

# **Elektronički sklopovi – Dinamička svojstva pojačala**

Elektronika – 8. predavanje

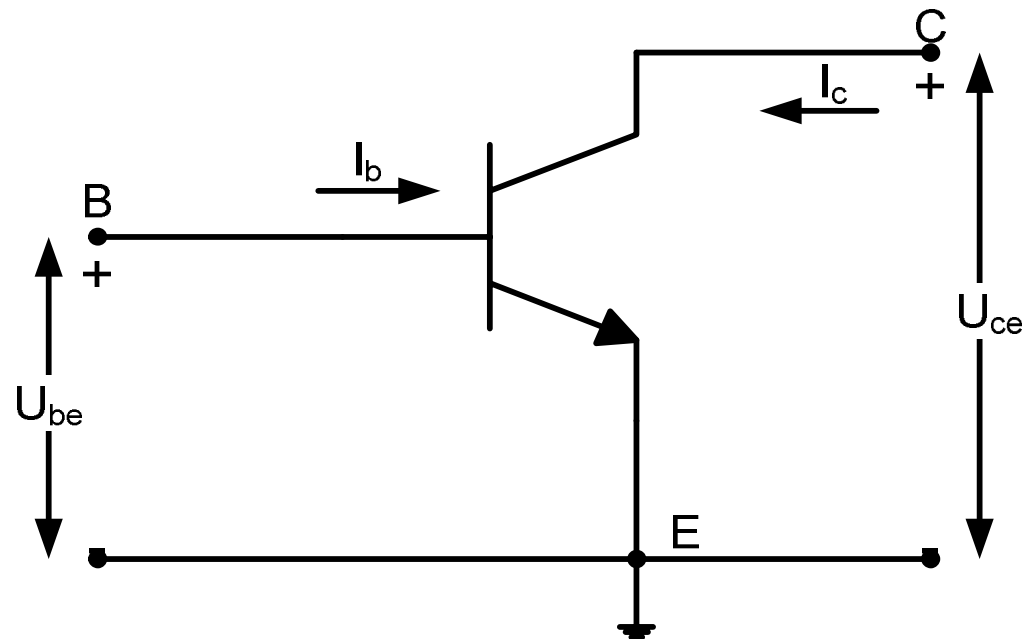
# Dinamička svojstva pojačala

- Mali signal i srednje frekvencije
- Mali signal ili linearni režim rada – odnosi se na izmjenične komponente napona i struje čije su amplitude promjena malene u usporedbi s istosmjernim vrijednostima u statičkoj radnoj točki.
- Ako su spomenuti uvjeti ispunjeni, karakteristika tranzistora može se linearizirati, a tranzistor nadomjestiti linearnim aktivnim četveropolom.
- Najčešće se tranzistor nadomješta hibridnim nadomjesnim sklopom.

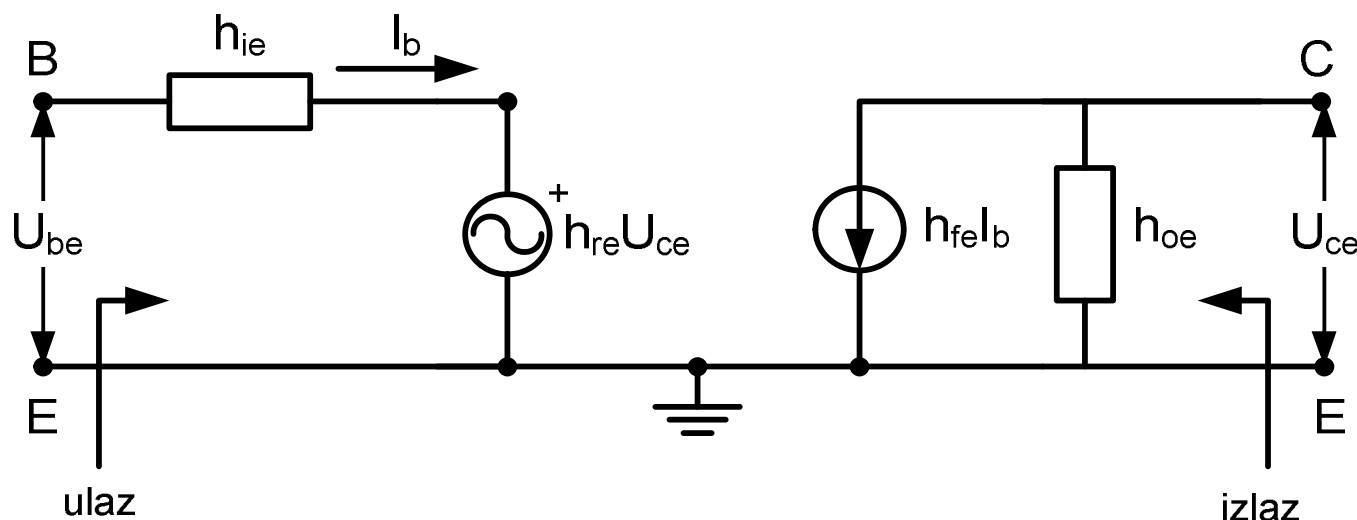


# Spoj zajedničkog emitera

- Emiter je uzemljen, odnosno on je zajednička elektroda ulaznog dijela (krug baza-emiter) i izlaznog dijela (krug kolektor-emiter) tranzistora za izmjenični signal.



- Hibridni nadomjesni sklop bipolarnog tranzistora za spoj zajedničkog emitera:



- Hibridni nadomjesni sklop opisan je hibridnim jednažbama:

$$U_{be} = h_{ie} \cdot I_b + h_{re} \cdot U_{ce} \quad (1)$$

$$I_c = h_{fe} \cdot I_b + h_{oe} \cdot U_{ce} \quad (2)$$

- $h_{ie}$ ,  $h_{re}$ ,  $h_{fe}$  i  $h_{oe}$  su hibridni parametri tranzistora u spoju zajedničkog emitera.
- Hibridni parametri definirani su kao:

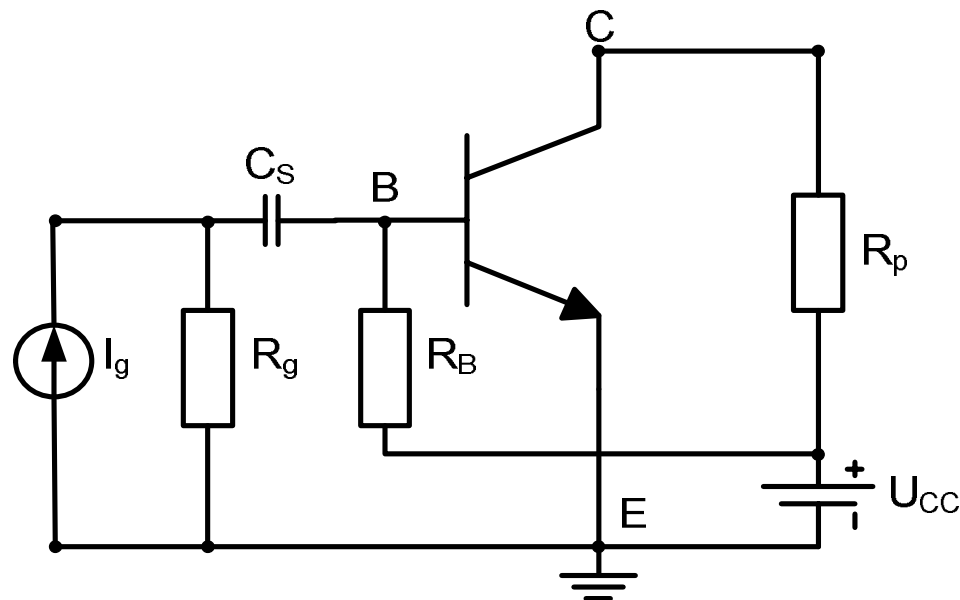
$$h_{ie} = \left. \frac{U_{be}}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} \quad \equiv \text{ulazni otpor uz kratko spojeni izlaz}$$

$$h_{re} = \left. \frac{U_{be}}{U_{ce}} \right|_{I_b=0} \quad \equiv \text{faktor naponskog povratnog djelovanja uz otvoreni ulaz}$$

$$h_{fe} = \left. \frac{I_c}{I_b} \right|_{U_{ce}=0} \quad \equiv \text{faktor strujnog pojačanja uz kratko spojeni izlaz}$$

$$h_{oe} = \left. \frac{I_c}{U_{ce}} \right|_{I_b=0} \quad \equiv \text{izlazna vodljivost uz otvoreni ulaz}$$

- Iz hibridnog nadomjesnog sklopa moguće je analitički odrediti osnovne karakteristične veličine pojačala: **strujno i naponsko pojačanje te ulazni i izlazni otpor.**
- Primjer: analiza sklopa prikazanog slikom:

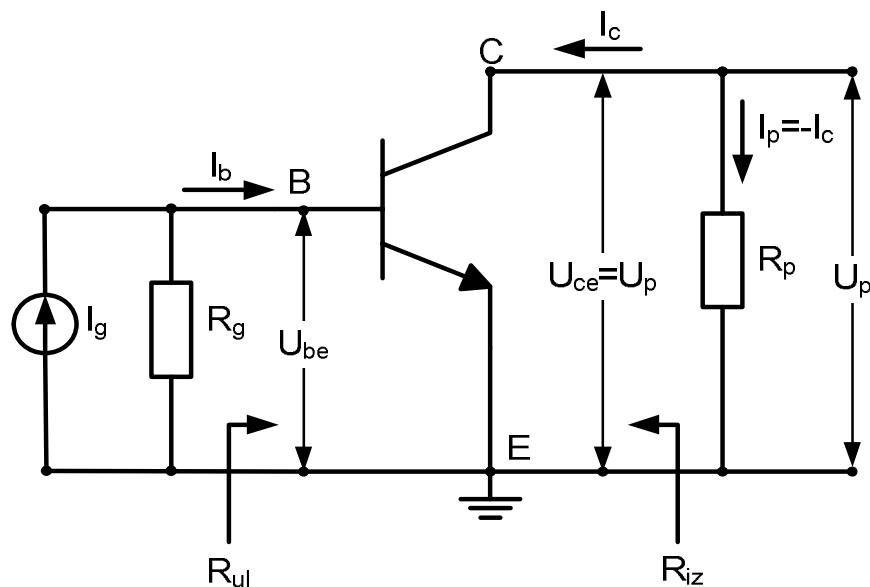


Istosmjerni izvor napajanja  $U_{CC}$  te otpornici  $R_B$  i  $R_p$  osiguravaju rad tranzistora u normalnom aktivnom području.

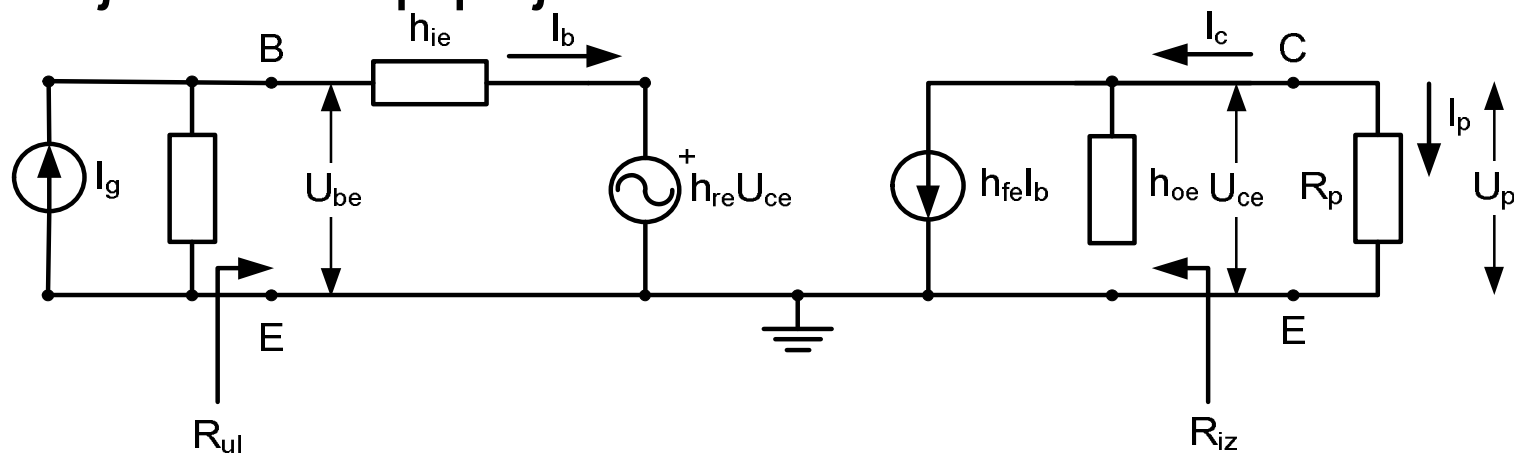
Kondenzator  $C_s$  odvaja istosmjernu struju od generatora struje  $I_g$ , tj. onemogućava istosmjernu spregu pojačala i generatora signala.

