

TSTE05 Elektronik & mätteknik

Föreläsning 17

Transistorers frekvensberoende

Darlingtonkoppling

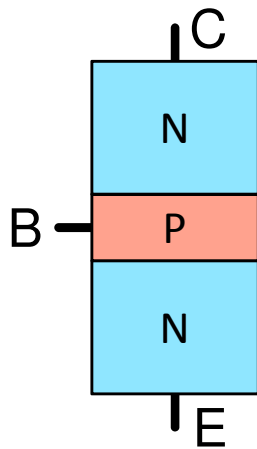
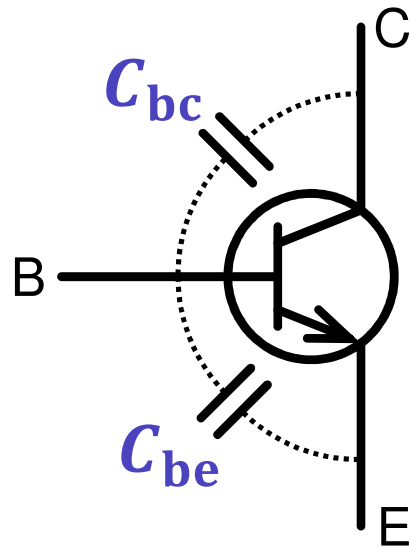
Diverse förstärkarsteg, Exempel

Mikael Olofsson

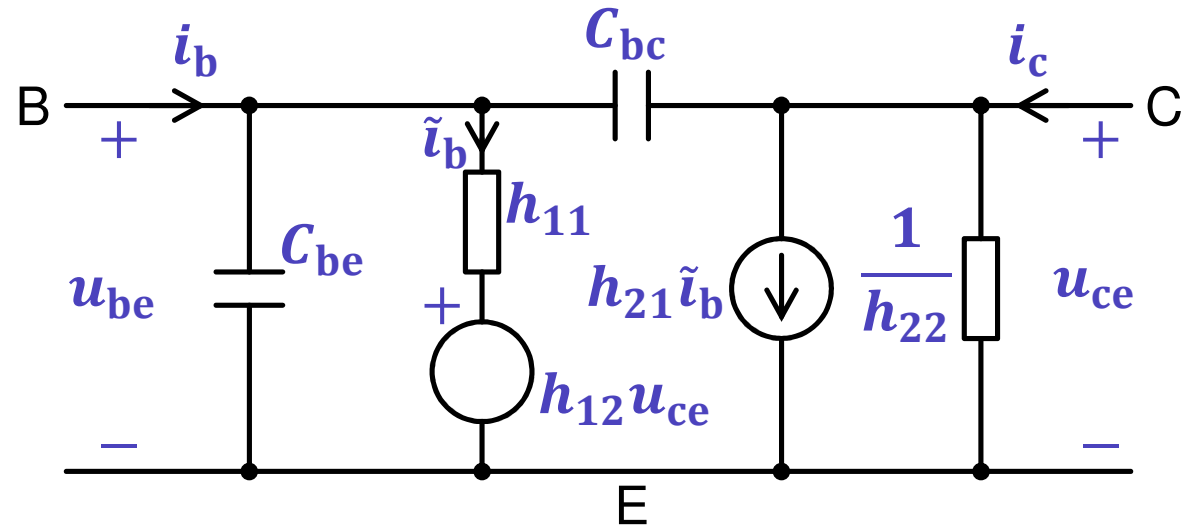
Institutionen för Systemteknik (ISY)

Ämnesområdet Elektroniska kretsar och system

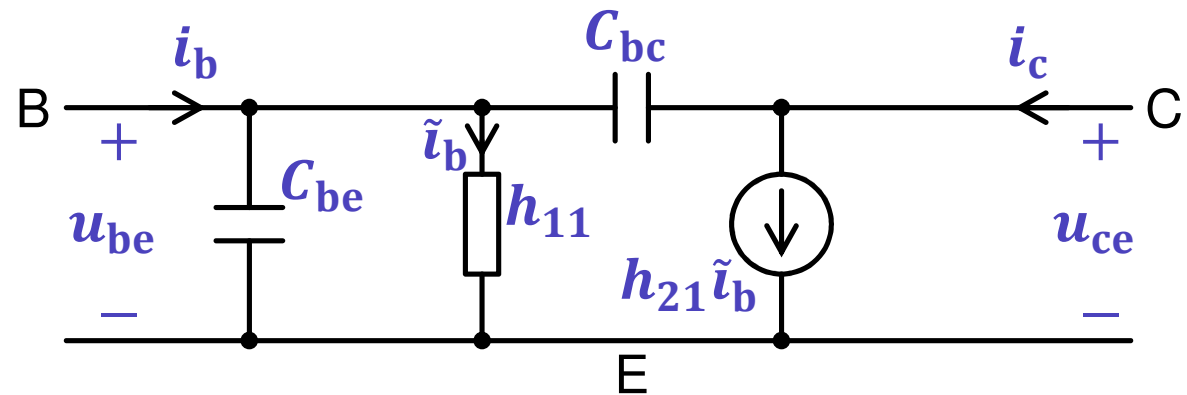
Parasitiska kapacitanser (strökapacitanser)



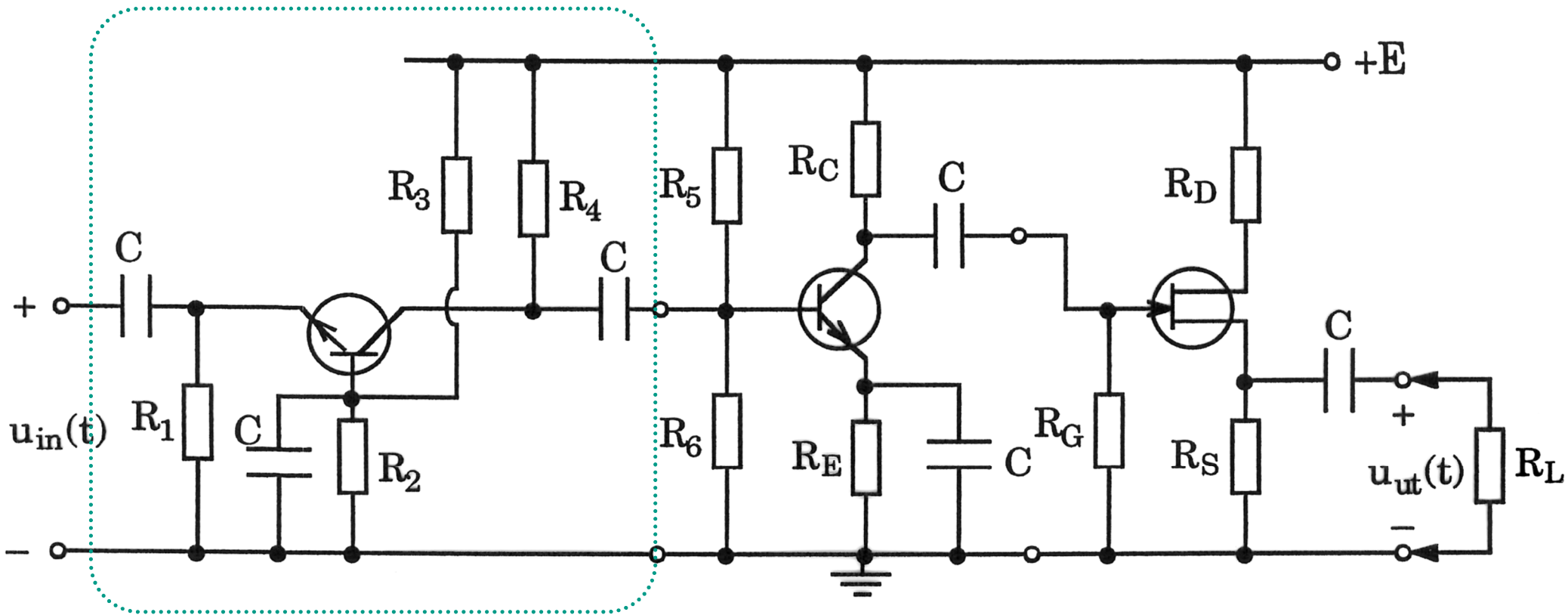
Fullständig småsignalekvivalent



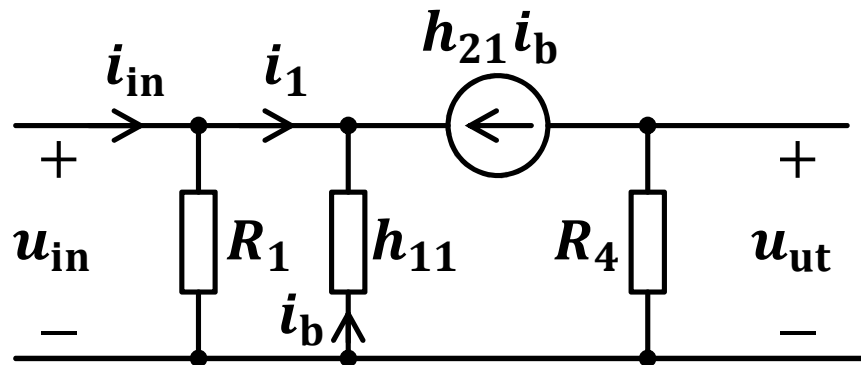
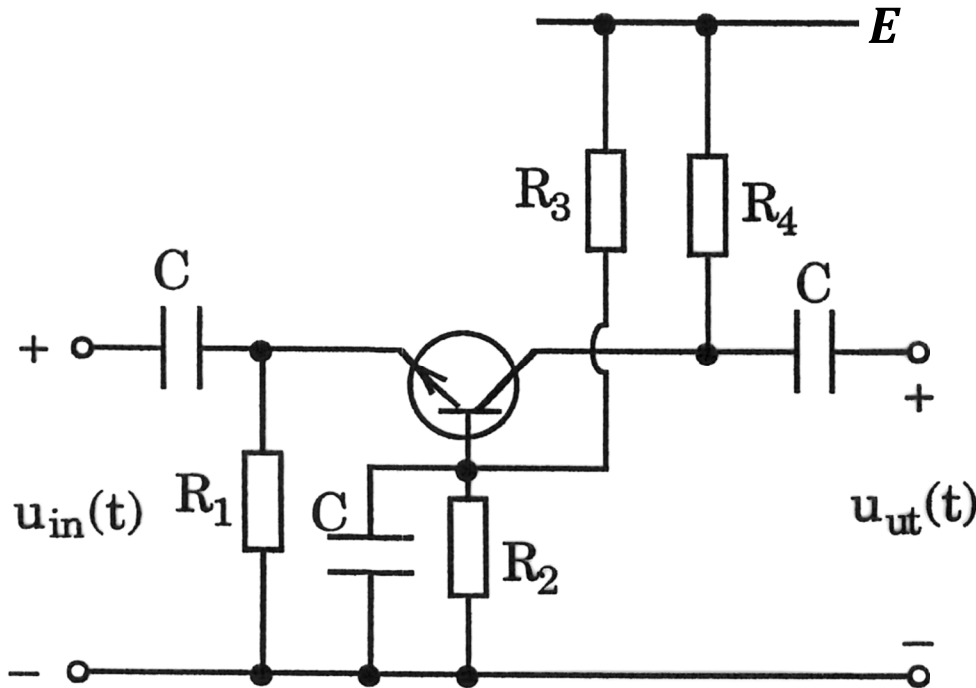
Förenklad småsignalekvivalent



Gemensam bas (GB-steg)



Egenskaper hos gemensam bas-steg



Utimpedans: $Z_{ut} = R_4$ Som GE.

