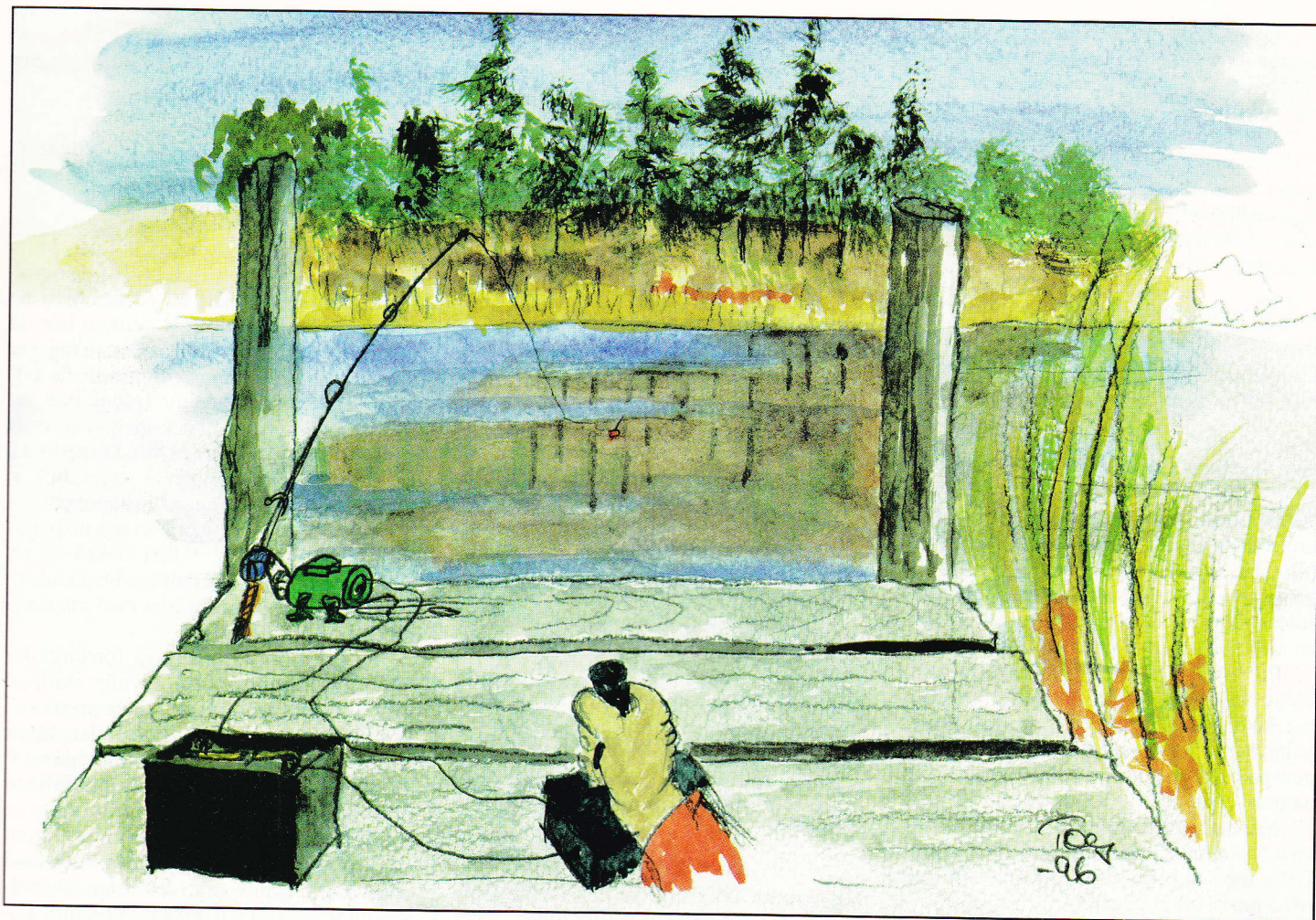




BYGG MED OPERATIONSFÖRSTÄRKARE

I detta nummer fortsätter Elektronikvärlden sin serie byggprojekt med några användbara bygge som använder en klassiker bland de linjära IC - kretsarna - operationsförstärkaren. I den här artikeln skall vi visa hur den här kretsen bland annat kan användas som förstärkare, likriktare för audiosignaler och för anpassning av joystick till en elmotor.

