

KTH
Institutionen för Talöverföring
ÄNDRING AV HÖGTALARES MEKANISKA PARAMETRAR
PÅ ELEKTRISK VÄG
Examensarbete mars 1976
Karl Erik Ståhl
Handledare: Johan Liljencrants

Department of Speech Communication
Royal Institute of Technology (KTH)
S-100 44 Stockholm, SWEDEN

INNEHÅLLSFÖRTECKNING

Förord.....	2
1 Uppfinningen och dess möjligheter.....	3
2 Högtalarelementet.....	4
3 "Specialdrivning", att påverka M_M , R_M och C_M från den elektriska sidan.....	7
4 Högtalarelementet i slutna låda och basreflexlåda.....	9
4.1 Slutna låda.....	9
4.2 Basreflexlåda.....	10
4.3 Dimensionering med filtermetoder.....	11
5 Övre gränshäufigvens vid specialdrivning.....	14
6 Distorsion vid specialdrivning.....	15
7 Realisering av kopplingar för specialdrivning.....	16
7.1 Direkt realisering.....	16
7.2 Koppling med bandpassfilter som både ger önskad förstärkning och utgångsimpedans.....	17
7.2.1 Realisering med DIG bandpassfilter.....	17
7.2.2 Realisering med färre operationsförstärkare.....	18
7.2.3 Ännu enklare realisering.....	19
7.3 Ett par andra kopplingar.....	20
7.3.1 Realisering utan fjädringsändring.....	20
7.3.2 Något bättre realisering, dessutom även med fjädringsändring..	21
8 Experiment, försök och kompletta prototyper.....	22
8.1 Inledande försök med en enkel radiohögtalare.....	22
8.2 Ett 12" bashögtalarelement i slutna låda.....	24
8.3 Ett 8.5" bashögtalarelement i basreflexlåda.....	25
8.4 Dubbla bashögtalarelement.....	26
8.5 Kompletta prototyp med 40 liters nettovolym.....	27
8.6 Kompletta prototyp med 20 liters nettovolym.....	33
9 Enklare elektronik.....	36
10 Kort jämförelse med andra metoder att åstadkomma rak tonkurva vid låga frekvenser.....	37
10.1 Normal drivning av högtalaren, d v s drivning med konstant spänning och utan någon frekvenskorrektions.....	37
10.2 Korrigering av högtalarens tonkurva genom filter i förstärkaren.....	37
10.3 Motkopplad bashögtalare såsom Philips 22RH532.....	38

FÖRORD

Detta examensarbete har tillkommit på mitt eget initiativ. Efter att ha kommit på idén till den uppfinning som rapporten behandlar samt gjort vissa inledande försök, begärde jag detta ämne som examensarbete vid institutionen för Talöverföring.Handledare har tekn lic Johan Liljencrants varit. Vissa mätningar har utförts i det ekofria rum som institutionen för Talöverföring har tillsammans med Teknisk Audiologi [Karolinska Institutet], och vissa beräkningar har gjorts på institutionen för Teletransmissionsteoris programmerbara kalkylator med plotter. I övrigt har arbetet huvudsakligen utförts i mitt hem. Styrelsen för Teknisk Utveckling [STU] har beviljat medel för projektutveckling och patentansökan /som har inlämnats den 24 mars 1976, nr 7603585-6/

Sollentuna i mars 1976

Karl Erik Ståhl

1 UPPFINNINGEN OCH DESS MÖJLIGHETER

Uppfinningen går ut på att påverka högtalarelements mekaniska parametrar, genom att den drivande förstärkaren utförs med viss speciell utgångsimpedans och förstärkning. Det är tidigare känt och tillämpat att den mekaniska dämpningen kan påverkas genom ändring av den drivande förstärkarens utgångsresistans. Med det här aktuella förfarandet —som för enkelhets skull i fortsättningen kommer att kallas "specialdrivning"— kan man dock även ändra den svängande massan och fjädningen.

Dagens hi fi högtalare har ofta en undre gränshfrekvens omkring 50Hz eller däröver och ibland även en mer eller mindre utpräglad höjning av utnivån omkring denna frekvens. De få högtalare som har rak tonkurva ned till väsentligt lägre frekvenser, har vanligen stor volym, låg verkningsgrad och/eller är mycket dyra. /De frekvensomfång som anges för högtalare är som regel överdrivna, bl a beroende på DIN-normens mätmetod. Angiven undre gränshfrekvens ligger ej sällan $\frac{1}{2}$ -1 oktav under högtalarens resonansfrekvens./

Med specialdrivning av bashögtalaren är det möjligt att tämligen godtyckligt utsträcka frekvensområdet i det lägsta basregistret och ge systemet önskade transientegenskaper. Kostnaden för detta är att det krävs mer effekt från effektförstärkaren vid de lägsta frekvenserna, samt att denna måste vara dimensionerad för en viss bashögtalare. Det krävs alltså en separat effektförstärkare för mellan- och diskantregistret.

Två par kompletta prototyper /även innefattande mellan- och diskantregisterhögtalare samt effektförstärkare för dessa/ har konstruerats och byggts. Två av dessa har 40 l volym och två har 20 l volym, båda typerna är basreflexlådor och undre gränshfrekvensen [-3 dB] har lagts vid 20 respektive 30 Hz. Mycket goda egenskaper har uppnåtts, vilket bekräftas både vid mätningar och lyssningsmässigt. Dessa högtalare beskrivs utförligare i slutet av denna rapport.

2 HÖGTALARELEMENTET

Då detta arbete behandlar drivningen av högtalarelement, ges en mycket kortfattad beskrivning av ett sådant. De mekaniska förloppen beskrivs med en mekanisk-elektrisk analogi, där mekanisk kraft behandlas som elektrisk spänning, hastighet som ström, massa som induktans, dämpning som resistans och fjädring som kapacitans.

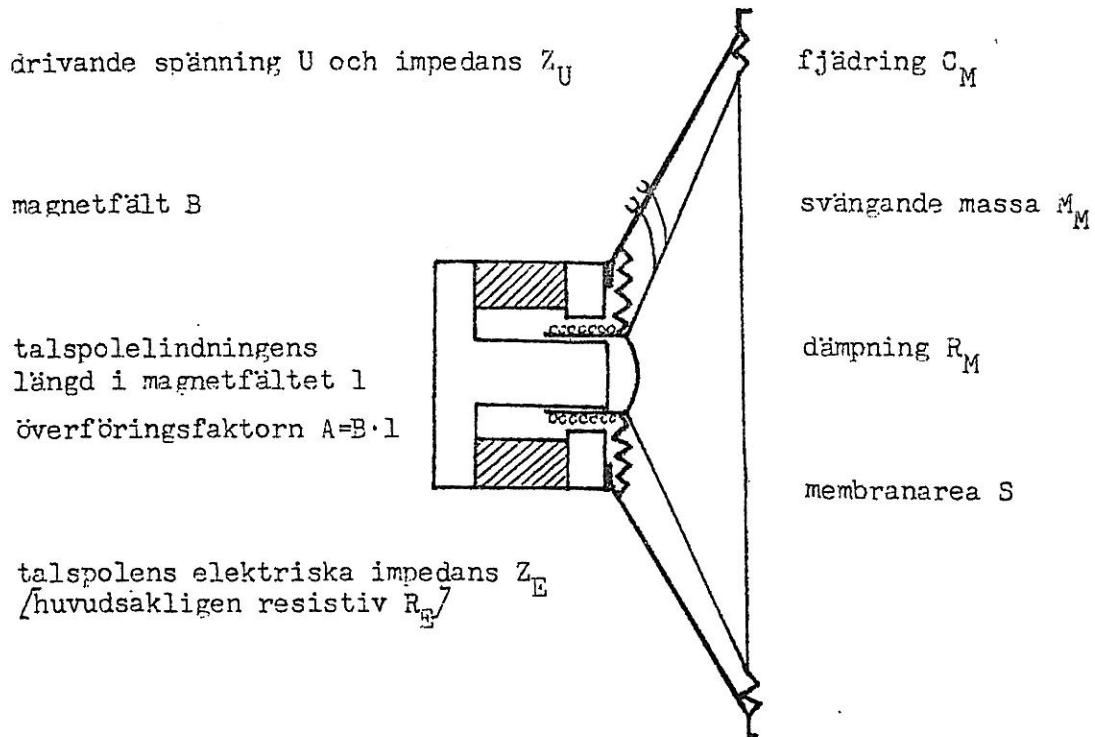


Fig 1. Högtalarelement med definition av de grundläggande parametrarna.

Högtalarelementet kan betraktas som fyrrpol med elektriska storheter på den ena sidan och mekaniska storheter på den andra. Sambandet mellan dessa ges av ekvationerna:

$$\begin{cases} U = Z_E I + AV \\ F = AI + Z_M V \end{cases} \quad \text{Där } Z_M \text{ är den mekaniska im-} \\ \text{pedans som utgörs av massa, dämpning och fjädring: } Z_M = sM_M + R_M + 1/sC_M.$$

Ekvationerna innebär att högtalarelementet kan beskrivas med en gyrator med kedjematrisen: $[K] = \begin{pmatrix} 0 & -A \\ 1/A & 0 \end{pmatrix}$, se fig 2. En gyrator har egenskapen

att man från den ena sidan ser dualen av det nät, som finns på den andra sidan.

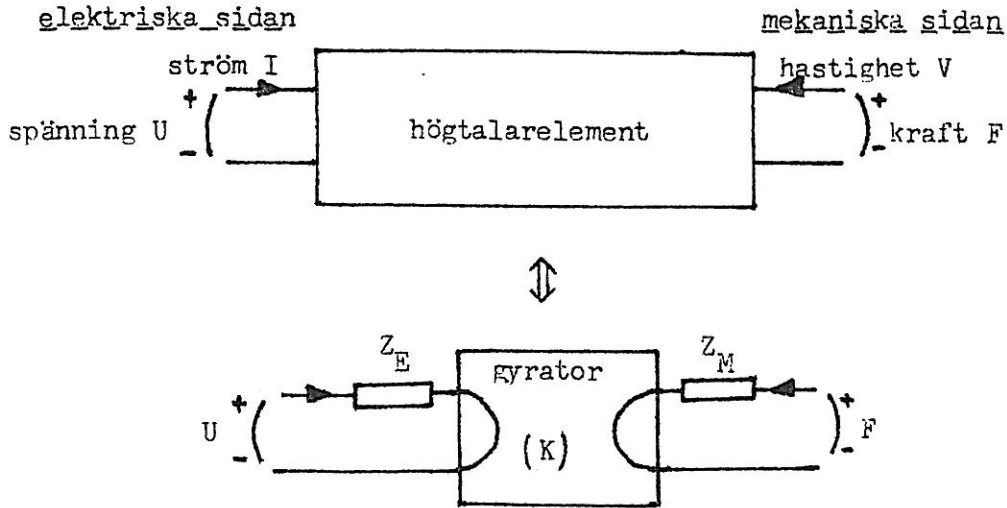


Fig 2. Högtalarelementet som fyvpol.

Vid normal användning av högtalarelementet drivs det av en förstärkare med utgångsimpedansen Z_U , och på den mekaniska sidan tillkommer en mekanisk impedans Z_B —t ex låda och luft— som belastar membranet. Högtalarelementet får då det ekvivalenta schemat:

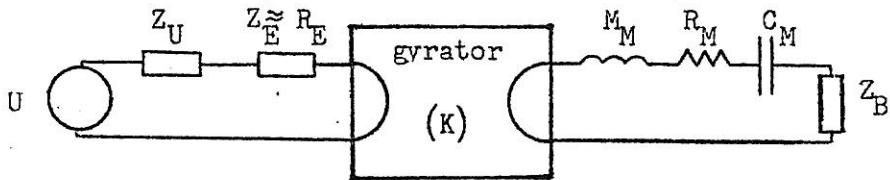


Fig 3. Ekvivalent schema vid normal användning.

Eller sett från den elektriska respektive mekaniska sidan:

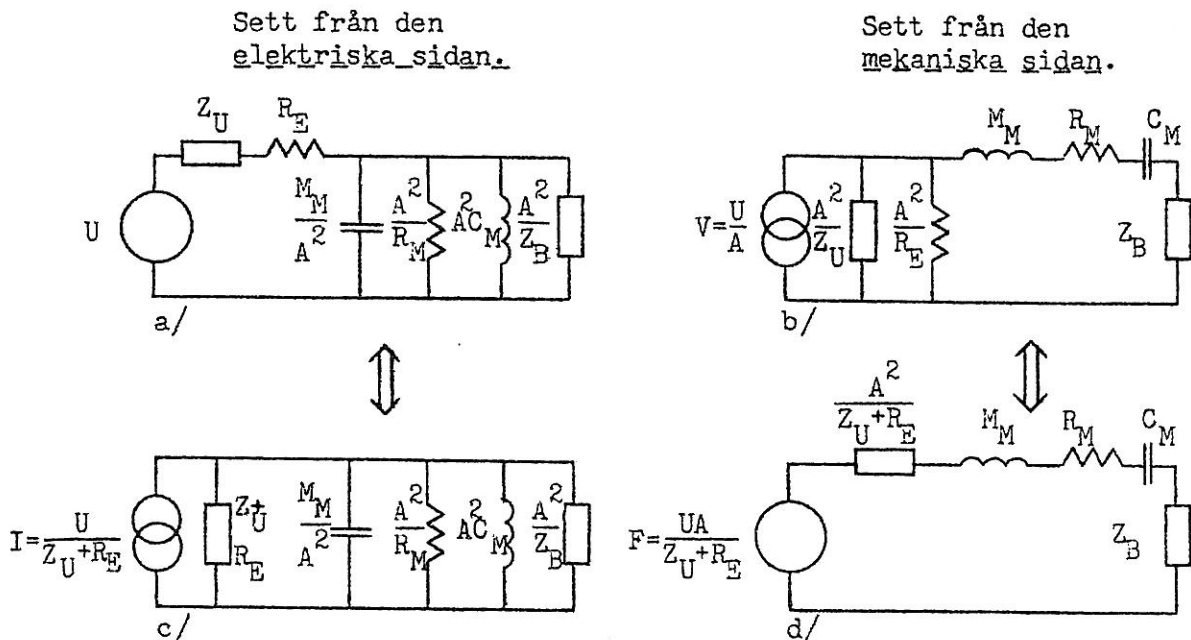


Fig 4. Ekvivalenta schema för högtalare, sett på olika sätt.

Övergången från fig 4a/ till c/ och från b/ till d/ fås genom att ersätta en spänningsgenerator med en strömgenerator och vice versa.

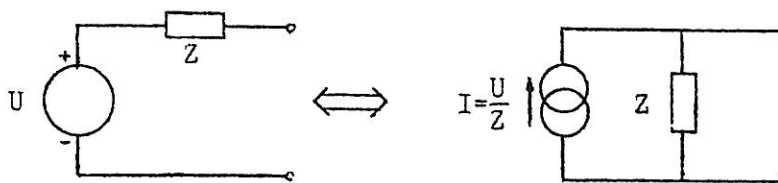


Fig 5. Övergång mellan spännings- och strömgenerator.

Schemat i fig 4d/ är det i litteraturen vanligast förekommande. I de flesta ljudåtergivningssammanhang drivs högtalaren med en konstant spänning —d v s $Z_U=0$ — varvid högtalarelementets mekaniska dämpning R_M ökar med A^2/R_E . Genom att välja positiva eller negativa resistiva värden på Z_U kan dämpningen minskas respektive ökas, vilket även har tillämpats i vissa konstruktioner.

