

UMEÅ UNIVERSITET
Tillämpad fysik och elektronik
Johan Pålsson m.fl.



2003-12-10
Rev 1.0.6

Op-förstärkare

K O M P E N D I U M

ELEKTRO

INNEHÅLL

1. FÖRORD	3
1.1. <i>Operationsförstärkarens historia</i>	3
1.2. <i>Kompendiet</i>	3
2. DEN IDEALA OPERATIONSFÖRSTÄRKAREN	4
3. FÖRSTÄRKARKOPPLINGAR	5
3.1. <i>Motkoppling</i>	5
3.2. <i>Förstärkarkopplingars egenskaper</i>	5
3.3. <i>Inverterande förstärkare</i>	5
3.4. <i>Icke-inverterande förstärkare</i>	7
3.5. <i>Spänningsföljare</i>	8
3.6. <i>Differentialförstärkare</i>	8
3.7. <i>Summator</i>	10
3.8. <i>Instrumentförstärkaren</i>	11
3.9. <i>Komparator</i>	12
3.10. <i>Integrator</i>	13
3.11. <i>Derivator</i>	13
3.12. <i>Matningsspänningar</i>	15
4. DEN VERKLIGA OPERATIONSFÖRSTÄRKAREN	17
4.1. <i>Egenskaper</i>	17
4.1.1. <i>Offsetspänning</i>	17
4.1.2. <i>Förströmmar</i>	18
4.1.3. <i>Offsetström</i>	19
4.1.4. <i>Temperaturdrift</i>	20
4.1.5. <i>Inspänningar</i>	20
4.1.6. <i>CMRR</i>	20
4.1.7. <i>PSRR</i>	21
4.1.8. <i>Inresistans</i>	21
4.1.9. <i>Utresistans</i>	21
4.1.10. <i>Utspänning</i>	21
4.1.11. <i>Slew rate</i>	21
4.1.12. <i>Spänningsförstärkning</i>	22
4.1.13. <i>Frekvensberoende</i>	22
4.1.14. <i>Bandbredd</i>	23

1. FÖRORD

1.1. *Operationsförstärkarens historia*

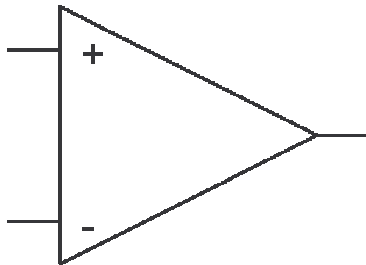
Operationsförstärkaren introducerades i slutet av 40-talet när man började utarbeta metoder för att lösa stora differentialekvationssystem med analoga datorer, så kallade analogmaskiner. Ordet operation kommer förresten från matematiska operationer. Operationsförstärkaren kan kopplas för att addera, subtrahera, multiplicera, dividera, derivera och integrera. Det mesta av den uppgiften görs idag med datorer. Operationsförstärkaren är dock etablerad som en grundläggande komponent i analoga elektroniksystem. En av de personer som brukar ges äran av att ha utvecklat operationsförstärkaren är George Philbrick. Han konstruerade 1948 en operationsförstärkare med endast ett elektronrör. Under femtiotalet ersatte transistorerna successivt elektronrören i elektronikkonstruktioner. Den första integrerade kretsen, dvs. kretsar med flera transistorer på en och samma halvledarplatta, lanserades 1959. Den första integrerade operationsförstärkaren ($\mu A709$) konstruerades 1964 av Bob Widlar som då arbetade vid Fairchild Semiconductor (han övergick senare till National Semiconductor). Under åren 1964-68 utvecklades flera integrerade operationsförstärkare; 702, 709 och 741 vid Fairchild och 101/301 vid National Semiconductor för att nämna några.

1.2. *Kompendiet*

Det är angeläget att studenter som läser kurser i analog elektronik lär sig använda och förstå grunderna kring operationsförstärkaren då den är så användbar och funktionell. Tyvärr är det svårt att hitta en bra kursbok som täcker hela det ämnesområde som man försöker få med i en elektronikurs. Operationsförstärkaren är den del som enligt min erfarenhet oftast trillat utanför. Det här kompendiet kommer förhoppningsvis att fungera som ett bra komplement till annan kurslitteratur. Synpunkter på innehåll och utformning mottages tacksamt.

2. DEN IDEALA OPERATIONSFÖRSTÄRKAREN

När vi pratar om operationsförstärkare utgår vi oftast från en ideal operationsförstärkare och använder en generell symbol för kretsen (Figur 2-1). Insignalen till kretsen är spänningsskillnaden mellan plus- och minusingången till vänster och utsignalen är spänningen på utgången till höger (i förhållande till jord).



Figur 2-1 Symbol för en generell operationsförstärkare.

Den ideal operationsförstärkare skall ha oändlig förstärkning

$$A = \infty,$$

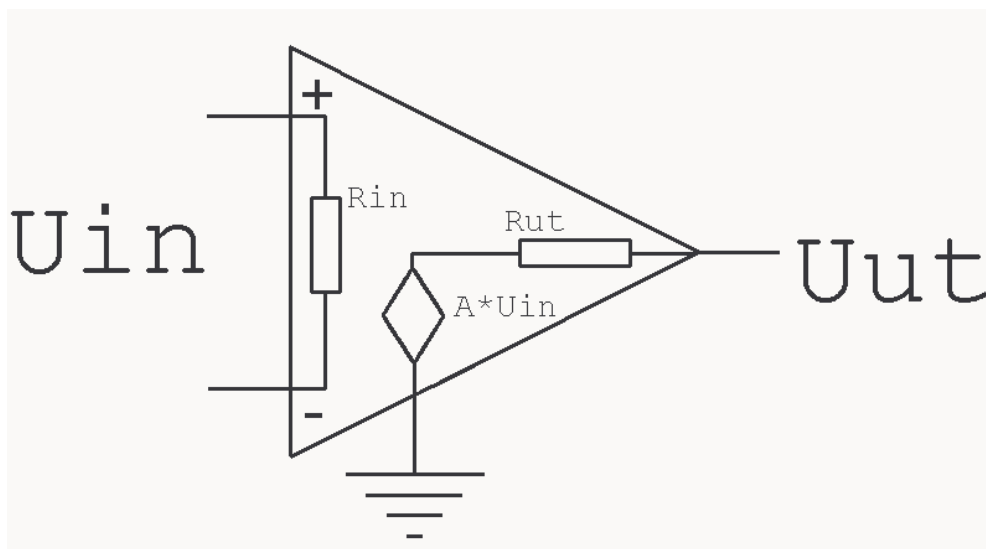
oändlig inimpedans

$$R_{in} = \infty$$

och utimpedansen noll

$$R_{ut} = 0.$$

För att lättare förstå dessa egenskaper kan vi skapa en elektrisk modell för den ideala op-förstärkaren (Figur 2-2).



Figur 2-2 Elektrisk modell av op-förstärkaren.

Den höga inimpedansen medför att ingen ström går in på ingångarna, den höga förstärkningen gör att förstärkaren vid motkoppling (se avsnitt 3.1) inte har någon spänningsskillnad mellan ingångarna och den låga utimpedansen gör att utspänningen inte sjunker vid belastning.

3. FÖRSTÄRKARKOPPLINGAR

3.1. Motkoppling

De vanligaste grundkopplingarna är när operationsförstärkaren motkopplas med två resistorer för att ge en viss förstärkning. Motkopplingen görs alltid mot minusingången på förstärkaren så att den del av utsignalen som återförs hamnar i motfas till insignalen. Om återkopplingen görs mot plusingången kommer den del av utspänningen som återförs i medfas till insignalen och förstärkaren kan självsvänga. Det finns två grundkopplingar, en inverterande och en icke inverterande koppling. Att förstärkaren är inverterande innebär att utspänningen är i motfas till inspänningen. En minnesregel för att avgöra om kopplingen är inverterande är att se om insignalen kopplas mot plus- eller minusingången av operationsförstärkaren. Kopplas insignalen mot plusingången är förstärkarkopplingen icke inverterande och kopplas den mot minusingången är den inverterande.