Av Nils-Åke Petersson

Operationsförstärkaren eller OP:n är en suverant användbar IC-krets. Den kan användas till att förstärka signaler allt från likström till audio-, video- och UHF-signaler. Med OP:n kan man summera, subtrahera och

multiplitera signaler. Den kan användas för att filtrera högfrekvens, lågfrekvens eller speciella frekvensband eller likrikta växelströmssignaler.

Den kan användas för att generera signaler med de flesta utseenden som sinus, fyrkant eller sågtdand.

Med OP:n kan de svagaste signaler

förstärkas som till exempel den extremt svaga signalen från en pyroelektrisk sensor, trådtöjningsgivare, tryckgivare eller fotodiod.

Inte nog med detta! Operationsförstärkaren är dessutom lätt att använda. Det räcker faktiskt att känna till ett par grundregler för att på egen hand, med framgång, bygga och experimentera med den.

Förstärkning: 1 milj gånger!

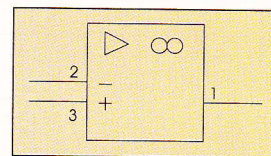
Det är ett par viktiga egenskaper som gör operationsförstärkaren så användbar.

Det första är dess enorma förstärkning. En OP har faktiskt en "råförstärkning" som normalt är flera 100 000 ggr upp till 1 miljon! Kasta ett öga på symbolen (figur 1).

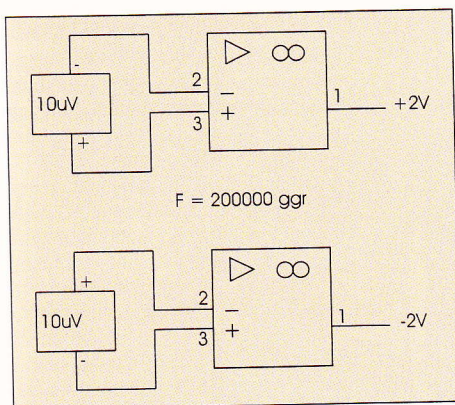
Trekanten i symbolen visar att det är en förstärkare och oändlighetstecknet syftar på förstärkningen.

Även om förstärkningen i verkligheten inte är oändligt stor är den tillräckligt stor för att man inte skall behöva bry sig om den exakta storleken.

OP:n är en spänningsförstärkare. Den betraktar den spänning som finns mellan



Figur 1: Symbolen för operationsförstärkaren.



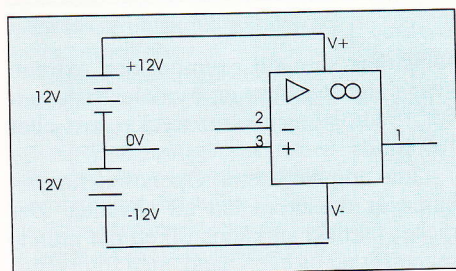
Figur 2: In- och utsignalernas polaritet.

dess ingångar och förstärker sedan denna så mycket den orkar.

Som du ser i schemasymbolen har kretsen en plus- (+) och en minus-ingång (-). Det är spänningen mellan dessa ingångsbän (spänningsskillnaden) som förstärks i kretsen. Antag att nu att vår OP har en råförstärkning på måttliga 200 000 ggr.

En insignal på 10 mV till OP:n ger då $\pm 2V$ ut beroende på polariteten på insignalen som bilden visar. (figur 2). "Rätt" polaritet i förhållande till OP:ns ingångar ger positiv utsignal, "fel" polaritet ger negativ utsignal.

