



Effektförstärkning efter en OP-förstärkare

- av Leif Nilsson SM7MCD -

Bipolära transistorer är en typisk strömförstärkare, och en operationsförstärkare är, som vi har mött den i ESR's elektronikskola, en typisk spänningsförstärkare. Ofta kombineras dessa båda förstärkare till en effektförstärkare, där vi kan förstärka både ström och spänning.

I de fall man vill kombinera spänningsförstärkning och strömförstärkning finns det flera kopplingar att tillgå, alla med sina speciella fördelar. Jag har här valt en koppling som är väldigt universell och relativt enkel, och vi skall här titta närmare på denna.

Effektlagen säger att elektrisk effekt är produkten av ström och spänning $P = U * I$

I tidigare delar av elektronikskolan har jag beskrivit operationsförstärkaren som en ren spänningsförstärkare, det vill säga, finns det en spänning på ingången, finns en förstärkt kopia av denna spänning på utgången. Inspänningen kan vara DC, AC eller en blandning av dessa. Utsignalen blir alltid en förstärkt kopia av insignalen, det är definitionen på en spänningsförstärkare.

Spänningsförstärkningen blir $F_U = U_{UT}/U_{IN}$

Effektförstärkning blir $F_P = P_{UT}/P_{IN}$

Vi tänker oss, som exempel, en direktblandad mottagare. Då behövs en lågbrusig förstärkare med möjlighet till hög spänningsförstärkning, och därefter möjlighet att leverera ström till en högtalare för att återge den mottagna signalen.

Signalen från en stark station kanske ger $100 \mu V$ ut från blandaren, och skall denna signal producera en ton i högtalaren med en effekt av 0.25 watt. Hur fixa detta?

De parametrar som finns att arbeta med kan de se ut som följer.

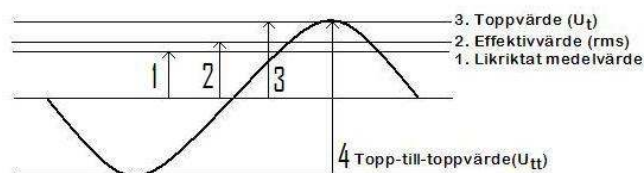
Räkna först ut hur mycket spänningssving som behövs på utgången till högtalaren. Anta att högtalaren är på 4Ω .



$$U = \sqrt{P * R} \text{ ger } \sqrt{(0.25 * 4)} = 1 \text{ volt RMS}$$

$$\text{Toppvärdet blir då } \sqrt{2} * 1 = 1.4 \text{ volt}$$

Av detta syns att det behövs ett spänningssving på ± 1.4 volt som toppspänning från förstärkningen. Räkna med RMS-nivåer på spänningarna så blir det följande krav på den spänningsförstärkning som krävs på vår förstärkare.

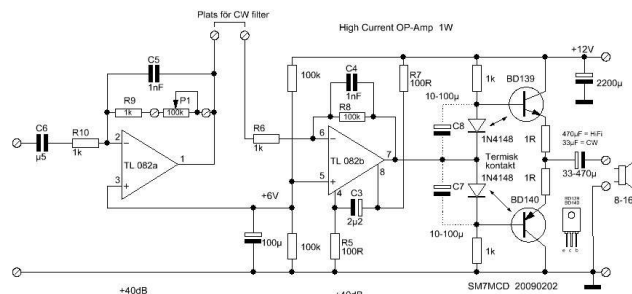


Spänningsförstärkningen blir:

$$F_U = U_{UT}/U_{IN} \text{ ger } 1 \text{ V} / 100 \mu V = 10\,000 \text{ ggr (80 dB)}$$

I praktisk konstruktion väljer man två eller flera förstärkarsteg, låt oss här välja två steg med 40 dB / st.

Kopplingen kan se ut som följer.



Här är två inverterande förstärkarsteg om 40 dB st som är kopplade i serie med varandra. Total spänningsförstärkning blir då $40 \text{ dB} + 40 \text{ dB} = 80 \text{ dB}$.