3.2. Förstärkarkopplingars egenskaper

I de flesta fall kan operationsförstärkaren betraktas som ideal och du kan då räkna med följande egenskaper när du härleder uttryck för resulterande förstärkning.

Hög inresistans \Rightarrow Inga strömmar på operationsförstärkarens ingångar.

Hänsyn måste dock tas till att förströmmar krävs på ingångarna. Om motkopplingsnätet är alltför höghohmigt kan också inresistansen få betydelse. Högre resistansvärden än ca $1 \text{ M}\Omega$ bör inte användas.

Låg utresistans \Rightarrow Utspänningen sjunker inte på grund av belastning.

Förstärkaren kan dock inte driva hur stor ström som helst. Största belastningsström brukar anges i datablad. Belastningen får alltså inte vara alltför låghohmig.

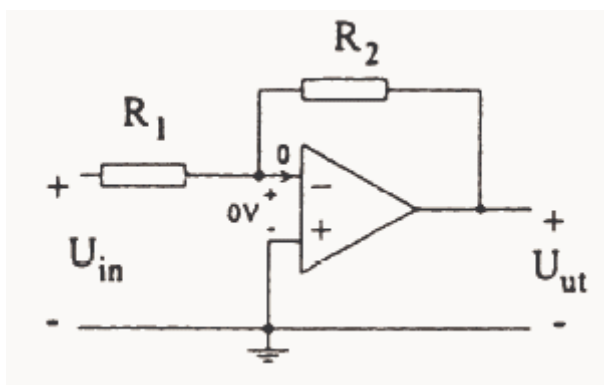
Hög förstärkning \Rightarrow Noll volt mellan ingångarna vid motkoppling

Eftersom utspänningen är i aktiva området mellan matningsspänningarna och förstärkningen är stor kommer spänningsskillnaden att vara liten mellan ingångarna. Inspänningen kan approximativt anses vara noll jämfört med övriga spänningar i kopplingen. Det innebär dock inte att ingångarna kan kopplas ihop. Ingångarna karakteriseras av 0 V spänningsskillnad och 0 A ström, dvs. liknar både kortslutning och avbrott.

3.3. Inverterande förstärkare

Figur 3-1 visar den inverterande grundkopplingen. Eftersom spänningsskillnaden mellan plus- och minusingång kan anses vara mycket liten kommer potentialen på minusingången att vara noll. Ibland kallas den punkten för virtuell jordpunkt. Inspänningen U , hamnar helt och hållet över R_1 och ger upphov till en ström

genom R_2 . Eftersom operationsförstärkaren har hög inresistans går det ingen ström in på dess minusgång så strömmen genom R_1 tvingas gå genom R_2 till operationsförstärkarens utgång. Spänningen som då uppstår över R_2 ger utspänningen U_{ut} .



Figur 3-1 Inverterande grundkoppling

Spänningsförstärkningen kan beräknas

$$\frac{U_{in} - 0}{R_1} = \frac{0 - U_{ut}}{R_2}$$

$$F = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1}$$

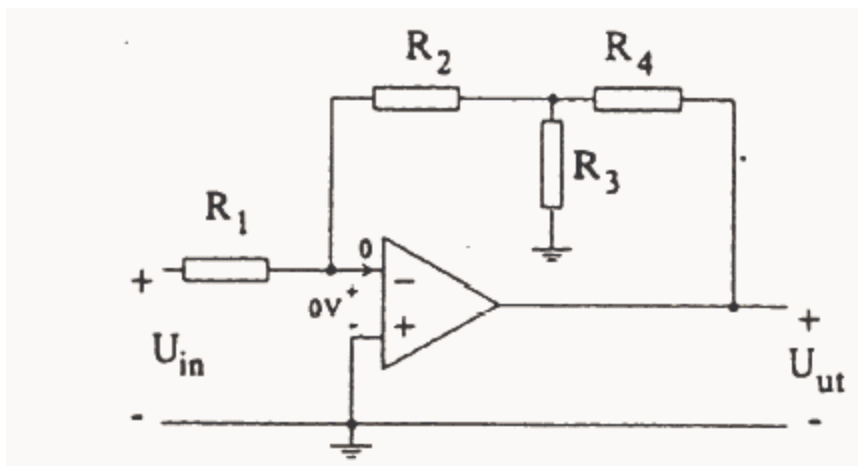
dvs. förstärkningen är

$$F = -\frac{R_2}{R_1} \quad (1)$$

Inresistansen blir

$$\frac{U_{in}}{I_{in}} = R_{in} = R_1.$$

I många fall önskas hög inresistans och det kan då leda till orimligt höga värden på R_2 om man samtidigt även vill ha hög förstärkning. En variant av inverterande koppling där förhållandet mellan resistorerna inte är så stort visas i Figur 3-2.



Figur 3-2 Inverterande koppling som inte kräver lika höga resistansvärden

Förstärkningen för den här kretsen blir

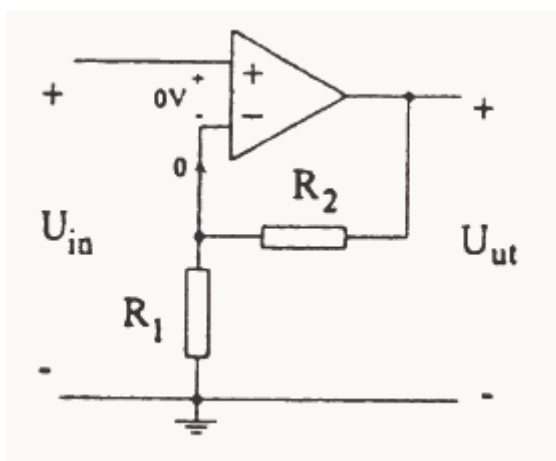
$$\frac{U_{in} - 0}{R_1} = \frac{0 - V}{R_2} \Rightarrow V = -\frac{R_2}{R_1} U_{in}$$

$$U_{ut} = \left(\frac{V - 0}{R_2} + \frac{V - 0}{R_3} \right) R_4 + V = V \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

$$A = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = -\frac{R_2}{R_1} \left(1 + \frac{R_4}{R_2} + \frac{R_4}{R_3} \right)$$

3.4. Icke-inverterande förstärkare

Figur 3-3 visar den icke inverterande grundkopplingen. Även här använder vi regeln att spänningsskillnaden mellan ingångarna är noll. Det innebär att U_{in} är lika med spänningen över R_1 . Eftersom ingen ström går in på minusingången kommer spänningen över R_1 , att ge upphov till en ström som går genom R_1 och R_2 och ger en utspänning som är större än U_{in} .



Figur 3-3 Icke inverterande grundkoppling

Förstärkningen F för den icke inverterande kopplingen är

$$U_- = \frac{U_{ut}}{R_1 + R_2} R_1$$

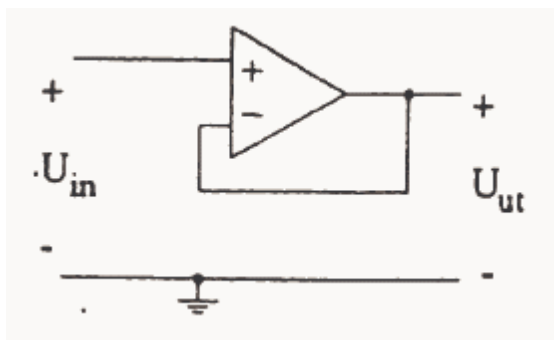
$$U_- = U_+ = U_{in}$$

$$F = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{R_1 + R_2}{R_1} \quad (2)$$

Här blir inresistansen hög eftersom signalen går direkt till en av operationsförstärkarens ingångar.

3.5. Spänningsföljare

Figur 3-4 visar spänningsföljarkopplingen. Den kallas så därför att utspänningen är lika med inspänningen. När inspänningen varierar följer alltid utspänningen med. Kopplingens användning är som buffertsteg när belastningen på föregående steg skall vara liten eller för att öka drivförmågan (hur stor ström på utgången som kopplingen klarar). Kopplingen har hög inresistans och låg utresistans.



