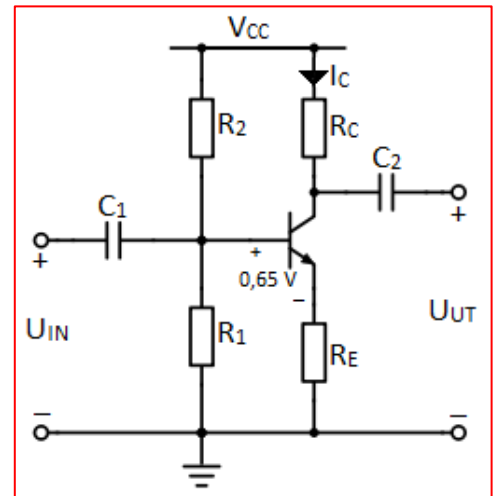


3.2 - Konstruktion av ett separat GE-steg

- GE-steget till höger skall användas för att driva en högtalare.
- GE-steget skall innehålla följande parametrar:
 - Matningsspänning $V_{CC} = 20\text{ V}$
 - Kollektorström i vilopunkten: $I_{CQ} = 1\text{ mA}$
 - Brytfrekvenser runt 1 Hz för att spärra likström.
- a) Dimensionera GE-steget resistorer så att förstärkningsfaktorn blir maximerad, samtidigt steget är temperaturstabil. Förstärkarsteget får modifieras vid behov, föredragsvis genom tillförandet av en emitterkondensator C_E .
- b) Dimensionera avkopplingskondensator C_1 på ingången för en undre brytfrekvens runt 1 Hz.
- c) Dimensionera även avkopplingskondensator C_2 på utgången för en undre brytfrekvens runt 1 Hz.
- d) Beräkna GE-stegets in- och utresistans vid signalfrekvenser (vid växelström).



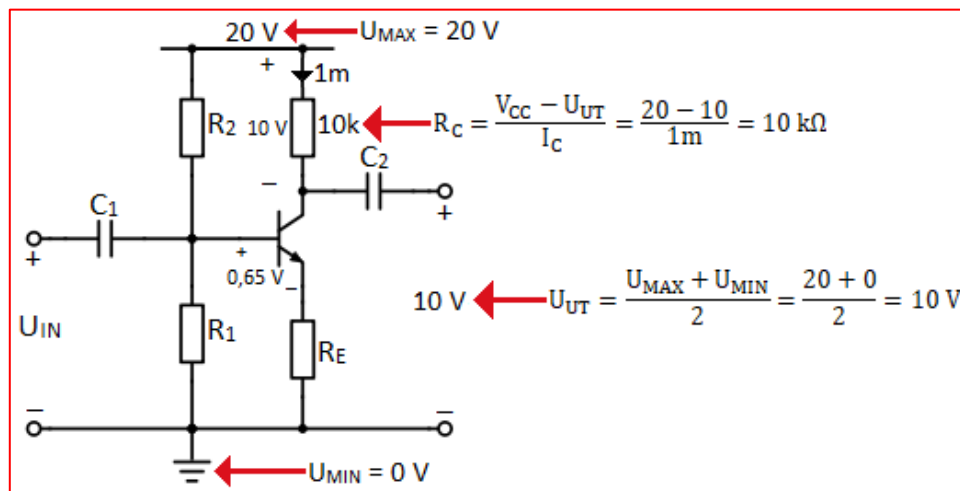
Separat GE-steg.

Se lösningar på efterföljande sidor!

- a) Dimensionera GE-stegets resistorer så att förstärkningsfaktorn blir maximerad, samtidigt steget är temperaturstabil. Förstärkarsteget får modifieras vid behov.

- Sätt utspänningen till GE-stegets mittpunkt, alltså medelvärdet av det minsta och det största värdet som utsignalen kan anta.
 - Se längst upp och längst ner på GE-steget nedan. Eftersom förstärkarsteget är ansluten till matningsspänningen 20 V och ned till jord så medför detta att utsignalerna kan svänga mellan 0–20 V. Detta medför att vår mittpunkt i detta fall är 10 V.
 - Därmed kan de sinusformade utsignalerna svänga upp till 20 V och ned till 0 V, med 10 V som mittpunkt. 20 V är maxvärdet på utsignalerna, medan 0 V är minimumvärdet. Däremellan kan utsignalerna röra sig fritt.
 - När vi dimensionerar GE-steget så arbetar förstärkarsteget i den så kallade vilopunkten, alltså insignalen är lika med noll. När insignalen är lika med noll så vill vi att utsignalen skall hamna i mittpunkten, alltså 10 V, för att utsignalen skall kunna svänga så lika mycket upp som ner, alltså ± 10 V, upp till 20 V och ned till 0 V. Utsignalen skall därför sättas till medelvärdet av 0 och 20 V, alltså 10 V.