Till den nödvändiga förstärkningen finns också ett krav på tillräcklig bandbredd, detta krav ger att man måste dela upp förstärkningen i flera steg, annars leder det till begränsningar i bandbredden. I denna konstruktion vill vi ha en begränsad bandbredd, varför förstärkarens naturliga begränsning får bli en del i konstruktionen.

Den använda OP-förstärkarens så kallade FB-produkt kommer att bestämma hur många förstärkarsteg som behövs att dela upp spänningsförstärkaren i. Hade målet varit att förstärka hela det hörbara tonområdet med lite marginal hade valet här blivit att använda 4 förstärkare med 20 dB spänningsförstärkning i varje steg. Jag går här inte djupare in i vad FB-produkten innebär, utan tittar vidare på effektförstärkning.

Spänningssvinget på utgången kommer att kunna vara minst ± 5 V med 12 volt i batteriet, enligt det visade schemat. Jag har dock valt att rita kopplingsförslagen med tvåbatterimatning likt tidigare delar i elektronikskolan som behandlar OP-förstärkare. Skillnaden är att det inte är nödvändigt att ha kopplingskondensatorer i förstärkaren.

LM324 kommer det att bli en ganska brusig förstärkare med den höga förstärkning som är vald här. Ett betydligt bättre val för denna konstruktion är kretsar likt TL071, TL081 eller de varianter som finns i två eller fyra kretsar i samma kapsel (TL082, TL084).

Beräkningarna fortsätter: Nu är det rätt spänningssving från förstärkaren. Räkna sedan på vilken ström som kommer att flyta genom den last som högtalaren utgör så syns det att vår OP-förstärkare inte kommer att klara att mata högtalaren så som tänkt.

Enligt databladet bör det inte gå över 10 mA ström från förstärkaren. Förstärkaren kommer inte att gå sönder, men OP-förstärkaren kommer att strömbegränsa utgången så att utspänningen inte blir större än:

$$U = R * I \text{ ger } 4\Omega * 10\text{mA} = 40\text{mV}$$

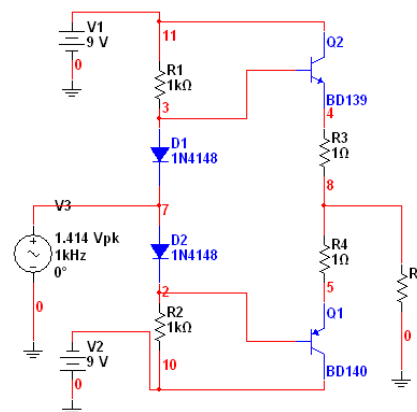
40mV är inte mycket när det skulle vara 1 volt och förstärkaren kommer därmed inte att få den uträknade uteffekten.

Spänningssvinget är dock rätt vid högohmig last, vad som behövs är att komplettera med en strömförstärkare.

NPN - PNP

En vanlig lösning är att använda två transistorer som kopplas i ett par (NPN-PNP), detta par kallas komplementärt par. Använder man två transistorer av samma typ (NPN eller PNP) kallas paret för kvasikomplementärt.

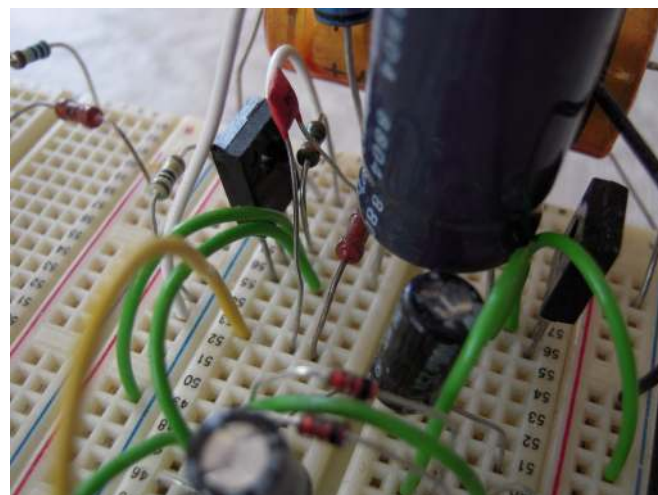
Transistorerna kopplas så att de får direktanslutning till matningsspänningen och syftet är att öppna en strömväg mellan matningsspänningen och lasten, här i form av en högtalare. (I ritningen är det R8 som symboliserar högtalaren)



De två motstånden R3/R4 på 1 Ω som finns i emitteranslutningen är endast där som strömbegränsning. Funktionen är att när strömmen genom transistor Q1 eller Q2, når den nivån så att spänningsfallet över motståndet R3 eller R4 når upp till 0,6 V kommer spänningsfallet över R3 eller R4 att hamna så att spänningen över resistorn kommer i serie med U_{BE} men med motsatt tecken, och kommer alltså att strypa transistoren.

