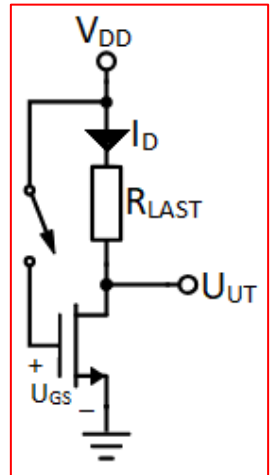


3.1 - Transistorswitchar

1. Du har en Power Switch till höger, där en last, vars resistans R_{LAST} är $1\text{ k}\Omega$, skall drivas med maximal drainström I_D när switchen är sluten. Matningsspänningen V_{DD} är satt till 20 V .
 - a) Hur hög blir strömmen I_D genom lasten när switchen är sluten?
 - b) Varför används ingen gateresistor i denna koppling?
 - c) Anta att MOSFET-transistorns tröskelspänning U_T är 4 V . Förklara sambandet mellan tröskelspänningen U_T samt gate-sourcespänningen U_{GS} . På vilka villkor blir MOSFET-transistorn icke-ledande respektive ledande?

Lösning:



Power Switch.

- a) När switchen är öppen, så är gate-sourcespänningen U_{GS} lika med noll. Transistorn leder då inte och drainströmmen I_D genom lasten är då noll.
- Däremot ifall switchen sluts så blir gate-sourcespänningen U_{GS} lika med matningsspänningen V_{DD} , vilket i detta fall är 20 V :

$$U_{GS} = V_{DD} = 20\text{ V},$$

vilket kan bevisas via Kirchhoffs spänningslag beräknat från matningsspänningen V_{DD} ned till jord via transistorns gate:

$$V_{DD} - U_{GS} = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_{GS} = V_{DD}$$

- Maximal drainström I_D kommer då flöda genom lasten, samtidigt som förlusteffekten blir mycket liten på grund av den obefintliga gateströmmen.
- När drainströmmen I_D blir maximal så hamnar så mycket av matningsspänningen V_{DD} som är möjligt över lasten, vilket i sin tur medför att drain-sourcespänningen U_{DS} , alltså spänningsfallet mellan transistorns drain och source, blir så liten som möjligt. I praktiken så kan U_{DS} inte bli mindre än några millivolt, som vi försummar:

$$U_{DS} \approx 0\text{ V}$$

- I figuren ovan, så är inte drain-sourcespänningen U_{DS} utmärkt. Däremot är MOSFET-transistorns utsignal detta. I denna krets så gäller att utsignalen U_{UT} alltid är lika med drain-sourcespänningen U_{DS} , då

$$U_{UT} - U_{DS} = 0,$$

vilket innebär att

$$U_{UT} = U_{DS}$$

- I praktiken så kan utsignalen inte bli mindre än några millivolt, som vi försummar.

$$U_{UT} \approx 0\text{ V}$$

- Därmed så kan spänningen över lasten inte överstiga ungefär $20 - 0\text{ V} \approx 20\text{ V}$ för denna last, vilket också begränsar den maximala drainströmmen I_D , som i detta fall blir

$$I_D = \frac{V_{DD} - U_{UT}}{R_{LAST}} \approx \frac{20 - 0}{1\text{ k}} \approx 20\text{ mA}$$

- MOSFET-transistorn blir i detta fall maxledande. Eftersom utspänningen inte kan understiga några millivolt så kan spänningsfallet över lasten inte bli högre än ca 20 V , vilket medför att drainströmmen inte kan bli högre än 20 mA för denna last.

- b) Eftersom MOSFET-transistorns inresistans R_{IN} är mycket hög, så krävs ingen gateresistor R_G . Oavsett spänningen U_G in på transistorns gate, så blir gateströmmen I_G försumbar (ofta uppe i pA – nA), då

$$I_G = \frac{U_G}{R_{IN}} = \frac{U_G}{\infty} \approx 0$$

- c) För att MOSFET-transistorn skall börja leda, så måste gate-sourcespänningen U_{GS} överstiga eller vara lika med tröskelspänningen U_T :

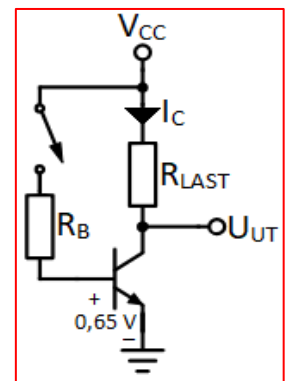
$$\begin{cases} U_{GS} \geq U_T \rightarrow \text{Transistorn leder} \\ U_{GS} < U_T \rightarrow \text{Transistorn spärrar} \end{cases}$$

- För att MOSFET-transistorn sedan skall vara maxledande, så måste gate-sourcespänningen U_{GS} vida överstiga tröskelspänningen U_T . Exakt hur mycket beror på MOSFET-transistorn i fråga och kan härledas via ett fåtal ekvationer (se 4.1 – Transistorn som switch under fliken Anteckningar). Dock kan vi anta att för en gate-sourcespänning U_{GS} som överstiger tröskelspänningen U_T med ett fåtal Volt, exempelvis 3 – 4 V, så är transistorn maxledande.

