



ELEKTRONIKA

Predavanje 10 POJAČALA S TRANZISTORIMA STATIČKI UVJETI RADA

Pojačala s tranzistorima

- Pojačalo – linearni elektronički sklop za pojačavanje električnih signala (strujnih i/ili naponskih).
- Pojačalo sadrži aktivne i pasivne komponente, linearne disipativne i reaktivne komponente.
- Efekt pojačanja signala u pojačalu posljedica je djelovanja aktivnih elektroničkih komponenata kao što su **bipolarni i unipolarni tranzistori**.
- Za ispravan rad aktivnih elektroničkih komponenata u pojačalu potrebno je svaku od tih komponenata dovesti u **odgovarajuće radno područje** (u kojem je moguće pojačavačko djelovanje) primjenom istosmjernog napona i struje – istosmjerno napajanje.
- Istosmjerni ili statički uvjeti rada predstavljaju skup istosmjernih veličina (struje i naponi) koji definiraju radno područje aktivne elektroničke komponente.
- **Radno područje (uvjetovano statičkim uvjetima) definira karakteristike i parametre aktivne komponente u dinamičkim (izmjeničnim) uvjetima rada.**



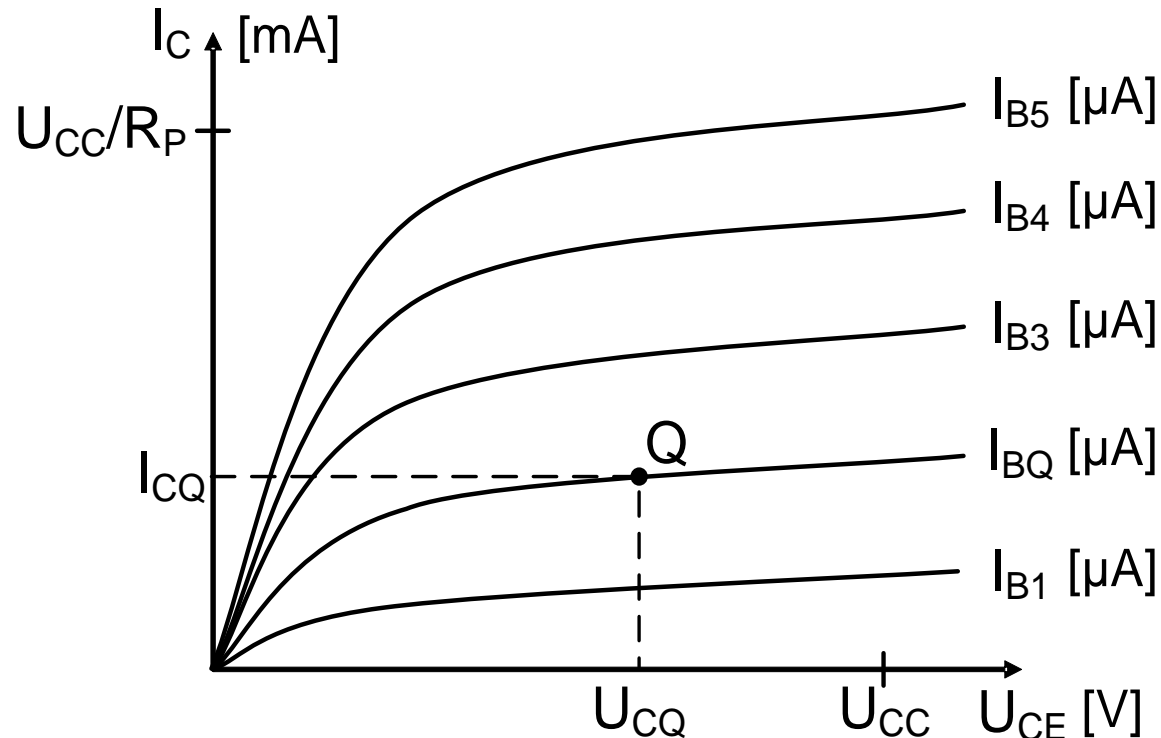
Pojačala s bipolarnim tranzistorom (1)

