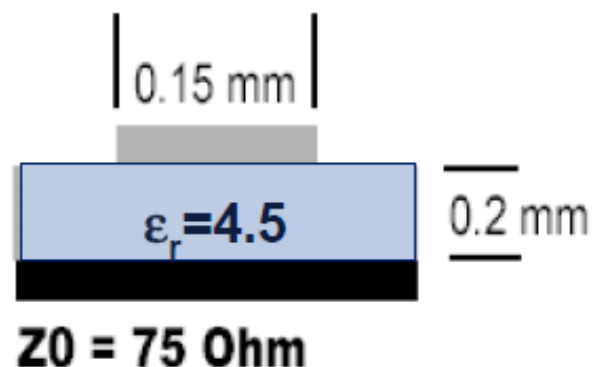
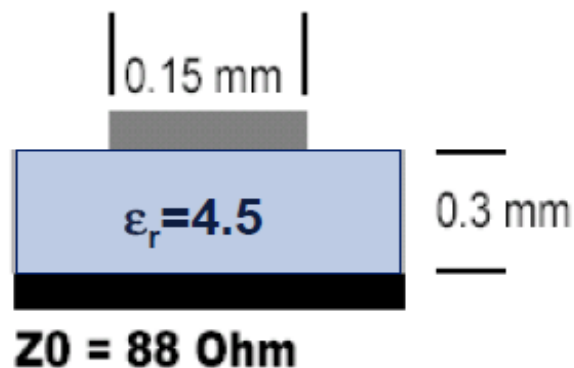
(b)



(c)

$$v(a) > v(b) > v(c)$$

Primeri



Kritične dolžine linij

$$L_0 = 3 \frac{nH}{cm}, C_L = 15 \text{ pF}$$

$$L_{krit} = \frac{t_r}{2t_{pd}}$$

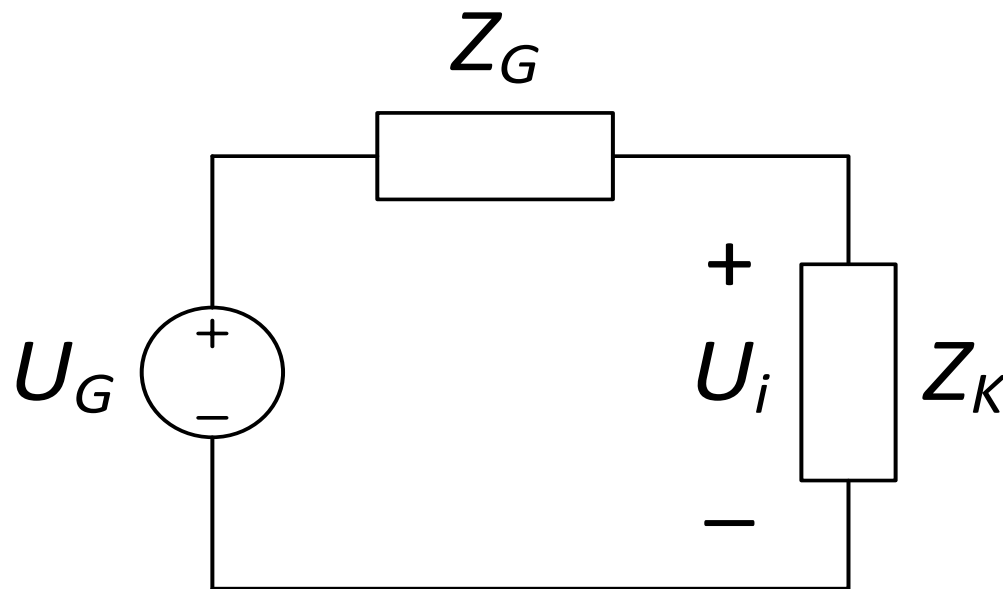
$$Z_k = \sqrt{\frac{L_0}{C_0}}$$

$$t_{pd} = \sqrt{L_0 C_0}$$

Družina	Z_K		100 Ω	70 Ω	50 Ω	25 Ω
	t_r [ns]	t_f [ns]	L_{krit} [cm]			
FCT	4,0	1,4	22,4	15,5	11,2	5,6
HC	2,9	2,9	46	32,3	23,1	11,4
LV	2,9	2,9	46	32,3	23,1	11,4
ALS	2,7	1,7	26,9	18,8	13,5	6,9
AHC	2,1	1,6	25,4	17,8	12,7	6,4
LVC	1,8	1,8	28,7	20,1	14,2	7,1
AC	1,2	1,7	19,1	13,5	9,7	4,8
ALVC	1,2	1,1	17,5	12,2	8,6	4,3
ABT	0,9	1,2	14,2	9,9	7,1	3,6
LVT	0,8	0,6	9,7	6,6	4,8	2,3
ALVT	0,8	0,7	11,2	7,9	5,6	2,8

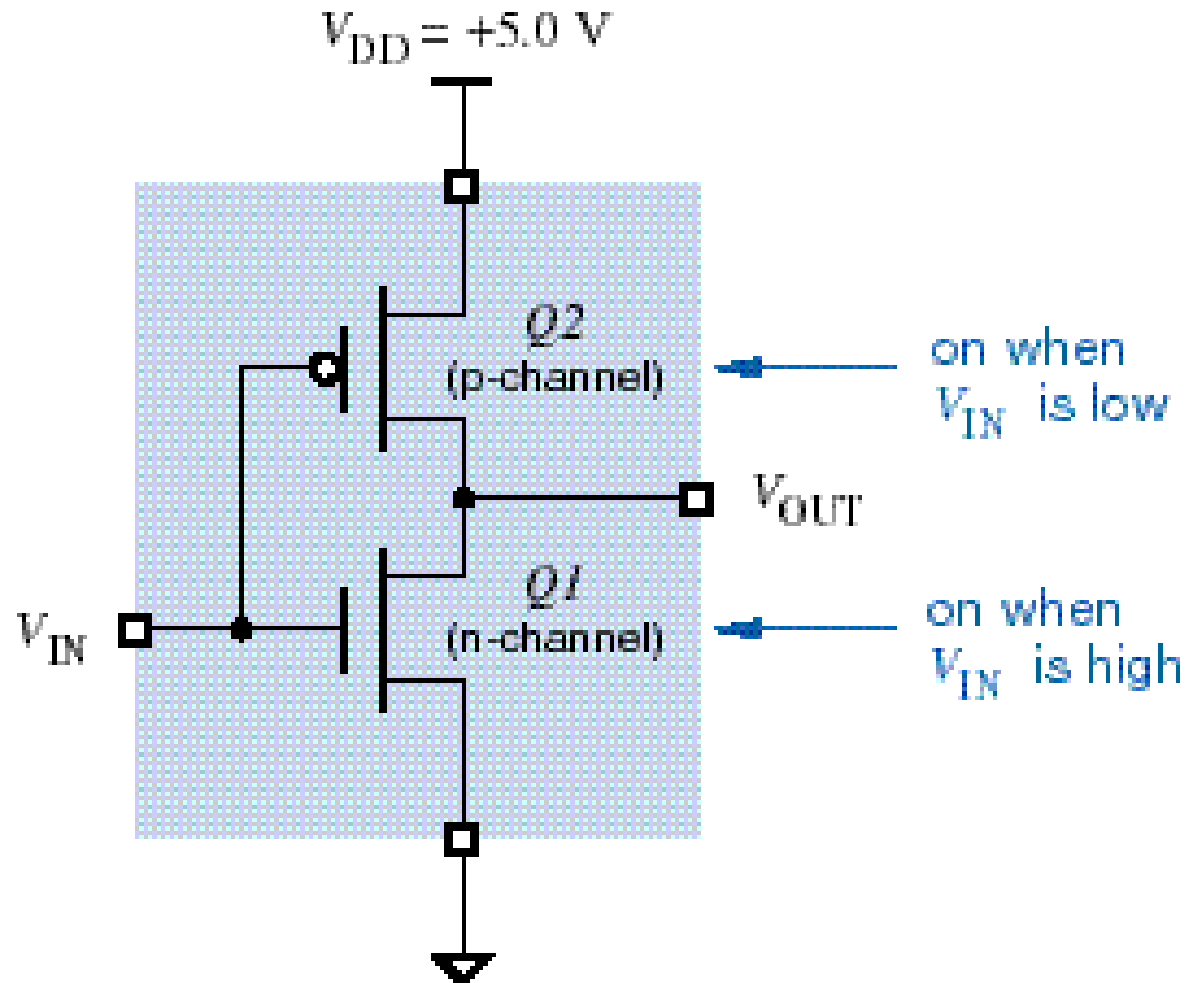
Krmiljenje linije

- Signal na vhodu linije ob času $t = 0$ čuti karakteristično impedanco linije, saj še nima informacije o tem, kaj je na drugi strani linije