U području srednjih frekvencija reaktancija kondenzatora  $C_s$  je zanemarivo malena.

## ■ Sklop u dinamičkim uvjetima:



## ■ Nadomjesni sklop pojačala



- **Strujno pojačanje** definirano je omjerom struje trošila  $I_p$  i strujom baze tranzistora  $I_b$ :

$$A_i = \frac{I_p}{I_b} = -\frac{I_c}{I_b} \quad (3)$$

- Iz izlaznog kruga slijedi:

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} U_{ce} \quad (4)$$

$$U_{ce} = U_p = -I_c R_p \quad (5)$$

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} (-I_c R_p) \quad (6)$$

$$A_i = -\frac{I_c}{I_b} = -\frac{h_{fe}}{1 + h_{oe} R_p} \quad (7)$$



- Za ulazni krug sklopa jednačba naponske ravnoteže je:

$$U_{be} = I_b h_{ie} + h_{re} U_{ce} = I_b h_{ie} + h_{re} (-I_c R_p) = I_b (h_{ie} + h_{re} A_i R_p) \quad (8)$$

- **Ulazni dinamički otpor** sklopa je po definiciji omjer ulaznog izmjeničnog napona i ulazne izmjenične struje:

$$R_{ul} = \frac{U_{be}}{I_b} = h_{ie} + h_{re} A_i R_p \quad (9)$$

gdje je  $A_i$  strujno pojačanje određeno relacijom (7).

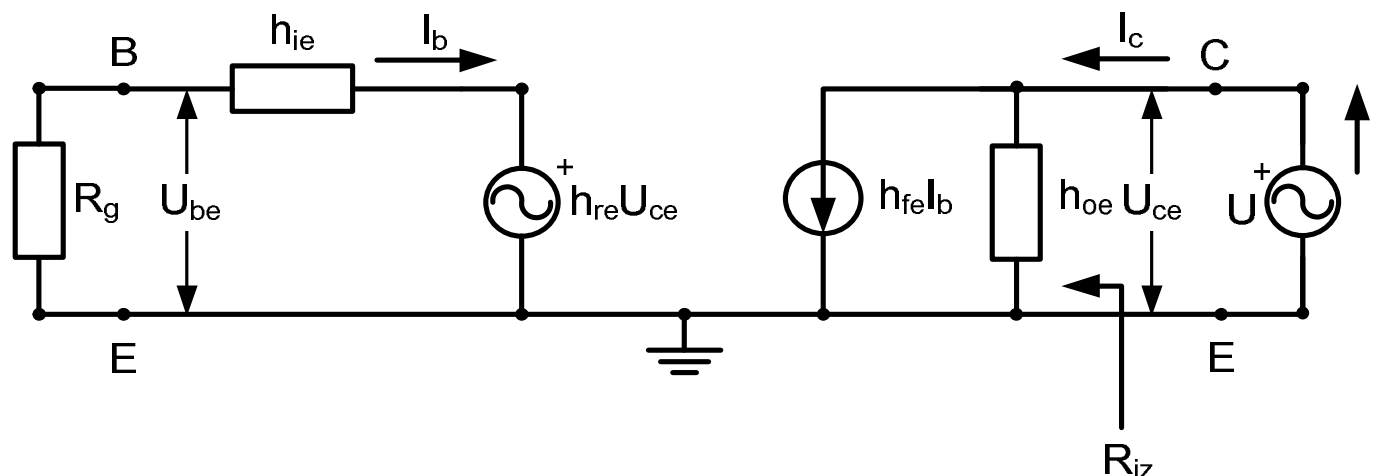
- Ako se (7) uvrsti u (9) dobiva se:

$$R_{ul} = h_{ie} - \frac{h_{re} h_{fe}}{h_{oe} + \frac{1}{R_p}} \quad (10)$$

- **Naponsko pojačanje** je po definiciji omjer izmjeničnog napona  $U_{ce}=U_p$  na izlazu pojačala (trošilu  $R_p$ ) i napona signala na ulazu pojačala,  $U_{be}$ :

$$A_v = \frac{U_p}{U_{be}} = -\frac{I_c R_p}{I_b R_{ul}} = -A_i \frac{R_p}{R_{ul}} \quad (11)$$

- Pri određivanju **izlaznog otpora** valja odspojiti trošilo  $R_p$  na izlazu i na njegovo mjesto spojiti generator  $U$ , prema slici:



- **Izlazni otpor** određen je omjerom napona  $U=U_{ce}$  i struje  $I=I_c$ . Pritom je nužno u ulaznom krugu isključiti struju  $I_g$  ulaznog generatora, dok njegov unutrašnji otpor  $R_g$  ostaje. Iz izlaznog kruga na slici dobiva se:

$$I_c = h_{fe} I_b + h_{oe} U_{ce} \quad (12)$$

a iz ulaznog kruga:

$$I_b (R_g + h_{ie}) + h_{re} U_{ce} = 0 \quad (13)$$

- Iz relacija (12) i (13) dobiva se **izlazni otpor**:

$$R_{iz} = \frac{U_{ce}}{I_c} = \frac{1}{h_{oe} - \frac{h_{re} h_{fe}}{R_g + h_{ie}}} \quad (14)$$

- Na temelju provedene analize za pojačalo u spoju zajedničkog emitera može se zaključiti:
  1. U području relativno niskih frekvencija **strujno pojačanje je**, uz realno trošilo, **negativan broj veći od jedinice**, osim kod vrlo visokih vrijednosti otpora trošila. Ako je ispunjen uvjet  $h_{oe}R_p < 0,1$ , tada je, prema relaciji (7), strujno pojačanje  $A_i \approx -h_{fe}$ , dakle neovisno o otporu trošila.
  2. **Naponsko pojačanje je**, uz realno trošilo, **negativan broj veći od jedinice**, osim kod sasvim malih vrijednosti otpora priključenog trošila. S porastom otpora trošila iznos naponskog pojačanja raste i kada  $R_p \rightarrow \infty$  prema relaciji

$$A_v = - \frac{h_{fe}}{h_{ie} \left( h_{oe} + \frac{1}{R_p} \right) - h_{re} h_{fe}} \quad (15)$$

teži prema vrijednosti

$$A_v = - \frac{h_{fe}}{h_{ie} h_{oe} - h_{re} h_{fe}} \quad (16)$$

3. Ulazni otpor prema relaciji (10) ima vrijednost  $h_{ie}$  kod malih iznosa otpora trošila  $R_p$ . S porastom otpora trošila ulazni otpor opada težeći prema iznosu

$$R_{ul} = h_{ie} - \frac{h_{re} h_{fe}}{h_{oe}} \quad (17)$$

kada  $R_p \rightarrow \infty$ .

4. Izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkog emitera prema relaciji (14) opada s porastom unutrašnjeg otpora generatora signala.

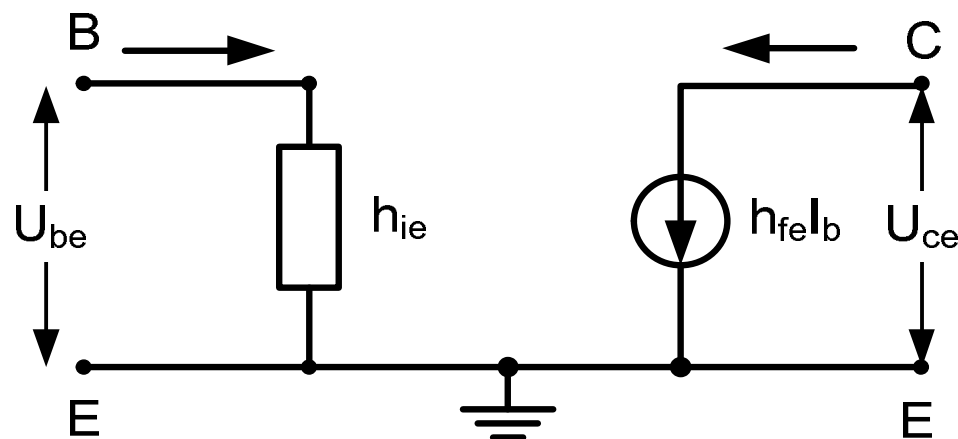
# Idealizirani prikaz pojačala u spoju zajedničkog emitera

- Ako je ispunjen uvjet  $h_{oe}R_p < 0,1$ , što znači da uz tipični iznos  $h_{oe} < 10^{-4}$  S otpor trošila mora biti  $R_p < 1$  k $\Omega$ , vodljivost  $h_{oe}$  može se zanemariti u odnosu prema vodljivosti priključenog trošila.
- Ako je npr.  $h_{re} = 10^{-4}$  i  $A_v = -100$ , tada je

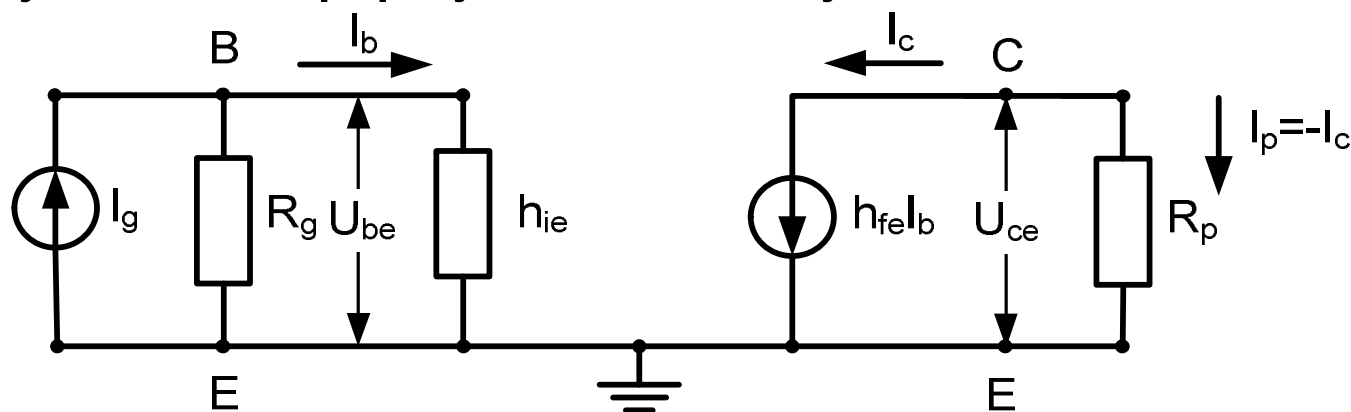
$$h_{re}U_{ce} = h_{re}A_vU_{be} = 10^{-4} \cdot (-100) \cdot U_{be} = -0,01U_{be} \quad (18)$$

a to znači da je u ulaznom krugu nadomjesnog sklopa pojačala elektromotornu silu  $h_{re}U_{ce}$  moguće zanemariti u odnosu prema ulaznom naponu  $U_{be}$ .

- U navedenim uvjetima hibridni nadomjesni sklop tranzistora u spoju zajedničkog emitera poprima oblik:



- Nadomjesni sklop pojačala tada je:



- Iz navedenog nadomjesnog sklopa slijede relacije za strujno i naponsko pojačanje te ulazni otpor:

$$A_i = \frac{I_p}{I_b} = -\frac{h_{fe} I_b}{I_b} = -h_{fe} \neq f(R_p) \quad (19)$$

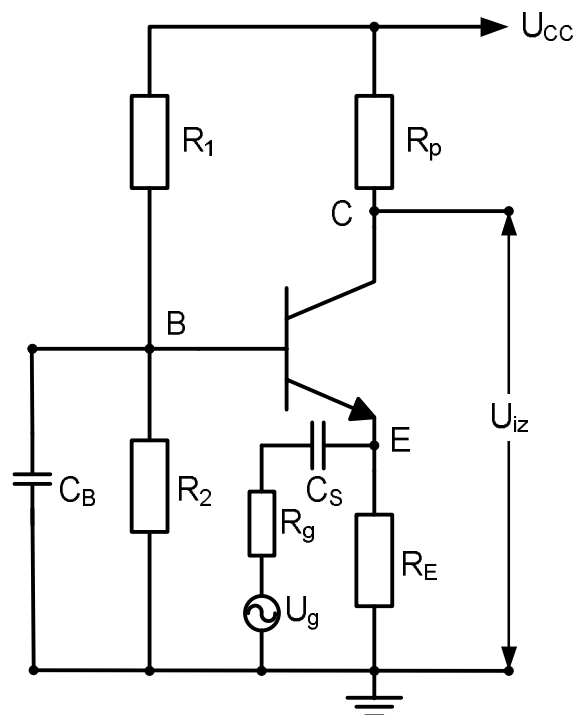
$$R_{ul} = \frac{U_{be}}{I_b} = h_{ie} \neq f(R_p) \quad (20)$$

$$A_v = \frac{U_p}{U_{be}} = \frac{I_p R_p}{U_{be}} = -\frac{h_{fe} I_b R_p}{I_b h_{ie}} = -h_{fe} \frac{R_p}{h_{ie}} \quad (21)$$