- Bipolarni tranzistor sastoji se od dva pn-spoja:
 - Spoj emiter-baza (E-B)
 - Spoj kolektor-baza (C-B)
- Svaki pn-spoj može se propusno i nepropusno polarizirati što primijenjeno na bipolarni tranzistor rezultira s četiri područja rada bipolarnog tranzistora:
 - 1) **Normalno aktivno područje** se koristi kad tranzistor radi kao pojačalo. Spoj E-B je propusno polariziran, spoj C-B je nepropusno polariziran
 - 2) Inverzno aktivno područje
 - 3) Područje zasićenja
 - 4) Područje zapiranja
- **Postavljanje statičkih uvjeta bipolarnog tranzistora podrazumijeva polarizaciju pn spojeva E-B i C-B korištenjem istosmjernog izvora napajanja!!!!**
- Skup vrijednosti istosmjernih veličina definira točno određenu točku unutar radnog područja u kojoj tranzistor radi – **statička radna točka Q.**



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (2)

- Statička radna točka bipolarnog tranzistora Q određuje se u izlaznim karakteristikama tranzistora, a definirana je s tri veličine: I_{BQ} , I_{CQ} , U_{CEQ} .

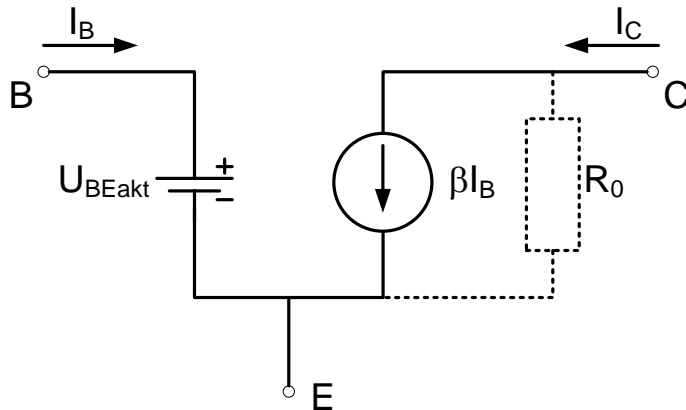


- Idealan položaj statičke radne točke: $U_{CEQ} = U_{CC}/2!!!!$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (3)

- Model bipolarnog npn tranzistora u istosmjernim uvjetima (spoj ZE):
- Aktivno područje:



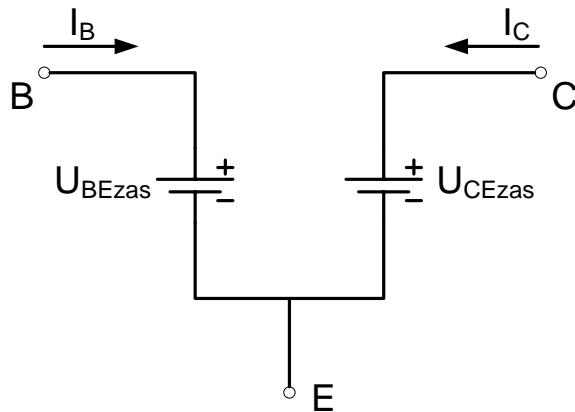
$R_0 \gg$

$U_{BEakt} = 0,7 \text{ V}$
(za silicijski tranzistor)

$$I_C = \beta \cdot I_B + (\beta + 1) \cdot I_{CB0}$$

$$I_C \approx \beta \cdot I_B$$

- Područje zasićenja:



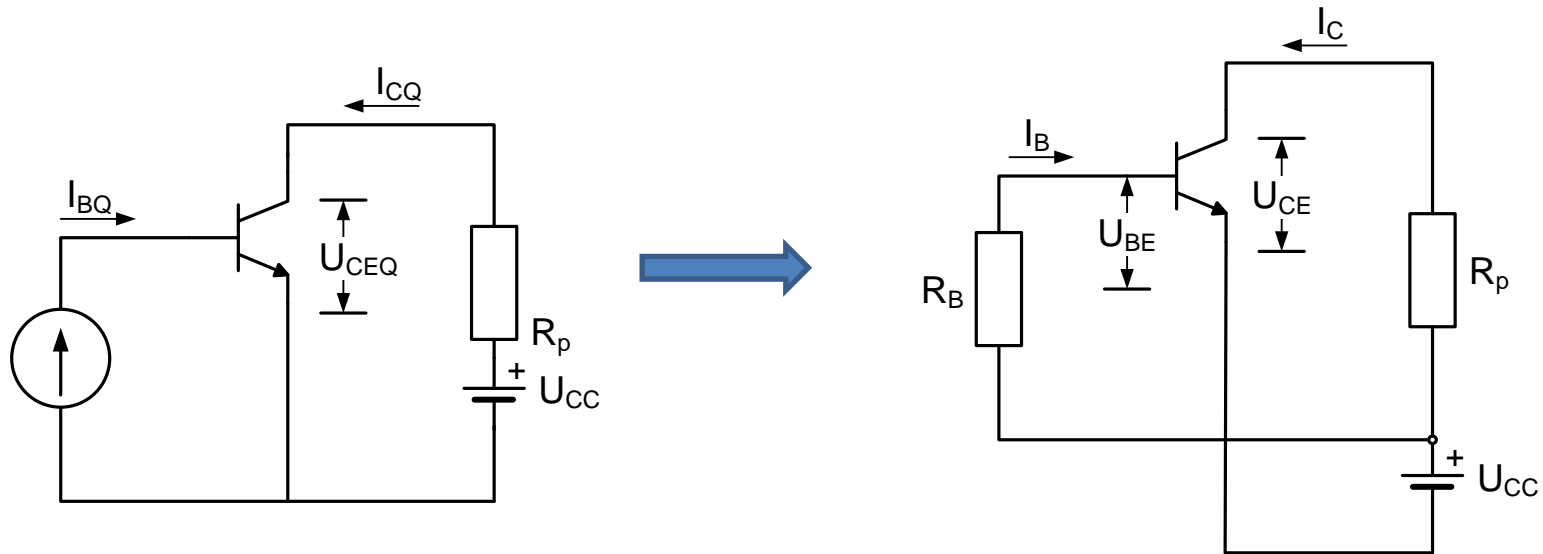
$U_{BEzas} = 0,8 \text{ V}$

$U_{CEzas} = 0,2 \text{ V} - 0,3 \text{ V}$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (4)

- Da bi se osigurali statički uvjeti potrebno je osigurati struju baze I_B u ulaznom krugu (strujni generator) odnosno struju kolektora I_C i napon U_{CE} u izlaznom krugu (kolektorska baterija U_{CC}).
- Ako je ulazni otpor tranzistora puno manji od R_B tada se strujni generator u ulaznom krugu može izvesti iz kolektorske baterije.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (5)

- Statički uvjeti rada u promatranom sklopu definirani su sljedećim izrazima:

$$U_{CC} = U_{CE} + I_C R_P \quad (1)$$

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B} \quad (2)$$

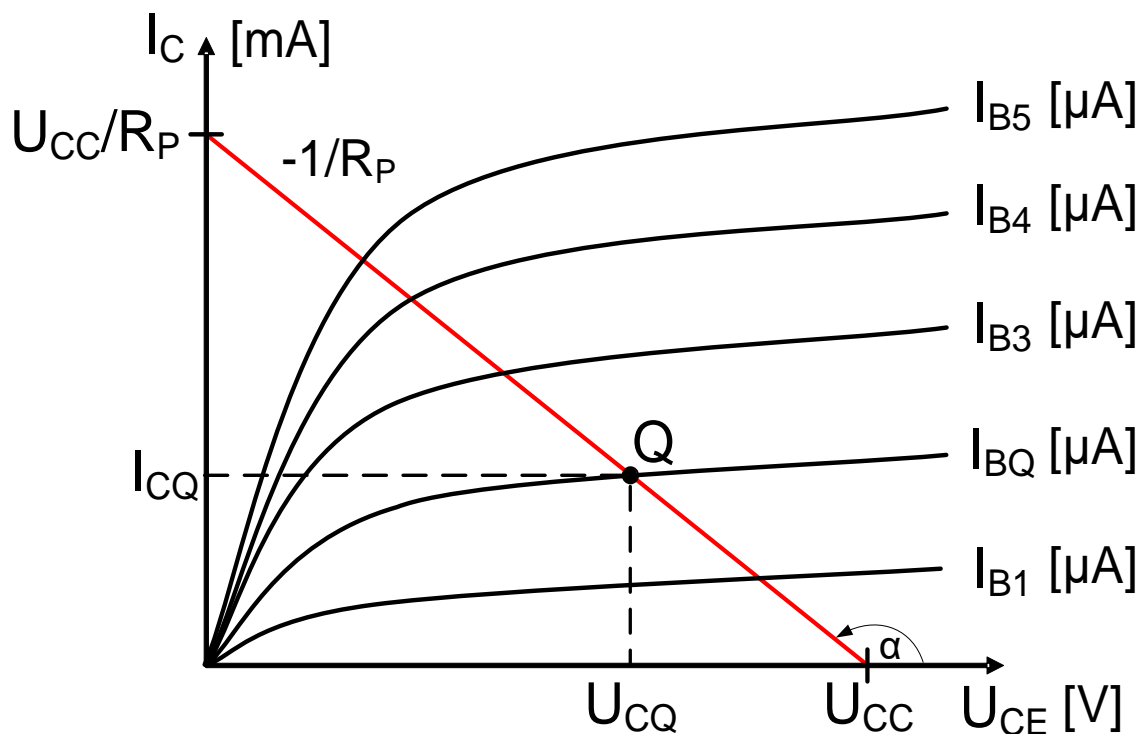
$$I_C = \beta I_B \quad (3)$$

- Jednadžba (1) predstavlja jednadžbu izlaznog kruga i određuje položaj statičkog radnog pravca u izlaznim karakteristikama tranzistora.
 - Odsječak na apscisi: U_{CC} (za $I_C=0$)
 - Odsječak na ordinati: U_{CC}/R_P (za $U_{CE}=0$)
 - Nagib radnog pravca: $tg\alpha=-1/R_P$
- Jednadžba (2) predstavlja jednadžbu ulaznog kruga i određuje struju baze.
- Izraz (3) povezuje veličinu izlaznog kruga I_C i veličinu u ulaznom krugu I_B .



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (6)

- Određivanje statičke radne točke:
- Presjecište statičkog radnog pravca i izlazne karakteristike za iznos struje baze određene izrazom (2) određuje položaj statičke radne točke:



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (7)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Prilikom izbora položaja statičke radne točke potrebno je voditi računa o većem broju faktora kao što su:
 - Toplinska stabilnost sklopa
 - Osiguranje linearnog režima rada
 - Što niži stupanj izobličenja pojačanog signala
 - Stabilnost dinamičkih karakteristika tranzistora pri zamjeni tranzistora
 - Promjena temperature okoline
 - Pojava zračenja itd...
- Najčešći slučaj je promjena temperature zbog čega se izbor položaja statičke radne točke provodi tako da se osigura temperaturna stabilnost u radu sklopa.
- Temperatura tranzistora određena je temperaturom okolnog prostora i snagom disipiranom na tranzistoru zbog protjecanja struje kroz tranzistor.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (8)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Zbog disipacije snage izazvane protjecanjem struje kroz tranzistor temperatura tranzistora raste iznad temperature okolnog prostora.
- Porast temperature tranzistora iznad temperature okoline može se aproksimirati zakonom:

$$\Delta T = T_T - T_0 = KU_{CE}I_C = KP_C$$

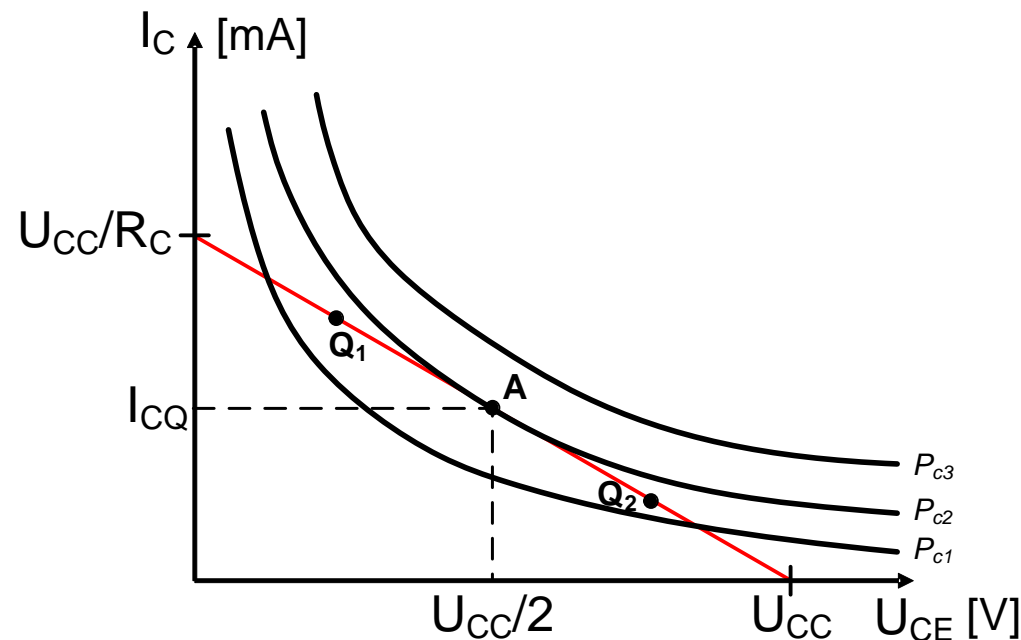
gdje je T_T – temperatura tranzistora, T_0 temperatura okoline, K toplinski otpor između tranzistora i okoline, a P_C snaga kolektorskih gubitaka koja ima oblik hiperbole.