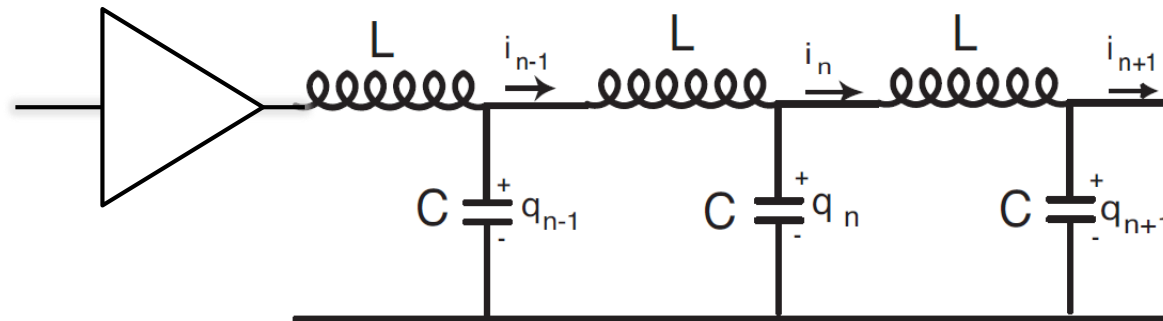
$$U_i = U_G \frac{Z_K}{Z_G + Z_K}$$

Tipična konfiguracija digitalnega CMOS izhoda



Krmiljenje linij

- Za krmiljenje linije potrebujemo nizkoimpedančni vir napetosti, saj je potrebujemo tok oz. naboj za polnjenje/praznjenje kapacitivnosti linije



- Če želimo, da se v času t_{pd} prenese logični nivo preko linije, potem mora biti začetna napetost U_i večja od napetostnega praga za logično „1“.

Krmiljenje linij

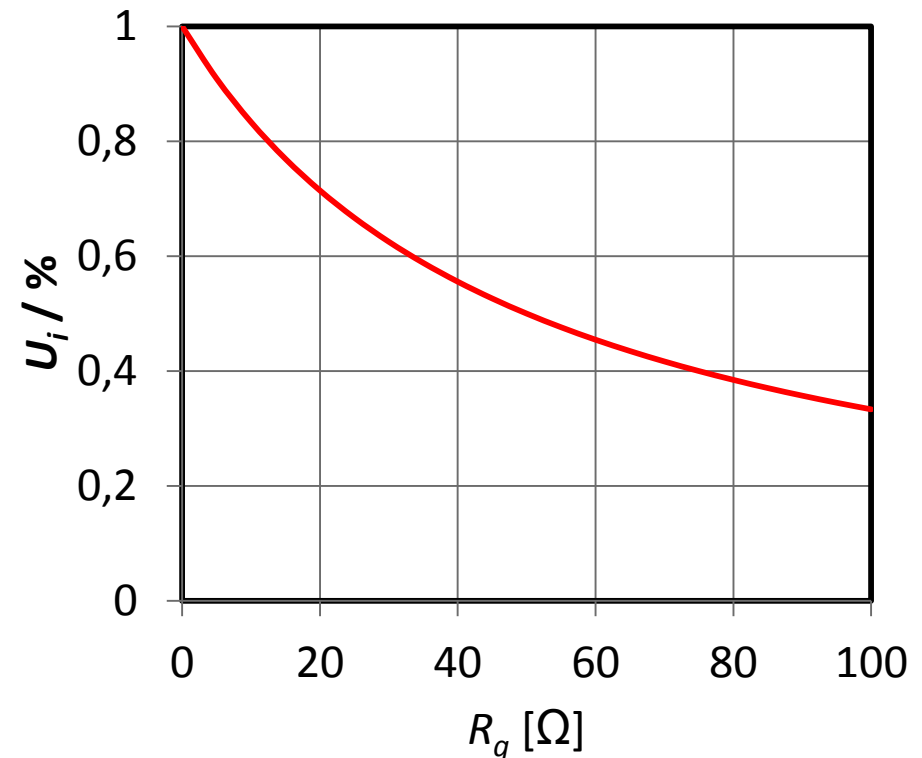
- Nizek R_g -> doseganje logične „1“ na liniji v $t < t_{pd}$
 - $U_i = \frac{Z_k}{R_g + Z_k} \rightarrow R_g \ll Z_k$
- Tipična geometrija mikrotrakaste linije na FR4 substratu
 - $h = 1,5 \text{ mm}, T = 35 \text{ } \mu\text{m in } W = 0,3 \text{ mm} \rightarrow Z_k = 125 \text{ } \Omega$
 - Želimo si $R_g < 12,5 \text{ } \Omega$
- Izhodna stopnje linijskih ojačevalnikov (Line drivers) imajo
 - $R_g = 5 - 60 \text{ } \Omega$
- V vsakem primeru imamo pri viru signala $\Gamma_g < 0$

Krmiljenje linij

- Minimalna Z_k linij za različne logične družine, ki imajo različne izhodne upornosti

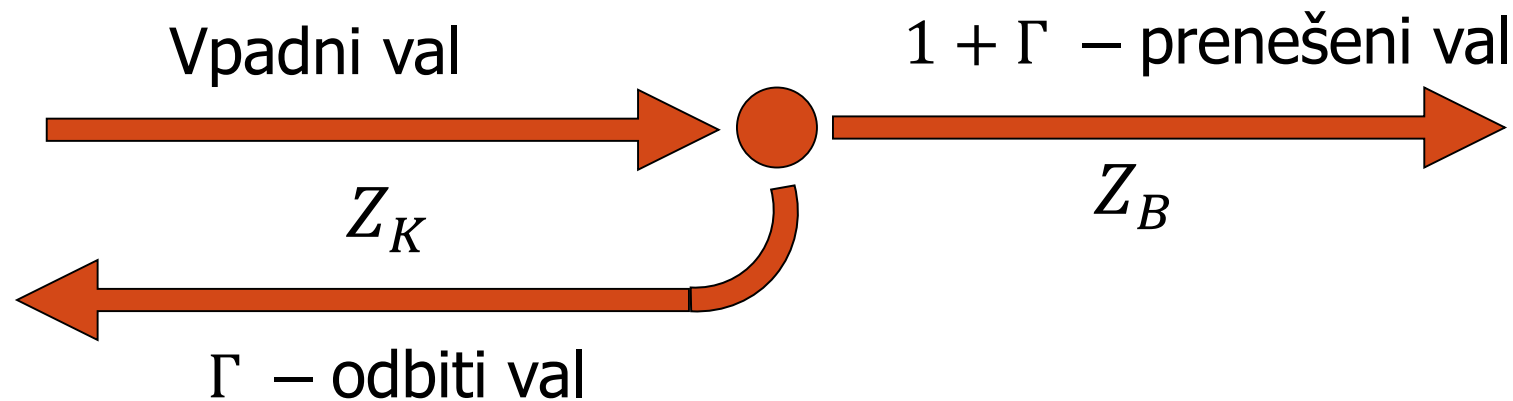
Logična družina	min. Z_k [Ω]
ABT	35
AC/ACT	50
ALS	65
FAST	50
LVT	35
ALVT	35
LVC	50
ALVC	50

- Začetna napetost U_i na liniji $Z_k = 50 \Omega$ v odvisnosti od izhodne upornosti vira



Odboji na linijah

- Odboj je pojav na koncih linije, ko se del energije, ki potuje po liniji (v katerikoli smeri), odbije in se vrača v nasprotni smeri prvotnega potovanja.



