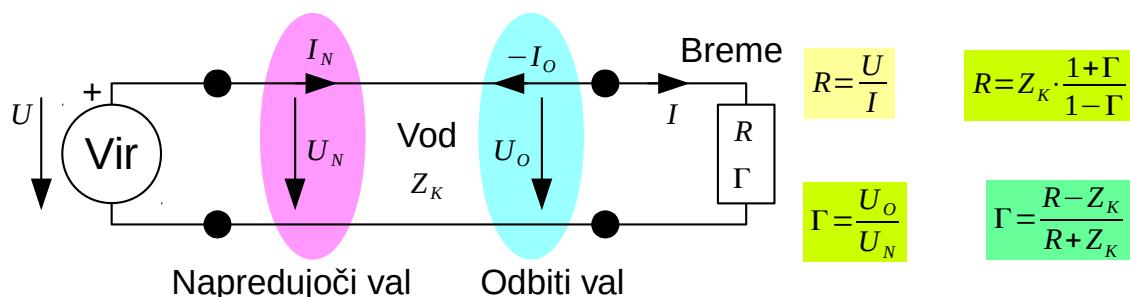


Odboj in zvonjenje

Rešitev telegrafske enačbe daje 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 v celoti 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 :

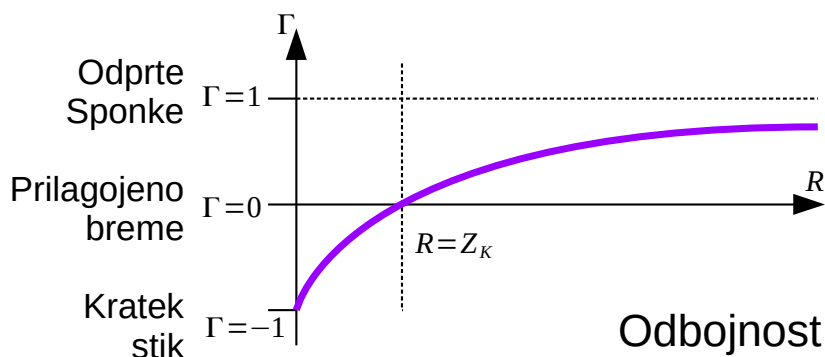


$$U = U_N + U_O \quad I = I_N + I_O = \frac{U_N}{Z_K} - \frac{U_O}{Z_K} \quad \longrightarrow \quad U_N - U_O = I \cdot Z_K = U \cdot \frac{Z_K}{R}$$

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

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

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



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 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.

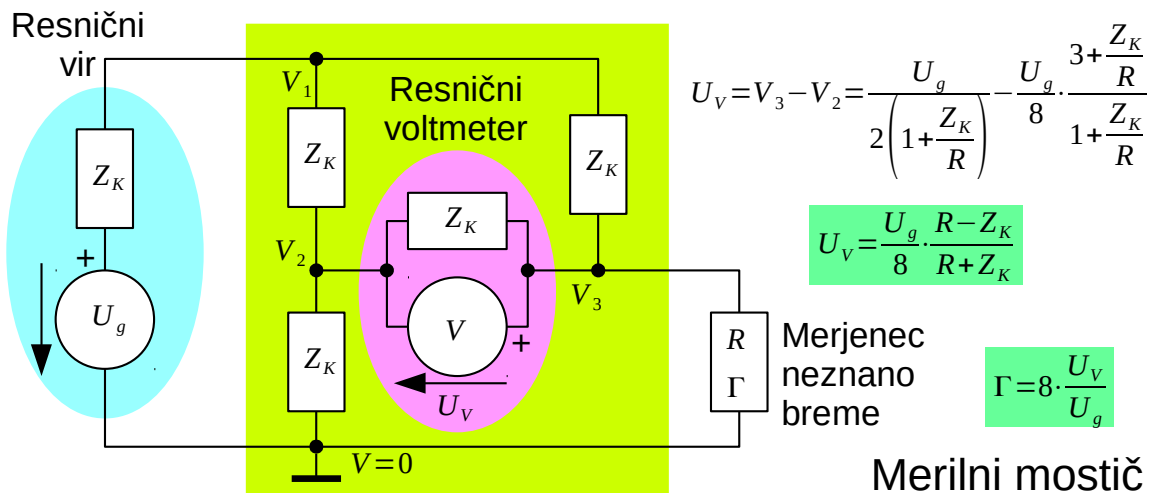
Odbojnost Γ v celoti opisuje električno obnašanje bremena povsem enakovredno njegovi električni upornosti R . Odbojnost Γ je dosti širši fizikalni pojem od električne upornosti R , saj je povsem točno določena tudi za elektromagnetna polja in številna druga valovanja v fiziki. Povsem jasno obstaja preprosta 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 $R_V = Z_K$:

