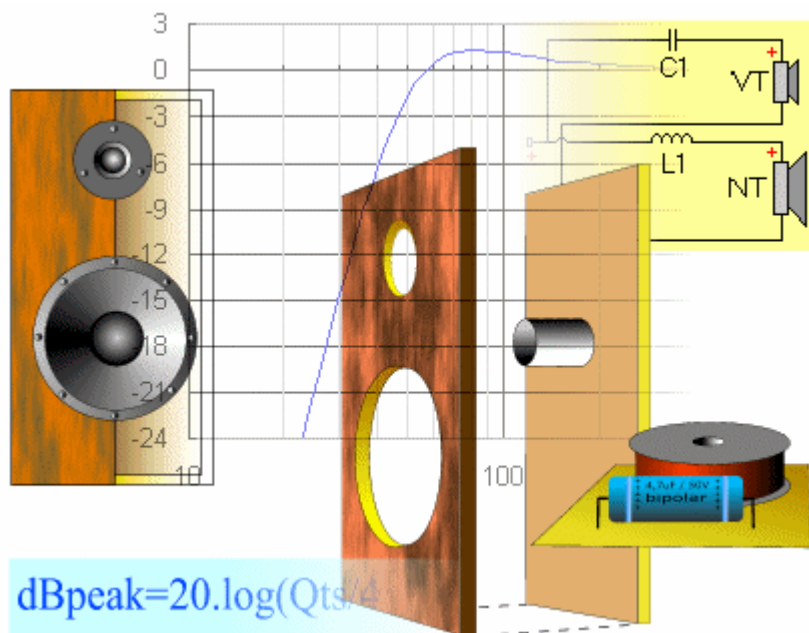


Samogradnja zvočnih omaric

1999 Hrastnik Bogdan



Akustika

Zvočnik

Izračuni in meritve na neznanem zvočniku

Zvočna omarica

Zaprta zvočna omarica

Bas-reflex zvočna omarica

Bas-reflex odprtina

Pasovni zvočni sistem

Elektrotehnika

Kretnice in filtri

Namesto uvoda

To besedilo je nastalo potem, ko sem v knjigarnah zaman iskal ustrezno literaturo. Sledile so dolge ure iskanja po Internet-u. Večina najdenih člankov je iz anglo-ameriškega področja; pri tem pa ni vedno jasno določeno z kakšno mersko enoto se računa. Najpogosteje sta inch in feet kar kombinirana z metričnim sistemom, npr.: Xmax v mm, volumen zvočne omarice pa v cubic feet?! Pri tem imajo tudi formule največkrat precej nepregledno obliko (podobno Excel-u).

Tudi v revijah so članki na to temo vedno redkejši; praviloma lahko zasledimo samo opis gotovega projekta -brez "ozadja". In če nam opisan projekt ne ustreza, nimamo nič!

Naslednje strani so namenjene tistim samograditeljem, ki niso iz "stroke", vendar želijo vedeti nekaj več.

Veliko potrpljenja pri samogradnji....

Hrastnik Bogdan
bogdan.hrastnik@siol.net

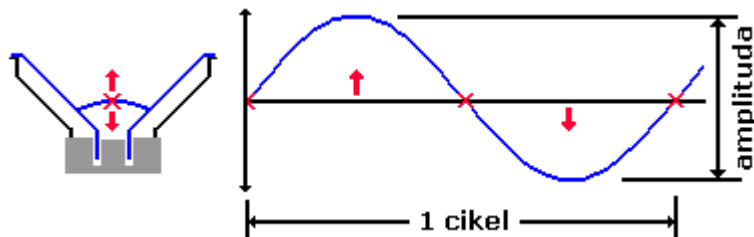
Nekateri viri podatkov:

www.spiceisle.com/homepages/brian/audioidiy
www.jblpro.com
www.jlaudio.com
www.hifisound.de

1. Akustika

1.1 Valovna dolžina in frekvenca

Zvok je posledica sprememb zvočnega tlaka v določenem času. Te spremembe povzroča premikanje membrane zvočnika:



Kadar se membrana pomakne naprej, nastane pred membrano nadtlak, ob pomiku skrajno nazaj pa nastane pred membrano podtlak -membrana je s tem opravila en cikel. Da bi spremembe tlaka sploh zaznali (torej slišali), se morajo cikli ponavljati dovolj hitro: 20-krat v sekundi ali več.

Število ciklov na sekundo imenujemo frekvenca in jo označujemo z malo črko f . Enota za frekvenco je Hz (Hertz), oz. en cikel na sekundo je 1Hz. Višja frekvenca je torej več ciklov na sekundo, kar slišimo kot višji ton.

Večji oz. daljši pomiki membrane pomenijo večjo amplitudo in s tem večjo glasnost.

Valovna dolžina je pot, ki jo en cikel opravi v eni sekundi. Valovno dolžino označujemo z grško črko λ . Valovno dolžino pri poljubni frekvenci dobimo:

$$\lambda = \frac{c}{f}$$

- λ -valovna dolžina [m],
- c -hitrost zvoka [m/s] (pri sobni temperaturi $\sim 344\text{m/s}$),
- f -frekvenca [Hz]

Slišno področje zvoka se razteza od 20Hz do 20000Hz (=20kHz), oz. ima valovno dolžino od 17,2m do 1,72cm.

Pri samogradnji zvočnih omaric lahko slišno področje zvoka grobo razdelimo na:

20Hz	40Hz	-ekstremno nizkotonsko področje,
40Hz	200Hz	-nizkotonsko področje,
200Hz	4kHz	-srednjetonsko področje,
4kHz	20kHz	-visokotonsko področje.

Toni frekvenc pod 40Hz se v glasbi skoraj ne pojavljajo saj so jih sposobni proizvesti le redki instrumenti (npr. orgle) -še težje je zgraditi zvočne omarice, ki bi bile sposobne te tone predvajati.

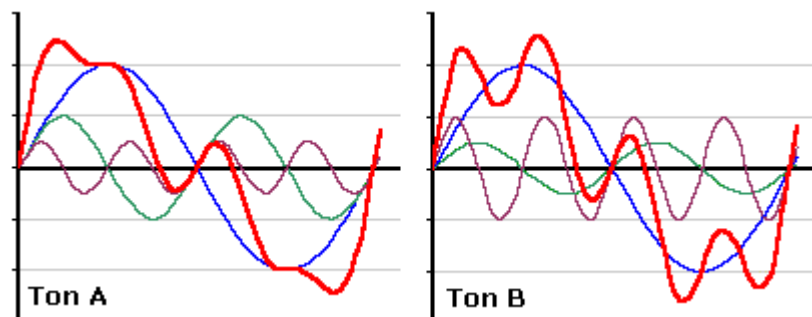
Osnovni toni glasbenih instrumentov se nahajajo v nizko- in srednjetonskem področju.

V visokotonskem področju se nahajajo harmonične frekvence (gl. naslednje poglavje) osnovnih tonov instrumentov.

1.2 Harmonična frekvenca in oktava

Nobeden naravni instrument ni sposoben proizvesti tona, ki bi imel čisto sinusno obliko. Vsak naravni instrument generira poleg osnovnega tona tudi tone, ki so večkratniki osnovnega tona. Kadar npr. na violini zaigramo ton "a", je ton sestavljen iz osnovne frekvence 440Hz in tonov z frekvencami 880Hz, 1320Hz, 1760Hz, itd. -ton 880Hz je v tem primeru prvi harmonik tona 440Hz.

Pri tem ima osnovni ton največjo amplitudo; amplitude harmonikov so odvisne od posameznega instrumenta. Npr. ton "a" ima na klarinetu in na violini enako osnovno frekvenco, vendar se amplitude harmoničnih frekvenc pri obeh instrumentih razlikujejo:



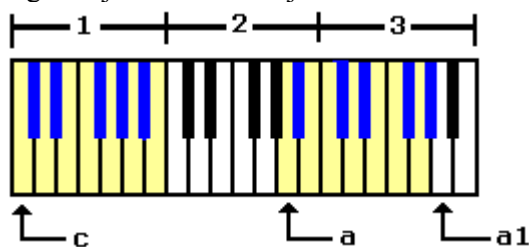
Na sliki imamo prikazana dva instrumenta, ki imata enako osnovno frekvenco in amplitudo (modra linija) in dve enaki harmonični frekvenci z različnima amplitudama. Ker se amplitude posameznih frekvenc seštevajo, bomo slišali to, kar je prikazano z rdečo linijo -ravno "oblika" te linije nam omogoča, da ločimo npr. trobento od klarineta.

Na zgornji sliki sta zaradi večje preglednosti prikazani samo dve harmonični frekvenci. V resnici vsebuje ton nekega instrumenta ogromno harmoničnih frekvenc.

Zaenkrat ne obstaja zvočnik, ki bi bil sposoben enakomerno predvajati cel zvočni spekter, zato običajno gradimo dvo- ali več stezne zvočne omarice.

Recimo, da smo zgradili zvočno omarico, ki ima vgrajena dva zvočnika: nizkotonskega in visokotonskega. Z ustrezno kretnico dovajamo tone pod 4kHz na nizkotonski zvočnik, tone nad 4kHz pa na visokotonski zvočnik. Osnovni pogoj pri konstrukciji je, da sta zvočnika enako "glasna" -s tem je zagotovljeno, da bodo harmonične frekvence sorazmerne glede na osnovni ton.

V glasbi je oktava razdeljena na sedem osnovnih tonov in pet poltonov:



Na sliki imamo prikazano klaviaturo z obsegom treh oktav. Za primer vzamimo oktavu z začetnim tonom "a", ki ima frekvenco 440Hz; oktavu višje je ton "a1", ki ima enkrat višjo osnovno frekvenco, torej 880Hz. Ustrezno temu ima ton, ki je oktavu nižje, frekvenco 220Hz.

Razmerja oktav veljajo za poljubne frekvence, npr:

-oktavo višje od tona 1000Hz je ton 2000Hz, oktavu nižje pa je ton 500Hz;

-ton 320Hz je dve oktavi višje od tona 80Hz, ton 20Hz pa je dve oktavi nižje od tona 80Hz.

Skrajno slišno področje (20Hz do 20kHz) torej obsega 10 oktav, pri tem pa vsebuje prvih pet oktav frekvence pod 1000Hz!

Pojem oktava bo pomemben za lažje razumevanje konstrukcij zvočnih kretnic.

1.3 Glasnost in decibel

Glasnost je možno definirati kot nivo zvočnega pritiska na določeno površino, kar pa je pri akustiki precej nepraktično -spodnja meja slišnosti je namreč $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2$. Zato je uvedena enota Bel, ki je definirana kot logaritem razmerja dveh moči:

$$\text{Bel} = \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

Po dogovoru se uporablja decibel -torej ena desetina Bel-a:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right)$$

Vzamimo, da je referenčna moč $P_0=1\text{W}$:

$P_1[\text{W}]$	Razlika [dB]
1	0
10	10
100	20
200	23

Subjektivno občutimo 10-kratno povečanje moči kot "enkrat bolj glasno", oz. 10-kratno zmanjšanje moči kot "pol manj glasno". Torej bomo 100W slišali enkrat bolj glasno kot 10W. Če se dovedena moč spremeni za manj kot 2dB, razlike praktično ne opazimo.

Recimo, da poslušamo glasbo z 10W. Če se bo sedaj (ne da bi to videli) moč povečala na 15W, razlike ne bomo opazili:

$$\text{dB} = 10 \cdot \log\left(\frac{15\text{W}}{10\text{W}}\right) = 1,76\text{dB}$$

Enako velja, če poslušamo glasbo pri moči 100W in jo povečamo na 150W -razlika bo zopet 1,76dB!

Vzamimo referenčno moč $P_0=1\text{W}$, torej: **dB** = 10.log(**P**₁)
sledi:

$$P_1 = 10^{\frac{\text{dB}}{10}}$$

Sestavimo tabelo moči z razmerji 0-10dB:

Razlika [dB]	$P_1[\text{W}]$
0	1
1	1,25...
2	1,58...
3	1,99...
4	2,51...
5	3,16...
6	3,98...
7	5,01...
8	6,30...
9	7,94...
10	10

Primer:

Poslušamo glasbo pri moči 5W in moč povečamo za 3dB. Kolikšna bo moč?

$$P = 5W \cdot 1,99... = 9,97...W$$

preverimo:

$$10 \cdot \log\left(\frac{9,97W}{5W}\right) = 10 \cdot \log(1,99) = 3dB$$

Primer:

Kakšna je razlika moči med 20W in 80W?

$$10 \cdot \log\left(\frac{80W}{20W}\right) = 10 \cdot \log(4W) = 6,02...dB$$

Enako vrednost dobimo, če primerjamo npr. 16W in 4W -saj je razmerje enako.

V elektriki je moč definirana z:

$$P = I \cdot U = I^2 \cdot R = U^2 / R$$

Ker je moč sorazmerna kvadratu napetosti, se z podvojitvijo napetosti moč poveča za 4-krat:

$$(2 \cdot U)^2 / R = 4 \cdot U^2 / R$$

Za primer vzamimo: $U=4V$, $R=2\Omega$, dobimo:

$$P = 4^2 / 2 = 8W$$

Sedaj napetost podvojimo: $U=8V$:

$$P = 8^2 / 2 = 32W \text{ -kar je 4-krat več.}$$

Če želimo moč v dB predstaviti z razmerjem napetosti ali toka, uporabimo naslednje formule:

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{U_1}{U_0}\right) \quad \text{ker} \quad dB = 10 \cdot \log\left(\frac{U_1}{U_0}\right)^2$$

in

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{I_1}{I_0}\right)$$

-upoštevati pa moramo, da navedene vrednosti veljajo samo pri enakih upornostih.

V elektroniki se uporablja referenčna napetost 0,775V, ki pri upornosti 600Ω predstavlja moč 1mW; kar je enako 0dB.

Nivo zvočnega pritiska označujemo z SPL (sound pressure level):

$$dB = 20 \cdot \log\left(\frac{P_1}{P_0}\right) \quad \text{torej} \quad SPL = I = U = 10^{\frac{dB}{20}}$$

Zopet sestavimo tabelo:

dB	U,I ali SPL
0	1
2	1,25...
4	1,58...
6	1,99...
8	2,51...
10	3,16...
12	3,98...
14	5,01...
16	6,30...
18	7,94...
20	10

V akustiki predstavlja SPL nivo zvočnega pritiska (v dB) nad referenčnim zvočnim pritiskom. Referenčni zvočni pritisk je $20 \times 10^{-6} \text{ N/m}^2 = 0 \text{ dB}$ ($1 \text{ N/m}^2 = 1 \text{ Pa}$).

Primer:

Kakšna je razlika moči v dB med 2V in 10V? -upornost je v obeh primerih enaka, npr. 8Ω

Preberemo vrednosti iz tabele: $\sim 2\text{V}=6\text{dB}$, $10\text{V}=20\text{dB}$; razlika je: $20-6=\sim 14\text{dB}$.

Preverimo: $P_0 = 2^2 / 8 = 0,5\text{W}$
 $P_1 = 10^2 / 8 = 12,5\text{W}$
 $P_x = 10 \cdot \log(12,5/0,5) = 10 \cdot \log(25) = 13,98... \text{dB}$

Primer:

V prostoru imamo dva enaka zvočnika na katera dovajamo ton enake frekvence, vendar različne moči: -na enega dovajamo moč 60W, na drugega pa 40W. Kolikšen je skupni SPL?

Na prvi pogled se zdi logično, da seštejemo SPL vrednosti obeh zvočnikov:

$$\text{SPL1} = 20 \cdot \log(60\text{W}) = 35,56... \text{dB}$$

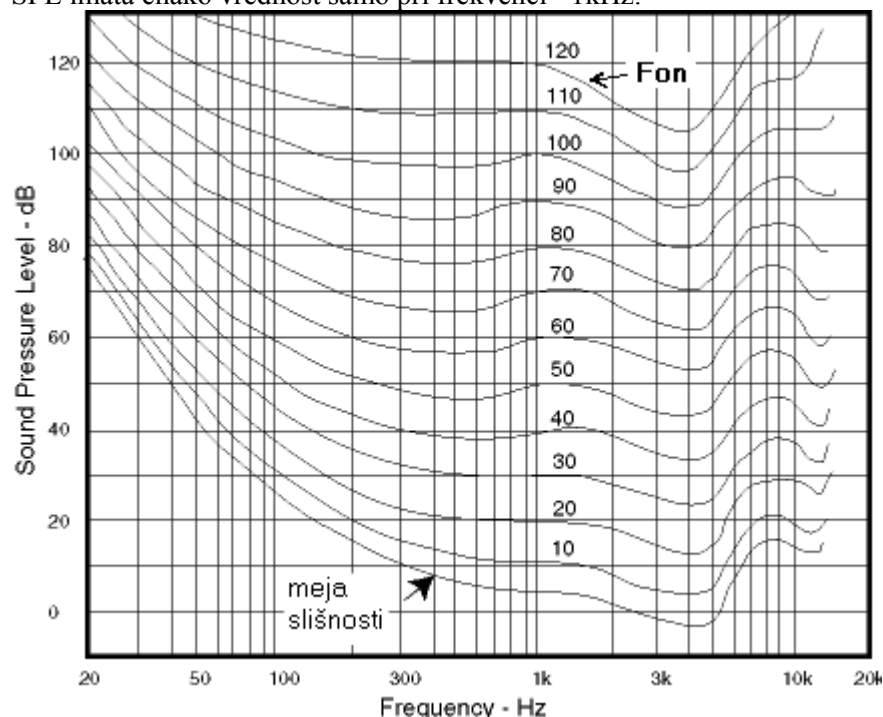
$$\text{SPL2} = 20 \cdot \log(40\text{W}) = 32,04... \text{dB}$$

torej $\text{SPL}_x = \text{SPL1} + \text{SPL2} = 67,60... \text{dB}$ -kar pa je napačno!