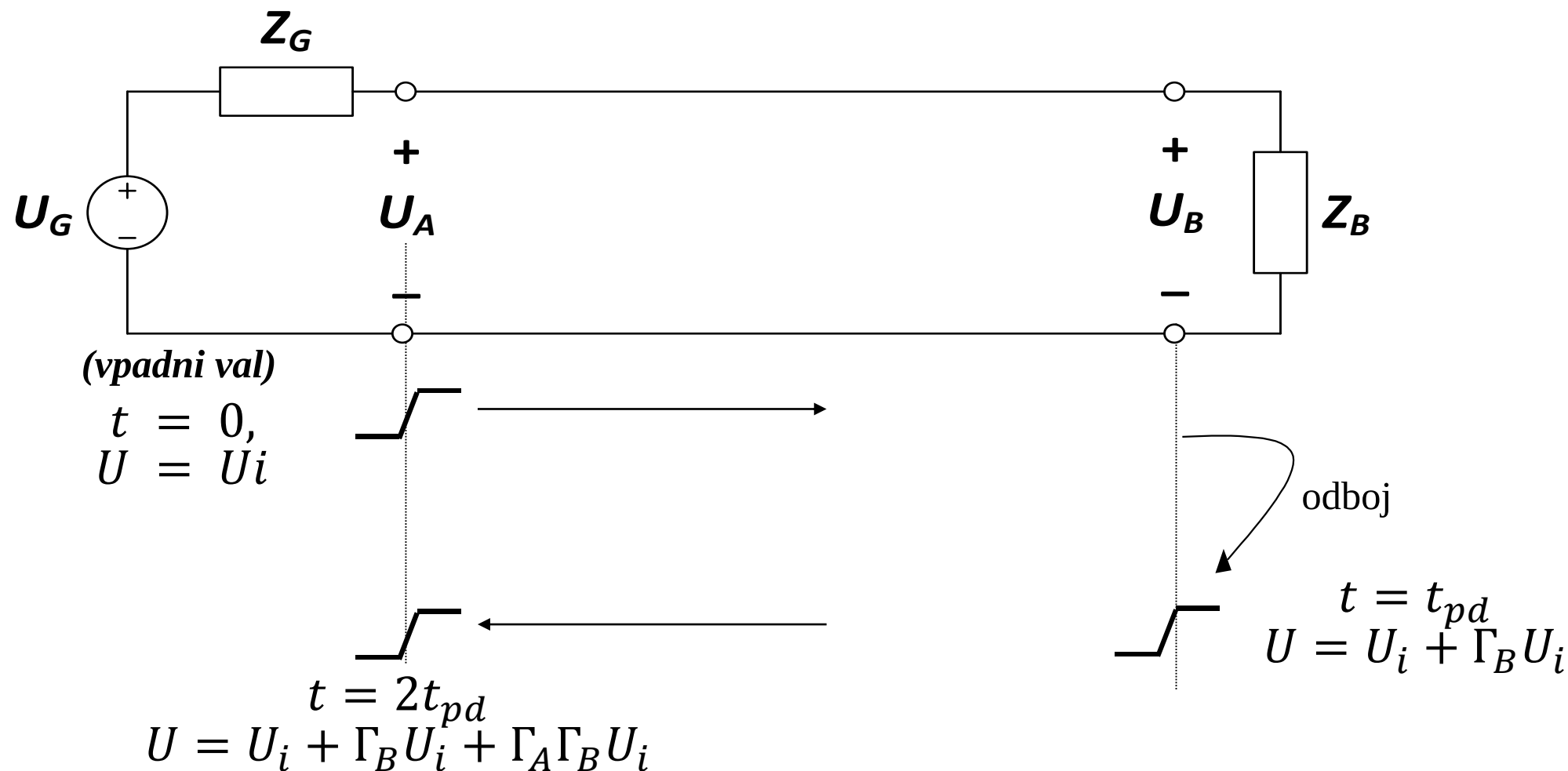
Koeficient odbojnosti

$$\Gamma = \frac{Z_B - Z_K}{Z_B + Z_K}$$

Koeficient prenosa

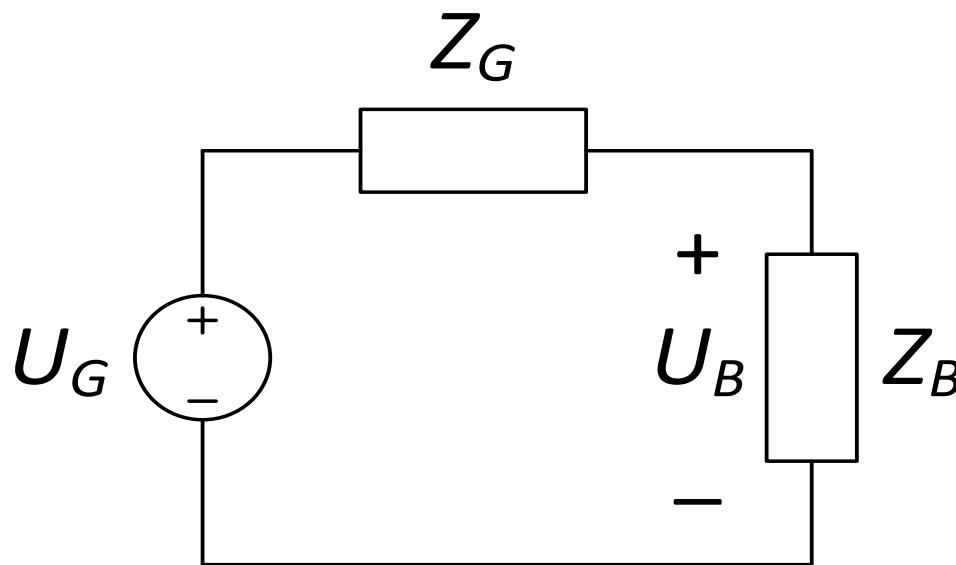
$$T = 1 + \Gamma = \frac{2Z_B}{Z_B + Z_K}$$

Razširjanje valovanja po liniji



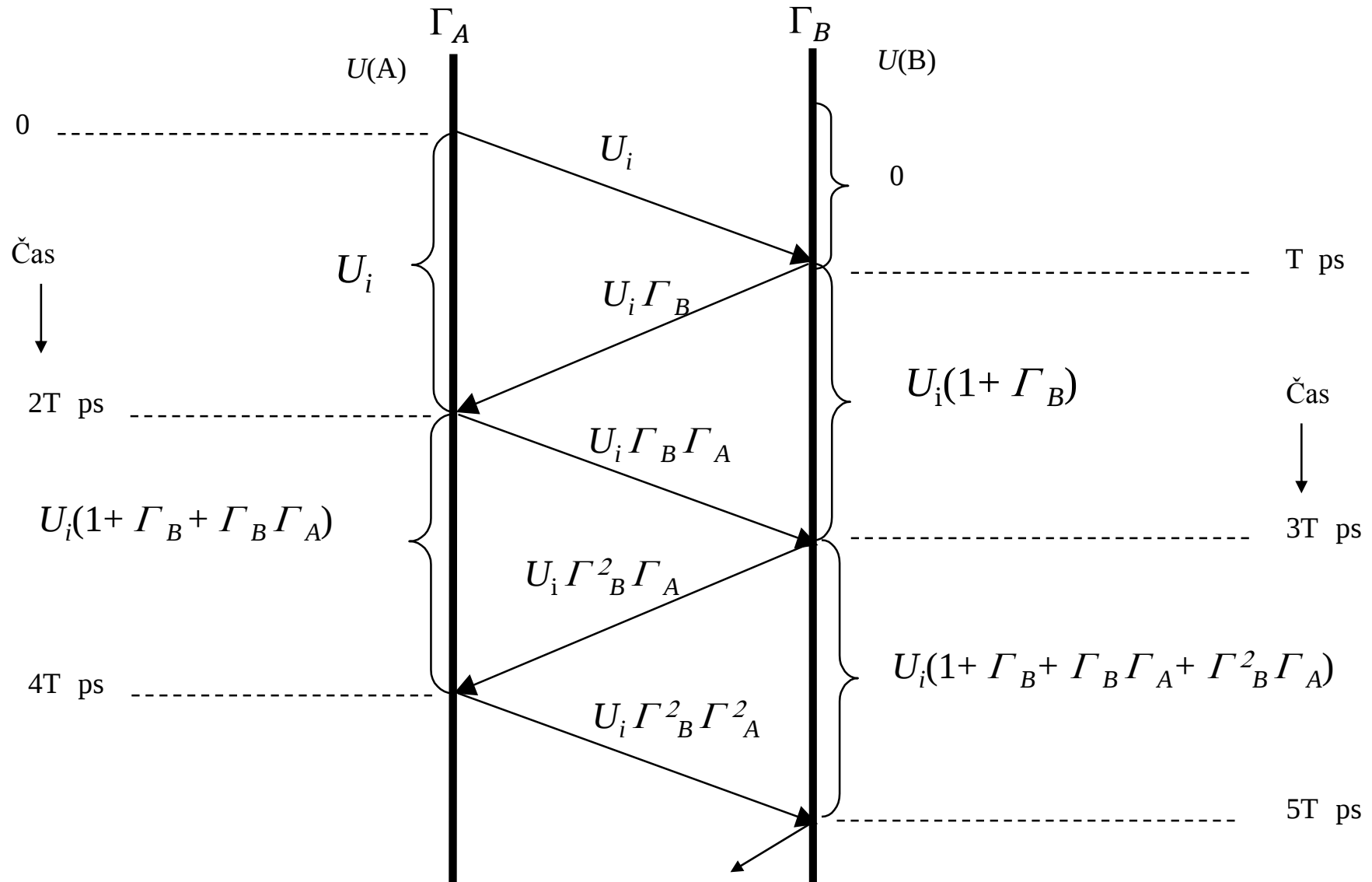
Stacionarno stanje

- Zaradi izgub na liniji in običajno nizkih odbojnosti moč odbitih signalov slabi in po preteku nekega časa linija preide v stacionarno stanje
- Takrat vir in breme ne čutita več impedance linije.