Ohms lag: $i_b = -\frac{U_{in}}{h_{11}}$

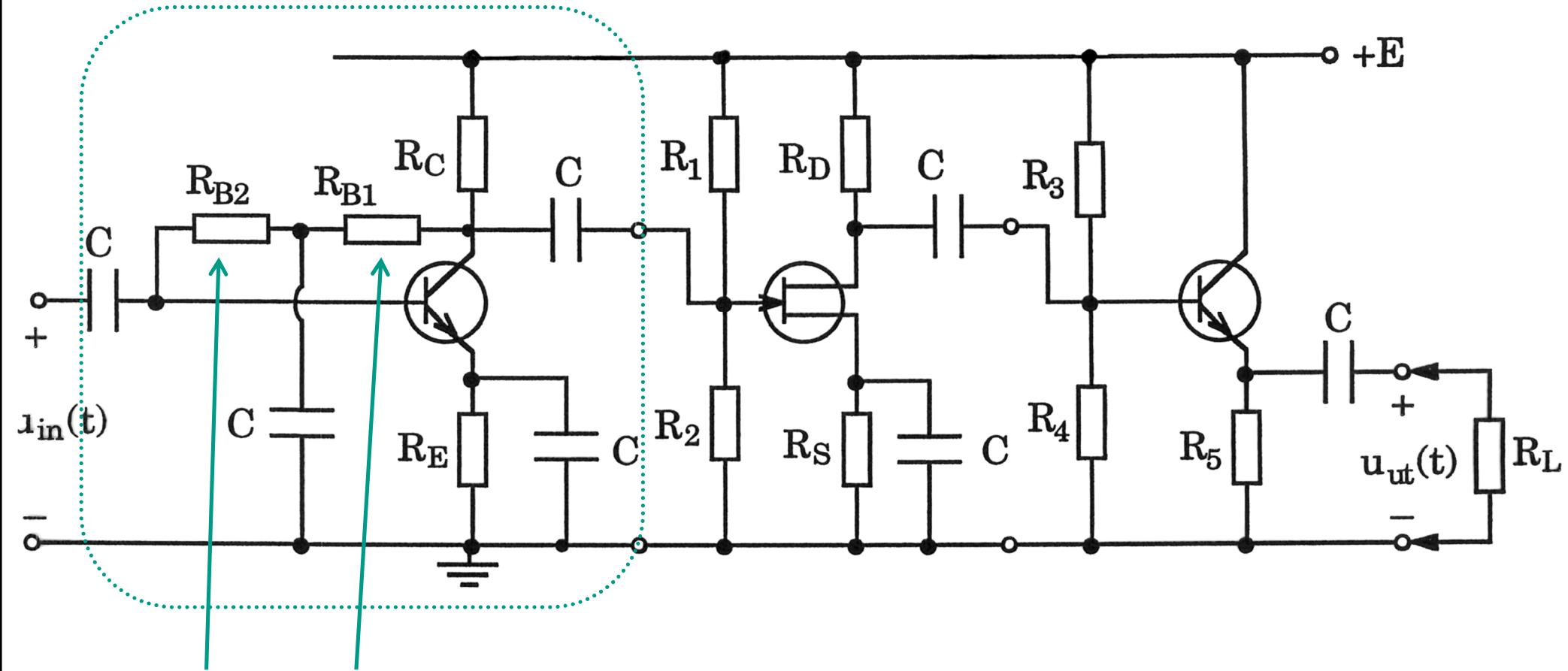
KCL: $i_1 = -(h_{21} + 1)i_b = (h_{21} + 1)\frac{U_{in}}{h_{11}}$

Inimpedans: $Z_{in} = R_1 \parallel \frac{h_{11}}{h_{21} + 1} \approx \frac{h_{11}}{h_{21}}$
Väldigt låg!

Ohms lag: $U_{ut} = -h_{21}i_b R_4 = h_{21}\frac{R_4}{h_{11}}U_{in}$

Råförstärkning: $A = h_{21}\frac{R_4}{h_{11}}$ Som GE men pos.

Motkoppling

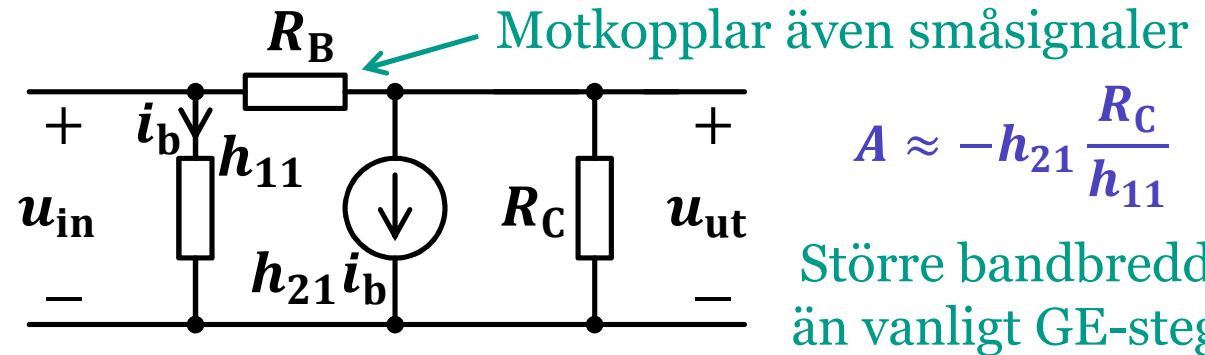
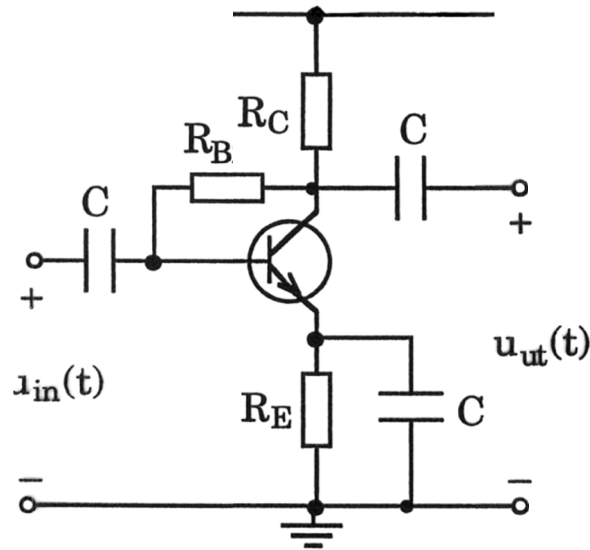


Motkopplar (reglerar)
arbetspunkten

Olika motkopplingssteg

R_L : Lastresistans

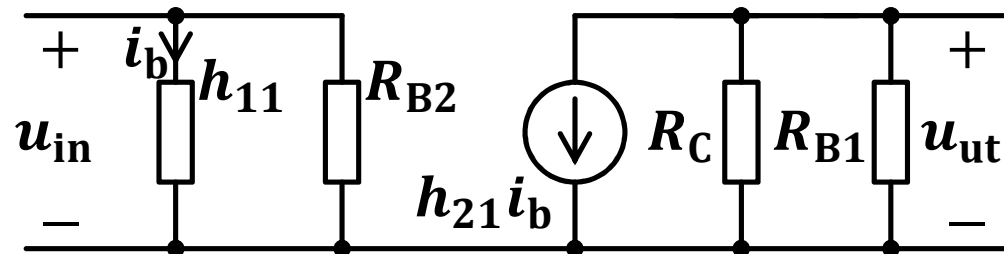
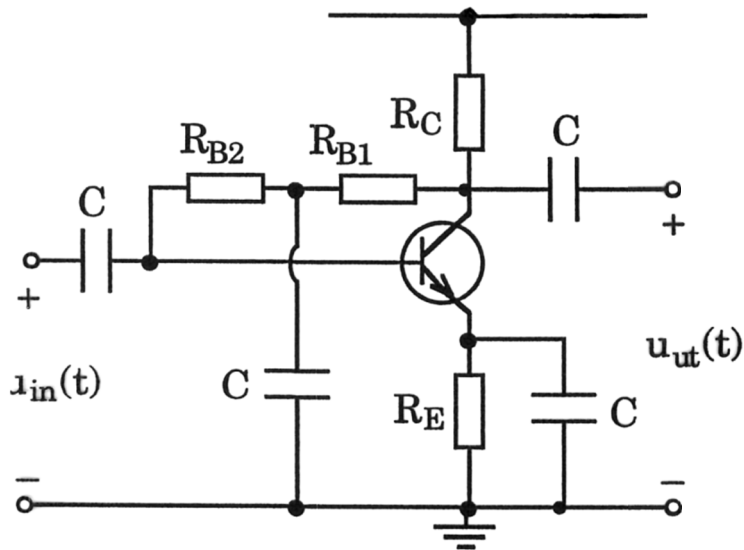
R_G : Generatorresistans



$$A \approx -h_{21} \frac{R_C}{h_{11}}$$

Större bandbredd än vanligt GE-steg

$$Z_{in} \approx \frac{h_{11}}{1 + h_{21}(R_C \parallel R_L)/R_B} \quad Z_{ut} \approx R_C \parallel \frac{R_B + h_{11} \parallel R_G}{h_{21} + 1}$$