Figur 3-4 Spänningsföljare

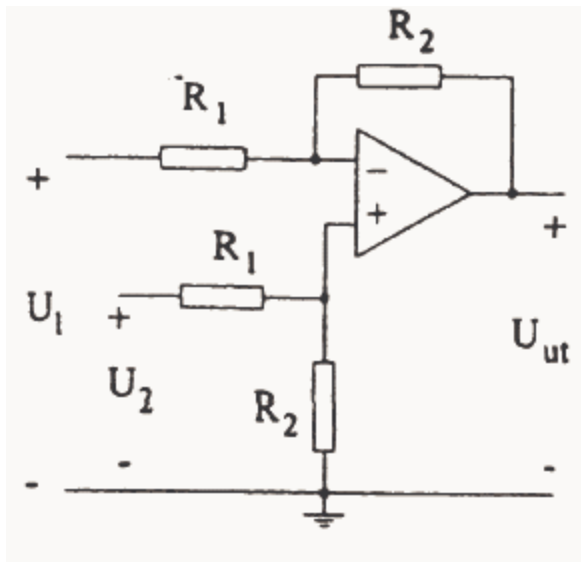
$$U_{ut} = U_{in}$$

$$F = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = 1 \quad (3)$$

I spänningsföljaren blir R_{in} stor och R_{ut} liten.

3.6. Differentialförstärkare

Differentialförstärkarkopplingen i Figur 3-5 används för att förstärka spänningsskillnaden (differential mode) mellan ingångarna. Spänningar som kommer in lika på båda ingångarna (common mode) i förhållande till jord skall inte förstärkas.



Figur 3-5 Differentialförstärkare

Eftersom vi har negativ återkoppling kommer spänningsskillnaden mellan plus- och minusingången vara noll, dvs.

$$U_+ = U_-$$

och eftersom strömmen in på ingångarna är noll kommer strömmen som går genom resistorn R1 vara densamma som strömmen genom R2

$$\frac{U_1 - U_-}{R_1} = \frac{U_- - U_{ut}}{R_2}$$

Spänningen på plusingången (samma som minusingången) är enkel att beräkna med hjälp av spänningsdelning

$$U_+ = U_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$

$$U_- \left(\frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_2} \right) = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_{ut}}{R_2}$$

$$U_2 \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot \frac{R_1 + R_2}{R_1 \cdot R_2} = \frac{U_1}{R_1} + \frac{U_{ut}}{R_2}$$

$$\frac{U_2}{R_1} - \frac{U_1}{R_1} = \frac{U_{ut}}{R_2} \Rightarrow U_{ut} = \frac{R_2}{R_1} (U_2 - U_1) \quad (4)$$

Utsignalen är därmed differensen mellan de två ingångarna och kopplingen kallas följaktligen även subtraherare.

Kopplingen som visas i Figur 3-5 är inte så bra i praktiken eftersom den kräver perfekt matchning av de resistorer som skall vara lika för att ge låg Common Mode-förstärkning. Dessutom har den olika inresistans på den inverterande och den icke inverterande ingången vilket gör att ingångarna är olika känsliga för störningar. Det är dessutom svårt att göra förstärkningen variabel eftersom två resistorer måste ändras på ett sånt sätt att de följs åt. En bättre koppling som

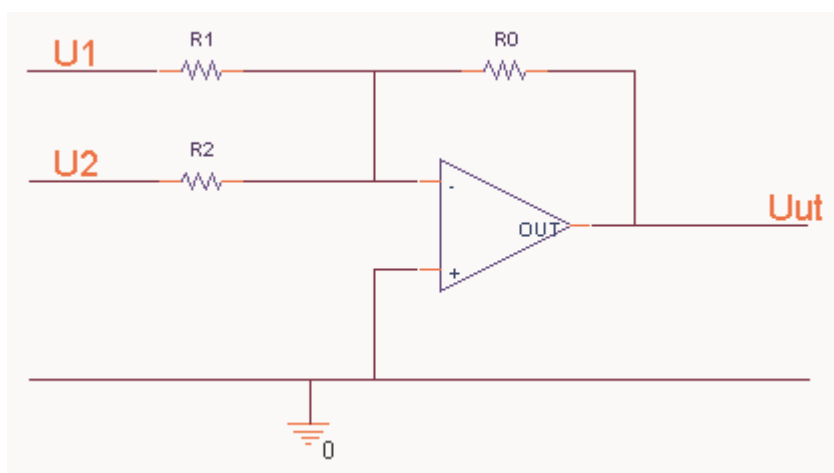
förstärker differensen mellan två ingångar och som har högre inresistans och bättre CMRR visas i Figur 3-7. Den kopplingen brukar kallas instrumentförstärkare och är flitigt använd i mätförstärkare.

3.7. Summator

Kopplingen i Figur 3-6 är en negativt återkopplad op-förstärkare med 2 ingångar kopplade till den inverterande ingången. Var och en av de anslutna spänningarna bidrar med en ström som bestäms av

$$I_i = \frac{U_i}{R_i}$$

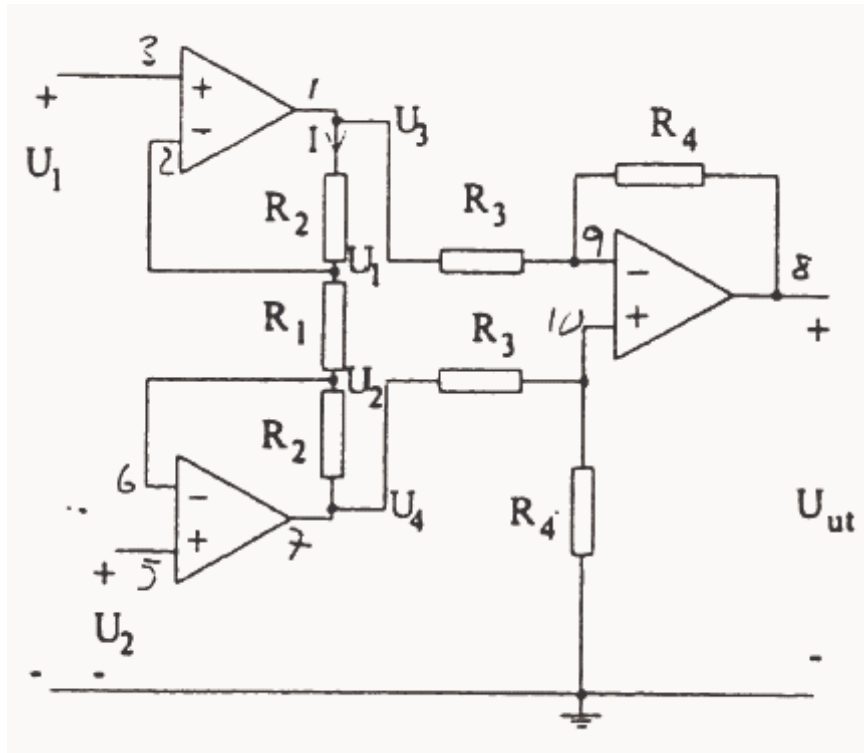
där i anger vilken av ingångarna man avser. Detta innebär att U_{ut} kommer att bli proportionell mot summan av strömmarna, som på vanligt sätt bildar en spänning över det återkopplande motståndet R_0 .