De två motstånden mellan transistorernas basanslutningar och respektive spänningssmatning säkerställer att det går rätt ström genom transistorerna. Om vi ändrar matningsspänningen och/eller insignalen, kommer vi att få följa upp den ström som flyter genom transistoren och justera värdet på motståndet. Här kan man i stället ha en strömgenerator/strömspegel eller annan kretslösning som klarar att hålla strömmen genom transistorerna inom rimliga nivåer trots att matningsspänningen och signalnivåer ändras.

Jag tänker inte här gå igenom alla dessa finesser utan fokuserar helt på grunderna i kopplingen. Dessutom är det först när man strävar efter väldigt låga siffror på förvrängning som vi kommer att se en skillnad, om vi sedan märker skillnaden är en annan fråga.



De två dioderna som finns mellan transistorernas basanslutningar säkerställer att det alltid finns en liten ström genom transistorerna, dock flyter inte denna vilostöm genom lasten, endast genom transistorerna. Om dioderna monteras så

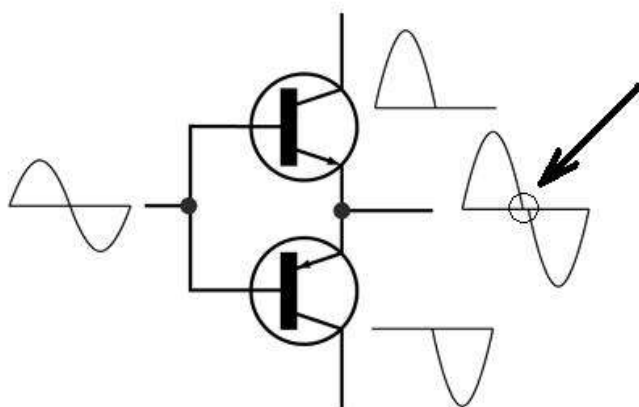
att de får termisk kontakt med de bägge transistorerna kommer vilostrommen genom transistorerna, till stor del, att vara självjusterande. Effekten av denna termiska koppling är inte alltför dramatisk, men på en förstärkare som skall fungera i kyla såväl som värme är det en enkel åtgärd att koppla termiskt mellan transistor och diod.

Att jag nämner strömmen genom de bägge transistorerna hela tiden beror på att strömmen genom transistorerna är central i sättet att beskriva kopplingen.

Klass A, AB, B, C

Man delar in kopplingen i olika klasser, A, B, AB och C. Klass C innebär att det inte går någon ström genom transistorerna förrän signalen in till transistorerna har nått betydande signalnivåer, och att strömmen flyter endast en mindre del av signalens periodtid genom transistorerna.

Kopplingen i klass C används oftast för förstärkare inom sändarteknik där signalen filtreras kraftigt efter förstärkarsteget. Det är inte användbart att ha en ljudförstärkare i klass C.



Utan dioderna och basmotstånden med insignalen direkt på transistorernas hopkopplade basar kommer kopplingen att gå i klass B.

Problemet att lösa är hur strömmen skall kopplas om mellan transistorerna då insignalen passerar nivån "noll". Klass B innebär att det inte går någon ström genom transistorerna då signalen är noll volt. Men så fort signalen når över 0.6 volt (U_{BE} för transistorerna) så kommer transistorerna att leda växelvis i takt med insignalens pendlingar

Vid noga kontroll så kommer det att uppstå ett område kring utsignalens nollnivå där ingen av transistorerna leder, detta medför att det uppstår en förvrängning av utsignalen som kallas övergångsdistorsion. (markerat med en pil i bilden ovan)

Örat är otroligt känsligt för distorsion just kring signalens nollgenomgång, det är därför väldigt viktigt att minimera möjligheten för att övergångsdistorsion skall uppstå.