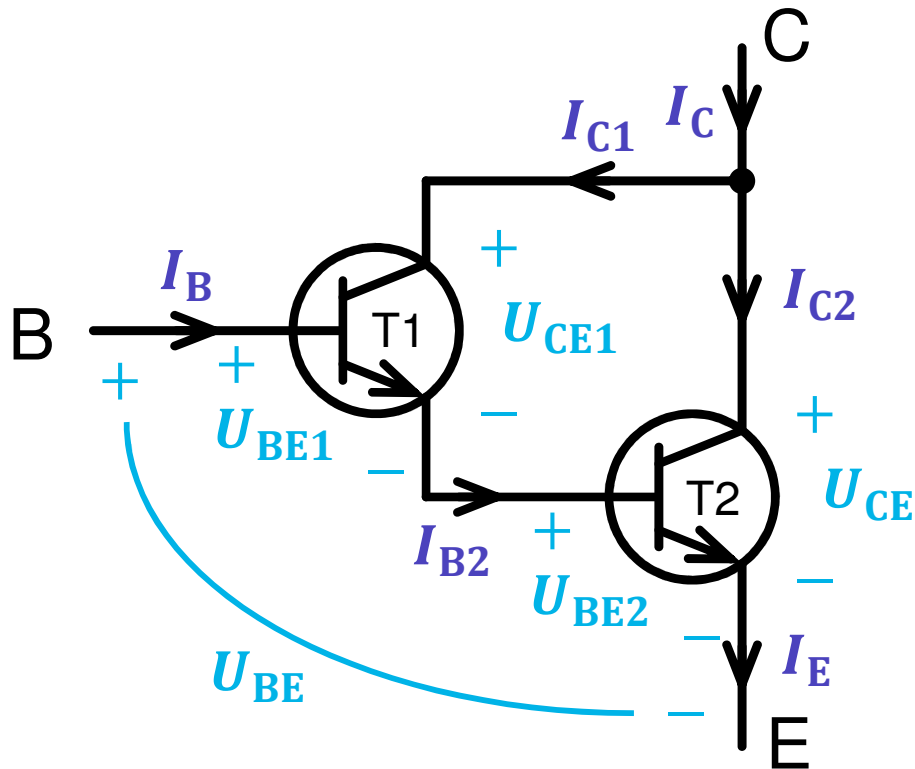
$$Z_{in} \approx R_{B2} \parallel h_{11}$$

$$A = -h_{21} \frac{R_{B1} \parallel R_C}{h_{11}}$$

$$Z_{ut} \approx R_{B1} \parallel R_C$$

Motkopplar inte småsignaler

Darlingtonkoppling – DC-analys



Spänningar:

$$U_{BE} = U_{BE1} + U_{BE2} \approx 1,4 \text{ V}$$

$$U_{CE} = U_{CE1} + U_{BE2}$$

Strömmar:

$$I_{C2} = B_2 I_{B2} \quad I_{C1} = B_1 I_{B1}$$

$$I_{B2} = I_B + I_{C1} = (1 + B_1) I_B$$

$$I_E = I_{B2} + I_{C2} = (1 + B_2) I_{B2} = (1 + B_2)(1 + B_1) I_B$$

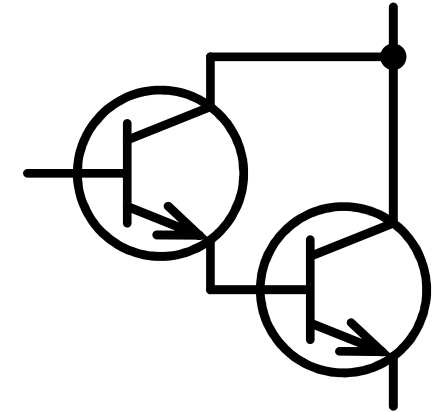
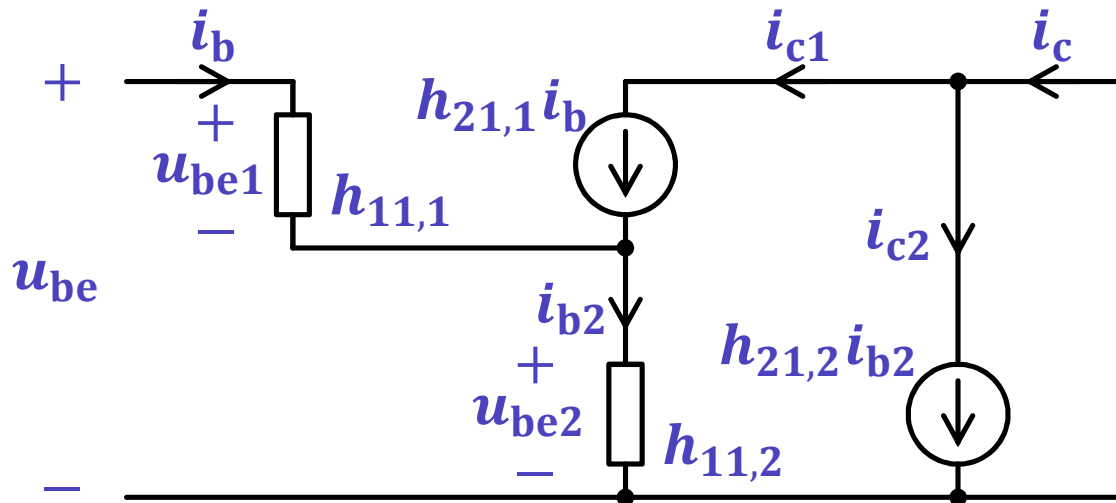
$$I_C = I_{C1} + I_{C2} = (B_1 + B_2(1 + B_1)) I_B$$

Strömförstärkningsfaktor:

$$B = B_1 + B_2(1 + B_1)$$

Darlingtonkoppling – ESSS

Förenklad småsignalekvivalent



$$i_{c1} = h_{21,1} i_b$$

$$i_{b2} = i_b + i_{c1} = (1 + h_{21,1}) i_b$$

$$i_{c2} = h_{21,2} i_{b2}$$

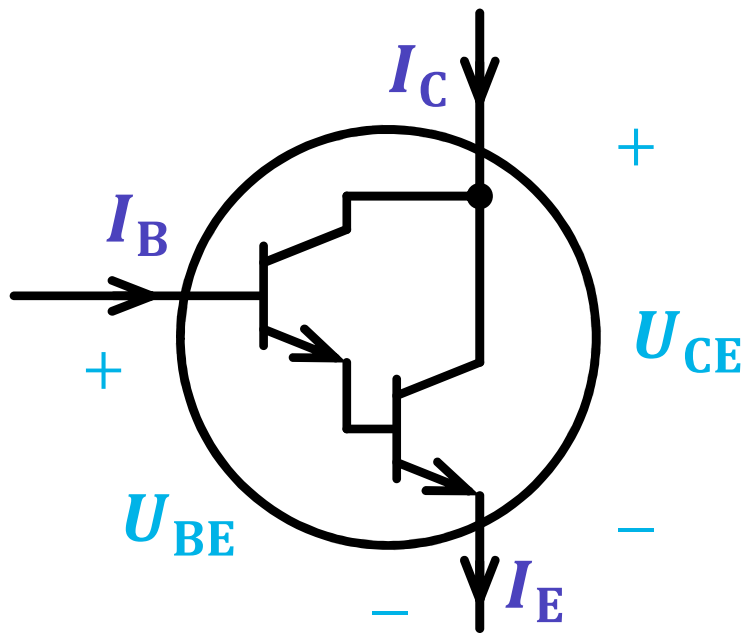
$$i_c = i_{c1} + i_{c2} = h_{21,1} i_b + h_{21,2} i_{b2} = (h_{21,1} + h_{21,2} (1 + h_{21,1})) i_b$$

Strömförstärkningsfaktor: $h_{21} = h_{21,1} + h_{21,2} (1 + h_{21,1})$

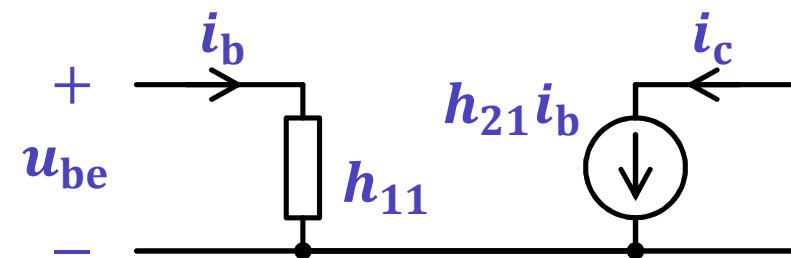
$$u_{be} = u_{be1} + u_{be2} = h_{11,1} i_b + h_{11,2} i_{b2} = (h_{11,1} + h_{11,2} (1 + h_{21,1})) i_b$$

Inimpedans: $h_{11} = h_{11,1} + h_{11,2} (1 + h_{21,1})$

Darlingtonkoppling – Tolkning som en transistor



Förenklad småsignalekvivalent



Inimpedans:

$$h_{11} = h_{11,1} + h_{11,2}(1 + h_{21,1})$$

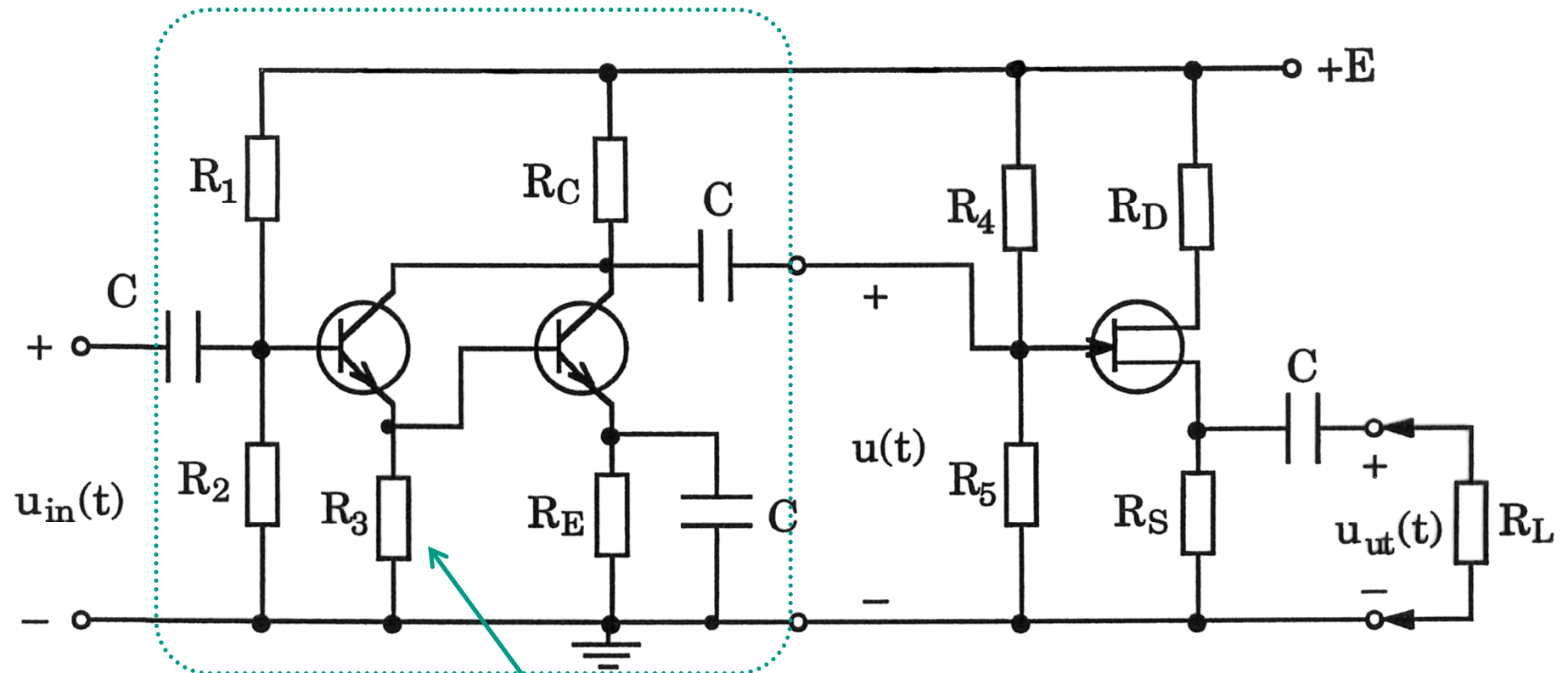
Strömförstärkningsfaktor:

$$h_{21} = h_{21,1} + h_{21,2}(1 + h_{21,1})$$

Strömförstärkningsfaktor:

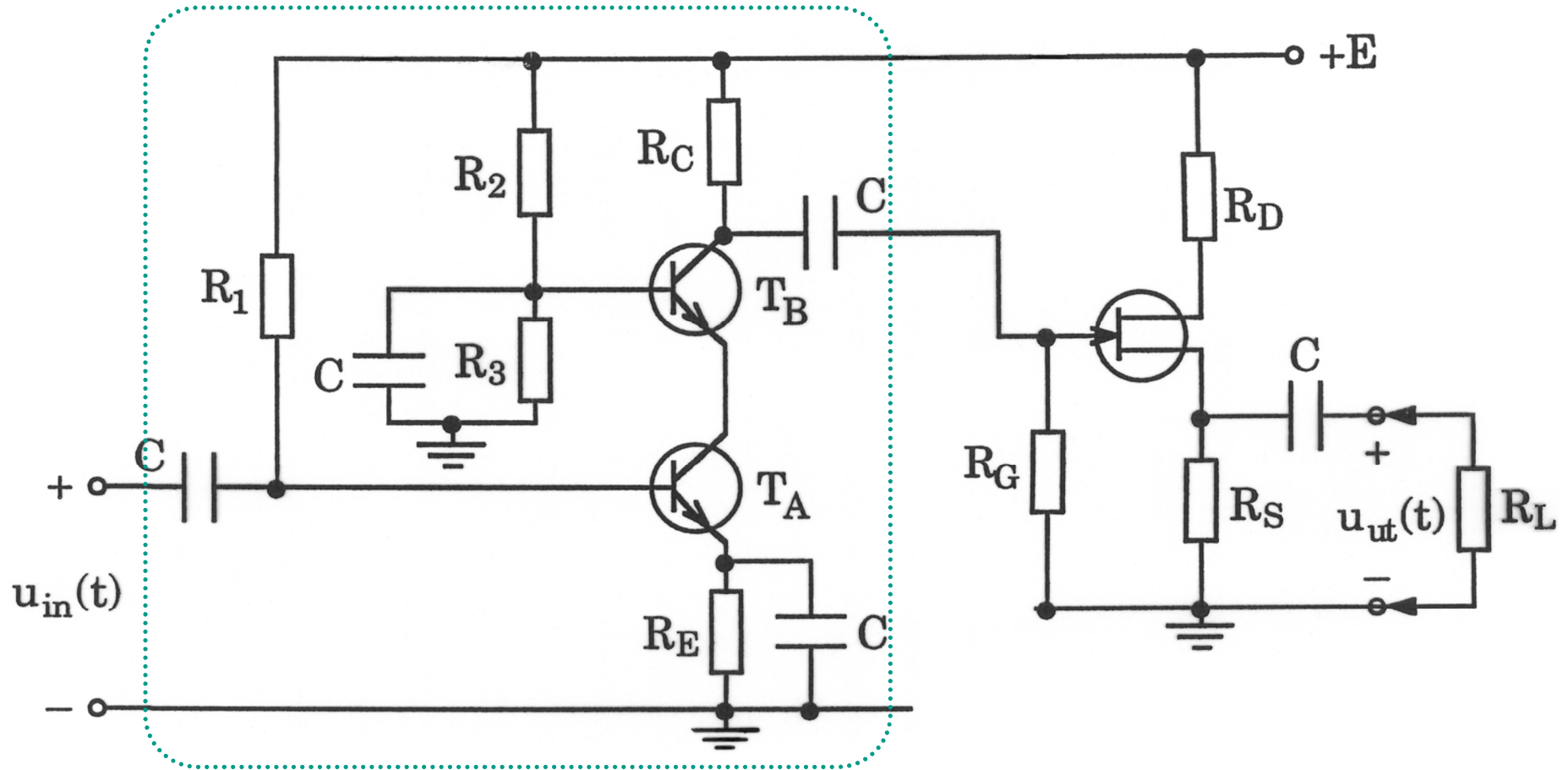
$$B = B_1 + B_2(1 + B_1)$$

GE-steg med modifierad darlingtonkoppling

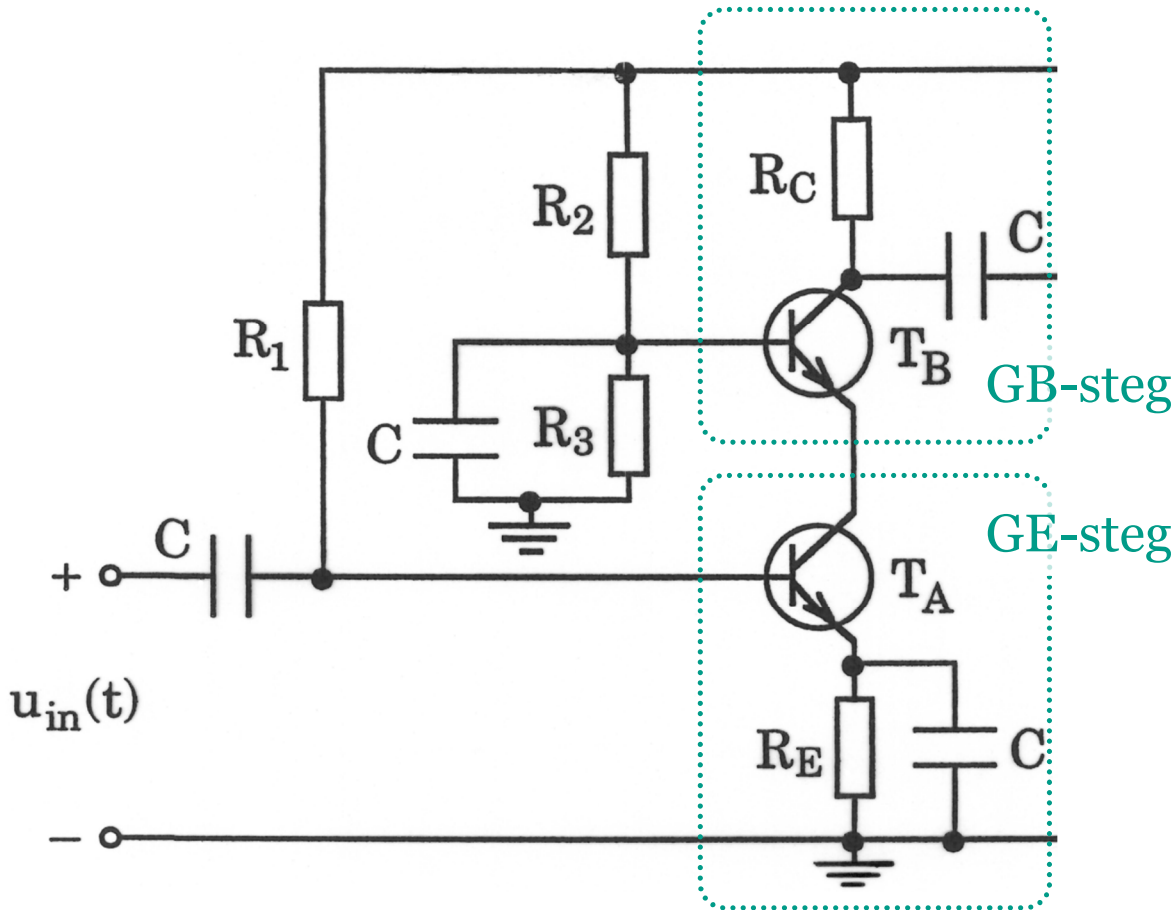


Resistansen R_3 justerar resulterande strömförstärkningsfaktor, påverkar både arbetspunkt och förstärkning.

Cascode-förstärkare



Cascode-förstärkarens delar och egenskaper



$$A \approx -h_{21,A} \frac{R_C}{h_{11,A}}$$

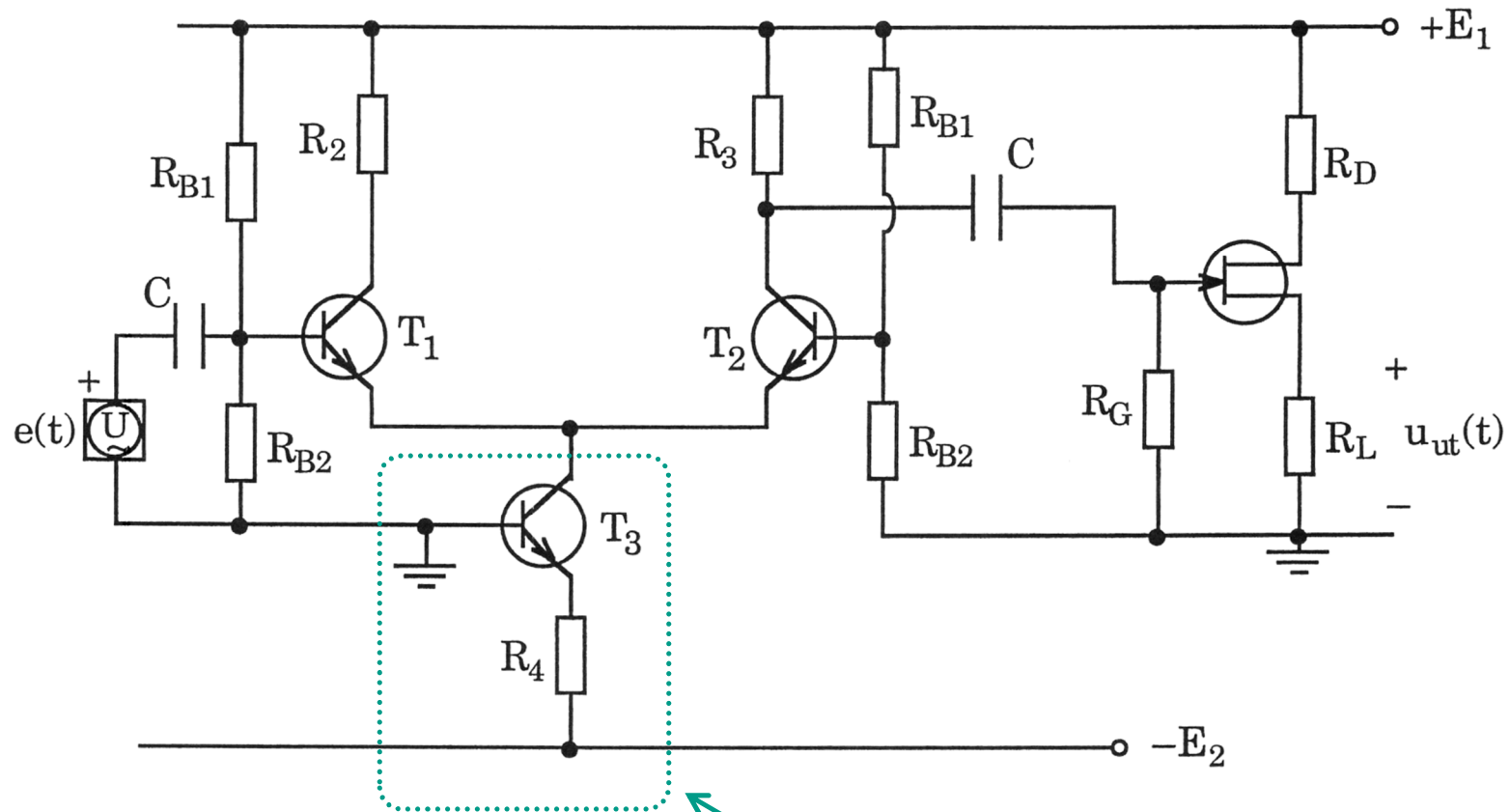
$$Z_{in} \approx R_1 \parallel h_{11,A}$$

$$Z_{ut} \approx R_C$$

Alltså: Ungefär som GE-steget.