Figur 3-6 Summator

Kopplingen är inte begränsad till att bara summera två signaler. Vi kan enkelt bygga ut kopplingen med fler anslutningar och motsvarande resistorer så att vi får så många ingångar som vi behöver. Vi kan också använda denna koppling till en enkel digital-analog-omvandlare genom att variera värdena på resistorerna R_1, R_2, \dots enligt det binära talsystemets uppbyggnad, dvs. $2R, 4R, 8R, \dots$

3.8. Instrumentförstärkaren



Figur 3-7 Instrumentförstärkare

Strömmen I genom R_2 , R_1 och R_2 är lika eftersom ingångsresistansen till op-kretsarna är idealt oändliga och därför får vi

$$\begin{cases} I = \frac{U_1 - U_2}{R_1} \\ U_3 = U_1 + R_2 I \\ U_4 = U_2 - R_2 I \end{cases}$$

Skilnaden i spänning mellan utgången på den övre respektive nedre op-förstärkaren blir då

$$\begin{aligned} U_3 - U_4 &= U_1 - U_2 + 2R_2 I = \\ &= U_1 - U_2 + 2R_2 \frac{U_1 - U_2}{R_1} = \\ &= (U_1 - U_2) \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) \end{aligned}$$

Resistorerna betecknande R_3 och R_4 bildar tillsammans med den högra op-förstärkaren en subtraherare och vi kan därför beräkna utspänningen

$$U_{ut} = \frac{R_4}{R_3} (U_4 - U_3)$$

$$U_{ut} = \frac{R_4}{R_3} \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) (U_2 - U_1) \quad (5)$$

Vi kan förenkla ekvationen väsentligt genom att välja

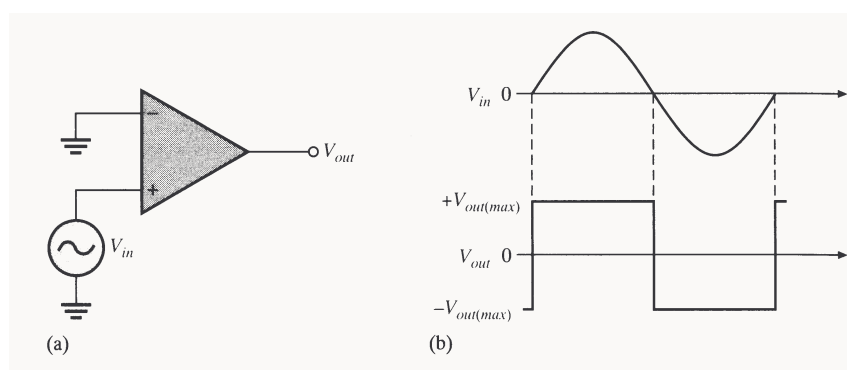
$$R_3 = R_4$$

$$U_{ut} = \left(1 + 2 \frac{R_2}{R_1} \right) (U_2 - U_1) \quad (6)$$

Om man väljer att inte förändra värdet på de två resistorer som har värdet R_2 kan man relativt enkelt justera förstärkningen genom att ändra värdet på enbart en resistor, R_1 .

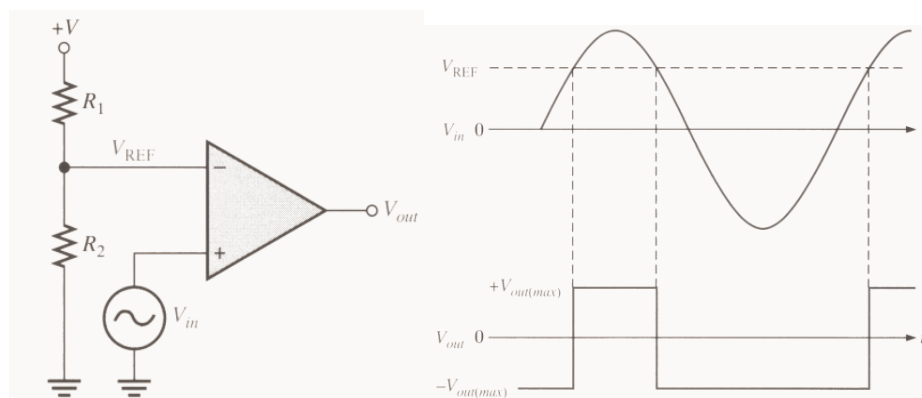
3.9. Komparator

Komparatorn är, precis som namnet säger, en koppling vilken jämför två signaler. Det vanliga sättet att använda kopplingen är att man jämför en insignal med någon slags referenssignal.



Figur 3-8 Komparator med nollnivå detektering

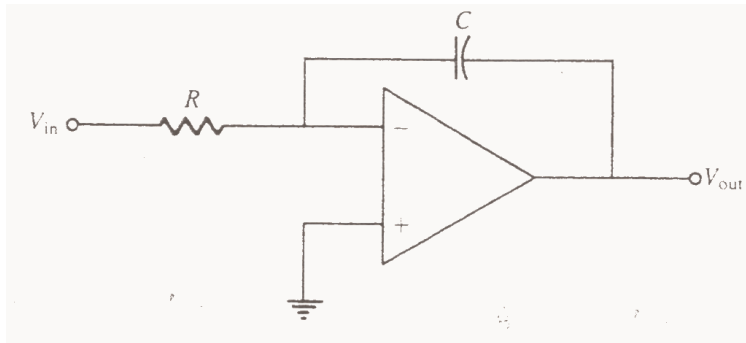
I sin enklaste form använder man enbart en op-förstärkare (se Figur 3-8). Till minus-ingången kopplar man referensen och till plus-ingången den signal man vill få jämförd. När insignalen är större än referensen kommer op-förstärkaren ge maximalt positiv utsignal. Är insignalen mindre blir det motsvarande negativ utsignal.



Figur 3-9 Komparator med referenssignal

3.10. Integrator

Integrering är i grunden ett sätt att matematiskt bestämma arean under en kurva. Därför ger integratorn i Figur 3-10 en utsignal som är proportionell till arean under kurvan av inspänningen.



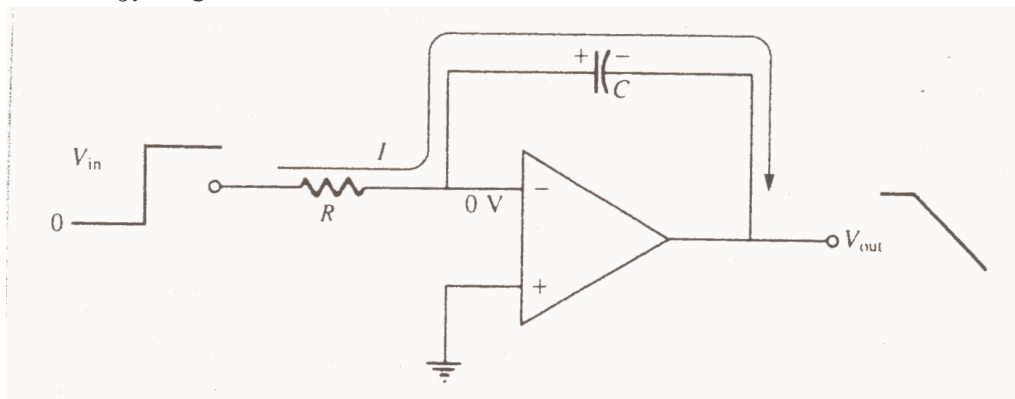
Figur 3-10 Integrator

När en spänning V_{IN} kopplas till ingången på kretsen så blir strömmen genom resistorn R

$$I = \frac{V_{IN}}{R}$$

och hela strömmen kommer gå till kondensatorn som laddas upp så som beskrivs i Figur 3-11. Det är här värt att tänka på att uppladdningen av en kondensator är proportionell mot strömmen

$$\frac{\partial V}{\partial t} = \frac{I}{C}$$



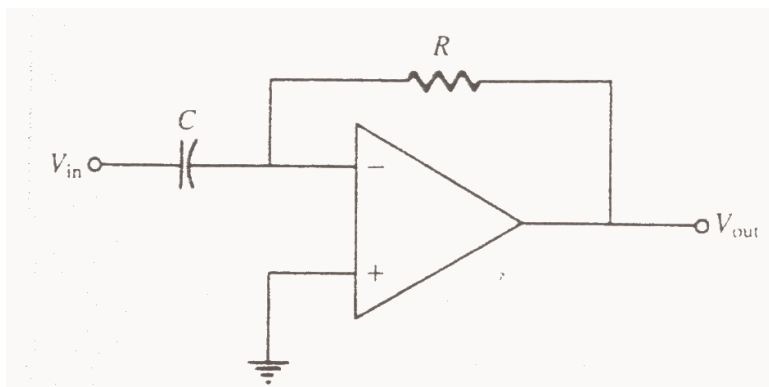
Figur 3-11 Utsignalens förändring då en spänning kopplas till en integrator.