Skupni SPL dobimo:

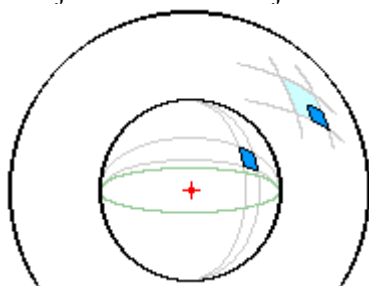
$$\text{SPL}_x = 20 \cdot \log(60\text{W}+40\text{W}) = 20 \cdot \log(100\text{W}) = 40\text{dB}$$

Vedeti moramo, da SPL in glasnost (loudness) ni eno in isto -glasnost merimo z enoto fon. Glasnost in SPL imata enako vrednost samo pri frekvenci $\sim 1\text{kHz}$:



Vidimo, da ima fon bolj subjektiven značaj: tudi človeško uho je na nizke in zelo visoke frekvence manj občutljivo.

Kadar se od izvora zvoka oddaljujemo opazimo, da nivo zvočnega pritiska (SPL) pada. Za primer vzamimo, da imamo točkasti izvor zvoka -zvok se bo širil v vse smeri enako- in smo od izvora zvoka oddaljeni 1m. Na razdalji 1m bo površina sfere $4\pi\text{m}^2$:



Sedaj povečajmo razdaljo od izvora zvoka na 2m: površina sfere bo $16\pi\text{m}^2$ -površina večje sfere je 4 krat večja od površine manjše sfere.

To pomeni, da bo akustična moč (modra površina) na veliki sferi predstavljala samo četrtno površine glede na površino na manjši sferi -razmerje moči 4:1 pa predstavlja razliko $\sim 6\text{dB}$. Sklepamo: vsaka podvojitve razdalje od izvora zvoka predstavlja zmanjšanje SPL za 6dB -na prostem!

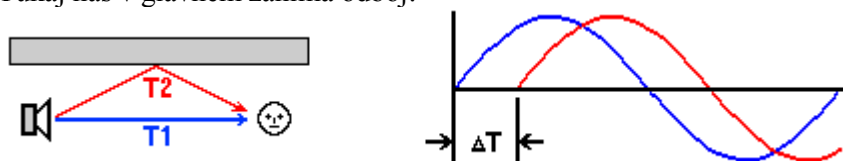
V zaprtem prostoru velja to samo pri relativno majhnih razdaljah od zvočnika, saj se zvok na večjih razdaljah zaradi odbitih valov "porazdeli". Razdalja do katere velja zgornje pravilo je odvisna od velikosti prostora in "usmerjenosti" zvočnika. Samo za ilustracijo: v prostoru $\sim 20\text{m}^2$ velja to do razdalje $\sim 1\text{m}$.

1.4 Odboj zvoka in fazni pomik

Kadar zvok naleti na oviro, se lahko zgodi:

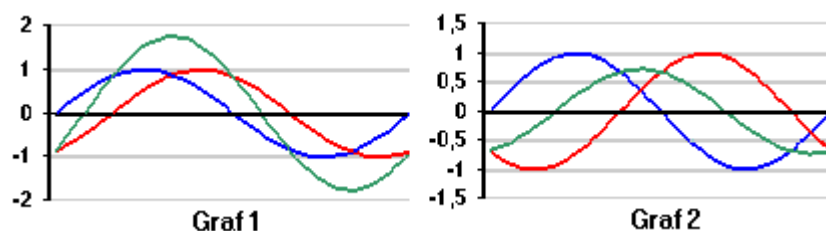
- zvok bo absorbiran (npr. v tekstilno preprogo),
- zvok se bo odbil (npr. od stene).

Tukaj nas v glavnem zanima odboj:



Na sliki vidimo, da mora odbiti val opraviti nekoliko daljšo pot -torej bo glede na direktni zvočni val, nekoliko kasnil.

Ker se amplitude posameznih zvočnih valov seštevajo, je lahko rezultat direktnega in odbitega vala:



Na grafu 1 vidimo, da je rezultat odboja povečanje amplitude, medtem ko je rezultat na grafu 2 zmanjšana amplituda. Kaj bomo dobili v določenem prostoru je odvisno samo od valovne dolžine tona in razdalj direktnega in odbitega vala.

Seveda v praksi ne poslušamo tona ene same frekvence, ampak cel spekter frekvenc določenega instrumenta -poleg tega ima prostor poleg stropa in tal še vsaj štiri stene. V vsakem primeru bomo poleg direktnega zvoka slišali tudi odbite zvoke.

Medtem ko bo npr. ena od sten povzročila povečanje amplitude določene frekvence, bo ta ista stena povzročila zmanjšanje druge frekvence. In frekvenca, ki bo imela zmanjšano amplitudo, se bo morda odbila od druge stene z ojačano amplitudo.

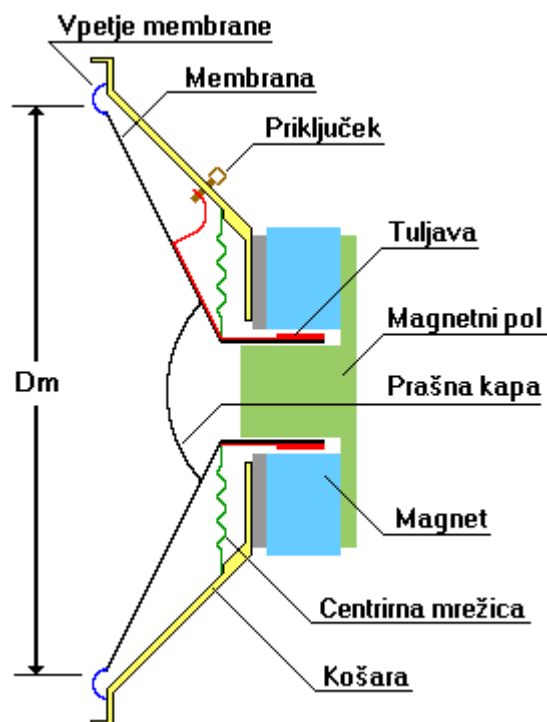
Torej bomo določene frekvence nekega instrumenta slišali glasneje, druge pa tišje -v praksi to predstavlja popačen zvok. Problem lahko rešujemo na nekaj načinov:

- z iskanjem optimalnega mesta za zvočnike,
- določena mesta sten obložimo z ustreznim materialom (npr. na tla preprogo),
- uporabimo "equalizer".

Zgodi se torej lahko, da tudi zelo kvalitetne zvočne omarice ne bodo dale pričakovanega rezultata -če prostor ne ustreza.

2. Zvočnik

2.1 Elementi zvočnika



Membrana (ang. cone)

Kadar tuljava potisne membrano navzven, se mora istočasno enakomerno premakniti navzven cela površina membrane. Torej mora biti membrana dovolj čvrsta (toga), da se pri premikanju oz. vibriranju, ne podaja (upogiba).

Zvočnik z papirno membrano ima zelo dobre akustične lastnosti. Papir ima lastnost, da vpija vlago iz atmosfere (je higroskopičen) in pri tem s časom izgubi svoje prvotne lastnosti. Proizvajalci kvalitetnih zvočnikov zato papir ustrezno površinsko zaščitijo.

Membrana iz polipropilena (PP) ima bistveno večjo togost od papirne membrane. Glede na razmerje cena-kvaliteta, je zvočnik z membrano iz PP trenutno najboljši izbor.

Ostali materiali (kevlar, aluminij, itd.) so relativno dragi. V večini primerov pa pri kvalitetnih zvočnikih membrana ni samo iz enega materiala, ampak iz več slojev različnih materialov s čemer se zagotavljajo potrebne akustične lastnosti.

Vpetje membrane (ang. surround)

-mora biti čim bolj elastično, da pri premikanju membrane ne zadržuje zunanjega roba membrane. Istočasno pa mora poskrbeti, da se bo membrana čimprej vrnila v svojo nevtralno pozicijo -brez nekontroliranih nihanj.

Za vpetje se v glavnem uporablja guma (rubber) ali pena (foam), pri čemer ima pena nekoliko boljše akustične lastnosti. Vendar pa je guma nekoliko manj občutljiva na atmosferske vplive (onesnaženje v zraku), tako da dalj časa ohranja svoje lastnosti.

Košara (ang. basket, chassis)

-je iz litine (aluminij, magnezij) ali iz železa. Košara iz litine ima vsekakor prednost, saj se ne more deformirati in tudi konstrukcija je akustično ugodnejša.

Tuljava (ang. coil)

-predstavlja skupaj z magnetom "motor", ki povzroča gibanje membrane. Sestavljena je iz nosilca tuljave (valj), ki je vpet na membrano in iz žice, ki je navita na valj. Pri tem se uporabljajo različni materiali (baker, aluminij), ki morajo zagotoviti čim boljše akustične in termične lastnosti -pri tem pa morajo imeti čim manjšo lastno težo.

2.2 Thiele/Small podatki

-so rezultat raziskav, ki sta jih opravila Thiele in Small. Tukaj bomo navedli samo tiste T/S podatke, ki jih bomo pri konstrukciji zvočnih omaric potrebovali.

Pe [W]

-je največja moč, ki jo tuljava zvočnika termično še prenese (ang. thermally limited maximum electrical input power). Z prekoračitvijo te moči, se tuljava zvočnika trajno poškoduje.

Včasih je podatek Pe označen tudi z PEmax.

Rz [Ω]

-je nazivna impedanca zvočnika (običajno 4 ali 8Ω).

Re [Ω]

-je upornost tuljave pri enosmerni napetosti. Ta upornost je vedno nižja od Rz.

Le [mH]

-je induktivnost tuljave. Omogoča izračun upornosti tuljave pri poljubni frekvenci.

Fs [Hz]

-je rezonančna frekvenca zvočnika na prostem (ang. resonance frequency of driver in free air).

Vas [liter]

-predstavlja volumen zraka, ki ima enake akustične lastnosti kot celotno vzmetenje membrane. Vrednost Vas ne predstavlja potrebnega volumna zvočne omarice! -volumen omarice je odvisen od ostalih T/S vrednosti in tipa zvočne omarice.

Xmax [mm]

-je največji linearni pomik tuljave (in s tem membrane) zvočnika v eno smer (npr. iz nevtralne pozicije navzven). Xmax ni razdalja za katero se je membrana zvočnika fizično sposobna premakniti ampak razdalja, za katero je magnet zvočnika sposoben premakniti membrano v eno smer in da pri tem ostane cela tuljava v magnetnem polju.

Včasih je Xmax podan kot "peak to peak", kar predstavlja celo pot membrane in ne samo v eno smer; v tem primeru delimo vrednost z dva -vendar pa vzamimo rezultat z "rezervo": ni namreč nujno, da je magnet sposoben premakniti membrano v obe smeri enako daleč!

Sd [m²]

-je projicirana efektivna površina membrane. V naših izračunih bomo zaradi poenostavitve uporabljali efektivni premer membrane (v cm), ki zajema tudi 1/3 vpetja membrane:

$$Dm = 2 \cdot \sqrt{\frac{Sd \cdot 1000}{\pi}} \quad [Dm = \text{cm}, Sd = \text{m}^2]$$

Qts, Qes in Qms

-so podatki brez dimenzije, merjeni pri Fs. Pri tem velja razmerje:

$$\frac{1}{Qts} = \frac{1}{Qms} + \frac{1}{Qes} \Rightarrow \frac{1}{Qms} = \frac{1}{Qts} - \frac{1}{Qes}$$

Eff ali η_0 [%]

-je izkoristek zvočnika (reference efficiency).

SPL ali Sensitivity [dB]

-nivo zvočnega pritiska, ki ga je zvočnik sposoben proizvesti pri moči 1W na razdalji 1m. Včasih je podatek podan v obliki 2,83V/1m, kar je enako 1W/1m -vendar samo pri 8Ω zvočniku!

2.3 Primeri podatkov za nekatere zvočnike

	Dynaudio 17W75	Peerless PT165M	ScanSpeak 18W8544	Seas H582
Splošni podatki				
Moč	150 W	80 W	100 W	100 W
Upornost	8 ohm	8 ohm	8 ohm	8 ohm
Frekv. območje	50-2000 Hz	45-2500 Hz	35-2000 Hz	60-3000 Hz
Občutljivost	89 dB	89 dB	90 dB	91 dB
Zunanji premer	17,6 cm	16,5 cm	17,8 cm	17,0 cm
Košara	Al litina	železna	Al litina	Al litina
Material membrane	PHA	PP	kevlar	PP
Vpetje membrane	guma	pena	guma	guma
Tuljava	Al Ø75 mm	Cu Ø33 mm	Cu Ø42 mm	Cu Ø26mm
Nosilec tuljave	Al	Al	Al	Al
T/S podatki				
Fs	54 Hz	48 Hz	34 Hz	60 Hz
Vas	12,42 l	29,43 l	40,46 l	25,97 l
Qts	0,76	0,31	0,24	0,39
Qes	1,10	0,38	0,28	0,58
Re	5,10 ohm	6,00 ohm	5,40 ohm	5,70 ohm
Le	0,24 mH	0,27 mH	0,09 mH	0,25 mH
Eff	0,20%	0,80%	0,54%	0,91%
Xmax	2 mm	4 mm	6,5 mm	3 mm
Sd	118,63 cm ²	136,64 cm ²	153,72 cm ²	128,48 cm ²
Izračunan Dm	12,2 cm	13,1 cm	13,9 cm	12,7 cm
Izračunan SPL 1W/1m	84,3 dB	91,1 dB	89,3 dB	91,6 dB

Izvor podatkov: www.hifisound.de

	SLG-165P	SLG-200P	KT-165E	KT-200E
Splošni podatki				
Moč	60 W	80 W	120 W	150 W
Upornost	8 ohm	8 ohm	8 ohm	8 ohm
Frekv. območje	47-4200 Hz	47-2500 Hz	47-4500 Hz	38-4000 Hz
Občutljivost 1W/1m	93 dB	94 dB	90 dB	91 dB
Zunanji premer	16,5 cm	20,5 cm	17,0 cm	21,0 cm
Košara	železna	železna	litina	litina
Material membrane	papir	papir	kevlar	kevlar
Vpetje membrane	pena	pena	guma	guma
Tuljava	-	-	Ø35 mm	Ø35 mm
T/S podatki				
Fs	47 Hz	47 Hz	47 Hz	38 Hz
Vas	26,112 l	42,77 l	18,474 l	36,469 l
Qts	0,469	0,483	0,304	0,331
Qes	0,512	0,535	0,323	0,344
Qms	5,550	5,000	5,089	9,088
Re	5,8 ohm	5,8 ohm	6,8 ohm	6,8 ohm
Le	-	-	-	-
Eff	-	-	-	-
Xmax	-	-	-	-
Sd	-	-	-	-
Izračunan SPL 1W/1m	89,0 dB	91,0 dB	89,5 dB	89,4 dB

Izvor podatkov: Conrad electronic 99

3. Izračuni in meritve na neznanem zvočniku

3.1 Izkoristek, SPL in PeakSPL

Izkoristek izračunamo z formulo:

$$\text{eff} = \frac{9,64 \cdot 10^{-10} \cdot F_s^3 \cdot V_{as}}{Q_{es}}$$

-če dobljeno vrednost množimo z 100, dobimo izkoristek (Eff) v %.

Nivo zvočnega pritiska, ki ga je zvočnik sposoben proizvesti pri dovedeni moči 1W na razdalji 1m, izračunamo:

$$\text{SPL} = 112 + 10 \cdot \log(\text{eff}) \quad [\text{dB } 1\text{W}/1\text{m}]$$

Zaželeno je, da dobimo čim večjo vrednost (običajno 88-92dB 1W/1m), saj je s tem za določen nivo glasnosti potrebna manjša dovedena moč ali povedano drugače: pri isti dovedeni moči bo glasnejši zvočnik, ki ima večji SPL.