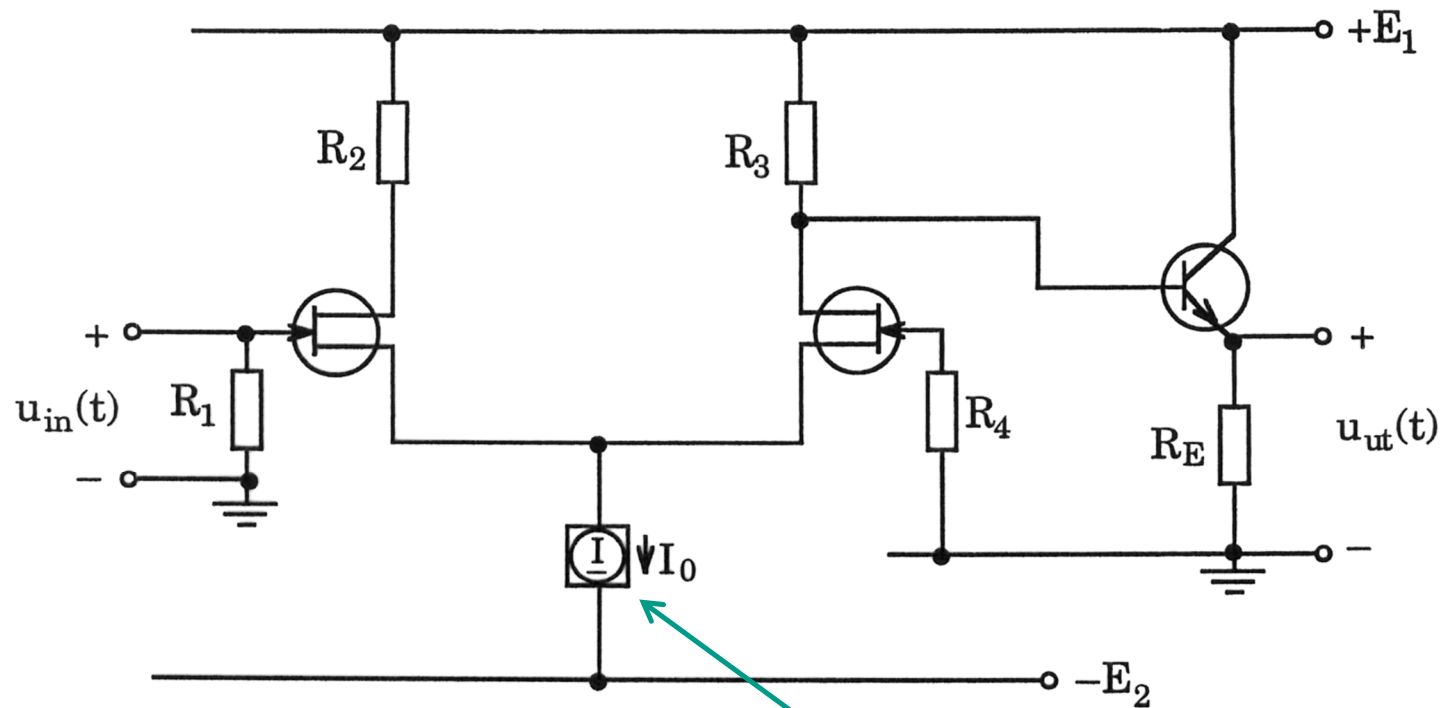
Men större bandbredd.

Differentialsteg med bipolartransistorer



Avsikten med detta är att skapa en strömkälla.

Differentialsteg med fälteffekttransistorer

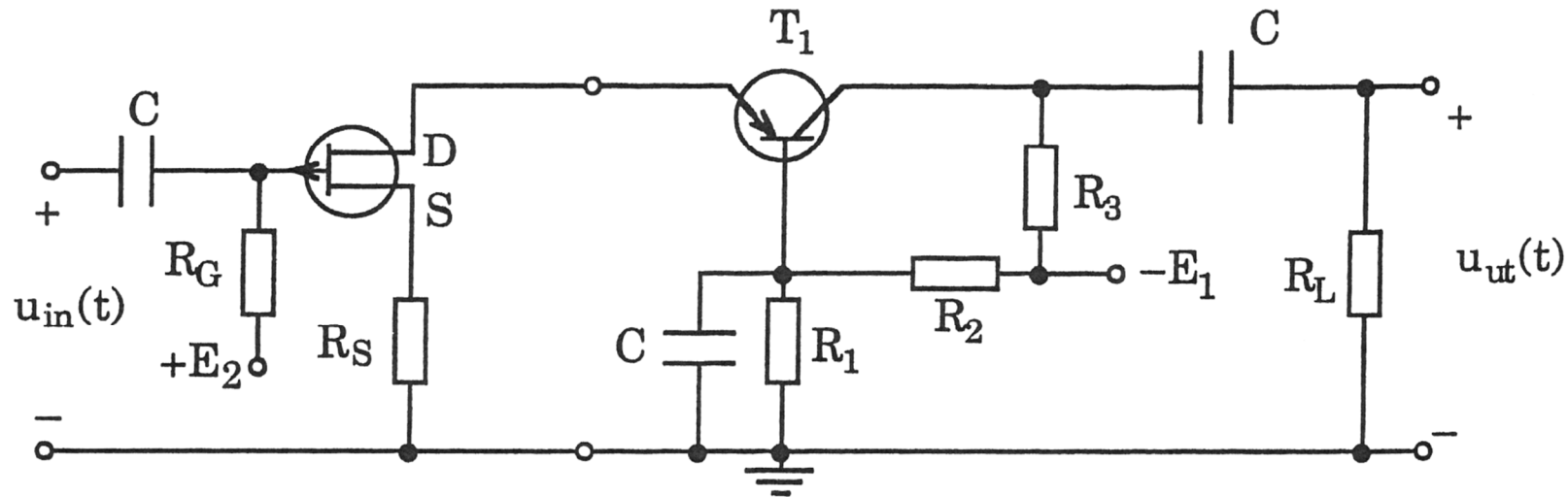


Likströmskällan blir ett avbrott i småsignalschemat.

Exempel förstärkarkoppling

- a) Beräkna arbetspunkten för transistorerna i nedanstående koppling.
- b) Beräkna utspänningen $u_{ut}(t)$ när $u_{in}(t)=\sin(10^3t)$ [mV].
Kapacitanserna C är stora och likspänningskällorna ideala.
För FET-transistorn gäller: $I_{DSS}=-8$ mA, $U_p=3,5$ V, $g_m=1,63$ mS,
 g_0 försummas och $Z_{in}=\infty$.
För bipolartransistorn gäller: $h_{11}=1$ k Ω , $h_{21}=B=100$, h_{12} och h_{22} försummas.

$R_G=510$ k Ω , $R_S=250$ Ω , $R_1=R_2=5,1$ k Ω , $R_3=3,3$ k Ω och $R_L=5$ k Ω . $E_2=2$ V, $E_1=15$ V



Metodik likströmsanalys (arbetspunkt) 1(2)

Beräkning av I_{CQ} , U_{CEQ} för bipolartransistorer och. I_{DQ} , U_{DSQ} , U_{GSQ} för FET-transistorer.

- 1) Rita likströmsschema. (Kondensatorer ersätts med avbrott.)
- 2) Ersätt bipolartransistorers basmatningskrets med en ekvivalent enport. (Gäller bipolartransistorer med standardbasmatningskrets.)
- 3) Inför strömmar och spänningar i likströmsschemat. OBS! Referensriktningar.
Bipolartransistorer: I_B , I_C , I_E , U_{CE} och U_{BE} .
FET-transistorer: I_D , U_{DS} , U_{GS} . ($I_G=0$)
 - Om flera transistorer av samma typ använd indexering I_{B1} , I_{B2} etc.
 - Samma referensriktningar i PNP som i NPN och i P-kanal som N-kanal.Beräknade strömmar och spänningar blir då negativa för PNP och P-kanal (U_{GSQ} blir positiv).

Metodik likströmsanalys (arbetspunkt)

- 4) Ställ upp ekvationer med hjälp av KCL och KVL.

Spänningsdelning, strömdelning, Ohms lag

- 5) Ytterligare samband som kan behöva användas:

Bipolar: $U_{BEQ} = 0.7 \text{ V}$ ($U_{BEQ} = -0.7 \text{ V}$ för PNP)

$$I_E = I_C + I_B$$

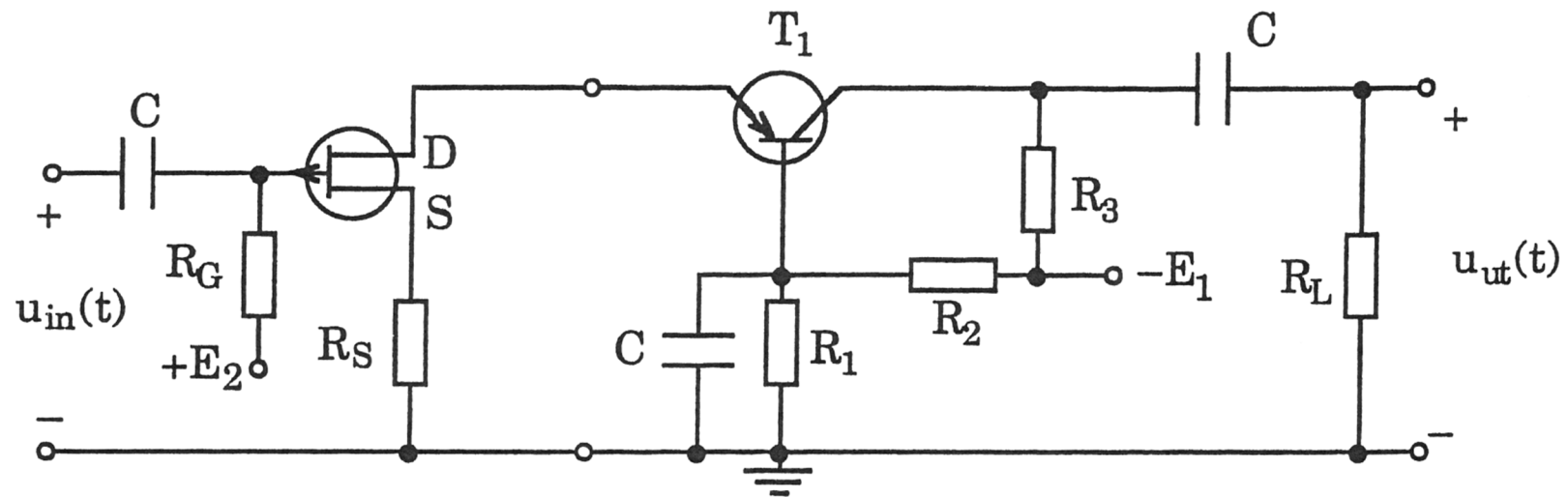
$$I_C = \beta I_B$$

$$\text{FET: } I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_P}\right)^2$$

- 6) Lös ekvationssystemet som erhålls i 4) och 5).