3 "SPECIALDRIVNING", ATT PÅVERKA M_M , R_M OCH C_M FRÅN DEN ELEKTRISKA SIDAN

Betrakta högtalarelementets ekvivalenta schema sett från den elektriska sidan [≡fig 4a/]:

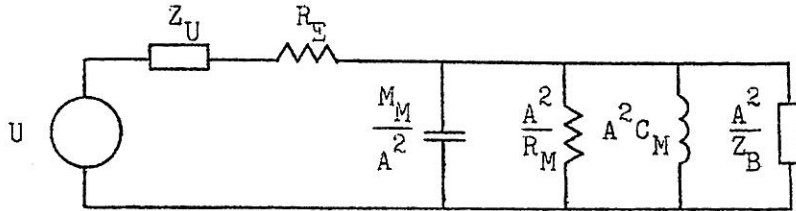


Fig 6. Högtalarens ekvivalenta schema sett från den elektriska sidan.

Låt den del som motsvarar förstärkaren utgöras av kopplingen nedan, d v s:

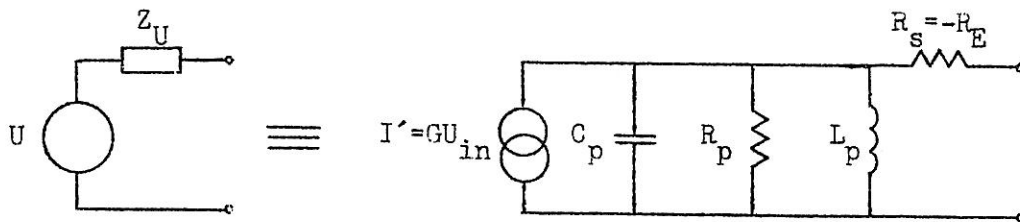


Fig 7. Förstärkaren vid specialdrivning.

Om man vill betrakta kopplingen med spänningsgenerator istället för strömgenerator—se fig 8— så krävs att förstärkningen är frekvensberoende på samma sätt som "parallellimpedansen" Z_p .

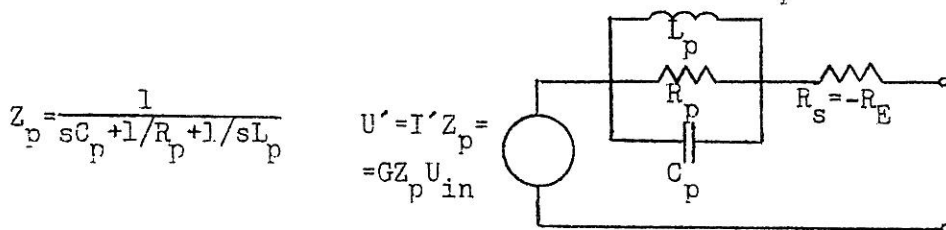


Fig 8. Förstärkaren vid specialdrivning, betraktad som spänningskälla.

Man får då det ekvivalenta schemat:

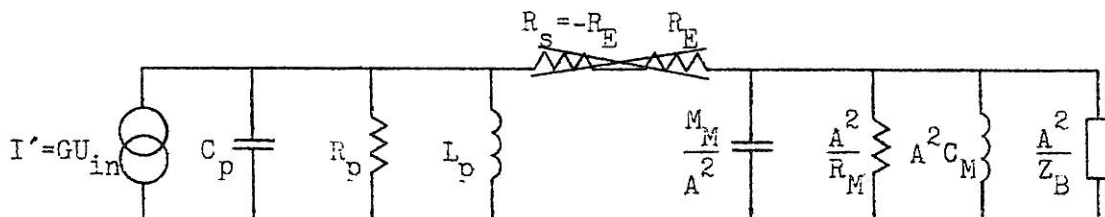


Fig 9. Ekvivalent schema vid specialdrivning, sett från den elektriska sidan.

eller sett från den mekaniska sidan, jämför fig 4d/.

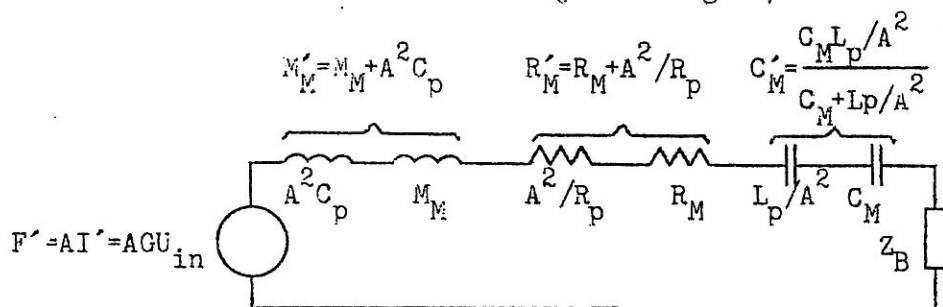


Fig 10. Ekvivalent schema vid specialdrivning, sett från den mekaniska sidan.

Den skenbara massan och dämpningen har alltså ökat och fjädringen har styvnat $\sqrt{C'_M < C_M}$. Dessa "skenbara" storheter är dock så verkliga, att om en mekaniker försökte mäta massa, dämpning och fjädring, så skulle han finna dessa värden $\sqrt{M'_M}$, R'_M och C'_M , då förstärkaren var tillkopplad.

Det är alltså möjligt att ändra högtalarelementets svängande massa, dämpning och fjädring, genom att utföra den drivande förstärkaren enligt fig 7. Utgångsimpedansen skall bestå av en negativ serieresistans som i huvudsak eliminerar talspolens elektriska impedans $Z_E \approx R_E$. Vidare skall parallellt med den drivande strömgeneratorn finnas en kapacitans om massan önskas ändrad, en resistans om dämpningen önskas ändrad och en induktans om fjädringen önskas ändrad.

4 HÖGTALARELEMENTET I SLUTEN LÅDA OCH BASREFLEXLÅDA

För att utstråla ljudeffekt vid låga frekvenser krävs att högtalarelementet monteras i någon slags låda eller motsvarande. De vanligaste typerna är den slutna lådan —även kallad tryckkammarhögtalare— och basreflexlådan. Då lådan tillsammans med högtalarelementet bestämmer bassystemets egenskaper —såsom tonkurva och transientåtergivning— ges här en kort genomgång av dessa två vanliga typer av system.

4.1 Slutna låda

Den slutna lådan innebär att högtalarelementet monteras i en — förutom öppningen för membranet— helt slutna låda. I lådan finns viss dämpning R_V , och den inneslutna luften verkar som en fjädring C_V , och högtalar-membranet belastas av den medsvängande luftmassan M_L och strålnings-resistansen R_L . Strålningsresistansen är proportionell mot frekvensen i kvadrat, $R_L = \rho \omega^2 S^2 / 4\pi c^2$ (ρ = luftens densitet och c = ljudhastigheten), och det är den i R_L utvecklade effekten "som hörs". Det ekvivalenta schemat blir då enligt fig 11.

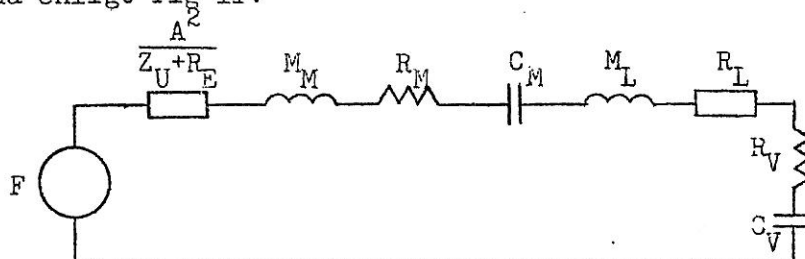


Fig 11. Ekvivalent schema för slutet system.

Förutsatt att $R_L \ll$ impedanserna i övrigt —vilket är fallet— och att drivningen sker med en förstärkare med resistiv utgångsimpedans eller med specialdrivning, så kan schemat förenklas till fig 12.

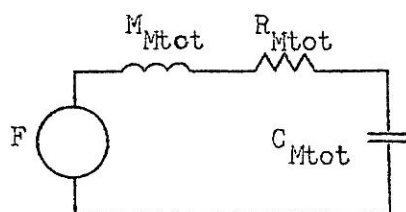


Fig 12. Förenklat ekvivalent schema för slutet system.

Detta innebär att ljudtrycket uppför sig som ett 2a ordningens högpasfilter med resonansfrekvensen: $f_0 = 1/2\pi \sqrt{M_{Mtot} C_{Mtot}}$ och Q-värde:

$Q = 2\pi f_0 M_{Mtot} / R_{Mtot}$, medan membranamplituden uppför sig som ett 2a ordningens lågpasfilter med samma f_0 och Q.

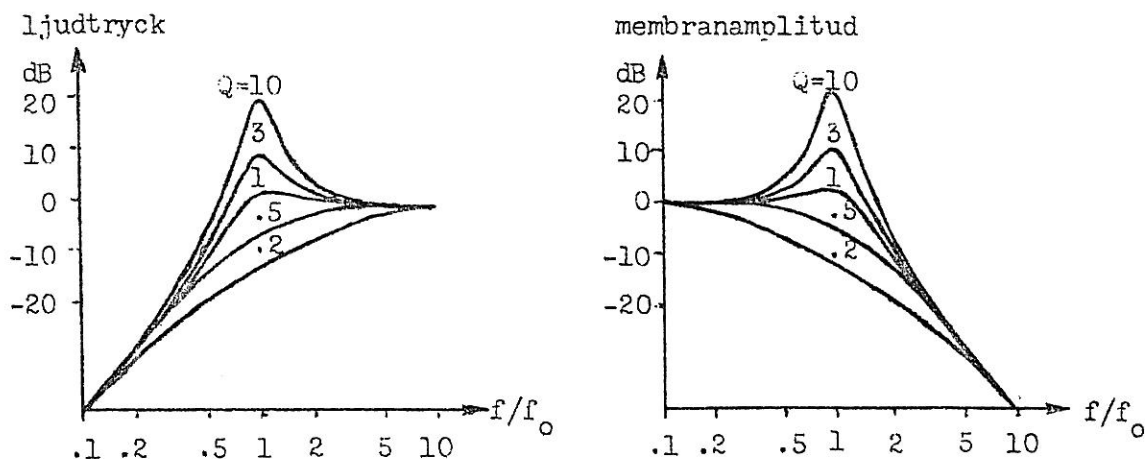


Fig 13. Tonkurva och membranamplitud för slutet högtalarsystem.

Genom ökning av högtalarelementets svängande massa och dämpning —t ex genom specialdrivning— kan man sänka gränshfrekvensen och välja lämpligt Q -värde.

4.2 Basreflexlåda

I basreflexlådan finns en öppning i form av ett rör eller dylikt. Detta gör att en svängande luftmassa uppkommer i öppningen, och ljudstrålning sker även därifrån. Jämfört med den slutna lådans ekvivalenta schema tillkommer därför luftmassan i öppningen M_T och dess dämpning R_T samt strålningsresistans R_L på samma sätt som vid membranöppningen.

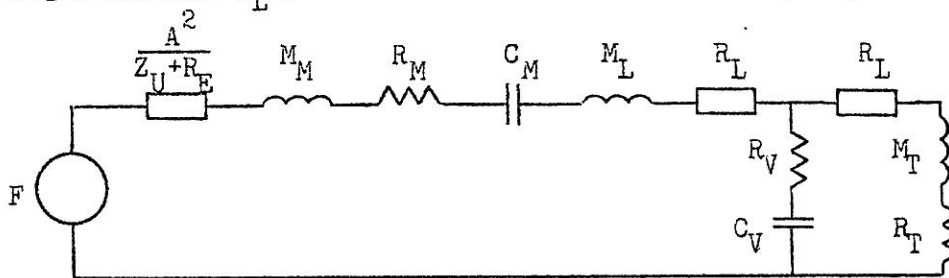


Fig 14. Ekvivalent schema för basreflexsystem.

Analys och syntes av basreflexsystem —som är betydligt mer invecklat än för slutna system— kan studeras i Johan Liljencrants rapport "On the Dimensioning of Bass-reflex Enclosures" [Speech Transmission Laboratory, Quarterly Progress and Status Report, Oktober 15, 1966]. Ljudtrycket uppför sig huvudsakligen som ett 4e ordningens högpasfilter, och membranamplituden får ett nollställe vid $f_B = 1/2\pi\sqrt{M_T C_V}$. Detta nollställe medför lägre membranamplitud omkring och strax över f_B , medan den dock ökar snabbt vid frekvenser under f_B , där dock bas-

reflexsystemet ej är avsett att användas. Fördelen med basreflexsystemet —jämfört med det slutna systemet— är just den lägre membranamplituden, vilken medför att högre akustisk uteffekt kan erhållas med ett visst högtalarelement eller att lägre distorsion erhålls vid samma uteffekt.

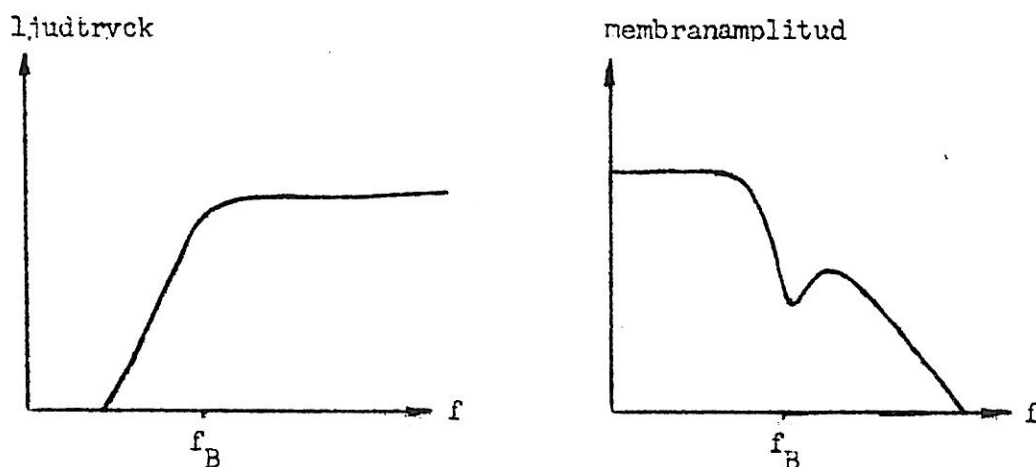


Fig 15. Exempel på tonkurva och membranamplitud för ett basreflexsystem.

Med specialdrivning kan det här vara aktuellt att välja högtalarelementets svängande massa, dämpning och fjädring, för att få de önskade egenskaperna.

4.3 Dimensionering med filtermetoder

Då högtalarsystem uppför sig som filter, kan de också dimensioneras för att få de egenskaper som välkända filter har, t ex Chebyshevfilter eller Butterworthfilter. Det kan vara fördelaktigt —speciellt vid basreflexsystem— att i förstärkaren beskära frekvenser under de lägst önskade, för att därmed hålla membranamplituden låg. Det kan t ex göras med ett 2a ordningens högpasfilter, varvid ett slutet högtalarsystem lämpligen betraktas tillsammans med detta filter som ett 4e ordningens filter och basreflexsystemet som ett 6e ordningens filter. I de försök som utförts har svstemen ofta dimensionerats för att uppföra sig som Butterworthfilter, varför nedan ges ljudtryck och membranamplitud för:

- Slutet system utan filter, med ljudtryck som ett 2a ordningens Butterworthfilter.
- Slutet system med filter, med ljudtryck som ett 4e ordningens Butterworthfilter.
- Basreflexsystem utan filter, med ljudtryck som ett 4e ordningens Butterworthfilter.
- Basreflexsystem med filter, med ljudtryck som ett 6e ordningens Butterworthfilter.