$$U_B = U_G \frac{Z_B}{Z_G + Z_B}$$

Mrežni diagram



Posebni primeri zaključitev linij

prilagoditev



$$\Gamma = \frac{Z_K - Z_K}{Z_K + Z_K} = 0$$

kratek stik



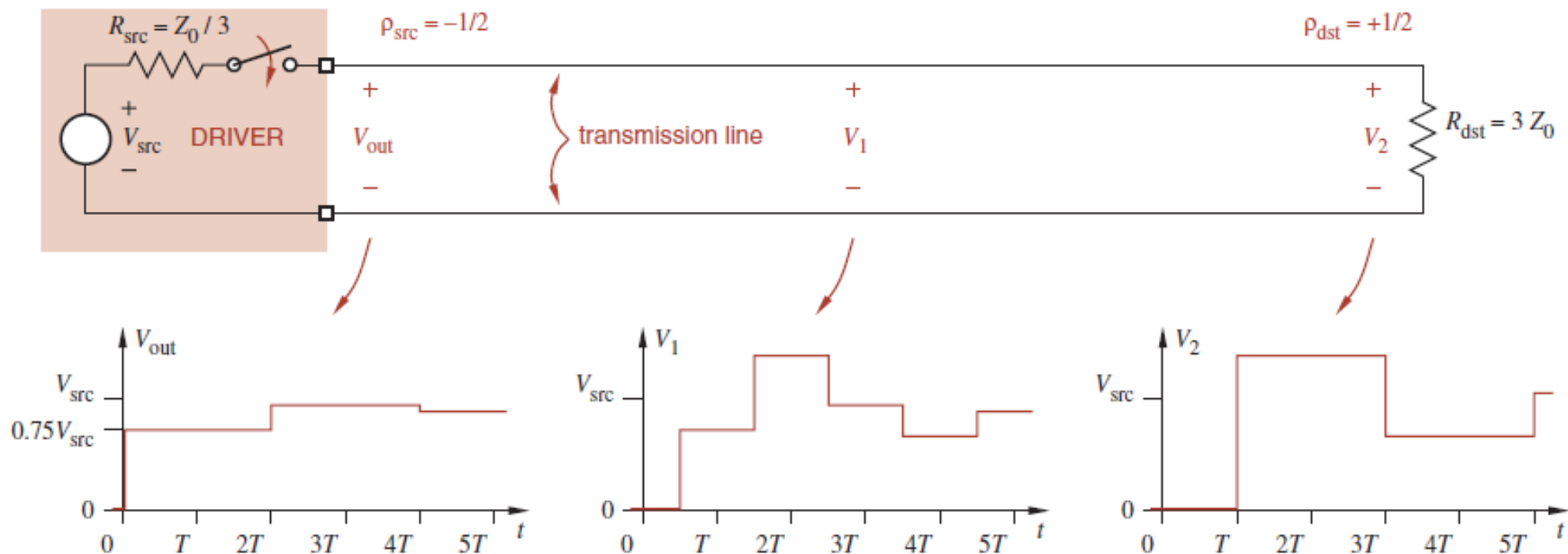
$$\Gamma = \frac{0 - Z_K}{0 + Z_K} = -1$$

odprte sponke



$$\Gamma = \frac{\infty - Z_K}{\infty + Z_K} = 1$$

Krmiljenje neprilagojene linije



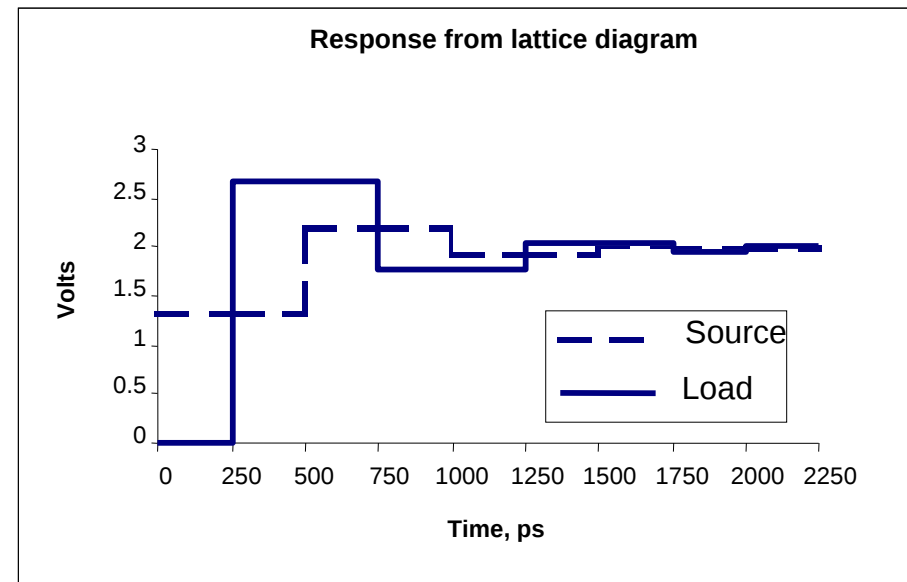
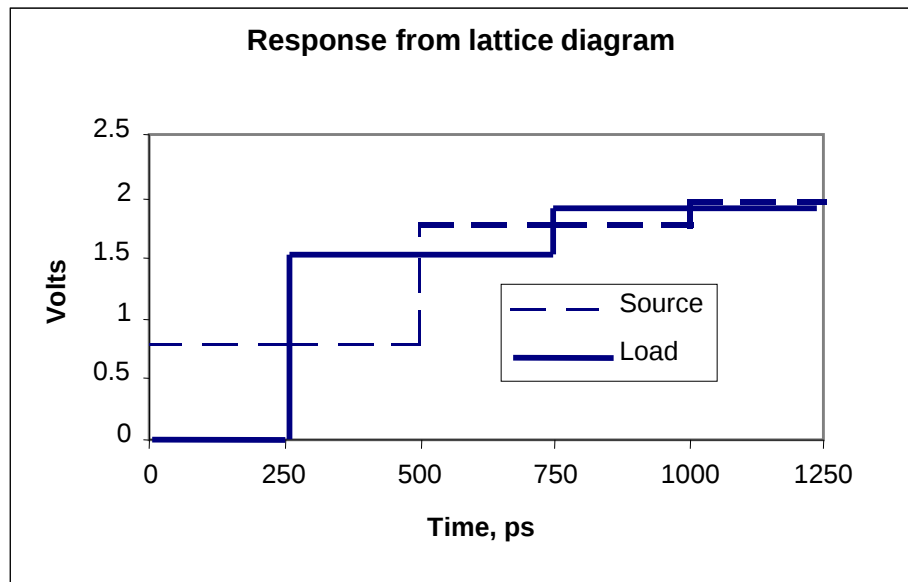
Pod- in nad-krmiljenja linija

- Podkrmiljena linija (Underdriven)

- $\Gamma_g > 0$ in $\Gamma_b > 0$

- Nadkrmiljena linija (Overdriven)