Ett sätt att ta bort övergångsdistorsionen är att hindra transistorerna att sluta leda vid signaler nära "noll", men ändå försöka att turas om att skicka ström till högtalaren för signaler som är "stora".

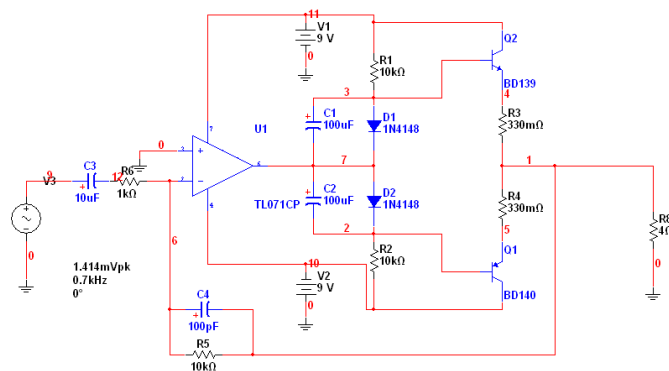
Skulle alltid båda transistorerna leda ström hela tiden så uppstår ingen övergång och heller ingen övergångsdistorsion. Men då går förstärkaren i klass A, och det kommer att vara usel verkningsgrad och massor av värme att kyla bort.

Med dioderna (D1, D2) monterade kommer det alltid att gå en liten ström genom transistorerna, även om insignalen är noll volt. Därmed går förstärkaren i klass A för insignaler som är små och pendlar nära noll volt.

Effekten med kopplingen blir att för små signaler kommer båda transistorerna att leda lite, (förstärkaren går då i klass A), men för stora signaler så kommer transistorerna att turas om att leda ström till högtalaren, och då arbetar förstärkaren i klass B. Detta kombinerade arbetssätt kallas alltså klass AB. (En rörförstärkare kan arbeta i klass AB_1 eller AB_2 , skillnaden är om vi drar gallerström eller inte.)

Lösningen att kombinera klass A och B, genom att införa de två dioderna är en lösning som är allmänt förekommande i de flesta förstärkare idag. Med de två basmotstånden R1 och R2 kommer det att gå att reglera hur mycket ström det skall gå genom transistorerna utan insignal. Därmed kan det bestämmas vid vilken nivå förstärkaren skiftar från klass AB till klass B genom att byta motstånden R1 och R2.

Praktiskt kopplingsarbete

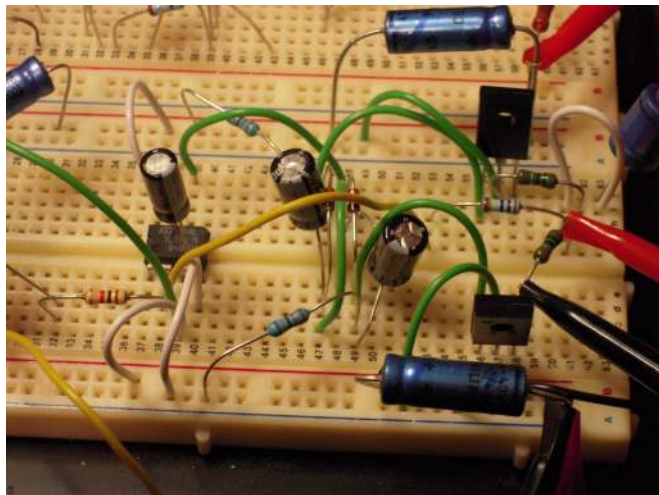


Som praktisk koppling att börja med är detta schema att rekommendera, där $R_5 = 10k\Omega$, och $R_6 = 1k\Omega$.

Spänningsförstärkningen blir då,

$$F_U = R_5/R_6 \text{ ger } F_U = 10k\Omega / 1k\Omega = 10 \text{ ggr (20 dB)}$$

Förstärkningen är inte mer komplicerad än att det fungerar att bygga på ett kopplingsdäck. Kondensator C4 är för att det inte skall vara alltför lätt att få självsvängning, samt att vi filtrerar bort brus, etc som ändå inte hörs men som kan störa mätningar mm.



