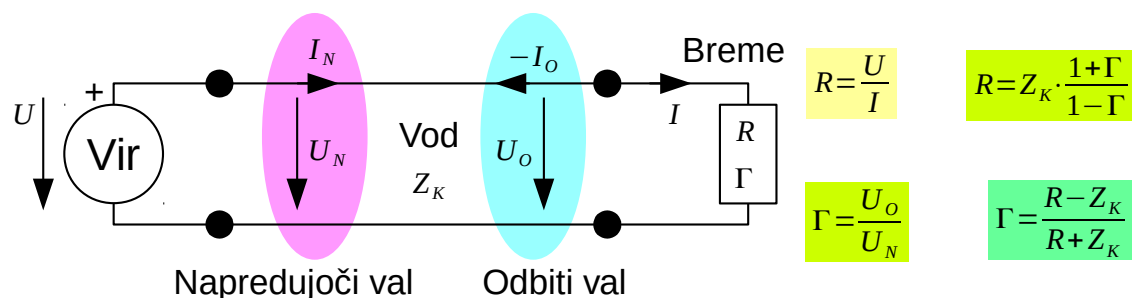


Odboj in zvonjenje

Rešitev telegrafske enačbe nam opisuje napetost $u(z, t)$ in tok $i(z, t)$ kot funkcijo položaja z na prenosnem vodu in časa t . Rešitev sestavljata napredujoči val in odbiti (povratni) val. Razmerje med napetostjo in tokom posameznih valov ni poljubno. Pri napredujočem valu znaša razmerje $+Z_K$, pri odbitem valu pa $-Z_K$. Brezizgubni prenosni vod opišemo z dvema podatkom: hitrostjo valovanja v in karakteristično impedanco Z_K .

Prenosni vod napajamo na začetku z virom, na drugem koncu pa ga zaključimo z bremenom. Najprej si oglejmo najpreprostejši zgled! Uporabimo enosmerni napetostni vir U in počakamo, da kakršenkoli prehodni pojav izzveni. Breme je upor R , ki določa razmerje med enosmerno napetostjo U in enosmernim tokom I :

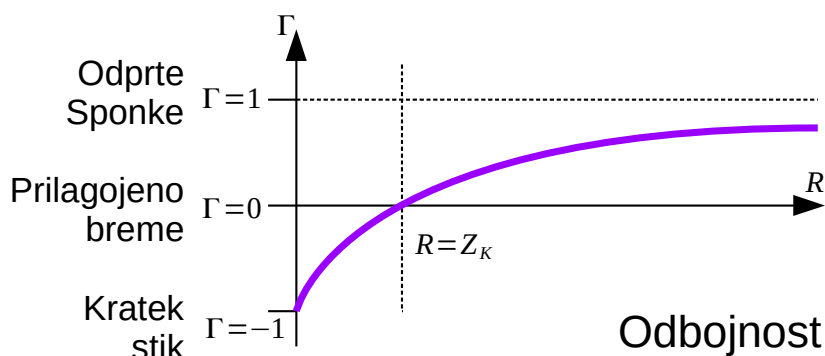


$$U = U_N + U_O \quad I = I_N + I_O = \frac{U_N}{Z_K} - \frac{U_O}{Z_K} \longrightarrow U_N - U_O = I \cdot Z_K = U \cdot \frac{Z_K}{R}$$

$$U_N = \frac{1}{2} \cdot \left(U + U \cdot \frac{Z_K}{R} \right)$$

$$U_O = \frac{1}{2} \cdot \left(U - U \cdot \frac{Z_K}{R} \right)$$

$$\Gamma = \frac{U - U \cdot \frac{Z_K}{R}}{U + U \cdot \frac{Z_K}{R}}$$



Upor R se v splošnem razlikuje od karakteristične impedance voda Z_K . Upor R torej vsiljuje drugačno razmerje med napetostjo U in tokom I , kot to zahteva rešitev valovne enačbe za napredujoči val. Rešitev

valovne enačbe za odbiti val zahteva negativno razmerje med napetostjo U in tokom I , kar je še težje doseči.