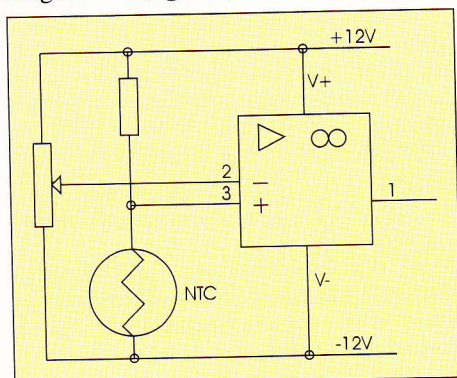
När man använder OP:n för att hantera växelspanningssignaler matar man gärna OP:n med dubbel matningsspänning dvs både positiv och negativ.



Figur 3: Dubbel spänningsmatning.

I bilden (figur 3) visar vi en matning med $\pm 12V$. 2 till $\pm 18V$ är vanligt men många OP arbetar även enkel matningsspänning i området 2 - 36 V.

Den höga förstärkningen kommer till sin rätt om man vill använda en OP som komparator dvs för att jämföra två spänningsnivåer (figur 4).

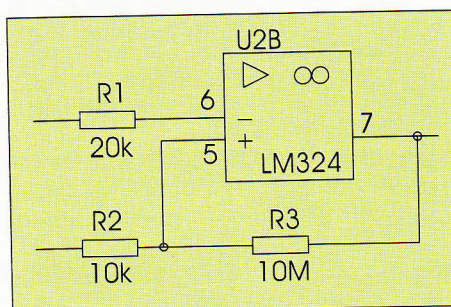


Figur 4: Op:n som komparator.

Tänk dig att (+)-ingången i ett viss läge ligger högre än (-)-ingången. Det räcker med $12/200000 = 0,00006V$ ($60\mu V$) högre för att OP:n skall ge $+12V$ ut om vi tänker oss en råförstärkning på 200 000 ggr.

När temperaturen ökar, minskar resistansen hos det temperaturkänsliga NTC-motståndet med minskat spänningsfall som följd. Då sjunker spänningsnivån på (+)-ingången. När spänningen ligger $0,00006V$ under nivån på (-)-ingången blir det $-12V$ på utgången dvs komparatorn slår om.

Åtminstone i teorin finns det ett läge då insignalen (dvs skillnaden mellan de båda ingångarna) är 0V och utsignalen är då också 0V. I praktiken är omöjligt att stabilisera insignalen för 0V ut, i den här



Figur 5: Komparatorkoppling med hysteres.

kopplingen, på grund av den temperaturdrift som alltid finns på nivåer inne i själva OP:n. I det här fallet är det också ointressant. Det viktiga är att komparatorn slår om när omslagspunkten passeras.

Det finns också ett område $\pm 60mV$ där OP:ns utspänning ligger inne i intervallet $\pm 12V$. Om insignalen ändras långsamt kan man hamna i detta område med en odefinierad utsignal som följd. Om man tex skall driva ett relä kan det bli ett väldigt splattrande i reläkontakten om inte utsignalen är väl definierad. Du som läste den förra artikeln i serien (EV nr 3-96 Bygg själv Elektronisk övervakningsenhet) minns säker hur detta kan lösas med hjälp av hysteres (figur 5).

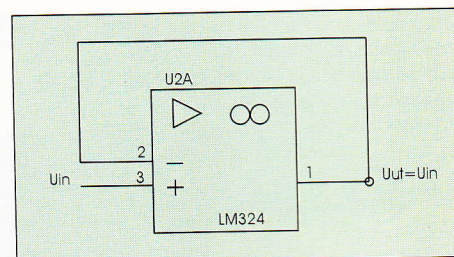
Med hjälp av motståndet R3 sker en svag positiv återkoppling som innebär att omslagspunkten flyttas så att det krävs lite mer för omslag och lite mindre för att slå tillbaka.

Ingen ström in

Vi kommer nu till OP:ns andra lika viktiga egenskap: det går så lite ström in på OP:ns ingångar att man i de flesta kopplingar kan bortse från den.