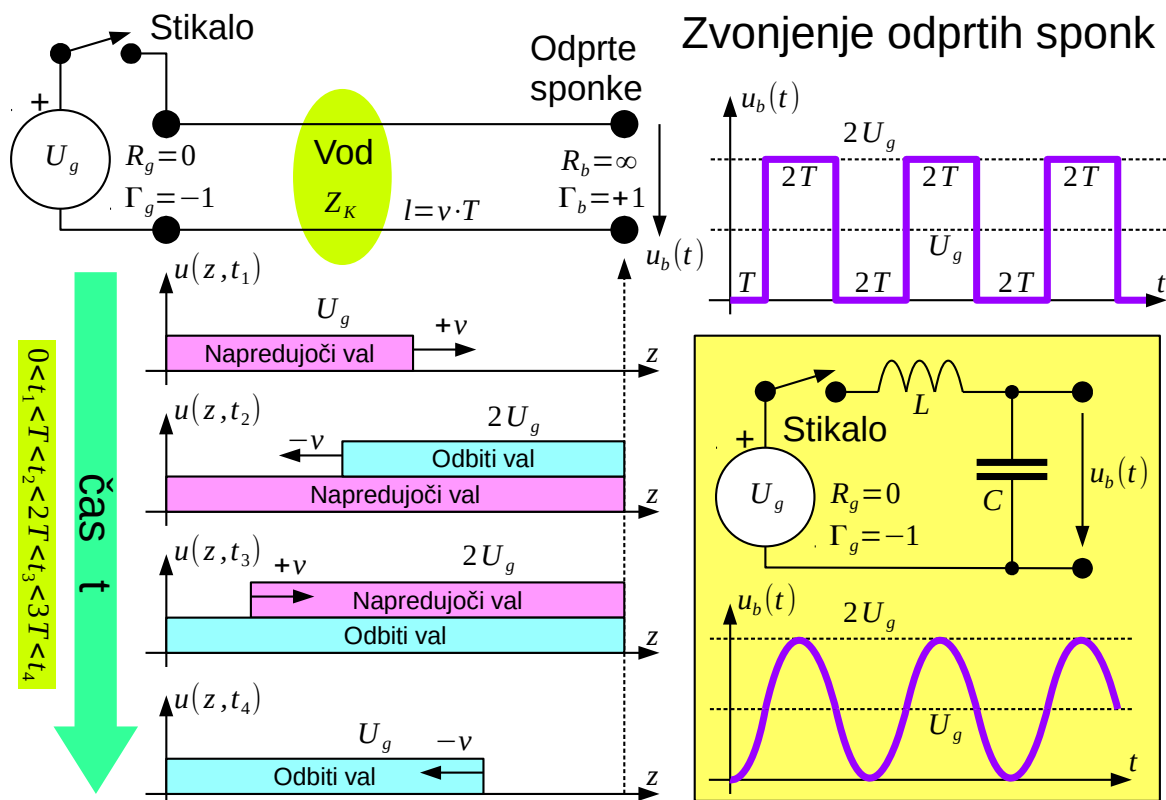
$$\begin{aligned}
 \textcircled{1} \quad & \frac{V_1 - U_g}{Z_K} + \frac{V_1 - V_2}{Z_K} + \frac{V_1 - V_3}{Z_K} = 0 \rightarrow 3V_1 = U_g + V_2 + V_3 \rightarrow 8V_2 = U_g + 4V_3 \rightarrow V_3 = \frac{U_g}{2\left(1 + \frac{Z_K}{R}\right)} \\
 \textcircled{2} \quad & \frac{V_2 - V_1}{Z_K} + \frac{V_2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



Ena od pomanjkljivosti merilnega mostiča je ta, da vir napajanja, voltmetr 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 zgolj reševanju vozliščnih enačb za potenciale 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 računsko poenostavitev. 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 kot 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 nazaj.