- $\Gamma_g < 0$ in $\Gamma_b > 0$

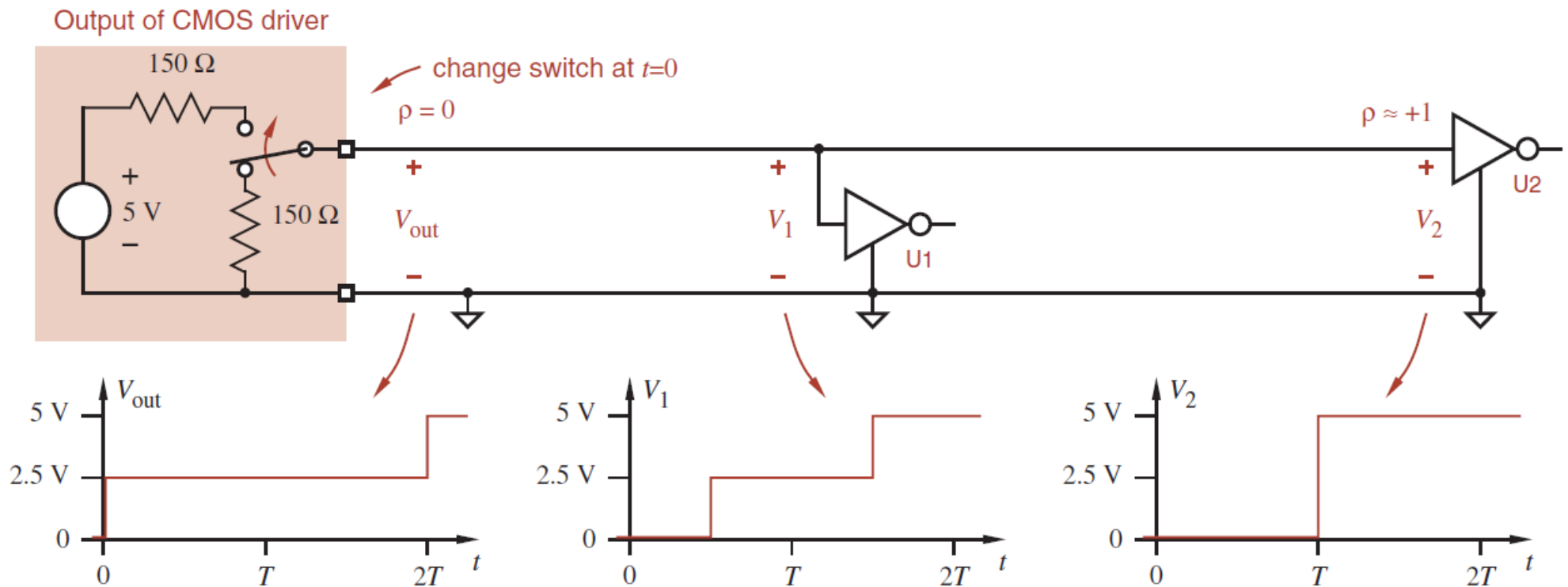


Zaključitve linij

- Mesto zaključitve
 - zaključitev pri generatorju
 - Signal doseže stacionarno stanje po zakasnitvi najmanj $2t_{pd}$
 - zaključitev pri bremenu
 - Signal doseže stacionarno stanje po zakasnitvi najmanj $1t_{pd}$
- Zaključitvene vezave:
 - serijska zaključitev
 - paralelna zaključitev
 - Théveninova zaključitev
 - izmenična ali AC zaključitev
 - Aktivna (diodna) zaključitev

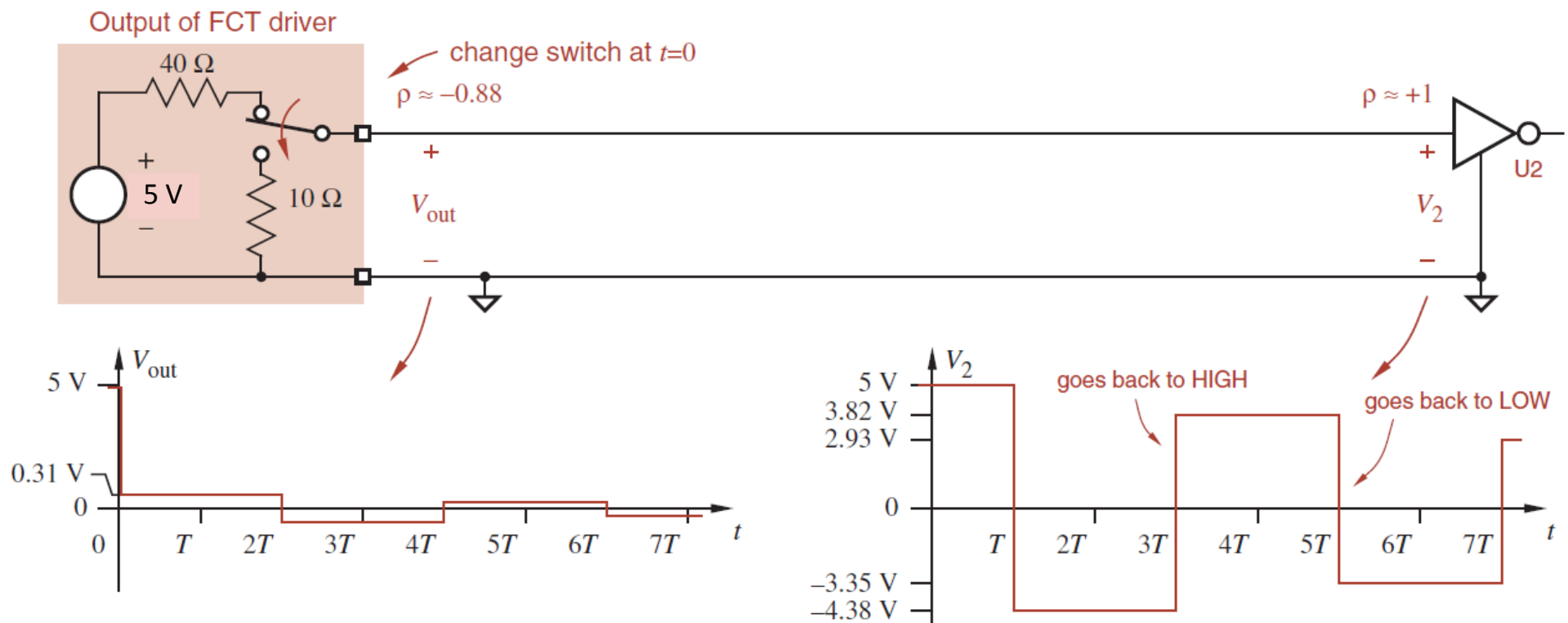
Krmiljenje linije z digitalnim CMOS izhodom

- Nezaključena linija, prehod iz „0“ na „1“
- Simetrična tokovna zmogljivost izhodnih tranzistorjev



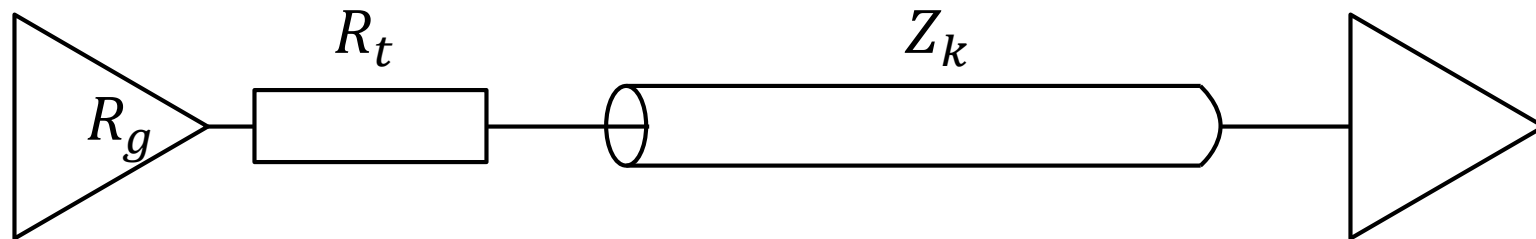
Krmiljenje linije z digitalnim CMOS izhodom

- Nezaključena linija, prehod iz „1“ na „0“
- Nesimetrična tokovna zmogljivost izhodnih tranzistorjev