Man kan säga att OP:n ser skillnads-spänningen utan att beröra den. För alla som sysslar med elektronik eller mätteknik är detta en önskeegenskap, att kunna koppla in sig på något utan att påverka detta.

I många förstärkarkopplingar är detta ett vanligt ingångssteg (figur 6)

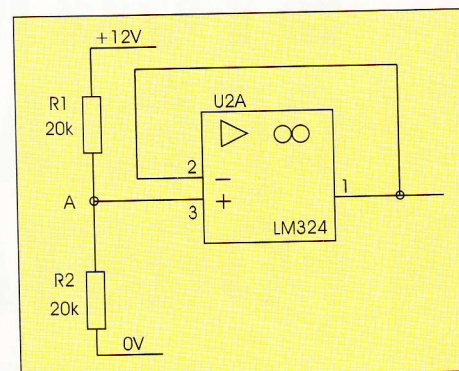


Figur 6: Spänningsföljaren.

Kopplingen är lätt att förstå. Välj en valfri inspänning tex 1 V. Vilken blir då utspänningen? Ett enkelt resonemang ger svaret: Om utspänningen är mindre än 1 V blir inspänningen positiv (glöm inte att OP:n förstärker skillnaden mellan sina ingångar) och utspänningen blir därmed $+12V$. Men om utspänningen är större än 1 V blir ju inspänningen negativ (högre på (-)-ingången än på (+)-ingången) och utspänningen blir då $-12V$ vilket också är en omöjlighet. Den enda möjliga utspänningen inträffar då denna är lika med inspänningen!

På grund av OP:ns höga förstärkning krävs en i det närmaste osynlig skillnad mellan ingångarna för att åstadkomma vilken som helst utsignal. Utsignalen följer därför i detta fallet insignalen på någon μV när. Kopplingen kallas **spänningsföljare** men också **impedansomvandlare**.

Genom att OP:n inte drar någon ström på dess ingångar är dess ingångsmotstånd (eller inimpedans som det heter i växelspanningssammanhang) mycket stort. Utgången på OP:n förmår däremot lämna en hel del med ström utan att spänningen



Figur 7: Spänningsdelare med OP.

sjunker dvs OP:ns utimpedans är låg. Från hög till låg impedans med andra ord. Se nu hur detta kan användas (figur 7).

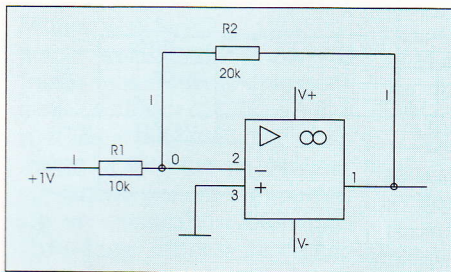
Spänningsdelare med R1 och R2 ger en spänning på 6V. Men utan OP:n är den nästan obrukbar. Så fort man tar ut lite ström från punkten A ökar spänningsfallet över R1 och utspänningen sjunker. OP:n löser detta suveränt enkelt. Utan att påverka spänningsdelaren, betraktar den spänningen på (+)-ingången och ställer ut samma spänningen dvs i det här fallet 6 V på utgången. Med en **effektOP** kan man på detta sätt hämta flera ampere ström utan att spänningsföljaren R1 + R2 och därmed utspänningen påverkas.

Kontrollera förstärkningen

OP:ns råförstärkning är imponerande, men den måste tämjäs. Det är betydligt vanligare att man vill förstärka 10-100 ggr än 200 000 ggr. Nu är det inte alls svårt att utnyttja OP:ns egenskaper och ta kontroll över förstärkningen.

I den här enkla förstärkaren (figur 8) kopplas (+)-ingången till 0 V. Insignalen är i exemplet +1 V. Vilken blir då utspänningen?

