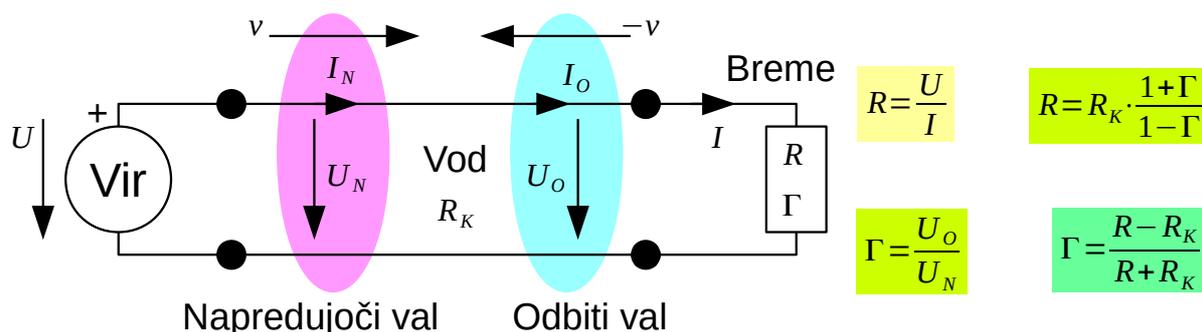


3. Odboj in zvonjenje

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 upornostjo R_K .

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

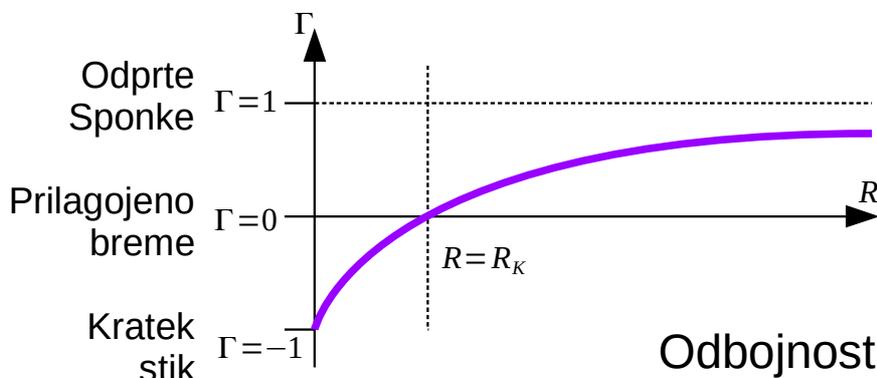


$$U = U_N + U_O \quad I = I_N + I_O = \frac{U_N}{R_K} - \frac{U_O}{R_K} \quad \longrightarrow \quad U_N - U_O = I \cdot R_K = U \cdot \frac{R_K}{R}$$

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

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

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



Upornost R se v splošnem razlikuje od karakteristične upornosti voda

R_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.

Zahtevano razmerje bremena upornosti 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 $\Gamma = E_O/E_N$. Pri zvočnem valovanju je odbojnost definirana kot razmerje amplitud tlakov, $\Gamma = p_O/p_N$.

Povsem jasno ima razmerje tokov $I_O/I_N = -\Gamma$ oziroma magnetnih poljskih jakosti $H_O/H_N = -\Gamma$ oziroma razmerje amplitud hitrosti delcev zvočnega valovanja $v_O/v_N = -\Gamma$ nasprotni predznak. Karakteristični upornosti $u/i = \pm R_K$ je enakovredna povezava med električno in magnetno poljsko jakostjo, valovna impedanca snovi $E/H = \pm Z = \pm \sqrt{\mu/\epsilon}$ oziroma med amplitudama tlaka in hitrosti delcev, zvočna valovna impedanca $p/v = \pm Z = \pm \sqrt{C \cdot \rho}$, kjer sta C modul elastičnosti in ρ gostota snovi.