Zahtevano razmerje bremena R med napetostjo U in tokom I lahko dosežemo edino tako, da dopuščamo na prenosnem vodu hkrati obe rešitvi telegrafske enačbe za napredujoči val U_N, I_N in za odbiti val U_O, I_O . Razmerje med odbitim in napredujočim valom imenujemo odbojnost (bremena) Γ . V elektrotehniki odbojnost vedno definiramo kot razmerje napetosti $\Gamma = U_O/U_N$ oziroma električnih poljskih jakosti. Povsem jasno ima razmerje tokov $\Gamma = -I_O/I_N$ oziroma magnetnih poljskih jakosti obrnjen predznak.

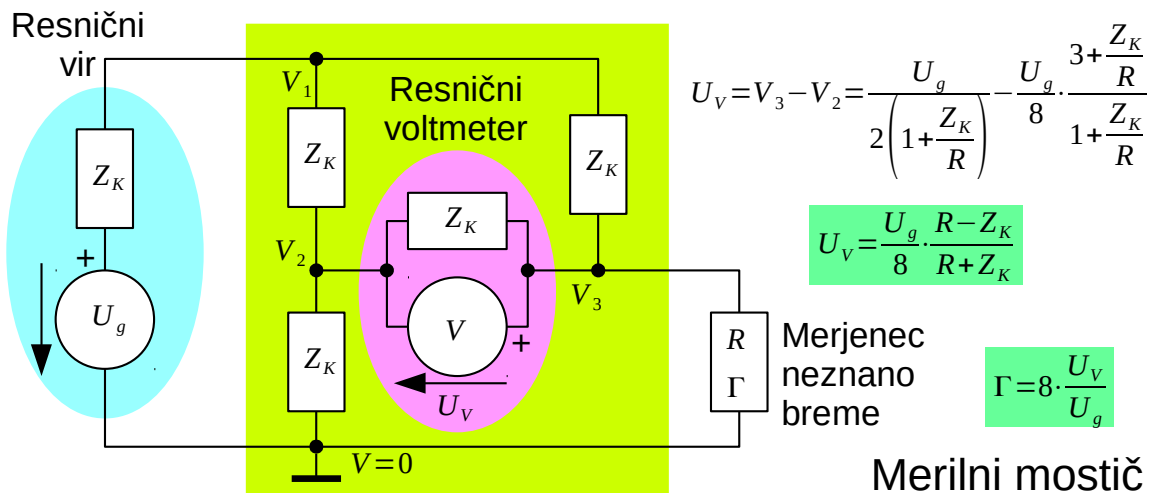
Odbojnost Γ v celoti opisuje električno obnašanje bremena povsem enakovredno njegovi električni upornosti R . Odbojnost Γ je dosti širši fizikalni pojem od električne upornosti R , saj je povsem točno določena tudi za elektromagnetna polja in številna druga valovanja v fiziki. Povsem jasno obstaja preprosta povezava v obe smeri: kako iz upornosti bremena R dobimo odbojnost Γ in obratno.

Odbojnost Γ je razmerje, torej neimenovano število. Uporaba odbojnosti Γ torej zahteva izbiro karakteristične impedance Z_K , ki ima v svetu električnih napetosti in tokov mersko enoto Ω (Ohm). Na drugi strani ima odbojnost Γ marsikatero prednost pri računanju oziroma meritvah. Za pasivno breme $R \geq 0$ je velikost odbojnosti $|\Gamma| \leq 1$ vedno manjša od enote!

Odbojnost Γ je načeloma lažje meriti od električne upornosti R . Električno upornost R določimo tako, da izmerimo napetost U z voltmetrom in tok I z ampermetrom. Pri tem nam nagaja bodisi notranja upornost voltmetra, ki ne more biti neskončno velika $R_V < \infty$ oziroma notranja upornost ampermetra, ki ne more biti neskončno majhna $R_A > 0$.

Odbojnost Γ lahko merimo na številne različne načine. Ena možna meritev odbojnosti Γ v svetu električnih napetosti in tokov je z merilnim mostičem. Mostič napajamo z resničnim električnim virom, ki ima končno in preprosto izvedljivo vrednost svoje lastne notranje upornosti $R_g = Z_K$. Kot merilnik napetosti uporabimo resnični voltmeter, ki ima končno in preprosto izvedljivo vrednost svoje lastne notranje upornosti $R_V = Z_K$:

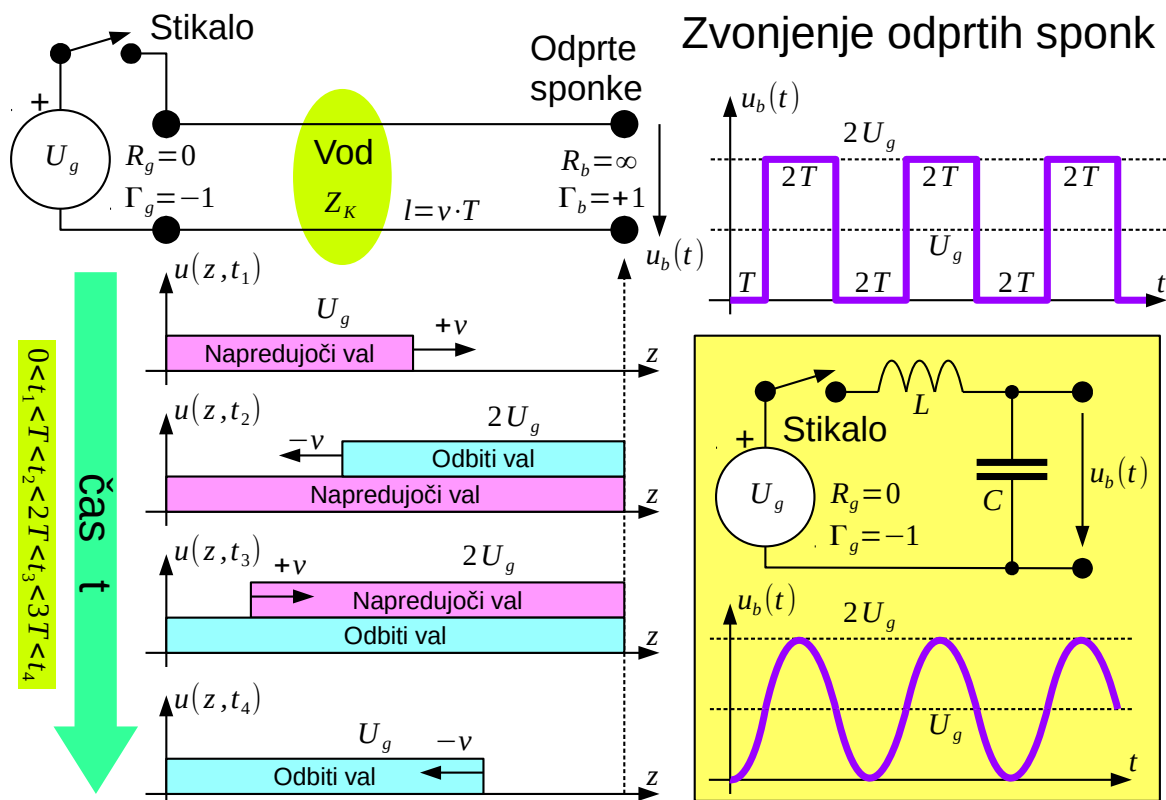
$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \quad & \frac{V_1 - U_g}{Z_K} + \frac{V_1 - V_2}{Z_K} + \frac{V_1 - V_3}{Z_K} = 0 \rightarrow 3V_1 = U_g + V_2 + V_3 \rightarrow 8V_2 = U_g + 4V_3 \rightarrow V_3 = \frac{U_g}{2\left(1 + \frac{Z_K}{R}\right)} \\
 \textcircled{2} \quad & \frac{V_2 - V_1}{Z_K} + \frac{V_2 - V_3}{Z_K} + \frac{V_2}{Z_K} = 0 \rightarrow 3V_2 = V_1 + V_3 \rightarrow V_1 = 3V_2 - V_3 \\
 \textcircled{3} \quad & \frac{V_3 - V_2}{Z_K} + \frac{V_3 - V_1}{Z_K} + \frac{V_3}{R} = 0 \rightarrow \left(2 + \frac{Z_K}{R}\right)V_3 = V_1 + V_2 \rightarrow \left(3 + \frac{Z_K}{R}\right)V_3 = 4V_2 \rightarrow V_2 = \frac{U_g}{8} \cdot \frac{3 + \frac{Z_K}{R}}{1 + \frac{Z_K}{R}}
 \end{aligned}$$



Ena od pomanjkljivosti merilnega mostiča je ta, da vir napajanja, voltmeter in merjenec nimajo ene skupne sponke, ki bi jo lahko ozemljili, kar je še posebno težavno pri visokih frekvencah. Prikazana ozemljitev na sliki je namenjena samo reševanju vozliščnih enačb za potenciala V_1 , V_2 in V_3 , iz katerih izračunamo odziv U_V merilnega mostiča. Odziv U_V je kar sorazmeren odbojnosti Γ neznanega bremena in napetosti vira U_g , ni potrebno nobeno dodatno preračunavanje!

