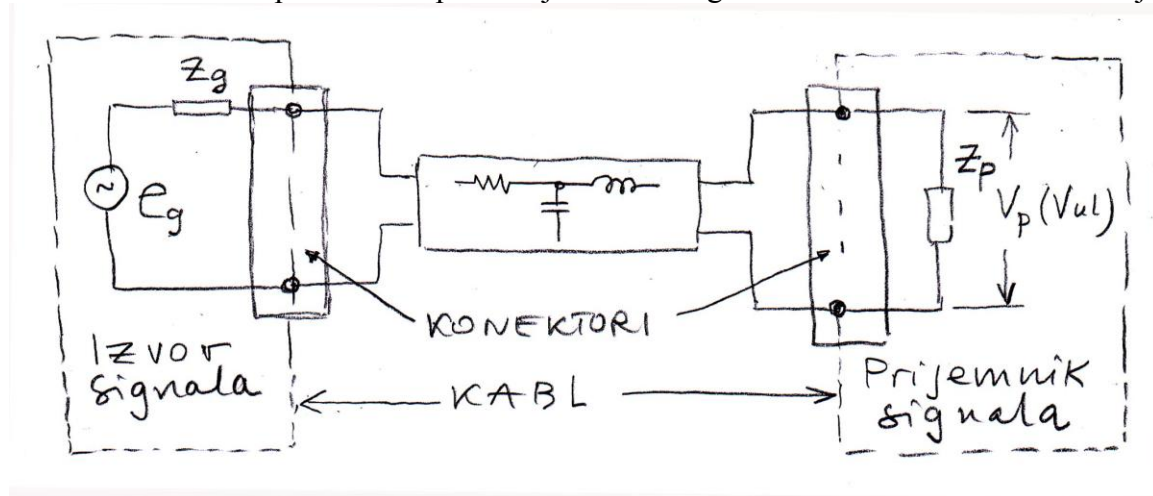


KABLOVI U AUDIO SISTEMIMA

1. Osnovne karakteristike kablova

Način međusobnog povezivanja uređaja u bilo kojem audio sistemu može se prikazati kao na slici 1. Ovde je izvor signala ili pedajni uređaj predstavljen svojom elektromotornom silom e_g i unutrašnjom ili izlaznom impedansom Z_g . U većini slučajeva ova se impedansa može svesti na čistu termogenu otpornost R_g . Prijemni uređaj odnosno prijemnik signala je predstavljen svojom ulaznom impedansom Z_p koja se u kolu sa slike 1 obično naziva impedansom opterećenja. Audio signal se između ova dva uređaja



Slika 1. Princip povezivanja audio uređaja

prenosi preko kabla, koji sadrži električne provodnike i koji ima svoje električne karakteristike. Zato se kabl, kao deo električnog kola, predstavlja pasivnim elementima: otpornošću, provodnošću, kapacitivnošću i induktivnošću. Vrednosti ovih elemenata se daju po jedinici dužine kabla i zavise od konstrukcije i materijala od kojih je kabl napravljen.

Vrednost signala na ulazu prijemnika označena je sa V_p (ili V_{ul}) i naziva se ulazni napon prijemnika ili napon na opterećenju Z_p .

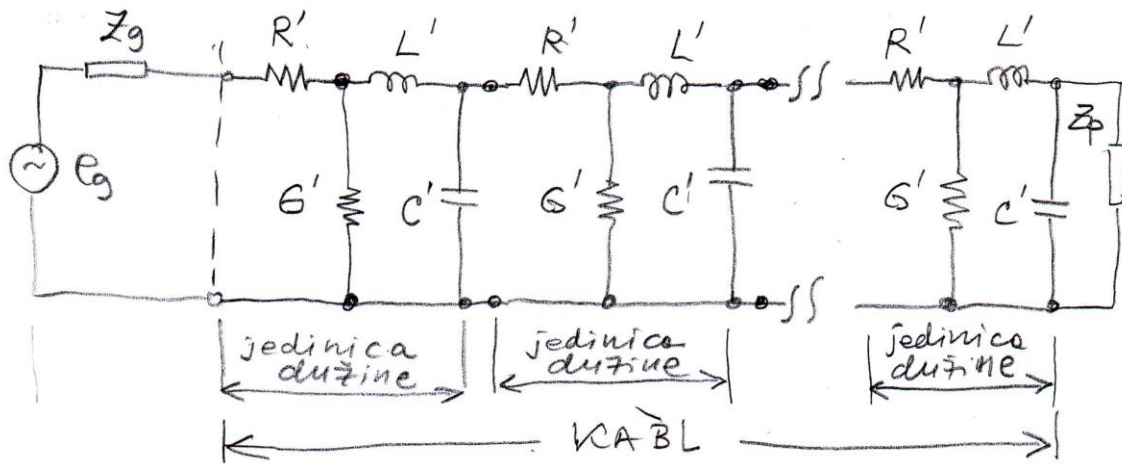
Neposredna veza kabla sa uređajima na obe njegove strane (kod izvora i kod prijemnika signala) ostvaruje se preko odgovarajućih konektora. Konektori su elektromehanički elementi koji se izrađuju u parovima gnezdo – utikač (ženski – muški). Njihova uloga je da obezbede siguran električni spoj provodnika kabla sa izlazom izvora i ulazom prijemnika signala. Poželjno je da otpornost kontakata spojenog konektorskog para (gnezdo – utikač) bude što manja, kao i da konektori omoguće lako i brzo povezivanje i razvezivanje uređaja.

Uticaj kablova na karakteristike prenošenog audio signala može biti veoma veliki, naročito ako se radi o većim dužinama, kada iz nekog praktičnog razloga audio uređaji

moraju biti na velikom međusobnom rastojanju. Nisu retki slučajevi u praksi u kojima su dužine audio kablova reda 50 do 100 m pa i više (mikrofonski kablovi u sistemima za ozvučavanje koncerata u velikim salama, kablovi linijskog nivoa signala između pojedinih tehničkih celina u radio stanicama, zvučnički kablovi u sportskim arenama i td.).

1.1 Električni parametri kablova

Najznačajniji parametar svakog kabla je njegova karakteristična impedansa Z_0 . Prema definiciji, karakteristična impedansa kabla predstavlja odnos intenziteta električnog i magnetnog polja u kablju, koji su posledica prostiranja električnog signala kroz kabl. Karakteristična impedansa je karakteristika samog kabla, bez obzira na njegovu dužinu i impedansu izvora i prijemnika koje kabl povezuje. Ona zavisi od konstrukcije i materijala od kojih je kabl napravljen, odnosno od njegovih električnih parametara. Svaki kabl se može predstaviti svojim podužnim električnim parametrima, što znači da jedinicu dužine kabla (recimo 1m) zamenjujemo vezom njegove podužne otpornosti R' , induktivnosti L' , kapacitivnosti C' i provodnosti G' . Ceo kabl se onda, zavisno od njegove dužine, predstavlja rednom vezom određenog broja identičnih jediničnih sekcija, slika 2. Provodnost izolacionih materijala kod audio kablova je veoma mala tako da se parametar G' u ekvivalentnoj šemi na slici 2 može zanemariti.



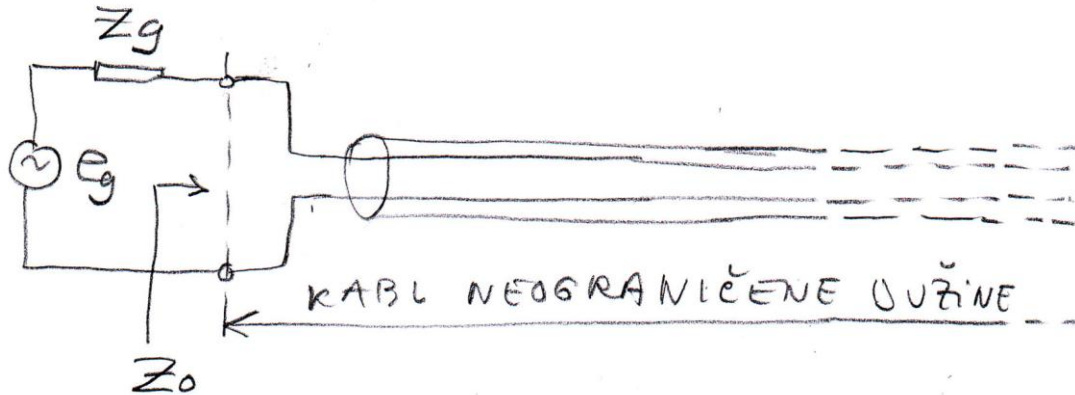
Slika 2. Kabl predstavljen električnim podužnim (raspodeljenim) parametrima

Podužni parametri kabla R' , L' i C' se u literaturi nazivaju još i raspodeljeni parametri. Podužna otpornost R' i induktivnost L' predstavljaju otpornost i induktivnost provodnika u kablju jedinične dužine, dok podužna kapacitivnost C' predstavlja kapacitet kondenzatora koji čine dva paralelna provodnika u kablju jedinične dužine.

Kabl neograničene dužine, slika 3, predstavlja prenosnu liniju. Kod ovakve linije signal nikada neće stići do njenog drugog kraja i zato njena impedansa izmerena na ulazu predstavlja njenu karakterističnu impedansu i ne zavisi od uslova na drugom kraju linije. Karakteristična impedansa prenosne linije je data relacijom:

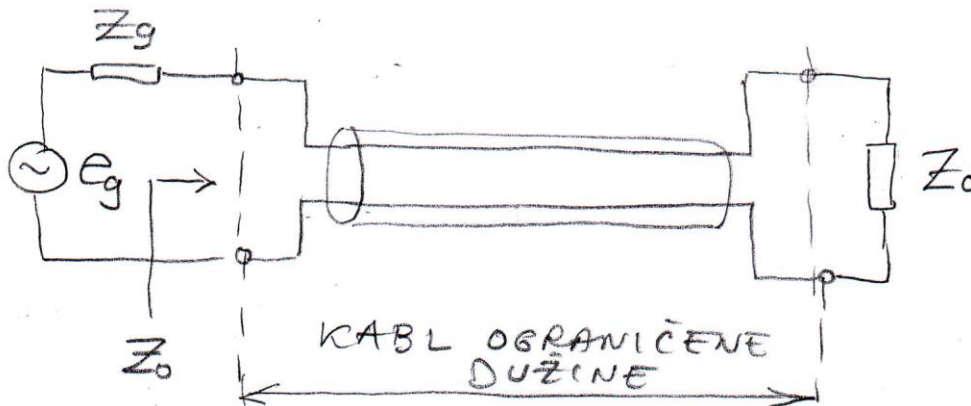
$$Z_0 = \sqrt{\frac{R' + j \omega L'}{G' + j \omega C'}} \quad (1)$$

gde je $\omega = 2 \pi f$ - kružna učestanost,
 f - frekvencija signala,
 $j = \sqrt{-1}$.