Den takt med vilken spänningen över kondensatorn förändras, och därmed utsignalens förändring, beror på förhållandet mellan strömmen I och kondensatorns kapacitans C . Från ekvationerna ovan får vi

$$\frac{\partial V_{ut}}{\partial t} = \frac{V_{IN}}{RC}$$

3.11. Derivator

En op-koppling som deriverar visas i Figur 3-12. Förändringen jämfört med integreraren är enbart att resistor och kondensator har bytt plats.



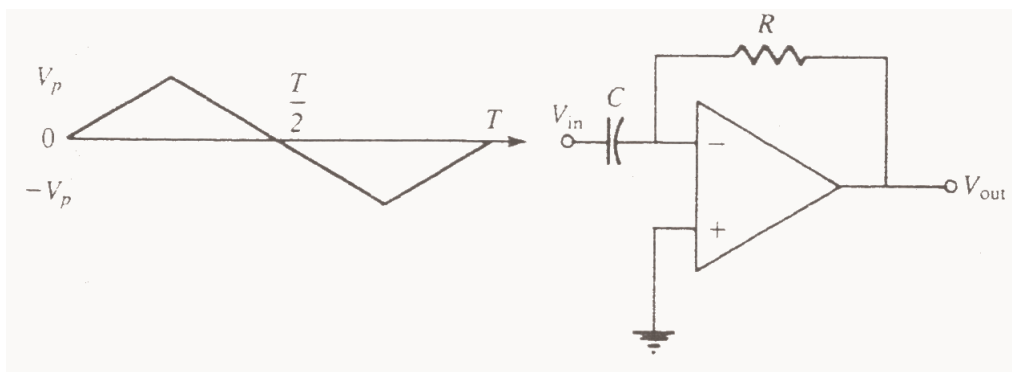
Figur 3-12 Derivator

Om vi kopplar en triangelvåg till ingången (Figur 3-13) kommer till en början spänningen över kondensatorn C öka linjärt och eftersom strömmen genom kondensatorn bestäms av

$$i = C \frac{\partial V}{\partial t}$$

kommer strömmen genom kondensatorn att vara konstant

$$I = \frac{CV_{pp}}{T/2}.$$

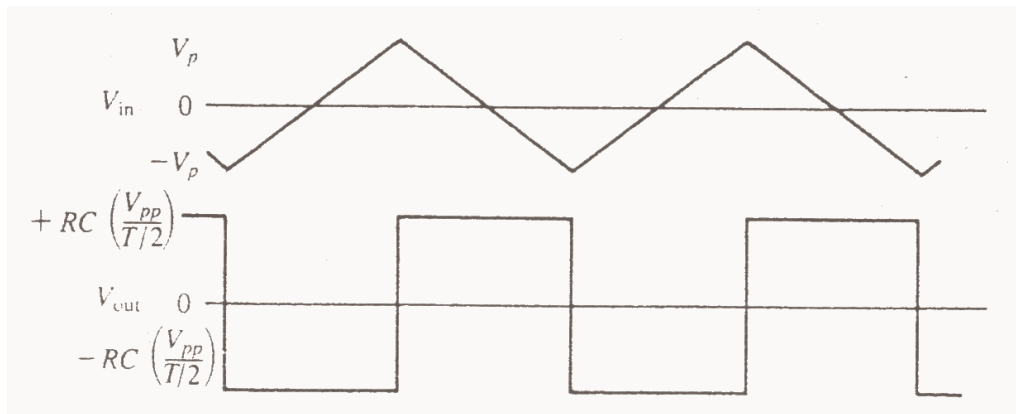


Figur 3-13 Triangelvåg kopplad till derivatorns ingång.

Eftersom utspänningen är spänningen över resistorn R och eftersom strömmen I är konstant blir även utspänningen konstant

$$V_{out} = \pm RC \left(\frac{V_{pp}}{T/2} \right).$$

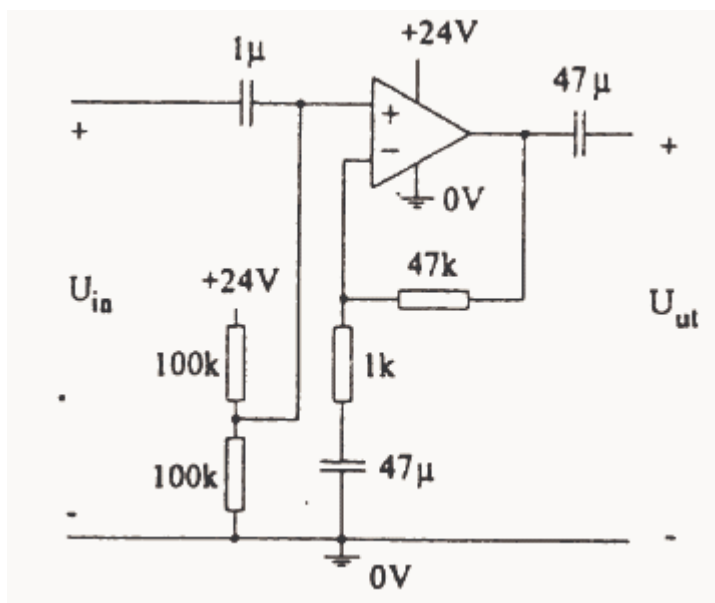
När insignalen ökar blir utsignalen negativ och positiv då utsignalen minskar. In- och utsignalen för vårt exempel visas i Figur 3-14.



Figur 3-14 Insignal och motsvarande utsignal för derivatorn.

3.12. Matningsspänningar

Operationsförstärkare behöver inte matas med ± 15 V. De kan matas med lägre spänning eller till och med osymmetrisk spänning (t ex +10 V och -5 V) så länge totala matningsspänningen ligger inom specifikationen för kretsen. Om operationsförstärkaren skall drivas med enkelmatning och förstärker växelspanning kan man använda kretsar avsedda för dubbelmatning om en konstgjord referens skapas mellan noll och matningsspänningen. Ett exempel på detta visas i Figur 3-15 för en icke inverterande växelspanningsförstärkare. En likspänningsnivå på halva matningsspänningen alstras med en spänningsdelare för att ge lämpligt vilovärde på operationsförstärkarens ingång. Även utgången kommer att ligga på samma nivå eftersom kopplingen fungerar som en spänningsföljare för likspänning. Med kopplingskondensatorer på ingång och utgång ser man till att enbart växelspanning kommer in till förstärkaren och att likspänningsnivån på utgången filtreras bort. Kondensatorn 47 pF i motkopplingen tillsammans med resistorerna ser till att lämplig förstärkning erhålls för växelspanning. I det här fallet blir spänningsförstärkningen $(47k + 1k)/1k = 48$ ggr



Figur 3-15 Konstgjord nollreferens för enkel matningsspänning till op avsedd för dubbelmatning

Nu finns det även operationsförstärkare att köpa som tål att inspänningen går ner till negativa matningsspänningen och kan driva utgången ned till negativa

matningsspänningen. Den negativa matningsspänningen kan alltså vara noll volt, dvs. förstärkaren klarar av enkelmatning. Om inspänning och utspänning enbart skall vara positiva och dubbel matningsspänning inte finns tillgängligt är det naturligtvis enklare att använda en operationsförstärkare som klarar enkelmatning. Det finns ett flertal operationsförstärkare som klarar enkelmatning. En flitigt använd krets är LM 324 med fyra operationsförstärkare i en kapsel.