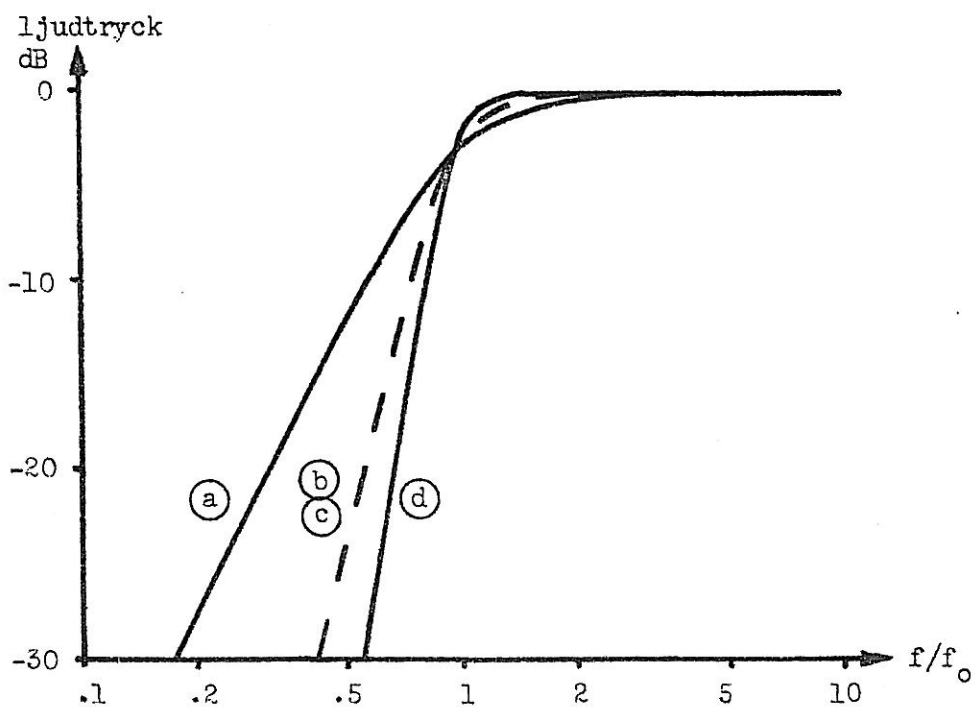


Fig 16. Tonkurvor för olika Butterworthdimensionerade högtalarsystem.

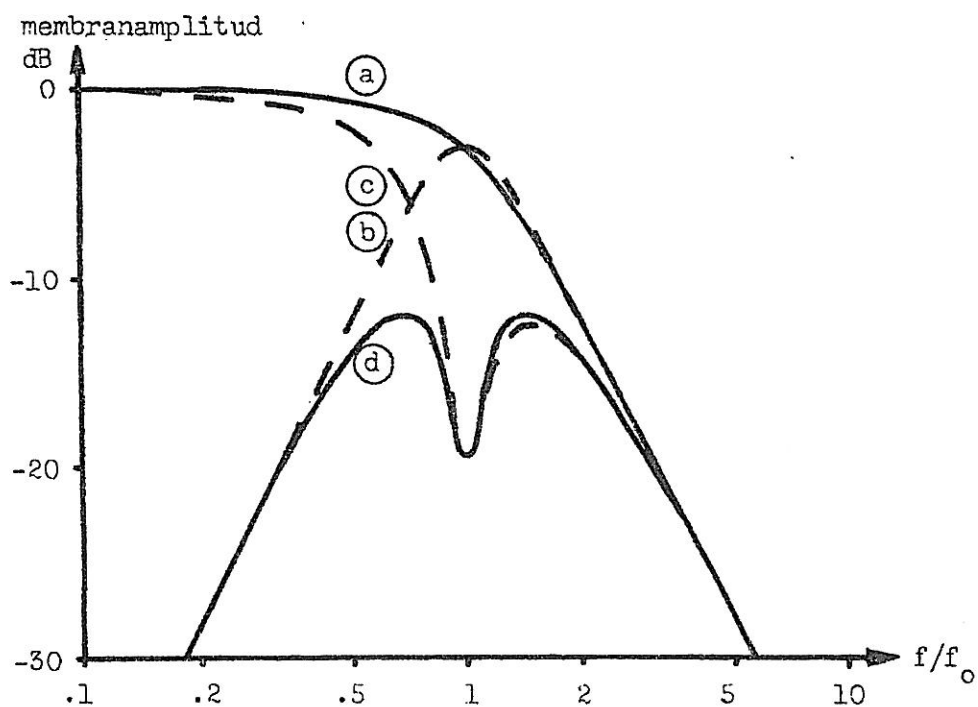


Fig 17. Membranamplitud för olika Butterworthdimensionerade högtalarsystem.

Ur fig 17 kurva d framgår att membranamplituden för det 6e ordningens Butterworthdimensionerade basreflexsystemet har den trevliga egenskapen, att ha två maxima som är lika höga och 9—12 dB lägre

än maximala membranamplituden för de övriga systemen. Detta innebär att exempelvis ett slutet system skulle behöva kunna prestera cirka 3 gånger större membranamplitud, för att ge samma akustiska uteffekt vid låga frekvenser.

5 ÖVRE GRÄNSFREKVENNS VID SPECIALDRIVNING

Hittills har endast uppförandet vid låga frekvenser betraktats. Det har dock visat sig, att vid specialdrivning av bashögtalarelementet fås en övre gränshfrekvens i området 100-500 Hz. Detta beror på att talspolens elektriska impedans Z_E ej är rent resistiv utan även induktiv. Vid dessa frekvenser kan det ekvivalenta schemat —sett från den elektriska sidan— förenklas till:

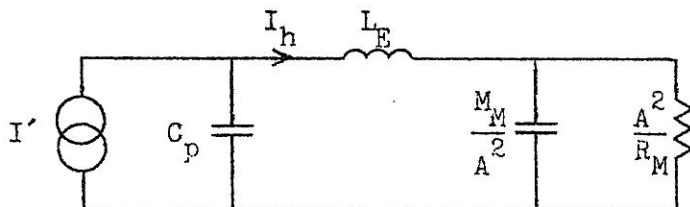


Fig 18. Förenklat ekvivalent schema, gällande vid övre gränshfrekvensen. L_E =talspolens induktans.

Det framgår att tonkurvan —som är proportionell mot strömmen I_h — är av lågpasskaraktär och överföringsfunktionen kan tecknas:

$$I_h = \frac{sM_M + R_M}{I s^3 L_E M_M C_p + s^2 L_E C_p R_M + s \sqrt{C_p A^2 + M_M} + R_M}$$

Om $sM_M \gg R_M$ —vilket inte alltid är ett bra antagande, men ändå ger god uppfattning om uppförandet hos filterfunktionen— så kan funktionen approximativt betraktas som ett 2a ordningens lågpasfilter med

$$f_u = \frac{1}{2\pi} \sqrt{\frac{C_p A^2 + M_M}{L_E M_M C_p}} \quad \text{och} \quad Q = \frac{2\pi f_u M_M}{R_M}.$$

Detta lågpasfilter utnyttjas lämpligen som delningsfilter, varvid en mellanregisterhögtalare får återge toner över denna gränshfrekvens. Ett lämpligt delningsfilter fås om Q-värdet minskas, genom att öka R_M omkring övre gränshfrekvensen [obs det verkliga, ej genom specialdrivning/ med dämpmaterial bakom högtalarelementet och kombinera detta med en lågpas RC-länk i förstärkaren. Denna och andra metoder att påverka filterfunktionen exemplifieras i samband med de olika försöken.

6 DISTORSION VID SPECIALDRIVNING

Distorsion hos högtalarsystem beror bl a på olinjäriteter i överföringsfaktorn A och de mekaniska parametrarna M_{Mtot} , R_{Mtot} och C_{Mtot} , samt membranets styvhet och dess fasthet i föreningen med talspolen. Vid specialdrivning tillkommer de skenbara mekaniska parametrarna, vars linjäritet beror på A .

Vid normal drivning av ett slutet högtalarsystem kan membranhastig-

heten tecknas:
$$V_{\text{Mnorm}} = \frac{U_{\text{in}} A / R_E}{s M_{\text{Mtot}} + R_{\text{Mtot}} + 1 / s C_{\text{Mtot}}}$$

Härur framgår olinjäriteternas inverkan genom A och de mekaniska parametrarna. Om de skenbara parametrarna är dominerande vid specialdrivning —vilket ofta är fallet— kan membranhastigheten approximeras till:

$$V_{\text{Mspec}} = \frac{U_{\text{in}} G A}{s A^2 C_p + A^2 / R_p + A^2 / s L_p} = \frac{U_{\text{in}} G / A}{s C_p + 1 / R_p + 1 / s L_p}$$

Även här inverkar A , medan de verkliga mekaniska parametrarnas inverkan är av underordnad betydelse, då de ju domineras av de skenbara. Man kan alltså förvänta, att den del av distorsionen som beror på de verkliga parametrarnas olinjäriteter kommer att minska vid specialdrivning.

Minskning av distorsionen har också uppmätts vid låga frekvenser [där den normalt är hög], då specialdrivning av goda bashögtalarelement har provats. Vid högre frekvenser kan en viss ökning uppträda, speciellt 2a-tonsdistorsionen strax under den övre gränshfrekvensen. Det beror på att talspoleinduktansen —som har stor inverkan här— är olinjär då membranet gör kraftiga utslag. Induktansens "järnkärna" —och därmed dess värde— minskar ju då talspolen rör sig ut från magneten och ökar då den rör sig in. Denna olägenhet kan minskas genom att välja högtalarelement, där talspoleinduktansen är låg eller delvis kortsluten, t ex genom en kopparhylsa omkring magnetkärnan. Den övre gränshfrekvensen hamnar då högre upp, och eftersom membranrörelserna då är mindre, blir även distorsionen mindre. Ett annat mycket verkningsfullt sätt att minska 2a-tonsdistorsionen är att använda två högtalarelement i serie- eller parallellkoppling. Om man då vänder det ena elementet, och låter det arbeta med "baksidan" utåt [givetvis måste även polariteten på den elektriska anslutningen ändras], så kommer den ena talspolen att röra sig mot magneten, samtidigt som den andra rör sig från magneten, vilket resulterar i att 2a-tonsdistorsionen utsläcks. Detta kommer närmare att tas upp i samband med försöken, se avsnitt 8.

7 REALISERING AV KOPPLINGAR FÖR SPECIALDRIVNING

Specialdrivning innebär —som tidigare nämnts— att högtalarelementet drivs med en förstärkare med förstärkning och utgångsimpedans enligt nedan.

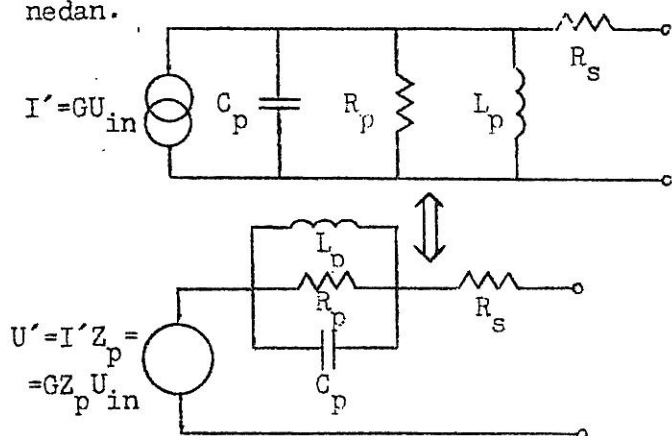


Fig 19. Förstärkare vid specialdrivning.

R_s skall vara lika stor som talspolens resistans men negativ, varvid man kan ändra på högtalarelementets svängande massa genom C_p , dämpning genom R_p och fjädning genom L_p .

Denna speciella förstärkare kan realiseras på ett flertal olika sätt, och nedan exemplifieras både bra och dåliga.

7.1 Direkt realisering

Förstärkare med negativ utgångsresistans har tidigare gjorts. Det ligger då nära till hands, att efter denna förstärkare koppla en parallellresonanskrets, och att före förstärkaren koppla ett bandpassfilter.

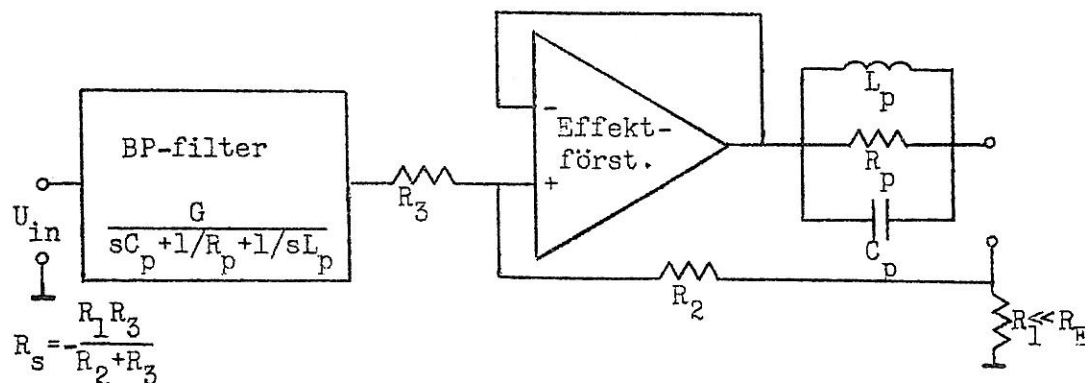


Fig 20. Direkt realisering av "specialförstärkare".

Nackdelar:

- Ur praktisk synpunkt mycket olämpliga värden på C_p och L_p .
- Bandpassfiltret måste överensstämma med Z_p .
- Effekt förlust i R_p .

7.2 Koppling med bandpassfilter som både ger önskad förstärkning och utgångsimpedans

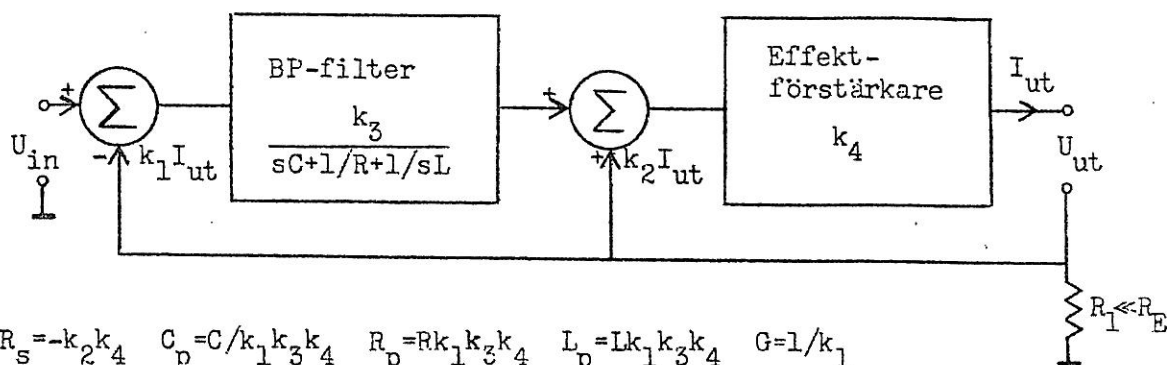


Fig 21.

Fördelar:

- a/ Inga impedanser på effektsidan.
- b/ Förstärkning och utimpedans bestäms på samma ställe; i BP-filtret.

7.2.1 Realisering med DIG bandpassfilter

Om bandpassfiltret i kopplingen ovan utförs med ett s k DIG-filter erhålls mycket trevliga egenskaper.