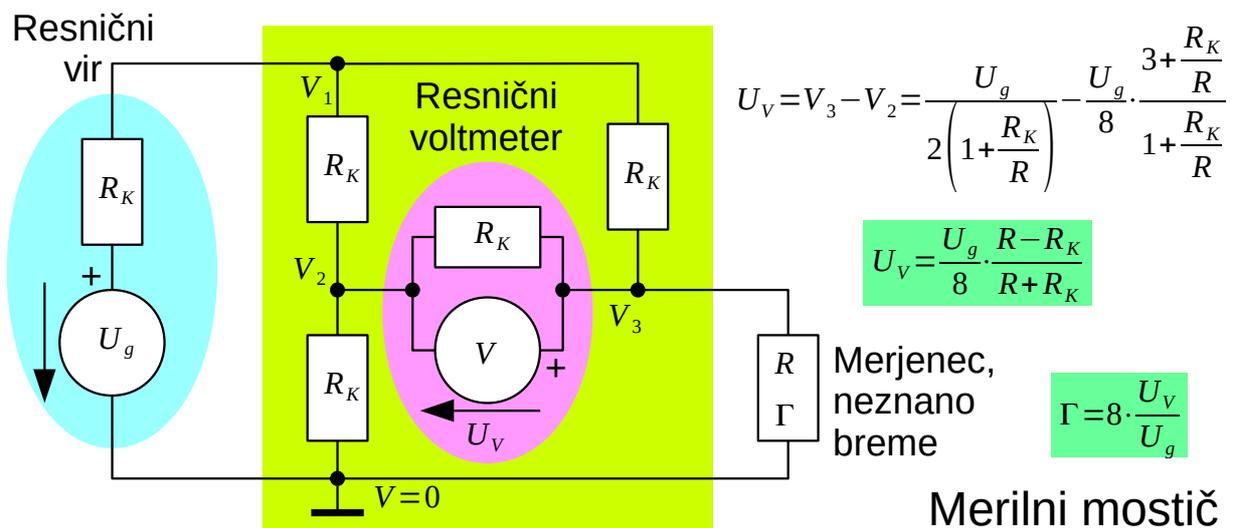
Odbojnost Γ v celoti opisuje električno obnašanje bremena. Odbojnost Γ je dosti širši fizikalni pojem od električne upornosti R , saj je povsem točno določena tudi za elektromagnetna polja in številna druga valovanja v fiziki. Obstaja povsem jasna in enolična povezava: kako iz upornosti bremena R dobimo odbojnost Γ in obratno.

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

Odbojnost Γ je načeloma lažje meriti kot električno upornost 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 različne načine. Ena možna meritev odbojnosti Γ v svetu električnih tokov in napetosti je z merilnim mostičem. Mostič napajamo z resničnim električnim virom, ki ima končno in preprosto določljivo vrednost svoje lastne notranje upornosti $R_g = R_K$. Kot merilnik napetosti uporabimo resnični voltmeter, ki ima končno in preprosto izvedljivo vrednost svoje lastne notranje upornosti $R_V = R_K$:

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

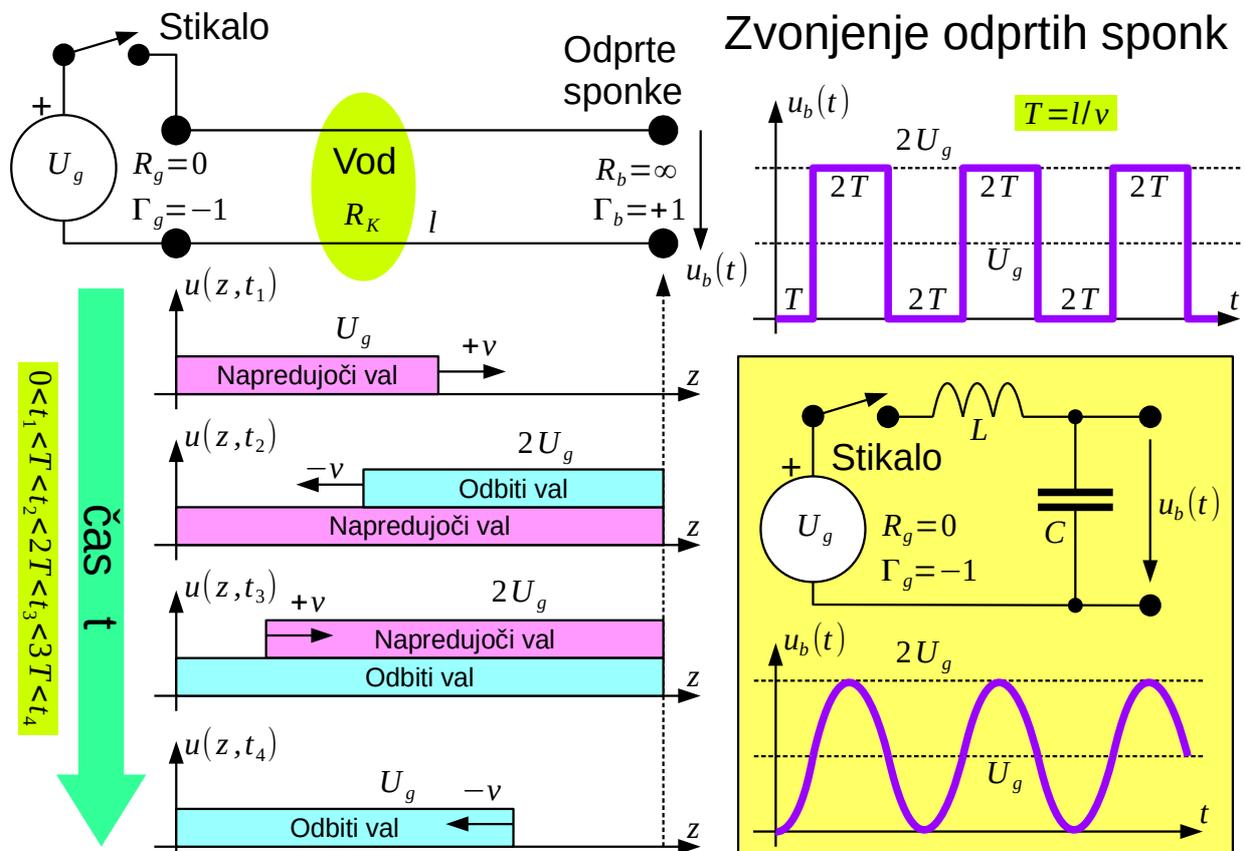


Ena od pomanjkljivosti merilnega mostiča je ta, da vir, voltmeter in merjenec nimajo skupne sponke, ki bi jo lahko ozemljili, kar je še posebno težavno pri visokih frekvencah. Prikazana ozemljitev na sliki je namenjena zgolj reševanju vozliščnih enačb za potenciala V_1 , V_2 in V_3 , iz katerih izračunamo odziv U_V . Odziv U_V je kar sorazmeren odbojnosti Γ neznanega bremena in napetosti vira U_g , ni potrebno nobeno dodatno preračunavanje! Prikazani mostič je torej električno vezje, ki je sposobno natančno ločiti napredujoči val od odbitega vala.

Oboroženi s pojmom odbojnosti Γ se lahko lotimo zahtevnejših nalog, na primer reševanja prehodnih pojavov ob preklapljanju v električnih vezjih. Tu osnove elektrotehnike ne znajo rešiti nekaterih preprostih nalog. Na

primer, če na vir napetosti U priključimo kondenzator kapacitivnosti C , steče vanj 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 računski poenostaviteli. 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 voda.

V trenutku, ko vključimo stikalo, vir še ne more »vedeti«, kaj je na drugem koncu voda, saj odbitega vala takrat še ni! Vir pošilja v vod samo

napredujoči val, torej sta napetost U in tok I v razmerju R_K . Pripadajoča energija se kopiči kot energija električnega polja v kapacitivnosti voda in kot magnetna energija v induktivnosti voda.

Po času 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.

Po času $2T$ 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.

Po času $3T$ 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.

Po času $4T$ 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... Opisani 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 prek zaporedne tuljave L , na primer induktivnosti priključnih žic. Tuljava L in kondenzator C tvorita električni zaporedni nihajni krog. Vklon stikala požene električno nihanje.