R1 och R2 är här $10k\Omega$ vilket kan ge en ström som är i minsta laget med risk för övergångsdistortion när batterierna blir dåliga. Genom att öka strömmen samtidigt som man lyssnar på en svag ton (1 kHz) bör man höra skillnaden när motståndet minskas och strömmen ökar. Genom att titta på utsignalen i ett oscilloskop kan man prova med olika basmotstånd och se vad som händer om man ökar/minskar drivningen och om man ökar/minskar vilostrommen genom transistorerna, eller helt enkelt tar bort dioder och motstånd.

Lämpliga värden att testa på R1 och R2 är $10k\Omega$ och i steg ned mot $1k\Omega$. Tänk på att när vilostrommen ökar genom transistorerna ökar även förlusteffekten, med ökad temperatur i transistorerna.

Håll därför noga kontroll på hur stor ström som flyter i vila, och hur temperaturen stiger i transistorerna. Effektlagen gäller även här $P = U * I$ Vid ± 9 volt och $10mA$ genom varje transistor blir förlusteffekten:

$$P_D = 9V * 10mA \text{ ger } P_D = 90mW \text{ i varje transistor.}$$

Skall förstärkaren användas med batteridrift är det mycket att vinna på att vara snål med förlusteffekten, utan att få märkbar övergångsdistorsion.

Strömbegränsning

Motståndet R3 och R4 kan beräknas för max ström som skall flyta genom transistorerna.

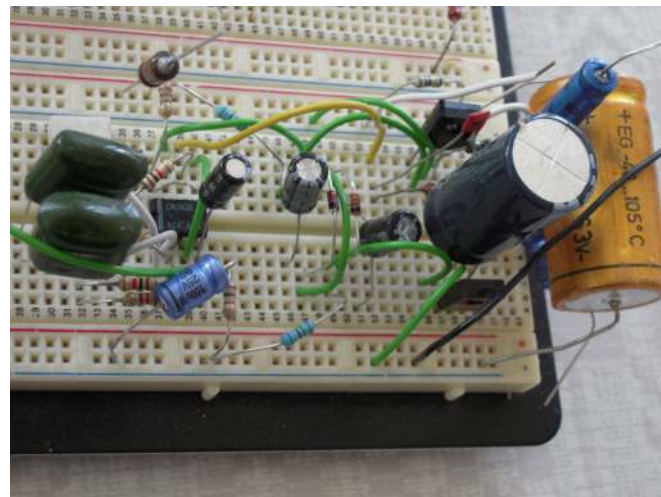
$$I_{MAX} = U_{BE} / R \text{ ger } 0.6V / 0.33\Omega = 1.8 A$$

$$\text{Om } R3 \text{ och } R4 = 1\Omega, \text{ ger } 0.6V / 1\Omega = 0.6A$$

Montera motstånd som matchar ditt val av transistor!

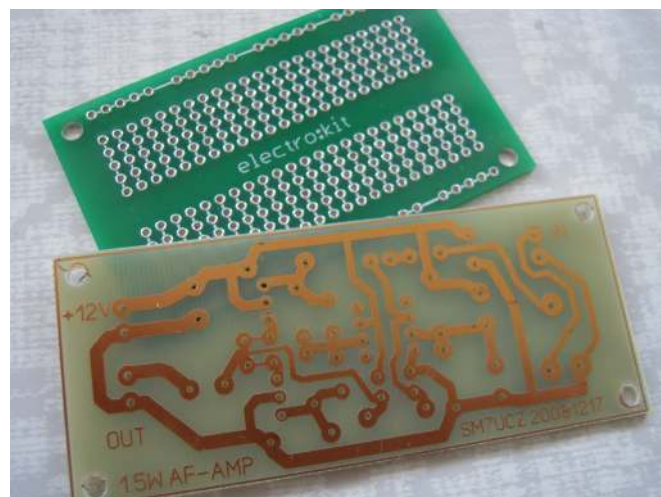
I schemat har jag ritat in BC139/140 som förslag på transistorer, och dessa duger till att bygga en effektförstärkare kapabel att lämna 10 watt om matningsspänningen klarar detta. Men det finns många andra passande kombinationer. BC337/BC327, BC338/328 är andra tilltalade par när man inte behöver ha så mycket medeffekt, till exempel en liten mottagarförstärkare.