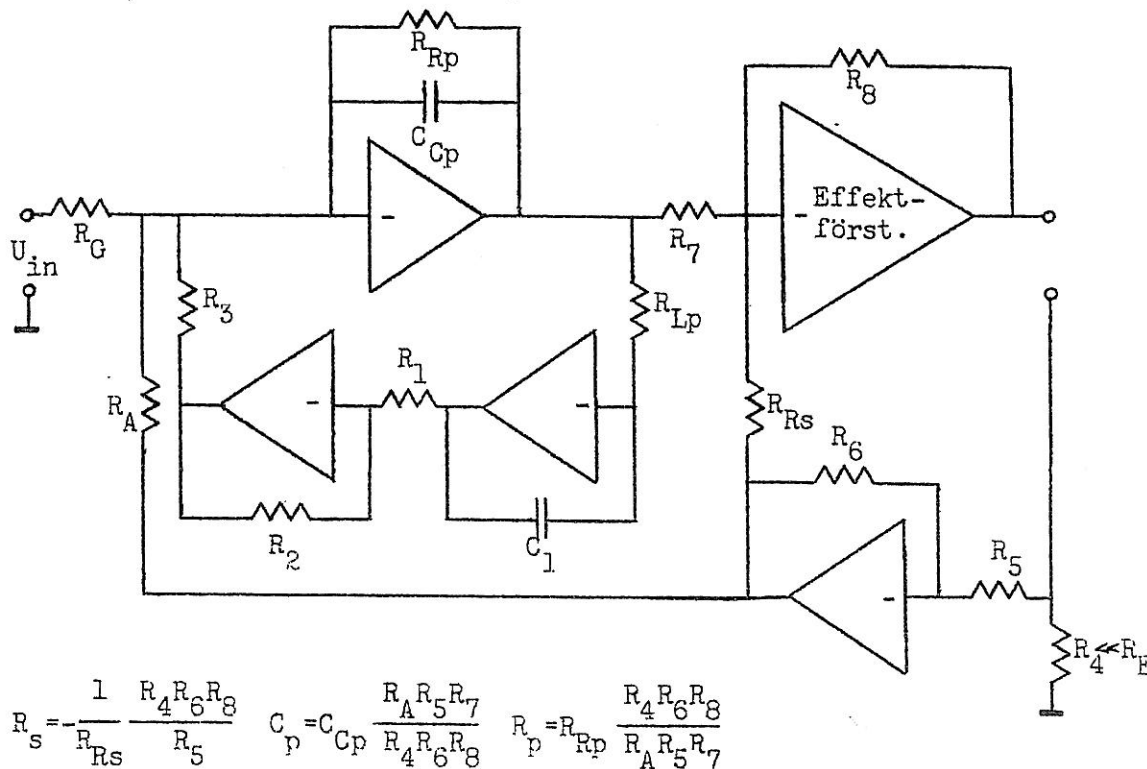


Fig 22a.

Fördelar:

a/ Aktivt, d v s inga induktanser behövs.

b/ Varje parameter $\sqrt{R_s}$, C_p , R_p , L_p och G kan ställas in oberoende av varandra med en komponent.

Nackdel:

C_p bestäms med en kondensator.

Det skulle i vissa sammanhang eventuellt kunna vara en fördel om även C_p kunde varieras med en resistans, vilket kan uppnås genom följande ändring:

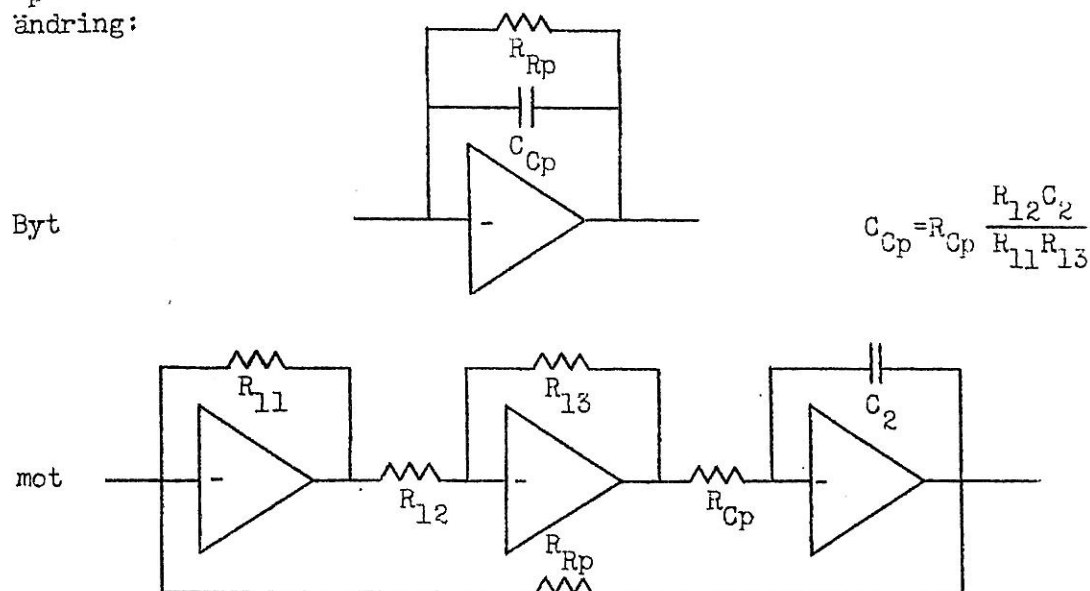


Fig 22b. Ändring i schemat i fig 22a för att även C_p skall kunna varieras med en resistans.

7.2.2 Realisering med färre operationsförstärkare

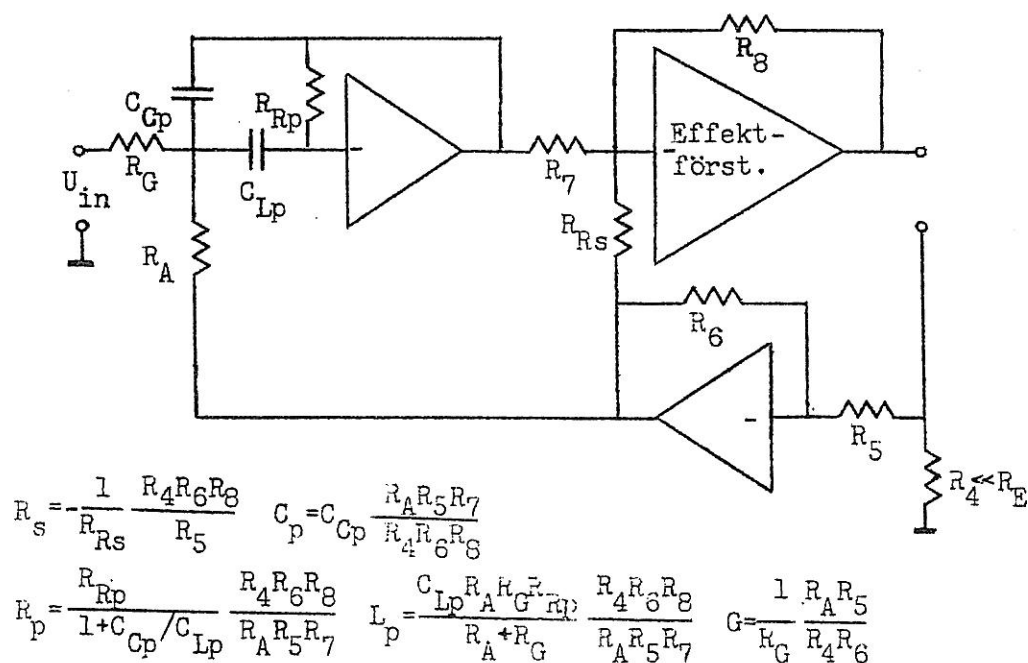


Fig 23.

Fördelar:

a/ Aktivt, d v s inga induktanser behövs.

b/ Om L_p ej önskas [d v s ingen fjädringsändring, C_{Lp} kortsluten], så kan varje parameter ställas in oberoende av varandra med en komponent

Nackdel:

Parametrarna C_p , R_p , L_p och G kan ej varieras oberoende av varandra med endast en komponent.

Denna realisering är alltså något besvärlig att experimentera med och att trimma, men önskas endast en bestämd dimensionering, duger den gott.

7.2.3 Ännu enklare realisering

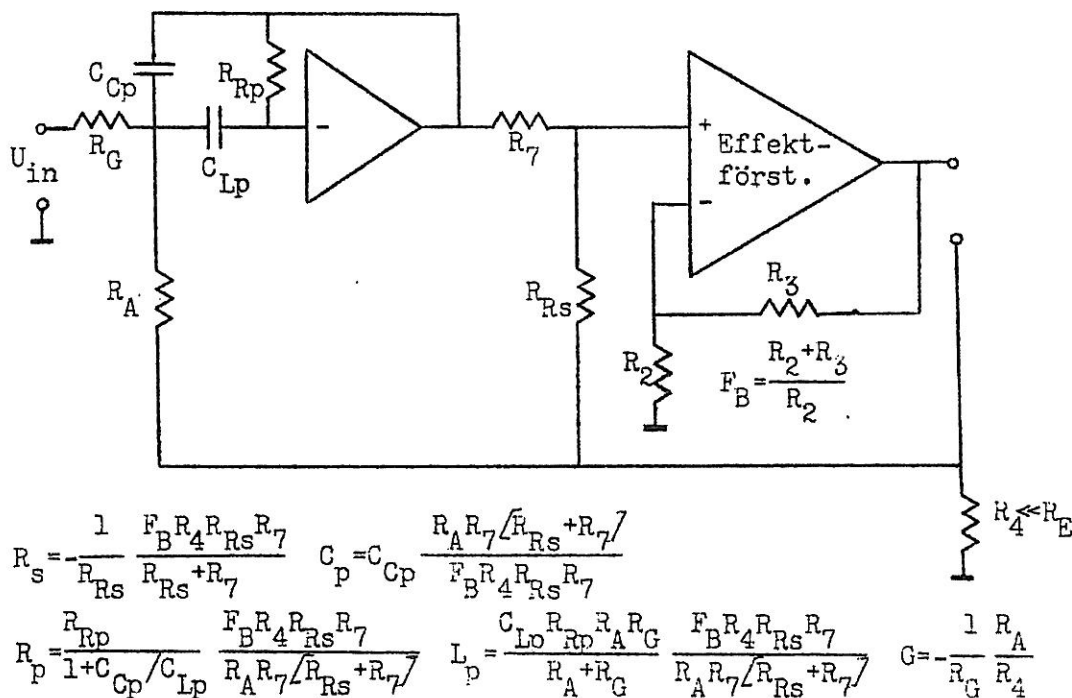


Fig 24.

Fördelar:

a/ Aktivt, d v s inga induktanser behövs.

b/ Få komponenter.

Nackdel:

Jämfört med realiseringen i 7.2.2, är även R_s kopplat med de övriga parametrarna, varför eventuell trimning eller dvlikt blir omständigt.

7.3 Ett par andra kopplingar

Dessa ges bara som exempel på att flera möjligheter till realisering finns. De har inga fördelar framför tidigare kopplingar.

7.3.1 Realisering utan fjädringsändring

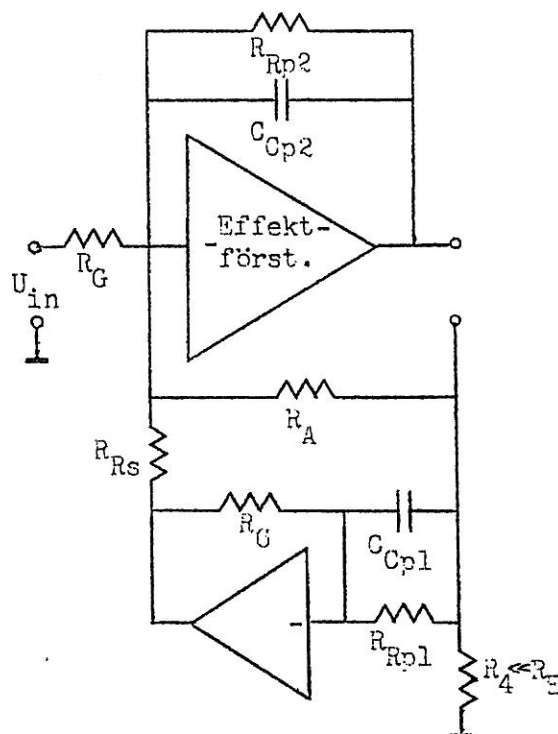


Fig 25.

Fördel:

Aktivt, d v s inga induktanser behövs.

Nackdelar:

a/ Fjädringsändring är ej möjligt $[L_p = \infty]$.

b/ Innehåller differentiator.

c/ $R_{Rp1} C_{Cp1} = R_{Rp2} C_{Cp2}$ krävs.

7.3.2 Något bättre realisering, dessutom även med fjädringsändring

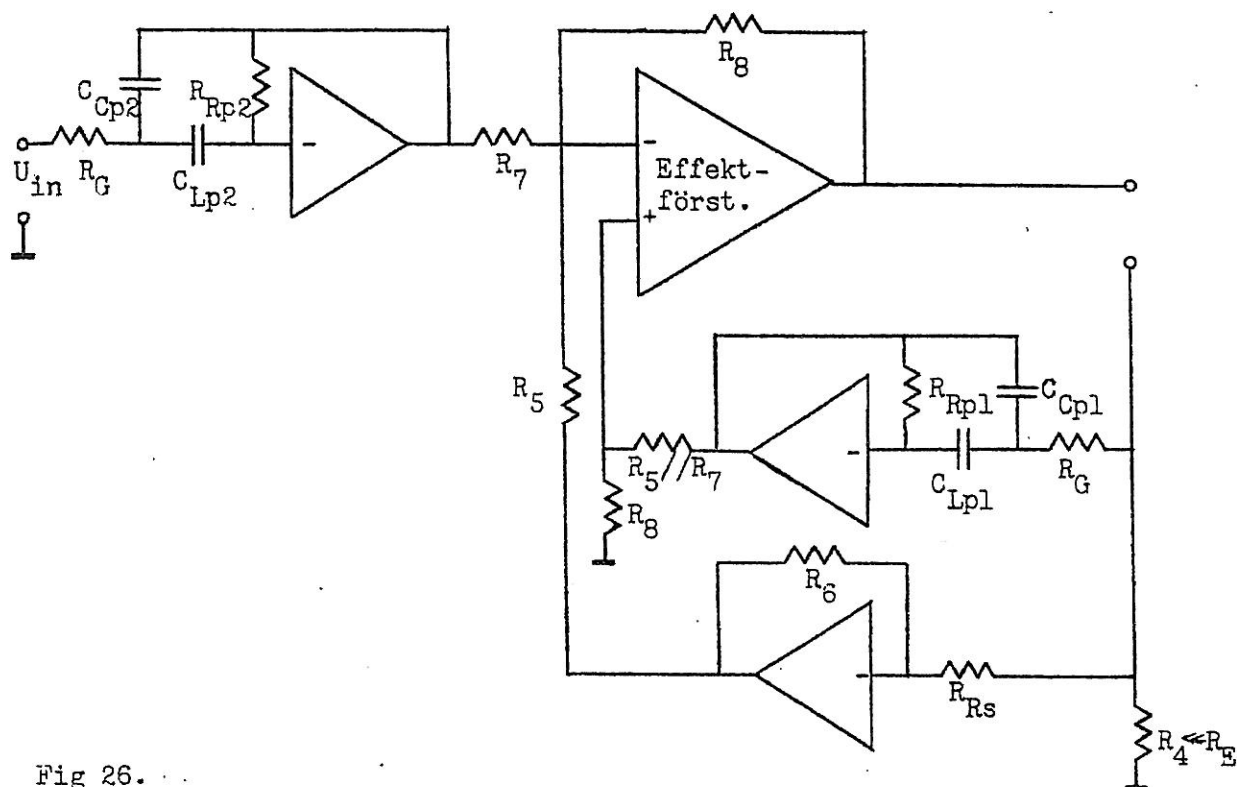


Fig 26. . .

Fördel:

Aktivt, d v s inga induktanser behövs.

Nackdel:

Likadant bandpassfilter på två ställen krävs.

8 EXPERIMENT, FÖRSÖK OCH KOMPLETTA PROTOTYPER

8.1 Inledande försök med en enkel radiohögtalare

Philips högtalarelement AD 3700M befanns ha följande data:

$$M_M = 3.2 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$A = 2.9 \text{ Tm}$$

$$R_M = 0.67 \text{ kg/s}$$

$$R_E = 3.4 \text{ ohm}$$

$$C_M = 1.2 \cdot 10^{-3} \text{ m/N}$$

Detta ger —vid normal drivning— en resonansfrekvens på 81 Hz med ett Q-värde på 0.53, då elementet är fritt eller monterat i en oändlig baf-fel. Genom specialdrivning ökades massan till 23.5 g och totala dämpningen till 2.3 kg/s, varvid resonansfrekvensen borde bli 30 Hz och Q-värdet 1.5 [godtyckligt valda värden]. Någon fjädringsändring gjordes ej. Nedan har uppritats de tonkurvor, som dessa båda fall borde ge [kurva a och b]. Eftersom ingenting reellt gjordes åt själva högtalarelementet, kan man förvänta att spänningen över högtalarelementet skall motsvara skillnaden mellan dessa kurvor [kurva c].