Napetost na odprtih sponkah oziroma na kondenzatorju niha med nič in dvakratno napetostjo vira $2U_g$. Razlika med prenosnim vodom s porazdeljenima induktivnostjo L/l in kapacitivnostjo C/l ter vezjem s koncentriranimi gradnikoma L in C je edino v časovni obliki nihanja

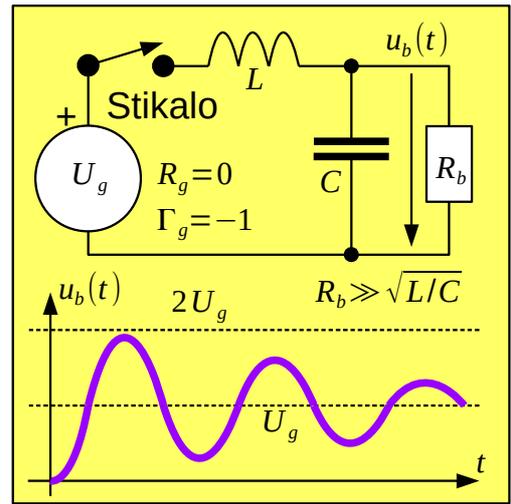
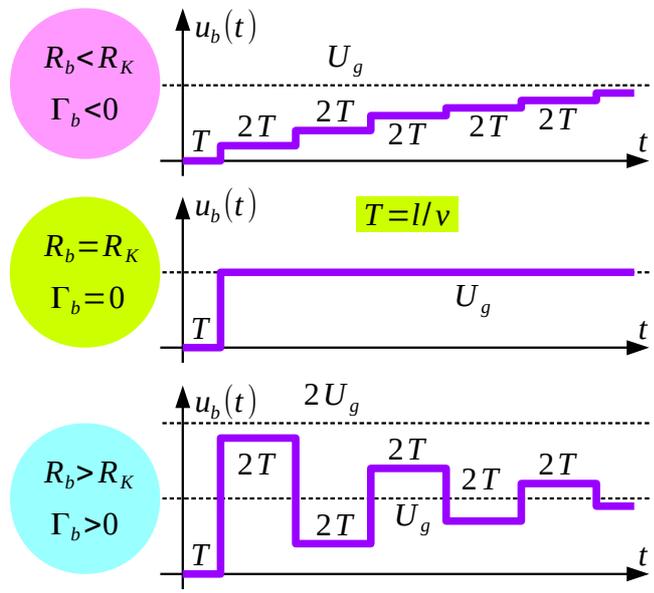
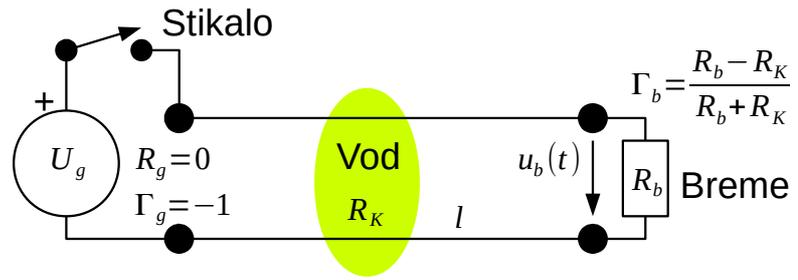
napetosti: pravokotnik za prenosni vod s porazdeljenimi gradniki in sinus za koncentrirana gradnika.

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. Razlog izgub je tudi majhna, vendar končna notranja upornost vira $R_g \neq 0$. V točnejši, tri-dimenzijski 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.