Zgornja obrazca sta primerna za "preverjanje" podatkov -razlika med deklariranimi in izračunanimi podatki ne bi smela biti večja od $\pm 0,5\text{dB}$.

Podatek PeakSPL pomeni največji nivo zvočnega pritiska (v dB), ki ga je zvočnik sposoben proizvesti:

$$\text{PeakSPL} = \text{SPL} + 10 \cdot \log(P_e)$$

-dobljeno vrednost lahko prekoračimo samo tako, da na zvočnik dovedemo moč, ki je večja od P_e (pri tem zvočnik seveda trajno poškodujemo).

3.2 Volumen izrinjenega zraka

Pri izračunu zvočnih omaric bomo potrebovali tudi največji volumen zraka, ki ga lahko membrana izrine.

Najprej izračunajmo efektivno površino membrane:

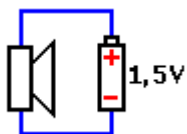
$$S_d = \frac{\pi \cdot D_m^2}{4} \quad [S_d = \text{cm}^2, D_m = \text{cm}]$$

Volumen izrinjenega zraka dobimo:

$$V_d = \frac{S_d \cdot X_{\max}}{10000} \quad [V_d = \text{litri}, S_d = \text{cm}^2, X_{\max} = \text{mm}]$$

3.3 Polariteta zvočnika

Za ugotavljanje +/- pola zvočnika uporabimo navadno 1,5V baterijo, ki jo kratkotrajno priklopimo na kontakte zvočnika (ker ne vemo kje na zvočniku je +/-, je seveda vseeno kako jo obrnemo). Ob priklopu baterije opazujemo v katero smer se premakne membrana:

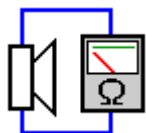


Membrana se je pomaknila navzven: + pol baterije je priklopljen na + pol zvočnika.

Membrana se je pomaknila navznoter: + pol baterije je priklopljen na - pol zvočnika.

3.4 R_e in R_z upornost zvočnika

Podatek R_e dobimo tako, da na zvočnik priklopimo Ω -meter in vrednost direktno odčitamo:



Vrednost R_z je odvisna od R_e :

$$R_e = 2 \dots 4 \Omega: R_z = 4 \Omega$$

$$R_e = 4 \dots 8 \Omega: R_z = 8 \Omega$$

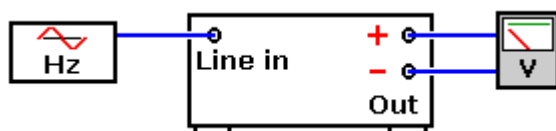
3.5 F_s zvočnika

Za te meritve potrebujemo:

- ton generator za frekvence vsaj do $\sim 200\text{Hz}$,
- ojačevalec moči $\sim 5\text{W}$ ali več,
- upor $\sim 8\Omega/5\text{W}$,
- digitalni multimeter.

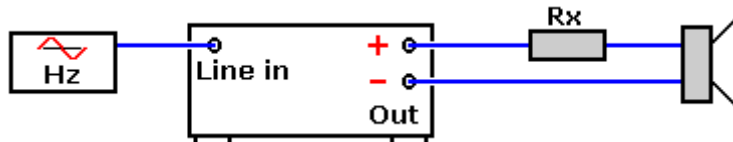
Pri naslednjih meritvah mora biti zvočnik na prostem! V oglatem oklepaju so navedene vrednosti za primer.

1. Najprej izmerimo R_e zvočnika [=5,6 Ω].
2. Točno izmerimo upornost uporabljenega upora R_x [=6,8 Ω].
3. Ton generator priklopimo na vhod ojačevalca in frekvenco nastavimo na $\sim 150\text{Hz}$:



Glasnost ojačevalca nastavimo tako, da dobimo na izhodu napetost $V_s \sim 1\text{V}$ [=0,5V].
Glasnost pustimo nespremenjeno!

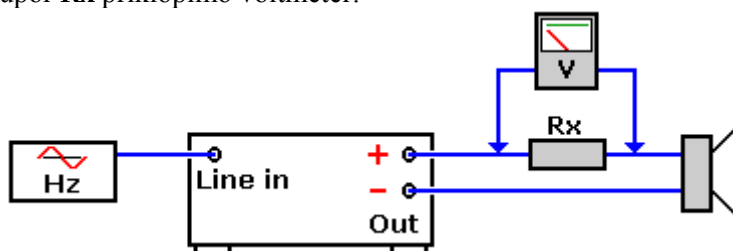
Zvočnik in upor povežemo po naslednji shemi:



Tok skozi upor R_x in zvočnik lahko izračunamo:

$$I_s = \frac{V_s}{R_x + R_e} [= 0,0403\text{A}] \quad \text{-potrebujemo samo za naslednje poglavje (p.3.6)}$$

4. Na upor R_x priklopimo voltmeter:



5. Frekvenco počasi znižujemo in sicer tako dolgo, dokler na uporu R_x ne dobimo minimalne napetosti:

- zabeležimo si izmerjeno napetost V_m [= 0,062V] -samo za naslednje poglavje (p.3.6)
- zabeležimo si frekvenco F_s [= 54Hz] -rezonančna frekvenca zvočnika.

3.6 Qts, Qes in Qms zvočnika

Najprej izvršimo postopek iz prejšnjega poglavja (p.3.5), nato nadaljujemo:

1. Izračunajmo tok, ki teče skozi upor **R_x** kadar je na upor napetost **V_m**:

$$I_m = \frac{V_m}{R_x} \quad [= 0,0091A]$$

Impedanca zvočnika pri rezonančni frekvenci je:

$$R_m = \frac{V_s - V_m}{I_m} \quad [= 48,1Hz]$$

Izračunajmo tok -3dB:

$$I_r = \sqrt{I_m \cdot I_s} \quad [= 0,0192A]$$

Napetost -3dB:

$$V_r = I_r \cdot R_x \quad [= 0,1306V]$$

Pomožna vrednost:

$$R_o = \frac{I_s}{I_m} \quad [= 4,4286]$$

2. Sedaj počasi višamo frekvenco in sicer tako dolgo, da dobimo na upor **R_x** napetost **V_r**:
-zabeležimo si dobljeno **F_{hi}** frekvenco [= 66Hz].

3. Nižajmo frekvenco pod **F_s** in zopet tako dolgo, da dobimo na upor **R_x** napetost **V_r**:
-zabeležimo dobljeno **F_{lo}** frekvenco [= 45Hz].

4. Dobljeni **F_{hi}** in **F_{lo}** vrednosti preverimo z formulo:

$$\sqrt{F_{hi} \cdot F_{lo}} = F_s \quad [= 54,5Hz = \sim F_s]$$

5. Izračunajmo **Q** vrednosti:

$$Q_{ms} = \frac{F_s \cdot \sqrt{R_o}}{F_{hi} - F_{lo}} \quad [= 5,4114]$$

$$Q_{es} = \frac{Q_{ms}}{R_o - 1} \cdot \frac{R_e}{R_x + R_e} \quad [= 0,7128]$$

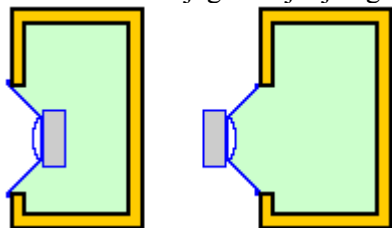
$$Q_{ts} = \frac{Q_{ms} \cdot Q_{es}}{Q_{ms} + Q_{es}} \quad [= 0,6298]$$

Dobljene podatke (meritve) lahko preverimo:

$$\frac{1}{Q_{ts}} = \frac{1}{Q_{ms}} + \frac{1}{Q_{es}} \Rightarrow \frac{1}{Q_{ms}} = \frac{1}{Q_{ts}} - \frac{1}{Q_{es}}$$

3.7 Vas zvočnika

Da bi lahko ugotovili **Vas** zvočnika, ga moramo vgraditi v zaprto (ne bas-reflex!) zvočno omarico. Volumen zvočne omarice (**Vb**) naj bo približno takšen, kot predvidevamo da je potreben. Zvočnik lahko zaradi lažjega merjenja vgradimo tudi tako, da je obrnjen navznoter:



1. Najprej izračunamo točen netto volumen omarice **Vb** (zeleno označeno področje).
2. Sedaj moramo ugotoviti resonančno frekvenco sistema **Fb**. To naredimo tako, da izvedemo postopek iz p.3.5, vendar tokrat z vgrajenim zvočnikom (dobljeni **Fs** je v tem primeru **Fb**).
3. Izračunamo **Vas**:

$$V_{as} = V_b \cdot \left(\left(\frac{F_b}{F_s} \right)^2 - 1 \right) \quad [V_{as}, V_b = \text{litri}, F_b, F_s = \text{Hz}]$$

Če nam tudi resonančna frekvenca zvočnika **Fs** ni znana, potem moramo postopek iz p.3.5 izvesti dvakrat: enkrat z nevgrajenim zvočnikom (dobimo **Fs**) in nato z vgrajenim zvočnikom (dobimo **Fb**).

Recimo, da smo zvočnik iz prejšnjega poglavja (**Fs**=54Hz) vgradili v zvočno omarico z prostornino **Vb**=4,5 litra. Po opravljeni meritvi (p.3.5) smo dobili **Fb**=106Hz. Torej:

$$V_{as} = 4,5 \cdot \left(\left(\frac{106}{54} \right)^2 - 1 \right) = 12,84 \text{ litra}$$

3.8 Risanje diagramov

Diagrami predstavljajo določeno karakteristiko zvočne omarice v izbranem frekvenčnem področju. Pri tem moramo razlikovati merjene in izračunane diagrame. Merjeni diagrami so rezultat realnih meritev, ki so praviloma izvršena v posebej za ta namen pripravljenih prostorih.

Izračunani diagrami predstavljajo "predviden" odziv zvočne omarice. Teoretično je izračunan odziv enak merjenemu, toda pri izračunih je praktično nemogoče zajeti vse dejavnike, ki vplivajo na rezultat. Kakorkoli že: pri samogradnji je predhodni izračun diagrama edini možni način s katerim lahko predvidimo rezultat samogradnje. Tudi če smo z izračunanim diagramom zadovoljni to še ne pomeni, da bomo zadovoljni tudi z zgrajenimi zvočnimi omaricami. Vedeti pa moramo, da je nemogoče narediti dobre zvočne omarice, če smo predhodno dobili slab diagram.

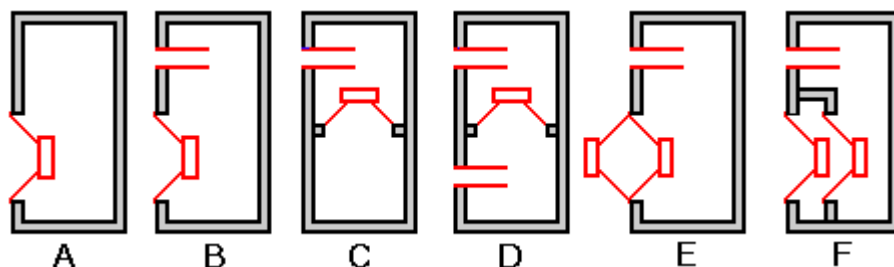
Pri vseh diagramih je frekvenca predstavljena z logaritemsko porazdelitvijo. Pozicijo poljubne frekvence na skali dobimo z formulo:

$$F_x = \frac{L \cdot (\log(f) - \log(f_a))}{2}$$

- L - dolžina skale,
- f - frekvenca katere pozicijo želimo izračunati,
- f_a - začetna frekvenca na skali,
- F_x - za koliko je frekvenca f oddaljena od začetka skale.

4. Zvočna omarica

4.1 Vrste zvočnih omaric



A: Zaprti sistem (ang. sealed enclosure)

Ta tip zvočne omarice ima kar nekaj prednosti:

- zahteva relativno majhen volumen omarice,
- frekvenčni odziv je zelo linearen,
- ima dober odziv membrane na kratkotrajne impulze,
- pri samogradnji si lahko "privoščimo" manjša odstopanja od idealnega volumna omarice.

In sedaj (edina) slabost:

- ta tip zvočne omarice je v nizkotonskem področju najmanj učinkovit (kar seveda ne pomeni, da nizkih tonov ni sposoben predvajati).

B: Bas-reflex sistem (ang. vented enclosure, ported enclosure)

Ta sistem je najpogostejše uporabljan za hi-fi ozvočenja -predvsem zaradi dobrega odziva v nizkotonskem področju. Pri istem vgrajenem zvočniku bo imela bas-reflex omarica večji volumen od omarice zaprtega tipa, vendar so dimenzije še vedno sprejemljive.

Slabosti ta sistem pravzaprav nima razen to, da je pri konstrukciji (izračunih) potrebna izredna pazljivost. Zvočnih omaric, ki temeljijo na bas-reflex principu (slika B-F) enostavno ne moremo delati "na pamet". Kajti, če zrak "veselo piha" skozi odprtino to še ne pomeni, da zadeva deluje tako kot mora: skozi odprtino mora priti tudi zvok.

C in D: Pasovni sistem (ang. bandpass enclosure)

-je namenjen samo za predvajanje točno izbranega področja zelo nizkih frekvenc. Večina "subwoofer" sistemov (npr. za kino surround) je zgrajena prav na tem principu. V hi-fi namene se ta sistem redkeje uporablja oz. ima smisel samo pri tri (ali več) steznih zvočnih omaricah. Torej potrebujemo poleg zelo kvalitetnega nizkotonskega zvočnika tudi bolj zahtevne tonske kretnice.

Na sliki C je pasovni sistem 4-reda (4th order), na sliki D pa sistem 6-reda.

E in F: Isobarik sistem

-je rešitev, ki se lahko uporablja kot bas-reflex ali kot pasovni sistem. Zvočnika sta obrnjena eden proti drugemu ali eden za drugim, kar omogoča stabilno delovanje membrane po principu "potisni-povleci" (push-pull). Pri tem morata biti oba zvočnika enaka!

Zvočno omarico gradimo, kot da imamo en velik zvočnik (površini obeh zvočnikov se seštevata), pri tem pa računamo volumen omarice glede na **Vas** enega zvočnika. To ima za posledico, da bo imela tako grajena zvočna omarica manjši volumen kot npr. standardna bas-reflex omarica pri enakem (vendar samo enem) zvočniku.

Tipično za ta sistem je tudi, da ima za 3dB manjši SPL kot standardna bas-reflex omarica, kar lahko kompenziramo z večjo dovedeno močjo (vgrajena zvočnika sta praviloma v paralelni povezavi).

Obstaja še nekaj sistemov, ki pa so v osnovi izpeljani iz zgoraj navedenih, npr. transmission line zvočna omarica. Pri tej omarici potuje zvok zelo nizkih frekvenc skozi precizno preračunan "tunel", kar ima za posledico ogromne dimenzije omarice.

4.2 Izbor zvočne omarice

Na izbor tipa zvočne omarice bodo vplivali predvsem naslednji dejavniki:

- mesto postavitve zvočne omarice (torej velikost zvočne omarice),
- izbor nizkotonskega zvočnika (dimenzije in akustične lastnosti),
- rezultat, ki ga želimo slišati.

Najprej pogledjmo kakšen zvočnik potrebujemo za določen tip zvočne omarice oz. v kakšen tip zvočne omarice lahko določen zvočnik vgradimo. To lahko ugotovimo s pomočjo EBP razmerja (efficiency bandwidth product), če sta nam znana T/S parametra **F_s** in **Q_{es}**:

$$EBP = \frac{F_s}{Q_{es}}$$

EBP je manjše od ~60:

- zvočnik je namenjen za vgradnjo v zvočno omarico zaprtega tipa.

EBP je med ~60 in ~100:

- zvočnik lahko vgradimo v zaprto ali bas-reflex zvočno omarico.

EBP je nad ~100:

- zvočnik je namenjen za vgradnjo v bas-reflex zvočno omarico.

5. Zaprta zvočna omarica

Za ta tip zvočne omarice bomo za primer izbrali zvočnik Seas H582:

Vas:	25,97 litra
Pe:	100W
Fs:	60 Hz
Qts:	0,39
Qes:	0,58
Dm:	12,7cm
Xmax:	3 mm

Izračunajmo še nekatere vrednosti, ki jih bomo potrebovali (p.3.1):

eff	=0,0093234
SPL	=91,7 dB
PeakSPL	=111,7 dB
Vd	=0,03982 litra

Pri vseh naslednjih formulah v tem poglavju bo v oglatem oklepaju primer rezultata za ta zvočnik.