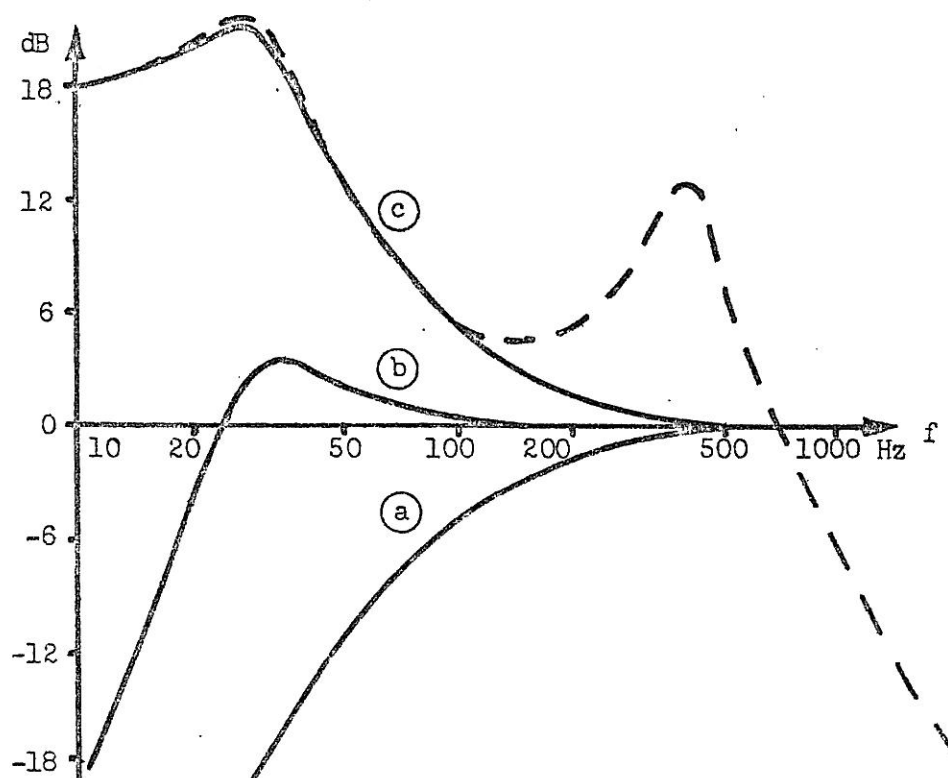


Fig 27. Förväntade tonkurvor och spänning över högtalarelementet. Streckad kurva: uppmätt spänning över högtalarelementet.

Den uppmätta spänningen har streckats i figuren, och överensstämmelsen är total vid låga frekvenser. På grund av talpoleinduktansen fås — såsom redogjorts för i avsnitt 5— en övre gränshfrekvens med tämligen

högt Q -värde vid 400 Hz. Olika försök att påverka detta uppförande har gjorts, och resultaten visas i fig 29 och fig 30.

a/ Högtalarelementet har parallellkopplats med en RC-länk, så att impedansökningen vid högre frekvenser undviks. Detta löser dock ej problemet, ty L_E elimineras ej direkt, vilket framgår ur det förenklade ekvivalenta schemat nedan. RC-länken borde endast kopplas över $R_E L_E$, vilket dock inte är möjligt.

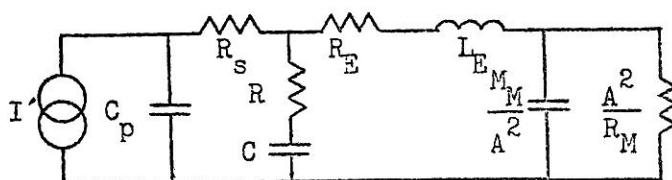


Fig 28. Förenkladt ekvivalent schema gällande omkring övre gränzfrequensen, då en RC-länk kopplats över högtalarelementet.

b/ L_E borde kunna elimineras, genom att förse förstärkaren med en negativ induktans i serie med utgången. /Det var lätt att realisera med den använda kopplingen./ Emellertid visade sig L_E vara både olinjär och förlustbehäftad, varför kompenseringen blev svår. Kurvan nedan har uppmätts för ett fall där även förlusterna försökts att kompensera.

c/ Enligt förutsättningarna för specialdrivning skall talspoleresistansen R_E helt elimineras av R_S . Detta är dock ej speciellt kritiskt, och kurvan nedan visar ett fall där resistansen $R_E + R_S$ — som borde vara noll — har valts till cirka 30% av talspoleresistansen. Resonanstoppen minskas kraftigt, men även nivån vid lägre frekvenser påverkas.

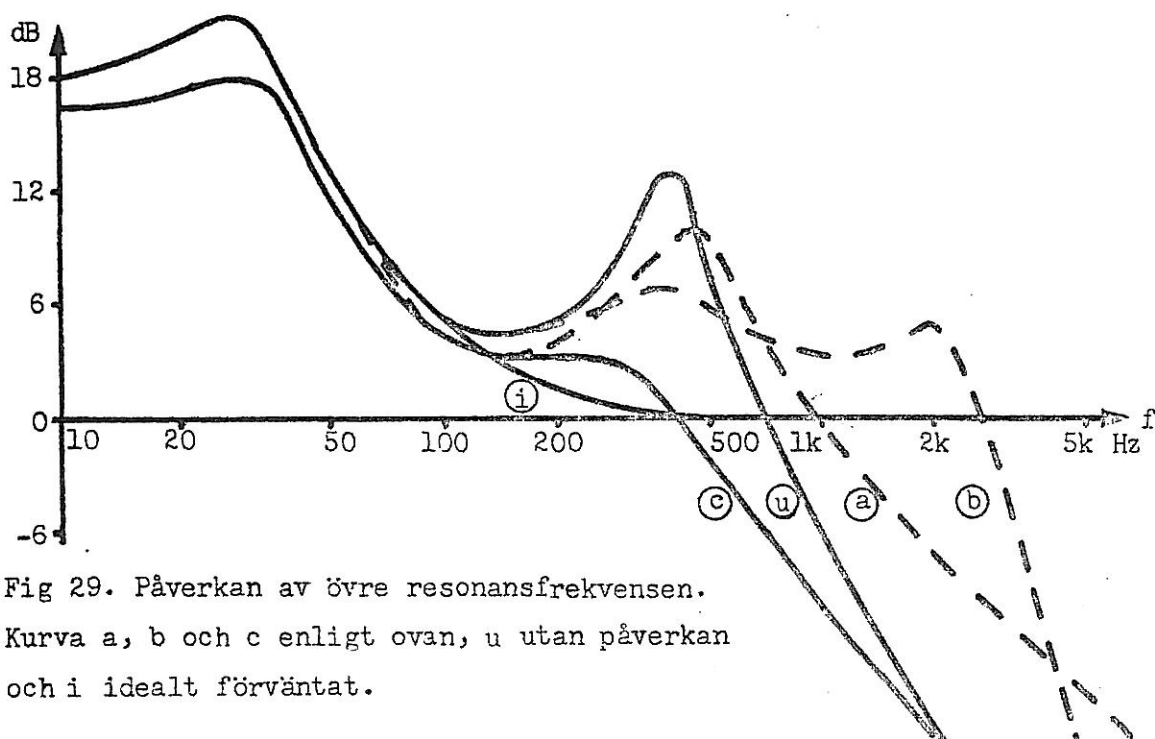


Fig 29. Påverkan av övre resonansfrekvensen. Kurva a, b och c enligt ovan, u utan påverkan och i idealt förväntat.

d/ Genom att öka högtalarelementets verkliga dämpning R_M —t ex genom införande av dämpmaterial bakom elementet— kan resonanstoppens Q -värde minskas. Detta ger givetvis även dämpning vid lägre frekvenser, vilket får tas hänsyn till vid valet av dämpningens ökning genom specialdrivning. Nedan visas avvikelser från den idealt förväntade tonkurvan vid olika mängd av dämpmaterial bakom elementet.

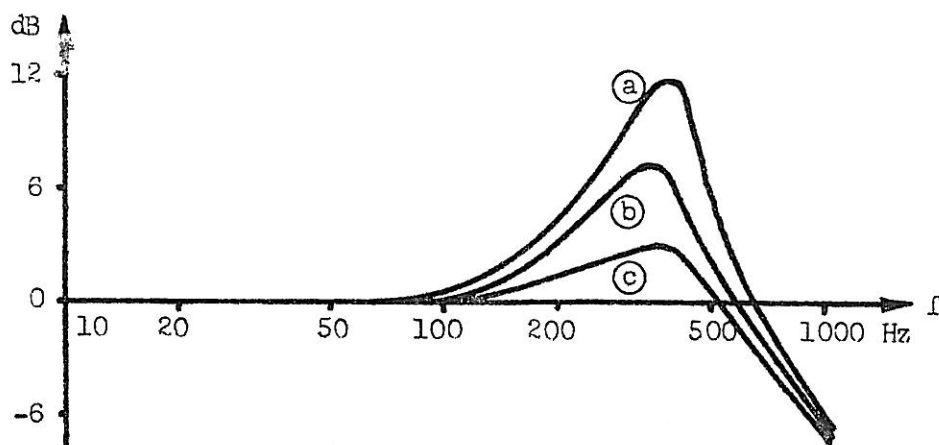


Fig 30. Avvikelse från idealt förväntad tonkurva omkring övre gränshäufigkelsen. Kurva a utan extradämpning, b med viss extradämpning och c med mer extradämpning.

8.2 Ett 12" bashögtalarelement i sluten låda

Elementet [Philips AD 5201S/77] monterades i en 37 liters sluten låda. Vid normal drivning var resonansfrekvensen $f_0=70$ Hz och $Q=0.9$. Den svängande massan och dämpningen ändrades genom specialdrivning enligt nedanstående tabell.

storhet	fall a	fall b	fall c
	"verkligt värde"	ändring till	ändring till
f_0	70 Hz	40 Hz	20 Hz
Q	0,9	0,7	0,7
M_{Mtotal}	40 g	130 g	520 g
R_{Mtotal}	17 kg/s	48 kg/s	95 kg/s

Tonkurvor uppmätta i ekofritt rum för fallen i tabellen visas i fig 31.

Förstärkareffekten var ej tillräcklig, för att distorsionen vid låga frekvenser och stora membranamplituder skulle kunna studeras. För övrigt både ökade och minskade distorsionen i jämförelse med normal drivning av högtalaren [beroende på frekvens, 2a eller 3e ton samt effekt], dock ej i någon avsevärd omfattning.

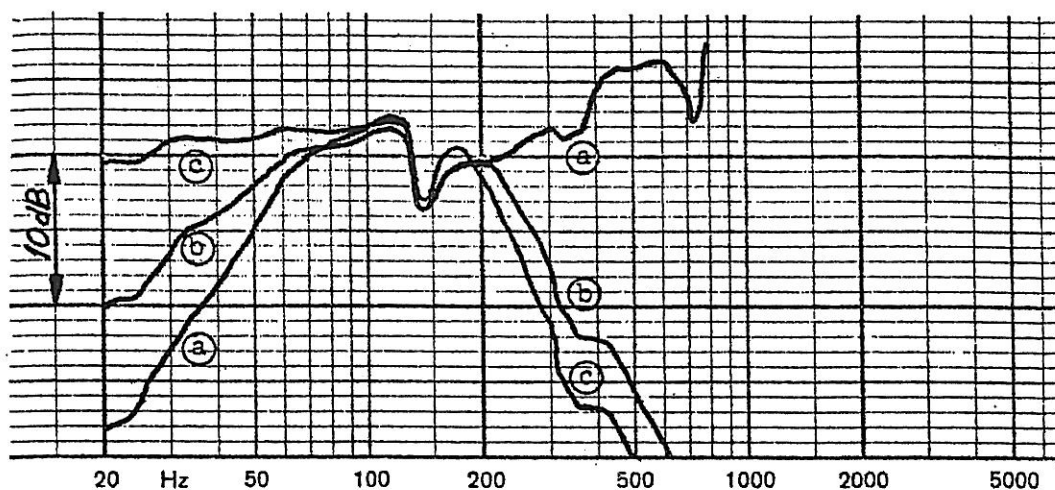


Fig 31. Tonkurvor för högtalaren vid a normal drivning och b,c två fall av specialdrivning.

8.3 Ett 8,5" bashögtalarelement i basreflexlåda.

Basreflexlådan på 43 liters volym dimensionerades —tillsammans med ett 2a ordningens högpassfilter i förstärkaren— för att uppföra sig som ett 6e ordningens Butterworthfilter med gränshfrekvensen 20 Hz. Elementets svängande massa, dämpning och fjädring ändrades genom specialdrivning till önskade värden. Tonkurvor uppmätta i ekofritt rum visas nedan, medan motsvarande teoretiskt beräknade kurvor har streckats.

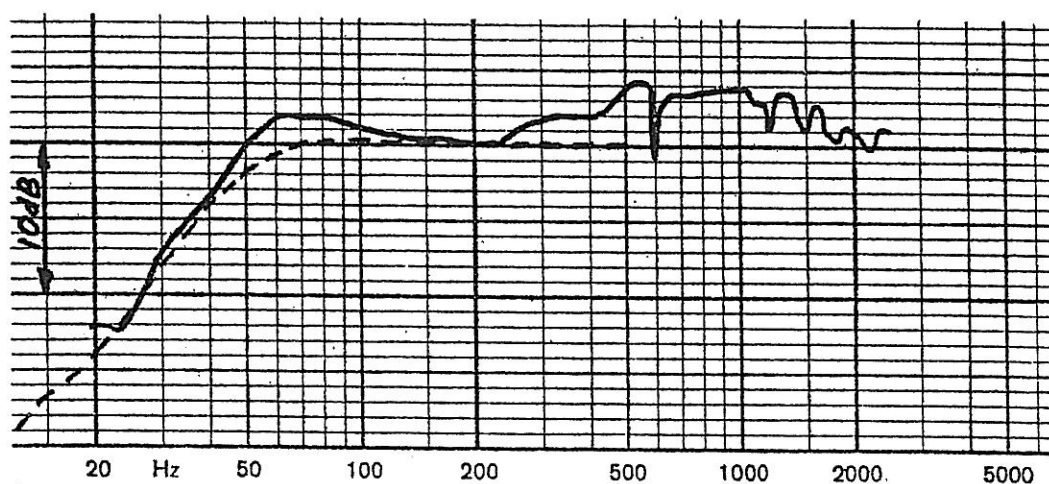


Fig 32. Högtalarens tonkurva vid drivning med konstant spänning; uppmätt [heldragen] och teoretiskt beräknad [streckad].

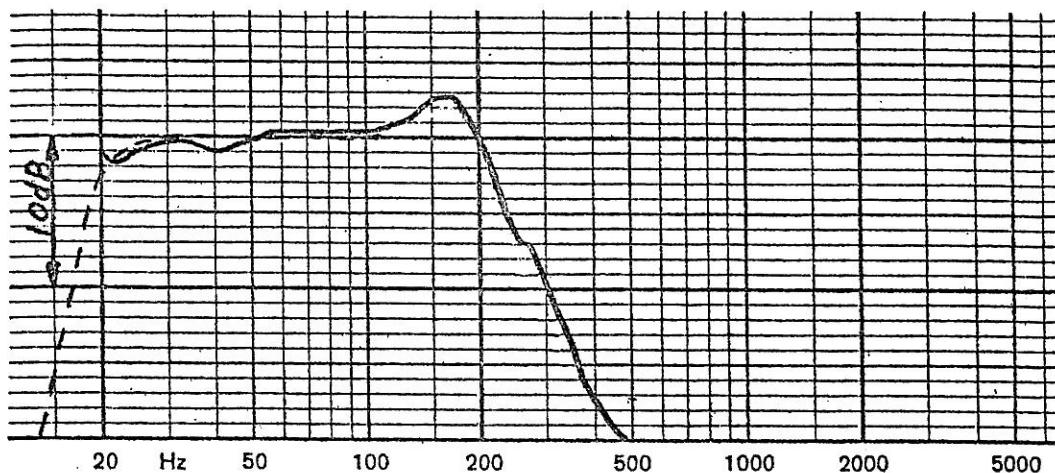


Fig 33. Högtalarens tonkurva vid specialdrivning; uppmätt [heldragen] och teoretiskt beräknad [streckad].