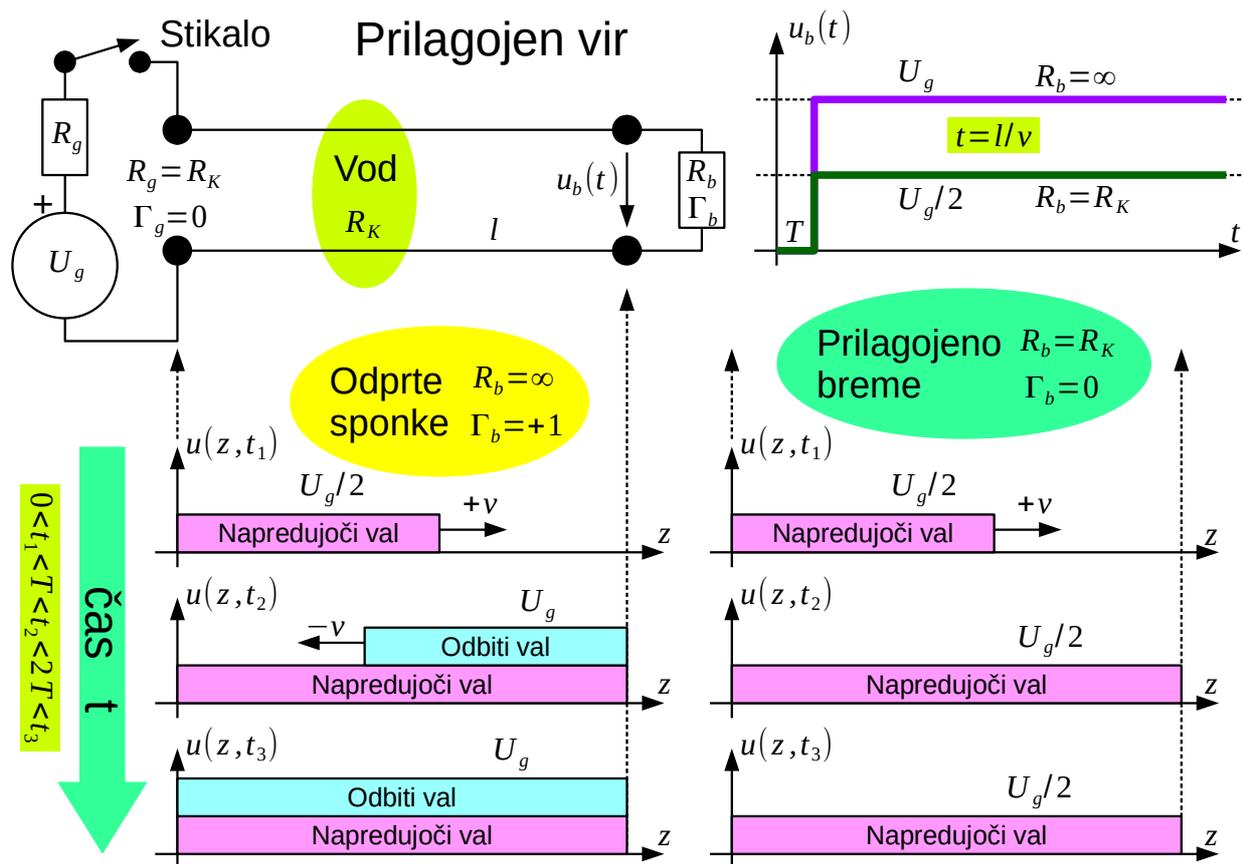
Učinek različnih bremen na zvonjenje je prikazan na spodnji sliki v sicer enakih pogojih kot za odprte sponke. Napetostni vir ima notranjo upornost $R_g = 0$. Stikalo požene prehodni pojav. Brezizgubni prenosni vod ima karakteristično upornost R_K . Njegova dolžina l pri znani hitrosti valovanja v določa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