$$U_{UT} = \frac{U_{MIN} + U_{MAX}}{2} = \frac{0 + 20}{2} = 10 \text{ V}$$



- Detta medför att vi dimensionerar GE-steget så att utsignalerna kan svänga maximalt utan att de blir klippta, som sker då utsignalen försöker överstiga 20 V eller understiga 0 V. Eftersom utsignalerna inte kan överstiga taket maxvärdet (20 V) eller minimumvärdet (0 V) så blir topparna i detta fall avklippta, vilket medför distorsion och därmed sämre ljud, vilket vi inte vill.
 - Eftersom 10 V av matningsspänningens 20 V hamnar på utgången så medför detta att resten, alltså $20 - 10 = 10$ V, hamnar över kollektorresistorn.
- Dimensionera kollektorresistorn R_C så att halva matningsspänningen (10 V) hamnar över den, samtidigt som önskad kollektorström (1 mA) flödar genom den.
 - Kollektorresistorn kan därefter beräknas med Ohms lag:

$$R_C = \frac{10}{1\text{mA}} = 10 \text{ k}\Omega$$

- Om återkoppling används så kan man strunta i detta och i stället maximera kollektorresistansen genom att ersätta kollektorresistorn med en strömgenerator. Då kan vi få en förstärkningsfaktor på -2000 eller mer. Dock är det viktigt att vi i detta fall har en höghög last eller använder ett slutsteg, annars kommer förstärkningen minska drastiskt.

3. Välj emitterresistor så att spänningsfallet 10 % av matningsspänningen hamnar över emitttern, samtidigt som önskad emitterström (ca 1 mA) flödar genom den.

- Spänningsfallet över emitterresistorn skall alltså vara 2 V, samtidigt som ca 1 mA flödar genom den. Därmed kan vi beräkna ett lämpligt värde på emitterresistorn med Ohms lag:

$$R_E = \frac{2}{1\text{mA}} = 2\text{ k}\Omega$$

- 2 kΩ:s resistorer finns i E24-serien, som vi väljer att använda.
- Vi approximerar här att emitterströmmen är lika med kollektorströmmen, då de i praktiken är nästan lika stora.

$$I_E \approx I_C = 1\text{ mA}$$

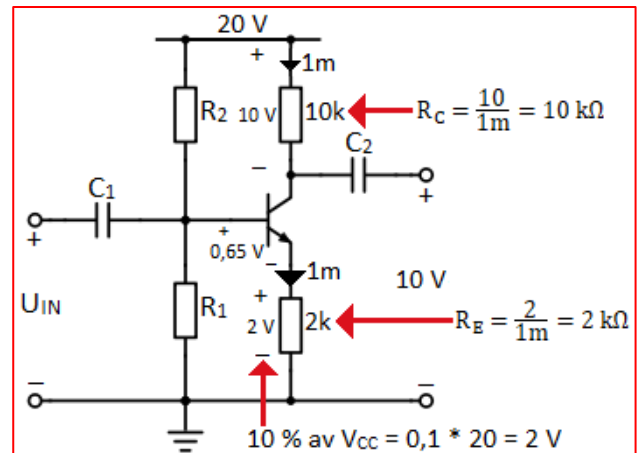
- Detta beror på att emitterströmmen är lika med summan av kollektorströmmen och basströmmen. Dock är kollektorströmmen väldigt mycket större än basströmmen, förmodligen ca 100 gånger större eller mer.
- Som exempel, om basströmmen hade varit lika 1 mA och kollektorströmmen hade varit lika med 100 mA, så hade emitterströmmen varit lika med 101 mA, vilket är nästan lika med kollektorströmmen. Skillnaden är obetydlig, men förenklar beräkningarna.
- Alltså gäller följande:

$$I_E = I_B + I_C \approx I_C, \text{ eftersom } I_C \gg I_B$$

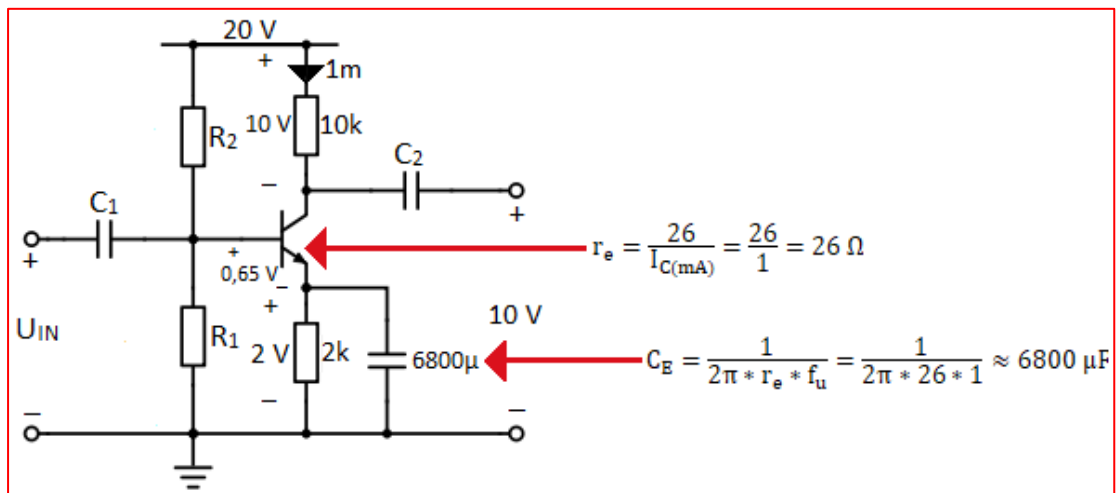
- Förmodligen är kollektorströmmen omkring 100 gånger större än basströmmen, om inte mer.
- Vi kan nu beräkna förstärkningsfaktorn för GE-steget ovan:

$$G = -\frac{R_C}{R_E + r_e} = -\frac{10\text{k}}{1\text{k} + 26} \approx -10$$

- Förstärkningen blev relativt låg på grund av att vi använder en emitterresistor. Som vi sett tidigare är det dock möjligt att maximera förstärkningen utan att förlora temperaturstabilitet samt utan att använda återkoppling genom att användas oss av ett trick.
- Vi parallellkopplar emitterresistorn med en kondensator med en kondensator, som spärrar för likström, men samtidigt släpper igenom signaler alldeles ovanför 0 Hz, exempelvis 1–5 Hz. För detta så måste kondensatorn vara tillräckligt stor.



4. Placera en kondensator parallellt med emitterresistorn för att öka förstärkningen vid växelström samtidigt som temperaturstabiliteten behålls.



- Dimensionera emitterkondensatorn C_E så att emitterresistorn blir förbikopplad vid ca 1 Hz.
- När emitterkondensatorn arbetar, alltså vid växelström, så ser den endast den inbyggda emitterresistansen r_e som resistans till jord. Tillsammans bildar dessa ett högpasfilter, vars undre brytfrekvens är lika med ca 1 Hz.
- Vi beräknar därmed ett lämpligt kondensatorvärde för den undre brytfrekvensen $f_u = 1$ Hz.

$$C_E = \frac{1}{2\pi * r_e * f_u} = \frac{1}{2\pi * 25 * 1} \approx 6360 \mu\text{F}$$

- Närmaste standardvärde är 6800 µF. Då blir brytfrekvensen lite lägre än 1 Hz (ca 0,94 Hz), men detta gör ingenting.

$$C_E = 6800 \mu\text{F}$$

- Förstärkningsfaktorn blir nu, vid växelström:

$$G_{AC} = -\frac{R_C}{r_e} = -\frac{10k}{125} \approx -400,$$

där AC står för Alternate Current, alltså växelström.

- Förstärkningsfaktorn blir därmed ca 80 gånger högre genom att placera en stor kondensator parallellt med emitterresistorn. Vid likström så är dock förstärkningen fortfarande låg (-10). Om GE-stegets hade använts i en återkopplad loop, exempelvis i en vanligt OP-förstärkare, så hade vi dock kunnat strunta i emitterresistorn och haft hög förstärkning hela tiden. Dessutom hade vi kunnat få dubbelt så hög förstärkning, kanske ännu högre, genom att ersätta kollektorresistorn med en transistor som fungerar som en strömgenerator. Som sagt måste dock återkoppling användas i detta fall för att reducera eller eliminera olinjariteter samt instabilitet. Se mer information om detta i nästa stycke.

5. Dimensionera spänningsdelaren bestående av resistorerna R_1 och R_2 så att spänningen in på transistorns bas är lika med emitterspänningen plus 0,65 V.

När transistorn leder så kommer 0,65 V falla mellan dess bas och emitter. Eftersom spänningsfallet över emitttern är lika med 2 V och bas-emitterspänningen är 0,65 V så måste vi se till att spänningsfallet över resistor R_1 är lika med 2,65 V, eller däromkring.