5.1 Volumen zvočne omarice

-dobimo z naslednjo formulo:

$$V_b = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{tc}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad [=11,35 \text{ litra}]$$

Dobljeni volumen predstavlja notranji "netto" volumen zvočne omarice. Končni notranji volumen bo seveda večji, saj moramo prišteti še volumen, ki ga "zaseda" vgrajeni zvočnik in eventualne ojačitve znotraj omarice.

Vrednost **Qtc** v zgornji formuli predstavlja skupni Q sistema pri rezonančni frekvenci. Vrednost Qtc določimo sami. Iz zgornje formule lahko vidimo, da Qtc mora biti večji od Qts, kajti pri:

Qtc = Qts	-dobimo neskončni volumen (Vas / 0),
Qtc < Qts	-dobimo negativen volumen.

Če želimo volumen, pri katerem dobimo optimalni frekvenčni odziv, bomo za Qtc izbrali vrednost:

$$Q_{tc} = \sqrt{0,5} = 0,707... \quad \text{-ta vrednost je izbrana za zgornji rezultat.}$$

Volumen omarice torej določamo z vrednostjo Qtc: čim manjši je Qtc, tem večji bo volumen in obratno. Največji možni volumen je torej omejen z vrednostjo Qts -saj mora biti Qtc večji od Qts.

Navzdol volumen ni omejen, vendar pretirana "miniaturizacija" ni priporočljiva, saj negativno vpliva na frekvenčni odziv sistema.

Običajno se v praksi za Qtc izbere vrednost med 0,6 in 1,2.

5.2 Frekvenčni odziv zvočne omarice

Rezonančno frekvenco sistema (zvočnika vgrajenega v zvočno omarico) dobimo:

$$F_b = \frac{Q_{tc} \cdot F_s}{Q_{ts}} \quad [= 108,79 \text{ Hz}]$$

Frekvenco, pri kateri odziv pade za 3dB označujemo z F3 in jo izračunamo z:

$$F_3 = F_b \cdot \sqrt{\frac{k + \sqrt{k^2 + 4}}{2}} \quad [= 108,79 \text{ Hz}] \text{ -pri tem je: } k = \frac{1}{Q_{tc}^2} - 2$$

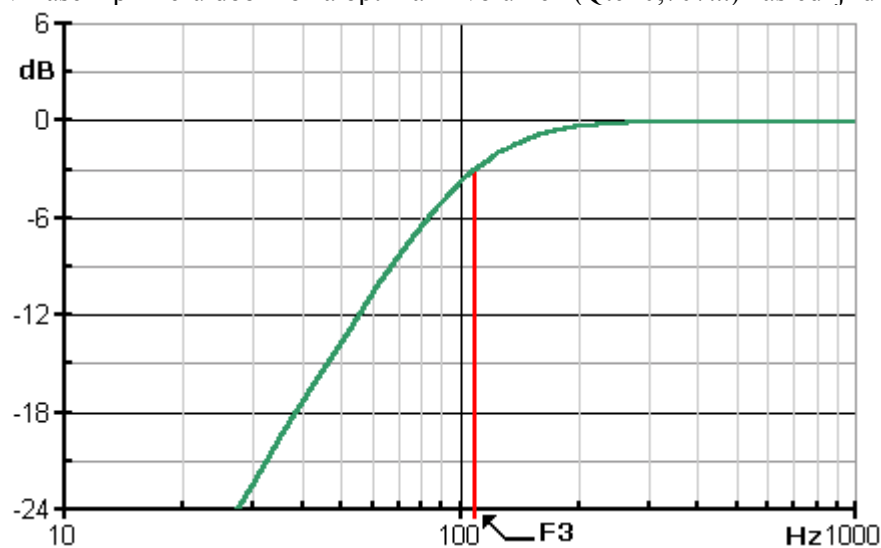
Odziv na poljubni frekvenci izračunamo z formulo:

$$\text{dBgain} = 10 \cdot \log \left(\frac{F_r^2}{(F_r - 1)^2 + \frac{F_r}{Q_{tc}^2}} \right) \quad \text{-pri tem je: } F_r = \left(\frac{F}{F_b} \right)^2$$

Dobljena **dBgain** vrednost je relativna glede na 0dB: če v zgornji formuli v spremenljivko **F** vstavimo vrednost **F3** (torej $F=108,79$), dobimo rezultat -3dB.

Največkrat bomo to formulo uporabljali za risanje diagrama frekvenčnega odziva (gain, frequency response).

V našem primeru dobimo za optimalni volumen ($Q_{tc}=0,707\dots$) naslednji diagram:



Iz diagrama je lepo razviden strmi padec odziva (ang. roll-off) od frekvence F3 navzdol, ki znaša pri zaprti zvočni omarici tipično 12dB/oktavo.

Dobljena krivulja predstavlja realni odziv zvočne omarice, vendar pri tem ni upoštevano dejstvo, da se upornost tuljave z frekvenco spreminja in da je na rezonančni frekvenci zvočnika upornost tuljave nekajkrat višja od deklarirane.

5.3 Sprememba volumna

Iz določenega vzroka se lahko pokaže potreba po spremembi volumna zvočne omarice. Poglejmo posledice v frekvenčnem odzivu.

Volumen omarice je direktno odvisen od vrednosti Q_{tc} in obratno:

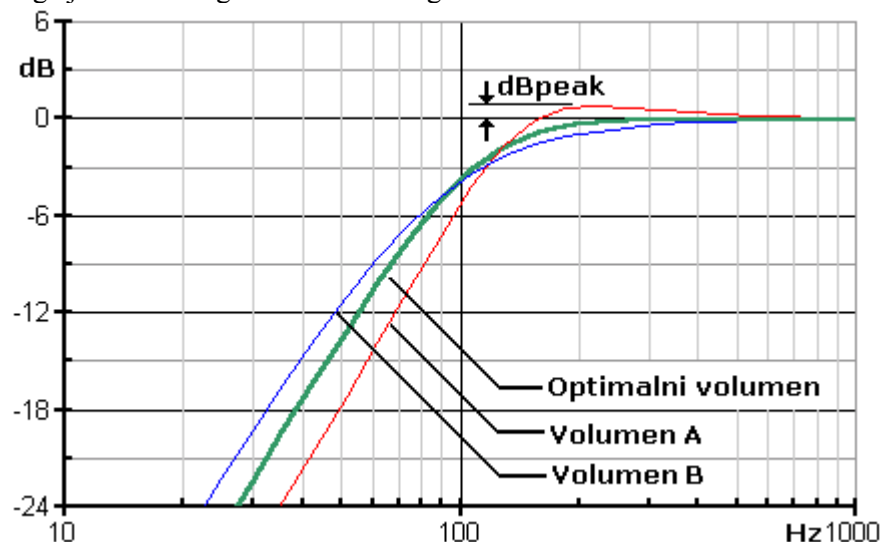
$$Q_{tc} = Q_{ts} \cdot \sqrt{\frac{V_{as}}{V_b} + 1}$$

Za primer izračunajmo ostale vrednosti za pol manjši volumen in za enkrat večji volumen od optimalnega:

	Volumen A	Optimalni volumen	Volumen B
V_b [litri]	5,68	11,35	22,71
Q_{tc}	0,92...	0,707...	0,57...
F_b [Hz]	141,66	108,79	87,85
F_3 [Hz]	116,01	108,79	113,42

-samo pri optimalnem volumnu dobimo najnižjo možno F_3 frekvenco.

Poglejmo si še diagrame frekvenčnega odziva za vse tri volumne:



Iz diagrama je razvidno kaj pridobimo oz. izgubimo pri spremembi volumna.

V primeru, ko je volumen manjši od optimalnega ($Q_{tc} > 0,707...$), se najprej pojavi "vrh" odziva -zatem začne krivulja z nižanjem frekvence strmo padati (volumen A).

Zanima nas odstopanje od linearne krivulje. Najprej izračunamo:

$$A_{max} = \frac{Q_{tc}^2}{\sqrt{Q_{tc}^2 - 0,25}} \quad \text{-pri } Q_{tc} < 0,707... \text{ vzamemo: } A_{max} = 1$$

Odstopanje izračunamo z:

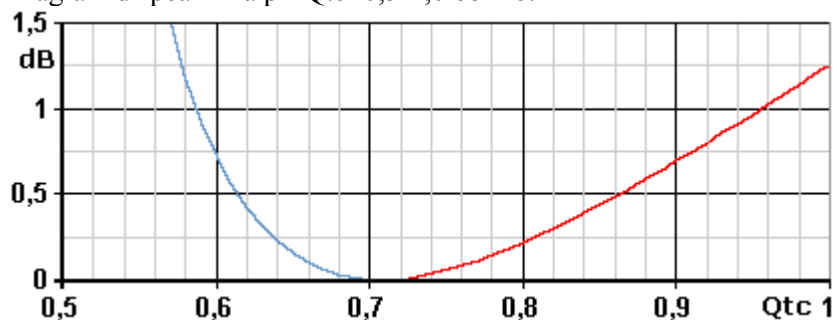
$$dB_{peak} = 20 \cdot \log(A_{max}) \quad \text{-pri } Q_{tc} = 0,92... \text{ dobimo } dB_{peak} = 0,8 \text{ dB}$$

-pri $Q_{tc} = 0,707...$ (ali manj) dobimo seveda 0 dB.

Vidimo, da je odstopanje odvisno samo od vrednosti Q_{tc} . Iz zgornjega obrazca je razvidno, da mora biti Q_{tc} večji od 0,5 kajti pri:

- $Q_{tc} < 0,5$ -dobimo negativno vrednost v korenu,
- $Q_{tc} = 0,5$ -vrednost korena bo 0.

Diagram dBpeak ima pri $Q_{tc}=0,5-1,0$ obliko:



-dBpeak je prisoten samo pri volumnu, ki je manjši od optimalnega, oz. $Q_{tc} > 0,707...$ (rdeča linija).

Volumen zvočne omarice lahko zmanjšamo tudi s tem, da vstavimo (ang. stuffing) primerno količino zvočno-absorpcijskega materiala. V tem primeru je nov volumen 10-20% manjši -odvisno od količine vstavljenega materiala, ki jo določimo eksperimentalno.

5.4 Linearni odziv na vhodno moč

Vemo, da se z podvojevanjem dovedene moči nivo glasnosti pri konstantni razdalji poveča za 3dB, npr: 1W=91,7dB, 2W=94,7dB, 4W=97,7dB,....

in če moč povečamo za 10-krat, se nivo glasnosti poveča za 10dB:

$$1W=91,7dB, 10W=101,7dB, 100W=111,7dB$$

Vzamimo naš zvočnik in povečujemo moč v korakih:

$$1W=91,7dB, \dots 4W=97,7dB, 40W=107,7dB$$

Sedaj moč povečajmo iz 40W na 80W. Ali je zvočnik sedaj še sposoben povečati nivo glasnosti za 3dB? Zanima nas, do katere dovedene moči bo zvočnik še ustrezno povečeval nivo glasnosti, kajti: zvočnik bo pri 80W igral glasneje kot pri 40W, vendar dobiček morda ne bo več 3dB!

Da bi izračunali odziv na vhodno moč, si najprej izračunajmo "pomožno" vrednost:

$$K1 = \frac{4 \cdot \pi^3 \cdot Ro \cdot Fb^4 \cdot \left(\frac{Vd \cdot 1,15}{1000} \right)^2}{c} \quad [=0,124965]$$

Vd -volumen izrinjenega zraka v litrih (p.3.2),

Ro -gostota zraka [= 1,18kg/m³],

c -hitrost zvoka v zraku [= 344m/s],

Fb -rezonančna frekvenca sistema v Hz (p.5.2).

Sedaj lahko izračunamo odziv na vhodno moč:

$$PElin = \frac{K1}{Amax^2 \cdot eff} \quad [=13,4W \text{ -pri optimalnem volumnu: } Q_{tc}=0,707...]$$

V našem primeru se bo glasnost linearno povečevala do 13,4W. To pomeni, da se bo nivo glasnosti povečal za 3dB, če dovedeno moč povečamo iz 6,7W na 13,4W; če moč povečamo iz npr. 10W na 20W, se bo nivo glasnosti povečal -vendar za manj kot 3dB.

Poglejmo odzive za pol manjši in enkrat večji volumen zvočne omarice:

	Volumen A	Optimalni volumen	Volumen B
Vb [litri]	5,68	11,35	22,71
Qtc	0,92	0,707...	0,57
Amax	1,0965548	1	1
PElin [W]	32,05	13,40	5,70

5.5 Z nihanjem omejen nivo glasnosti

Vemo, da je nihanje membrane z X_{max} omejeno. Zanima nas kakšen je največji nivo glasnosti, ki ga nihanje membrane pri določeni frekvenci dovoljuje (ang. displacement limited SPL).

$$SPL_d = K_2 + 40 \cdot \log\left(\frac{F}{F_b}\right) \quad \text{-pri tem je } K_2 = 112 + 10 \cdot \log(K_1)$$

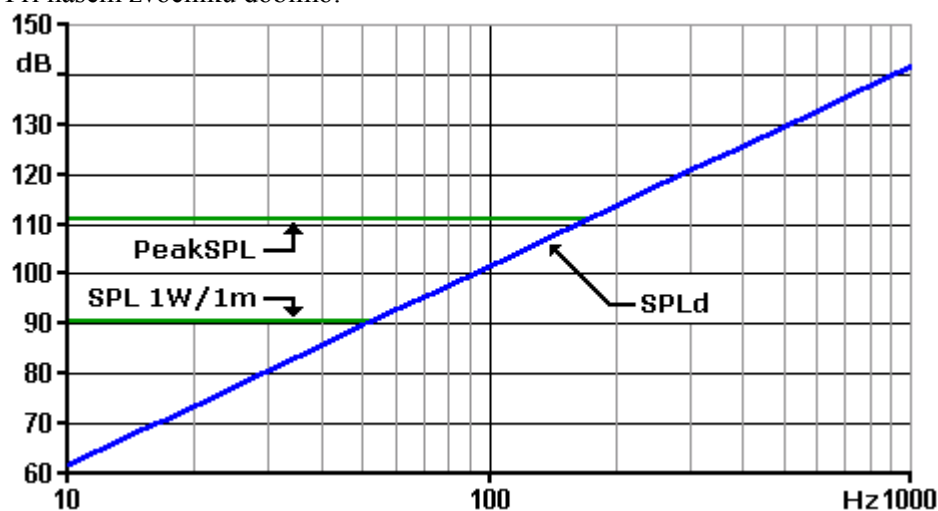
SPL_d -z nihanjem omejen nivo glasnosti [dB],

F_b -rezonančna frekvenca sistema (p.5.3),

K_1 -pomožna vrednost (p.5.5),

F -frekvenca, pri kateri nas zanima SPL_d .

Z nekaj računanja lahko ugotovimo, da SPL_d ni odvisen od izbrane Q_{tc} vrednosti, ampak samo od volumna zraka, ki ga membrana lahko izrine (V_d) -torej od premera membrane in od vrednosti X_{max} . Pri našem zvočniku dobimo:



Pri frekvenci npr. 50Hz je največji nivo glasnosti ~90dB -večje glasnosti pri tej frekvenci nihanje membrane ne omogoča.

Kaj pa če povečamo dovedeno moč? Vedeti moramo, da s tem prekoračimo X_{max} mejo kar ima za posledico popačenje tona -v skrajnem primeru lahko trajno poškodujemo membrano oz. vzmetenje membrane.

Zanima nas, kakšna je največja dovoljena moč na določeni frekvenci oz. kakšna moč na določeni frekvenci je potrebna, da dosežemo SPL_d :

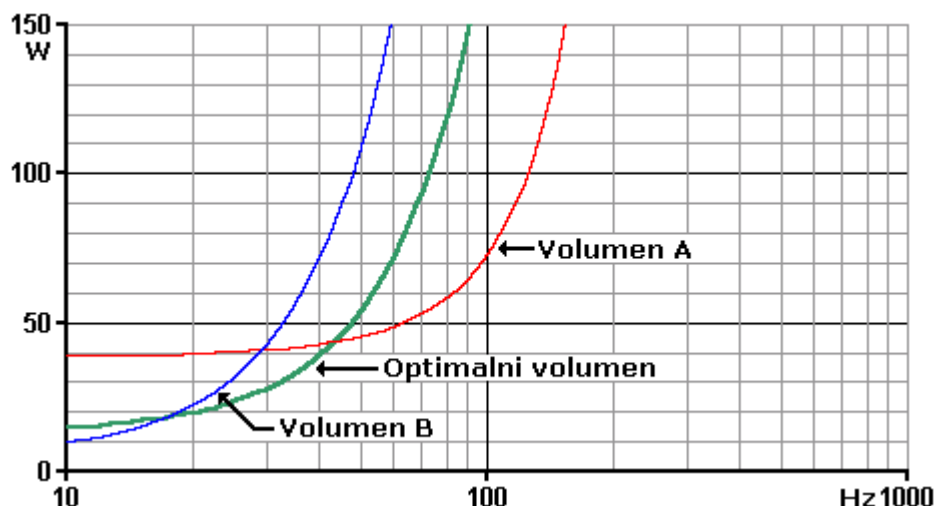
$$P_{max} = \frac{K_1 \cdot (Fr - 1)^2 + \frac{Fr}{Q_{tc}^2}}{eff} \quad \text{-pri tem je } Fr = \left(\frac{F}{F_b}\right)^2$$

P_{max} -moč, ki je na določeni frekvenci potrebna, da dosežemo SPL_d [W],

F -frekvenca, pri kateri nas zanima P_{max} .