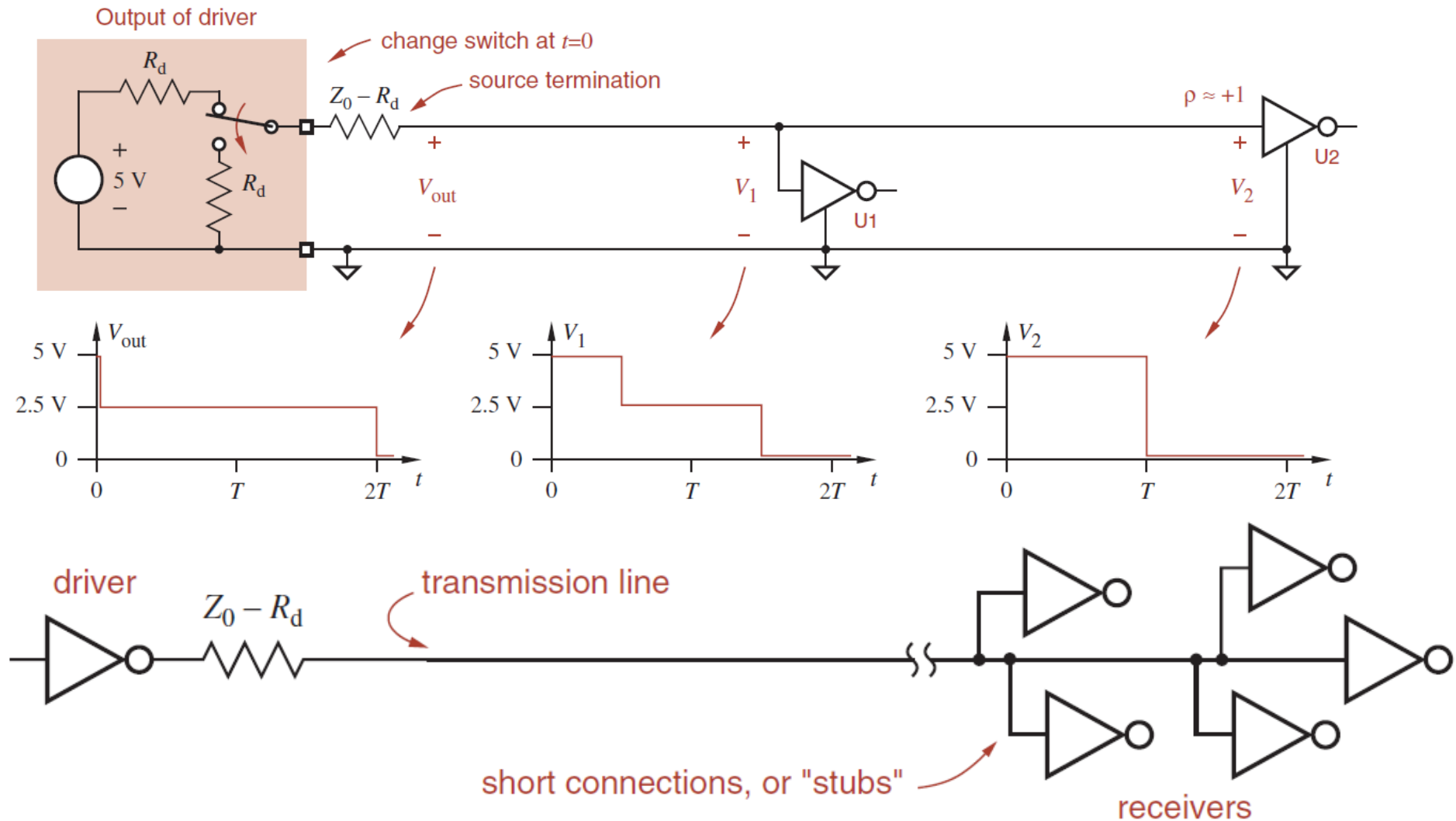
Serijska zaključitev

- Zaključitveni upor $R_t = Z_k$
 - Vezan serijsko v linijo, običajno pri izvoru



- Zaključitev ne vnaša dodatne enosmerne porabe moči na zaključitvenem vezju
- Izkustveno pravilo:
 - serijski zaključitveni upori imajo vrednosti približno 1/3 do 1/2 karakteristične impedance Z_k .
 - 15 – 40 Ω za linije $Z_k = 50 - 100 \Omega$

Serijska zaključitev – časovni diagram



Serijska zaključitev

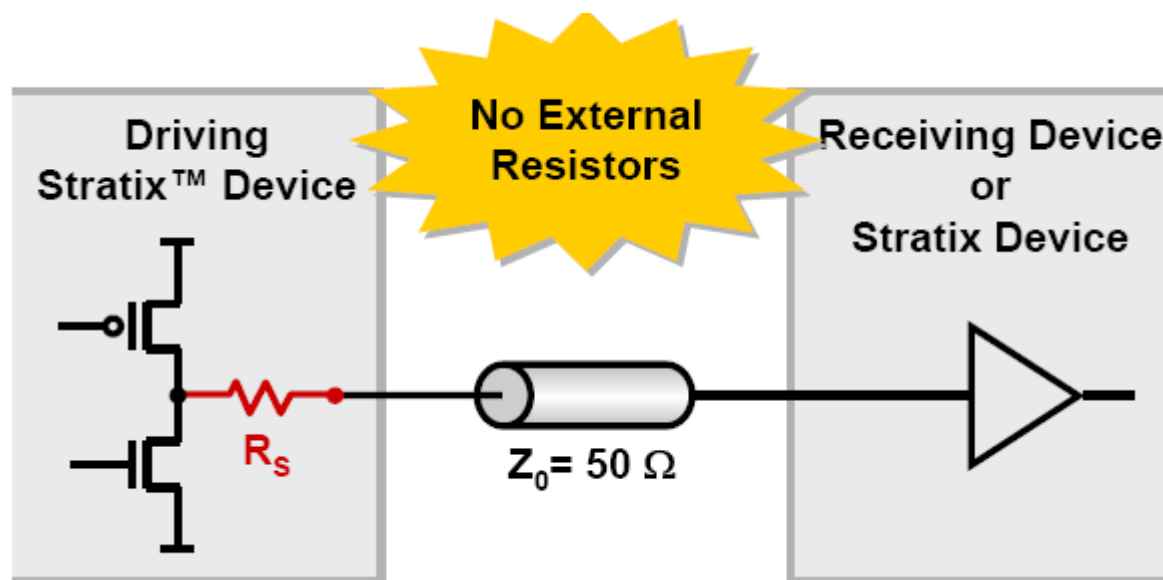
Prednosti

- cenena izvedba,
- nezahtevne aplikacije,
- Vsak linijski ojačevalnik potrebuje za zaključitev samo en upor.
- Nima enosmerne porabe moči
 - ni dodatne upornosti proti masi.
- Od vseh rezistivnih zaključitev ima najmanjšo porabo moči.
- Uporaba pri
 - zunanjih vodilih (periferija),
 - primerna za CMOS, ki nima močnih izhodov

Slabosti

- ni za hitra in zahtevna vodila
- Nastavitev zaključitvenega upora je težavna. Večina linijskih ojačevalnikov je nelinearnih in imajo različno izhodno impedanco za logična nivoja. Ni prilagoditve za oba nivoja!
- Podaljša se časovna konstanta linije na $\tau = C \cdot (R_t + Z_k)$.
- Problemi nastanejo, če se sprejemniki nahajajo na vmesnih točkah linije

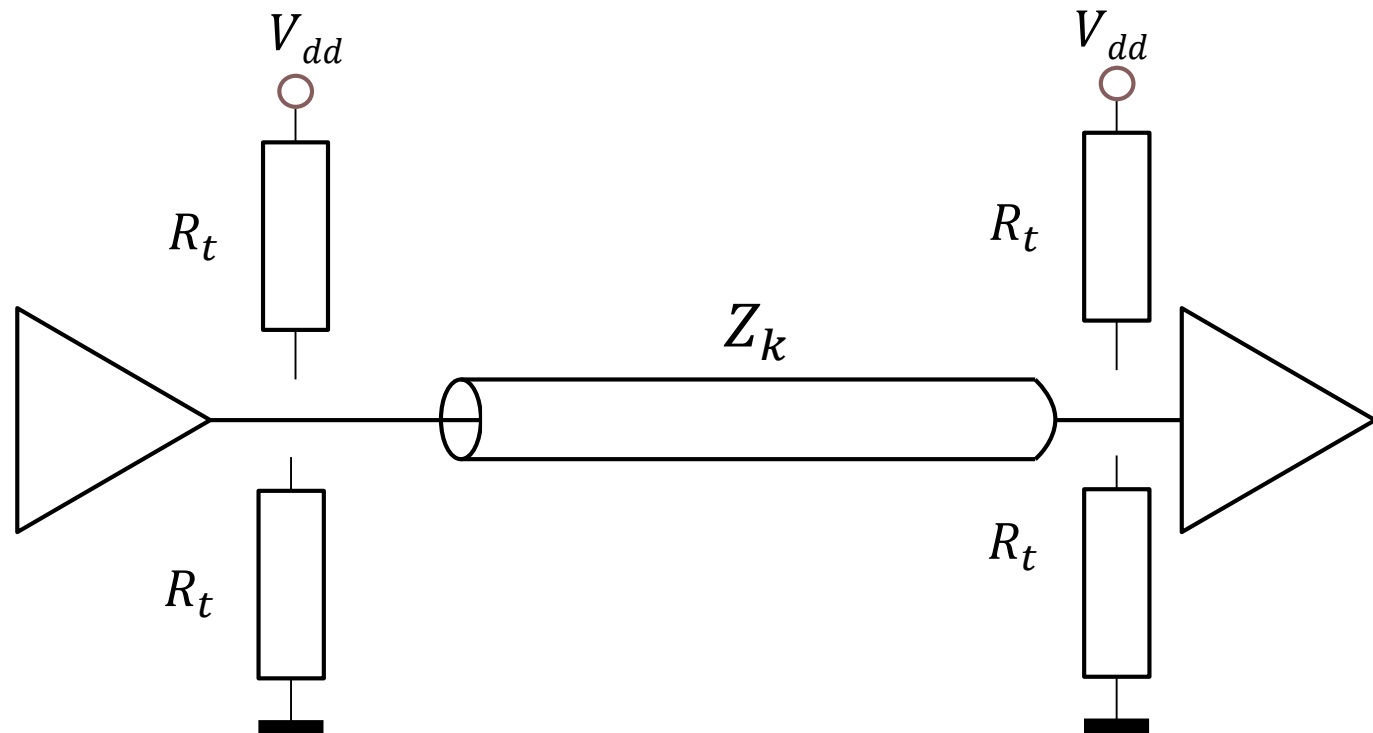
Vgrajena serijska zaključitev



I/O Standard	R_s
3.3-/2.5-/1.8-V LVTTTL	25 or 50 Ω
3.3-/2.5-/1.8-V LVCMOS	25 or 50 Ω
SSTL-2/-3 Class I	25 Ω
SSTL-2/-3 Class II	25 Ω

Paralelna zaključitev

- Zaključitveni upor $R_t = Z_k$
 - pri viru ali
 - pri bremenu ali
 - vezan na maso (pull-down) ali
 - vezan na napajanje (pull-up).