- Resten av spänningen (från matningsspänningen V_{CC}) skall falla över resistor R_2 . Vi vill alltså att 2,65 V skall falla över R_1 och resten, alltså $20 - 2,65 = 17,35$ V, skall falla över R_2 .
- En tumregel är att spänningsdelarens resistans inte bör överstiga en tiondel av resistansen från emitttern sedd från basen vid likström, alltså summan av resistansen i emitttern multiplicerat med strömförstärkningsfaktorn h_{FE} . Detta är en vanlig regel inom elektronik för att se till att inresistansen på efterföljande steg (i detta fall emitttern) inte är för lågt i förhållande till utresistansen på det föregående steget (i detta fall spänningsdelaren). Om detta sker så kommer inresistansen från emitttern belasta spänningsdelaren, vilket medför att utsignalen kommer bli kraftigt försvagad.
- Eftersom spänningsfallet över dessa resistorer är proportionerligt med deras resistans, i enlighet med Ohms lag, så kan vi som startvärde sätta R_1 till 2,65 k Ω och R_2 till 17,35 k Ω . Eftersom högre utresistans är önskvärt så höjer vi dessa resistorvärden till den punkt att deras parallellresistans $R_1 // R_2$ är ungefär lika med 10 % av inresistansen sedd från basen, alltså summan av all resistans i emitttern multiplicerad med strömförstärkningsfaktorn h_{FE} , som kan antas vara 50. Detta gör vi för att spänningsdelaren inte skall belasta efterföljande steg, då utsignalen riskerar att bli lägre.
- Med startvärdena ovan så är parallellresistansen $R_1 // R_2$ lika med:

$$R_1 // R_2 = \frac{2,65k \cdot 17,35k}{2,65k + 17,35k} \approx 2,3 \text{ k}\Omega$$

- Inresistansen sedd från basen är lika med:

$$R_{IN,BAS} = h_{FE}(R_E + r_e),$$

där h_{FE} är strömförstärkningsfaktorn, som antas vara 50, R_E är emitterresistansen och r_e är transistorns inbyggda emitterresistans, som vi kan beräknas genom att dividera 26 med kollektorströmmen i mA, alltså

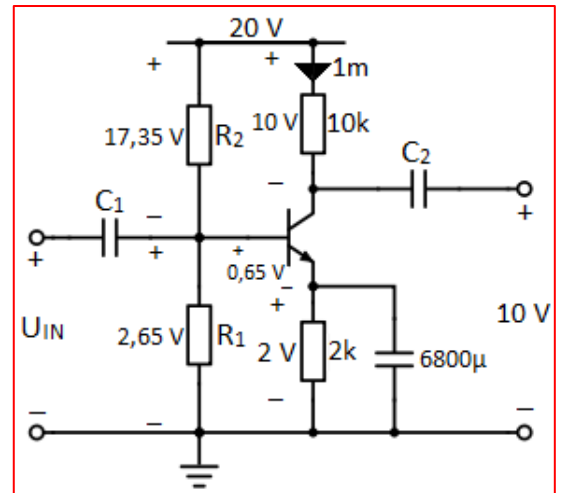
$$r_e = \frac{26}{I_{C(mA)}} = \frac{26}{1} = 26 \Omega$$

- Därefter beräknar vi inresistansen sedd från basen:

$$R_{IN,BAS} = h_{FE}(R_E + r_e) = 50 \cdot (2k + 26) = 101,3 \text{ k}\Omega$$

- Eftersom vi räknade med lägsta möjliga strömförstärkningsfaktor (50) så kan inresistansen från basen mycket väl vare högre. Dock såg vi till att även om vi använder en transistor med lägsta möjliga strömförstärkningsfaktor så fungerar steget.
- Parallellresistansen från spänningsdelaren bör inte överstiga 10 % av detta värde, alltså 10,13 k Ω :

$$R_1 // R_2 \leq 10,13 \text{ k}\Omega$$



Elektroteknik

- Vi försöker sätta parallellresistansen så nära detta värde som möjligt. Med startvärdena $R_1 = 2,65 \text{ k}\Omega$ och $R_2 = 17,35 \text{ k}\Omega$ så blev parallellresistansen $R_1//R_2$ ca $2,3 \text{ k}\Omega$. Vi kan därmed höja resistorvärdena $10,13 / 2,3 \approx 4,4$ gånger:

$$R_1 \approx 2,65 \text{ k} * 4,4 \approx 11,7 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste lägre värde i E12-serien är $12 \text{ k}\Omega$, som vi väljer att använda:

$$R_1 = 12 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 \approx 17,35 \text{ k} * 4,4 \approx 76,4 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste lägre värde i E12-serien är $82 \text{ k}\Omega$, som vi väljer att använda:

$$R_2 = 82 \text{ k}\Omega$$

- Parallellresistansen $R_1//R_2$ från spänningsdelaren blir därmed ca $10,5 \text{ k}\Omega$:

$$R_1//R_2 = \frac{12 * 82 \text{ k}}{12 \text{ k} + 82 \text{ k}} \approx 10,5 \text{ k}\Omega,$$

vilket är något högre än höga utsatta värde. Därmed kan värden på resistorer $R_1 - R_2$ sänkas till närmaste lägre värde i E12-serien, vilket är $10 \text{ k}\Omega$ respektive $68 \text{ k}\Omega$. Parallellresistansen $R_1//R_2$ hamnar då runt $8,7 \text{ k}\Omega$, då

$$R_1//R_2 = \frac{10 * 68 \text{ k}}{10 \text{ k} + 68 \text{ k}} \approx 8,7 \text{ k}\Omega$$