Oboroženi z novim pojmom odbojnosti Γ se lahko lotimo zahtevnejših nalog, na primer reševanju prehodnih pojavov ob preklapljanju v električnih vezij. Tu osnove elektrotehnike ne znajo rešiti nekaterih preprostih nalog. Na primer, če na napetostni vir U priključimo kondenzator C , vanj steče elektrina $Q = C \cdot U$. Vir pri tem opravi delo $A = Q \cdot U$ in shrani energijo $W = Q \cdot U / 2$ v kondenzatorju. Polovica energije je očitno poniknila nekje v prehodnem pojavu?

Isto nalogo opisuje elektrodinamika nekoliko drugače. Koncentrirani gradniki so samo računska poenostavitve. V resnici imamo samo porazdeljene gradnike, to je porazdeljene kondenzatorje, porazdeljene tuljave itd. Kondenzator lahko v elektrodinamiki ponazorimo s prenosnim vodom, ki ima na drugem koncu odprte sponke:



Odprte sponke pomenijo neskončno upornost bremena $R_b = \infty$ in pripadajočo odbojnost $\Gamma_b = +1$. Napetostni vir U_g ima neskončno majhno notranjo upornost $R_g = 0$. Vir na začetku prenosnega voda opišemo z odbojnostjo vira, ki za napetostni vir znaša $\Gamma_g = -1$. Celoten prehodni pojav opisujemo kot odbijanje valovanja med virom na začetku voda in bremenom na koncu istega voda.

V trenutku, ko vključimo stikalo, vir še ne more vedeti, kaj je na drugem koncu prenosnega voda, saj odbitega vala takrat še ni! Vir pošilja v vod samo napredujoči val, torej sta napetost U in tok I v razmerju Z_K . Pripadajoča energija se kopiči kot energija električnega polja v kapacitivnosti voda in magnetna energija v induktivnosti voda.

Čez čas T prednja fronta napredujočega vala doseže konec voda in se tam odbije. Ker znaša odbojnost odprtih sponk $\Gamma_b = +1$, ima napetost odbitega vala U_O enak predznak kot napetost napredujočega vala U_N . Skupna napetost na prenosnem vodu se podvoji na $2U_g$, tok za fronto odbitega vala upade na nič. Za fronto odbitega vala se vsa energija pretvori v električno energijo v porazdeljeni kapacitivnosti, magnetna energija pa upade na nič.

Čez čas $2T$ se odbiti val vrne do vira. Vir lahko šele tedaj izve, kaj se sploh dogaja na drugem koncu prenosnega voda! Odbiti val se ponovno odbije na viru. Ker ima slednji notranjo upornost nič $R_g=0$, se odbiti val ponovno odbije z obratnim predznakom $\Gamma_g=-1$. Dvakrat odbiti val se natančno izniči s prvotnim napredujočim valom. Podirajoča fronta napredujočega vala tedaj prazni energijo, ki se je nakopičila v prenosnem vodu. Ker v tem trenutku izvor vidi le še odbiti val, odbiti val vrača viru nakopičeno energijo iz prenosnega voda.

Čez čas $3T$ podirajoča fronta napredujočega vala doseže konec voda. Napredujoči val povsem izgine. Napetost na odprtih sponkah upade na nič. Ker ni več napredujočega vala, se začne podirati tudi odbiti val, ki še vedno vrača nakopičeno energijo viru.