Paralelna zaključitev

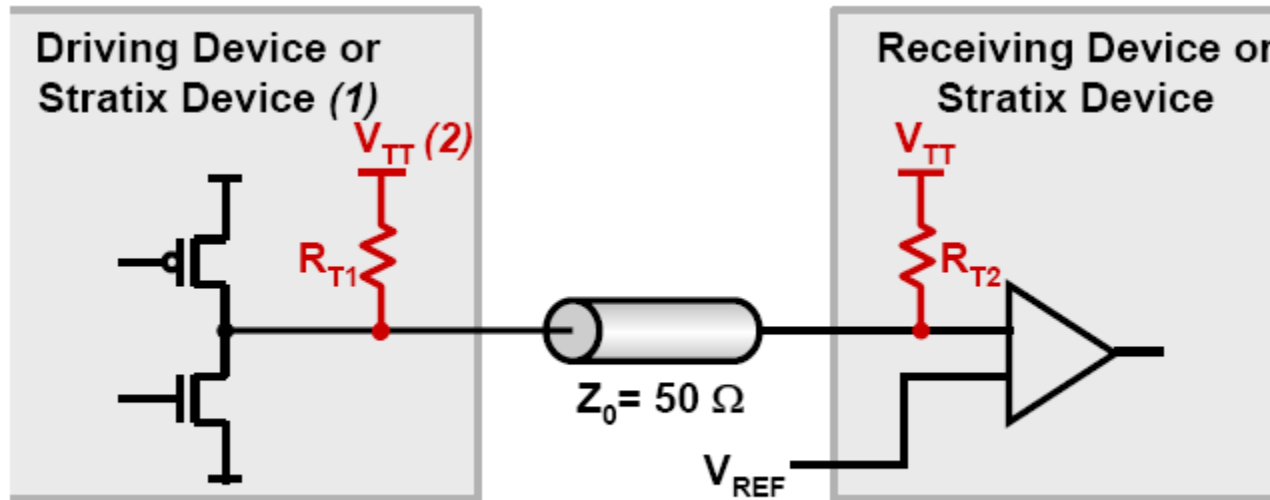
Prednosti

- Je enostavna zaključitev tako električno, manj pa za izvedbo na tiskanem vezju.
- Potrebujemo en sam zaključitveni element.
 - tudi pri več sprejemnikih.

Slabosti

- Velika enosmerna poraba moči
 - Vezava na maso za nizka razmerja impulz-pavza.
 - Vezava na napajanje za visoka razmerja impulz-pavza.
- Od linijskega ojačevalnika zahteva konstantno tokovno zmogljivost pri obeh logičnih nivojih.
 - Problem pri CMOS vezjih
 - Zaradi asimetrije preklapov se lahko spremeni razmerje impulz – pavza.

Vgrajena paralelna zaključitev



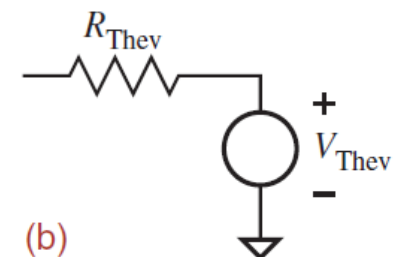
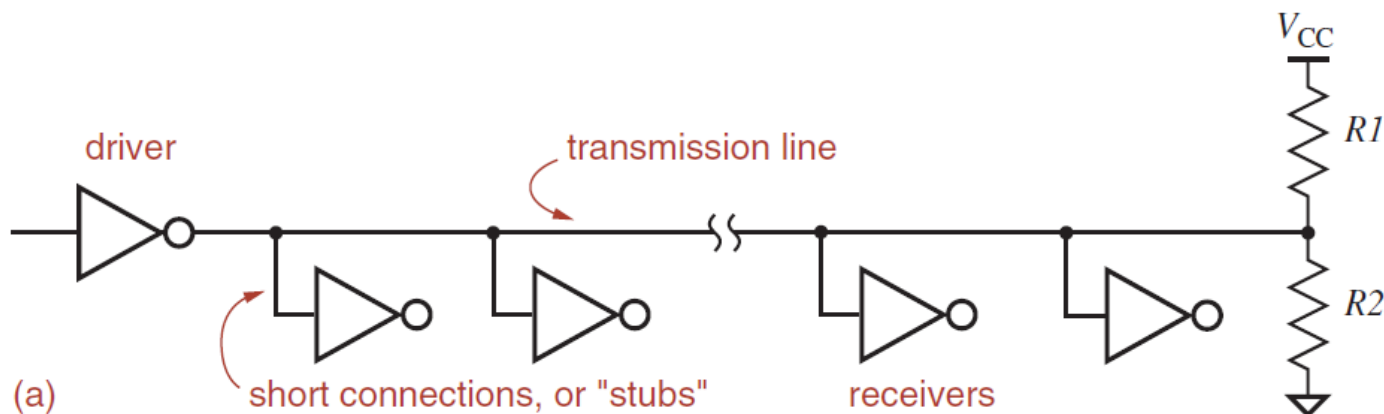
- (1) HSTL Class II Pin Example
(2) Internally Generated

I/O Standard	R_{T1}	R_{T2}
SSTL-2/-3 Class I	-	50 Ω
SSTL-2/-3 Class II	50 Ω (3)	50 Ω
HSTL Class I	-	50 Ω
HSTL Class II	50 Ω	50 Ω
GTL / GTL+	50 Ω	50 Ω
CTT	-	50 Ω

Théveninova zaključitev

- $R_{Th} = R_1 \parallel R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = Z_k$
- $U_{Th} = U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$
- $R_1 = Z_k \frac{U_{DD}}{U_{Th}}$
- $R_2 = Z_k \frac{U_{DD}}{U_{DD} - U_{Th}}$

- Kako določiti U_{Th}
 - Optimizacija glede na tokovne zmogljivosti vira
 - Določitev nivoja linije v primeru visokoimpedančnega stanja vira



Določitev U_{Th}

- Pri nesimetrični tokovni zmogljivosti vira ($I_{Hmax} < I_{Lmax}$)
 - Izberemo U_{Th} tako, da pri maksimalni vrednosti izhodnega toka pri visokem izhodnem nivoju dosežemo vsaj minimalno napetost za logično „1“.
 - $U_{th} = U_{Hmin} - I_{Hmax} (R_g + Z_K)$
 - S tem zagotovimo minimalno tokovno porabo zaključitve pri obeh logičnih nivojih
- Pri tristanjskem vodilu
 - Izberemo U_{Th} tako, da v primeru HiZ stanja ni v bližini pragovne napetosti logičnih vezij

Théveninova zaključitev

Prednosti

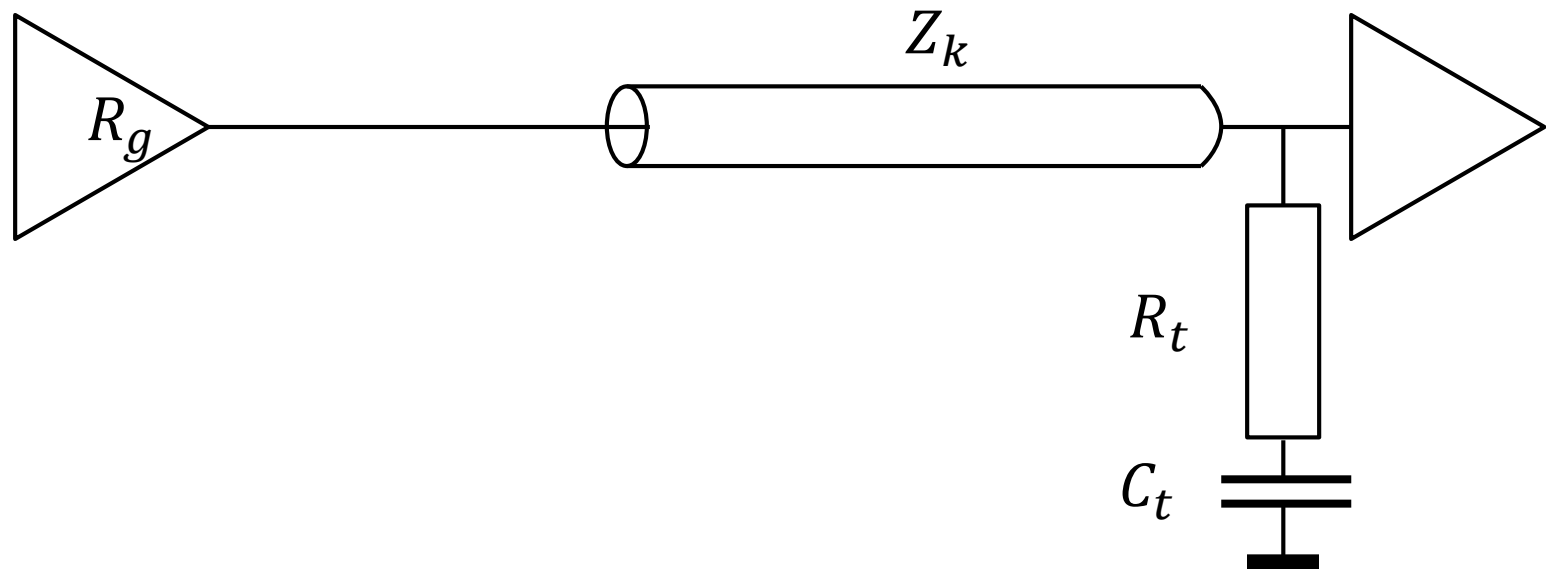
- Ugodna za primer sprejemnikov, ki so na različnih lokacijah linije
- Nudi dobro prenapetostno zaščito na bremenu.
- Ugodno vpliva na izhodno stopnjo za oba logična nivoja.
- Omogoča hkrati vezavo na napajanje in na maso
- S pravilno izbiro uporov povečamo šumno mejo