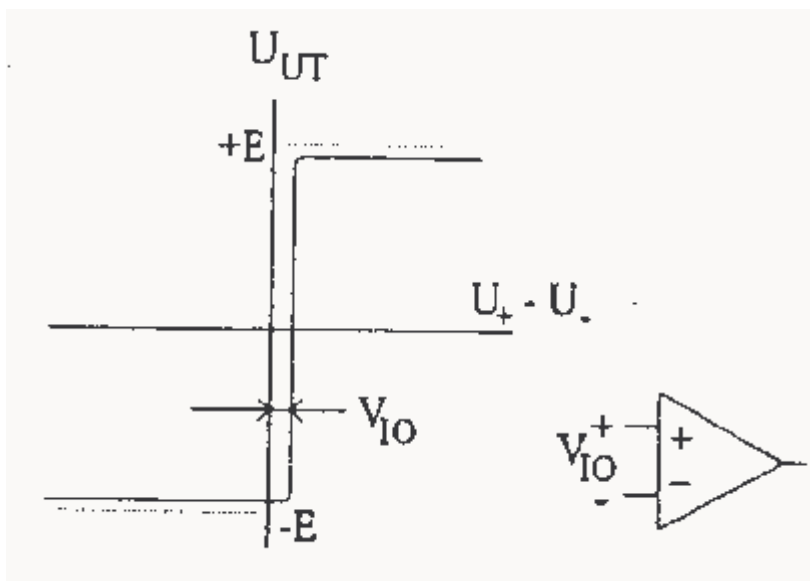
4. DEN VERKLIGA OPERATIONSFÖRSTÄRKAREN

4.1. Egenskaper

Ingen komponent är ideal men den verkliga operationsförstärkaren har data som gör att den i många fall kan betraktas som ideal. I andra fall måste däremot hänsyn tas till den verkliga operationsförstärkarens begränsningar. Vidare finns det ett stort antal olika typer av operationsförstärkare. För att kunna använda operationsförstärkaren på rätt sätt och kunna välja rätt typ i krävande tillämpningar är det viktigt att du känner till hur de egenskaper som redovisas i databladet påverkar en konstruktion. Som exempel på en allmänbruksförstärkare fördjupar vi oss i operationsförstärkaren 741. Den är en välkänd operationsförstärkare som först konstruerades av Fairchild Semiconductor. Den introducerades redan 1966 och används fortfarande flitigt även om den har fått många efterföljare.

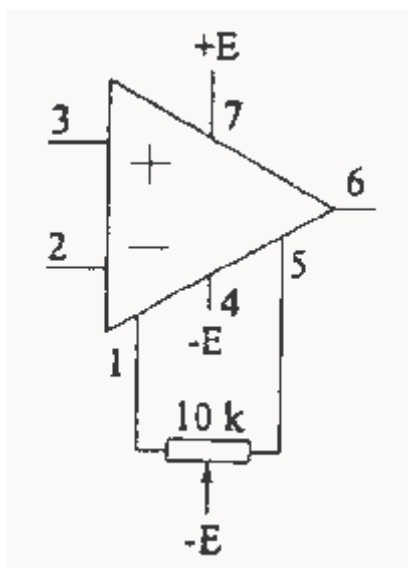
4.1.1. Offsetspänning

En ideal OP bör ge noll volt ut med noll volt in. På grund av obalanser i ingångssteget kan det dock finnas en likspänningsnivå (offset) på utgången fastän ingången är kortsluten. Offsetspänningen (V_{IO} , input offset voltage) definieras som den spänning som måste läggas mellan ingångarna för att utspänningen skall bli noll. Man kan också se det som att det finns en liten likspänning mellan ingångarna på förstärkaren (se Figur 4-1). Typiska värden på V_{IO} är $\pm 1-5$ mV för en bipolär operationsförstärkare. För operationsförstärkare med JFET-ingång eller i MOS-teknik kan V_{IO} uppgå till ± 20 mV. Även om offsetspänningen är låg kan det ge en felaktig likspänningsnivå på utgången eftersom offsetspänningen i regel förstärks. Offsetspänning är ett viktigt begrepp eftersom förströmmarna på ingången även kan ge upphov till offsetspänning på utgången. Operationsförstärkaren 741 har $V_{IO} = 1$ mV (typvärde).



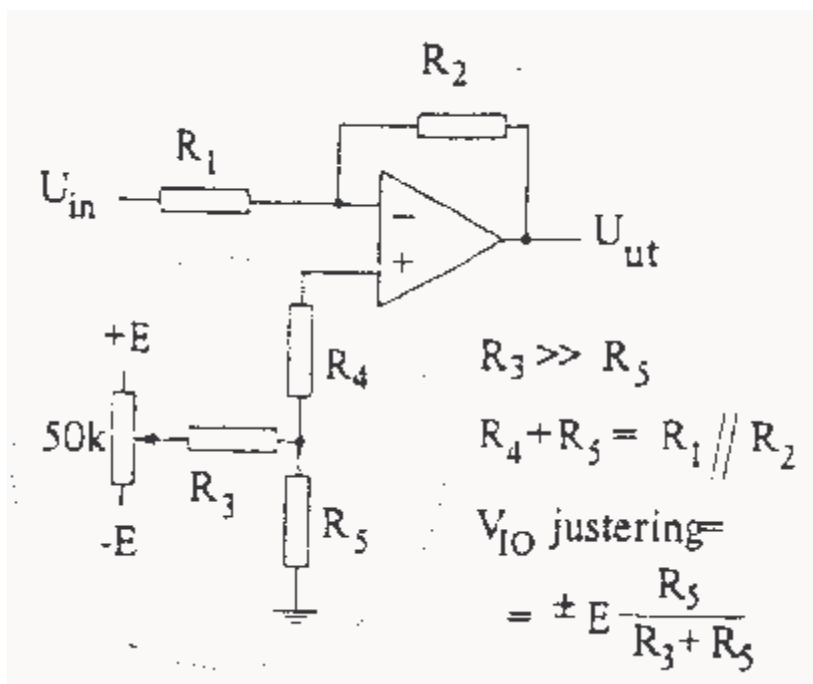
Figur 4-1 Offsetspänning V_{IO} .

På vissa operationsförstärkare finns det möjlighet att korrigera offsetspanningen med en yttre potentiometer. Figur 4-2 visar hur offsetspanningen kan korrigeras på operationsförstärkaren 741.



Figur 4-2 Justering av offsetspanning på 741.

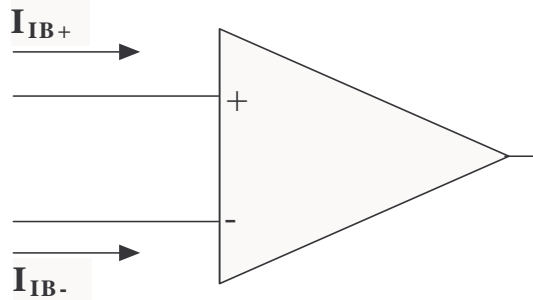
Måste offsetspanningen trimmas till noll och förstärkaren inte har möjlighet till korrektion med yttre potentiometer kan man istället införa ett yttre nät som ger en spänning motriktad V_{IO} på ingången. Ett exempel på detta visas i Figur 4-3.



Figur 4-3 Yttre kompensering av offsetspanning i en inverterande förstärkarekoppling

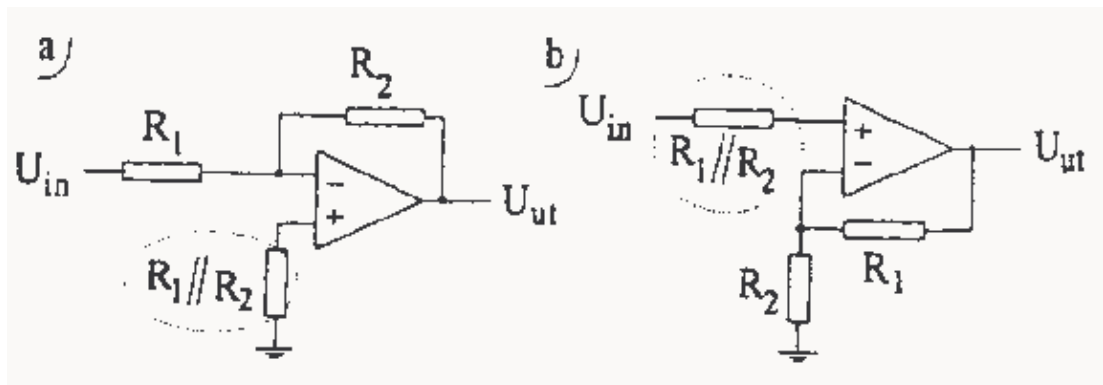
4.1.2. Förströmmar

Operationsförstärkarens ingångssteg kräver basströmmar på ingången för att ge förstärkning. Dessa strömmar kallas förströmmar (input bias current), se Figur 4-4.