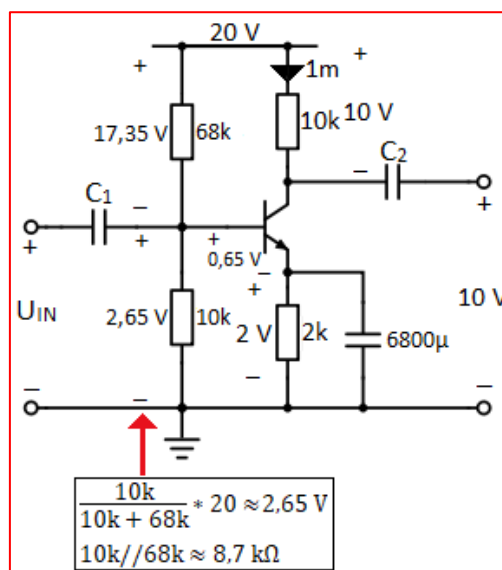
Samtidigt hamnar spänningen U_{R1} in på transistorns bas runt $2,56 \text{ V}$, då

$$U_{R1} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} * V_{CC} = \frac{10 \text{ k}}{10 \text{ k} + 68 \text{ k}} * 20 \approx 2,56 \text{ V}$$

- Detta värde kan anses vara tillräckligt nära $2,65 \text{ V}$ och kan därmed användas:

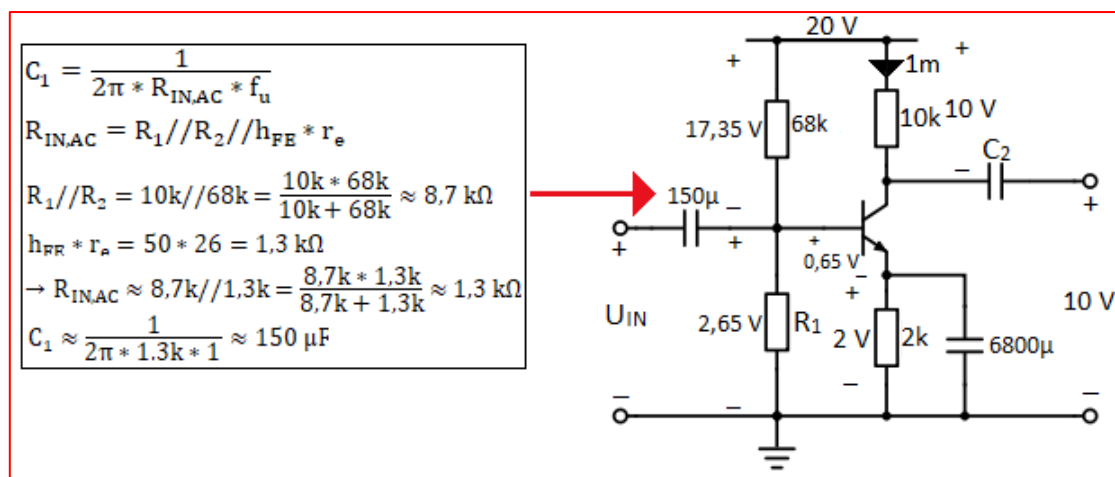
$$R_1 = 10 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 68 \text{ k}\Omega$$



b) Dimensionera avkopplingskondensator C_1 så att den undre brytfrekvensen är lika med ca 1 Hz.

- Avkopplingskondensator C_1 bilar ett högpasfilter ihop med GE-stegets inresistans.
- C_1 används för att spärra för likström. Detta gör vi så att vårt GE-steg kan användas som förstärkare till en högtalare. Saken är den att högtalare inte tål likström. Om likström förstärks och går till en högtalare så kommer denna högtalare med största sannolikhet gå sönder. Samtidigt så måste vi välja ett tillräckligt stort kondensatorvärde så att vi inte råkar dämpa hörbara frekvenser, då vi riskerar att dämpa eller ta bort ljudsignaler, främst basfrekvenser.
- Så fort en kondensator placeras på ingången så kommer likström att spärras. Problemet är att ju mindre kondensator vi använder, mätt i dess kapacitans, desto högre blir den undre brytfrekvensen, där frekvenser börjar dämpas. Vi människor kan höra signaler med frekvenser mellan 20 Hz – 20 kHz, så det vore bra om den undre brytfrekvensen ligger under 20 Hz, kanske så lågt som 1 Hz.