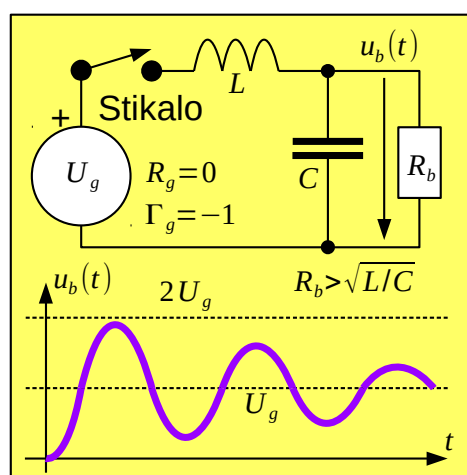
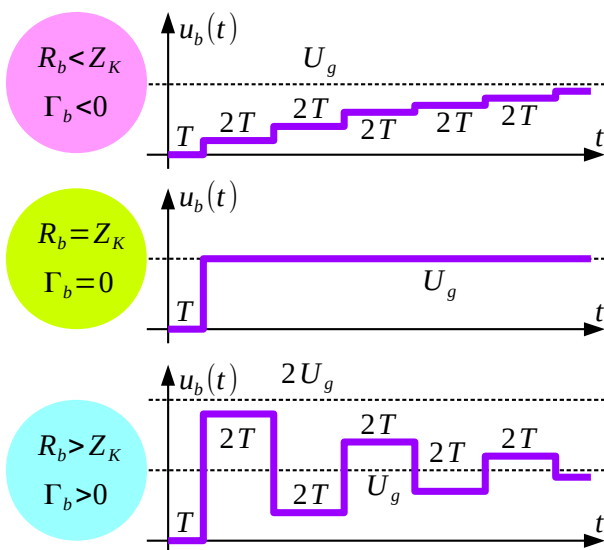
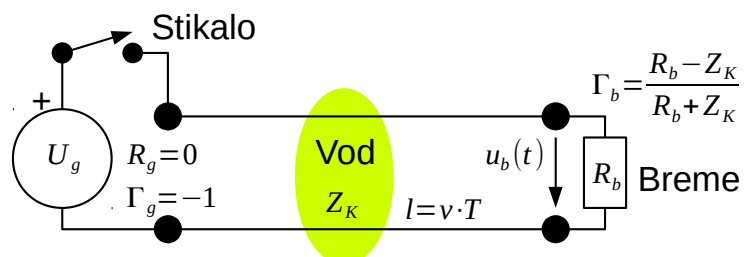
Čez čas $4T$ se vsa energija vrne nazaj v vir. Na prenosnem vodu ni več nobenega toka niti napetosti, torej nič energije. Celoten cikel nihanja energije se čez čas $4T$ ponovi na povsem enak način kot v trenutku, ko smo sklenili stikalo... Pojav imenujemo zvonjenje prenosnega voda.