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.

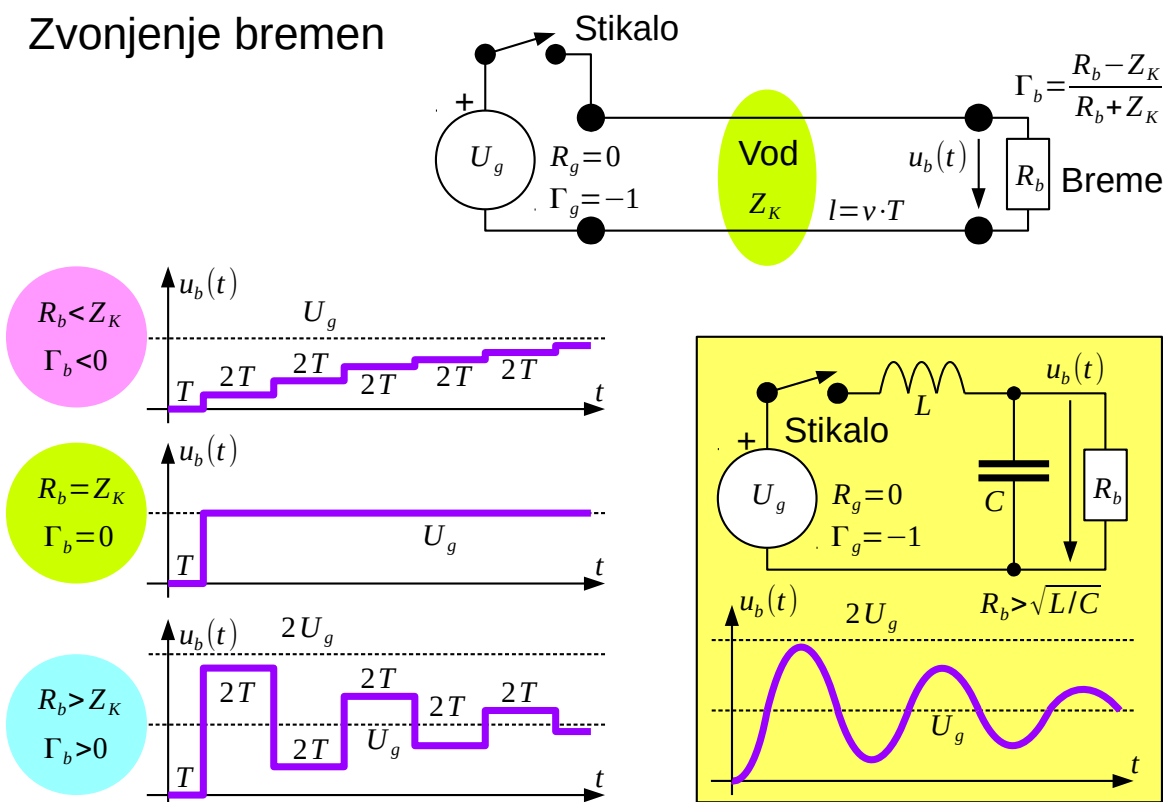
Zanimivo, popolnoma enakovredno zvonjenje opazimo tudi v vezju s koncentriranimi gradniki, ko kondenzator C , priključimo na napetostni vir U_g preko zaporedne tuljave L , na primer induktivnosti priključnih žic. Napetost na odprtih sponkah oziroma na kondenzatorju niha med nič in dvakratno napetostjo 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!

Električno zvonjenje 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.