Summan av 2a och 3e-tonsdistorsionen vid en akustisk utnivå av 90 dB spl, på 1m avstånd, visas i fig 34. Jämfört med drivning med konstant spänning [streckad kurva] minskar distorsionen vid låga frekvenser, medan den ökar oacceptabelt omkring 100 Hz [endast 2a-tonsdistorsionen] på grund av talspoleinduktansens olinjäritet.

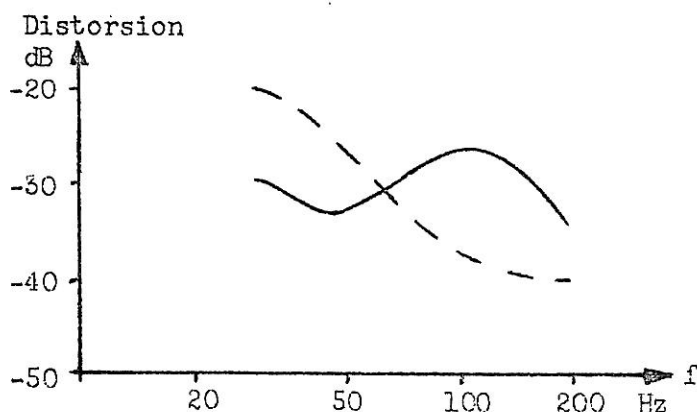


Fig 34. Högtalarens distorsion vid 90 dB_{spl} utnivå. Streckad kurva gäller för normal drivning och heldragen för specialdrivning.

8.4 Dubbla bashögtalarelement

Såsom skisserats i avsnitt 6 kan 2a-tonsdistorsionen —och särskilt ökningen strax under den övre gränshfrekvensen— minskas genom att två högtalarelement används, och det ena vändes med "baksidan" utåt. Denna symmetriska koppling är mycket effektiv och eliminerar helt olägenheten med 2a-tonsdistorsionen. I fig 35 visas 2a-tonsdistorsionen vid parallellkoppling av två stycken 6.5" bashögtalarelement, Philips AD 7036W8. I det ena fallet [streckad kurva] är båda elementen monterade åt samma

håll, och i det andra fallet [heldragen kurva] är ett av elementen vänt. Elementen drevs med specialdrivning, och den akustiska utnivån var i båda fallen $90 \text{ dB}_{\text{spl}}$ vid 1 m avstånd.

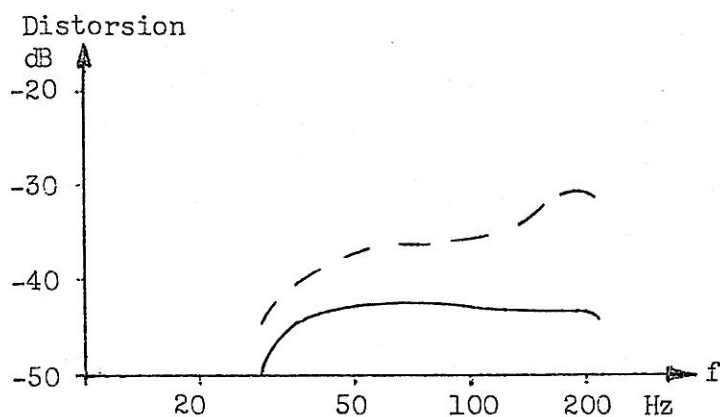


Fig 35. 2a-tonsdistorsionen vid dubbla högtalarelement och specialdrivning. Streckad kurva gäller då båda elementen var monterade åt samma håll och heldragen kurva då det ena elementet var vänt.

8.5 Komplet prototyp med 40 liters nettovolym

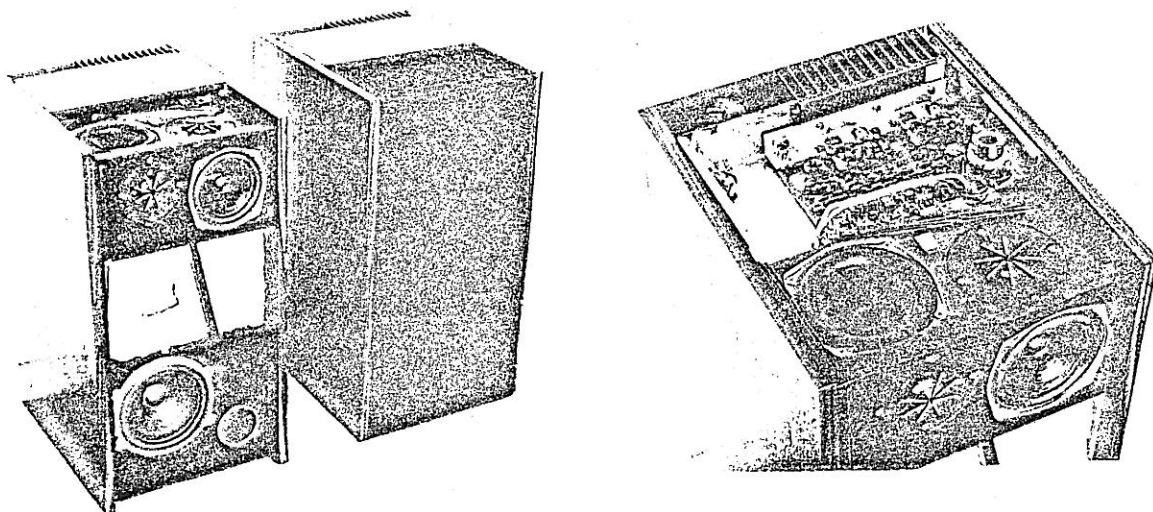


Fig 36. De beskrivna 40 liters prototyperna samt den inbyggda elektroniken.

2 st prototyper av denna typ har byggts. De innehåller högtalarelement avsedda att återge hela det hörbara tonregistret samt effektförstärkare —60 W för basdelen och 60 W för mellan- och diskantdelen— och nödvändiga filter.

Följande högtalarelement ingår och används för angivna frekvensområden:

2 st 6,5" baselement	Isophone PSL170/30	20—300 Hz
2 st 5" mellanregisterelement	Kef B110	300—2500 Hz
2 st 1" "dome-tweeter"	Pioneer DS17	2500—18000 Hz

Basdelen är ett basreflexsystem med 40 liters nettovolym, där ett av elementen vänts med "baksidan" utåt. Det är dimensionerat för att — tillsammans med ett högpassfilter i förstärkaren— ha egenskaper motsvarande ett 6e ordningens Butterworthfilter med gränzfrequensen $[-3 \text{ dB}]$ vid 20 Hz. Systemet kan även vid de lägsta frekvenserna prestera en akustisk utnivå om $90 \text{ dB}_{\text{spl}}$ på 1 m avstånd i fritt fält vid 4π strålningvinkel, vilket motsvarar drygt 100 dB akustisk uteffekt relativt 1 pW [som är den referensnivå som Statens Provningsanstalt använder vid högtalarmätningarna i efterklangsrum]. Schema över den i högtalarna använda elektroniken, som är gjord med tanke på att även kunna användas vid experiment, visas i fig 39.

Om de två bashögtalarelementen betraktas som ett element, blir dess parametrar:

svängande massa $M_M = 24 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$	membranarea $S = 31 \cdot 10^{-3} \text{ m}^2$
dämpning $R_M = 2.4 \text{ kg/s}$	överföringsfaktor $A = 8.8 \text{ Tm}$
fjädring $C_M = 0.7 \cdot 10^{-3} \text{ m/N}$	talspoleresistans $R_E = 6.4 \text{ ohm}$

Dessa värden ger i basreflexlådan egenskaper motsvarande pol-nollställeskonfigurationen enligt fig 37 vid drivning med konstant spänning, medan önskad konfiguration visas i fig 38.

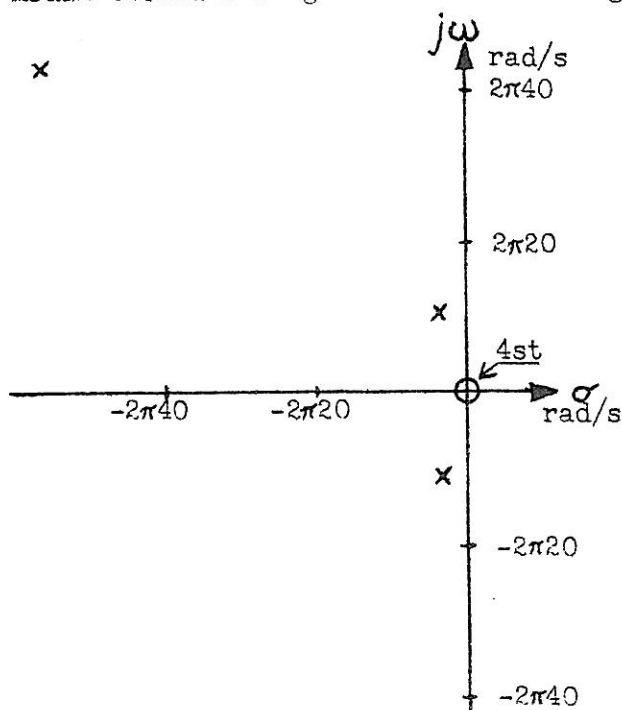


Fig 37. Pol-nollställeskonfiguration vid normal drivning.

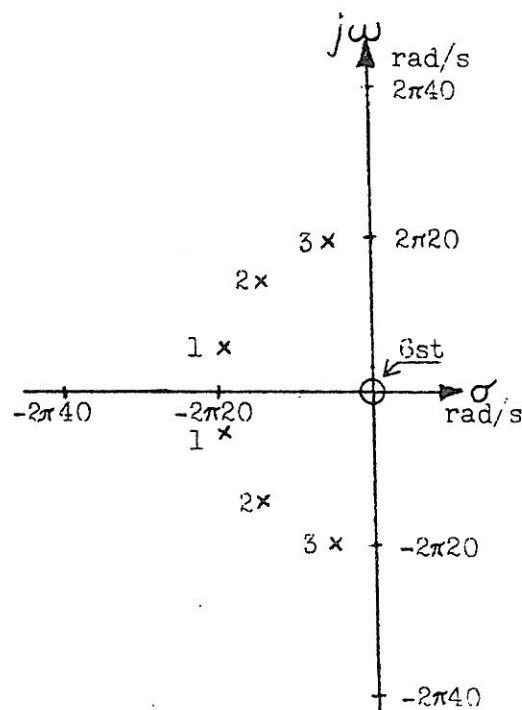


Fig 38. Önskad pol-nollställeskonfiguration.

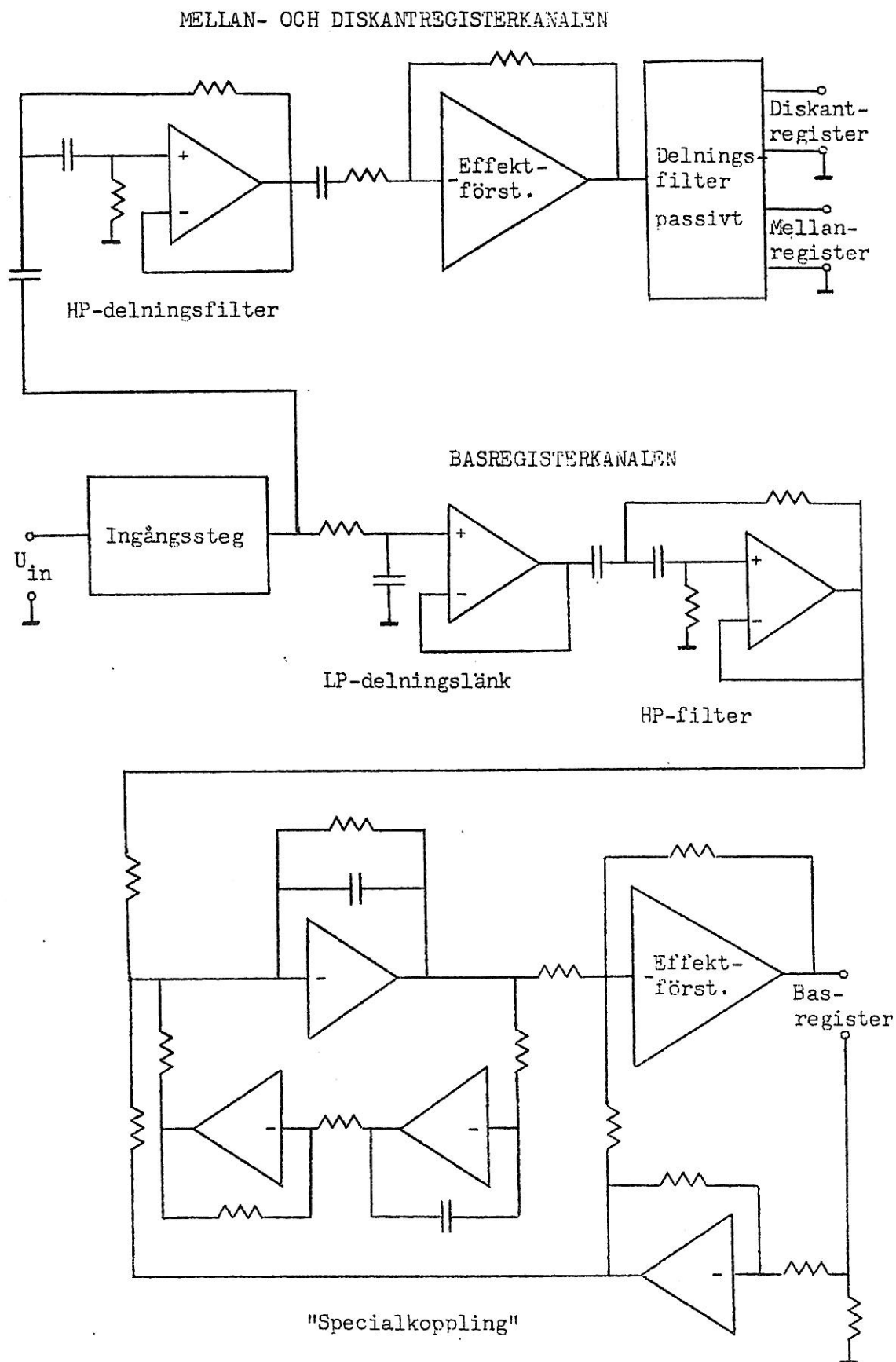


Fig 39. Schema över elektroniken som används i prototyphögtalarna.

Genom att med specialdrivning tillordna M_M , R_M och C_M nya värden, kan de ursprungliga polparen flyttas till 2 av de 3 önskade polparen. Det 3e polparet åstadkoms med ett filter i förstärkaren. Det finns alltså 3 olika möjligheter att få den önskade konfigurationen. I detta fall har valts att låta de två polparen med högst Q-värde — d v s polpar 2 och 3— utgöras av basreflexsystemet tillsammans med specialdrivningen, och att låta polpar 1 utgöras av ett filter i förstärkaren. Denna lösning kräver de största förändringarna av M_M , R_M och C_M , varför man kan förvänta sig lägre distorsion vid låga frekvenser än för de andra möjligheterna. Alla tre möjligheterna har testats och mätningar bekräftar detta antagande. För att få denna polkonfiguration ändrades bashögtalarelementens mekaniska parametrar genom specialdrivning till:

$$M_{Mtot} = 412 \cdot 10^{-3} \text{ kg}$$

$$R_{Mtot} = 91 \text{ kg/s}$$

$$C_{Mtot} = 157 \cdot 10^{-6} \text{ m/N}$$

Fig 40 visar beräknade och uppmätta tonkurvor vid drivning med konstant spänning och vid specialdrivning samt spänningen över högtalarelementen.