En sak kan man se direkt: Eftersom (+)-ingångens spänning är lägre än (-)-

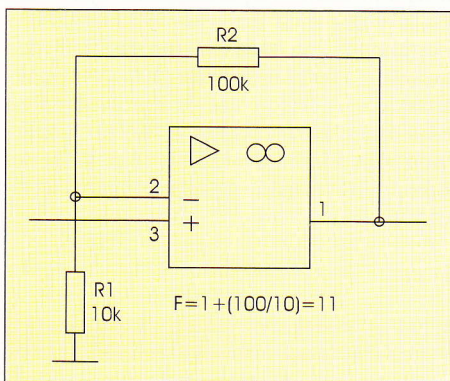


Figur 8: Inverterad förstärkarkoppling.

ingången måste utsignalen bli en minus-spänning. Frågan är nu hur stor denna blir. I bilden (figur 8) har vi ritat in den ström I som måste flyta. Lagg märke till att det inte går någon ström in i kretsen.

Om man nu bara tänker på att det är skillnadsspänningen mellan OP:ns ingångar som förstärks och på OP:ns enorma förstärkning kan man misstänka att det behövs endast en oerhört liten skillnad mellan (+)- och (-)-ingången oavsett vilken utspänningen är. Faktiskt är skillnaden så liten att vi kan sätta den till 0 V. (Om du mäter med ett instrument kommer du också att mäta 0 V)

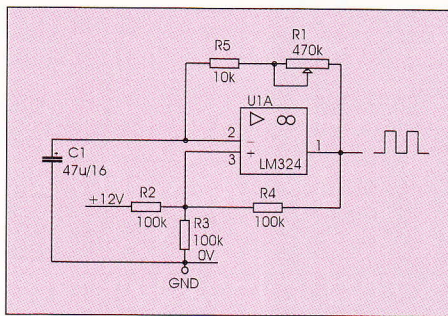
Men i så fall är faktiskt saken klar. Om det ligger 1 V över R_1 måste det nämligen ligga 2 V över R_2 eftersom R_2 är dubbelt så stor som R_1 och samma ström går genom de båda. Eller med andra ord: om vi



Figur 9: Icke-inverterad förstärkare.

tappar 1 V från +1 V till 0 V genom R_1 tappar vi 2 V dvs från 0 V till -2 V genom R_2 . Utspänningen hamnar således på -2 V.

Om vi bortser från att utspänningen blivit minus dvs signalen inverterats har 1 V tack vare OP:n blivit 2 V. Förstärkning F



Figur 10: Pulsoscillator.

$= U_{ut} / U_{in} = 2$. Är det en tillfällighet att även $R_2 / R_1 = 2$? Nej knappast. Om du byter ut till 100k och genomför samma resonemang kommer du att upptäcka att förstärkningen nu blir $F = R_2 / R_1 = 100 / 10 = 10$. Så enkelt var det med det.

Med hjälp av endast R_1 och R_2 har kretsen försetts med en negativ återkoppling och vi har fått en förstärkare med den förstärkning vi själva önskar.

Icke-inverterad förstärkare

Om man förstärker en växelspänning spelar det knappast någon roll om förstärkarsteget inverterar. Om signalen i stället är en likspänning från tex en temperaturgivare skulle det vara bättre om förstärkningen sker utan invertering. Inget problem (figur 9)!

Negativ återkoppling som tidigare och insignalen kopplas istället in på (+)-ingången. I det här fallet blir förstärkningen $F = 1 + (R_2 / R_1)$. Prova själv med ett resonemang enligt ovan för att förstå varför det blir denna enkla formel.

Positiv återkoppling

Om man istället gör en återkoppling till OP:ns (+)-ingång får man en pulscillator (figur 10)

Om du till att börja med bortser från R_4 ligger (+)-ingången på 6 V genom spänningsdelaren $R_2 + R_3$. Antag nu att utsignalen i ett visst läge är hög dvs 12V. Man kan då se det som att R_4 ligger parallellt med R_2 . ($R_4 / R_2 = 50k$). (+)-ingången ligger således i själva verket på 9V.