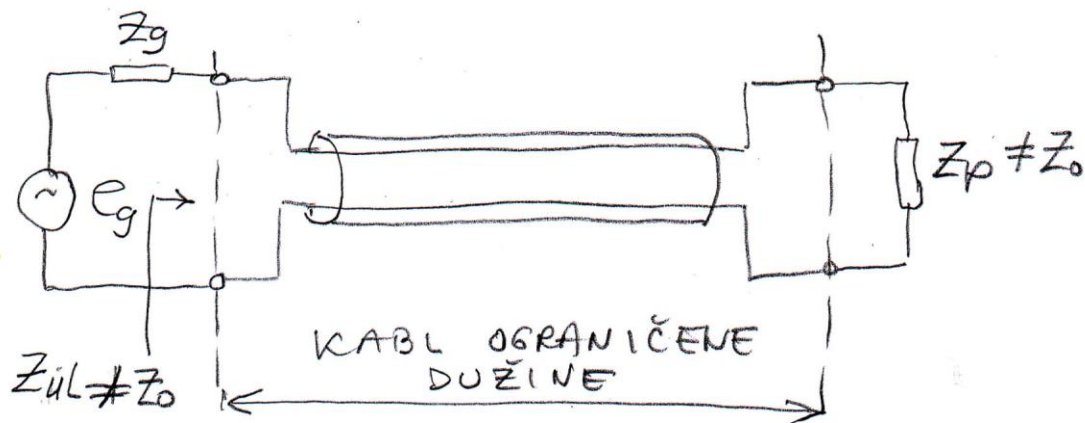
Slika 3. Kabl neograničene dužine (prenosna linija) ima ulaznu impedansu jednaku karakterističnoj impedansi kabla

Ako imamo kabl konačne dužine koji je na drugom kraju zatvoren svojom karakterističnom impedansom, slika 4, impedansa na ulazu kabla, kako je vidi izvor signala, biće takođe jednaka karakterističnoj impedansi kabla Z_0 . To znači, da će se u električnom smislu ovaj kabl ponašati kao da je neograničene dužine.



Slika 4. Kabl ograničene dužine zatvoren svojom karakterističnom impedansom

Za svaku drugu vrednost impedanse na kraju kabla, njegova ulazna impedansa biće različita od njegove karakteristične impedanse, slika 5. Pri tome će se deo prenešene snage reflektovati od kraja kabla i neće biti predat potrošaču, dok će preneti signal biti izobličen. Ako pri tome ni unutrašnja impedansa izvora Z_g nije jednaka karakterističnoj impedansi kabla



Slika 5. Kabl ograničene dužine zatvoren impedansom različitom od njegove karakteristične impedanse

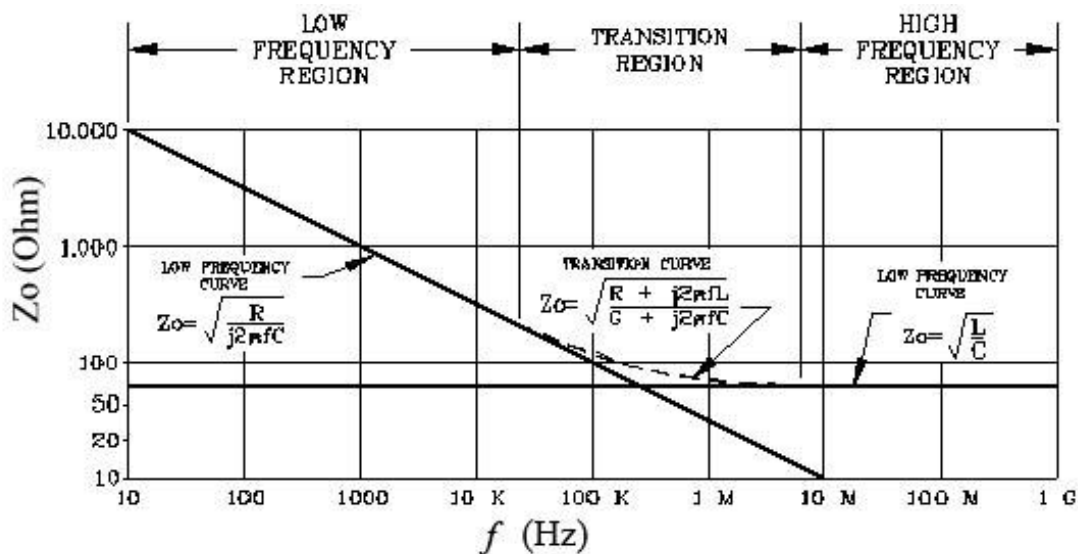
Karakteristična impedansa kabla se menja sa promenom frekvencije signala, čak i ako podužni električni parametri kabla ne zavise od frekvencije, što u praksi često nije slučaj. Kada se radi o niskim frekvencijama (R') onda se karakteristična impedansa svodi na izraz:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R'}{j\omega C'}} \quad (2)$$

dok je na visokim frekvencijama:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{L'}{C'}} \quad (3)$$

Moduli karakteristične impedanse određeni iz izraza (2) i (3) prikazani su na slici 6.



Slika 6. Promena vrednosti karakteristične impedanse kabla u funkciji frekvencije

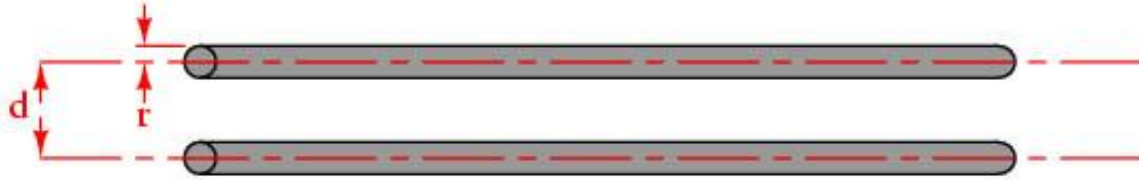
Kao što se vidi sa slike (6) vrednost karakteristične impedanse kabla opada kako frekvencija raste. Taj pad na višim frekvencijama postepeno prelazi u konststntnu vrednost datu izrazom (3). Na ovim frekvencijama karakteristična impedansa kabla je čista termogena otpornost i to je u stvari ona vrednost na koju se misli kada se govori o karakterističnoj impedansi kabla, i koja se daje u tehničkim specifikacijama za pojedine vrste kablova.

Vrednost karakteristične impedanse kabla na visokim frekvencijama, izraz (3), može se izračunati ako je poznata konstrukcija kabla, ili se može odrediti merenjem.

Tako, za karakterističnu impedansu kabla sa dva paralelna provodnika, slika 7, se dobija:

$$Z_0 = \frac{276}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{d}{r} \quad (4)$$

gde je d rastojanje između provodnika, r poluprečnik provodnika i ϵ_r relativna dielektrična konstanta izolacionog materijala kabla.



Slika 7. Detalji konstrukcije kabla sa dva paralelna provodnika

Slično, za karakterističnu impedansu koaksijalnog kabla, slika 8, nalazimo:

$$Z_0 = \frac{138}{\sqrt{\epsilon_r}} \log \frac{d_1}{d_2} \quad (5)$$

gde je d_1 spoljašnji prečnik unutrašnjeg provodnika a d_2 unurašnji prečnik spoljašnjeg provodnika.



Slika 8. Detalji konstrukcije koaksijalnog kabla

Merenjem se karakteristična impedansa kabla Z_0 može odrediti iz dva koraka. Prvo se na ulaz kabla priključi naizmenični napon odgovarajuće frekvencije i izmeri ulazna impedansa kabla sa otvorenim drugim krajem Z_{uo} . Zatim se na isti način izmeri ulazna impedansa kabla kada je njegov drugi kraj kratko spojen Z_{uc} . Za karakterističnu impedansu kabla se sada dobija:

$$Z_0 = \sqrt{Z_{uo} \cdot Z_{uc}} \quad (6)$$

1.2 Brzina prostiranja električnih signala kroz kablove

Električni signali se kroz telekomunikacione kablove (gde spadaju i audio kablovi) kreću brzinom v koja je manja od brzine svetlosti c . Koliko je to umanjenje zavisi od relativne dielektrične konstante sredine ε_r u kojoj se nalaze provodnici u kابلu i može se pisati da je :

$$v = \frac{c}{\sqrt{\varepsilon_r}} \quad (7)$$

Relativna dielektrična konstanta izolacionih materijala koji se koriste u telekomunikacionim kablovima ima približno vrednosti $\varepsilon_r = 2,1 - 5$, tabela 1, tako da je brzina v za 30 do 55% manja od brzine svetlosti. Za dalju analizu možemo uzeti da je brzina električnih signala u kablovima za oko 30% niža od brzine prostiranja elektromagnetnih talasa u vazduhu i iznosi 210 000 km/s.

Tabela 1. Vrednosti relativne dielektrične konstante ε_r za vazduh i vakuum i materijale koji se koriste kao izolatori kod izrade kablova

Materijal / sredina	ε_r
Vakuum	1
Vazduh	1,0167
Teflon	2,1
Polietilen	2,25
Polipropilen	2,3
PVC	3 do 5

Da u kابلu ne bi došlo do pojave prostiranja (kada ne moramo voditi račna o njegovoj karakterističnoj impedansi) njegova dužina mora biti manja od $0,1 \lambda$ gde je λ dužina električnih talasa u njemu.

U slučajevima kada je dužina kabla veća od $\lambda/4$ u njemu dolazi do refleksija i disperzije signala. Da bi ove pojave bile što manje izražene kabl mora imati konstantnu karakterističnu impedansu i mora na obe svoje strane biti zatvoren impedansom koja je jednaka njegovoj karakterističnoj impedansi.

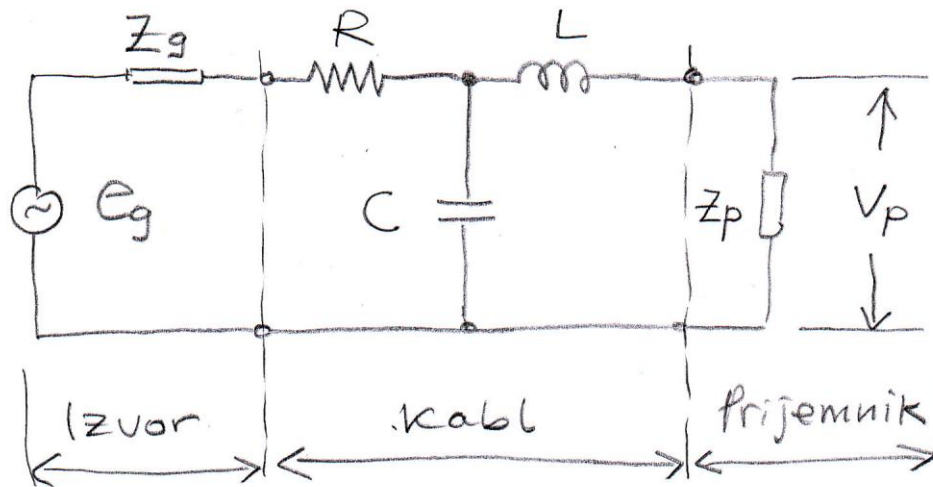
2. Kablovi za analogne audio signale

Talasna dužina analognog audio signala na frekvenciji od 20 kHz u tipičnom audio kابلu (brzina signala je 210 000 km/s) je oko 10 km. Odavde se može zaključiti da se kablovi za analogne audio signale čija je dužina manja od 1 km ($0,1 \lambda$) neće ponašati kao prenosne linije i da nije važno kolika je i da li je konstantna njihova karakteristična impedansa. Što je gornja granična frekvencija signala $f_{\max}$ koju treba preneti viša to je maksimalna dužina kabla $l_{\max}$ na kojoj neće biti prostiranja kraća, i obratno, tj.:

$$l_{\max} \approx 0,1 \lambda = \frac{21}{f_{\max} (\text{kHz})}, \quad [\text{km}] \quad (8)$$

Analogni audio signali imaju harmonijske komponente i u ultrazvučnom delu spektra. Značajna izobličenja harmonijskih komponenti u opsegu do 60 kHz izazivaju čujna i merljiva izobličenja u audio opsegu. Tako, ako hoćemo da se u potpunosti obezbedimo od negativnog uticaja efekata prostiranja na frekvencijama sve do 60 kHz dužina kablova za analogne audio signale ne bi smela biti veća od oko 300 m. Može se smatrati da je u praktičnoj primeni ovaj zahtev uvek ispunjen.