# Pojačalo u spoju zajedničke baze

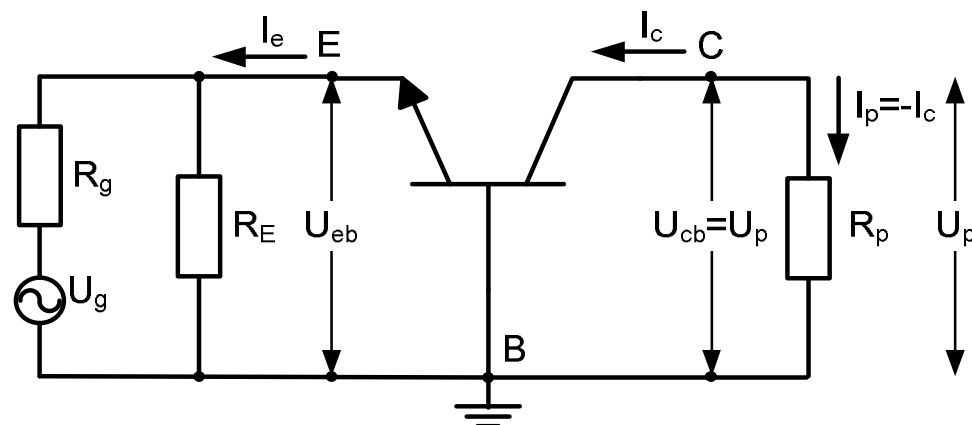
- Praktična izvedba pojačala u spoju zajedničke baze prikazana je na slici. U dinamičkim uvjetima baza je uzemljena, tj. ona je zajednička elektroda ulaznom i izlaznom krugu sklopa.



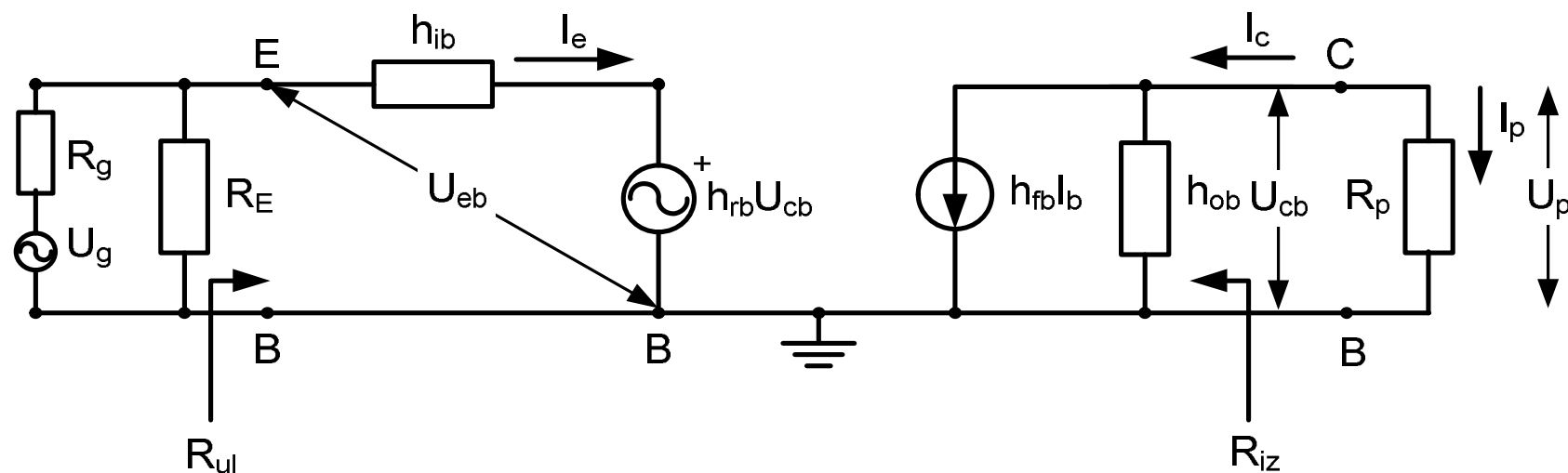
Otpornici  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_p$  i  $R_E$  s izvorom napajanja sklopa  $U_{CC}$  osiguravaju odgovarajuću statičku radnu točku u normalnom aktivnom području rada.

Kondenzator  $C_S$  odvaja statičke uvjete od kruga generatora signala, a kondenzator  $C_B$  na frekvenciji signala ima zanemarivo malu reaktanciju te praktički u dinamičkim uvjetima uzemljuje bazu tranzistora.

- Model pojačala za mali izmjenični signal:



- Nadomjesni sklop pojačala za mali izmjenični signal:



- Sklop je formalno identičan sklopu za spoj zajedničkog emitera, samo hibridne parametre za spoj zajedničkog emitera treba zamijeniti hibridnim parametrima za spoj zajedničke baze, ulaznu struju  $I_b$  treba zamijeniti strujom  $I_e$ , napon  $U_{be}$  s naponom  $U_{eb}$  i napon na izlazu  $U_{ce}$  s naponom  $U_{cb}$ .

- **Strujno pojačanje:**

$$A_i = \frac{I_p}{I_e} = -\frac{I_c}{I_e} = -\frac{h_{fb}}{1 + h_{ob}R_p} \quad (22)$$

Budući da je redovito  $h_{ob}R_p \ll 1$ , strujno pojačanje  $A_i$  je:

$$A_i \approx -h_{fb} \approx 1 \quad (23)$$

## ■ Ulazni otpor:

$$R_{ul} = \frac{U_{eb}}{I_e} = h_{ib} + h_{rb} A_i R_p = h_{ib} - \frac{h_{rb} h_{fb}}{h_{ob} + \frac{1}{R_p}} \quad (24)$$

Zbog malog iznosa parametra  $h_{rb}$  redovito je drugi član u izrazu (24) puno manji od  $h_{ib}$  pa se za  $R_{ul}$  može pisati približan izraz:

$$R_{ul} \approx h_{ib} \quad (25)$$

## ■ Naponsko pojačanje:

$$A_v = \frac{U_p}{U_{eb}} = \frac{I_p R_p}{I_e R_{ul}} = A_i \frac{R_p}{R_{ul}} = - \frac{h_{fb}}{h_{ib} \left( h_{ob} + \frac{1}{R_p} \right) - h_{rb} h_{fb}} \quad (26)$$