Nu händer dock följande: Eftersom det inte flyter någon ström in på OP:ns ingångar till exempel på (-)-ingången kommer kondensatorn C_1 att successivt laddas upp med ström som flyter från

OP:ns utgång på 12V, genom $R_1 + R_5$. Det tar en stund att ladda upp C_1 men strax är spänningen över C_1 och därmed inspänningen på (-)-ingången över 9V dvs den aktuella spänningen på (+)-ingången.

Vad händer då? Jo OP:n slår om till 0 V på utgången. I ett slag sjunker då inspänningen på (+)-ingången till 3V (räkna själv ut varför det blir just 3V), vilket endast förstärker omslaget! (Det är därför det kallas positiv återkoppling!).

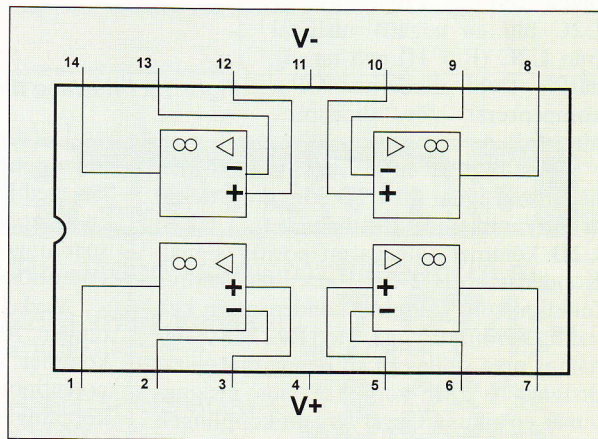
Detta tillstånd blir dock inte långvarigt. Nu kommer ju C_1 att laddas ur genom att ström nu flyter andra hållet, från kondensatorn till OP:ns ingång, som nu ligger på 0V. Denna urladdning av C_1 fortsätter tills spänningen över kondensatorn och därmed spänningen på (-)-ingången passerar 3V. Då slår utgången om till +12 V igen. Så är varvet fullbordat och det hela börjar om från början.

Så enkelt var det att göra en pulsgenerator med hjälp av en operationsförstärkare.

Fyra OP i samma kapsel

Med den packningsteknik som tillämpas för integrerade kretsar är det idag ingen konst att få plats med fyra OP i samma kapsel. (figur 11)

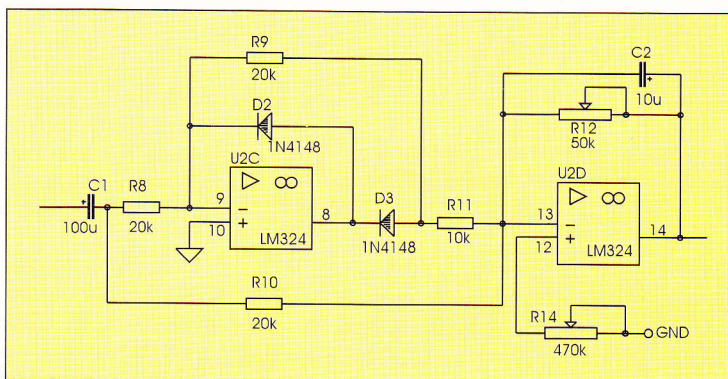
Detta är en mycket vanlig benkonfigu-



Figur 11: Fyra OP i en kapsel.

ration för kretsar som innehåller fyra operationsförstärkare. Det gäller tex LM324, 3403, LMC660 (CMOS) för att bara nämna några.

Dessa nämnda kan dessutom användas



Figur 12: AC - DC omvandlare.

med enkel matningsspänning vilket ibland är en fördel. I de följande exemplen har vi använt LM324 genomgående.

Likriktare för audio

I den här likriktaren avsedd för lågfrekvenssignaler utnyttjar vi två OP (figur 12).

Detta är en något mera utvecklad koppling mot tidigare. U2C fungerar som en som en halvålslikriktare. Även om kopplingen kanske ser lite skum ut, på grund av dioderna, är det lätt att se att kopplingen med U2C är ett inverterande förstärkarsteg (jämför med figur 8).