Iz prethodnih razloga audio kablovi se posmatraju kao parovi provodnika koji se mogu predstaviti sa ekvivalentnim kolima sa koncentrisanim parametrima, kako je prikazano na slici 9. Parametri R , C i L predstavljaju ukupnu otpornost, kapacitivnost i induktivnost kabla. Otpornost i induktivnost kabla uključuju ukupne vrednosti za oba provodnika (odlazni i povratni) dok pod kapacitivnošću kabla podrazumevamo ukupnu kapacitivnost

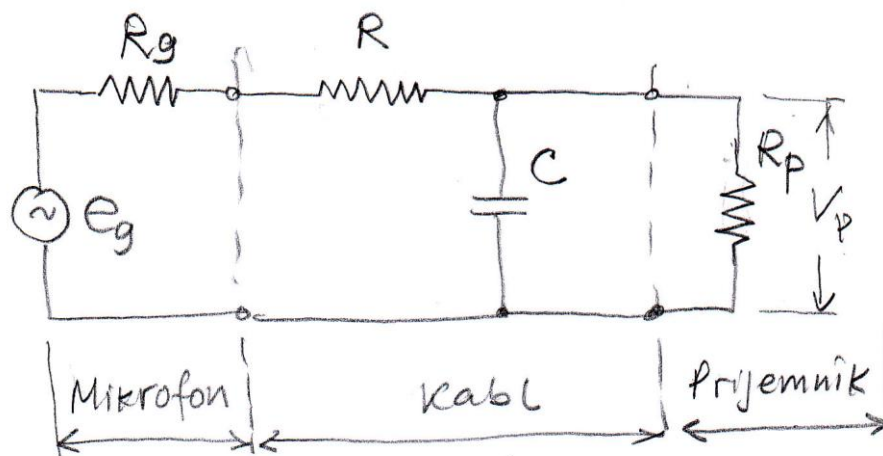


Slika 9. Audio kabl sa koncentrisanim parametrima

između njegova dva provodnika. Elektromotorna slila izvora i njegova unutrašnja impedansa označeni su, respektivno, sa e_g i Z_g dok je Z_p impedansa prijemnika.

2.1 Mikrofonski kablovi

Elektrodinamički mikrofoni za profesionalnu namenu deklarirani su najčešće kao izvori signala izlazne impedanse od 150 Ω do 200 Ω . Međutim, stvarne vrednosti impedanse u praksi su u nešto širim granicama, između 100 Ω i 300 Ω . Podužna induktivnost mikrofonskog kabla je veoma mala i njen uticaj se u svim razmatranjima može zanemariti u odnosu na ostale elemente u kolu sa slike 10.



Slika 10. Ekvivalentna šema mikrofonske linije

Tipičan mikrofonski pretpojačavač ima ulaznu impedansu oko $1,5 \text{ k}\Omega$. Podužna kapacitivnost mikrofonskih kablova je reda 80 pF/m . Jednu mikrofonsku liniju sada možemo predstaviti kao na slici 10. Ovde je mikrofon predstavljen kao generator ems e_g i unutrašnje otpornosti R_g . R_p je otpornost prijemnika – potrošača a R otpornost linije odnosno ukupna otpornost oba provodnika. Za praktične dužine mikrofonskih linija do maksimalno 100 m R se može zanemariti. Njegov uticaj se svodi na neznatno slabljenje mikrofonskog signala koji na liniji dužine 100 m sa provodnicima prečnika $0,25 \text{ mm}^2$ ($13,6 \Omega$) iznosi $0,1 \text{ dB}$.

Normalizovana prenosna funkcije kola sa slike 10 data je relacijom:

$$\left| \frac{V_{p(j\omega)}}{e_g} \right| = \frac{1}{\sqrt{1 + \frac{\omega^2 C^2 R_g^2 R_p^2}{(R_g + R_p)^2}}} \quad (9)$$

i predstavlja prenosnu funkciju filtra propusnika niskih frekvencija. Da slabljenje na višim frekvencijama ne bi bilo veće od 3 dB mora biti ispunjen uslov:

$$\frac{R_g R_p}{R_g + R_p} \leq \frac{1}{\omega \cdot C} \quad (10)$$

Iz izraza (10) se vidi da za datu gornju graničnu frekvenciju f_3 (slabljenje amplitudske karakteristike 3 dB), s obzirom da je $R_g \ll R_p$, mora biti:

$$f_3 \leq \frac{1}{2 \pi C R_g} \quad (11)$$

Drugim rečima otpornost mikrofona ili kapacitivnost kabla moraju biti što manji. Za mikrofon otpornosti 200Ω date su u tabeli 1 gornje granične frekvencije f_3 , f_1 i $f_{0,5}$ za

slabljenje amplitudske karakteristike od 3, 1 i 0.5 dB, respektivno, u funkciji dužine mikrofonskog kabla čija je podužna kapacitivnost $C' = 80 \text{ pF/m}$.

Tabela 1. Gornja granična frekvencija mikrofonskog signala u zavisnosti od dužine mikrofonskog kabla

Impedansa mikrofona $R_g = 200 \text{ } \Omega$ Podužna kapacitivnost kabla $C' = 80 \text{ pF/m}$			
Dužina mikrofonskog kabla (m)	f_3 (kHz)	f_1 (kHz)	$f_{0,5}$ (kHz)
50	199,0	101,5	69,4
100	99,5	50,7	34,7
200	49,8	25,4	17,4
300	33,2	16,9	11,6

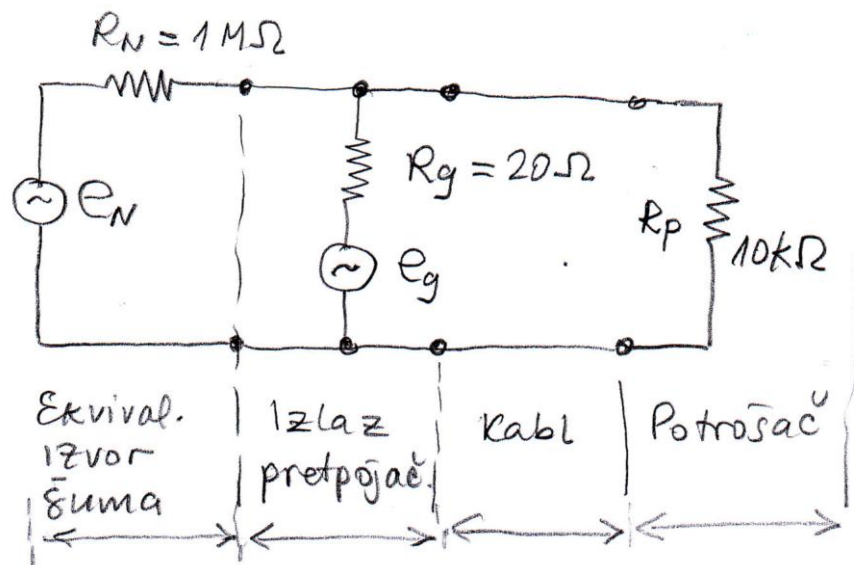
Ako kao kriterijum uzmemo pad amplitudske karakteristike za 1 dB, vidimo da mikrofonski kabl ne sme biti duži od 200 m. Ukoliko se radi o još strožijem zahtevu, ili se u obzir uzme i promena faze, onda su moguće dužine mikrofonskog kabla još manje. Na ulazu mikrofonskih prepojačavača često se ugrađuju filtri za zaštitu od radio smetnji. Ovde kapacitivnost filtra treba dodati ukupnoj kapacitivnosti kabla C tako da je gornja granična frekvencija još niža od vrednosti datih u tabeli 1.

Pri tome nam, u slučaju relativno dugih mikrofonskih linija, jedino ostaje mogućnost da odaberemo kabl sa manjom podužnom kapacitivnošću (recimo oko 50 pF/m) kakvih ima na tržištu.

2.2 Kablovi za linijske signale

Izlazna impedansa linijskih pojačavača je u granicama od 20 Ω do 100 Ω . Ova impedansa se nekada povećava dodavanjem spoljašnje redne otpornosti radi povećanja stabilnosti rada pojačavača. Ova otpornost razdvaja izlaz linijskog pojačavača od kapacitivnosti kabla i smanjuje fazni pomeraj koji bi unosila sama kapacitivnost. Sa tačke gledišta stabilnosti rada pojačavača što veća izlazna otpornost to je bolje. Međutim sa tačke gledišta otpornosti linije na elektromagnetne smetnje izlazna otpornost linijskog pojačavača treba da bude što manja.

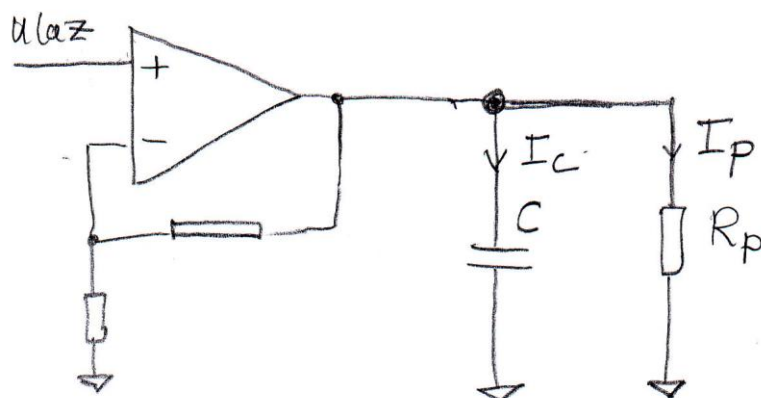
Linijski pojačavač se obično povezuje sa uređajima čija je ulazna impedansa reda 10 k Ω . Ako izvor šuma (ekvivalent elektromagnetnih smetnji) predstavimo elektromotornom silom $e_N = 100 \text{ mV}$ i unutrašnjom impedansom $R_N = 1 \text{ M}\Omega$, napon smetnji na prijemu je, prema slici 11, oslabljen za $(R_g + R_N)/R_g = 5 \cdot 10^4$ puta ili za 94 dB.



Slika 11. Uticaj elektromagnetnih smetnji na izlazu linijskog pojačavača

S obzirom na veoma malu izlaznu impeansu linijskih pojačavača, kapacitivnost kabla (koji je ovde istog tipa kao i mikrofonski) će imati znatno manji uticaj na slabljenje signala visokih frekvencija nego što je slučaj kod mikrofonskih linija, jednačina (11) i tabela 1.