2. I denna uppgift skall motsvarande BJT-switch konstrueras. Kretsen har därmed följande data:

$$V_{CC} = 20 \text{ V}; R_{LAST} = 1 \text{ k}\Omega; 50 \leq h_{FE} \leq 250; U_{CE,sat} = 0,1 \text{ V}$$

- Resistor R_{LAST} är en last, som skall drivas med maximal kollektorström I_C .
- För att driva lasten med maximal lastström så kopplas basen till matningsspänningen V_{CC} .



BJT-switch.

- a) Varför måste en basresistor R_B användas i denna krets?
- b) Hur hög blir kollektorströmmen I_C i maxledande / mättat tillstånd?
- c) Hur hög måste basströmmen I_B sättas till för att kollektorströmmen I_C skall bli maximal även i värstafallscenariot, alltså då BJT-transistorns strömförstärkningsfaktor h_{FE} är 50?
- d) Dimensionera basresistor R_B för att säkerhetsställa att kollektorströmmen I_C är maximal i värstafallscenariot. Beräkna förlusteffekten som erhålls på grund av basströmmen I_B i mättat tillstånd.
- e) Anta att BJT-transistorns strömförstärkningsfaktor h_{FE} är 200, alltså fyra gånger högre än i värstafallscenariot. Vilket värde hade då kunnat användas på basresistor R_B ? Med vilken faktor minskar då effektförbrukningen orsakad av BJT-transistorns basström?

Lösning:

- a) BJT-transistorn innehar låg inresistans R_{IN} . Utan basresistor R_B , så hade därmed basströmmen I_B blivit mycket hög och bränt sönder transistorn när switchen hade slutits, då

$$I_B = \frac{U_B}{R_{IN}} = \frac{V_{CC} - 0,65}{R_{IN}} = \frac{20 - 0,65}{\text{"0"}} = \infty$$

- b) Kollektorströmmen I_C kan beräknas med Ohms lag:

$$I_C = \frac{U_{LAST}}{R_{LAST}},$$

där U_{LAST} är spänningsfallet över lasten.

- I mättat tillstånd, då kollektorströmmen I_C är maximal, så är spänningsfallet U_{LAST} över lasten också maximalt. Genom att använda Kirchhoffs spänningslag från matningsspänningen V_{CC} ned till jord via emittern, så ser vi att

$$V_{CC} - U_{LAST} - U_{CE} = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_{LAST} = V_{CC} - U_{CE},$$

där kollektor-emitterspänningen U_{CE} är spänningsskillnaden mellan BJT-transistorns kollektor och emitter.

- Notera att utspänningen U_{UT} är lika med kollektor-emitterspänningen U_{CE} i detta fall, då

$$U_{UT} - U_{CE} = 0,$$

vilket innebär att

$$U_{UT} = U_{CE}$$

- I specifikationerna så ser vi att BJT-transistorns kollektor-emitterspänning i mättat tillstånd $U_{CE,sat}$ är 0,1 V, vilket betyder att kollektor-emitterspänningen U_{CE} inte kan understiga 0,1 V:

$$U_{CE,sat} = U_{UT,min} = 0,1 \text{ V}$$

- Detta medför att spänningsfallet U_{LAST} över lasten i mättat tillstånd blir 19,9 V, då

$$U_{LAST} = V_{CC} - U_{CE,sat} = 20 - 0,1 = 19,9 \text{ V}$$

- Notera att *sat* är en förkortning för *saturated*, vilket betyder mättad transistor.

- Därmed blir kollektorströmmen I_C i mättat tillstånd 19,9 mA, då

$$I_C = \frac{U_{LAST}}{R_{LAST}} = \frac{19,9}{1k} = 19,9 \text{ mA}$$

- c) För att säkerhetsställa att maximal ström flödar genom lasten oavsett strömförstärkningsfaktor h_{FE} , så antar vi att transistorn har så låg strömförstärkningsfaktor som möjligt, alltså $h_{FE} = 50$.

- Om vi dimensionerar basströmmen I_B efter detta värde så vet vi att kollektorströmmen I_C genom lasten kommer bli maximal, oavsett värde på strömförstärkningsfaktorn. Att BJT-transistorn är mättad medför att strömmen I_C genom lasten inte kan bli högre, oavsett hur mycket vi ökar basströmmen I_B .
- Om h_{FE} är högre än 50 så kommer det bara bli lättare att maximera lastströmmen, men vi tar det säkra före det osäkra och ser till att lastströmmen blir maximerad även i det värsta fallet.:

$$h_{FE} = 50$$

- Eftersom strömförstärkningsfaktorn h_{FE} antas vara lika med 50 så antas basströmmen I_B vara 50 gånger mindre än kollektorströmmen I_C :

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}}$$

- Därmed kan basströmmen I_B antas behöva sättas till ca 0,4 mA i värstafallscenariot, då

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{19,9 \text{ mA}}{50} = 0,398 \text{ mA}$$

- d) Vi måste bestämma ett lämpligt värde på basresistorn R_B så att maximal ström I_C flödar genom lasten när switchen är sluten. Samtidigt måste basresistor R_B inneha en lämplig storlek så att basströmmen I_B inte blir onödigt hög, vilket kan medföra onödigt hög förlusteffekt eller att transistorn förstörs.