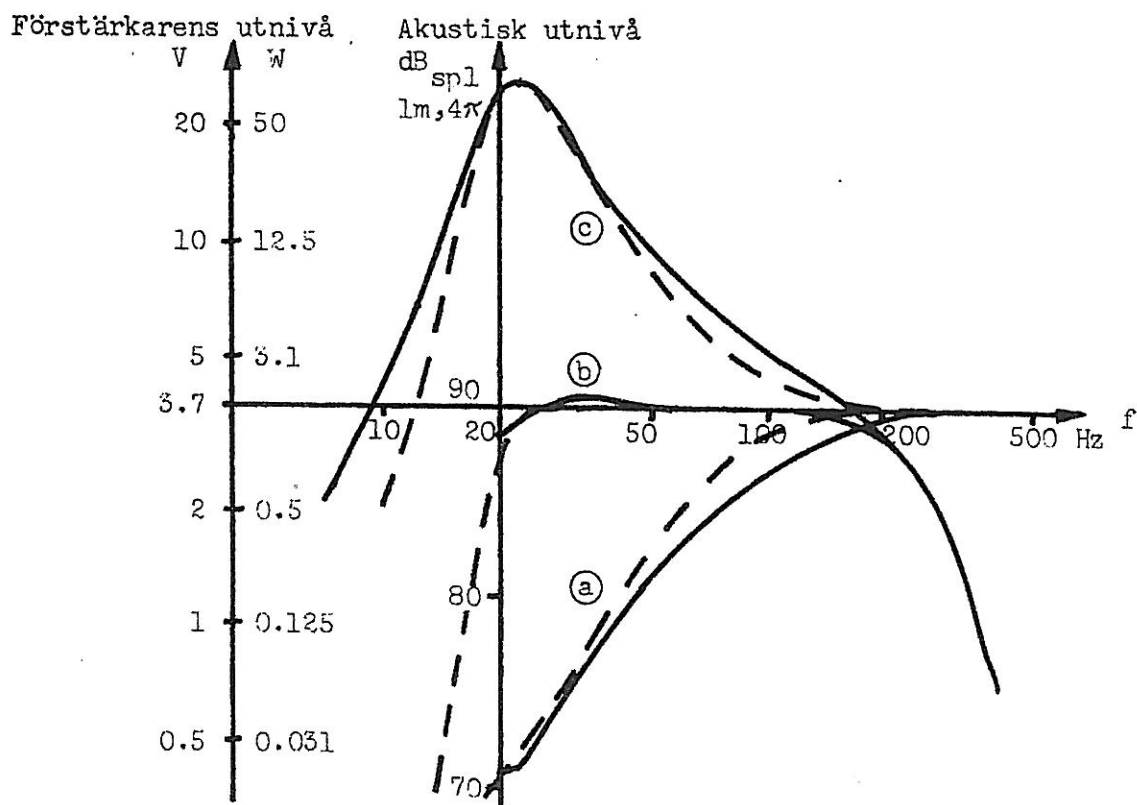


Fig 40. Tonkurvor för bassystemet, a vid normal drivning och b vid specialdrivning, samt spänningen över högtalarelementen, c. Teoretiskt beräknade kurvor har streckats.

Härur framgår bland annat den trevliga egenskapen, att specialdrivning ger självjustering i vissa avseenden. Avvikelsen från beräknat uppförande —vid normal drivning— omkring 50 till 100 Hz —vilken ju beror på att den uppställda modellen med de angivna värdena ej helt stämmer överens med verkligheten— kompenseras helt genom specialdrivningen. Med specialdrivning är ju den skenbara massan helt dominerande vid dessa frekvenser, till skillnad mot normal drivning då flera av de verkliga parametrarna bestämmer tonkurvan här.

Även membranamplituden har beräknats, och nedan visas resultatet för 90 dB akustisk utnivå.

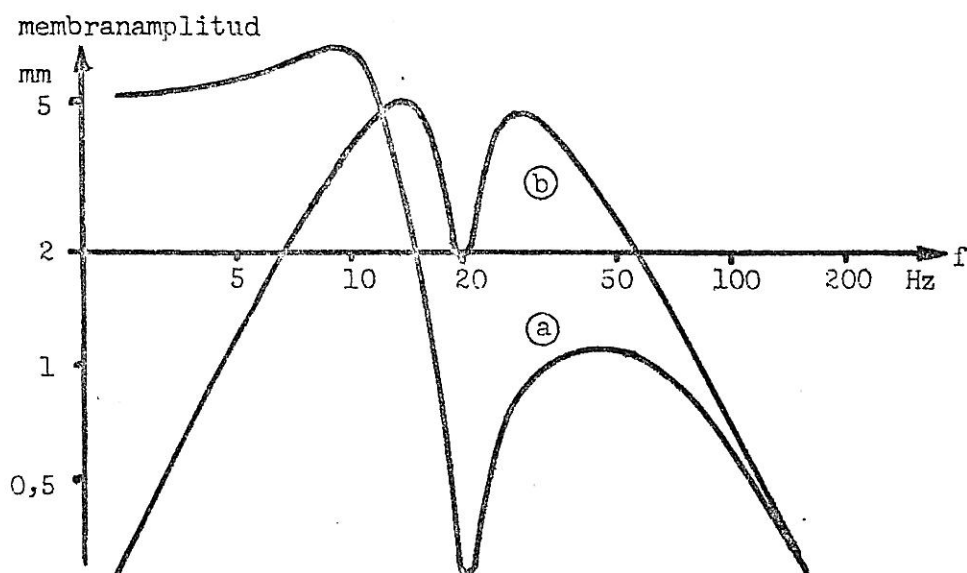


Fig 41. Högtalarens membranamplitud, a vid normal drivning och b vid specialdrivning. Den akustiska utnivån motsvarar tonkurvorna i fig 40.

Bashöjningen [se fig 40] kan tyckas stor, och skulle därmed eventuellt kunna orsaka olägenheter, vilket dock ej är fallet. För det första är högtalarelementens verkningsgrad vid högre frekvenser tämligen stor, och eftersom "höjningen" relateras till nivån vid dessa frekvenser —som alltså är låg— så framstår bashöjningen som stor, och för det andra räcker förstärkareffekten just till för att ge $90 \text{ dB}_{\text{spl}}$ vid de mest effektkrävande frekvenserna [20-25 Hz]. Mindre bashöjning hade behövts, om en större ljudvolym hade valts. Högre utnivå hade dock ej kunnat erhållas, ty omkring 30 Hz begränsas utnivån av att maximal membranamplitud [5 mm] uppnås vid 90 dB utnivå. Vid ökande frekvens ökar dock den möjliga uteffekten för systemet. Över 50 Hz kan minst $96 \text{ dB}_{\text{spl}}$ vid 1 m avstånd och 4π strålningsvinkel-avges, och över 80 Hz minst 100 dB.

Nedan visas ton- och distorsionskurvor för basdelen uppmätta i ekofritt rum. Mätmikrofonen har placerats nära [0.32 m] bassystemet, för att rummets ofullkomligheter vid låga frekvenser ej skall störa mätningarna.

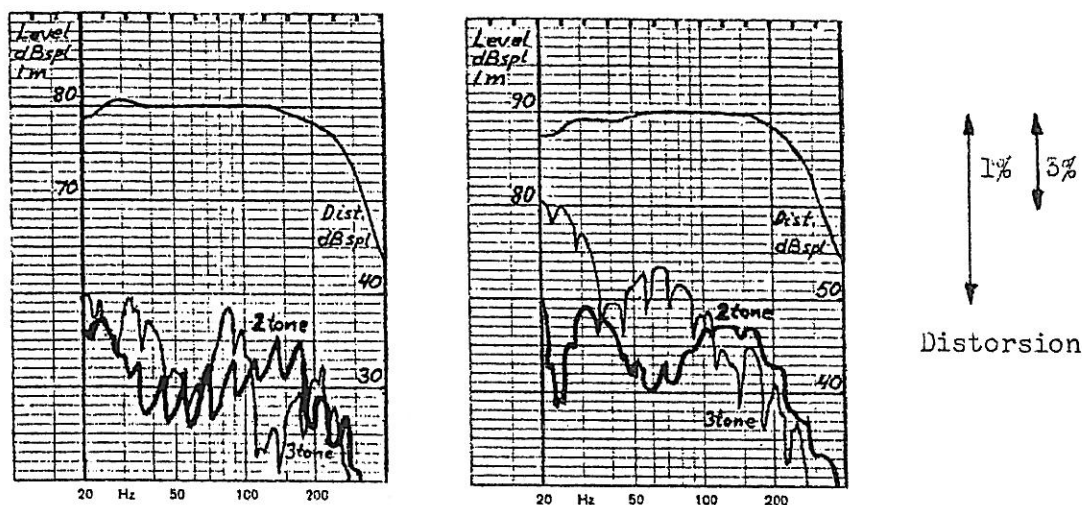


Fig 42. Ton- och distorsionskurvor för basdelen, vid 80 och 90 dB_{spl} akustisk utnivå.

Den kompletta högtalaren har även uppmäts med smalbandigt brus i Statens Provningsanstalts efterklangrum, enligt samma metod och med samma utrustning som använts vid högtalarredovisningen i Stereo Hi Fi handboken [utgiven av Svenska Hi Fi Institutet]. Metoden är ej helt invändningsfri vid frekvenser under 80 Hz, beroende på brusets bandbredd [30 Hz] och rummets inverkan, men kurvorna nedan är dock direkt jämförbara de i Stereo Hi Fi handboken. [Vid uppmätningen av den här aktuella högtalaren användes dock kortare sveptid, varför brusets slumpartade karaktär får större inverkan, d v s kurvan blir något hackigare].

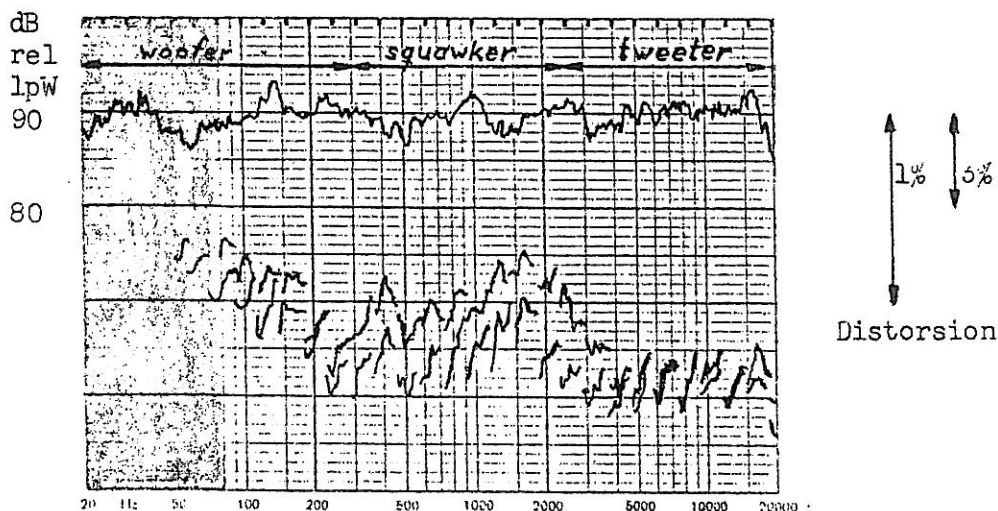


Fig 42. Den kompletta högtalaren uppmätt i efterklangrum.

Distorsionskurvorna har 20 dB högre förstärkning än tonkurvan, och visar summan av 2a- och 3e-tonsdistorsionen. Den undre kurvan gäller för den akustiska uteffekt som tonkurvan anger [ca 1 mW], medan den övre gäller för 10 dB högre uteffekt [ca 10 mW].

Den totala distorsionen [2a+3e ton] vid 80 och 90 dB_{spl} vid specialdrivning jämförs med distorsionen vid drivning med försumbar utimpedans i fig 43. Därur framgår att en väsentlig minskning av distorsionen erhålls vid låga frekvenser.

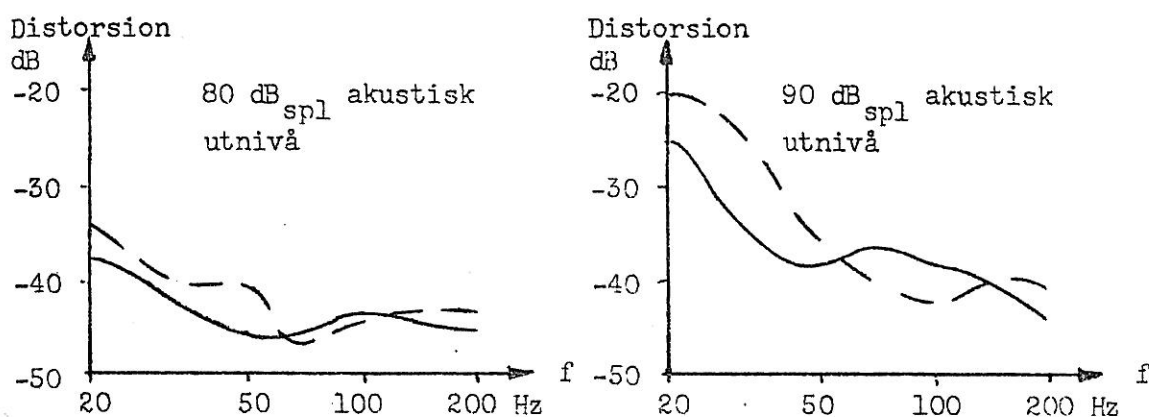


Fig 43. Högtalarens distorsion vid 80 och 90 dB_{spl}, jämförd med distorsionen då högtalaren drivs med konstant spänning [streckad kurva].

Slutligen skall nämnas att dessa högtalare förutom att ha utmärkta uppmätta data även gör ett mycket positivt lyssningsintryck. Den akustiska uteffekten i basregistret har visat sig räcka väl till för avancerad "hemmalyssning".

8.6 Kompletta prototyp med 20 liters nettovolym

Även 2 stycken prototyper av denna typ har byggts. Dessa har mycket gemensamt med de större prototyperna [bland annat elektroniken samt mellan- och diskantdelen], varför de ej kommer att beskrivas lika utförligt.

Följande högtalarelement ingår och används för angivna frekvensområden:

1 st 8" baselement	Scan Soeak 21W4205F4BSD	30—250 Hz
1 st 5" mellanregisterelement	Kef B110	250—2500 Hz
1 st 1" "dome-tweeter"	Pioneer DS17	2500—18000 Hz

Basdelen är även här ett basreflexsystem, dimensionerat —tillsammans med ett högpassfilter i förstärkaren— som ett 6e ordningens högpass Butterworthfilter med gränshfrekvensen 30 Hz.

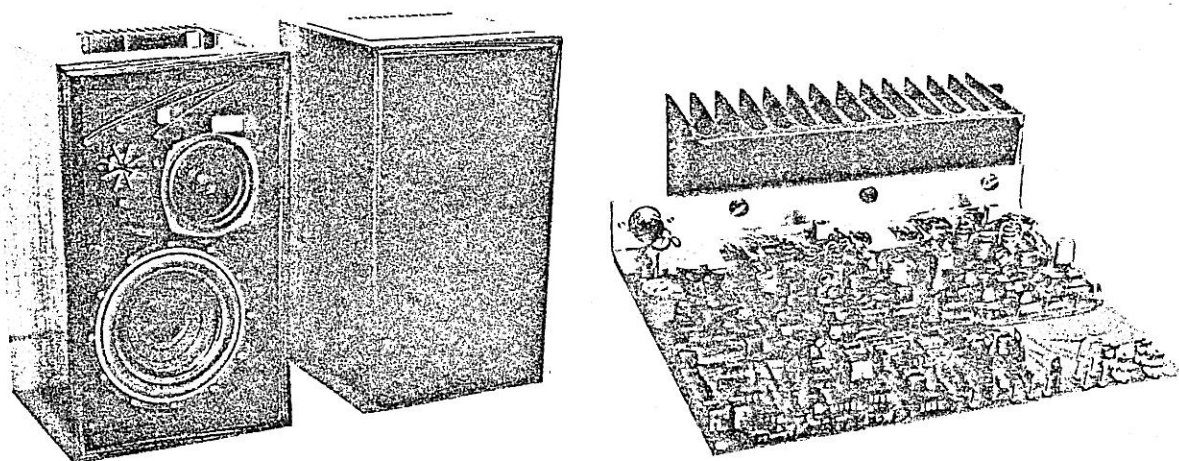


Fig 44. De beskrivna 20 liters prototyperna samt kretskortet för den inbyggda elektroniken.