Figur 4-4 Förströmmar I_{IB}

Förströmmarna på förstärkarens ingångar måste finnas där och det skall därför alltid finnas en likströmsväg till jord på ingångarna så att ingångstransistorerna får basström. Förströmmarna kan ge en offsetspänning på utgången till följd av spänningsfall över resistorer anslutna till ingångarna. Ett sätt att minska inverkan av förströmmarna är att se till att samma likströmsresistans finns på båda ingångarna. I Figur 4-5 visas detta för de två vanliga typkopplingarna. Med samma resistans på plus- och minusingången ger förströmmarna ingen spänningsskillnad mellan ingångarna på förstärkaren. Förströmmarna har störst inverkan vid kopplingar med höga inresistanser och hög förstärkning. Vid konstruktionen av operationsförstärkaren försöker tillverkaren dimensionera transistorerna i ingångsteget med låga basströmmar för att få så hög inresistans som möjligt (h_{ie} högre vid litet I_B). Låga basströmmar har dock den nackdelen att det ger lägre bränthet och lägre förstärkning för ingångsteget.



Figur 4-5 Kompensering för förströmmarna a) inverterande grundkoppling och b) icke-inverterande grundkoppling.

Förströmmen definieras som medelvärdet av förströmmarna på båda ingångarna.

$$I_{IB} = \frac{I_{IB+} + I_{IB-}}{2}$$

Förströmmarna är i storleksordningen 10 – 100 nA för bipolära OP och 1 – 100 pA för OP med JFET som ingångssteg. Operationsförstärkaren 741 har $I_{IB} = 80$ nA (typvärde).

4.1.3. Offsetström

På grund av obalanser i ingångsteget kan förströmmarna vara olika på ingångarna och offsetströmmen (input offset current) definieras som skillnaden mellan förströmmarna.

$$I_{IO} = I_{IB+} - I_{IB-}$$

Operationsförstärkaren 741 har $I_{IO} = 20 \text{ nA}$ (typvärde).

4.1.4. Temperaturdrift

När temperaturen ändras påverkas även offsetspänning och förströmmar. I precisionstillämpningar kan detta ha betydelse. Typiska värden på temperaturdrift för offsetspänningen är några $\mu\text{V}/^\circ\text{C}$. Operationsförstärkaren 741 har $10 \mu\text{V}/^\circ\text{C}$ temperaturdrift på offsetspänningen och $1 \text{ nA}/^\circ\text{C}$ temperaturdrift på förströmmarna.

4.1.5. Inspänningar

Operationsförstärkaren är en differentialförstärkare som skall förstärka skillnadsspänningen mellan ingångarna U_+ - U_- . Däremot skall spänningar som kommer in lika på ingångarna inte förstärkas. Skillnadsspänningen mellan ingångarna kallas för differential mode och spänningar som är lika på båda ingångarna kallas common mode. I datablad brukar specificeras vilka spänningsområden som är tillåtna för differential mode respektive common mode. Vanligen kan CM-inspänningen uppgå till ett par volt från matningsspänningen. Om spänningen ligger utanför tillåtet område, t ex nära matningsspänningen, kan förstärkningen ändras drastiskt och till och med byta tecken. I värsta fall kan även operationsförstärkaren förstöras. För operationsförstärkaren 741 garanteras funktionen om inspänningarna ligger inom $\pm 12 \text{ V}$ när matningsspänningen är $\pm 15 \text{ V}$.

4.1.6. CMRR

CMRR (Common Mode Rejection Ratio) är ett mått på förstärkarens förmåga att undertrycka common-mode spänningen. Det definieras som kvoten mellan förstärkningen för skillnadsinspänning och förstärkningen för common-mode inspänning.

$$CMRR = 20 \log \frac{A_{VDM}}{A_{VCM}}$$

där

$$A_{VDM} = \frac{U_{ut}}{U_+ - U_-}$$

$$A_{VCM} = \frac{U_{ut}}{U_{CM}}$$

och

$$U_{CM} = U_+ = U_-$$

En bra förstärkare bör således ha ett högt värde på CMRR. Typiska värden på CMRR för operationsförstärkare är 80-120 dB. Operationsförstärkaren 741 har CMRR = 90 dB (typvärde).

4.1.7. PSRR

PSRR (Power Supply Rejection Ratio) anger förhållandet mellan en ändring på offsetspänningen och motsvarande ändring på en av matningsspänningarna. Det anger alltså hur förstärkaren förmår undertrycka variationer på offsetspänningen som orsakas av matningsspänningsvariationer. Vanliga värden på PSRR är ca $30 \mu\text{V/V}$. Operationsförstärkaren 741 har PSRR $10 \mu\text{V/V}$ som typiskt värde.

4.1.8. Inresistans

Inresistansen till operationsförstärkaren ligger i området $0,1 - 5 \text{ M}\Omega$ för bipolära OP och $10^{10} - 10^{12} \Omega$ för förstärkare med JFET-ingång eller uppbyggda i MOS-teknik. Operationsförstärkaren 741 har inresistansen $2,0 \text{ M}\Omega$ (typvärde).

4.1.9. Utresistans

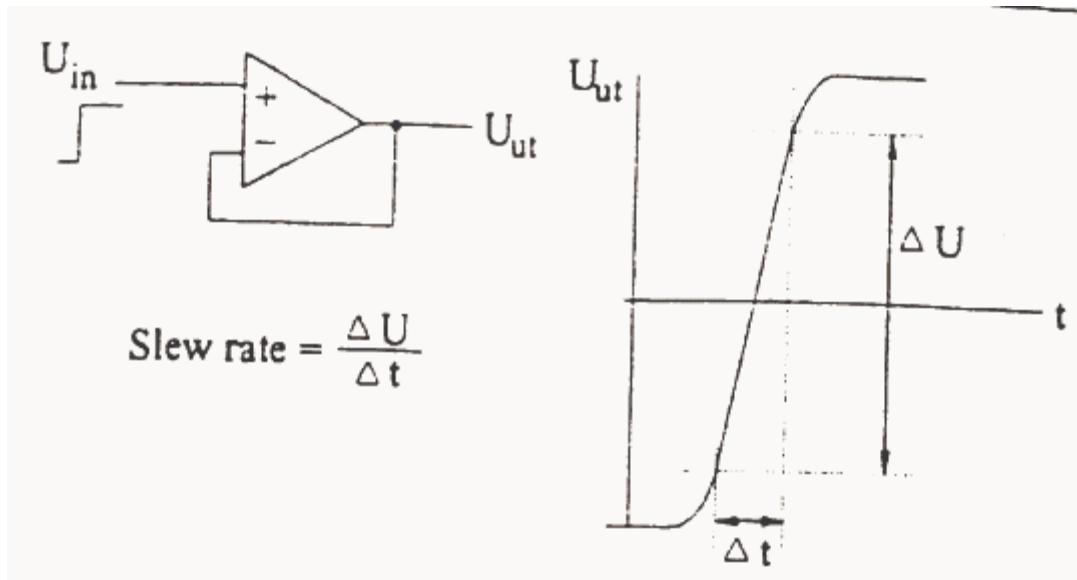
Utresistansen brukar ligga i storleksordningen $20 - 200 \Omega$. Operationsförstärkaren 741 har utresistansen 75Ω (typvärde).

4.1.10. Utspänning

Utspänningen från en operationsförstärkare kan, beroende på i vilken teknik utgångssteget är konstruerat, nå ända ut mot matningsspänningarna, men ofta bottnar förstärkaren ett par volt från matningsspänningen. I datablad specificeras vid given belastning vilken största positiva utspänning V_{OH} och största negativa utspänning V_{OL} eller vilken maximal variation som kan erhållas på utspänningen (output voltage swing). Operationsförstärkaren 741 har vid $\pm 15 \text{ V}$ matningsspänning ett typiskt sving $\pm 14 \text{ V}$ på utgången om belastningsresistansen inte understiger $10 \text{ k}\Omega$ och $\pm 13 \text{ V}$ om belastningsresistansen inte understiger $2 \text{ k}\Omega$.