Zvonjenje bremen



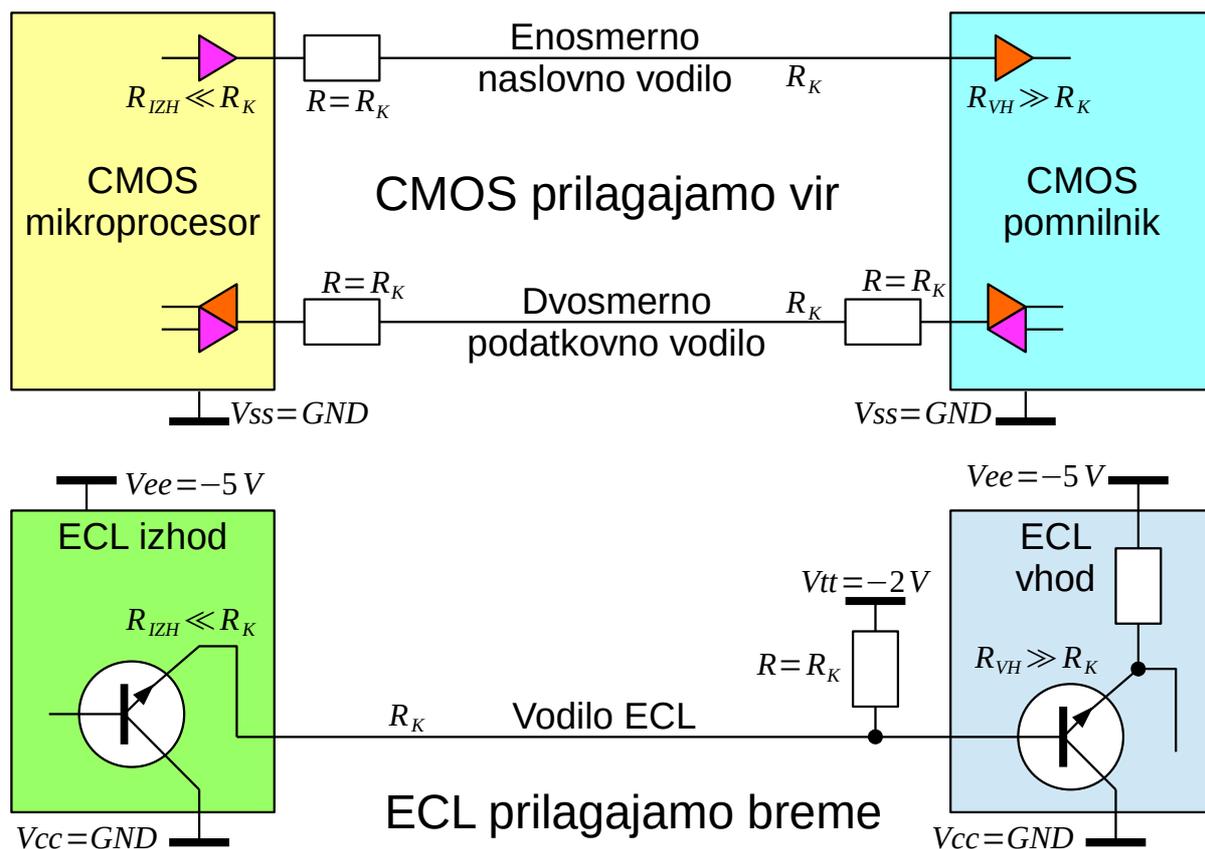
Dušen prenihaj dobimo samo v primeru, ko je upornost bremena $R_b > Z_K$ večja od karakteristične upornosti R_K oziroma korena razmerja L/C . Ko je upornost bremena $R_b < R_K$ manjša od karakteristične upornosti, napetost na bremenu monotono narašča po stopničkah proti končni vrednosti U_g . V primeru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

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



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

Zvonjenje je silno nadležen pojav na računalniških vodilih. Dolžine povezav med posameznimi čipi na tiskanem vezju so v velikostnem razredu $l \approx 10\text{ cm}$, torej je zakasnitev $T = l/v$ povsem primerljiva s preklopnimi časi logičnih signalov. Na električnih načrtih rišemo eno samo (signalno) žico prenosnega voda med oddajnikom (vijolični trikotnik) in sprejemnikom (oranžni trikotnik):



Druga žica je skupna elektroda ali masa (ground ali GND), ki jo na načrtih prikažemo z odebeljeno vodoravno črto ali znakom za ozemljitev. Masa je izdelana kot velika kovinska ploskev, ki izkorišča celo plast večslojnega tiskanega vezja. Pogosto uporabljamo več notranjih plasti večslojnega tiskanega vezja za razvod napajanj V_{dd} , V_{ss} , V_{cc} , V_{ee} , V_{gg} , V_{tt} itd, ki so s stališča elektrodinamike vsi enakovredni masi GND , čeprav so na različnih enosmernih potencialih.

Večina logičnih vezij je danes izdelana v tehnologiji CMOS. CMOS izhodi sodobnih logičnih vezij imajo zelo nizko izhodno upornost. Zvonjenje vodila na tiskanem vezju preprečujemo z dodatnim dušilnim uporom, ki ga vežemo zaporedno s CMOS izhodom v pripadajočo signalno žico. 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 vsebuje torej prilagojen vir in neprilagojeno breme, odprte sponke CMOS vhoda. Prednost take rešitve je v tem, da CMOS vhod dobi polno napetost izvora U_g , logične ravni signalov se torej ohranjajo. Zaporedni dušilni upor hkrati ne troši moči v stacionarnem stanju, ko se

logična raven izhoda ne menja.