- För att beräkna ett lämpligt värde på kondensatorn så används följande formel:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi * R_{IN,AC} * f_u}$$

där C_1 är avkopplingskondensatorn på ingången, $R_{IN,AC}$ är den totala inresistansen vid växelström (när förstärkaren arbetar) och f_u är den undre brytfrekvensen, som vi sätter till 1 Hz.

- Vi beräknar med inresistansen vid växelström, eftersom det är då som avkopplingskondensatorn arbetar, inte vid likström. Inresistansen vid växelström kan beräknas med följande formel:

$$R_{IN,AC} = R_1 // R_2 // h_{FE} * r_e,$$

där $R_1 // R_2$ är parallellresistansen från spänningsdelaren, h_{FE} är transistorns strömförstärkningsfaktor, som antas vara 100, och r_e är transistorns inbyggda emitterresistans, som tidigare beräknades till 25 Ω .

- Vid växelström så är emitterresistorn R_E förbikopplad av emitterkondensatorn C_E , vilket medför att den enda resistansen sedd från basen är den inbyggda emitterresistansen r_e , som är lika med 25 Ω . Sett från basen så kommer denna resistans vara h_{FE} gånger större. Eftersom vi antar att h_{FE} är lika med 50 så blir inresistansen sedd från basen lika med:

$$h_{FE} * r_e = 50 * 25 = 1,25 k\Omega$$

- Vi såg tidigare att parallellresistansen från spänningsdelaren är lika med ca 8,7 kΩ:

$$R_1 // R_2 = \frac{10k * 68k}{10k + 68k} \approx 8,7 k\Omega$$

- Därmed så kan vi beräkna inresistansen vid växelström:

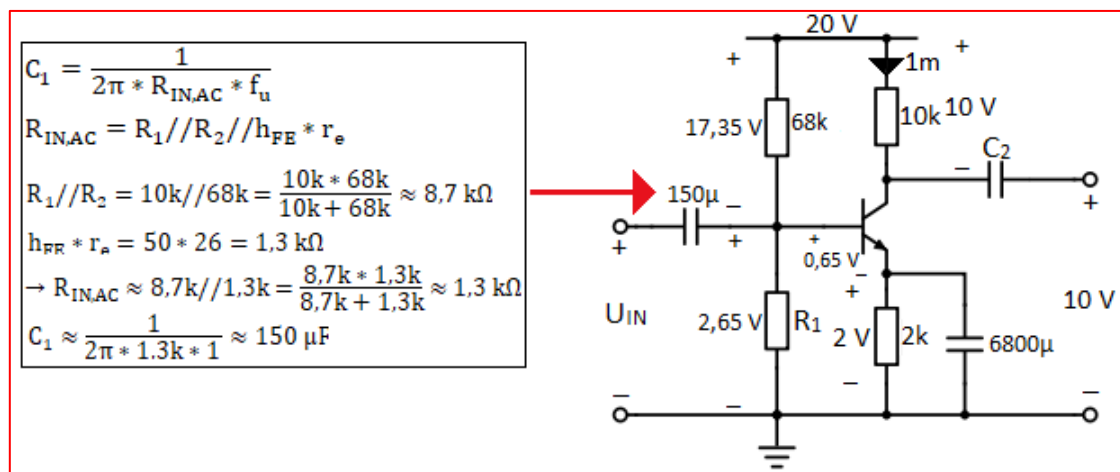
$$R_{IN,AC} = R_1 // R_2 // h_{FE} * r_e \approx 8,7k // 1,25k = \frac{8,7k * 1,25k}{8,7k + 1,25k} \approx 1,1 k\Omega$$

- Därefter så kan ett lämpligt värde på avkopplingskondensator C₁ beräknas:

$$C_1 = \frac{1}{2\pi * R_{IN,AC} * f_u} \approx \frac{1}{2\pi * 1,1k * 1} \approx 146 \mu F$$

- Närmaste standardvärde är 150 μF, vilket vi väljer att använda. Den undre brytfrekvensen blir då något lägre än 1 Hz (ca 0,97 Hz), men detta är obetydligt.

$$C_1 = 150 \mu F$$



- c) Dimensionera avkopplingskondensator C₂ på utgången så att den undre brytfrekvensen ligger runt 1 Hz.