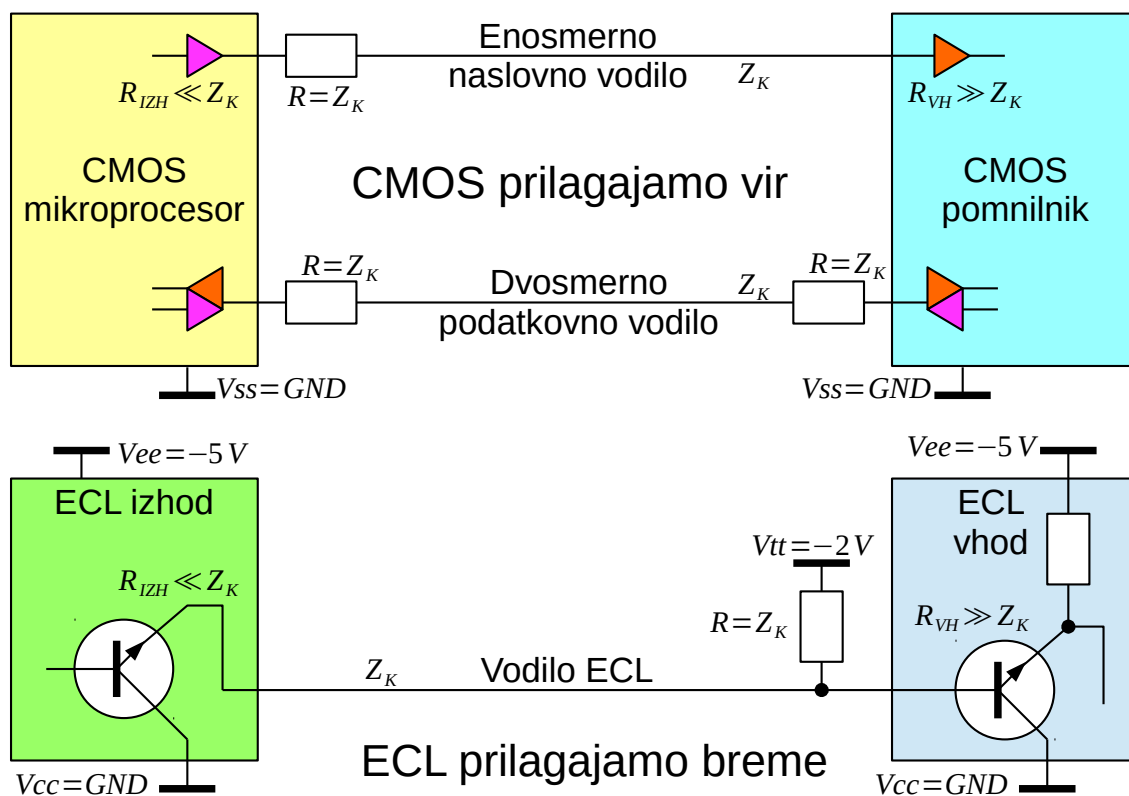
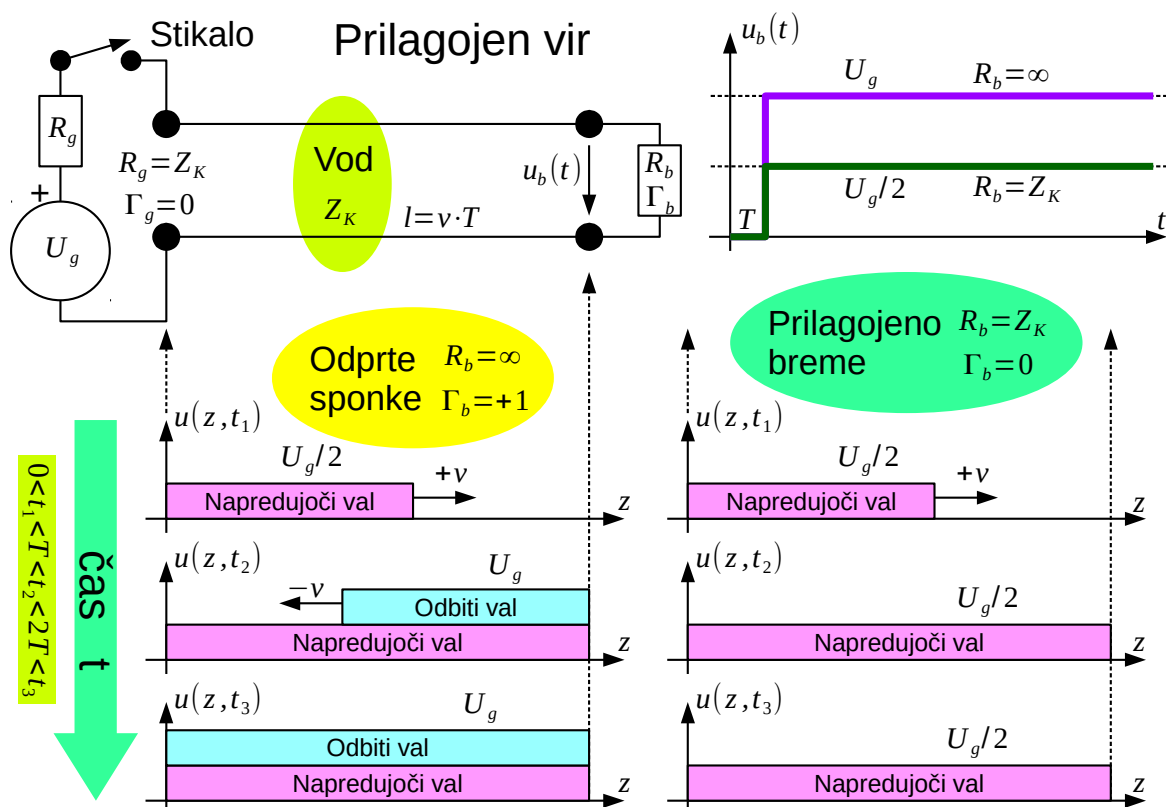
Zanimivo, popolnoma enakovredno zvonjenje opazimo tudi v vezju s koncentriranimi gradniki, ko kondenzator C , priključimo na napetostni vir U_g preko zaporedne tuljave L , na primer induktivnosti priključnih žic. Napetost na odprtih sponkah oziroma na kondenzatorju niha med nič in dvakratno napetostjo vira $2U_g$. Razlika je edino v časovni obliki nihanja napetosti: pravokotnik za prenosni vod s porazdeljenimi gradniki in sinus za koncentrirane gradnike.