Na podatkovnem vodilu pretakamo podatke v obe smeri: beremo vsebino pomnilnika ali pa vanj vpisujemo. Ko je na enem koncu vodila dejaven oddajnik, drugi konec vodila sprejema. V takem (izmenično) 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 $R_{IZH} \ll R_K$. 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 $R_{vH} \gg R_K$.

ECL uporablja tri ravni napajanja: V_{cc} , V_{tt} in V_{ee} . Notranja skupna elektroda je V_{cc} in ta je največkrat tudi dejansko ozemljena $V_{cc} = GND$, kar je pogosto vzrok zmede na načrtih!

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

Logična vezja za najvišje frekvence imajo izhode in vhode že v notranjosti prilagojene na karakteristično upornost prenosnega voda. Res hitra logična vezja običajno uporabljajo diferencialne izhode in vhode, ker ima simetrični dvovod boljše električne lastnosti od nesimetričnih vodov.

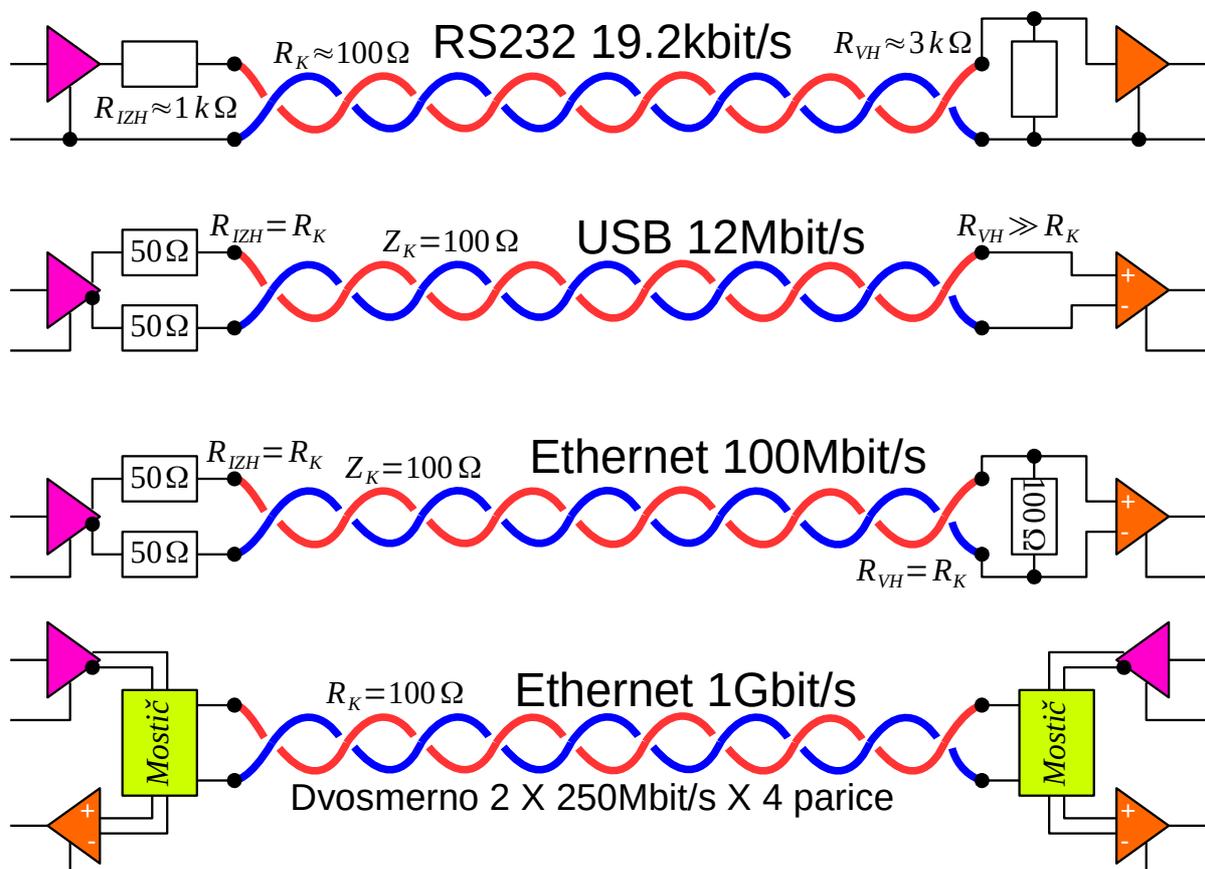
Simetrični dvovod pogosto uporabljamo v komunikacijah med računalniki na večjih razdaljah v velikostnem razredu $l \approx 100\text{m}$. Simetrični dvovod ima (v teoriji) nižje izgube od koaksialnega kabla in je hkrati cenejši za izdelavo, saj zahteva manj bakra. Sevanje in druge neželjene elektromagnetne presluhe močno duši smotrno izbrano prepletanje žic simetričnega dvovoda, zato dodaten oklop ni potreben.