Då endast ett bashögtalarelement används, kan ej samma metod som vid de större prototyperna användas för att undvika 2a-tonsdistorsionen strax under bassystemets övre gränshäufigens. Här har istället valts ett bashögtalarelement, där talspoleinduktansen delvis är kortsluten genom en kopparcylinder omkring magnetkärnan. Vidare har de två polparen med lägst Q-värde tillordnats bassystemet tillsammans med specialdrivningen, vilket innebär att mindre ökning av den svängande massan krävs, och därmed ökar den övre gränshäufigen något.

Detta bassystem kan över hela sitt frekvensområde prestera en ljudnivå om minst $93 \text{ dB}_{\text{spl}}$, vid 1 m avstånd och 4π strålningsvinkel.

Ton- och distorsionskurvor —uppmätta i ekofritt rum— för den kompletta högtalaren visas i fig 45 och 46. Även motsvarande kurvor uppmätta i Statens Provvningsanstalts efterklangsrums finns återgivna, och samma förutsättningar —som vid uppmätningen av den större prototypen— gäller.

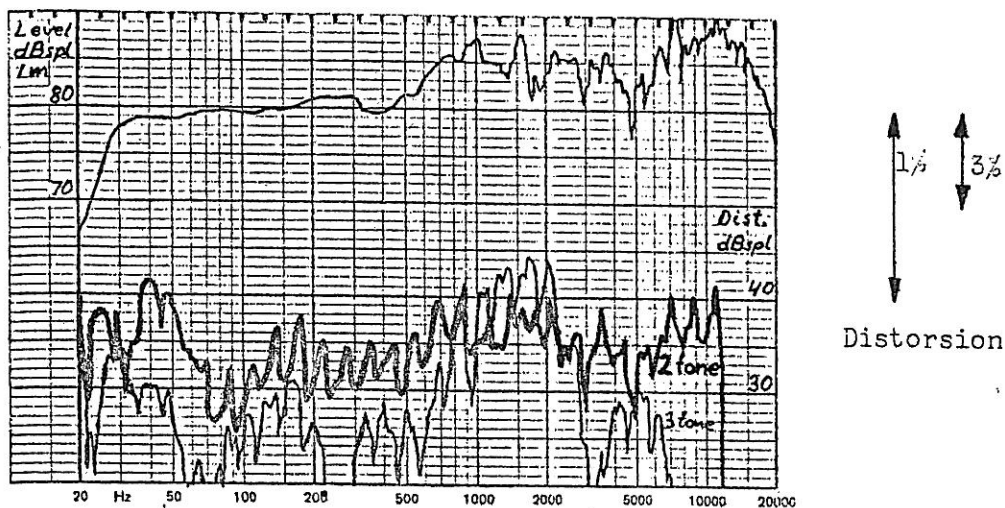


Fig 45. Ton- och distorsionskurvor för den kompletta högtalaren, vid 80 dB_{spl} akustisk utnivå.

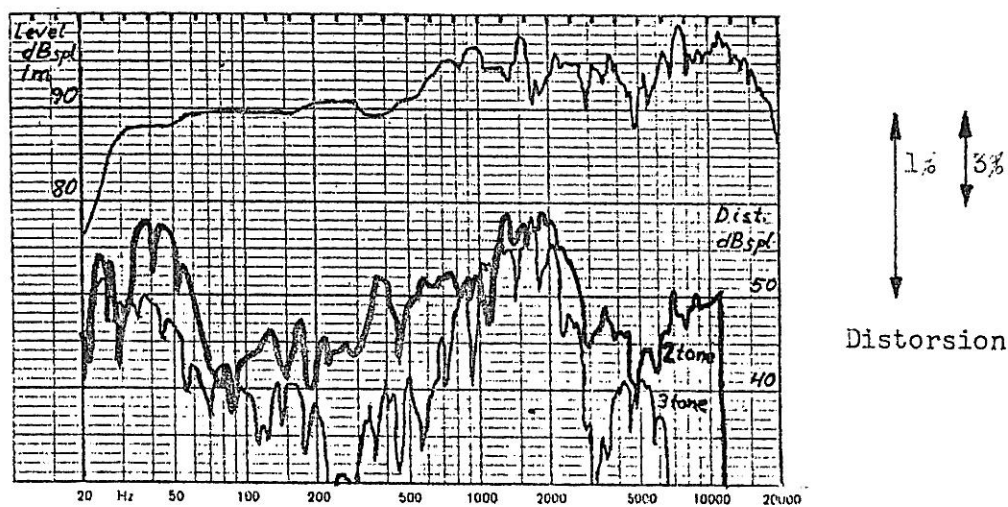


Fig 46. Ton- och distorsionskurvor för den kompletta högtalaren, vid 90 dB_{spl} akustisk utnivå.

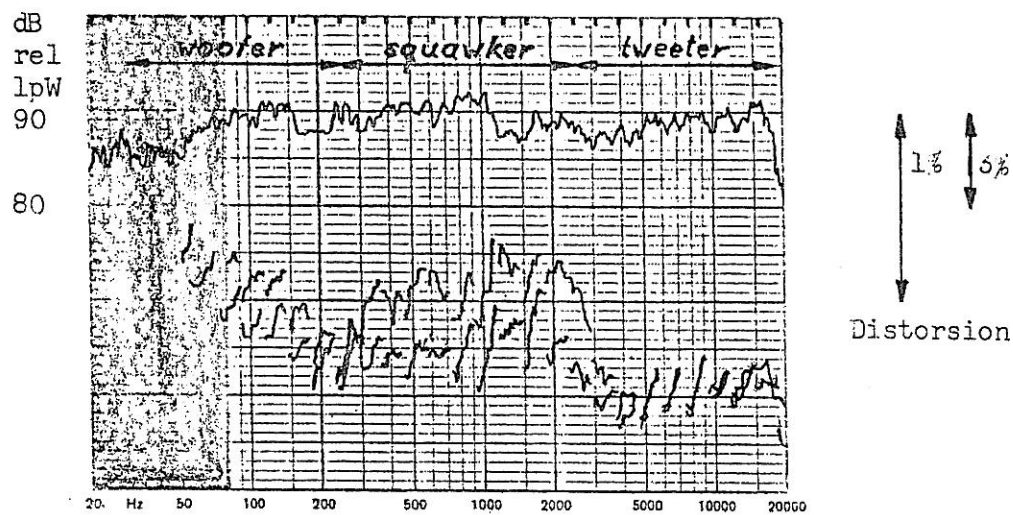


Fig 47. Den kompletta högtalaren uppmätt i efterklangsrum.

9 ENKLARE ELEKTRONIK

Elektroniken enligt fig 39 — som har använts till prototyphögtalarna — kan kanske synas något komplicerad och därmed dyrbar [vilket den dock ej behöver vara]. Som motpol till denna visas här hur enkel den kompletta elektroniken för en högtalare med specialdrivning av basdelen kan utföras. Den minst komponentkrävande realiseringen av specialdrivning har använts [fig 24], och operationsförstärkaren är uppbyggd med diskreta komponenter. Samtliga komponenter har ritats ut utom i effektförstärkarna, vilka symboliseras med block.

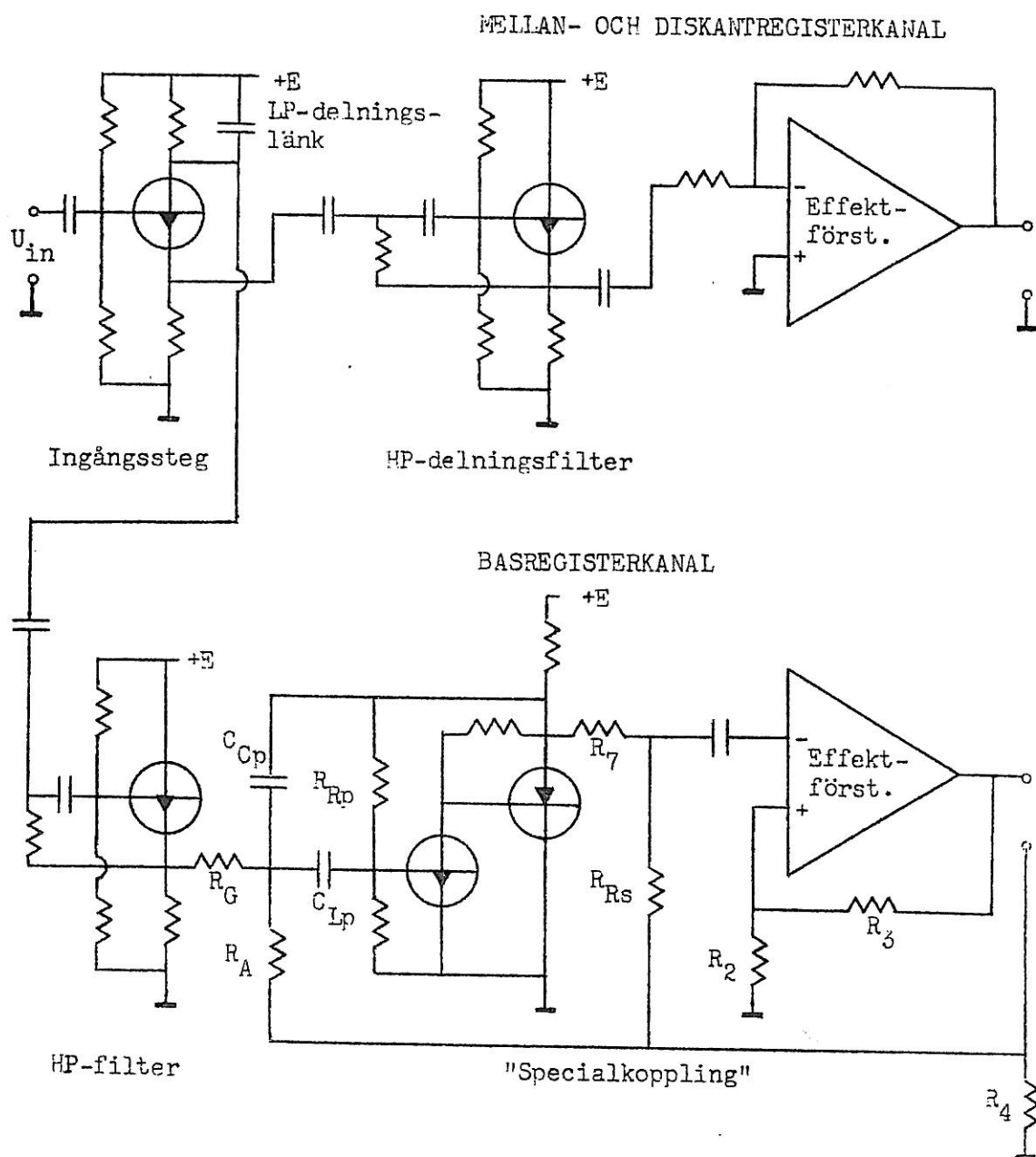


Fig 48. Enkel elektronik för ett komplett högtalarsystem med specialdrivning.

10 KORT JÄMFÖRELSE MED ANDRA METODER ATT ÅSTADKOMMA RAK TONKURVA VID LÅGA FREKVENSER

10.1 Normal drivning av högtalaren, d v s drivning med konstant spänning och utan någon frekvenskorrektion

En likadan tonkurva som den som fås vid specialdrivning, kan i princip erhållas genom en verklig ändring av de mekaniska parametrarna till samma värden som används vid specialdrivningen. Detta skulle dock i de flesta fall bli svårt —om inte omöjligt— att utföra. Dessutom skulle verkningsgraden vid något högre frekvenser —som ej påverkas vid specialdrivning— bli oacceptabelt låg. Mindre extrema värden på de mekaniska parametrarna krävs dock om man väljer stora ljudvolymmer.

10.2 Korrigering av högtalarens tonkurva genom filter i förstärkaren

Denna metod ger ej någon minskning av distorsionen vid låga frekvenser, såsom erhålls vid specialdrivning. En likadan tonkurva som vid specialdrivning kan erhållas, om systemets verkliga poler utsläcks med nollställen i filtret, och de önskade polerna erhålls i filtret. Det går an vid slutna lådor, men kan vid basreflexlådor ge mycket komplicerade filter. Om t ex den större prototypen hade gjorts på detta sätt, så skulle filtret behöva ha en pol-nollställeskonfiguration enligt fig nedan.

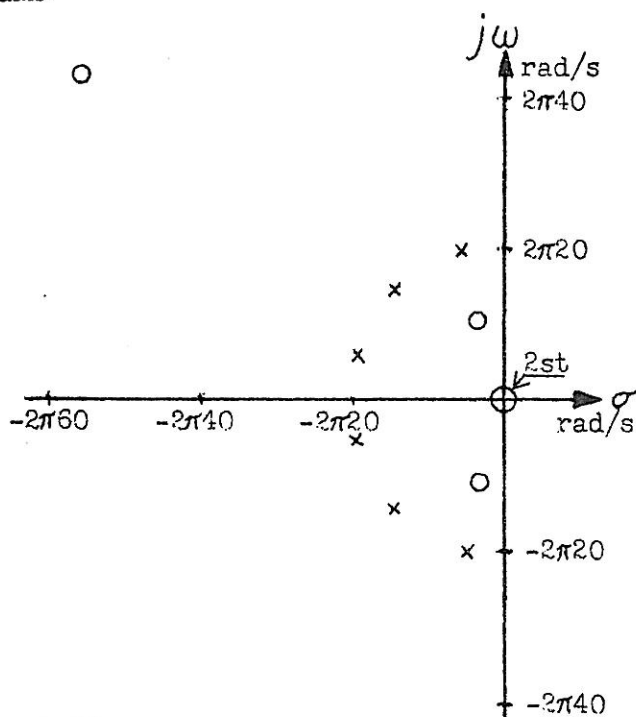


Fig 49. Nödvändig pol-nollställeskonfiguration om den större prototypen skulle ha frekvenskorrigerats med filter.

Detta system blir också känsligt för variationer i högtalarens mekaniska parametrar, då ju specialdrivningens självjusterande egenskaper saknas. Det beror på att vid den här metoden skall de verkliga polerna utsläckas och nya skapas, medan de vid specialdrivning endast flyttas.

10.5 Motkopplad bashögtalare såsom Philips 22RH532

Metoden går ut på att högtalarmembranets rörelser känns av och återkopplas negativt till förstärkaren. Förfarandet bör ge utökat frekvensområde och minskad distorsion. I den ovan nämnda konstruktionen sker avkänningen med en piezoelektrisk accelerationsgivare, som är fäst på membranet. Statens Provningsanstalts mätningar på denna högtalare [se Stereo Hi Fi handboken 76, s 348] visar —i jämförelse med högtalar-system som innehåller samma baselement— att frekvensområdet i basen har utsträckts något, medan däremot distorsionen tycks ha ökat.

En stor nackdel med denna metod är, att den endast är tillämpbar på slutna system, ty vid basreflexsystem är membranrörelserna ej direkt relaterade till det utstrålade ljudet. Det innebär att den möjliga utstrålade effekten vid låga frekvenser —med ett givet element— blir väsentligt lägre.