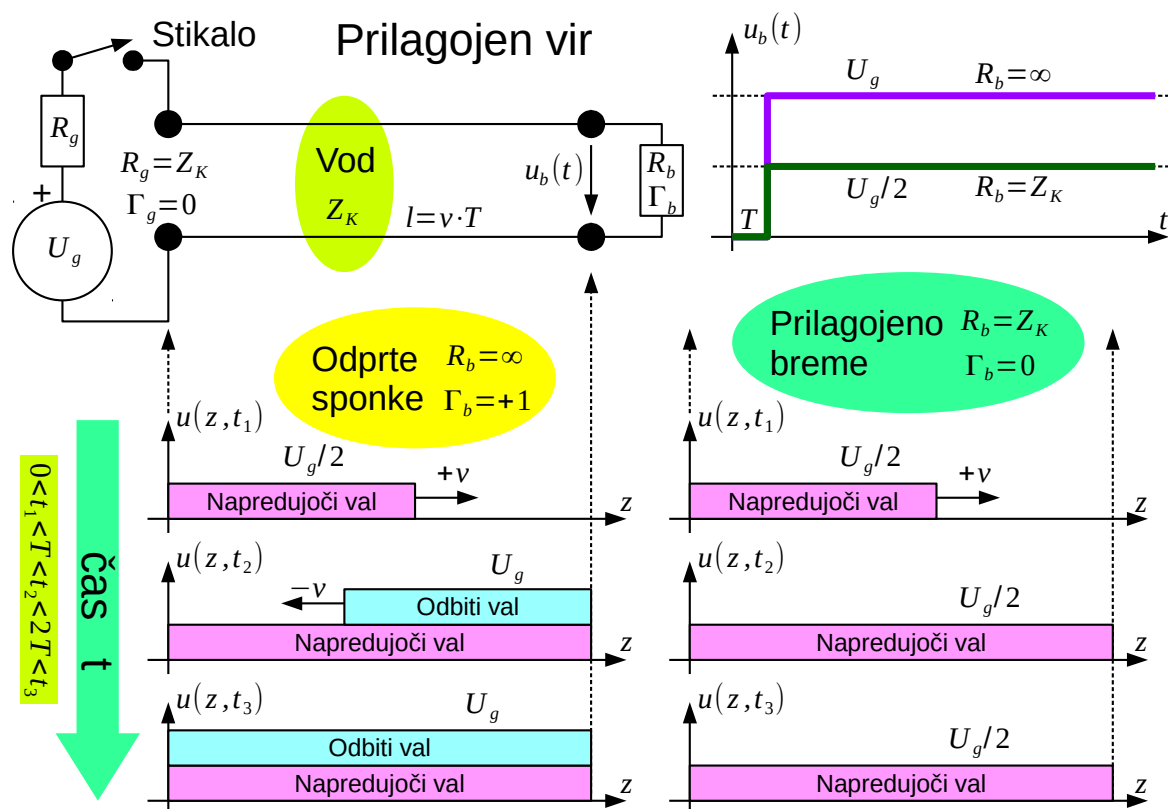
Učinek različnih bremen na zvonjenje je prikazan na spodnji sliki v sicer enakih pogojih kot za odprte sponke. Napetostni vir ima notranjo upornost $R_g = 0$. Stikalo požene prehodni pojav. Brezizgubni prenosni vod ima karakteristično impedanco Z_K . Njegova dolžina l določa zakasnitev T pri znani hitrosti valovanja v :

Zvonjenje bremen



Dušen prenehaj dobimo samo v primeru, ko je upornost bremena $R_b > Z_K$ večja od karakteristične impedance Z_K oziroma korena razmerja L/C . Ko je upornost bremena $R_b < Z_K$, manjša od karakteristične impedance, napetost na bremenu monotono narašča po stopničkah proti končni vrednosti U_g . V primeru prilagojenega bremena $R_b = Z_K$ se prehodni pojav konča najhitreje, napetost na bremenu doseže končno vrednost U_g že po času T in se takoj ustali.