Medjutim, savremeni linijski pojačavači treba da su projektovani tako da mogu da rade sa opterećenjem od $R_p = 600\ \Omega$. Ako se ovome paralelno doda i kapacitivnost linije od recimo 50 m koja iznosi oko 6,5 nF (pretpostavka je da se koristi kabl podužne kapacitivnoszi od 130 pF/m) onda se na visokim frekvencijama dobija vrlo mala impedansa opterećanja (paralelna veza C i R_p), slika 12. Za pobudu ove impedanse treba obezbediti odgovarajuću struju pri velikim nivoima signala (od +20 dBu, odnosno amplitude 11V i efektivne vrednosti nešto manje od 8 V) za koje su linijski pojačavači deklarirani.



Slika 12. Izlaz linijskog pojačavača optrećen linijom

Maksimalna brzina promene napona na izlazu linijskog pojačavača je:

$$\frac{dV}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot V_m \quad (5)$$

gde je f frekvencija signala a V_m njegova amplituda. Da bi napon na kondenzatoru distigao maksimalnu vrednost V_m pri frekvenciji signala f , potrebna vrednost struje punjenja kondenzatora kapaciteta C je:

$$I_C = C \frac{dV}{dt} = 2 \cdot \pi \cdot f \cdot C \cdot V_m \quad (6)$$

Tako je recimo za signal frekvencije $f = 15$ kHz porebno da pojačavač obezbedi struju za punjenje kondenzatora od 4,1 mA. Ukoliko impedanca nije veoma velika treba uzeti u obzir i struju koja otpada i na ovu impedansu. Ta struja je:

$$I_p = \frac{V_m}{\sqrt{2}R_p} \quad (7)$$

Ukupna izlazna struja linijskog pojačavača je:

$$I = \sqrt{I_C^2 + I_p^2} \quad (8)$$

Za impedansu $R_p = 600 \Omega$ i ostale uslove kao u gornjem primeru imamo da je

$I_p = 13$ mA i $I = 13,6$ mA.

Pri odredjivanju potrebne struje linijskog pojačavača za signale muzike i govora treba imati u vidu da nivoi ovih signala opadaju idući prema višim frekvencijama.

Tabela 2. Potrebne struje linijskog pojačavača pri napajanju potrošača impdanse $R_p = 600 \Omega$ u funkciji dužine napojnog kabla

Impedansa opterećenja $R_p = 600 \Omega$ Podužna kapacitivnost kabla $C' = 130$ pF/m $V_m = 3,2$ V na 16 kHz			
Dužina mikrofonskog kabla (m)	I_C (mA)	I_p (mA)	I (mA)
50	2,1	3,8	4,3
100	4,2	3,8	5,7
200	8,4	3,8	9,2
300	12,6	3,8	13,2

Predpostavićemo veoma strog uslov da je nivo signala konstantan do frekvencije od 5 kHz i da prema višim frekvencijama opada brzinom od 6 dB/oct. Ovaj uslov i u najtežem slučaju obezbedjuje marginu sigurnosti od 2:1. Uz ove pretpostavke i uslov da je na niskim frekvncijama $V_p = 11$ V, imamo da je $V_p = 3,2$ V na 16 kHz. Potrebne struje za različite dužine kabla date su u tabeli 2.

2.3 Zvučnički kablovi

Zvučnici se povezuju na pojačavače snage sa najrazličitijim vrstama kablova. Pri tome moramo imati u vidu da kablovi različitog oblika, različitog preseka i kvaliteta provodnika, zaštićeni različitim izolacionim materijalima, imaju znatno različite karakteristike. Ako ovome dodamo činjenicu da su zvučnički kablovi na svom kraju zatvoreni kompleksnom impedansom, kakvu predstavlja tipičan zvučnik ili zvučnički sistem, onda je jasno da njihov uticaj na audio signal može biti značajan i da je različit za različite tipove kablova. Iz ovoga je jasno da se izboru zvučničkih kablova za datu primenu mora posvetiti posebna pažnja.

Idealni zvučnički kabl treba da prenese audio signal od pojačavača snage do zvučnika bez bilo kakvih izobličenja. Kablovi u praksi uvek odstupaju od ovog uslova. U njima uvek postoje određeni gubici snage usled otpornosti. Takođe oni u većoj ili manjoj meri doprinose i promeni amplitudske ili fazne karakteristike audio signala kao što ćemo dalje videti.

Efekti prostiranja u zvučničkim kablovima

Kako je već rečeno u audio kablovi su u normalnim uslovima primene suviše kratki da bi ih mogli posmatrati kao prenosne linije. To naravno važi i za zvučničke kablove naročito kada se radi o niskoomskom razvodu gde su dužine kablova po pravilu male. Ipak neki manji efekti prenosne linije primećuju se i kod zvučničkih kablova. Naime, faza audio signala se promeni za oko 0,3 /m na 20 kHz a razlika u vremenima kašnjenja signala (diperzija) na frekvencijama od 100 Hz i 10 kHz je 60 ns/m, tabela

Skin efekat kod zvučničkih kablova

Skin efekat ima manji uticaj jedino kod kablova sa debljim provodnicima i na najvišim audio frekvencijama. Dubina skin efekta na 20 kHz za bakar iznosi 0,5 mm, što znači da za provodnike poprečnog preseka do 0,8 mm² (prečnik provodnika 1 mm) ovaj efekat nema nikakvog uticaja. Veličina ovog efekta može se videti iz odnosa otpornosti kabla na visokim R_{ac} i niskom R_{dc} frekvencijama, tabela

Ne postoji naučno objašnjenje koje ide u prilog činjenici da su čujno superiorniji kablovi čiji su provodnici proizvedeni od veoma čistog bakra i koji se reklamiraju pod nazivom OFHC (*oxygen-free high conductivity*) kablovi. Međutim, veliki broj korisnika audio uređaja veruje u ovu činjenicu.

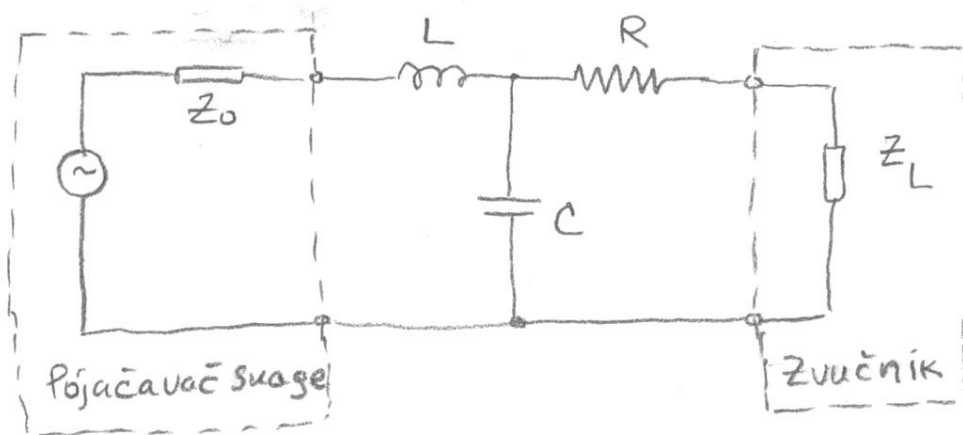
Povezivanje zvučnika i pojačavača snage

Većina međusobnih veza u sistemu za pojačanje zvuka su tipa konstantnog napona, što znači da izlaz niske impedanse pobuđuje ulaz visoke impedanse. Rezultat ovakve veze je maksimalni prenos napona i minimalni prenos struje audio signala. Ovakva veza nije optimizirana za prenos snage kod koje su impedanse identične. Ironično zvuči, ali je i veza između pojačavača snage i zvučnika tipa konstantnog napona. Ovo može na prvi pogled da izgleda nelogično, pošto se ipak radi o pojačavaču snage. Međutim, prenos

konstantnog napona obezbeđuje dovoljnu snagu za zvučnik, održava dobru stabilnost rada pojačavača snage i minimizira uticaj zvučničkih kablova.

Električni parametri zvučničkih kablova

Iz prethodno rečenog je jasno da su efekti prenosnih linija koji se pojavljuju kod zvučničkih kablova veoma slabi, praktično su nečujni i možemo ih zanemariti. Stoga je jedini ispravan način da zvučničke kablove posmatramo kao parove provodnika koje u ekvivalentnim kolima možemo predstaviti sa koncentrisanim parametrima. Ekvivalentna šema veze pojačavač snage-kabl-zvučnik prikazana je na slici 13. Z_g je izlazna impedansa pojačavača snage, L , C i R su parametri kabla a Z_L je ulazna impedansa zvučnika.



Slika 13. Ekvivalentna šema veze pojačavač snage-kabl-zvučnik

Otpornost zvučničkih kablova, ukoliko nisu previše dugački, nije od posebnog značaja. Pravilo koje je odomaćeno u praksi kod izvođenja instalacija audio sistema je da otpornost provodnika između pojačavača snage i zvučnika ne bude veća od 5% minimalne vrednosti impedance zvučnika. Ako kao primer uzmemo da minimalna vrednost impedance zvučnika, čija je nazivna impedansa 8Ω , nije manja od 4Ω maksimalna vrednost otpornosti provodnika može biti $0,2 \Omega$.

Svaka kombinacija dužine i površine poprečnog preseka provodnika može doći u obzir, ukoliko ukupna otpornost linije (odlazni i povratni provodnik zajedno) ne pređe ovu vrednost.

Ograničenjem otpornosti linije na 5 % vrednosti minimalne impedance zvučnika promena nivoa signala usled gubitaka na liniji je ograničena na najviše 0,5 dB.

Kapacitivnost zvučničkih kablova je, zavisno od tipa i konstrukcije, od 50 do 100 pF/m. Najveću kapacitivnost imaju trakasti kablovi, nešto manju kablovi kružnog preseka sa više provodnika a najmanju standardni kablovi kružnog preseka sa dva provodnika.

Obratno, induktivnost je najveća kod kablova sa dva provodnika, dok kablovi sa više provodnika imaju manju induktivnost. Prosečne vrednosti induktivnosti zvučničkih kablova su od 0,3 do 0,6 $\mu\text{H/m}$.

Faktor prigušenja

Membrana zvučnika ima masu i inerciju i slično bilo kojem telu koje se kreće ona teži da se suprotstavi svakoj akciji koja prekida njeno kretanje. Faktor prigušenja je pokazatelj koliko dobro neki pojačavač snage može da priguši zvučnik da ne „zvoni“ nakon prestanka pobude.

Ako uzmemo zvučnik prečnika 12 ili 15 inča i pritisnemo njegovu membranu ona će se lako pokrenuti. Ako je lupnemo prstom („udarimo joj čvrgu“) ona će se pokrenuti nekoliko puta napred – nazad, bolje rečeno „zazvoniće“. Kada kratko spojimo priključke zvučnika i ponovimo prethodni eksperiment osetićemo da je mnogo teže pokrenuti membranu i da ne zvoni tako dugo kada je udarimo. Spajanjem priključaka omogućili smo zvučniku da se samopriguši strujom indukovanom u kalemu usled kretanja membrane. Ova kontra-elektromotorna sila je korisna za smanjenje tendencije membrane zvučnika da zvoni. Pojačavač snage sa veoma malom izlaznom impedansom imaće isti uticaj kao kratko vezivanje priključaka zvučnika.