Zbog odnosa  $1/R_p \gg h_{ob}$  i  $h_{ib}/R_p \gg h_{rb}h_{fb}$ , za  $A_v$  može se približno pisati:

$$A_v = -h_{fb} \cdot \frac{R_p}{h_{ib}} \approx \frac{R_p}{h_{ib}} \quad (27)$$

■ Izlazni otpor:

$$R_{iz} = \frac{1}{h_{ob} - \frac{h_{rb}h_{fb}}{R'_g + h_{ib}}} \quad (28)$$

- Osnovne karakteristike pojačala u spoju zajedničke baze:
  1. U području relativno niskih frekvencija **strujno pojačanje je**, uz realno trošilo, **pozitivan broj iznosa blizu jedinice**, osim kod vrlo visokih iznosa otpora trošila. Ako je ispunjen uvjet  $h_{ob}R_p < 0,1$ , tada je strujno pojačanje  $A_i \approx 1$ , dakle neovisno o otporu trošila. Ta činjenica ukazuje na mogućnost primjene ovog sklopa kao praktički idealnoga zavisnog strujnog izvora upravljanog ulaznim strujnim generatorom.
  2. **Naponsko pojačanje je**, uz realno trošilo, **pozitivan broj veći od jedinice**, osim kod sasvim malih iznosa otpora trošila. S porastom otpora trošila naponsko pojačanje raste i kada  $R_p \rightarrow \infty$  prema relaciji (26) teži iznosu:

$$A_v = - \frac{h_{fb}}{h_{ib}h_{ob} - h_{rb}h_{fb}} \quad (29)$$

3. Ulazni otpor, prema relaciji (24), ima vrijednost  $h_{ib}$  kod niskih iznosa otpora trošila. Porastom otpora trošila ulazni otpor raste težeći prema iznosu

$$R_{ul} = h_{ib} - \frac{h_{rb} h_{fb}}{h_{ob}} \quad (30)$$

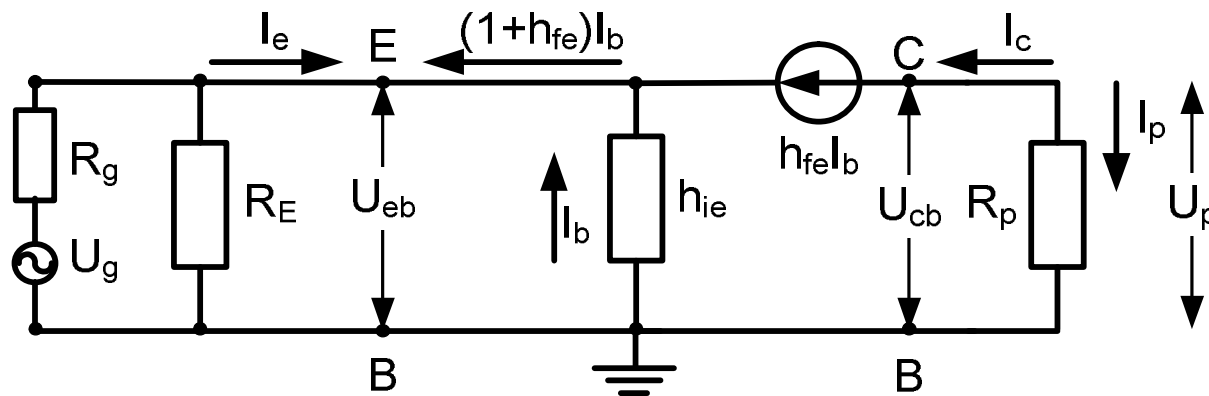
kada  $R_p \rightarrow \infty$ .

Po iznosu je ulazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze manji nego kod pojačala u spoju zajedničkog emitera i dok ulazni otpor pojačala u spoju zajedničkog emitera opada s otporom trošila, ulazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze raste s otporom trošila.

4. Izlazni otpor pojačala u spoju zajedničke baze veći je nego kod pojačala u spoju zajedničkog emitera i raste s porastom unutrašnjeg otpora generatora signala na ulazu sklopa.

# Pojednostavnjeni prikaz pojačala u spoju zajedničke baze

- Ako se za spoj zajedničke baze primijeni, radi jednostavnosti, idealizirani hibridni nadomjesni sklop tranzistora u spoju zajedničkog emitera, dobiva se idealizirani nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničke baze:





- **Strujno pojačanje** prema sklopu na slici približno iznosi:

$$A_i = \frac{I_p}{I_e} \approx \frac{-h_{fe} I_b}{-(1 + h_{fe}) I_b} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \quad (31)$$

Hibridni parametar  $h_{fb}$  za spoj zajedničke baze definiran je kao:

$$h_{fb} = \left. \frac{I_c}{I_e} \right|_{U_{cb}=0} \quad (32)$$

Prema slici i definiciji (32)  $h_{fb}$  iznosi:

$$h_{fb} = \frac{h_{fe} I_b}{-(1 + h_{fe}) I_b} = \frac{h_{fe}}{1 + h_{fe}} \quad (33)$$

Iz relacija (31) i (33) slijedi jednostavan (približan) izraz za strujno pojačanje za spoj zajedničke baze

$$A_i = -h_{fb} \quad (34)$$

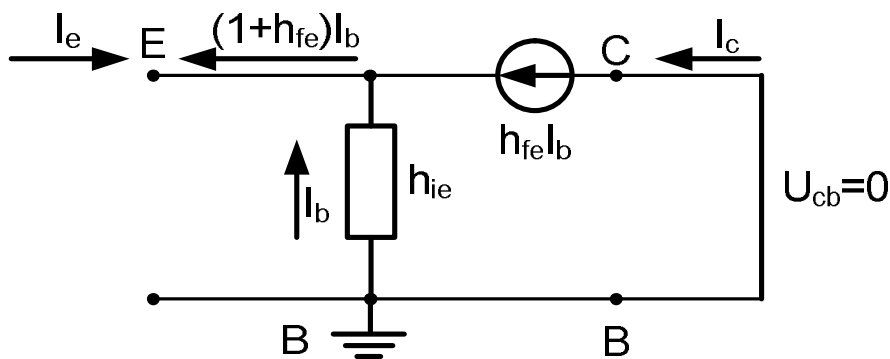
## ■ Ulazni otpor:

$$R_{ul} = \frac{U_{eb}}{I_e} = \frac{-I_b h_{ie}}{-(1 + h_{fe})I_b} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \quad (35)$$