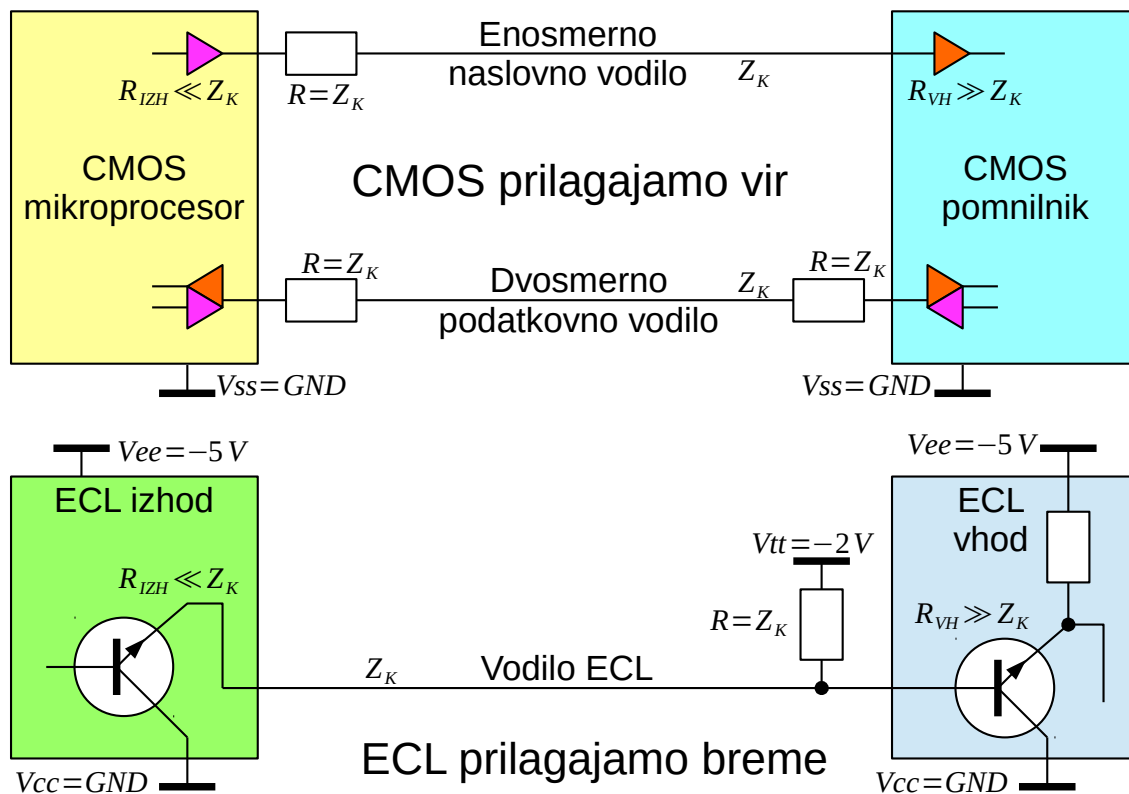
Zvonjenje prenosnega voda lahko učinkovito zadušimo tudi s prilagojenim virom. Prilagojeni vir ima svojo lastno notranjo upornost $R_g = Z_K$ enako karakteristični impedanci voda. Zvonjenje napetosti na bremenu $u_b(t)$ izgine v vseh primerih, od odprtih sponk $R_b = \infty$ do prilagojenega bremena $R_b = Z_K$:



Najstrožje zahteve po dušenju zvonjenja oziroma največje dopustne tolerance gradnikov omogoča prilagoditev na obeh koncih voda, vira in bremena, to se pravi $R_g = R_b = Z_K$. Takšna rešitev izgublja polovico moči signala na notranji upornosti vira, to se pravi na zaporednem dušilnem upor. Tudi napetost na bremenu je prepolovljena na $U_g/2$.

Večina logičnih vezij je danes izdelana v tehnologiji CMOS. CMOS izhodi sodobnih logičnih vezij imajo zelo nizko izhodno upornost. Praktična izvedba je dodaten dušilni upor, ki ga vežemo zaporedno s CMOS izhodom. Na enosmernem vodilu, na primer naslovno vodilo mikroračunalnika, zadošča en zaporedni upor na CMOS izhodu.