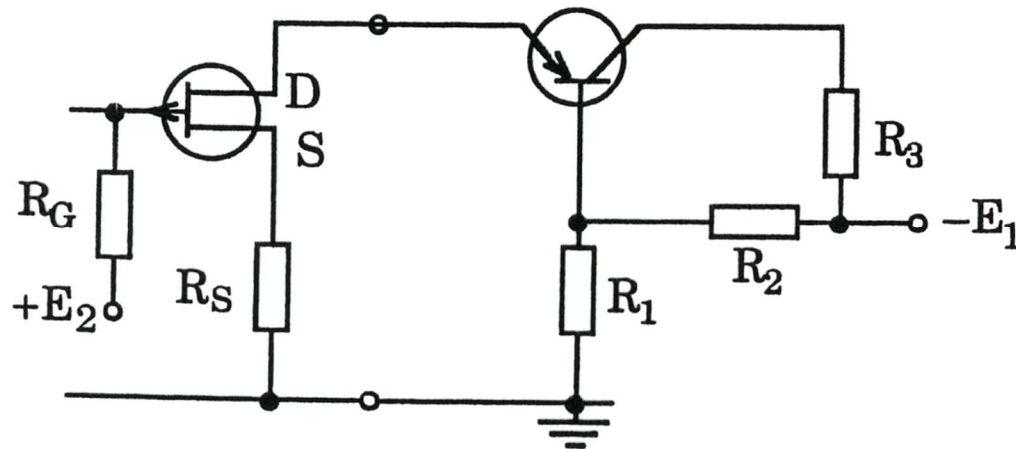
Exempel förstärkarkoppling – a) likströmsanalys

a) Beräkna arbetspunkten för transistorerna i nedanstående koppling.

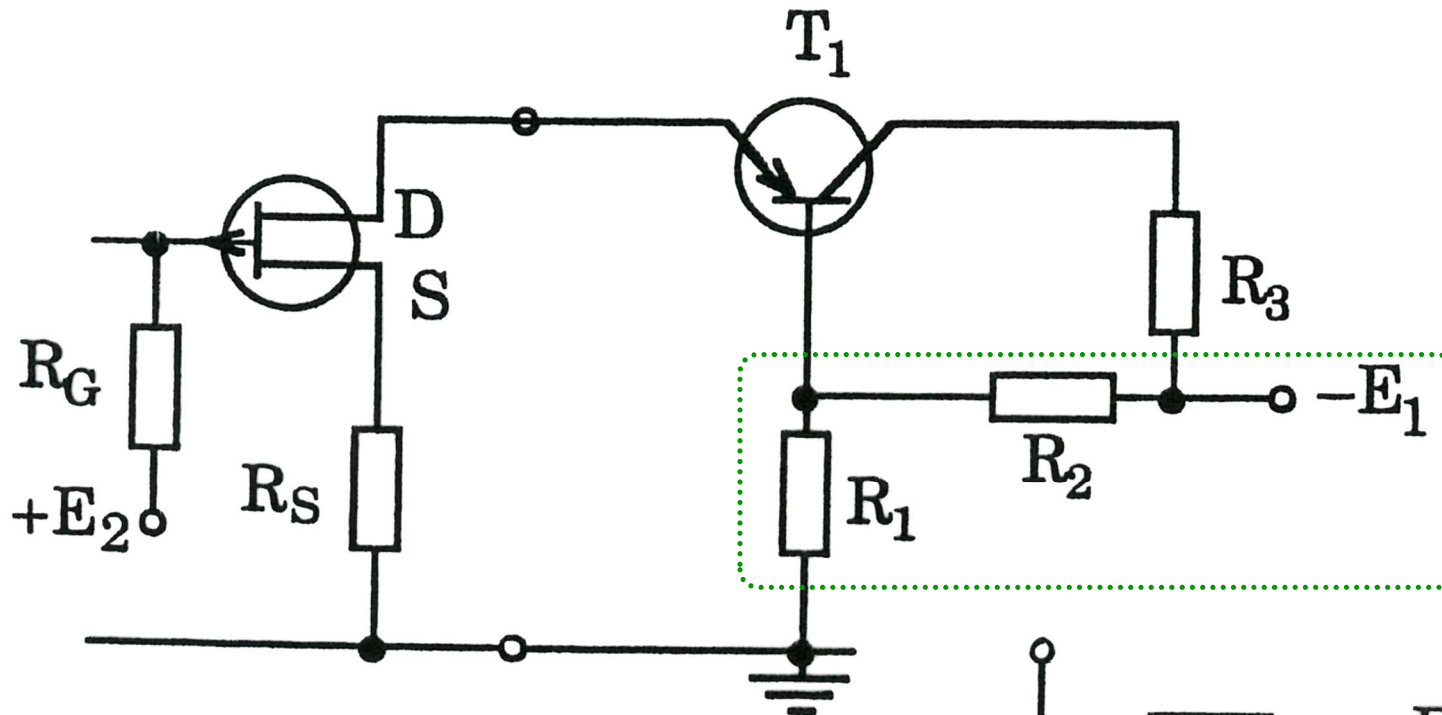


Likströmsschema:

Kapacitanserna
blir avbrott.



a) Likströmsschema

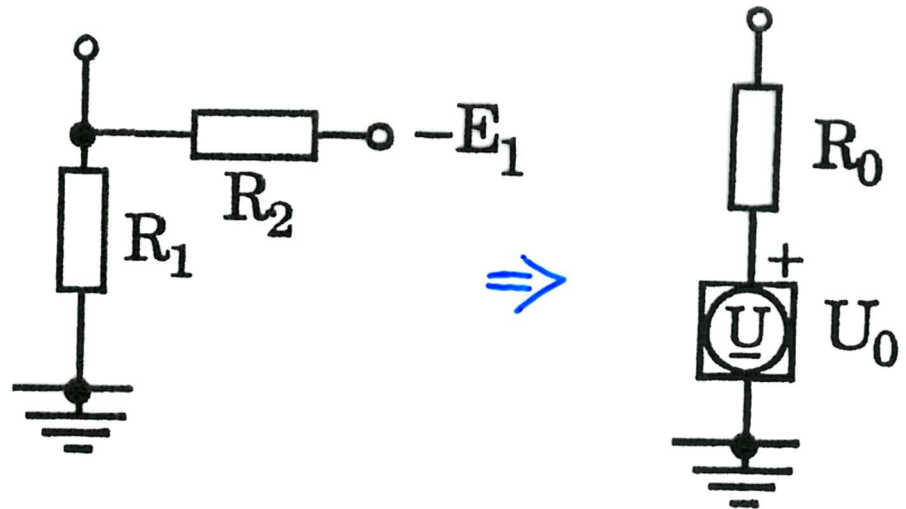


$R_G = 510\text{k}\Omega$
 $R_S = 250\ \Omega$
 $R_1 = R_2 = 5.1\text{k}\Omega$
 $R_3 = 3.3\text{k}\Omega$
 $E_1 = 15\text{V}$
 $E_2 = 2\text{V}$

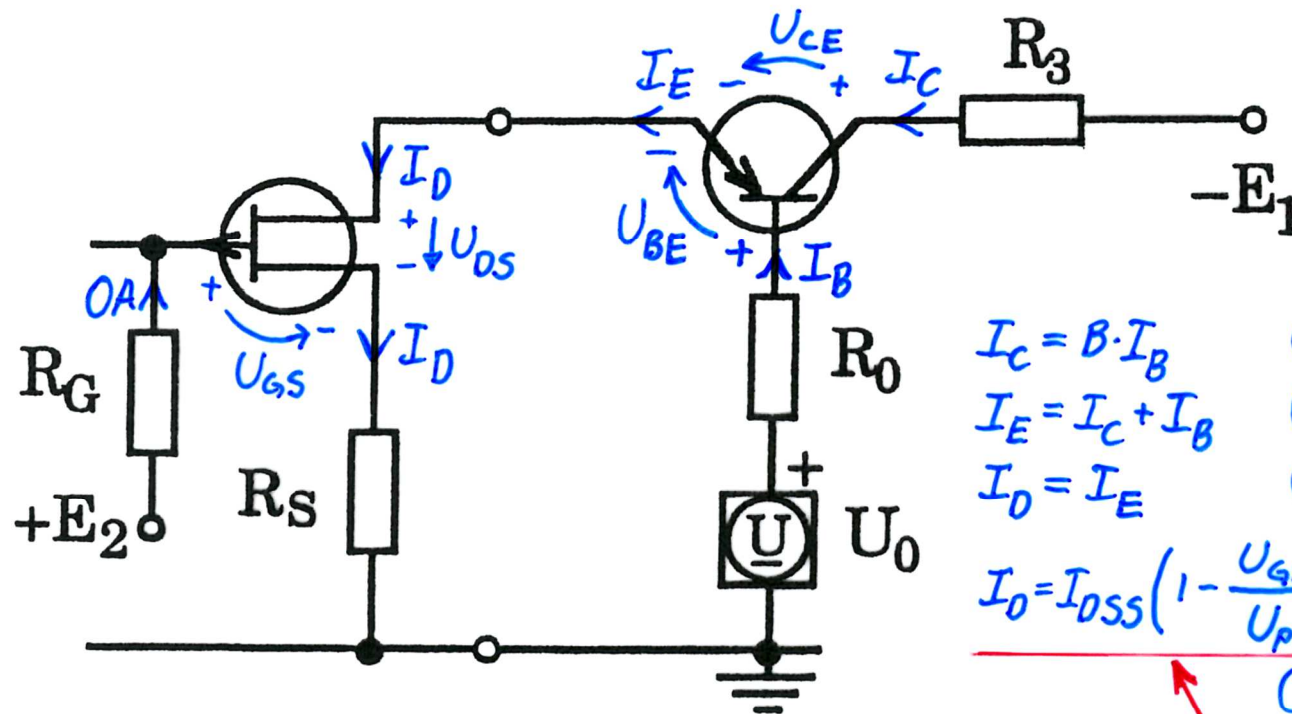
Tråpolssatsen på baskretsen:

$$U_0 = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot (-E_1) = -7.5\text{V}$$

$$R_0 = R_1 // R_2 = \frac{R_1 R_2}{R_1 + R_2} = 2.55\text{k}\Omega$$



a) Omritat likströmsschema



$$R_G = 510 \text{ k}\Omega$$

$$R_S = 250 \Omega$$

$$R_3 = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_0 = 2.55 \text{ k}\Omega$$

$$E_2 = 2 \text{ V}$$

$$U_0 = -7.5 \text{ V}$$

$$B = 100$$

$$I_{DSS} = -8 \text{ mA}$$

$$U_p = 3.5 \text{ V}$$

$$I_C = B \cdot I_B \quad (1)$$

$$I_E = I_C + I_B \quad (2)$$

$$I_D = I_E \quad (3)$$

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_p}\right)^2 \quad (4)$$

$$\text{KVL: } E_2 - U_{GS} - R_S I_D = 0 \quad (5)$$

$$U_0 - R_0 I_B - U_{BE} - U_{DS} - R_S I_D = 0 \quad (6)$$

$$-E_1 - R_3 I_C - U_{CE} - U_{DS} - R_S I_D = 0 \quad (7)$$

Standard-antagande (PNP):
 $U_{BE} = -0.7 \text{ V}.$

Obs! Gäller för U_{GS} mellan 0V och U_p .