Poglejmo diagrame za:

	Volumen A	Optimalni volumen	Volumen B
V_b [litri]	5,68	11,35	22,71
Q_{tc}	0,92	0,707...	0,57
PE_{lin} [W]	32,05	13,40	5,70



-pri optimalnem volumnu lahko vidimo, da je npr. pri ~60Hz največja dovoljena dovedena moč ~71W.

5.6 Termično omejen nivo glasnosti

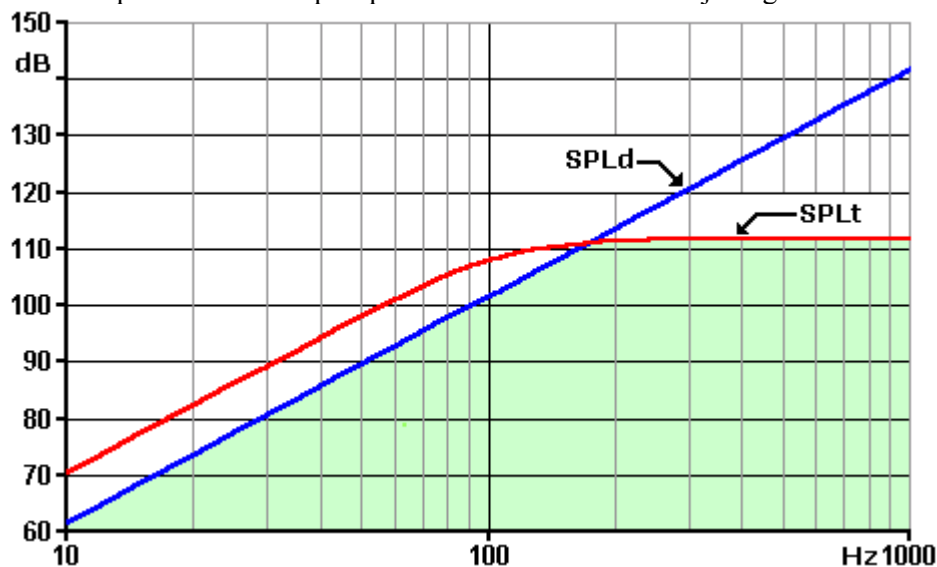
V prejšnjem poglavju smo videli, da membrana zvočnika z višanjem frekvence (v našem primeru nad ~100Hz) dovoljuje relativno velike dovedene moči.

Tukaj se srečamo z pojmom termično omejen nivo glasnosti (ang. thermally limited SPL). Ta glasnost je odvisna od frekvenčnega odziva sistema (p.5.2) in PeakSPL (p.3.1). Termično omejen nivo glasnosti na določeni frekvenci izračunamo z formulo:

$$\text{SPLt} = \text{dBgain} + \text{PeakSPL}$$

Termično omejen nivo glasnosti lahko prekoračimo samo tako, da na zvočnik dovedemo moč, ki je večja od Pmax (p.2.2) -s čemer lahko tuljavo zvočnika trajno poškodujemo.

V našem primeru dobimo pri optimalnem volumnu naslednji diagram:



Zeleno označeno področje predstavlja "dovoljene" nivoje glasnosti. Vidimo, da je nivo glasnosti pri nizkih frekvencah omejen z SPLd (torej z gibanjem membrane), medtem ko je pri višjih frekvencah omejen z SPLt.

6. Bas-reflex zvočna omarica

Tudi za ta tip zvočne omarice bomo za primer izbrali zvočnik Seas H582:

Vas:	25,97 litra
Pe:	100W
Fs:	60 Hz
Qts:	0,39
Qes:	0,58
Dm:	12,7cm
Xmax:	3 mm

Izračunajmo še nekatere vrednosti, ki jih bomo potrebovali (p.3.1):

eff	=0,0093234
SPL	=91,7 dB
PeakSPL	=111,7 dB
Vd	=0,03982 litra

Pri vseh naslednjih formulah v tem poglavju bo v oglatem oklepaju primer rezultata za ta zvočnik.

6.1 Volumen zvočne omarice

-dobimo z formulo:

$$V_b = 20 \cdot Q_{ts}^{3,3} \cdot V_{as} \quad [=23,23 \text{ litra}]$$

Tudi tukaj dobljeni volumen predstavlja notranji "netto" volumen zvočne omarice. Končni notranji volumen bo večji, saj moramo prišteti še volumen, ki ga "zaseda" vgrajeni zvočnik, volumen bas-reflex cevi in eventualne ojačitve znotraj omarice.

6.2 Frekvenčni odziv zvočne omarice

Rezonančno frekvenco sistema (t.j. zvočnika vgrajenega v zvočno omarico) dobimo:

$$F_b = F_s \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b} \right)^{0,31} \quad [=62,11 \text{ Hz}]$$

Frekvenco, pri kateri odziv pade za 3dB, dobimo:

$$F_3 = F_s \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b} \right)^{0,44} \quad [=63,01 \text{ Hz}]$$

Računanje odziva na poljubni frekvenci je bolj zapleteno, zato bomo formulo razdelili na več manjših enot:

$$F_{n2} = \left(\frac{F}{F_s} \right)^2 \quad F_{n4} = F_{n2}^2$$
$$A = \left(\frac{F_b}{F_s} \right)^2 \quad B = \frac{A}{Q_{ts}} + \frac{F_b}{F_s \cdot Q_x}$$

$$C = \frac{V_{as}}{V_b} + \frac{F_b}{F_s \cdot Q_{ts} \cdot Q_x} + A + 1 \quad D = \frac{1}{Q_{ts}} + \frac{F_b}{F_s \cdot Q_x}$$

-vrednost Q_x je konstanta, ki ji praviloma določimo vrednost: $Q_x = 7$.

Sedaj lahko izračunamo frekvenčni odziv:

$$dB_{gain} = 10 \cdot \log \left(\frac{F_n^4}{(A + F_n^4 - C \cdot F_n^2)^2 + F_n^2 \cdot (D \cdot F_n^2 - B)^2} \right)$$

Dobljena **dBgain** vrednost je relativna glede na 0dB: če v zgornji formuli v spremenljivko **F** vstavimo vrednost **F3** (torej $F=63,01$), dobimo rezultat -3dB.

Največkrat bomo to formulo uporabljali za risanje diagrama frekvenčnega odziva (gain, frequency response).

V našem primeru dobimo naslednji diagram:



Iz diagrama je razviden strmi padec odziva (ang. roll-off) od frekvence F_3 navzdol, ki znaša pri bas-reflex zvočni omarici tipično 18dB/oktavo.

Dobljena krivulja predstavlja realni odziv zvočne omarice, vendar pri tem ni upoštevano dejstvo, da se upornost tuljave z frekvenco spreminja in da je na rezonančni frekvenci zvočnika upornost tuljave bistveno višja od nazivne upornosti.

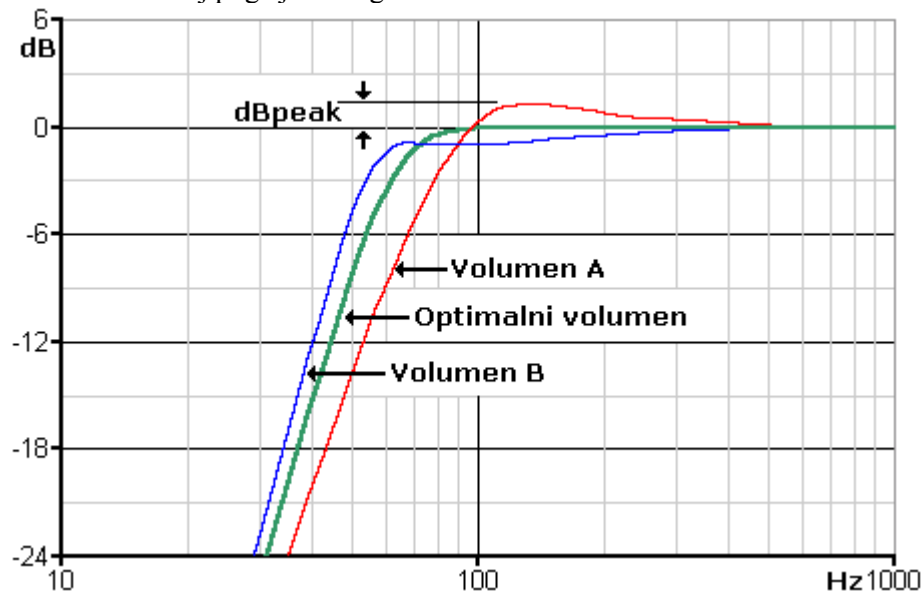
6.3 Sprememba volumna

Pri bas-reflex omaricah moramo biti pri eventualnih spremembah volumna izredno previdni, saj so posledice bistveno večje kot v primeru zaprte zvočne omarice.

Poglejmo dva primera: optimalni volumen zmanjšan za 10 litrov in optimalni volumen povečan za 10 litrov. Najprej izračunajmo nove **Fb** in **F3** vrednosti:

	Volumen A	Optimalni volumen	Volumen B
Vb [litri]	13,23	23,23	33,23
Fb [Hz]	73,95	62,11	55,58
F3 [Hz]	80,73	63,01	53,83

Na prvi pogled je povečanje volumna še posebej zanimivo, saj s tem bistveno znižamo **Fb** in **F3** frekvenco. Sedaj pogledjmo diagram:



Največje linearno odstopanje izračunamo z formulo:

$$dB_{peak} = 20 \cdot \log \left(\frac{Q_{ts}}{0,4} \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b} \right)^{0,3} \right)$$

Pri zgornjih volumnih dobimo:

Volumen A: +1,54dB
 Optimalni: 0,07dB -praktično ni odstopanja
 Volumen B: -0,86dB

6.4 Linearni odziv na vhodno moč

Največjo linearno moč dobimo (obrazložitev glej p.5.4):

$$P_{Elin} = \frac{3 \cdot F_3^4 \cdot \left(\frac{V_d}{1000} \right)^2}{eff} \quad [= 8,0W]$$

Pri zgornjih spremenjenih volumnih dobimo:

Volumen A: 21,6W
 Volumen B: 4,3W

6.5 Z nihanjem omejen nivo glasnosti

Tudi tukaj bomo računanje razdelili na manjše obrazce (obrazložitev glej p.5.5). Spremenljivke **A**, **B**, **C**, **D**, **Fn2** in **Fn4** so definirane v poglavju Frekvenčni odziv; potrebujemo še:

$$E = A \cdot \left(\frac{97}{49} \right) \cong A \cdot 1,9796$$

$$K1 = \frac{4 \cdot \pi^3 \cdot R_o \cdot F_b^4 \cdot \left(\frac{V_d \cdot 1,15}{1000} \right)^2}{c} \quad K2 = 112 + 10 \cdot \log(K1)$$

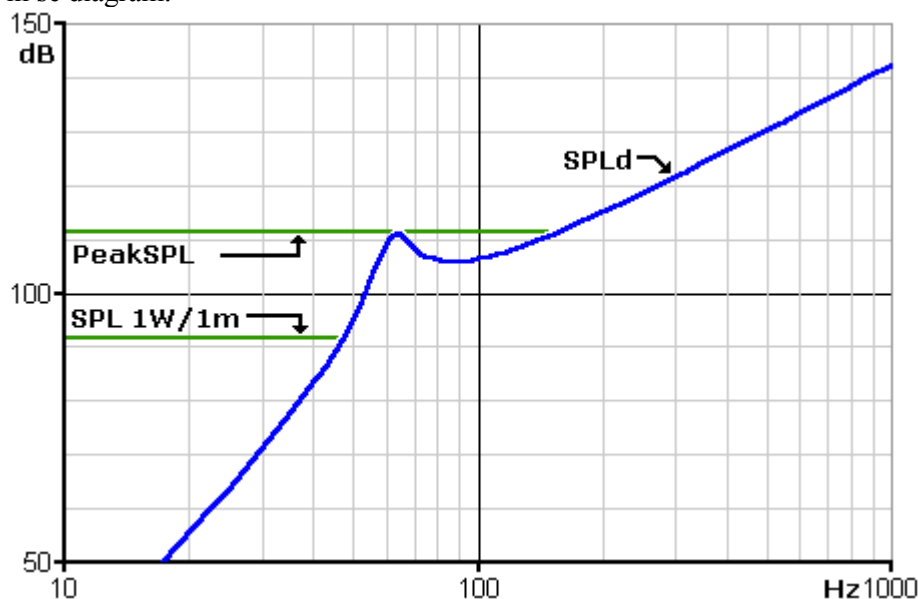
R_o -gostota zraka [=1,18kg/m³]

c -hitrost zvoka v zraku [=344m/s]

Sedaj lahko izračunamo:

$$SPLd = K2 + 10 \cdot \log \left(\frac{Fn4^2}{A^2 + Fn4 - Fn2 \cdot E} \right)$$

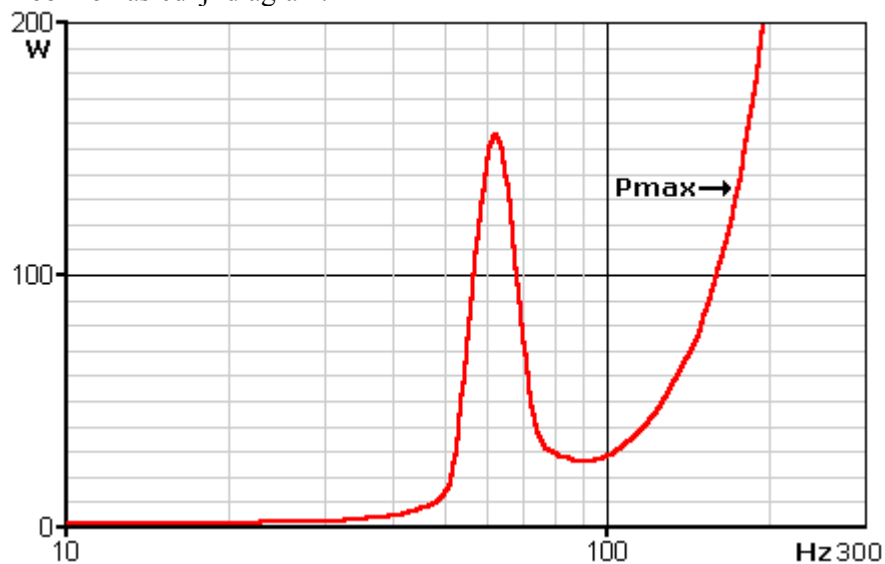
in še diagram:



Moč, ki je pri določeni frekvenci potrebna, da dosežemo SPLd izračunamo z formulo:

$$P_{max} = \frac{\left(\frac{K1}{eff} \right) \cdot \left((A + Fn4 - Fn2 \cdot C)^2 + Fn2 \cdot (Fn2 \cdot D - B)^2 \right)}{A^2 + Fn4 - Fn2 \cdot E}$$

Dobimo naslednji diagram:

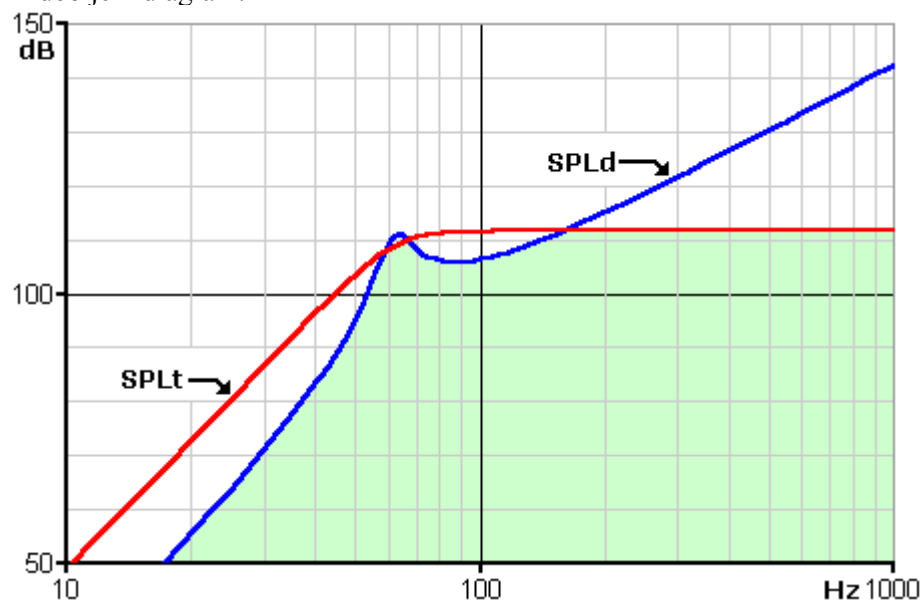


6.6 Termično omejen nivo glasnosti

-izračunamo enako kot pri zaprti zvočni omarici (glej p.5.5):

$$\text{SPLt} = \text{dBgain} + \text{PeakSPL}$$

in dobljeni diagram:



7. Bas-reflex odprtina

7.1 Uvod

Pri izračunih bas-reflex zvočne omarice ni potrebno nikjer navajati podatkov v zvezi z bas-reflex odprtino. Razlog je preprost: predvideno je, da bomo vgradili ustrezno odprtino! Enako velja pri zvočni omarici pasovnega tipa (v naslednjem poglavju).