Det är lite enklare att förstå kopplingen om man tittar på växelspänningens positiva och negativa halva var för sig. Den negativa halvan av inspänningen vill bli till en positiv utsignal från U2C men dioderna runt U2C kommer att spärra och den negativa halvan av inspänningen får därför istället ta vägen via R10 direkt till U2D. Den positiva halvan av inspänningen som också inverteras av U2C blir en negativ utsignal från U2C ($F = 1!$) och tar sig därför förbi dioderna. OP:n kompenserar för diodspänningsfallen.

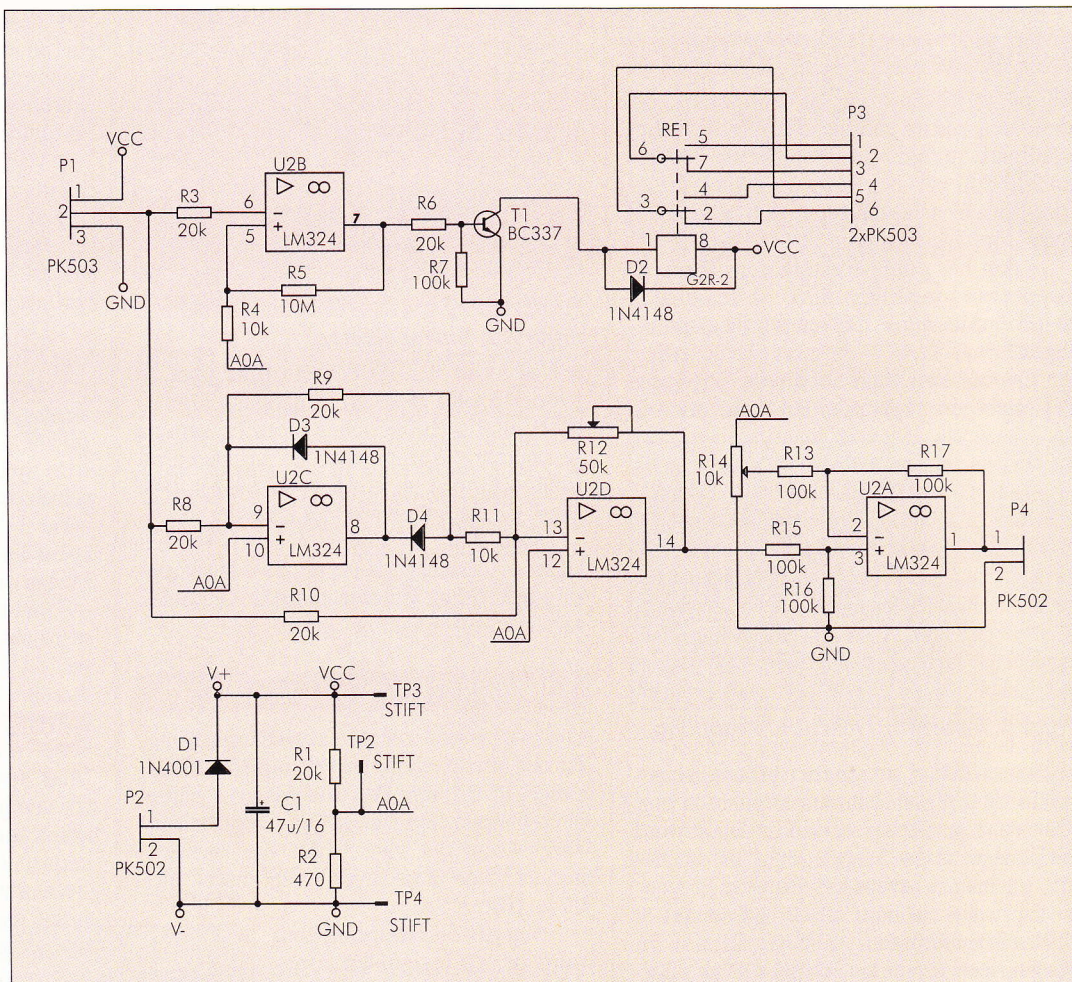
Resultatet är en halvålslikriktad men negativ insignal till U2D som dock också är ett inverterande förstärkarsteg. Ut från U2D kommer således en positiv signal. Kondensatorn C2 har i stort sett samma funktion som glättningskondensatorn i en vanlig likriktarbrygga. Med R12 kan utsignalens nivå ställas så att denna motsvarar insignalens RMS-värde (så länge insignalen är en sinus). Observera att kopplingen arbetar med dubbel matningsspänning och utsignalen refererar till 0V.