Metodik syntes (dimensionering)

Beräkning av resistansvärden så att viss önskad arbetspunkt (I_{CQ} , U_{CEQ} resp. I_{DQ} , U_{DSQ} , U_{GSQ}) erhålls.

- 1) – 5) som ovan.
- 6) Använd eventuella bivillkor.

Vanliga bivillkor:

- Arbetspunkten mitt på signalmässig arbetslinje.
OBS! Belastningsresistansen (efterföljande förstärkarstegs inresistans) inverkar.
- Efterföljande förstärkarsteg får inte sänka förstärkningen med mer än x procent, dvs. om förstärkningen utan belastning är A ska förstärkningen vara åtminstone $F = A - 0.01xA$ när belastningen beaktas. (Räkna på gränsfallet.)

Bipolar:- $R_0 = 0.1BR_E$

FET: - Gatepotentialen ska ha ett visst givet värde.

Metodik småsignalanalys 1(3)

Beräkning av inimpedans Z_{in} , utimpedans Z_{ut} och spänningsförstärkning F .

- 1) Rita signalschema.
Kapacitanser ersätts med kortslutningar, ideala likspänningskällor med kortslutningar och ideala likströmkällor med avbrott. (Kretsen nollställs likströmsmässigt.)
- 2) Rita ekvivalent småsignalschema.
 - Markera bas (B), kollektor (C), emitter (E) resp. drain (D), gate (G), source (S). (Skilj olika transistorer åt. B1, B2 etc.)
 - Ersätt bipolartransistorer med h-parameterscheman ($h_{11}, h_{12}, h_{21}, h_{22}$) och FET-transistorer med g-parameterscheman (g_m, g_0).
 - Rita in motsånden så att de kopplar till de olika referenspunkterna (B1, B2 etc.) på ett korrekt sätt.
- 3) Inför strömmar och spänningar (I_{b1}, I_{b2} etc.) i det ekvivalenta småsignalschemat.
OBS! Referensriktningar!

Metodik småsignalanalys (impedanser) 2(3)

Utgå från ekvivalent småsignalschema för beräkning av Z_{in} , Z_{ut} och F .

I regel försummas h_{12} , h_{22} och g_0 .

- Bestämning av Z_{in} : - Utgå från definitionen $Z_{in} = \frac{U_{in}}{I_{in}}$.

OBS! Belastningsresistansen (efterföljande förstärkarstegs inresistans) inverkar.

- Bestämning av Z_{ut} : - Utgå från definitionen $Z_{ut} = \frac{U}{I}$

U är en tänkt spänning pålagd på utgången (belastningsresistansen bortkopplad) och I motsvarande ström.

OBS! Generatorresistansen (föregående förstärkarstegs utresistans) inverkar.

Metodik småsignalanalys (förstärkning) 3(3)

- Beräkning av F eller beräkning av $u_{ut}(t)$: Arbeta från utsignal mot insignal!

1) Uttryck U_{ut} i närmast föregående variabel, t.ex. $U_{gs2} \cdot U_{ut} = f_1(U_{gs2})$

2) Uttryck U_{gs2} i den variabel som finns närmast innan U_{gs2} t.ex. $I_{b2} \cdot U_{gs2} = f_2(I_{b2})$

3) Fortsätt tills ett samband mellan U_{in} och den första variabeln t.ex. I_{b1} erhålls. $I_{b1} = f_x(U_{in})$.

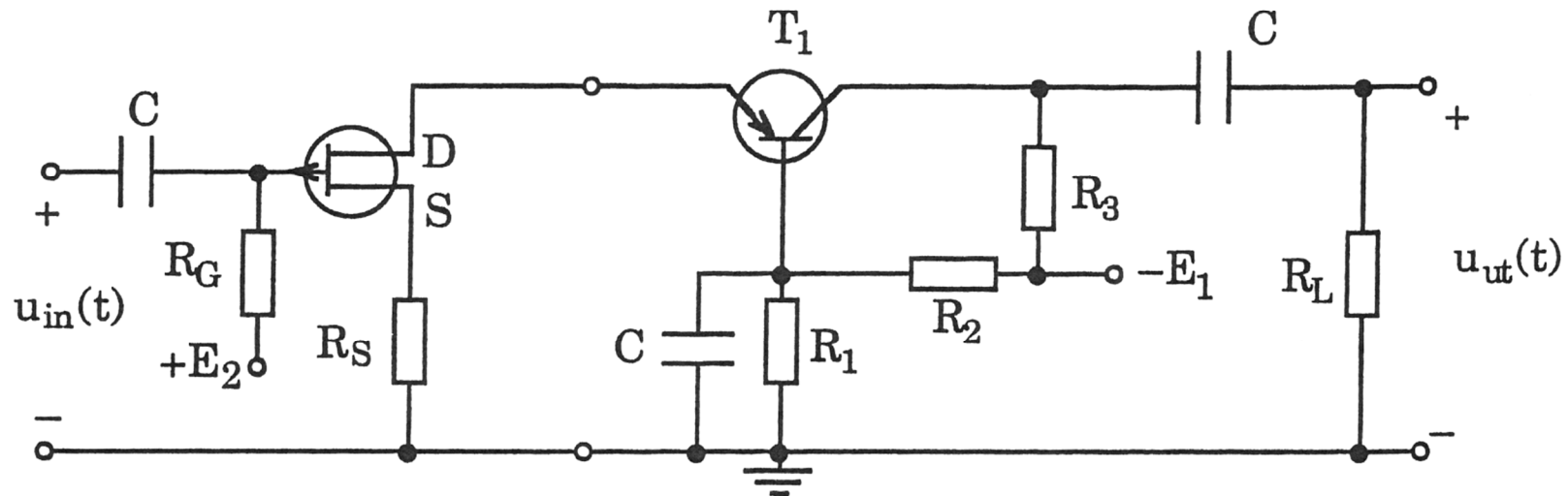
4) Ett samband mellan U_{ut} och U_{in} erhålls genom att ingående variabler elimineras ”från vänster till höger”.

Ex: 1) $U_{ut} = f_1(U_{gs2})$; 2) $U_{gs2} = f_2(I_{b2})$; 3) $I_{b2} = f_3(I_{b1})$; 4) $I_{b1} = f_x(U_{in})$.

4) insatt i 3) ger $I_{b2} = g_3(U_{in})$, vilket insatt i 2) ger $U_{gs2} = g_2(U_{in})$. Detta uttryck insatt i 1) ger slutligen $U_{ut} = g_1(U_{in})$.

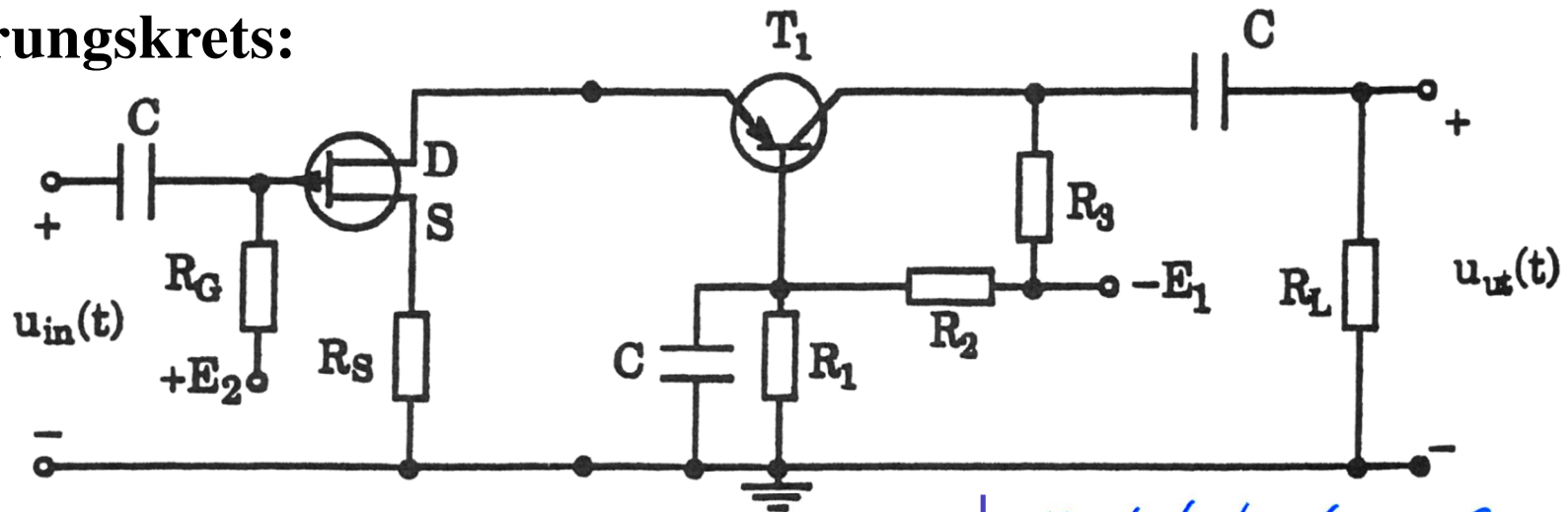
Exempel förstärkarkoppling – b) småsignalanalys

- b) Beräkna utspänningen $u_{ut}(t)$ när $u_{in}(t)=\sin(10^3t)$ [mV].
Kapacitanserna C är stora och likspänningskällorna ideala.
För FET-transistorn gäller: $I_{DSS}=-8$ mA, $U_p=3,5$ V, $g_m=1,63$ mS,
 g_0 försummas och $Z_{in}=\infty$.
För bipolartransistorn gäller: $h_{11}=1$ k Ω , $h_{21}=B=100$, h_{12} och h_{22} försummas.
 $R_G=510$ k Ω , $R_S=250$ Ω , $R_1=R_2=5,1$ k Ω , $R_3=3,3$ k Ω och $R_L=5$ k Ω . $E_2=2$ V, $E_1=15$ V