Presek bas-reflex odprtine (ang. port ali vent) je lahko poljubne oblike, vendar je odprtina v obliki cevi najbolj razširjena. Pri tem je več ali manj vseeno na kateri stranici zvočne omarice bo cev vgrajena. Zaželeno je, da je cev oddaljena od najbližje stranice vsaj za dolžino premera cevi.

Bas-reflex cev deluje kot neke vrste akustični ventil (od tod ang. vent), ki se "odpre" na točno določeni frekvenci. Zato je cev praviloma preračunana tako, da deluje samo na rezonančni frekvenci sistema in s tem "pomaga" membrani zvočnika. Od frekvence **F3** navzdol bas-reflex odprtina "izgubi" svojo lastnost in akustično predstavlja čisto navadno odprtino. Zato so lahko zelo nizke frekvence (pod **Fb**) pri večjih močeh, usodne za membrano (ki v tem primeru prosto niha).

7.2 Minimalni premer

V kolikor je premer cevi premajhen, se lahko pri večji glasnosti pojavi slišno "pihanje", česar seveda ne želimo. Pihanje je posledica vrtnčenja zračnih tokov na robovih cevi, ki se pojavi pri preveliki hitrosti zraka skozi cev. Iz tega razloga je zaželeno, da ima cev čim večji premer, saj s tem hitrost zraka skozi cev zmanjšamo. Problem je (kot bomo videli kasneje), da z večanjem premera raste tudi dolžina cevi.

Zato najprej izračunamo minimalni potrebni premer cevi:

$$D_{\min} = \frac{2030 \cdot \left(\frac{V_d^2}{F_b} \right)^{0,25}}{\sqrt{1000 \cdot N_p}} = \frac{2030 \cdot \left(\frac{(V_d/1000)^2}{F_b} \right)^{0,25}}{\sqrt{N_p}}$$

$D_{\min}$ -notranji premer cevi v cm,

V_d -volumen izrinjenega zraka v litrih (p.3.2),

F_b -rezonančna frekvenca sistema,

N_p -število bas-reflex cevi.

Izračunajmo $D_{\min}$ za bas-reflex sistem z eno cevjo in zvočnik Seas H582:

$$V_d = \frac{S_d \cdot X_{\max}}{10000} = \frac{128,48 \cdot 3}{10000} = 0,03854 \text{ litra}$$

$$F_b = F_s \cdot \left(\frac{V_{as}}{V_b} \right)^{0,31} = 60 \cdot \left(\frac{25,97}{23,23} \right)^{0,31} = 62,11 \text{ Hz}$$

$$D_{\min} = \frac{2030 \cdot \left(\frac{0,03854^2}{62,11} \right)^{0,25}}{\sqrt{1000 \cdot 1}} = \frac{2030 \cdot 0,06993}{31,6228} = 4,5 \text{ cm}$$

Če bomo robove cevi nekoliko obdelali, lahko uporabimo tudi cev nekoliko manjšega notranjega premera. Obrazec temelji na praktičnih testih in nam lahko služi kot neko izhodišče.

V kolikor bi želeli v isto omarico vgraditi dve enaki cevi, dobimo $D_{\min}=3,2\text{cm}$.

7.3 Dolžina cevi

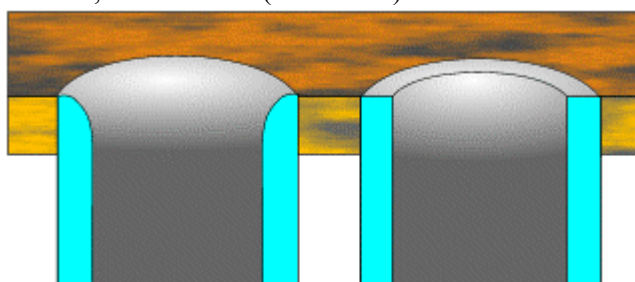
Dolžino (posamezne) bas-reflex cevi izračunamo z formulo:

$$L_p = \frac{23562,5 \cdot D_p^2 \cdot N_p}{F_b^2 \cdot V_b} - k \cdot D_p$$

- L_p -dolžina (posamezne) cevi v cm,
 D_p -notranji premer (posamezne) cevi v cm (oz. **Dmin**),
 N_p -število cevi,
 F_b -rezonančna frekvenca sistema (=tuning frequency) v Hz,
 V_b -netto volumen zvočne omarice v litrih,
 k -zaključek cevi.

Vrednost **k** je odvisna od tega, kako je cev zaključena:

- 0,307 -ravno odrezana cev,
0,425 -obdelan (zaokrožen) rob cevi.



Ker ima cev dva konca, se vrednosti ustrezno seštevajo:

- $k=0,614$ -oba konca cevi sta neobdelana (ravna),
 $k=0,732$ -en konec cevi (običajno zunanji) je obdelan,
 $k=0,850$ -oba konca cevi sta obdelana.

Pri zvočniku Seas H582 z optimalno zvočno omarico, imamo:

- $V_b = 23,23$ litra,
 $F_b = 62,11$ Hz,
 $D_p = 4,5$ cm (= Dmin),
 $k = 0,732$ (ena stran cevi obdelana),
 $N_p = 1$

$$L_p = \frac{23562,5 \cdot 4,5^2 \cdot 1}{62,11^2 \cdot 23,23} - 0,732 \cdot 4,5 = 5,34 - 3,29 = 2\text{cm}$$

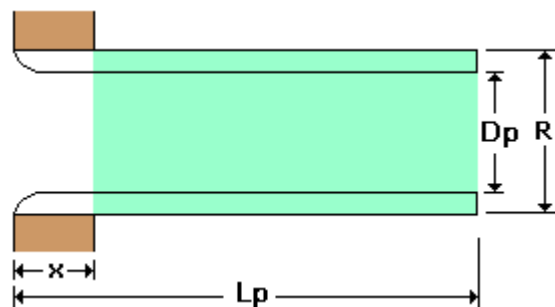
Če je debelina stranice zvočne omarice 2cm, potem je v tem primeru dovolj, da v stranico enostavno naredimo odprtino premera 4,5cm (cevi ne potrebujemo).

V kolikor bi želeli v isto omarico vgraditi dve enaki cevi premera 4,5cm dobimo $L_p=7,35\text{cm}$. V prejšnjem poglavju smo izračunali, da je pri dveh ceveh $D_{\min}=3,2\text{cm}$ -torej lahko vgradimo dve takšni cevi; dolžina bi bila $L_p=3\text{cm}$.

Videli smo, da lahko izberemo praktično poljuben premer cevi (vendar ne bistveno manjši od $D_{\min}$), medtem ko pri dolžini cevi ne sme biti odstopanja od izračunane vrednosti!

7.4 Volumen cevi

Končni (notranji) volumen zvočne omarice dobimo tako, da k netto volumnu (V_b) prištejemo tudi volumne vseh elementov, ki se v zvočni omarici nahajajo; torej tudi volumen, ki ga zaseda bas-reflex cev:



Pri tem predstavlja samo zeleno označeno področje volumen, ki ga želimo izračunati:

$$V_p = \frac{\pi \cdot R^2 \cdot (L_p - x)}{4000}$$

- V_p -volumen, ki ga zaseda cev v omarici [litri],
 R -skupni premer cevi [cm],
 L_p -celotna dolžina cevi [cm],
 x -debelina stene zvočne omarice [cm].

Recimo, da je debelina stene zvočne omarice 1,8cm in debelina stene cevi 0,2cm. Pri cevi iz prejšnjega poglavja dobimo:

$$V_p = \frac{\pi \cdot 4,5^2 \cdot (2 - 0,2)}{4000} = \sim 0,03 \text{ litra}$$

Notranji volumen omarice bo torej: $V_b + V_p = 23,23 + 0,03 = 23,26$ litra. K temu moramo seveda prišteti še volumen, ki ga zaseda zvočnik.

8. Pasovni zvočni sistem

Pasovni (ang. bandpass) zvočni sistem je namenjen za reprodukcijo zelo nizkih frekvenc. Iz tega razloga praviloma potrebujemo zvočnik z nekoliko večjim premerom oz. z čim nižjo rezonančno frekvenco. Poglejmo podatke za nekatere zvočnike:

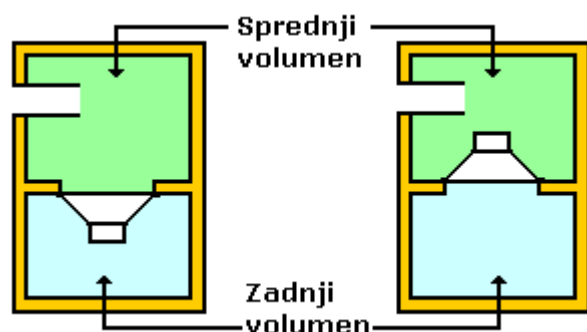
	Dynaudio 24W75	Peerless PT210M	ScanSpeak 18W8535	Seas H646
Splošni podatki				
Moč	120 W	90 W	70 W	150 W
Upornost	8 ohm	8 ohm	8 ohm	8 ohm
Frekv. območje	35-2000 Hz	35-2000 Hz	35-3000 Hz	30-1000 Hz
Občutljivost	87 dB	90 dB	86 dB	94 dB
Zunanji premer	23,8 cm	21,0 cm	17,8 cm	26,1 cm
Košara	železna	železna	Al litina	Al litina
Material membrane	PHA	PP	papir	papir
Vpetje membrane	pena	pena	guma	guma
T/S podatki				
Fs	33 Hz	32 Hz	34 Hz	29 Hz
Vas	73,12 l	81,12 l	32,29 l	144,41 l
Qts	0,86	0,38	0,57	0,29
Qes	1,11	0,45	0,67	0,33
Re	5,22 ohm	6,10 ohm	6,10 ohm	6,00 ohm
Le	0,23 mH	0,28 mH	0,17 mH	0,27 mH
Eff	0,22%	0,55%	0,19%	0,60%
Xmax	2,75 mm	4 mm	5 mm	4 mm
Sd	226,71 cm ²	226,71 cm ²	153,72 cm ²	346,03 cm ²
Izračunan Dm	17 cm	17 cm	14 cm	21 cm
Izračunan SPL 1W/1m	85,6 dB	89,5 dB	84,6 dB	92,1 dB

Izvor podatkov: www.hifisound.de

Za naš primer bomo uporabili zvočnik **Seas H646**.

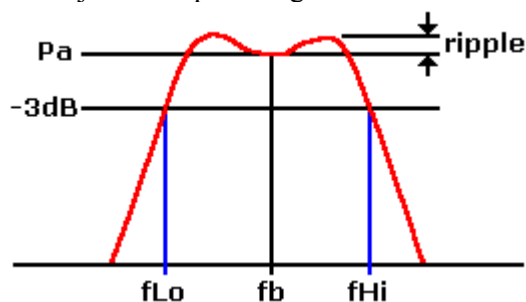
8.1 Volumen zvočne omarice

Pri pasovnem sistemu imamo opravka z dvema volumnoma: sprednji in zadnji. Sprednji volumen je prostor v katerem imamo vgrajeno bas-reflex cev; zadnji volumen je zaprt:



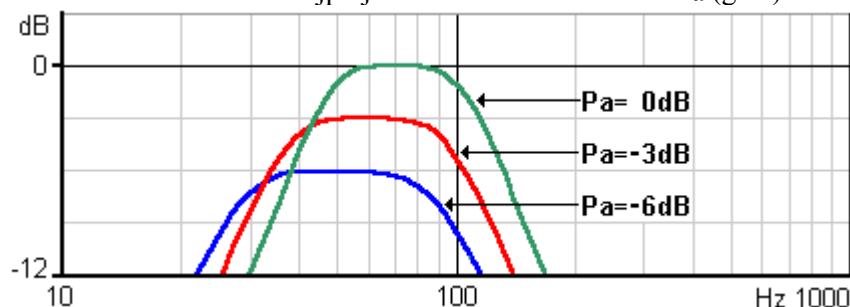
Nekoliko boljši rezultat lahko pričakujemo, če vgradimo zvočnik tako, da se magnet nahaja v sprednjem volumnu (desna slika). Seveda pri tem pazimo, da se magnet skozi bas-reflex cev ne vidi.

Krivulja odziva pasovnega sistema ima naslednje elemente:



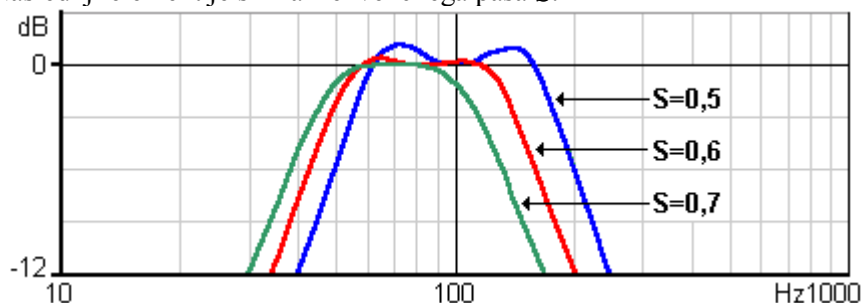
- fLo -spodnja frekvenca pri kateri odziv pade za 3dB,
- fHi -zgornja frekvenca pri kateri odziv pade za 3dB,
- Fb -rezonančna frekvenca sistema,

Pri izračunu volumna se najprej odločimo za nivo odziva **Pa** (gain):



Pri tem se moramo odločiti za kompromis: da bi dosegli čim nižjo **fLo** frekvenco, moramo **Pa** ustrezno zmanjšati. Praviloma se na začetku odločimo za **Pa = 0** in vrednost kasneje po potrebi zmanjšamo.

Naslednji element je širina frekvenčnega pasa **S**:



Glede na izbrano širino, dobimo naslednje vrednosti:

S = 0,7:	b = 0,7206	ripple = 0dB
S = 0,6:	b = 0,9560	ripple = 0,35dB
S = 0,5:	b = 1,2712	ripple = 1,25dB

Praviloma za začetek izberemo vrednost S = 0,7. Pripadajočo vrednost b = 0,7206 bomo potrebovali kasneje.

Najprej izračunamo vrednost Qbp (t.j. Qtc zadnjega volumna):

$$Q_{bp} = \frac{1}{2 \cdot S \cdot 10^{(-Pa/40)}}$$

Oba netto volumna izračunamo z:

$$V_f = V_{as} \cdot (2 \cdot S \cdot Q_{ts})^2 \quad \text{-sprednji volumen v litrih}$$

$$V_r = \frac{V_{as}}{\left(\frac{Q_{bp}}{Q_{ts}}\right)^2 - 1} \quad \text{-zadnji volumen v litrih}$$

Za zvočnik Seas H646 ($Q_{ts} = 0,29$ in $V_{as} = 144,41$ litrov) izberimo optimalne vrednosti:

$$P_a = 0 \text{ in } S = 0,7$$

Dobimo:

$$Q_{bp} = 0,71428$$

in

$$V_f = 23,80 \text{ litra}$$

$$V_r = 28,50 \text{ litra}$$

Ugotovimo lahko, da z spreminjanjem vrednosti P_a spreminjamo samo zadnji volumen. Za primer vzamimo $P_a = -3\text{dB}$. Dobimo:

$$Q_{bp} = 0,60100 \text{ in } V_r = 43,83 \text{ litra}$$

Z spremembo vrednosti S pa vplivamo na oba volumna. Pri $P_a = 0$ in $S = 0,6$ dobimo:

$$Q_{bp} = 0,83333$$

in

$$V_f = 17,49 \text{ litra}$$

$$V_r = 19,90 \text{ litra}$$

8.2 Frekvenčni odziv zvočne omarice

Rezonančno frekvenco sistema (t.j. sprednjega volumna) izračunamo z formulo:

$$F_b = \frac{Q_{bp} \cdot F_s}{Q_{ts}}$$

V našem primeru ($F_s = 29\text{Hz}$) pri $P_a = 0\text{dB}$ in $S = 0,7$ dobimo $F_b = 71,43\text{Hz}$.