Att också tänka på är att det nu kan flyta strömmar på 1A eller mer genom transistorerna, därför bör det monteras ett par rejäla elektrolytkondensatorer mellan transistorernas kollektorer och jord. Annars kommer det att bli brist på elektroner när man som bäst behöver dessa att mata ut ström till högtalaren. På bilderna syns det att det sitter stora kondensatorer på $1000\mu F$ eller mer i närheten av transistorerna.



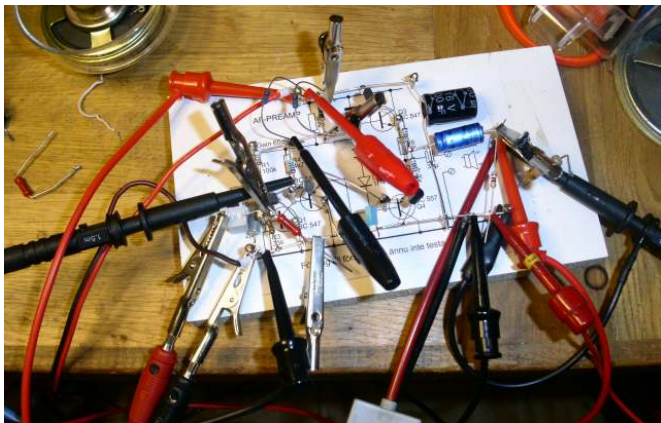
En viss komprimering av utsignalen kan även åstadkommas med motstånd som anpassas till den valda högtalaren. Genom att förstärkaren strömbegränsar vid hög volym reduceras uteffekten. Ibland kan detta fungera som en enkel AVC inom ett litet område, kan vara praktiskt vid en enkel mottagare.

Kretskort eller...

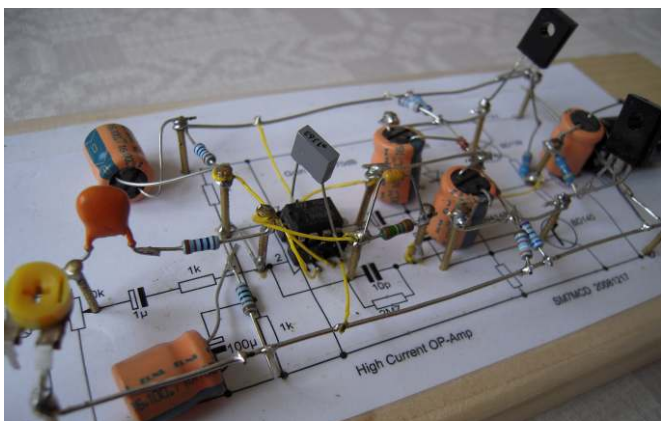


Ni som likt mig gillar att koppla på experimentbord. Nu har Electrokit kort med samma mönster som kopplingsbordet. Det är alltså bara att flytta över komponenterna och löda när det är färdiglabbat. På bilden finns även ett etsat kort, (frågar ni Johnny –UCZ så lägger han säkert ut mönstret på sin hemsida eller mailar er).

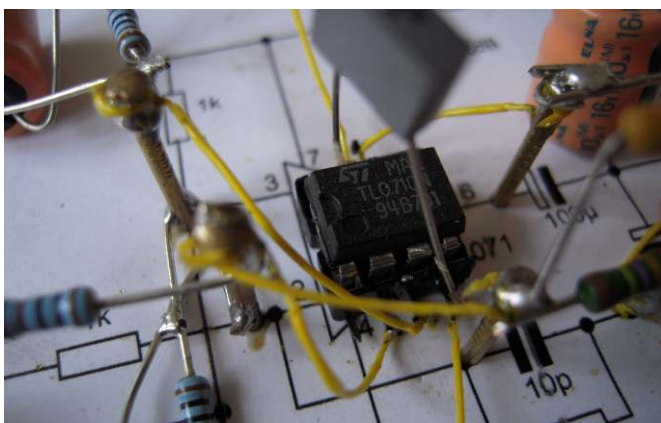
Att bygga på spik, det vill säga att limma pappersritningen på en träplatta och slå spik i lämpliga punkter, för att därefter löda komponenterna där ritningen visar, är många gånger en lysande byggmetod för att prova olika kopplingar.