CMOS vhodi so praktično odprte sponke z zelo majhno kapacitivnostjo. Opisana rešitev torej vsebuje prilagojen vir in neprilagojeno breme, odprte sponke CMOS vhoda. Prednost take rešitve je v tem, da CMOS vhod dobi polno napetost izvora U_g , torej se logične ravni signalov ohranjajo. Hkrati zaporedni dušilni upor ne troši nobene moči v stacionarnem stanju, ko se logična raven izhoda ne menja:



V dvosmernem vodilu opremimo z zaporednimi dušilnimi upori vse udeležence, ki lahko na vodilo karkoli oddajajo. Pri sprejemu ti upori nimajo učinka na delovanje CMOS vhodov. Logične ravni signalov se tudi tu ohranjajo.

ECL (Emitter-Coupled Logic) so vedno bile najhitrejše družine logičnih vezij. ECL izhodi običajno neposredno krmilijo prenosni vod. Ker je izhodna upornost ECL izhodov zelo nizka, se izhodi obnašajo kot napetostni vir z zelo nizko notranjo upornostjo $R_{IZH} \ll Z_K$. Zvonjenje preprečimo na sprejemni strani s primernim bremenskim uporom R . Zaključni upor R vezan na $V_{tt} = -2V$ hkrati poskrbi za enosmerni tok delovne točke emitorskega sledilnika v ECL izhodu. Sam ECL vhod ima razmeroma visoko notranjo upornost $R_{VH} \gg Z_K$.

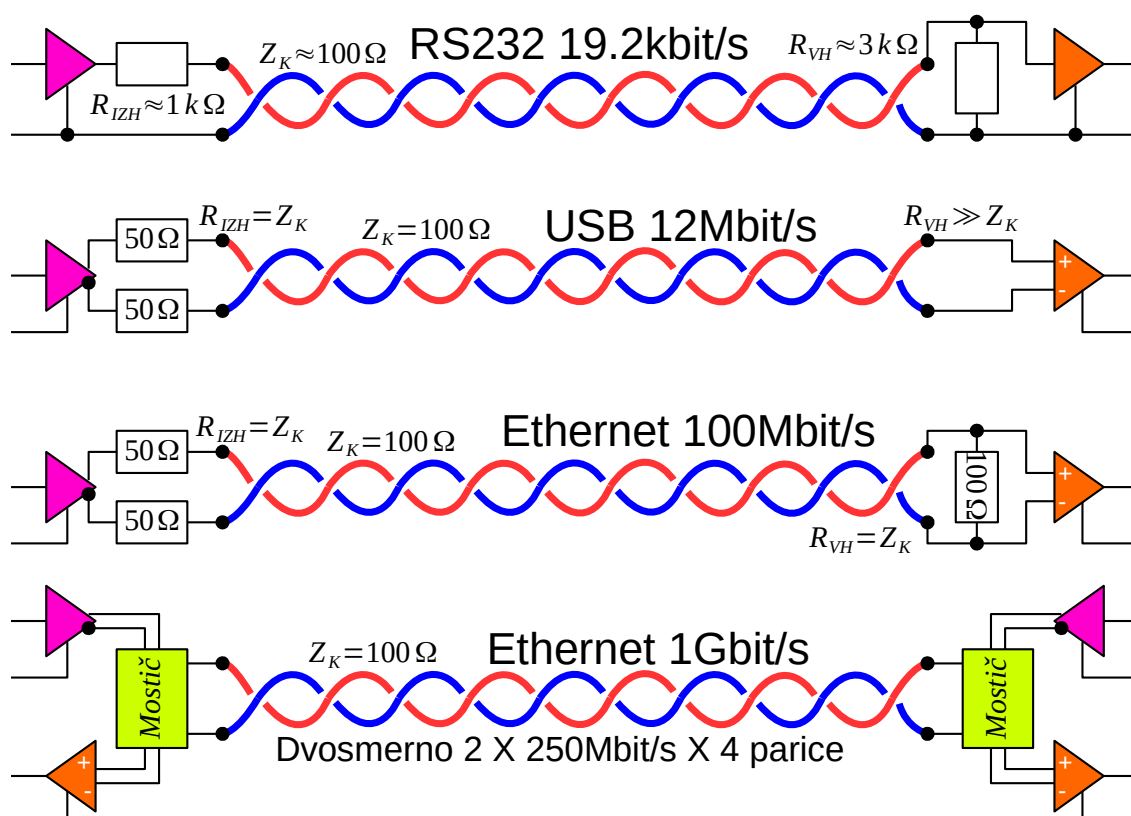
ECL vezja so bila vedno energetsko zelo požrešna. Znatno del moči napajanja se porabi tudi na zaključnih uporih R tako ob preklonih kot tudi v stacionarnem stanju. V ECL vezjih za frekvence nad 3GHz so zaključni upori na vseh kar vgrajeni v sam čip logičnega integriranega vezja.