Vidimo, da lahko resonančno frekvenco sistema znižamo samo z spremembo Q_{bp} ; torej z znižanjem P_a vrednosti.

Kot je razvidno iz diagramov (p.8.1) imamo pri pasovnem sistemu dve frekvenci pri kateri odziv pade za 3dB (cutoff frequency):

fLo -spodnja -3dB frekvenca

fHi -zgornja -3dB frekvenca

$$f_{Lo} = \frac{F_s}{Q_{ts}} \cdot \frac{\sqrt{b^2 + 4 \cdot Q_{bp}^2} - b}{2}$$

$$f_{Hi} = f_{Lo} + \frac{b \cdot F_s}{Q_{ts}}$$

V našem primeru ($S = 0,7$ in $b = 0,7206$) dobimo:

$$f_{Lo} = 43,97 \text{ Hz in } f_{Hi} = 116,03 \text{ Hz}$$

Pri tem ne smemo pozabiti, da sta dobljeni **fLo** in **fHi** vrednosti relativni glede na **Pa**. Torej če smo že v začetku za **Pa** izbrali vrednost -3dB, potem **fLo** in **fHi** predstavljata frekvenco pri kateri je nivo 3dB nižji od **Pa**: torej -6dB.

Risanje diagrama frekvenčnega odziva razdelimo na več manjših formul:

$$A = \left(\frac{1}{F_b} \right)^2 \cdot F^4 \quad B = \frac{\left(\frac{1}{Q_x} + \frac{F_s}{F_b \cdot Q_{ts}} \right) \cdot F^3}{F_b}$$

$$C = \left(\left(1 + \frac{V_{as}}{V_r} + \frac{V_{as}}{V_f} \right) \cdot \left(\frac{F_s}{F_b} \right)^2 + \frac{F_s}{Q_x \cdot F_b \cdot Q_{ts}} + 1 \right) \cdot F^2$$

$$D = \left(\left(1 + \frac{V_{as}}{V_r} \right) \cdot \frac{F_s^2}{F_b \cdot Q_x} + \frac{F_s}{Q_{ts}} \right) \cdot F$$

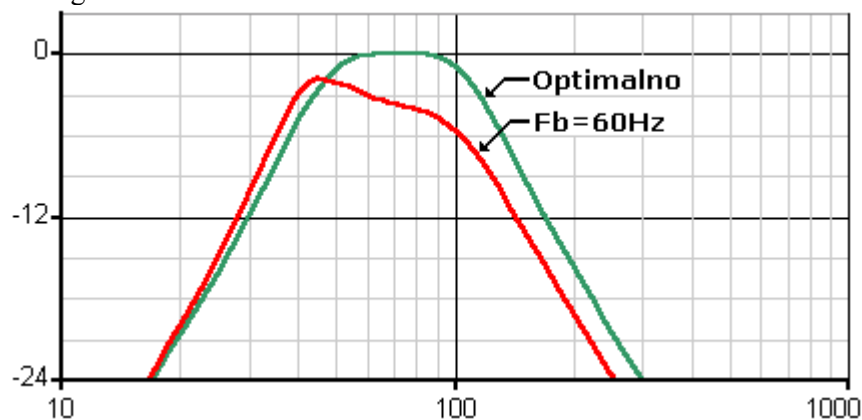
$$E = \left(\frac{V_{as}}{V_r} + 1 \right) \cdot F_s^2$$

In končno odziv na poljubni frekvenci (v dB):

$$dB_{gain} = 20 \cdot \log \left(\frac{F^2}{\sqrt{(A - C + E)^2 + (D - B)^2}} \right)$$

- F** -frekvenca pri kateri nas zanima odziv,
- Fb** -rezonančna frekvenca sistema (tuning frequency),
- Vr** -zadnji netto volumen (v litrih),
- Vf** -sprednji netto volumen (v litrih),
- Qx** -konstanta (praviloma zelo velika vrednost: 10000 ali več),
- Fs, Qts in Vas** so T/S parametri vgrajenega zvočnika.

Seveda je jasno, da moramo v našem primeru pri **fLo** in **fHi** vrednosti dobiti rezultat -3dB. Poglejmo še diagram:



Optimalna krivulja je rezultat pri **Pa=0dB** in **S=0,7** kjer imamo rezonančno frekvenco **Fb=71,43Hz**. V diagramu imamo prikazano tudi krivuljo odziva, če vgradimo bas-reflex cev za rezonančno frekvenco **Fb=60Hz**.

9. Elektrotehnika

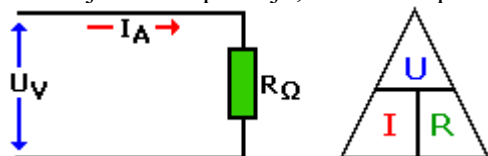
9.1 Upor

V električnih shemah je upor označen z črko R. Enota za upornost je ohm in jo označujemo z grško črko Ω . Večja enota je $k\Omega$, t.j. 1000Ω . Pri uporih večje moči je vrednost upora (torej upornost) običajno izpisana, medtem ko je pri uporih manjše moči upornost označena z barvami:

Barva	1.	2.	3.	4.	5.
Črna	0	0	0	x1	-
Rjava	1	1	1	x10	1%
Rdeča	2	2	2	x100	2%
Oranžna	3	3	3	x1000	-
Rumena	4	4	4	x10000	-
Zelena	5	5	5	x100000	0,5%
Modra	6	6	6	x1000000	-
Vijoličasta	7	7	7	x10000000	0,1%
Siva	8	8	8	-	-
Bela	9	9	9	-	-
Zlata	-	-	-	/10	5%
Srebrna	-	-	-	/100	10%

Če je upor označen samo z štirimi barvami, potem 3. kolone ne upoštevamo.

Razmerje med napetostjo, tokom in upornostjo lahko prikažemo z naslednjo shemo:



Primer: $U = 20V$, $R = 100\Omega$

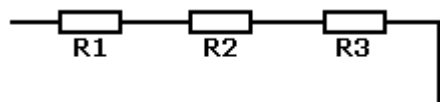
$$I = \frac{U}{R} = \frac{20V}{100\Omega} = 0,2A$$

Če torej na upor 100Ω priključimo napetost $20V$, bo stekel tok $200mA$. Pri tem se bo upor segreval, zato moramo vedeti kakšno najmanjšo moč mora upor imeti:

$$P = I \cdot U \quad P = I^2 \cdot R \quad P = \frac{U^2}{R}$$

V našem primeru dobimo: $P = I \cdot U = 4W$

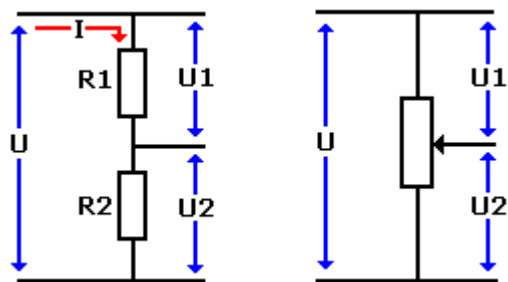
Zaporedna oz. serijska vezava



Skupno upornost dobimo s seštevanjem posameznih upornosti:

$$R_x = R1 + R2 + R3$$

Serijsko vezavo (običajno dveh uporov) uporabljamo za delitev napetosti:

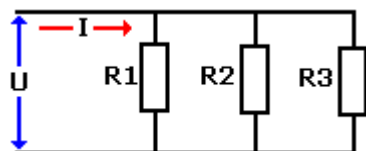


$$U = U_1 + U_2 \quad I = \frac{U}{R_1 + R_2}$$

Na desni strani je za enakovredno vezavo uporabljen potenciometer. Napetosti na posameznih uporih dobimo:

$$U_1 = \frac{U \cdot R_1}{R_1 + R_2} = I \cdot R_1 \quad U_2 = \frac{U \cdot R_2}{R_1 + R_2} = I \cdot R_2$$

Vzporedna oz. paralelna vezava



$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_3} \quad \Rightarrow \quad R_x = \frac{R_1 \cdot R_2 \cdot R_3}{R_1 \cdot R_2 + R_1 \cdot R_3 + R_2 \cdot R_3}$$

Običajno v praksi vežemo vzporedno samo dva upora:

$$\frac{1}{R_x} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \quad \Rightarrow \quad R_x = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2}$$

Skupna upornost bo torej vedno nižja od najnižje upornosti posameznega upora. Vzporedna vezava dveh enakih uporov je enaka polovici upornosti posameznega upora, pri tem pa se skupna moč podvoji; npr. $R_1, R_2 = 56\Omega$ in moč posameznega upora je 5W:

$$R_x = 56\Omega / 2 = 28\Omega$$

$$P_x = 5W \times 2 = 10W$$

Pri $U = 14V$ dobimo:

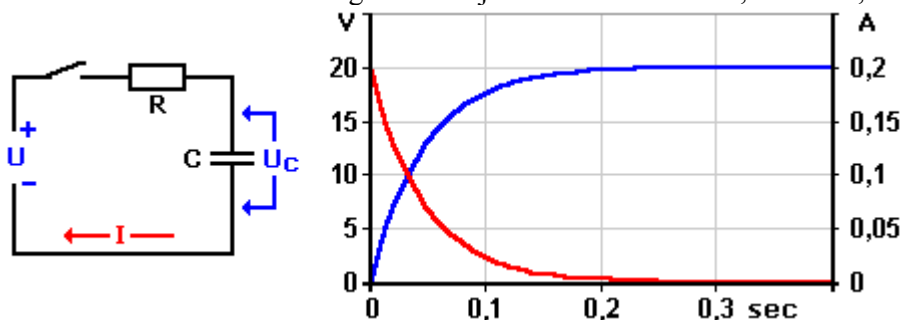
$$I = U / R = 14V / 28\Omega = 0,5A \quad \text{-skupni tok}$$

$$P = I \times U = 0,5A \times 14V = 7W \quad \text{-potrebna moč}$$

9.2 Kondenzator

Osnovna enota kondenzatorja -kapaciteta- je Farad, vendar v praksi uporabljamo manjšo enoto: μF ($1\text{F}=1000000\mu\text{F}$). Poleg tega ima kondenzator označeno tudi delovno napetost, ki je ne smemo prekoračiti!

Sestavimo enosmerni tokokrog z naslednjimi elementi: $U=20\text{V}$, $R=100\Omega$, $C=470\mu\text{F}$



V trenutku vklopa napetosti ($t=0\text{sec}$) se začne kondenzator polniti in tok je omejen samo z uporom R :

$$I_0 = U / R = 20\text{V} / 100\Omega = 0,2\text{A}$$

Čas polnjenja (praznjenja) skupaj z R in C predstavlja vrednost:

$$k = \frac{-t \cdot 1000000}{R \cdot C} \quad t = \text{sec}, R = \Omega, C = \mu\text{F}$$

S tem ko se kondenzator polni, tok skozi njega s časom pada:

$$I = I_0 \cdot e^k$$

I -tok skozi tokokrog po poteku časa t ,

I_0 -začetni tok (pri $t=0$).

Sorazmerno z padcem toka, napetost na kondenzatorju raste:

$$U_c = U \cdot (1 - e^k)$$

U_c -napetost na kondenzatorju po poteku časa t ,

U -dovedena napetost.

Povečanje napetosti na kondenzatorju (oz. zmanjšanje toka skozi kondenzator) je dejansko povečanje njegove upornosti.

Praznjenje kondenzatorja poteka po formuli:

$$U_c = U_0 \cdot e^k$$

U_c -napetost na kondenzatorju po času t ,

U_0 -začetna napetost na kondenzatorju (pri $t=0$).

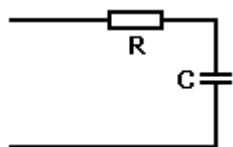
Iz formule vidimo, da se napetost praznjenja spreminja po enaki krivulji kot tok polnjenja.

Kadar se kondenzator nahaja v izmeničnem tokokrogu, se proces polnjenje-praznjenje veskozi ponavlja. Pri tem je upornost kondenzatorja odvisna od frekvence in sicer: čim višja je frekvenca, tem nižja je upornost. Kapacitivno upornost kondenzatorja pri poljubni frekvenci izračunamo z formulo:

$$R_c = \frac{1000000}{2 \cdot \pi \cdot f \cdot C} \quad R_c = \Omega, C = \mu\text{F}, f = \text{Hz}$$

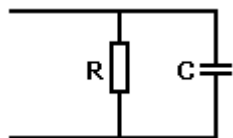
Jasno je, da bo imel kondenzator pri enosmerni napetosti ($f=0$) neskončno upornost t.j. skozi njega ne bo tekkel tok.

Serijska vezava RC



$$Z = \sqrt{R^2 + R_C^2} \quad I = \frac{U}{Z} \quad U = \sqrt{U_R^2 + U_C^2} \quad \varphi_{UI} = \arccos\left(\frac{R}{Z}\right)$$

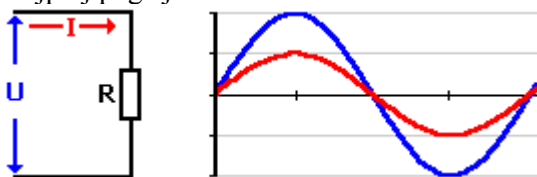
Paralelna vezava RC



$$Z = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + (1/R_C)^2}} \quad I = \frac{U}{Z} = \sqrt{I_R^2 + I_C^2} \quad \varphi_{UI} = \arccos\left(\frac{Z}{R}\right)$$

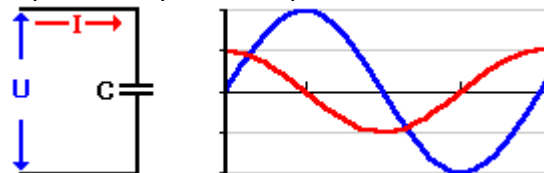
Fazni pomik

Najprej pogledimo v kakšnem odnosu sta tok in napetost v primeru ohmske upornosti:



-vidimo, da se tok spreminja sorazmerno z napetostjo, t.j. tok je v fazi z napetostjo.

V primeru kapacitivne upornosti imamo:



-napetost zaostaja za tokom (v idealnem primeru za 90°).

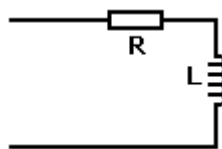
9.3 Tuljava

Osnovna enota tuljave -impedanca- je Henry, vendar v praksi uporabljamo manjšo enoto: mH (1H=1000mH). Upornost tuljave na določeni frekvenci imenujemo induktivna upornost. Pri tem se upornost tuljave z rastjo frekvence povečuje:

$$R_L = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot L}{1000} \quad R_L = \Omega, L = \text{mH}, f = \text{Hz}$$

Jasno je, da bo imela tuljava pri enosmerni napetosti ($f=0\text{Hz}$) upornost 0. Vsaka tuljava pa vsebuje tudi ohmsko upornost, t.j. upornost žice iz katere je tuljava navita. Iz električnega vidika je ohmska upornost tuljave serijsko vezana z induktivno upornostjo.

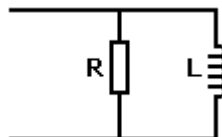
Serijska vezava RL



-predstavlja zvočnik ($R=R_e$, $L=L_e$)

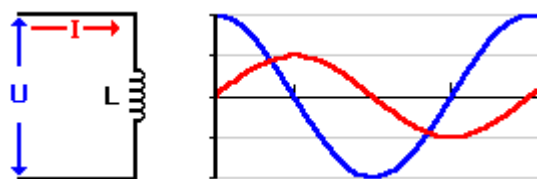
$$Z = \sqrt{R^2 + R_L^2} \quad I = \frac{U}{Z} \quad U = \sqrt{U_R^2 + U_L^2} \quad \varphi_{UI} = \arccos\left(\frac{R}{Z}\right)$$

Paralelna vezava RL



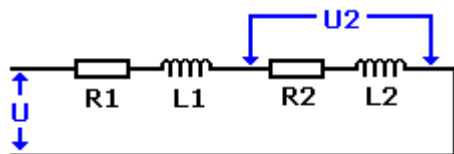
$$Z = \frac{1}{\sqrt{(1/R)^2 + (1/R_L)^2}} \quad I = \frac{U}{Z} = \sqrt{I_R^2 + I_L^2} \quad \varphi_{UI} = \arccos\left(\frac{Z}{R}\right)$$

Fazni pomik



-tok zaostaja za napetostjo (v idealnem primeru za 90°).