Faktor prigušenja veze pojačavač snage – zvučnik definisan je odnosom nominalne impedanse zvučnika i izlazne impedanse pojačavača snage. U specifikacijama pojačavača snage uvek se mogu naći veoma velike vrednosti za ovaj parametar (nekoliko stotina i više) ali treba imati u vidu da se u praksi, i otpornost zvučničkog kabla i kontakata mora dodati izlaznoj impedansi pojačavača snage. Velika otpornost kabla praktično sprečava kratak spoj koji bi na priključcima zvučnika stvarala samo izlazna otpornost pojačavača snage. Pavilo 5% (otpornost kabla ne treba da pređe 5% minimalne vrednosti impedanse zvučnika) za definisanje preseka zvučničkog kabla u praksi, svešće faktor prigušenja na oko 20, što je sasvim dovoljno u sistemima za pojačanje zvuka (sistemima ozvučavanja). U kućnim audio sistemima i sistemima za kritično slušanje otpornost kablova može uvek da bude manja od ove granične vrednosti a time i vrednost faktora prigušenja veća od 20.

Kablovi koji „dobro zvuče“

Promena kvaliteta zvuka često se pripisuje zvučničkim kablovima. Frekvencijski zavisne promene nivoa zvuka mogu biti prouzrokovane otpornošću provodnika. Razlog ovome treba tražiti u kompleksnoj prirodi impedanse zvučnika, čija vrednost zavisi od frekvencije.

Kao što je ranije rečeno veza pojačavač snage - zvučnik je tipa konstantnog napona. To znači da napon koji pojačavač predaje zvučniku u najvećoj meri ne zavisi od frekvencije. Zbog toga će struja kojom se napaja zvučnik zavisiti od vrednosti impedanse (tačnije modula impedanse) na datoj frekvenciji i zvučnik će primati veću struju a time i veću snagu u opsezima frekvencija gde je njegova impedansa najmanja. Povećanje otpornosti zvučničkog kabla imaće veći uticaj na snagu koju prima zvučnik upravo u opsezima gde je impedansa zvučnika najmanja. Ovo može izazvati frekvencijski zavisnu promenu koju slušalac može čuti. Pošto je smanjenje snage najveće u opsegu srednje-niskih frekvencija (tu je obično najmanja vrednost impedanse zvučnika) to se ima subjektivni osećaj oskudnijeg basa odnosno slabijeg nivoa signala na ovim frekvencijama. Kao i kod faktora prigušenja, ove promene se mogu minimizirati ako se kod proračuna preseka kabla pridržavamo pravila 5%.

Najznačajniji elemenat veze pojačavač snage - zvučnik je zvučnički kabl, a najznačajniji parametar kabla je njegova otpornost. Uvek je bolje koristiti kraći kabl većeg prečnika da bi imao što manju otpornost.

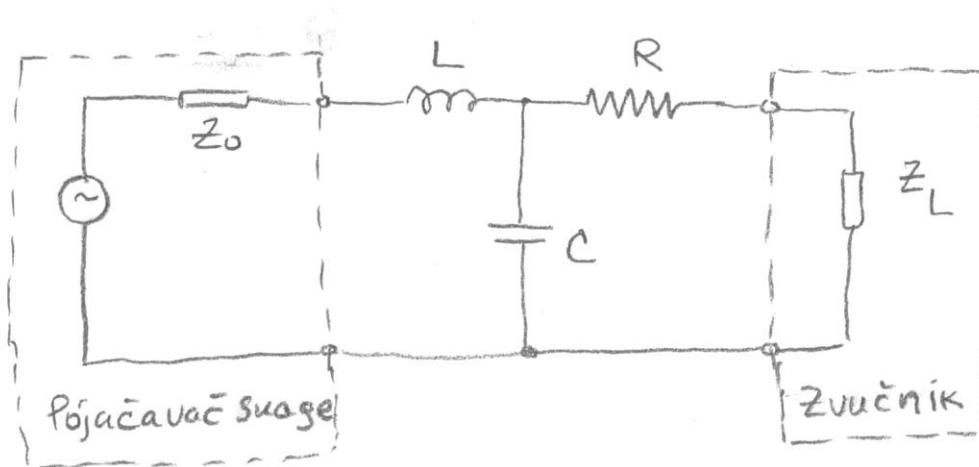
Drugi parametri kabla kao što su njegova induktivnost i kapacitivnost mogu uticati na karaktersitike sistema samo ukoliko su njihove vrednsoti znatno iznad uobičajenih.

Veza pojačavača snage i zvučnika je jedna od mnogih sličnih veza u audio sistemima. Primenjujući pravilo 5% obezbedićemo se da ova veza ne bude degradirana prevelikom otpornošću provodnika.

Ne postoji naučno objašnjenje koje ide u prilog činjenici da su čujno superiorniji kablovi čiji su provodnici proizvedeni od veoma čistog bakra i koji se reklamiraju pod nazivom OFHC (oxygen-free high conductivity) kablovi. Međutim, veliki broj korisnika audio uređaja veruje u ovu činjenicu.

Električni parametri zvučničkih kablova

Iz prethodno rečenog je jasno da su efekti prenosnih linija koji se pojavljuju kod zvučničkih kablova veoma slabi, praktično su nečujni i možemo ih zanemariti []. Stoga je jedini ispravan način da zvučničke kablove posmatramo kao parove provodnika koje u ekvivalentnim kolima možemo predstaviti sa koncentrisanim parametrima. Ekvivalentna šema veze pojačavač snage-kabl-zvučnik prikazana je na slici 5. Z_g je izlazna impedansa pojačavača snage, L , C i R su parametri kabla a Z_L je ulazna impedansa zvučnika. Vrednosti koncentrisanih parametara za različite tipove kablova prikazane su u tabeli i na dijagramima ...



Slika 5. Ekvivalentna šema veze pojačavač snage-kabl-zvučnik

Cable Type	Inductance/ $[\mu\text{H}/\text{m}]$	Capacitance/ $[\text{pF}/\text{m}]$	Resistance/ $[\Omega/\text{m}]$	R_{ac}/R_{dc}	$Z_{0h}[\Omega]$
No. 18 rip cord	0.52	58	0.042	1.05	95
No. 16 rip cord	0.60	51	0.026	1.15	108
No. 14 speaker cable	0.43	57	0.016	1.3	87
No. 12 speaker cable	0.39	76	0.01	1.5	72
No. 12 rip cord	0.62	49	0.01	1.5	112
Welding cable	0.32	88	0.001	4.0	60
Braided cable	0.10	1630	0.026	1.0	8
Coaxial dual cylindrical	0.052	580	0.01	1.0	9
Coaxial RG-9	0.075	30	0.013	1.0	50

Otpornost zvučničkih kablova, ukoliko nisu previše dugački, nije od posebnog značaja. Pad napona od 1 dB dobija se na kablju čiji su provodnici preseka 18 AWG čija je dužina oko 23 m pri impedansi opterećenja od 8 Ω . Kablovi čiji provodnici imaju presek od 12 AWG biće više nego dovoljni u audio sisemima sa najvećim zahtevima, ukoliko im dužina nije prevelika.

Kapacitivnost zvučničkih kablova prikazana je na slici . Kako se vidi najveću kapacitivnost imaju trakasti kablovi, nešto manju kablovi kružnog preseka sa više provodnika a najmanju standardni kablovi kružnog preseka sa dva provodnika.

Induktivnost je najveća kod kablova sa dva provodnika, dok kablovi sa više provodnika imaju manju induktivnost.

	$V_p(100 \text{ Hz})$	$V_p(10 \text{ kHz})$	ΔT per meter
No. 12 wires (4-cm spacing)	8.15×10^7	1.87×10^8	0.69×10^{-8}
Coaxial RG-9	5.67×10^7	4.76×10^8	1.55×10^{-8}
No. 12 rip cord	4.92×10^7	2.57×10^8	1.64×10^{-8}
No. 12 speaker cable	4.03×10^7	1.78×10^8	1.92×10^{-8}
No. 18 rip cord	2.28×10^7	1.59×10^8	3.76×10^{-8}
Coaxial dual cylindrical	1.45×10^7	1.24×10^8	6.09×10^{-8}
Braided cable	5.45×10^6	4.84×10^7	16.3×10^{-8}

Da bi uticaj zvučnog kabla na audio signal bio što manji potrebno je da impedansa kabla bude što manja i konstantna sa frekvencijom. Na slici ... su prikazane krive impedanse u funkciji frekvencije, različitih tipova kablova zatvorenih otpornošću.

Table 5. Frequency limitations for 10-m lengths of cable with various loads.

Cable	Upper Corner Frequency, 2- Ω Load	4- Ω Load	Resonant Frequency, 4- μF Load	Measured Phase Angle at 20 kHz 4- Ω Load
No. 18 rip cord	75 kHz	136 kHz	35 kHz	3 degrees
No. 16 rip cord	61 kHz	114 kHz	32 kHz	2 degrees
No. 14 speaker cable	82 kHz	156 kHz	38 kHz	2 degrees
No. 12 speaker cable	88 kHz	169 kHz	40 kHz	1.5 degrees
No. 12 rip cord	55 kHz	106 kHz	32 kHz	4 degrees
Welding type cable	100 kHz	200 kHz	44 kHz	1.5 degrees
Braided cable	360 kHz	680 kHz	80 kHz	1 degree
Coaxial dual cylindrical	670 kHz	1300 kHz	112 kHz	—
Coaxial RG-9	450 kHz	880 kHz	92 kHz	—

Povezivanje zvučnika i pojačavača snage (Pat Brown)

Većina međusobnih veza u sistemu za pojačanje zvuka su tipa konstantnog napona, što znači da izlaz niske impedanse pobuđuje ulaz visoke impedanse. Rezultat ovakve veze je maksimalni prenos napona i minimalni prenos struje audio signala. Ovakva veza nije optimizirana za prenos snage kod koje su impedanse identične. Ironično zvuči, ali je i veza između pojačavača snage i zvučnika tipa konstantnog napona. Ovo može na prvi pogled da izgleda nelogično, pošto se ipak radi o pojačavaču snage. Međutim, prenos konstantnog napona obezbeđuje dovoljnu snagu za zvučnik, održava dobru stabilnost rada pojačavača snage i minimizira uticaj zvučničkih kablova. Pravilo je da kod povezivanja uređaja linijskog nivoa treba održati odnos 1:10 između vrednosti izlazne i ulazne impedanse. Ovo je dovoljno da se izbegne preopterećenje izlaza prethodnog uređaja ulazom narednog. Ovim se izbegava prevelik pad napona na provodnicima za vezu a ujedno izlazni napon uređaja ne zavisi od impedanse opterećenja. Dalje povećanje ulazne impedanse kod ovakve veze neće doprineti boljem transferu napona. Prenos struje pod ovim uslovima je minimalan i mala je bojazan da pobudni uređaj neće ispuniti zahteve u pogledu struje pobuđivanog uređaja. Primer.....??