- Basresistor R_B dimensioneras i värstafallscenariot. Därmed skall en basström I_B runt 0,4 mA flöda genom baskretsen i mättat (maxledande) tillstånd. Ett lämpligt värde på basresistor R_B kan beräknas via Ohms lag:

$$R_B = \frac{U_B}{I_B},$$

där U_B är spänningsfallet över basresistor R_B i mättat tillstånd.

- Genom att använda Kirchhoffs spänningslag från matningsspänningen V_{CC} ned till jord via baskretsen, så ser vi att

$$V_{CC} - U_B - 0,65 = 0,$$

vilket kan transformeras till

$$U_B = V_{CC} - 0,65$$

- Eftersom matningsspänningen V_{CC} är satt till 20 V, så kan spänningsfallet U_B över basresistor R_B antas ligga runt 19,35 V i mättat tillstånd, då

$$U_B = 20 - 0,65 = 19,35 \text{ V}$$

- Därmed bör basresistor R_B sättas till ett värde runt 48 k Ω , då

$$R_B = \frac{19,35}{0,398} \approx 48 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 47 k Ω :

$$R_B = 47 \text{ k}\Omega,$$

vilket medför att basströmmen I_B hamnar runt 0,41 mA, då

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} = \frac{19,35}{47k} \approx 0,41 \text{ mA}$$

- Därmed blir basströmmen I_B blir något högre än vad som krävs i värstafallscenariot, men det skadar inte. Vi har därmed lite marginal, vilket medför att vi kan vara säkra på att maximal ström I_C flödar genom lasten. Andra faktorer, såsom att bas-emitterspänningen U_{BE} kanske är något högre än 0,65 V på en given BJT-transistor, kan medföra att basströmmen I_B annars blir något lägre än vad vi förutspådde.

- Förlusteffekten P_L genom baskretsen kan beräknas via effektlagen*:

$$P_L = V_{CC} * I_B,$$

vilket direkt kan beräknas till ca 8,2 mW, då

$$P_L \approx 20 * 0,41m \approx 8,2 \text{ mW}$$

* Förlusteffekten P_L i praktiken består av effektutvecklingen P_B i basresistor R_B samt effektutvecklingen P_{BE} mellan BJT-transistorns bas- och emitter:

$$P_L = P_B + P_{BE},$$

som kan beräknas via effektlagen:

$$P_B = R_B * I_B^2 \approx 47k * 0,41m^2 \approx 7,97 \text{ mW}$$

samt

$$P_{BE} = U_{BE} * I_B \approx 0,65 * 0,41m \approx 0,27 \text{ mW},$$

vilket innebär att

$$P_L \approx 7,97m + 0,27m \approx 8,2 \text{ mW}$$

- e) Om strömförstärkningsfaktor h_{FE} vore 200, så bör basströmmen I_B i mättat / maxledande tillstånd sättas fyra gånger lägre än tidigare, alltså ca 0,1 mA, då

$$I_B = \frac{I_C}{h_{FE}} = \frac{19,9m}{200} \approx 0,1 \text{ mA}$$

- Eftersom basströmmen I_B bör sättas fyra gånger lägre än tidigare, så bör basresistor R_B , som reglerar storleken på I_B , sättas fyra gånger högre än tidigare, då

$$R_B = \frac{U_B}{I_B} \approx \frac{19,35}{0,1m} = 193,5 \text{ k}\Omega$$

- Närmaste värde i E12-serien är 180 k Ω :

$$R_B = 180 \text{ k}\Omega,$$

vilket medför att basströmmen I_B hamnar runt 0,11 mA, då

$$I_B = \frac{U_B}{R_B} = \frac{19,35}{180k} = 0,1075 \text{ mA}$$

- Eftersom förlusteffekten P_L är proportionerlig med basströmmen I_B , så minskar även P_L med en faktor fyra, då

$$P_L = V_{CC} * I_B = 19,35 * 0,1075m \approx 2,08 \text{ mW}$$

- Ifall en BJT-switch används, så kan vi därmed med fördel försöka hitta dess förstärkningsfaktor h_{FE} , exempelvis genom att mäta bas- och kollektorströmmen I_B samt I_C i linjärt tillstånd, alltså innan transistorn blir mättad; strömförstärkningsfaktor h_{FE} kan då beräknas som ration mellan I_C och I_B :

$$h_{FE} = \frac{I_C}{I_B}$$

- Om BJT-transistorn innehar låg strömförstärkningsfaktor h_{FE} , exempelvis mellan 50 – 75, och fler BJT-transistorer finns tillgängliga, så kan denna med fördel bytas mot en annan. Därefter kan samma mätning genomföras igen. Förhoppningsvis innehar denna en strömförstärkningsfaktor h_{FE} på åtminstone 100.