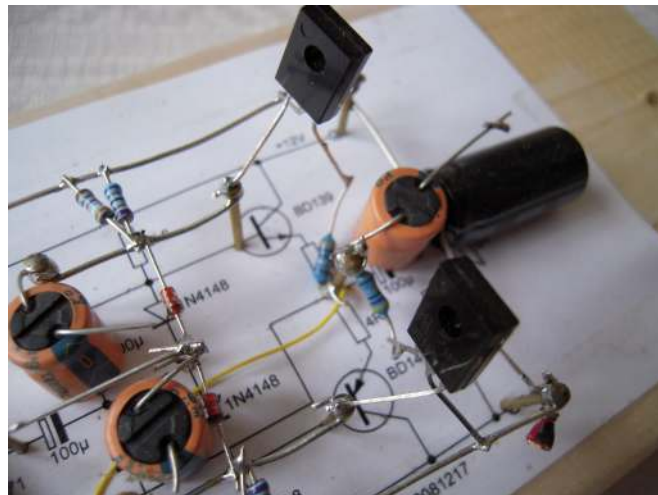
Det är dessutom väldigt enkelt att ansluta alla mätsladdar på spikar och ledningar. Som synes i bilden ovan kan det behövas många mätsladdar.



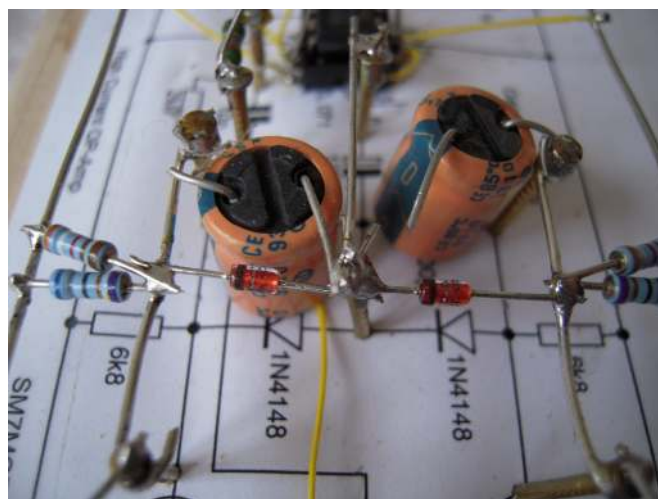
Här ovan är ett av de exemplar av förstärkare som använts till utvärdering innan kretslayout och slutliga komponentvärden och komponentstorlek är bestämt.



Det går även utmärkt att montera IC-hållare, en hållare är smidigt om man vill testa olika förstärkare då de flesta har samma benplacering.

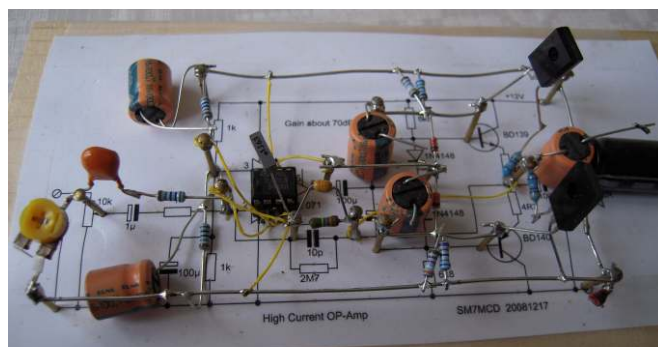


I bilden ovan syns hur det behövs lite elektrolytkondensatorer kring effektransistorerna, det flyter trots allt strömmar runt 1 A i kopplingen



Här är ett exempel på hur man på ett enkelt sätt kontrollerar om det märks skillnad med eller utan kondensatorer över biasdioderna, klipp av benen under lyssning...