Zvučnički kablovi

Mnogo pažnje posvećeno je kablovima koji povezuju pojačavač snage i zvučnike. Ovo je vitalna komponenta sistema i njen uticaj se mora razmotriti. Slika 1 prikazuje ekvivalentno kolo zvučničkog kabla. Ono sadrži serijsku otpornost (u obe grane – direktnoj i povratnoj), paralelnu kapacitivnost i rednu induktivnost u svakoj grani kola. Vrednost otpornosti ne zavisi od frekvencije. Vrednosti induktivne i kapacitivne reaktanse su frekvencijski zavisne, i posebno je znati da li su i kada one značajne u kolu. Pretpostavićemo da su reaktanse značajne kada je promena nivoa koju izazivaju svojim prisustvom reda 1 dB na bilo kojoj frekvenciji iz čujnog opsega. Ovo će se desiti kada ove reaktanse približno dostignu vrednost jednaku desetini vrednosti impedanse zvučnika. Uzećemo da je najgori slučaj impedansa od $4\ \Omega$ za zvučnik nominalne impedanse $8\ \Omega$.

Promena nivoa signala koja je posledica prisustva reaktanse kabla čija je vrednost jedanaka jednoj desetini vrednosti impedanse zvučnika iznosi:

$$\Delta L = 20 \log \left(\frac{V_z}{e_g} \right) = 20 \log \left(\frac{Z_z}{Z_z + X} \right) = 20 \log \left(\frac{Z_z}{Z_z + 0,1 Z_z} \right) = 20 \log \left(\frac{1}{1,1} \right) \approx -0,8 \text{ dB}$$

Kapacitivnost kabla

Kako je kapacitivnost kabla u paraleli sa izlazom pojačavača snage i opterećenjem, sa povećanjem frekvencije ona će obarati napon na zvučniku dok na visokim frekvencijama ne dovede do potpunog kratkog spoja na priključcima zvučnika. Potrebna kapacitivnost kabla da pad napona na zvučniku postane čujan iznosi:

Pri kapacitivnosti kabla od 150 pF/m (što je prilično mnogo za tipične zvučničke kablove) potrebna dužina kabla je:
Iz ovih rezultata je jasno da kapacitivnost kabla nije značajan faktor koji će prouzrokovati čujnu degradaciju audio signala.

Induktivnost kabla

Induktivnost kabla koja je vezana redno između pojačavača snage i zvučnika formira sa otpornošću u ekvivalentnom kolu filter propusnik niskih frekvencija. Induktivnost koja će dovesti do čujne promene iznosi:

Dužina provodnika čiji je prečnik 1,778 mm iznosi:

Ovo je najgori slučaj . U praksi na konačan rezultat mogu delovati i drugi faktori kao što su rastojanje provodnika, coiling i td. Medjutim, ako kablovi nisu previše dugački, može se zaanemariti uticaj induktivnosti i kapacitivnosti kabla na karakteristike audio signala koji se prenosi.. U tom slučaju se ekvivalentno kolo sa slike ... svodi na prostoji oblik, kako je dato na slici

Otpornost kabla

Otpornost provodnika se povećava sa njegovom dužinom i smanjuje sa povećanjem površine njegovog poprečnog preseka i ne menja se sa frekvencijom. Kako se otpornost provodnika povećava, struja koja protiče kroz kolo se smanjuje. Usled ovoga se smanjuje struja koja protiče kroz zvučnik, pa je i pad napona na zvučniku manji a usled toga je manji i nivo pritiska. Ovaj efekat je poznat pod nazivom *gubitak linije*. Ovo kolo se može posmatrati kao razdelnik napona. U ovom razdelniku napona gubici usled otpornosti provodnika se mogu minimizirati ako se ova parazitna otpornost provodnika održava malom u odnosu na vrednost impedance zvučnika.

Pravilo 5%

Pravilo koje je odomaćeno u praksi kod izvođenja instalacija audio sistema je da otpornost provodnika između pojačavača snage i zvučnika ne bude veća od 5% minimalne vrednosti impedance zvučnika. Ako kao primer uzmemo zvučnik impedance 4 Ω maksimalna vrednost otpornosti provodnika može biti:

Svaka kombinacija dužine i površine poprečnog preseka provodnika može doći u obzir, ukoliko ukupna otpornost linije (odlazni i povratni provodnik zajedno) ne pređe ovu vrednost. U tabeli 3 su prikazane vrednosti otpornosti za neke uobičajene preseke provodnika.

Ograničenjem otpornosti linije na 5 % vrednosti minimalne impedance zvučnika promena nivoa usled gubitaka na liniji je ograničena na 0,5 dB, pošto:

Faktor prigušenja

Membrana zvučnika ima masu I inerciju I slično bilo kojem telu koje se kreće ona eži da se suprotstavi svakoj akciji koja prekida njeno kretanje. Faktor prigušenja je pokazatelj koliko dobro neki pojačavač može da priguši zvučnik da ne zvioni nakon prestanka pobude. Prost eksperiment ilustruje ovaj koncept. Ako uzmenmo zvučnik prečnika 12i 15 inča I pritisnemo njegovu membranu ona će se lako pokrenuti. Lupnimo je prstogm (opalimo joj čvrugu) I ispratimo njeno kretanje. Sada kratkospojimo priključke zvučnika I ponovimo eksperiment. Osetićemo de je mnogo teže pokrenuti membranu ii nezvoni tako

jako kada je udarimo. Kratko spajanjem priključaka omogućili smo zvučniku da se samo priguši strujom indukovanom u kalemu usled kretanja membrane. Ova kontraelektromotorna sila je korisna za smanjenje tendencije membrane zvučnika da zvoní. Pojačavač sa veoma malom izlaznom impedansom imaće isti uticaja kao i kratko vezivanje priključaka zvučnika. Faktor prigušenja veze pojačavač – zvučnik definisan je odnosom impedanse zvučnika i izlazne impedanse pojačavača snage. U specifikacijama pojačavača snage uvek se mogu naći veoma velike vrednosti za ovaj parametar (nekoliko stotina i više) ali treba imati u vidu da se u praksi, i otpornost zvučničkog kabla i kontakata mora dodati izlaznoj impedansi pojačavača snage. Velika otpornost kabla praktično sprečava kratak spoj koji bi na priključcima zvučnika stvarala samo izlazna otpornost pojačavača. U praksi pavilo 5% za definisanje preseka zvučničkog kabla svešće faktor prigušenja na oko 20 što je sasvim dovoljno u sistemima za pojačanje zvuka (ozvučavanja). Slika 4 prikazuje smanjenje faktora prigušenja u jednom ekstremnom slučaju koje dovodi do suptilnih (ali merljivih) čujnih promena u karakteristikama niskotonskog zvučnika.

Kablovi koji “dobro zvuče”

Promena kvaliteta zvuka često se pripisuje zvučničkim kablovima. Frekvencijski zavisne promene nivoa mogu biti prouzrokovane otpornošću provodnika. Razlog ovome reba tražiti u kompleksnoj prirodi impedanse zvučnika. Na slici 5 je prikazana kriva impedanse zvučnika u bas- refleks kutiji. Vidise da impedansa zavisi od frekvencije. Kao što je ranije pokazano veza pojačavač zvučnik je tipa konstantnog napona. To znači da napon koji pojačavač predaje zvučniku u najvećoj meri ne zavisi od frekvencije. Zbog toga će struja kojom se napaja zvučnik zavistiti od vrednosti impedanse (tačnije modula impedanse) na datoj frekvenciji i zvučnik će primati veću struju a time i veću snagu u opsezima frekvencija gde je njegova impedansa najmanja. Povećanje otpornosti zvučničkog kabla imaće veći uticaj na snagu koju prima zvučnik upravo u opsezima gde je impedansa zvučnika najmanja. Ovo može izazvati frekvencijski zavisnu promenu koju slušalac može čuti. Pošto je smanjenje snage najveće u opsegu srednje-niskih frekvencija (tu je obično najmanja vrednost krive impedanse) to se ima subjektivni osećaj oskudnijeg (tighter) basa. Kao i kod faktora prigušenja, ove promene se mogu minimizirati ako se kod proračuna preseka kabla pridržavamo pravila 5%.

Postoje i druga pravila koja određuju najbolji tip kabla za datu primenu.

- Obično je praktičnije koristiti fleksibilne nego krute provodnike. Razlog je više praktične nego slušne prirode – krute provodnike je teže položiti i završiti.
- upredene parice su korisne usled smanjenog uticaja njihovog magnetnog polja na druge provodnike i opremu u njihovoj blizini.
- Zaštitni plašt mora imati određene karakteristike da pri gorenju ne emituje otrovne gasove.

Najznačajniji elemenat veze pojačavač- zvučnik je zvučnički kabl, a najznačajniji parametar kabla je njegova otpornost. Uvek je bolj ekoristiti kraći kabl većeg prečnika da bi imao što manju otpornost.

Drugi parametri kao što je induktivnost i kapacitivnost kabla mogu uticati na karaktersitike sistema ukoliko su njihove vrednosti van kontrole. Apelujem na čitaoce da provere važnost njihovog uticaja sami pre nego da veruju zaključcima i tvrdnjama

drugih. Mnogo zabune može nastati preuveličavanjem važnosti parametara provodnika.

Veza pojačavača i zvučnika je jedna od mnogih sličnih veza u audio sistemima. Pravilo 5% obezbeđuje korisnu meru da se obezbedimo da ova veza ne bude degradirana prevelikom otpornošću provodnika.

3. Kablovi za digitalne audio signale

Potreban frekvencijski opseg B za prenos digitalnih audio signala je mnogo širi nego kada su u pitanju analogni signali. Ovaj opseg zavisi od frekvencije odabiranja f_0 i može se uzeti da je :

$$B = 128 \cdot f_0 \quad (16)$$

U tabeli 1 su date potrebne širine opsega B za prenos digitalnih audio signala u zavisnosti od vrednosti frekvencije odabiranja f_0 . Kao što vidimo, ovde je potrebniji opseg više od hiljadu puta širi nego u slučaju kada se radi o prenosu analognih audio signala.

Tabela 3. Potreban opseg B za prenos digitalnih audio signala u funkciji vrednosti frekvencije uzorkovanja f_0

Frekvencija uzorkovanja f_0 (kHz)	Potreban opseg B (MHz)
32	4,096
38	4,864
44,1	5,645
48	6,144
96	12,288
192	24,578

Iz prethodnog je jasno da će na frekvenciji od 25 MHz određeni parametri kabla, o kojima nismo vodili računa kada je u pitanju prenos analognih audio signala, ovde imati značajan uticaj. To se, kao što ćemo kasnije videti, pre svega odnosi na karaktersitičnu impedansu kabla.

Povezivanje digitalnih audio uređaja

AES/EBU je profesionalna verzija standarda za povezivanje digitalnih audio uređaja, za prenos 2 audio kanala (stereo), koji je koncipiran od strane AES (Audio Engineering Society) i prihvacen od EBU (European Broadcast Union) osamdesetih godina. Obe organizacije imaju objavljene svoje standarde, a u audio industriji standard je prihvaćen kao AES/EBU. U osnovnoj varijanti, standard (AES3) predviđa primenu balansiranog paričnog kabla sa karakterističnom impedansom od 110 Ω , sa XLR konektorima potpuno identično praksi za analogni audio: ženski 3- polni XLR konektor na uređajima je ulaz, muški konektor izlaz. Funkcije pojedinih kontakata su: kontakt 1 = GND, 2=Hi, 3=Lo. Postoji i verzija za profesionalni prenos digitalnog audio signala po koaksijalnom kablju

impedanse $75\ \Omega$ (video kabl, npr, RG59B/U), sa BNC konektorima, uvedena standardom AES3id.

Standard AES3 je internacionalno potvrđen i standardom IEC 60968, Type I.