Hibridni parametar  $h_{ib}$  za spoj zajedničke baze je po definiciji:

$$h_{ib} = \left. \frac{U_{eb}}{I_e} \right|_{U_{cb}=0} \quad (36)$$

Primjenom definicije (36) na shemu dobiva se izraz za  $h_{ib}$  preko parametara  $h_{ie}$  i  $h_{fe}$ :



$$h_{ib} = \frac{-h_{ie} I_b}{-(1 + h_{fe})I_b} = \frac{h_{ie}}{1 + h_{fe}} \quad (37)$$

## ■ Naponsko pojačanje:

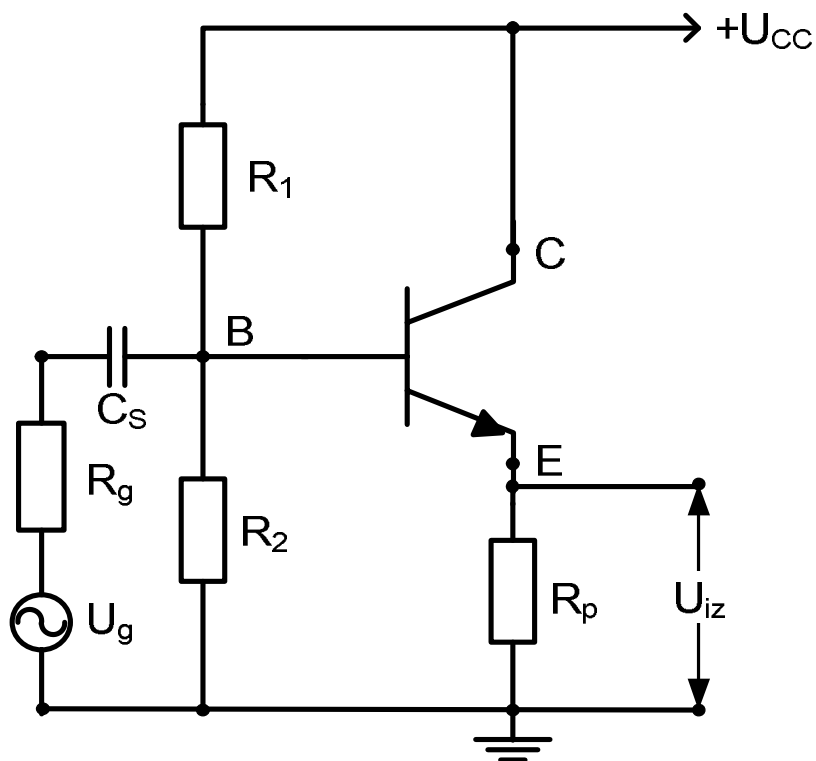
$$A_v = \frac{U_p}{U_{eb}} = \frac{I_p R_p}{-I_b h_{ie}} = \frac{-h_{fe} I_b R_p}{-I_b h_{ie}} = \frac{h_{fe}}{h_{ie}} R_p \quad (38)$$

- Približne relacije (33) i (37) povezuju hibridne parametre spoja zajedničke baze  $h_{fb}$  i  $h_{ib}$  s hibridnim parametrima spoja zajedničkog emitera  $h_{fe}$  i  $h_{ie}$ , te se nazivaju **relacije konverzije ili pretvorbe**. Osim za navedene parametre postoje relacije i za ostale hibridne parametre. Relacije konverzije su obično prikazane u tablicama i to za sva tri spoja rada tranzistora: zajednički emiter (ZE), zajednička baza (ZB) i zajednički kolektor (ZC).



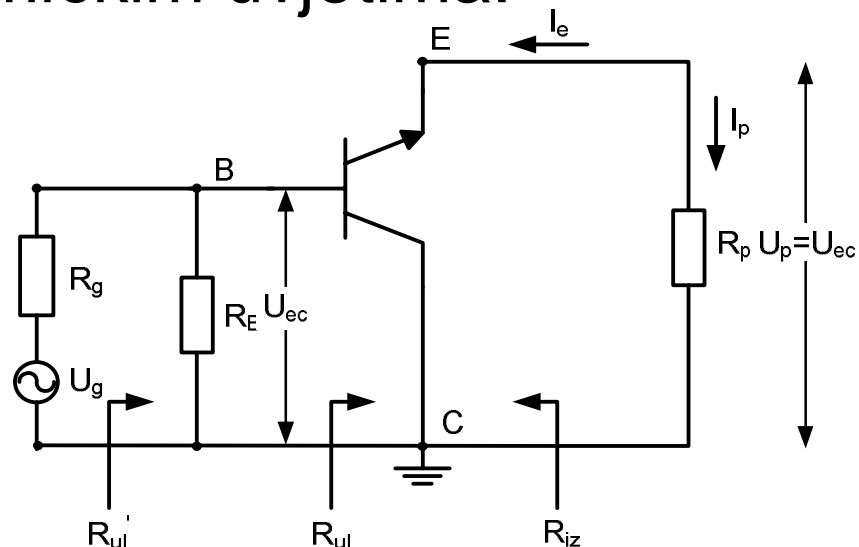
# Pojačalo u spoju zajedničkog kolektora (emitorsko sljedilo)

- Tipična izvedba pojačala u spoju zajedničkog kolektora:

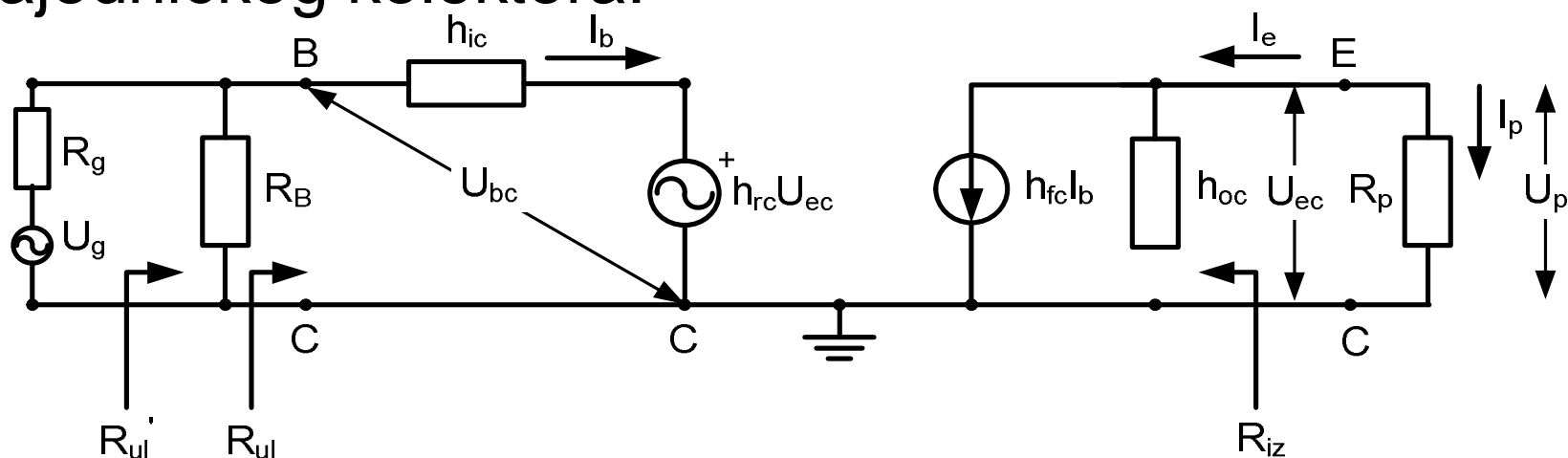


Trošilo se nalazi u krugu emitera, dok je kolektor izravno spojen na kolektorsku bateriju  $U_{CC}$  i time uzemljen za izmjenični signal. Naponsko djelilo  $R_1$ - $R_2$  osigurava određenu struju baze u tranzistoru. U dinamičkim uvjetima ta dva otpornika spojena su paralelno.

## ■ Pojačalo u dinamičkim uvjetima:



## ■ Zamjenom tranzistora s njegovim hibridnim modelom za spoj zajedničkog kolektora:



## ■ Strujno pojačanje:

$$A_i = \frac{I_p}{I_b} = -\frac{I_e}{I_b} = \frac{-h_{fc}}{1 + h_{oc}R_p} \quad (39)$$

Ako je ispunjen uvjet  $h_{oc}R_p < 0,1$ , strujno pojačanje približno iznosi  $-h_{fc}$ . Prema relacijama konverzije parametri za zajednički kolektor mogu se zamijeniti parametrima za zajednički emiter pa izraz za strujno pojačanje ima oblik:

$$A_i = \frac{1 + h_{fe}}{1 + h_{oc}R_p} \quad (40)$$

Dakle, uz uvjet  $h_{oc}R_p < 0,1$

$$A_i = 1 + h_{fe} \quad (41)$$

- U izrazima (40) i (41) su prema relacijama konverzije uvršteni hibridni parametri za zajednički emiter:

$$\begin{aligned} h_{fc} &= -(1 + h_{fe}) \\ h_{oc} &= h_{oe} \end{aligned} \quad (42)$$

- **Strujno pojačanje** pojačala u spoju zajedničkog kolektora **je pozitivno i redovito puno veće od jedinice.**

- **Ulazni otpor:**

$$R_{ul} = \frac{U_{bc}}{I_b} = h_{ic} + h_{rc} A_i R_p \quad (43)$$

ili ako se preko relacija konverzije uvrste hibridni parametri za zajednički emiter:

$$h_{ic} = h_{ie} \quad ; \quad h_{rc} = 1 - h_{re} \quad (44)$$

$$R_{ul} = h_{ie} + (1 - h_{re}) \frac{1 + h_{fe}}{1 + h_{oe} R_p} \cdot R_p \quad (45)$$

- Budući da je  $h_{re} \ll 1$  i  $h_{oe} R_p < 0,1$ :

$$R_{ul} = h_{ie} + (1 + h_{fe}) \cdot R_p \quad (46)$$

Ulazni otpor pojačala u spoju zajedničkog kolektora je prema relaciji (46) velik, i to prije svega zbog člana  $(1 + h_{fe}) R_p$ . Ako je npr.  $H_{fe} = 99$  i  $R_p = 2 \text{ k}\Omega$ ,  $R_{ul}$  će iznositi 200 k $\Omega$  uz zanemarenje otpora  $h_{ie}$  koji npr. može imati vrijednost oko 1 k $\Omega$ .

- **Naponsko pojačanje:**

$$A_v = \frac{U_p}{U_{bc}} = \frac{U_{ec}}{U_{bc}} = - \frac{h_{fc}}{h_{ic} \left( h_{oc} + \frac{1}{R_p} \right) - h_{rc} h_{fc}} = \frac{1 + h_{fe}}{h_{ie} \left( h_{oe} + \frac{1}{R_p} \right) + (1 - h_{re})(1 + h_{fe})} \quad (47)$$



- Ako je  $h_{oe}R_p < 0,1$  te uz  $h_{re} \ll 1$ ,

$$A_v \approx \frac{1}{1 + \frac{h_{ie}}{(1 + h_{fe})R_p}} \quad (48)$$

Otpor  $R_p$  je obično istog reda veličine kao i  $h_{ie}$ , te je redovito  $h_{fe} \gg 1$ , stoga je prema relaciji (48) **naponsko pojačanje pojačala u spoju zajedničkog kolektora pozitivno i tek neznatno manje od jedinice**.

To znači da svaka promjena napona na bazi izaziva praktički jednaku promjenu napona na emiteru, tj. da emitterski napon slijedi bazni. Zato se pojačalo u spoju zajedničkog kolektora zove i **emitorsko sljedilo**.

## ■ Izlazni otpor:

$$R_{iz} = \frac{1}{h_{oc} - \frac{h_{rc} h_{fc}}{R_g' + h_{ie}}} = \frac{1}{h_{oe} + \frac{(1 - h_{re})(1 + h_{fe})}{R_g' + h_{ie}}} \quad (49)$$

gdje je  $R_g' = R_g || R_B$ .

- Budući da je  $h_{re} \ll 1$  i da je drugi član u izrazu (49) u nazivniku puno veći od prvog člana, za izlazni otpor može se pisati:

$$R_{iz} \approx \frac{R_g' + h_{ie}}{1 + h_{fe}} \quad (50)$$

## ■ Osnovne karakteristike pojačala:

1. U području relativno niskih frekvencija strujno pojačanje je, uz realno trošilo, pozitivan broj veći od jedinice.
2. Naponsko pojačanje je, uz realno trošilo, pozitivno i blizu jedinici, ali uvijek manje od jedinice.
3. Ulazni otpor je velik i znatno veći od ulaznog otpora za spoj zajedničkog emitera i zajedničke baze.
4. Izlazni otpor je mali, manji nego kod pojačala sa zajedničkim emiterom i zajedničkom bazom.