Logična vezja za najvišje frekvence imajo tako izhode in kot vhode že v notranjosti prilagojene na karakteristično impedanco prenosnega voda. Res hitra logična vezja običajno uporabljajo diferencialne izhode in vhode, ker ima

simetrični dvovod boljše električne lastnosti od nesimetričnih vodov.

Višanje prenosne hitrosti in različne protiukrepe proti zvonjenju še najbolj opazimo v razvoju zaporednih računalniških vmesnikov. Eden prvih takšnih vmesnikov je RS232, ki naj bi omogočal prenos z zmogljivostjo 19.2kbit/s na razdalji do 18m.

Niti oddajnik niti sprejemnik RS232 nista prilagojena na karakteristično impedanco voda, ki ni točneje definirana. Simetrična parica je sicer uporabljena na nesimetričen način, ena žila je kar ozemljena. Zvonjenje RS232 dušimo v oddajniku z omejevanjem hitrosti krmilnika in višanjem njegove notranje upornosti $R_{IZH} \gg Z_K$:



Korak naprej je USB, ki uporablja diferencialni oddajnik, simetrični prenosni vod in diferencialni sprejemnik. Pri prenosni hitrosti 12Mbit/s (Full-Speed USB) na razdalji 2m je prilagojena samo izhodna upornost oddajnika $R_{IZH} = Z_K$. Sprejemnik ima tako visoko vhodno upornost $R_{VH} \gg Z_K$, da se obnaša kot odprte sponke.

Ethernet dosega domet 100m po neoklopljeni prepleteni parici UTP (Unshielded Twisted Pair). Prenosna hitrost 100Mbit/s zahteva prilagojeno notranjo upornost oddajnika $R_{IZH} = Z_K$ in prilagojeno vhodno upornost

sprejemnika $R_{VH}=Z_K$, da zvonjenje ne moti prenosa podatkov. Podobno je izveden tudi High_Speed USB za 480Mbit/s in številni drugi hitri vmesniki.

Gigabitni Ethernet gre še en korak naprej in v celoti izkorišča teorijo telegrafske enačbe, ki pravi, da sta napredujoči val in povratni val popolnoma neodvisna eden od drugega, vsak ima svojo energijo in vsak prenaša svojo moč. Zmogljivost 1Gbit/s dosega tako, da po vsaki od štirih paric UTP kabla pelje 250Mbit/s. Istočasni dvosmerni prenos omogočajo mostiči na obeh koncih prenosnega voda, ki ločijo povratni val od napredujočega vala.

Pri dvosmernem prenosu v gigabitnem Ethernetu bo kakršenkoli odboj povzročil presluh med napredujočim valom in povratnim valom. Oddajniki, sprejemniki in mostiči morajo biti zato dobro prilagojeni na karakteristično impedanco parice $Z_K=100\Omega$. Ker so tolerance gradnikov, vodov in vtičnic prevelike, ima sprejemnik za gigabitni Ethernet vgrajena še vezja, ki se sproti prilagajajo, da izločajo presluh lastnega oddajnika in zvonjenje željenega sprejetega signala.

* * * * *