Standard za audio uređaje široke potrošnje ("consumer" audio) nastao je kao rezultat uvođenja CD u široku primenu, kroz saradnju Philips/Sony pa je poznat kao Sony / Philips digital interface odnosno S/PDIF i za povezivanje u električnoj verziji koristi koaksijalni kabl $75\ \Omega$ sa "Cinch" (RCA) konektorima. Potvrđen je standardom IEC 60968, Type II. U odnosu na AES3 i AES3id postoji razlika u nivou signala i nekim detaljima "timing"-a. Ulazna kola savremenih uređaja (npr. audio rekorderi ili surround procesori) detektuju i AES3 i S/PDIF signal, pa je dovoljno primeniti dobro pasivno prilagođenje $75:110\ \Omega$ (Npr. Neutrik ima adaptore XLR/Cinch sa transformatorima imdenase $75/110\ \Omega$). Postoji i varijanta S/PDIF sa optičkim povezivanjem i tu se koriste "TOS-Link" konektori i multimodno opticko vlakno, njačešće u jeftinoj sintetičkoj varijanti.

AES3 standard povezivanja sa ispravnim prilagođavanjem i dobrim kvalitetom kabla koristi se za linije dužine do 100 m, a S/PDIF za kratke veze dužine ispod 10 m.

Kod AES/EBU (AES3) povezivanja u studijskoj tehnici koristi se i ostala klasična audio "infrastruktura" kao sto su patch paneli sa normalizacijom prolaska signala, odnosno "normal-through" vezom izmedju izvora (generatora) i prijemnika preko normalizovanog para (5-circuits) $1/4''$ ili $0.173''$ (bantam) gnezda. U tom slucaju preporučljivo je da patch kablovi koriste kabl $110\ \Omega$ (ne običan audio kabl sa "nedefinisanom" impedansom). Povezivanje je i ovde analogno klasičnom modelu za analogni audio (IEC 268-12): Tip (vrh) = Hi, Ring (prsten) = Lo, Sleeve (baza, omotač) = GND.

3. Kablovi za digitalne audio signale

Potreban frekvencijaki opseg B za prenos digitalnih audio signala je mnogo širi nego kada su u pitanju analogni signali. Ovaj opseg zavisi od frekvencije odabiranja f_0 i može se uzeti da je :

$$B = 128 \cdot f_0 \quad (2)$$

U tabeli 1 su date potrebne širine opsega B za prenos digitalnih audio signala u zavisnosti od vrednosti frekvencije odabiranja f_0 . Kao što vidimo, ovde je potrebni opseg više od hiljadu puta širi nego u slučaju kada se radi o prenosu analognih audio signala.

Tabela 1. Potreban opseg B za prenos digitalnih adio signala u funkciji vrednosti frekvencije uzorkovanja f_0

Frekvencija uzorkovanja f_0 (kHz)	Potreban opseg B (MHz)
32	4,096

38	4,864
44,1	5,645
48	6,144
96	12,288
192	24,578

Iz prethodnog je jasno da će na frekvenciji od 25 MHz određeni parametri kabla, o kojima nismo vodili računa kada je u pitanju prenos analognih audio signala, ovde imati značajan uticaj. To se, kao što ćemo kasnije videti, pre vega odnosi na impedansu kabla.

Povezivanje digitalnih audio uređaja

AES/EBU je profesionalna verzija standarda za povezivanje digitalnih audio uređaja, za prenos 2 audio kanala (stereo), koji je koncipiran od strane AES (Audio Engineering Society) i prihvacen od EBU (European Broadcast Union) osamdesetih godina. Obe organizacije imaju objavljene svoje standarde, a u audio industriji standard je prihvacen kao AES/EBU. U osnovnoj varijanti, standard (AES3) predviđa primenu balansirano-paričnog kabla sa karakterističnom impedansom od 110 Ω , sa XLR konektorima potpuno identično praksi za analogni audio: ženski 3-polni XLR konektor na uređajima je ulaz, muški konektor izlaz. Funkcije pojedinih kontakata su: kontakt 1 = GND, 2=Hi, 3=Lo. Postoji i verzija za profesionalni prenos digitalnog audio signala po koaksijalnom kablju impedanse 75 Ω (video kabl, npr. RG59B/U), sa BNC konektorima, uvedena standardom AES3id.

Standard AES3 je internacionalno potvrđen i standardom IEC 60968, Type I.

Standard za audio uređaje široke potrošnje ("consumer" audio) nastao je kao rezultat uvođenja CD u široku primenu, kroz saradnju Philips/Sony pa je poznat kao *Sony / Philips digital interface* odnosno S/PDIF i za povezivanje u električnoj verziji koristi koaksijalni kabl 75 Ω sa "Cinch" (RCA) konektorima. Potvrđen je standardom IEC 60968, Type II. U odnosu na AES3 i AES3id postoji razlika u nivou signala i nekim detaljima "timing"-a. Ulazna kola savremenih uređaja (npr. audio rekorderi ili surround procesori) detektuju i AES3 i S/PDIF signal, pa je dovoljno primeniti dobro pasivno prilagođenje 75:110 Ω (Npr. Neutrik ima adaptore XLR/Cinch sa transformatorima imdenase 75/110 Ω). Postoji i varijanta S/PDIF sa optičkim povezivanjem i tu se koriste "TOS-Link" konektori i multimodno optičko vlakno, njačešće u jeftinoj sintetičkoj varijanti.

AES3 standard povezivanja sa ispravnim prilagođavanjem i dobrim kvalitetom kabla koristi se za linije dužine do 100 m, a S/PDIF za kratke veze dužine ispod 10 m.

Kod AES/EBU (AES3) povezivanja u studijskoj tehnici koristi se i ostala klasična audio "infrastruktura" kao što su patch paneli sa normalizacijom prolaska signala, odnosno "normal-through" vezom između izvora (generatora) i prijemnika preko normalizovanog para (5-circuits) 1/4" ili 0.173" (bantam) gnezda. U tom slučaju preporučljivo je da patch kablovi koriste kabl 110 Ω (ne običan audio kabl sa "nedefinisanim" impedansom).

Povezivanje je i ovde analogno klasičnom modelu za analogni audio (IEC 268-12): Tip (vrh) = Hi, Ring (prsten) = Lo, Sleeve (omotač) = GND.

Literatura

[1] R.A. Greiner, Amplifier - Loudspeaker Interfacing, *Journal of Audio Engineering Society*, vol. 28, No. 5, pp. 311-315, May 1980.

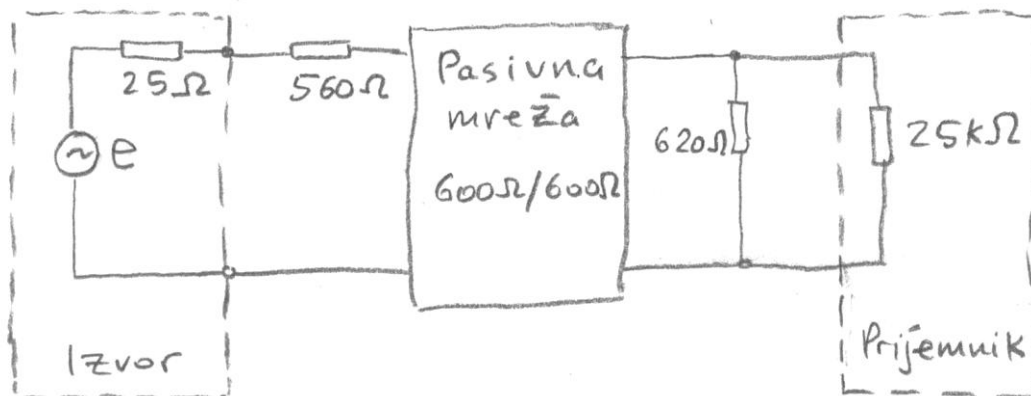
Prilagodjenje po impedansi

U radio i televizijskoj tehnici pojam prilagodjenja po impedansi odnosi se na usov prenosa maksimalne snage. Da bi potrošač primio od izvora maksimalnu snagu mora impedansa potrošača biti jednak impedansi izvora a njihove reaktivne komponente suprotnog znaka. Tako izvor unutrašnje impedanse od $600\ \Omega$ predaće maksimalnu snagu potrošaču čija je impedansa $600\ \Omega$.

Pod ovaj koncept ne mogu se podvesti pojačavači u audiotehnici. Savremeni pojačavači snage imaju impedansu mnogo manju (20 do 100 puta) nego što je impedansa opterećenja sa kojom su predviđeni da rade. Kada se pojačavači snage optereće impedansama manjim od nominalne vrednosti oni postaju nelinearni a njihovo pojačanje opada. Pojačavač počinje da odseca vrhove signala, povećavaju se izobličenja a ne retko može doći i do oštećenja samog pojačavača. Kod pojačavača snage posebno je problematična reaktivna komponenta u impedansi opterećenja.

Linijski pojačavači, kao što smo već videli takodje imaju malu izlaznu impedansu (20 do $100\ \Omega$). Impedansa opterećenja sa kojom su predviđeni da rade iznosi minimalno $600\ \Omega$.

Prilagodjenje po impedansi stoga, u audiotehnici, srećemo samo kod pasivnih meža kao što su: skretnice, ekvalizeri i oslabljivači – attenuatori. Elementi ovih pasivnih mreža su proračunati pod pretpostavkom da će mreže biti napajane iz izvora date unutrašnje impedanse i da će biti opterećene datom impedansom opterećenja. Ponašanje ovih meža biće u očekovanim granicama samo ako impedanse i izvora i opterećenja ne odstupaju značajno od onih vrednosti za koje su mreže projektovane.



Slika .4. Pasivna mreža sa prilagodjenjem impedansi izvora i opterećenja

Ukoliko naprimer, pasivnu mrežu predviđenu za rad sa impedansama izvora i opterećenja od $600\ \Omega$ treba da koristimo izmedju dva uređaja koja ove uslove ne ispunjavaju, slika , oramo to postići dodatnim otpornicima na ulazu i izlazu mreže.

Telefonske linije

Audio signale je nekada potebno preneti klasičnim telefonskim linijama. Telefonske linije se ponašaju prema klasičnoj teoriji vodova. Iako imaju nominalnu karakterističnu impedansu od $Z_0 = 600\ \Omega$ u praksi se ona često mnogo razlikuje od ove vrednosti. Ovo dolazi otuda što karakteristična impedanca zavisi od fizičke konstrukcije voda (prečnik provodnika, rastojanje provodnika, karakteristike izolatora i td.). Ako linija nije zatvorena svojom karakterističnm impedansom onda će i vrednost impedanse duž voda da varira. Te varijacije će biti veće što je diskontinuitet na kraju voda veći. U praksi se ipedansa telefonske linije menja čak u granicama od $200\ \Omega$ do $2\ k\Omega$.

Ako se radi o ekvalizovanoj telefonskoj liniji ona je tada ekvalizovana za ravnu amplitudsku karakteristiku pri impedansama izvora i opterećenja od $600\ \Omega$. Ovakvu liniju treba tretirati kao pasivnu mrežu predviđenu za rad sa impedansom izvora i opterećenja od $600\ \Omega$, slika .4.