Slabosti

- vezava ima enosmerno porabo moči
- Potrebuje dva elementa.
- Zmanjšuje napetostno strmino.
- Optimalna izbira vrednosti obeh uporov je težavna
- Vezava se lahko uproabi za 3-stanjska vodila z visokoimedančnim stanjem, da definira stanje
 - Napačna izbira napetosti delilnika lahko povzroči veliko disipacijo moči v sprejemnem vezju

AC zaključitve

- $R_T = Z_k$
- $C = \frac{t_{pd}}{Z_k \ln\left(\frac{Z_k}{Z_k - R_g}\right)} = \frac{1 - \Gamma_g}{-2\Gamma_g}$
- $\tau = RC > 2t_{pd}\sqrt{1 + C_D/C_0}$



AC zaključitev

Prednosti

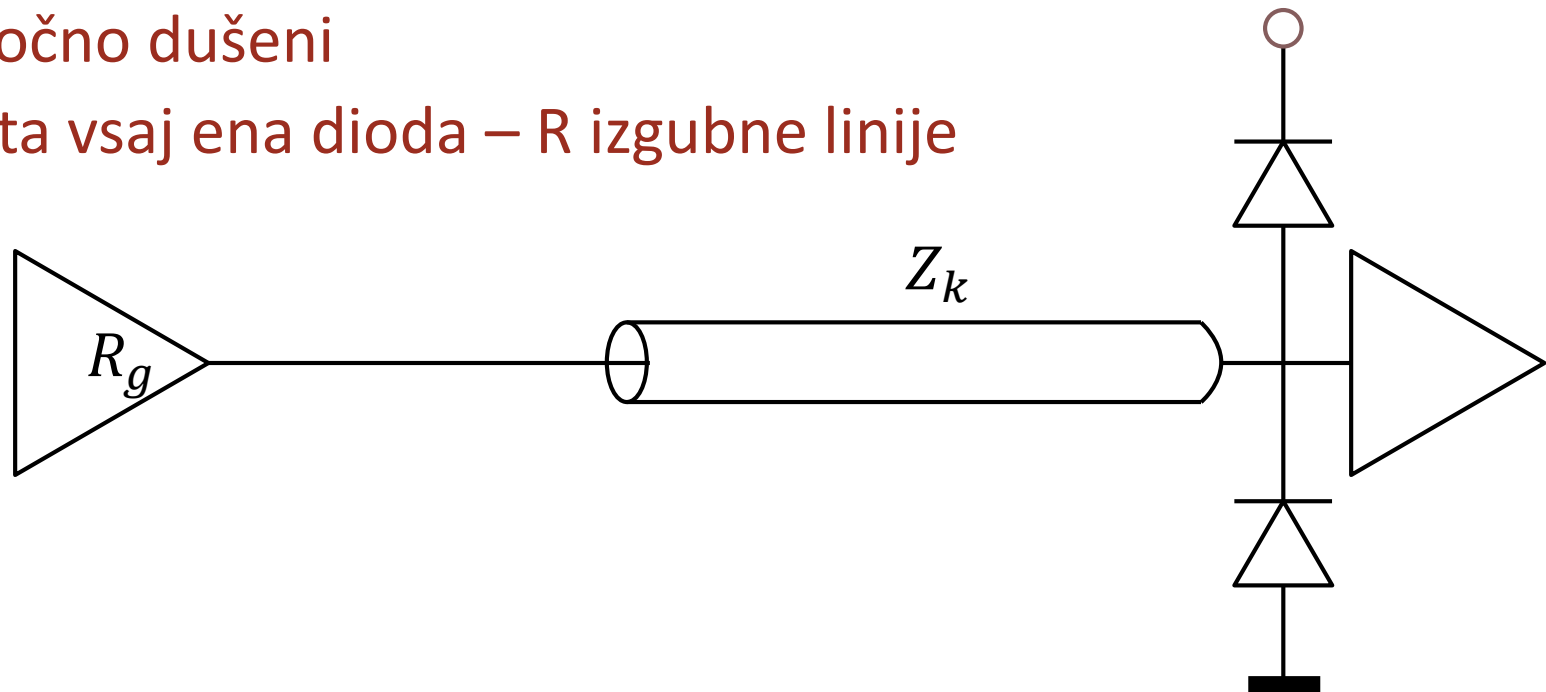
- Zmanjšuje porabo moči v primerjavi z enosmerno zaključitvijo.
 - **zaključitveni kondenzator preprečuje enosmerni tok in s tem zmanjša porabo.**
- Enostavna izbira vrednosti zaključitvenega upora.
- če je kondenzator pravilno izbran, je impulz na bremenu skoraj idealne oblike.
- Ena zaključitev za več sprejemnikov.
- Uporaba
 - **namesto paralelne ali pa Theveninove zaključitve, kjer se zaključitveni upor ne veže na napajanje,**
 - **povsod tam, kjer se zahteva majhna poraba moči.**

Slabosti

- Potrebuje dve komponenti.
- Težavna določitev vrednosti kondenzatorja.
- kondenzator se ne nabije vedno na isto vrednost, zato se tudi ne prazni vedno enako dolgo.
- zaključitev je odvisna tudi od dolžine linije, zato zaključitev ni primerna za sisteme z več izvori vzdolž linije.
- Ni za RS422 niti za tokovno močnejše linijske ojačevalnike.

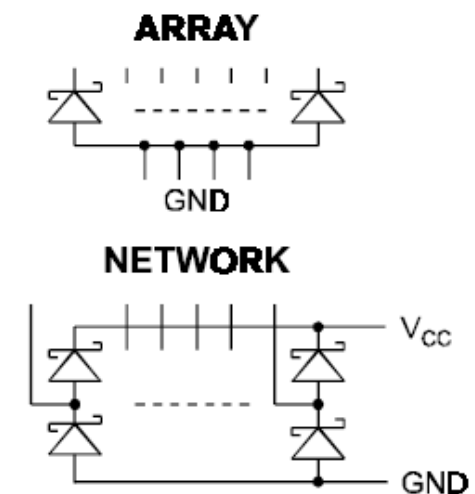
Aktivna – diodna zaključitev

- Ne absorbira moči temveč omejuje napetost
- Odboji še vedno obstajajo
 - So močno dušeni
 - Odprta vsaj ena dioda – R izgubne linije



Izbira diode za zaključitev

- ni impedančne prilagoditve,
- ni posebnih izrazov za izračun,
- pomembne lastnosti diode:
 - čas vklopa t_{ON} : povečan prevzpon/podvzpon
 - napetost kolena diode V_F : večja odbojnost V^-
 - čas nakopičenega naboja t_{rr} : daljši čas vzpona signala t_r
- Uporaba:
 - polja v TTL sistemih
 - vezja v CMOS sistemih (pozitivni prevzponi)
 - majhna vodila
 - sistemska vodila osebnih računalnikov



Aktivna – diodna zaključitev

Prednosti

- Glede na klasične zaključitve ni potrebno umerjanje s karakteristično impedanco. Zelo uporabno za linije, kjer Z_k ni poznana.
- Ni kapacitivne obremenitve, ne spremeni se efektivna Z_k' .
- Potrošena moč na odprti diodi je zanemarljiva napram rezistivnim zaključitvam.
- Linijski efekti (prevzpon, podvzpon, tresenje) se ublažijo s pravilno izbiro lastnosti diode.
- Schottkyjevo diodo lahko postavimo kamorkoli na linijo, kjer pričakujemo odboje

Slabosti

- Odziv diode mora biti poznan, da ni večkratnih odbojev.
- Te diode so učinkovite za višje napetosti (3,3 V ali 5 V).