Detta är en koppling som likriktar även för små signaler där en enkel diodbrygga inte har en chans. Den ger betydligt mer tillförlitliga mätvärden på signaler från 40 Hz till 10 kHz än många av de AC-DC omvandlare som sitter i visarinstrument och billiga multimetrar. (Sätt en spänningsföljare som ingångssteg så får kopplingen ytterligare bättre ingångsimpedans).

Joystickinterface

Vi ville styra en elmotor med en vanlig potentiometer eller en joystick. Mittläget skulle ge 0V till motorn. Vridning skulle ge ökad gas framåt eller bakåt.

I vårt fall skulle motorriktningen kastas om genom ett relä. Resultatet blev den här koppling byggd runt en kapsel med fyra OP (LM324) (figur 13).



Figur 13: Interface till joystick.

Det först problemet var att känna av potentiometerns mittläge. Detta fixades lätt med U2B i schemat. Det är helt enkelt en komparatorkoppling som jämför "mittspänningen" A0A med spänningen från potentiometern.

Med 12V:s matning ligger mittspänningen A0A på 6V. Komparatorn U2B kommer således att växla reläet RE1 i potentiometerns mittläge. Eftersom kopplingen har hysteres, genom motståndet R5, finns det inget obestämt läge för reläet.

Nu återstod dock ett annat problem. Utspanningen till motorn skulle vara 0V i mittläget, men sedan en positiv spänning åt vilket håll ratten än vrids. (Reläet sköter ju om polvändningen!) I förhållande till potentiometerns mittläge (och referensen A0A) blir spänningen positiv vid vridning åt ena hållet och negativ åt andra! Detta fixades med en likriktare av samma typ som ovan. Endast kondensatorerna är borttagna eftersom det är fråga om likspänning. Ut från kopplingen kommer således absolutvärdet av spänningen från potentiometern med mittläget som referens.

Utsignalen ligger dock mellan 6 och 12V! U2A har därför lagts till. Detta steg fungerar som en subtraherare av DC-spänningar. Inspänningen på (-) ingången, som är justerbar, dras ifrån inspänningen på (+) ingången. På så sätt kan nivån på utsig-

nalen justeras så att potentiometerns vridning kan ge en spänning som börjar från en valfri nivå och sedan stiger linjärt när potentiometerns ratt förs mot ett av sina ändlägen.

I vårt fall ville vi ha intervallet 3 - 9 V eftersom det passar vårt eget pulsstyrningskort för likströmsmotorer.

Exemplen ovan har vi använt LM324 i ett litet antal av dess tänkbara användningsområden. Experimentera själv och lär känna denna trevliga OP. Förstärkar-kopplingar kan vara lite tjuriga men med ordentliga förbindelser av alla 0 V:s punkter (jorden) brukar det gå bra även på ett experimentkort. LM324 är en tålig krets men den klarar dock inte felpolariserad inkoppling av matningsspänningen. Lycka till.

Det finns mera

Artikeln är ett utdrag ur en till hösten kommande handbok om Linjära IC-kretsar. Synpunkter och frågor som rör artikeln är välkomna.

Skriv eller ring till författaren.

Belganet Dataelektronik AB,
370 12 HALLABRO.

Tel 0457-52175, Fax 0457-52176.