Ukoliko telefonska linija nije ekvaliziovana ona će se bolje ponašati bez rednog otpornika kojim se impedansa izvora dovodi na potrebnu vrednost. Ovaj otpornik sa podužnom kapacitivnošću linije pravi filter propusnik niskih frekvencija usled čega dolazi do slabljenja komponenti signala na višim frekvencijama.

Fizičke karakteristike i konstrukcija audio kablova

Provodnik se sastoji iz provodnog jezgra i izolacije.

Provodno jezgro može da bude puna žica ili uzica (veći broj tankih provodnih niti). U prvom slučaju se radi o krutom a u drugom o fleksibilnom provodniku. Izolacija je najčešće izrađena od određene vrste plastike ili gume ili kombinacije ova dva materijala.

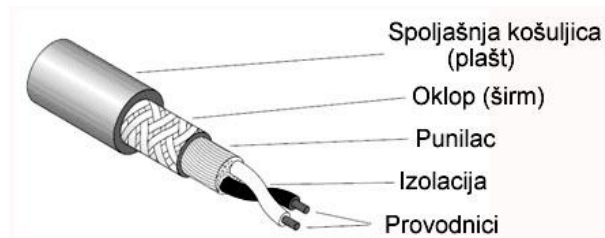
Provodnici za primenu u audiotehnici se izrađuju uglavnom od bakra u različitim veličinama prečnika, zavisno od njihove namene. Tako je poprečni presek provodnika za mikrofonske i linijske signale mali (po pravilu manji od 1 mm^2) u odnosu na poprečni presek provodnika za dugačke zvučničke linije velike snage (može biti i preko 6 mm^2).

Dva ili više provodnika međusobno spletenih ili u zajedničkom plaštu čine kabl.

Kablovi mogu imati različitu konstrukciju gde pored zajedničkog plašta postoje i metalni omot ili oplet (širm, ekran) koji štiti signale u provodnicima od elektromagnetnih smetnji.

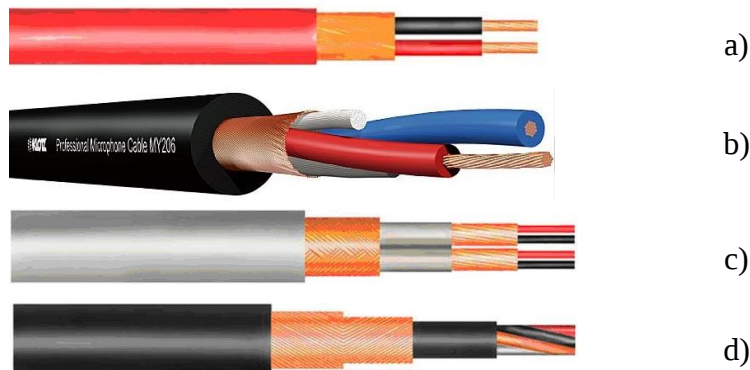
Mikrofonski kablovi

Mikrofonski kablovi, u najopštijem slučaju imaju konstrukciju prikazanu na slici. Provodnici u kابلu su pojedinačno izolovani određenom vrstom izolacionog materijala (pvc, polietilen, polipropilen, teflon) u dve boje. Unutar kabla provodnici su međusobno upredeni (sa određenim korakom upredanja na jedinici dužine) da bi se smanjio uticaj spoljašnjih elektromagnetnih



Slika 1. Sastavni elementi tipičnog mikrofonskog kabla

smetnji na signal koji se prenosi kablom. Upredanjem se provodnici drže na manjem međusobnom rastojanju pa su za spoljašnja elektromagnetna polja praktično skoro na istom mestu i u njima se indukuje ista smetnja. Ova smetnja se na impedansi opterećenja skoro potpuno poništava usled diferencijalne veze provodnika.



Slika 2. Različiti oblici izrade oklopa mikrofonskog kabla: a) omot, b) pletenica, c) omot i pletenica, d) dvostruki omot

Ovako upredeni provodnici su zaliveni u neku vrstu punioca da bi se fiksirao njihov međusobni položaj. Preko punioca je postavljen oklop ili ekran (u žargonu se često čuje “štrm”) izrađen od aluminijuma ili bakra. Oklop može biti napravljen u obliku folije, omota ili pletenice. Najbolja ali i najskuplja zaštita se postiže kod kablova čiji je oklop izveden u obliku pletenice. Radi dodatnog poboljšanja zaštite kvalitetniji kablovi imaju više zaštitnih slojeva koji mogu biti istog ili različitog oblika, kako je prikazano na slici 2.

Preko oklopa ili širma kabla se postavlja završni izolacioni sloj, obično od pvc materijala ili neke vrste gume, koji se naziva plašt.

Mikrofonski kablovi se proizvode kao jednoparični, slika 2a, i višeparični, slika 3. Jednoparični kablovi imaju široko područje primene u profesionalnim audio sistemima svih vrsta.

Višeparični audio kablovi primenjuju se svuda gde je potrebno grupisanje srodnih linija za prenos signala uz optimalno korišćenje raspoloživog prostora. Mogu se koristiti u fiksnim instalacijama (kada se polažu u kablovske kanale u cevi ili na kablovske regale) ili za izradu prenosnih priključnih kompleta, slika 4.



Slika 3. Višeparični mikrofonski kabl



Slika 4. Prenosna priključna kutija sa višeparičnim audio kablom

Radi dodatnog poboljšanja zaštite od elektromagnetnih smetnji mikrofonski kablovi se proizvode i u varijanti sa četiri provodnika koji su formirani kao dva upredena para pa opet upredena zajedno, slika 5. Ovde su provodnici manjeg preseka i po dva se vezuju zajedno tako da s obzirom na funkciju opet se radi o jednoparičnom kablju. Ovakvim načinom upredanja provodnika manjeg



Slika 5. "Star – quad" mikrofonski kabl

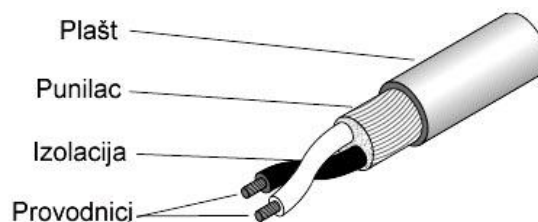
preseka smanjuje se rastojanje između provodnika kao i površina petlji koje provodnici međusobno formiraju zbog upredanja. Kao rezultat, dobija se povećanje slabljenja spoljašnjih smetnji za do 20 dB u odnosu na standardni kabl sa dva provodnika istog ekvivalentnog preseka. Ovakva verzija mikrofonskog kabla naziva se "star quad" i sve više se koristi za prenos mikrofonskih i linijskih audio signala u tv i video produkciji, u pozorištima i koncertnim dvoranama kao i na svim drugim mestima gde se koriste sistemi za regulaciju svetla koji i gde je prisutan uticaj jakih elektromagnetnih polja. Ovakav kabl ima manju induktivnost i manji uticaj skin efekta nego standardni dvoparični kabl istog ekvivalentnog preseka provodnika pa je i njegov uticaj na izobličenja signala na najvišim audio frekvencijama manji. Kaže se u žargonu "bolje zvuči".

Kablovi za prenosne audio sisteme uvek se prave od savitljivih provodnika (uzica) izrađenih od velikog broja provodnih niti. Pune žice bi se vremenom polomile zbog stalnog savijanja. Oklop kabla za ovakvu primenu treba da bude izrađen u obliku pletenice a ne od folije iz istog razloga. Takođe je poželjno da plašt kod prenosnih kablova bude od neke vrste gume.

Nasuprot tome, za statične sisteme mogu se koristiti kablovi sa oklopom od folije i sa plaštom od plastike.

Zvučnički kablovi

Detalj konstrukcije tipičnog zvučničkog kabla prikazan je na slici 6. Provodnici su izolovani, međusobno upredeni i zaliveni puniocem iz istih razloga kao i kod ostalih tipova kablova. Spoljašnji omotač ili plašt kabla predstavlja završni sloj koji obezbeđuje mehaničku zaštitu i električnu izolaciju kabla prema spolja. Provodnici su od bakra, izolacija i punilac od određene vrste plastike, a plašt od plastike, gume ili njihove mešavine.



Slika 6. Zvučnički kabl – sastavni elementi

Presek provodnika zvučničkih kablova kreće se od vednosti nešto manjih od 1 mm² pa do vrednosti od 6 mm², a u određenima slučajevima i više.

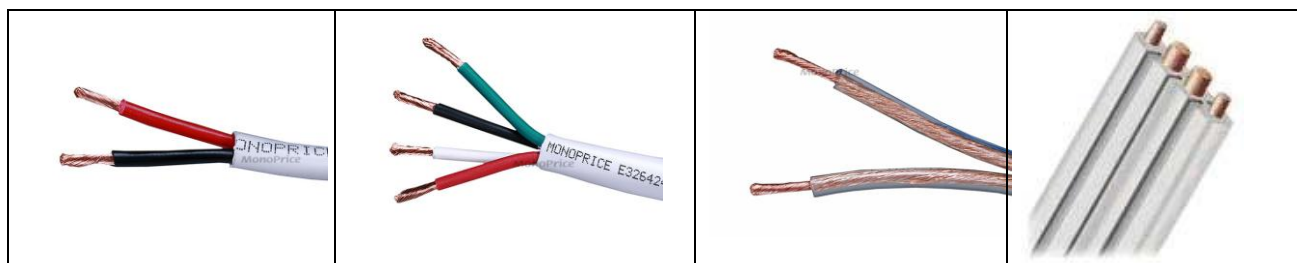
U svakom pojedinačnom slučaju primene treba uzeti u obzir snagu gubitaka u kابلu i povesti računa o parametrima kablova koji utiču na kvalitet reprodukovanoг signala

Parametar o kome se uvek mora voditi računa je otpornost zvučničkog kablova i ona treba da je što manja. Time se postiže manja snaga gubitaka i bolji faktor prigušenja pojačavača snage. Induktivnost i kapacitivnost kablova, koja su značajne za većinu audiofila, ako nisu date u podacima proizvođača mogu se odrediti iz poznatih detalja konstrukcije kablova, oblika i rastojanja odlaznog i povratnog provodnika u kابلu.

U sistemima za pojačanje zvuka je uobičajeno da se biraju kablovi kod kojih snaga gubitaka neće biti veća od 1 dB.

Zvučnički kablovi su najčešće kružnog ili trakastog oblika, slika 7. Kablovi kružnog oblika imaju veliku induktivnost a malu kapacitivnost, dok je kod trakastih kablova obratno. Detaljnije analize negativnog uticaja kablova na vezu pojačavač snage - zvučnik pokazuju da je on najmanji kod kablova koji imaju najmanju induktivnost.

Kablovi specijalne konstrukcije mogu se koristiti u razijama i prostorijama za produkciju muzike (mix room) gde se radi o kratkim rastojanjima. Međutim, ovakvi kablovi su veoma nepraktični u audio instalacijama u pozorištima, bioskopima, sportskim halama i drugim mestima gde se radi o velikim audio sistemima u kojima pojačavači snage ne mogu biti u blizini zvučnika. Kablovi u svim ovim slučajevima su značajne dužine, moraju imati provodnike relativno velikog preseka a iz oba ova razloga cena im može biti značajna.



Slika 7. Zvučnički kablovi standardne konstrukcije: kružnog preseka (levo), trakasti (desno)



Slika 8. Zvučnički kablovi specijalne konstrukcije