Višanje prenosne hitrosti in različne protiukrepe proti zvonjenju še najbolj opazimo v razvoju zaporednih računalniških vmesnikov. Eden prvih takšnih vmesnikov je RS232, imenovan tudi »COM port« na računalnikih.

RS232 naj bi omogočal prenos z zmogljivostjo 19.2kbit/s na razdalji do 18m. V resnici zmore RS232 več na večji razdalji. Predstavljene vrednosti so bile namreč svoj čas izbrane z veliko rezervo!

Niti oddajnik niti sprejemnik RS232 nista prilagojena na karakteristično upornost voda, ki ni točneje definirana. Simetrična parica je sicer uporabljena na nesimetričen način: ena žila je kar ozemljena na obeh straneh zveze, kar s stališča potovanja valov in odpornosti na elektromagnetne motnje zagotovo ni smotno. Zvonjenje RS232 dušimo v oddajniku z omejevanjem hitrosti krmilnika (vijolični trikotnik) in višanjem njegove notranje upornosti

$$R_{IZH} \gg R_K :$$



Korak naprej je USB, ki uporablja diferencialni oddajnik (vijolični trikotnik), simetrični prenosni vod in diferencialni sprejemnik (oranžni trikotnik). Simetrični dvovod torej tu povsem pravilno uporabljamo v simetričnem načinu. Pri prenosni hitrosti 12Mbit/s (Full-Speed USB) na razdalji 2m je prilagojena samo izhodna upornost oddajnika, $R_{IZH} = R_K$. Sprejemnik ima tako visoko vhodno upornost, $R_{VH} \gg R_K$, da se obnaša kot odprte sponke. Kar na sliki ni prikazano, je to, da USB uporablja isti dvovod izmenično v eno ali v drugo smer.

Ethernet dosega domet 100m po neoklopljeni prepleteni parici UTP (Unshielded Twisted Pair). Domet omejujeta slabljenje in popačenje prenosnega voda. Prenosna hitrost 100Mbit/s zahteva prilagojeno notranjo upornost oddajnika $R_{IZH} = R_K$ in prilagojeno vhodno upornost sprejemnika $R_{VH} = R_K$, da zvonjenje ne moti prenosa podatkov. Podobno so izvedeni tudi High-Speed USB za 480Mbit/s in številni drugi hitri računalniški vmesniki.

Gigabitni Ethernet gre še en korak naprej in v celoti izkorišča teorijo telegrafске 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 upornost parice $R_K = 100 \Omega$. Ker so tolerance gradnikov, vodov in vtičnic prevelike, ima sprejemnik za gigabitni Ethernet vgrajena še vezja, ki se sprti prilagajajo, da izločajo presluh lastnega oddajnika in zvonjenje željenega sprejetega signala.

Istočasni dvosmerni prenos na istem vodu je sicer izumil že Oliver Heaviside v drugi polovici 19. stoletja. Izuma takrat niso razumeli. Izum je moral počakati celih 120 let, da je končno zaživel v gigabitnem Ethernetu!

* * * * *