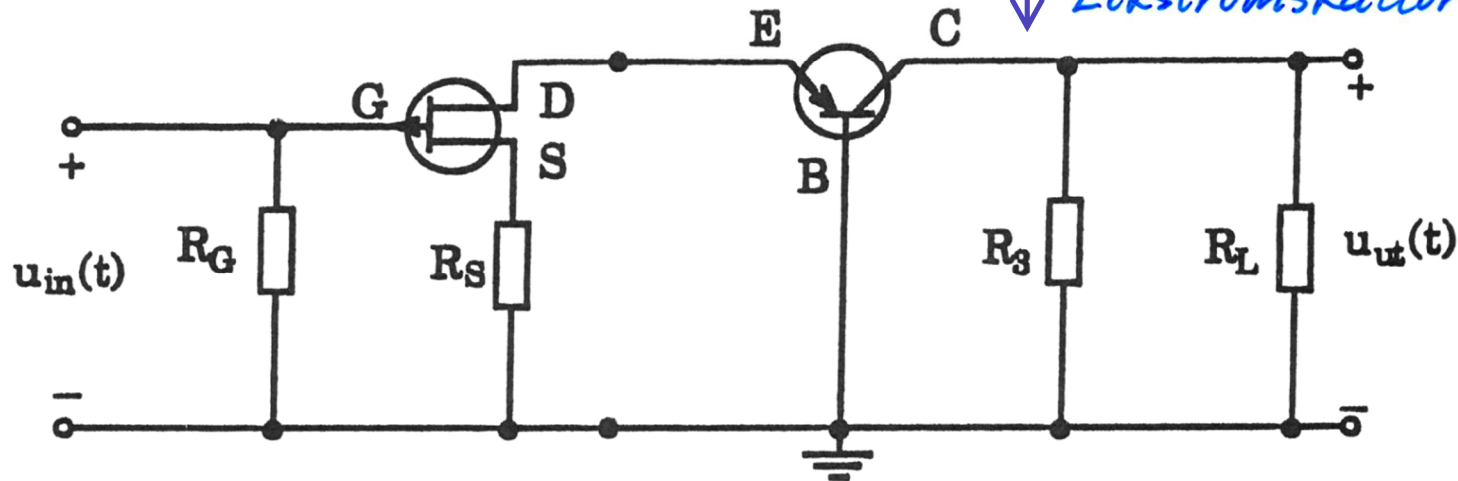


b) Småsignalanalys – signalschema

Ursprungskrets:

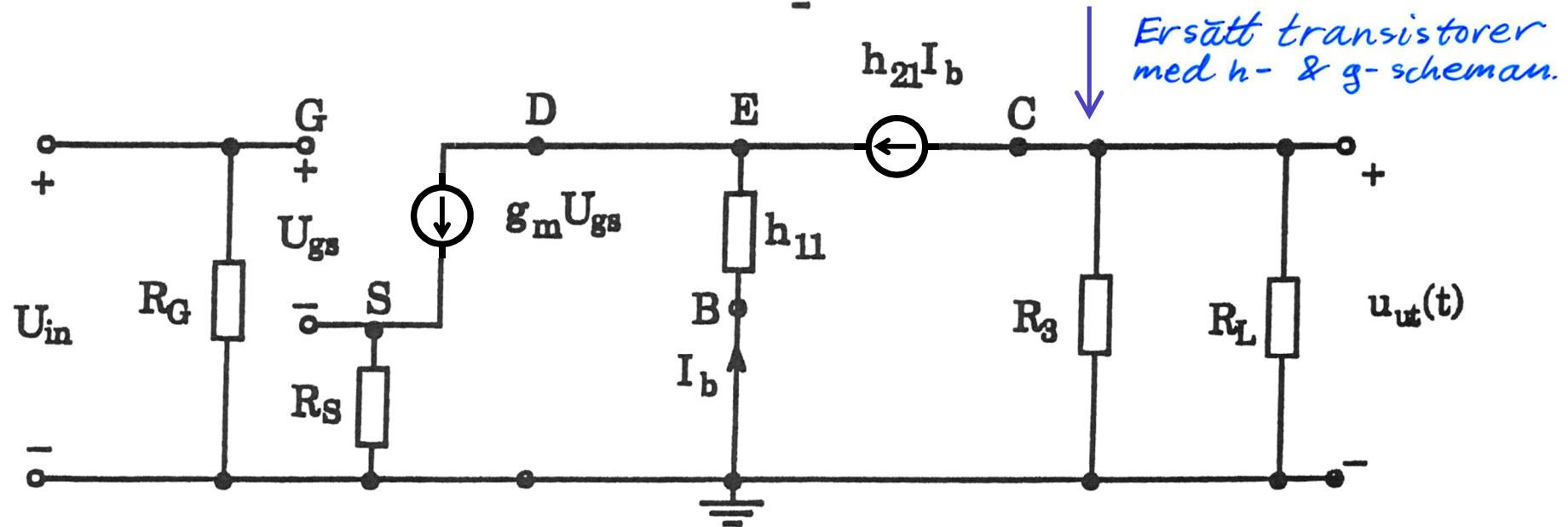
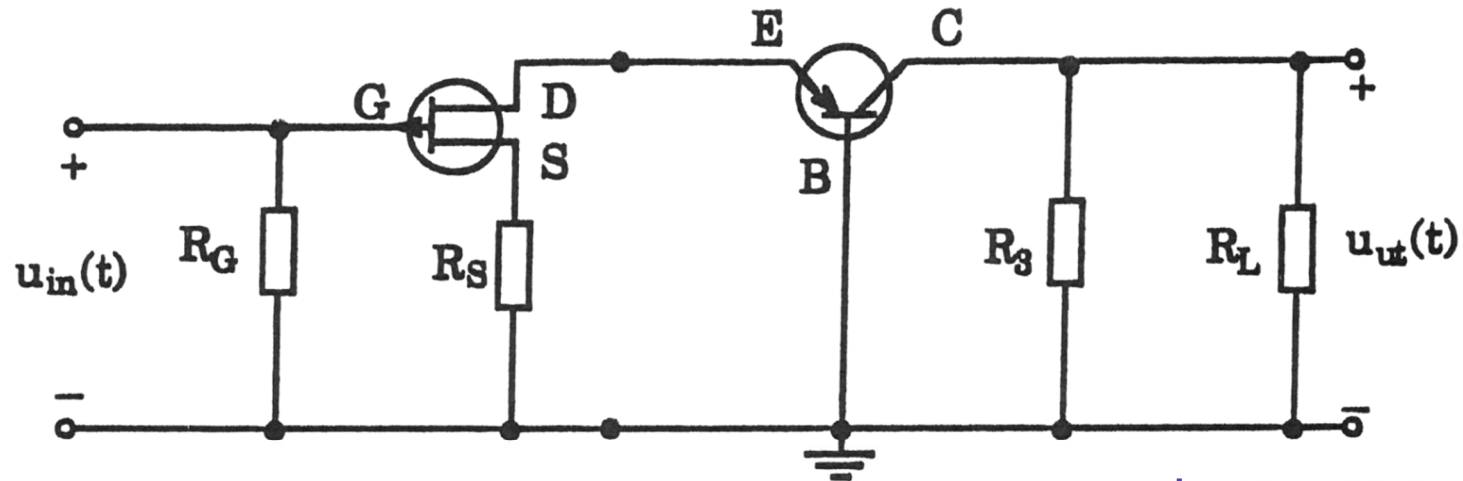


Signalschema:



*Kortslut stora C.
Kortslut likspänningskällor.
Likströmskällor blir avbrott.*

b) Småsignalanalys – ESSS



b) Småsignalanalys – Förstärkning

$$R_G = 510 \text{ k}\Omega$$

$$R_S = 250 \text{ }\Omega$$

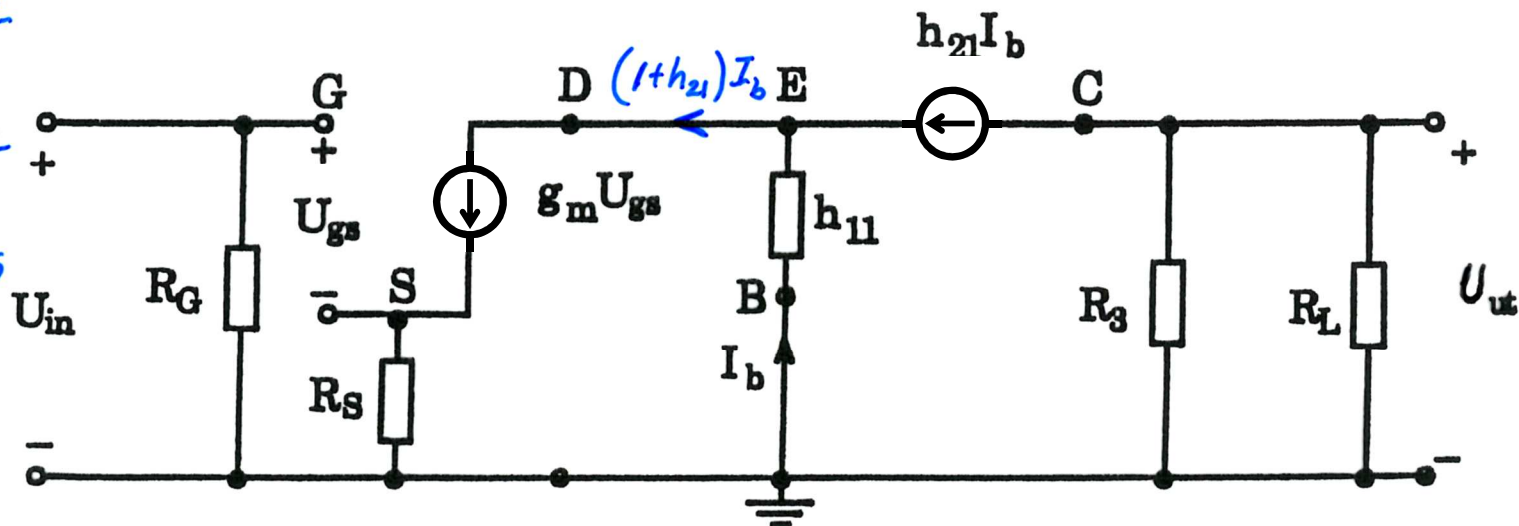
$$R_3 = 3.3 \text{ k}\Omega$$

$$R_2 = 5 \text{ k}\Omega$$

$$g_m = 1.63 \text{ mS}$$

$$h_{11} = 1 \text{ k}\Omega$$

$$h_{21} = 100$$



$$F = \frac{U_{ut}}{U_{in}} = \frac{U_{ut}}{I_b} \cdot \frac{I_b}{U_{gs}} \cdot \frac{U_{gs}}{U_{in}} = \frac{-h_{21}(R_3 // R_L)}{1+h_{21}} \cdot \frac{g_m}{1+g_m R_S} = -2.28$$

Ohms lag: $U_{ut} = -h_{21} I_b \cdot (R_3 // R_L)$

Ur schema: $g_m U_{gs} = (1+h_{21}) I_b$

KVL: $U_{in} = U_{gs} + g_m U_{gs} \cdot R_S$

$$u_{in}(t) = \sin(10^3 t) \text{ mV}$$

Ut signal: $U_{ut} = -2.28 \cdot U_{in} \Rightarrow u_{ut}(t) = 2.28 \cdot \sin(10^3 t + \pi) \text{ mV}$

Inlämningsuppgift 5: Approximationer

Följande approximationer kan användas på uppgift 5:

- $U_{BE} = \pm 0.7 \text{ V}$ för NPN (+) resp PNP (–).
- Linjäriseringen som h- och g-parametrarna innebär.
- Förenklade småsignalscheman:
$$h_{12} = 0, h_{22} = 0, g_0 = 0.$$
- Strömmen in på fälteffekttransistorers gate är noll.
- En del uppgifter anger specifikt att någon viss approximation kan användas.

Därutöver vill jag inte se några approximationer.

Mikael Olofsson
ISY/EKS

www.liu.se