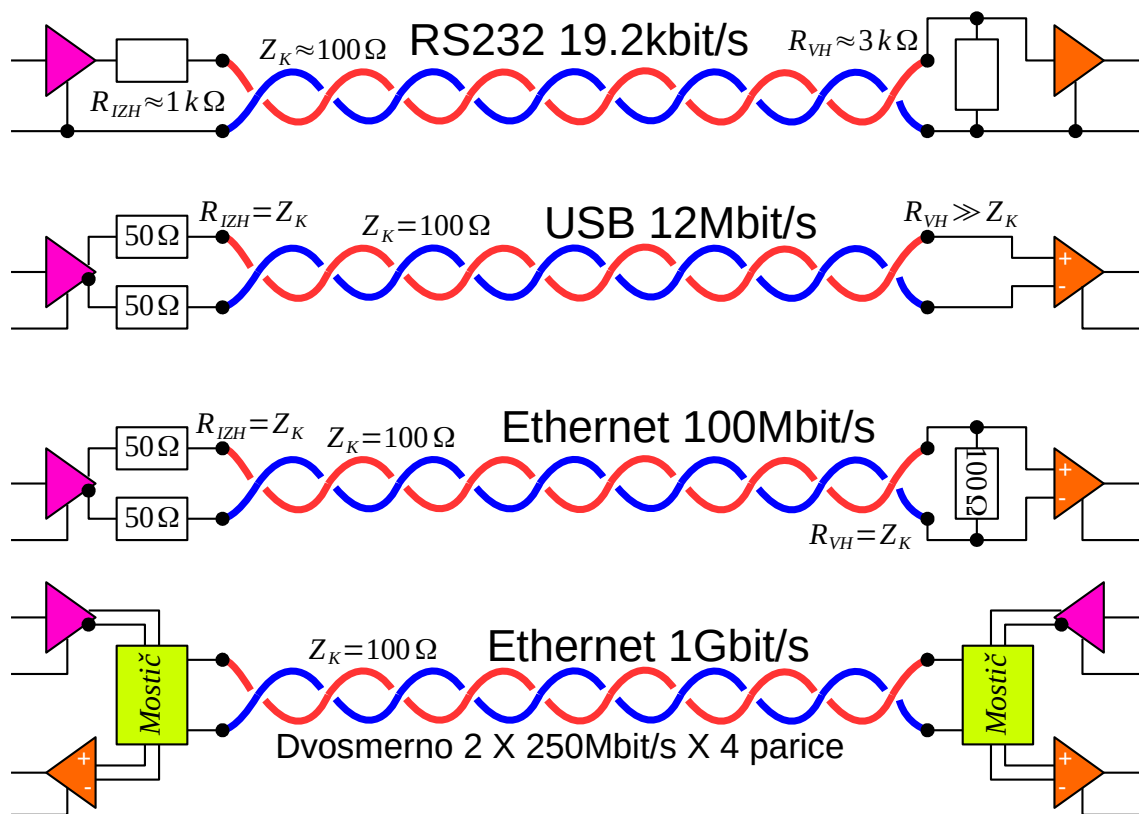
Resnični koncentrirani gradniki in resnični prenosni vodi imajo tudi izgube, zaradi katerih opisani prehodni pojav izzveni. Dobro izdelane tuljave, kondenzatorji in prenosni vodi imajo majhne izgube, da opazimo tudi več kot 100 (sto!) prenihajev, preden prehodni pojav izzveni. Izvor izgub je tudi majhna, ampak končna notranja upornost vira $R_g \neq 0$. V točnejši tridimenzijski obravnavi bi morali upoštevati še izgube sevanja!

Zvonjenje električnih je večinoma skrajno nezaželen pojav. Dvojna napetost vira $2U_g$ je pogosto vzrok odpovedi gradnikov električnih vezij, ki so načrtovani za napetost napajanja U_g . Zvonjenje vnaša napake v prenos podatkov v številskih vezjih. Zvonjenje omejujemo na različne načine: s prilagoditvijo upornosti (impedance) bremena R_b , z gradniki za omejevanje napetosti na bremenu, s prilagoditvijo notranje upornosti vira R_g , z omejevanjem hitrosti preklapljanja vira itd.

Zvonjenje bremen







* * * * *