Serijska vezava dveh tuljav



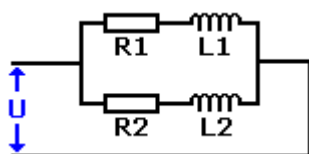
-vezava predstavlja tudi serijsko vezavo dveh zvočnikov, če $R=R_e$ in $L=L_e$.

$$Z = \sqrt{(R_1 + R_2)^2 + (R_{L1} + R_{L2})^2}$$

$$I = \frac{U}{Z} \quad \tan \varphi = \frac{2 \cdot \pi \cdot f \cdot (L_1 + L_2)}{1000 \cdot (R_1 + R_2)} \quad U_2 = I \cdot \sqrt{R_2^2 + R_{L2}^2}$$

Skupna ohmska upornost je $R_1 + R_2$, skupna induktivna upornost pa je $R_{L1} + R_{L2}$.

Paralelna vezava dveh tuljav



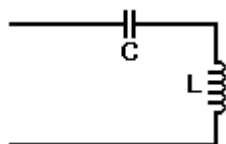
$$Z_1 = \sqrt{R_1^2 + R_{L1}^2} \quad Z_2 = \sqrt{R_2^2 + R_{L2}^2}$$

$$I_1 = \frac{U}{Z_1} \quad I_2 = \frac{U}{Z_2} \quad \cos \varphi_1 = \frac{R_1}{Z_1} \quad \cos \varphi_2 = \frac{R_2}{Z_2}$$

$$I = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 - 2 \cdot I_1 \cdot I_2 \cdot \cos(\varphi_2 - \varphi_1)}$$

9.4 Tuljava in kondenzator

Serijska vezava LC



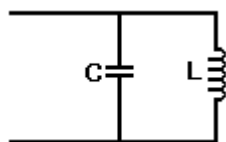
$$Z = |R_L - R_C| \quad I = \frac{U}{Z} \quad U = U_L - U_C \quad U_L = I \cdot R_L \quad U_C = I \cdot R_C$$

Zaradi nasprotnega faznega pomika je skupna upornost enaka absolutni razliki obeh upornosti. Na določeni frekvenci bosta imela kondenzator in tuljava enako upornost -takrat bo imela skupna upornost vrednost 0 ohmov (če zanemarimo ohmsko upornost tuljave).

Frekvenco, pri kateri imata kondenzator in tuljava enako upornost, imenujemo napetostna rezonančna frekvenca. Izračunamo jo z formulo:

$$f_r = \frac{10000}{2 \cdot \pi \cdot \sqrt{L \cdot C / 10}} \quad L = \text{mH}, C = \mu\text{F}, f = \text{Hz}$$

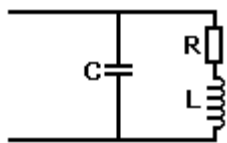
Paralelna vezava LC



$$Z = \frac{1}{\left| \frac{1}{R_L} - \frac{1}{R_C} \right|} \quad I = \frac{U}{Z} = |I_L - I_C| \quad I_L = \frac{U}{R_L} \quad I_C = \frac{U}{R_C}$$

Skupna upornost bo imela na frekvenci, pri kateri imata oba elementa enako upornost, neskončno vrednost. V tem primeru govorimo o tokovni rezonančni frekvenci.

Ker ima vsaka tuljava tudi realno ohmsko upornost, ima shema obliko:



$$Z_{RL} = \sqrt{R^2 + R_L^2} \quad I_{RL} = \frac{U}{Z_{RL}} \quad I_C = \frac{U}{R_C}$$

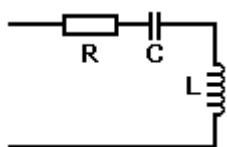
$$\alpha = 90^\circ - \varphi_1 \quad \varphi_1 = \arccos\left(\frac{R}{R_L}\right) \Rightarrow \alpha = \arcsin\left(\frac{R}{R_L}\right)$$

Za celotni tokokrog imamo torej:

$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{Z_{RL}^2} + \frac{1}{R_C^2} - \frac{2 \cdot \cos \alpha}{Z_{RL} \cdot R_C}}}$$

$$I = \sqrt{I_{RL}^2 + I_C^2 - 2 \cdot I_{RL} \cdot I_C \cdot \cos \alpha} = \frac{U}{Z}$$

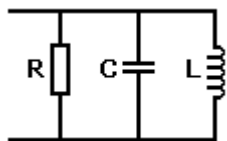
Serijska vezava RLC



$$Z = \sqrt{R^2 + Z_{LC}^2} \quad I = \frac{U}{Z} \quad U = \sqrt{U_R^2 + (U_L - U_C)^2}$$

Tudi pri tej vezavi se pojavi rezonančna frekvenca, pri kateri se induktivna in kapacitivna upornost izničita -takrat je tok omejen samo z uporom R.

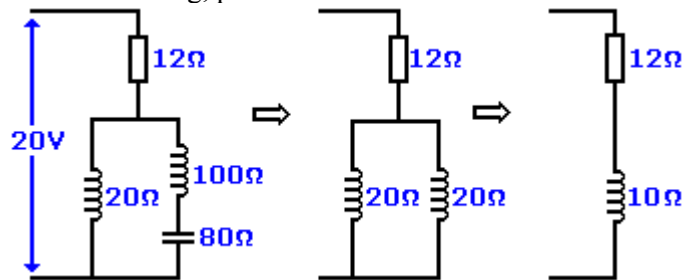
Paralelna vezava RLC



$$Z = \frac{1}{\sqrt{\frac{1}{R^2} + \frac{1}{Z_{LC}^2}}} \quad I = \frac{U}{Z} = \sqrt{I_R^2 + (I_L - I_C)^2}$$

Primer

Imamo tokokrog, pri katerem smo na določeni frekvenci izračunali naslednje vrednosti:



Rezultat serijsko vezane kapacitivne upornosti 80Ω in induktivne upornosti 100Ω je:

$$100\Omega - 80\Omega = 20\Omega$$

-dobimo dve enaki paralelno vezani induktivni upornosti, kar je enako:

$$20\Omega / 2 = 10\Omega$$

Torej imamo serijsko vezano induktivno upornost 10Ω in realno upornost 12Ω. Skupna upornost tokokroga je:

$$Z = \sqrt{12^2 + 10^2} \cong 15,62\text{ohm}$$

Tok skozi tokokrog je:

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{20}{15,62} \cong 1,28\text{A}$$

Napetost na upor R je:

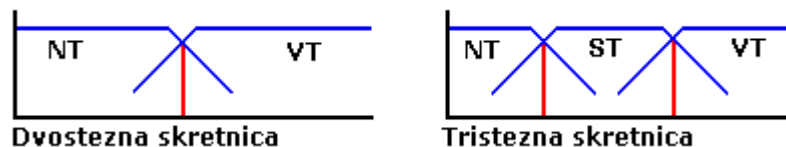
$$U_R = I \cdot R = 1,28 \cdot 12 = 15,36\text{V}$$

10. Kretnice in filtri

10.1 Uvod

Kretnica (ang. crossover) je frekvenčni filter, ki porazdeli frekvence na dva ali več zvočnikov. Najpogosteje se uporabljajo dvostezne in tritestne kretnice. Kretnica "poskrbi", da dobi vsak zvočnik tisti del frekvenčnega področja za katerega je namenjen. Glede na karakteristike izbranega zvočnika, se moramo odličiti za ustrezno prelomno frekvenco f_0 (ang. crossover frequency) in za stopnjo filtriranja.

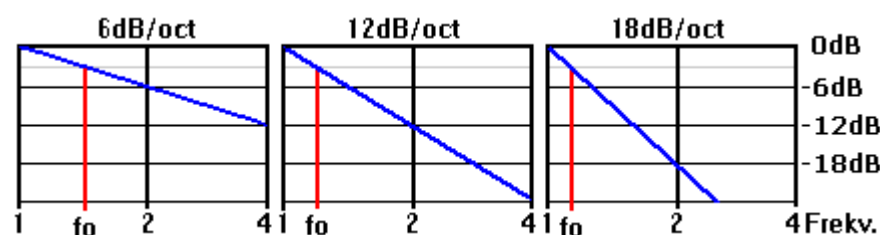
Prelomna frekvenca določa frekvenco, pri kateri je prehod iz npr. nizkotonskega na visokotonski zvočnik:



Vidimo, da npr. nizkotonski zvočnik (NT) na prelomni frekvenci ne utihne, ampak igra od prelomne frekvence dalje vedno tišje. Tudi visokotonski zvočnik ne začne igrati točno na prelomni frekvenci, ampak že prej -vendar manj glasno. Na prelomni frekvenci igrata oba zvočnika enako glasno: -3dB.

Stopnja filtriranja določa kakšen bo padec nivoja glasnosti od prelomne frekvence dalje. Pri tem se najpogosteje uporabljajo kretnice:

- 1.reda -padec 6dB/oktavo,
- 2.reda -padec 12dB/oktavo,
- in 3.reda -padec 18dB/oktavo.

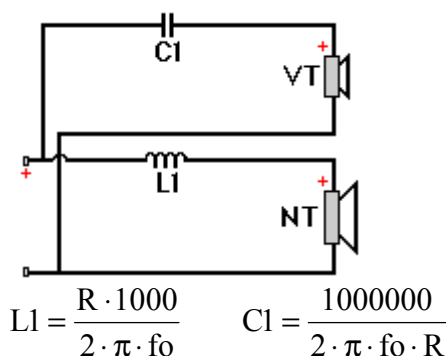


-vidimo, da je začetek rezanja (ang. cutoff frequency) že pred prelomno frekvenco in da je na prelomni frekvenci (f_0) nivo že zmanjšan za 3dB -neglede na stopnjo filtriranja.

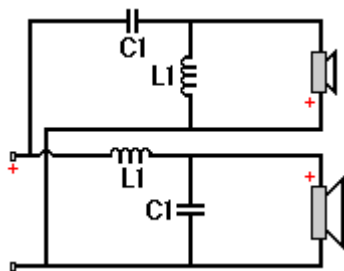
V formulah, ki sledijo, so vse enote v μF , Ω , mH in Hz. Upornost R predstavlja upornost zvočnika v veji za katero se filter računa.

10.2 Dvostezne kretnice

6dB/okt

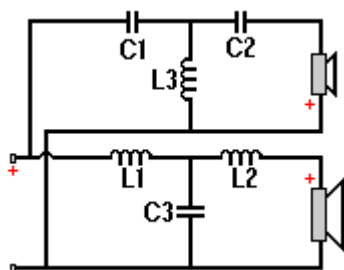


12dB/okt



$$L1 = \frac{R \cdot 1000 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot f_0} \quad C1 = \frac{1000000 \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R}$$

18dB/okt



$$L1 = \frac{R \cdot 1000 \cdot 3}{4 \cdot \pi \cdot f_0} \quad C1 = \frac{1000000}{3 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R}$$

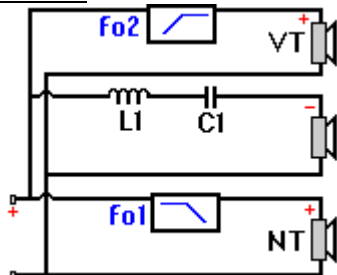
$$L2 = \frac{R \cdot 1000}{4 \cdot \pi \cdot f_0} \quad C2 = \frac{1000000}{\pi \cdot f_0 \cdot R}$$

$$L3 = \frac{R \cdot 1000 \cdot 3}{8 \cdot \pi \cdot f_0} \quad C3 = \frac{1000000 \cdot 2}{3 \cdot \pi \cdot f_0 \cdot R}$$

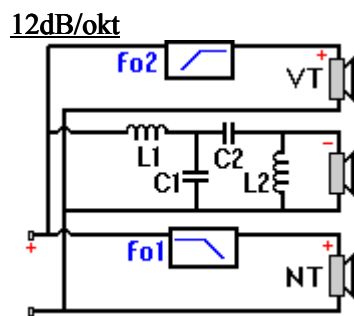
10.3 Tristezne kretnice

Prikazani bodo samo elementi srednjetoškega zvočnika; t.j. pasovnega filtra. Pri izračunih je f_{o1} prelomna frekvenca NT zvočnika in istočasno spodnja prelomna frekvenca pasovnega filtra. Ustrezno temu je f_{o2} prelomna frekvenca VT zvočnika in zgornja prelomna frekvenca pasovnega filtra. Seveda mora biti f_{o1} nižje od f_{o2} .

6dB/okt



$$L1 = \frac{R \cdot 1000}{2 \cdot \pi \cdot f_{o2}} \quad C1 = \frac{1000000}{2 \cdot \pi \cdot f_{o1} \cdot R}$$

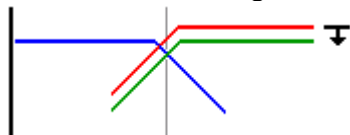


$$L1 = \frac{R \cdot 1000 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot fo2} \quad C1 = \frac{1000000 \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot fo2 \cdot R}$$

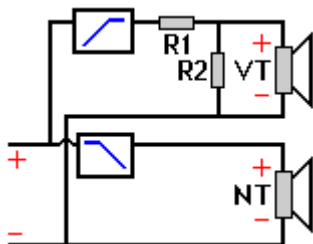
$$L2 = \frac{R \cdot 1000 \cdot \sqrt{2}}{2 \cdot \pi \cdot fo1} \quad C2 = \frac{1000000 \cdot \sqrt{2}}{4 \cdot \pi \cdot fo1 \cdot R}$$

10.4 Regulator nivoja glasnosti

V praksi se dogaja, da ima visokotonski zvočnik višji SPL kot nizkotonski zvočnik. Zato je potrebno, da SPL visokotonskega zvočnika znižamo na nivo NT zvočnika:



V ta namen uporabimo regulator nivoja glasnosti (SPL attenuator):



Znižanje nivoja (relativno na 0dB) dobimo:

$$Att = 20 \cdot \log \left(\frac{R2}{R1 + R2} \right)$$

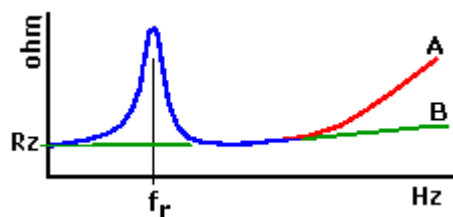
Skupno upornost VT sekcije dobimo:

$$Z_{VT} = R1 + \frac{1}{(1/R2 + 1/R)} \quad \text{-kjer je R upornost VT zvočnika.}$$

Praviloma bomo uporabili keramične upore večjih moči. V vsakem primeru pa mora biti ta regulator zadnji v verigi -tik pred VT zvočnikom.

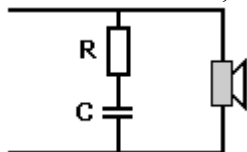
10.5 Zobel regulator

Tudi tuljava samega zvočnika ima induktivnost -torej se bo upornost zvočnika z naraščanjem frekvence višala (Linija A):



Na diagramu je z fr označena rezonančna frekvenca in pripadajoča upornost.

Z ustreznim filtrom, t.j. Zobel regulator, bomo dobili krivuljo B:

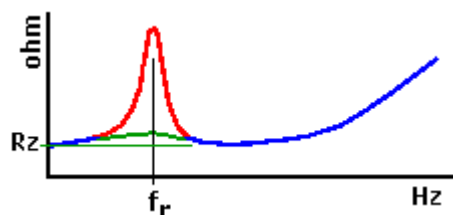


$$C = \frac{L_e \cdot 1000}{R^2} \quad C = \mu\text{F}, L_e = \text{mH}, R = \Omega$$

-pri tem mora imeti upor R enako upornost kot zvočnik (L_e je induktivnost tuljave zvočnika).

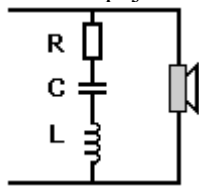
10.6 Notch filter

Kot že omenjeno, je upornost zvočnika na njegovi rezonančni frekvenci relativno visoka (tudi do 5-krat večja od nazivne upornosti):



Na rezonančni frekvenci namreč membrana ekstremno niha. To ima za posledico, da sama tuljava zvočnika generira elektromagnetno polje in s tem napetost, ki pa ima nasprotno fazo od dovedene napetosti -posledica je zvišanje upornosti.

Z uporabo Notch filtra se krivulja upornosti na rezonančni frekvenci "zgladi". To je potrebno takrat, ko je prelomna frekvenca kretnice blizu (2 oktavi ali manj) rezonančne frekvence zvočnika in imamo nizko stopnjo filtriranja (npr. 6dB/oktavo).



$$R = R_e + \frac{R_e \cdot Q_{es}}{Q_{ms}} \cong R_z$$

$$C = \frac{1000000}{2 \cdot \pi \cdot f_s \cdot R_e \cdot Q_{es}} \quad L = \frac{1000 \cdot R_e \cdot Q_{es}}{2 \cdot \pi \cdot f_s}$$

$R = \Omega, C = \mu\text{F}, L = \text{mH}$

Če nam Q_{es} podatek ni znan, potem lahko vzamemo približno vrednost 0,6.