- Avkopplingskondensator C₂ bildar ett högpasfilter tillsammans med GE-stegets utresistans, som varierar beroende om vi har en last eller inte samt vilken resistans denna last har.
- Om vi antar att vi har en last på (en högtalare) så hade följande formel varit lämplig för att beräkna ett lämpligt värde på kondensator C₂:

$$C_2 = \frac{1}{2\pi * f_u * (R_{UT,AC} // R_L)}$$

där C₂ är avkopplingskondensatorn vid utgången, f_u är den undre brytfrekvensen, R_{UT,ac} är transistors utresistans vid växelström, som vid likström är lika med kollektorresistorn, och R_L är lastens resistans.

- Eftersom emitterkondensatorn är förbikopplad vid växelström (av emitterkondensatorn C_E) så blir GE-stegets utresistans vid växelström samma som för ett GE-steg utan emitterresistor, alltså ungefär lika med kollektorresistorn.

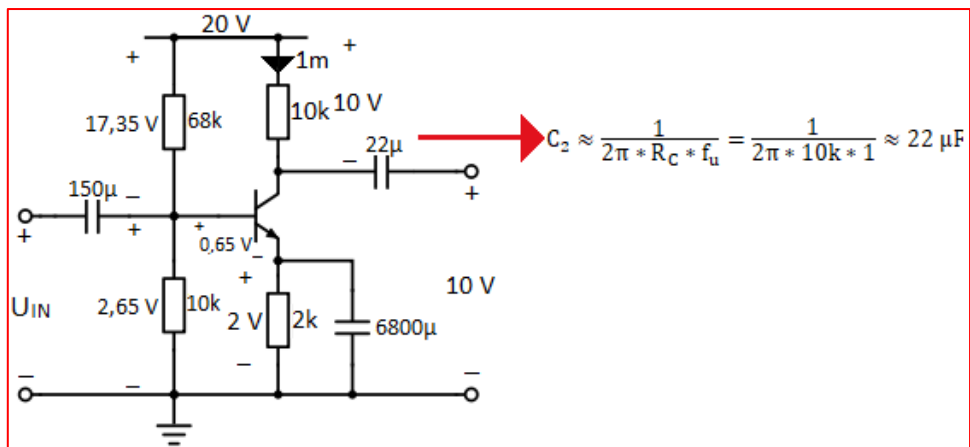
$$R_{UT,ac} \approx R_C = 10 k\Omega$$

- Vi vet inte hur stor lastens resistans är, så vi får anta ett värde. I detta fall är det viktigt att kondensatorn inte är för liten, om den är lite för stor gör absolut ingenting. Vi kan dock vara relativt säkra på att om en last dras direkt från ett GE-steg så måste lastens resistans vara mycket högre än GE-stegets utresistans, minst tio gånger högre, annars behövs ett slutsteg mellan GE-steget och lasten. Därför så räknar vi med kollektorresistorn som enda utresistans, alltså i olastat tillstånd. Då väljer vi en kondensator som är lite större än vad som behövs ifall lasten har hög impedans, men detta skadar som sagt inte.
- Med värdena ovan så beräknar vi ett lämpligt värde på avkopplingskondensatorn på utgången:

$$\rightarrow C_2 = \frac{1}{2\pi * 10k * 1} \approx 16 \mu F$$

- Närmaste standardvärde är 22 μF och bör passa utmärkt. Då blir den undre brytfrekvensen något lägre än 1 Hz (ca 0,72 Hz), men detta skadar inte. Så länge vi är långt under 20 Hz så bör det inte vara någon fara.

$$C_2 = 22 \mu F$$



d) Beräkna GE-stegets in- och utresistans vid signalfrekvenser (vid växelström).

- Eftersom GE-steget skall användas som för att driva en högtalare så är vi endast intresserade av in- och utresistansen vid växelström.
- Vi beräknade tidigare inresistansen vid växelström till ca 1,1 k Ω :

$$R_{IN,AC} = R_1 // R_2 // h_{FE} * r_e \approx 8,7k // 1,25k = \frac{8,7k * 1,25k}{8,7k + 1,25k} \approx 1,1 k\Omega$$

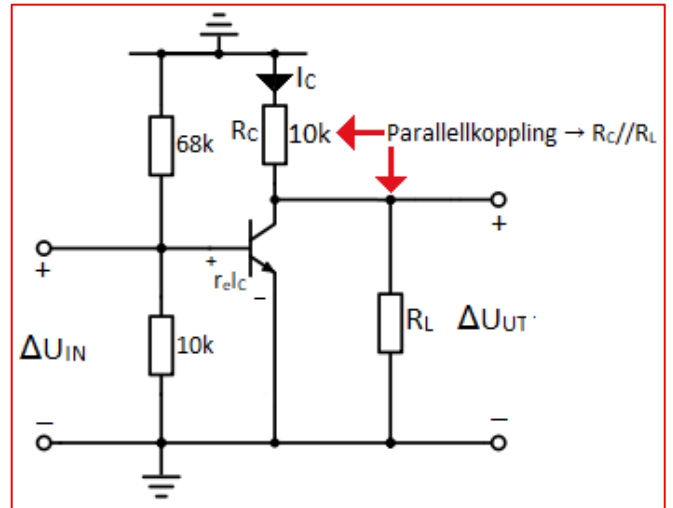
- Som vi såg tidigare så är utresistansen i olastat tillstånd ungefär lika med kollektorresistorns resistans, eftersom emitterresistorn är förbikopplad vid växelström:

$$R_{UT,AC} \approx R_C * \frac{R_E + r_e}{r_e}$$

- Utresistansen är relativt hög, vilket medför att väldigt liten ström kommer flöda genom en högtalare om den kopplas direkt till GE-steget. Därmed kommer vi knappt få något ljud ur högtalaren, även om spänningen förstärks. Vi måste använda ett slutsteg om vi vill ha mer ström och därmed ljud i högtalaren. Slutsteget används då för att minska utresistansen till några Ohm så att utströmmen höjs, vilket medför att vi kan få ljud ur högtalaren.

- I lastat tillstånd så beräknas utresistansen samma som ovan, med skillnaden att vi ersätter kollektorresistorn R_C med parallellresistansen $R_C // R_L$.
- Varför är det så? Det beror på att ekvationen ovan gäller i det tillstånd när de olinjära komponenterna i kretsen linjäriseras, såsom i en småsignalmodell, så kortsluts matningsspänningen V_{CC} .
- Därmed så blir kollektorresistorn och eventuell lastresistans parallellkopplade, eftersom de båda är anslutna till samma punkt på ena hållet och anslutna till jord på andra hållet.

$$R_{UT,AC,LASTAD} \approx R_C // R_L \approx 10k // R_L$$



Spänningsförstärkarens småsignalschema med resistorernas värden utritade. Vi kortsluter matningsspänningen, tar bort avkopplingskondensatorerna på in- och utgången och ersätter bas-emitterspänningen U_{BE} med spänningsfallet r_{eI_C} .

Emitterkondensator C_E utgör ett mycket litet motstånd i småsignalmodellen, vilket medför att denna kondensator förbikopplar emitterresistor R_E . Därför är varken C_E eller R_E utritade i småsignalschemat (C_E utgör ett så litet motstånd att passagen från emittern till jord kan antas vara fri).

Om lastens resistans är tillräckligt hög, alltså minst tio gånger högre än kollektorresistorn ($10k * 10 = 100 k\Omega$), så kommer parallellresistansen $R_C // R_L$ blir ungefär lika med R_C , alltså $10 k\Omega$, eftersom $10k // 100k \approx 10 k\Omega$. Därmed så blir utresistansen samma vid lastat som olastat tillstånd.

Om lastens resistans är lägre än så ($100 k\Omega$ i detta fall), så kommer utresistansen samt förstärkningsfaktorn minska vid last. Därför är det viktigt att använda ett slutsteg för att se till att förstärkarstegets utresistans alltid är högst tio gånger lägre än lastens resistans. Som exempel, en normal högtalare har en resistans på 8Ω , vilket kräver en utresistans på högst $0,8 \Omega$, helst lägre.

Resultat:

- Förstärkningsfaktorn är vid signalfrekvenser (växelström) -400, vilket är mycket högt. Vid likström är dock förstärkningsfaktorn endast -5, vilket är relativt lågt. Dock spelar det ingen roll i detta fall, då GE-steget skall användas för att driva en högtalare.
- Inresistansen vid (signalfrekvenser) är ca 1,1 k Ω , vid likström ca 8,7 k Ω . Såvida inte signalkällan (exempelvis en mikrofon) har en resistans på 100 Ω eller mindre så bör någon typ buffer föregå GE-steget, för att öka inresistansen.
- Utresistansen (vid signalfrekvenser) är i olastat tillstånd är ca 10 k Ω . Ett slutsteg bör också placeras mellan GE-steget och högtalaren, annars kommer väldigt lite ljud komma ur högtalaren; de flesta högtalare har en resistans på 8 Ω , så vi behöver ett slutsteg vars utresistans är tio gånger lägre än detta (högst 0,8 Ω), helst ännu lägre.
- Ingen likström skall kunna gå in i förstärkarsteget, då avkopplingskondensator C_1 kommer blockera all eventuell likström som når ingången.
- Även på utgången har vi en kondensator C_2 ifall likström på något sätt hade kommit in i förstärkarsteget. Vi ser då till att denna likström inte når högtalaren, som kan förstöras av likström.