4.1.11. Slew rate

Slew rate betecknar hur snabbt signalen kan förändras på förstärkarens utgång. Tänk dig att man ansluter en ideal fyrkantvåg till en spänningsföljare. Idealt skall då utsignalen också vara en ideal fyrkantvåg. Tyvärr kommer inte förstärkaren hinna med utan vi kommer se att utsignalen behöver en viss tid för att ändra värde (se Figur 4-6). Slew rate anges vanligen i $\text{V}/\mu\text{s}$.



Figur 4-6 Bestämning av slew rate.

Slew rate-värdet kan ibland vara ett problem, särskilt om vi vill ha en stor utsignal. Om t ex en sinusspänning

$$u(t) = \hat{U} \cdot \sin \omega t$$

skall förstärkas får tidsderivatan för den F -gångar förstärka utsignalen

$$\frac{\partial u}{\partial t} = F \cdot \hat{U} \omega \cos \omega t$$

$$\left[\frac{\partial u}{\partial t} \right]_{\max} = F \cdot \hat{U} \omega = F \cdot \hat{U} 2\pi f$$

inte överstiga slew rate-värdet för förstärkaren och den högsta tillåtna frekvensen vi kan ha utan att förvränga utspänningen blir

$$f_{\max} = \frac{\text{slew rate}}{2\pi \hat{U} \cdot F} \quad (7)$$

Allmänbruksförstärkare har slew rate 1-2 V/μs medan snabba operationsförstärkare kan ha slew rate upp till 30 V/μs. Operationsförstärkaren 741 har slew rate 0,5 V/μs (typvärde).

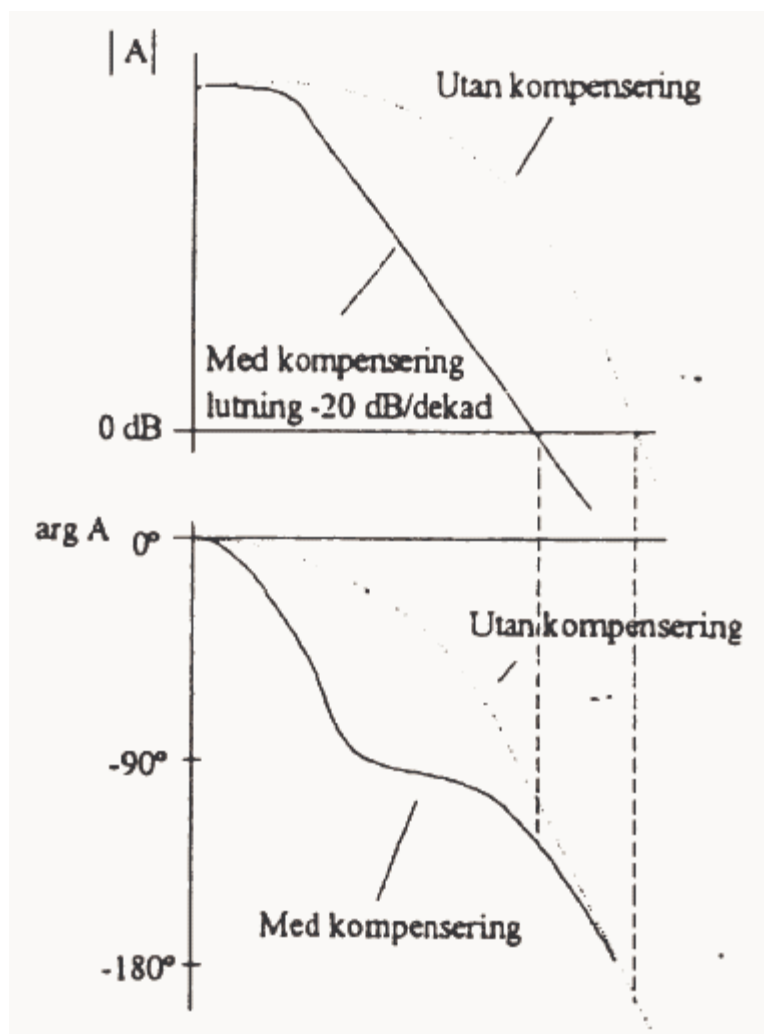
4.1.12. Spänningsförstärkning

Förstärkningen hos operationsförstärkare brukar överstiga 100 000 gånger. 741 har till exempel 200 000 gångers förstärkning (typvärde).

4.1.13. Frekvensberoende

Operationsförstärkarens frekvenskurva bör vara utformad så att förstärkaren är stabil vid motkoppling. Motkoppling innebär att en del av utsignalen återkopplas till minusingången på operationsförstärkaren så att den hamnar i motfas till insignalen. Om förstärkaren emellertid har ytterligare en fasvridning på -180° kan total fasvridning i förstärkare och återkopplingsnät bli -360° . I så

fall får vi medkoppling och om beloppet på förstärkningen i slingan samtidigt är större än ett börjar förstärkaren självsvänga. För att undvika detta brukar frekvenskurvan för operationsförstärkare modifieras så att fasvridningen inom det aktuella motkopplingsområdet inte blir så stor som -180° . Detta kallas för kompensering och kan antingen vara gjort inuti operationsförstärkaren (intern kompensering) eller åstadkommas med yttre komponenter (extern kompensering). I Figur 4-7 visas förstärkning och faskurva för en förstärkare med intern kompensering. En internt kompenserad OP enligt figuren är stabil vid motkoppling ner till 0 dB (spänningsföljare) om motkopplingsnätet är resistivt, dvs. utan fasvridning.



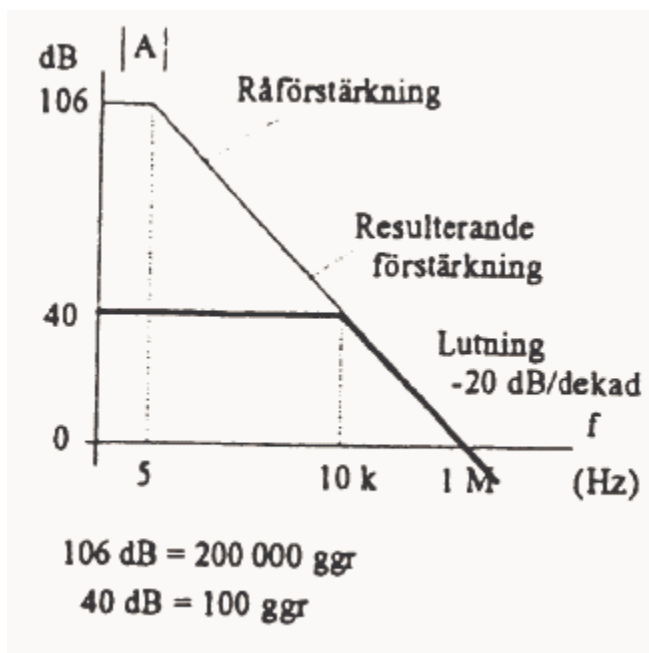
Figur 4-7 Intern kompensering.

4.1.14. Bandbredd

En operationsförstärkare som är internt kompenserad har en låg övre gränshfrekvens. 741:an har till exempel övre gränshfrekvensen ca 5 Hz och vid 1 MHz har dess förstärkning sjunkit till ett (0 dB), se Figur 4-8.

Detta medför att om hög förstärkning önskas i den motkopplade förstärkaren blir övre gränshfrekvensen låg. Produkten av förstärkning och bandbredd (FB-produkt) är konstant längs en förstärkningskurva med lutningen -1 . Lutningen -1 (-20 dB/dekad, -6 dB/oktav) betyder att förstärkningen sjunker med en faktor 0,1 när frekvensen ökar med en faktor 10. Eftersom FB-produkten är 1 MHz blir övre gränshfrekvensen vid t ex 100 ggr resulterande förstärkning endast 10

kHz. Att tänka på är att även slew rate kan begränsa övre gränshfrekvensen, se avsnitt 4.1.11. FB-produkten är för vanliga operationsförstärkare 1 – 10 MHz.



Figur 4-8 Övre gränshfrekvens och FB-produkt