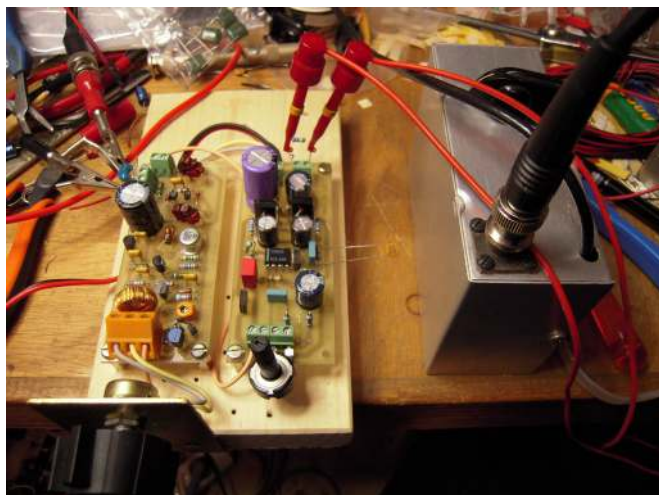
Vidare har motstånden som styr strömmen genom dioderna trimmats lite med att parallellkopplats med extra motstånd, därmed ökar strömmen lite.



Praktiskt exempel

Nedan är förstärkaren enligt den första ritningen monterad på en träbit för att tillsammans med en blandare och VFO bilda en komplett mottagare.

Förstärkaren i mitten, VFO och blandare till vänster och en preselektor till höger i bild. Mer än så här behövs inte för att få en högvärdig direktblandad CW/SSB-mottagare.



Mottagare för kortvåg byggd med denna förstärkare är mer eller mindre brusfri, och det är en märklig känsla att lyssna på signaler då dynamiken är minst sagt imponerande, utan att det uppstår irriterande distorsion vid hög volym.

Det kräver dock användande av en högvärdig högtalare, betydligt större och bättre än de tvåtummare som brukar monteras på enkla mottagare. Använd gärna en bredbandshögtalare med en diameter på 8 tum eller mer som högtalarelement.

Användbara instrument - datorn

För att prova och testa lågfrekvensförstärkare finns det ett stort utbud av datorprogram. Datorns ljudkort är ett utmärkt verktyg för att prova LF-förstärkare. Jag använder ett externt ljudkort för 250 kr för att inte riskera att kvadda det inbyggda kortet.

Det finns programvaror för att prova frekvensgång, distorsion, FFT-analys, låta datorn vara oscilloskop, funktionsgenerator etc. Det finns även en hel del nyttiga programvaror att ladda ned till Iphone och liknande telefoner.

I övrigt räcker det med en vanlig multimeter, välj gärna att mäta på låga frekvenser mellan 50 – 500 Hz, där brukar även ganska billiga voltmeter mäta hyfsat rätt. En 2-kanalig AC-millivoltmeter (nedan) ger möjlighet att enkelt kontrollera förstärkning mm med alla fördelar (och nackdelar) ett analogt instrument har.



Är det då någon vits med att bygga ett slutsteg när det finns så bra färdiga kretsar?

Jag ser flera fördelar, det är ofta enklare att löda dit ett par transistorer med några motstånd och därmed få högtalardrivning från till exempel ett aktivt filter. Det är ofta billigare att bygga, jämfört med att köpa en färdig krets.

Vill någon prova lite HiFi-användning kan kondensatorerna C1 och C2 monteras över dioderna. Normalt flyter det alltid ström genom dioderna D1 och D2, men det hindrar inte att det finns många som hävdar att det låter bättre med två kondensatorer över biasdioderna. Här är ett utmärkt tillfälle att prova om man tycker att det finns en hörbar skillnad... med eller utan C1 och C2.

Själv har jag byggt en hörlursförstärkare i stereoutförande med ställbar förstärkning mellan 1 – 10 gånger för att ge mig möjlighet att använda hörlurar på 300Ω eller mer när jag lyssnar på bärbar CD-spelare eller mp3. Hela bygget drivs av två 9-voltsbatterier och ryms i en liten plastask i innerfickan.

Men framförallt får man en väldigt lågbrusig förstärkare, och det är alltid värdefullt.

Utdrag av artikeln tidigare publicerad i Resonans nr 2 2010.

Copyright©Leif Nilsson