- Toplinski otpor izražava se u $^{\circ}\text{C}/\text{W}$ i obično se kreće u granicama od 1 do $1000^{\circ}\text{C}/\text{W}$.
- Što je toplinski otpor manji, kod zadane snage kolektorskih gubitaka, porast temperature tranzistora iznad temperature okolnog prostora će biti manji.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (9)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Tranzistori koji disipiraju veliku snagu izvode se tako da toplinski otpor između silicijeve pločice s difundiranim tranzistorom i okolnog prostora bude što manji kako bi se toplina nastala disipacijom efikasnije odvodila.
- Utjecaj položaja statičke radne točke na zagrijavanje tranzistora može se ilustrirati sljedećom slikom:



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (10)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Ako se radna točka nalazi u položaju Q_1 (iznad točke A), tada će porast struje kolektora izazvan porastom temperature ili nekim drugim utjecajem seliti radnu točku u smjeru od hiperbole konstantnih kolektorskih gubitaka P_{C2} prema hiperboli konstantnih kolektorskih gubitaka $P_{C1} < P_{C2}$ što znači da porast struje kolektora vodi prema sniženju kolektorskih gubitaka.
- Ako se radna točka nalazi u položaju Q_2 (ispod točke A), tada će porast struje kolektora seliti radnu točku u smjeru od hiperbole konstantnih kolektorskih gubitaka P_{C1} prema hiperboli konstantnih kolektorskih gubitaka $P_{C2} > P_{C1}$ što znači da porast struje kolektora izaziva daljnje zagrijavanje tranzistora.
- Posebno opasan slučaj je ako radna točka dođe u područje iznad hiperbole maksimalnih dozvoljenih gubitaka u tranzistoru P_{CM} .
- Pojava kumulativnog zagrijavanja tranzistora naziva se **toplinski bijeg** (engl. thermal runaway).



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (11)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Nagib hiperbole u bilo kojoj točki je:

$$\frac{dI_C}{dU_{CE}} = \frac{d}{dU_{CE}} \left(\frac{P_C}{U_{CE}} \right) = -\frac{P_C}{U_{CE}^2} = -\frac{I_C}{U_{CE}}$$

- Uz poznati nagib statičkog radnog pravca $-1/R_p$, da bi pravac tangirao hiperbolu u statičkoj radnoj točki mora vrijediti:

$$-\frac{I_C}{U_{CE}} = -\frac{1}{R_p},$$

odnosno:

$$I_C = \frac{U_{CE}}{R_p}$$

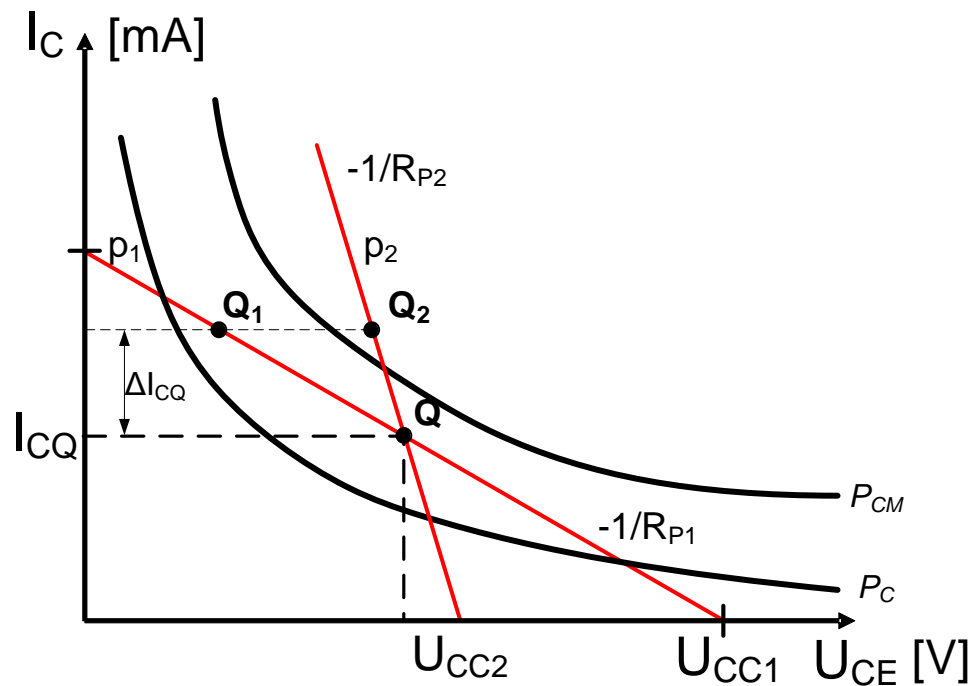
- Uvrštavanjem u jednadžbu izlaznog kruga (1) dobije se za radnu točku optimalni iznos napona:

$$U_{CE} = \frac{U_{CC}}{2}$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (12)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Prethodna analiza pokazuje da je idealan položaj statičke radne točke na polovini napona napajanja, a kako bi se izbjegla pojava toplinskog bijega uzima se: $U_{CE} < U_{CC}/2$.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (13)

- Izbor položaja statičke radne točke:
- Pravac p_1 određen je naponom kolektorske baterije U_{CC1} i otporom potrošača R_{p1} , a pravac p_2 naponom kolektorske baterije U_{CC2} i otporom potrošača R_{p2} , pri čemu vrijedi da je $R_{p2} < R_{p1}$.
- Statička radna točka Q putuje po pravcu p_1 u položaj Q_1 kojem odgovaraju manji kolektorski gubici nego u položaju Q, dok po pravcu p_2 putuje u položaj Q_2 kojem odgovaraju kolektorski gubici veći od maksimalno dozvoljenih.
- Dakle, uz mali otpor za istosmjernu struju u krugu kolektora vrlo lako dolazi do opasnosti toplinskog bijega.
- Ovaj slučaj posebno je izražen kod sklopova kod kojih se u krugu kolektora umjesto otpornika nalaze zavojnice, primari transformatora i slične komponente čiji je otpor za istosmjernu struju jako mali.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (14)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Dinamička svojstva pojačala (strujno i naponsko pojačanje) u području relativno niskih frekvencija ovise o hibridnim parametrima koji ovise o položaju statičke radne točke u polju izlaznih karakteristika.
- Da bi dinamičke karakteristike pojačala bile stabilne potrebno je osigurati stabilan položaj statičke radne točke.
- Struja baze za slučaj visokoomskog otpornika u bazi R_B određena je izrazom:

$$I_B = \frac{U_{CC} - U_{BE}}{R_B}$$

- Budući je kod silicijevih tranzistora u normalnom aktivnom području $U_{BEQ}=0,7$ V i budući redovito vrijedi $U_{CC} \gg U_{BEQ}$, jasno je da je struja I_B praktički konstantna i ne ovisi o svojstvima tranzistora.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (15)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- U normalnom aktivnom području rada struja kolektora određena je izrazom:

$$I_C = \beta I_B + I_{CE0}$$

gdje je: $\beta = h_{FE} \approx h_{fe}$ istosmjerni faktor strujnog pojačanja u spoju zajedničkog emitera, a I_{CE0} reverzna struja zasićenja pn spoja baza-kolektor uz $I_B = 0$.

- Struja kolektora u statičkoj radnoj točki I_{CQ} definirana je izrazom:

$$I_C = \beta \frac{U_{CC}}{R_B} - \beta \frac{U_{BE}}{R_B} + I_{CE0}$$

- Struja kolektora ovisi o tri parametra tranzistora: β , U_{BEQ} i I_{CE0} .
- ***Promjena bilo kojeg od navedenih parametara uzrokuje pomak radne točke u blizinu područja zasićenja ili zapornog područja gdje dolazi do značajnijeg izobličenja izmjeničnog signala!!!***



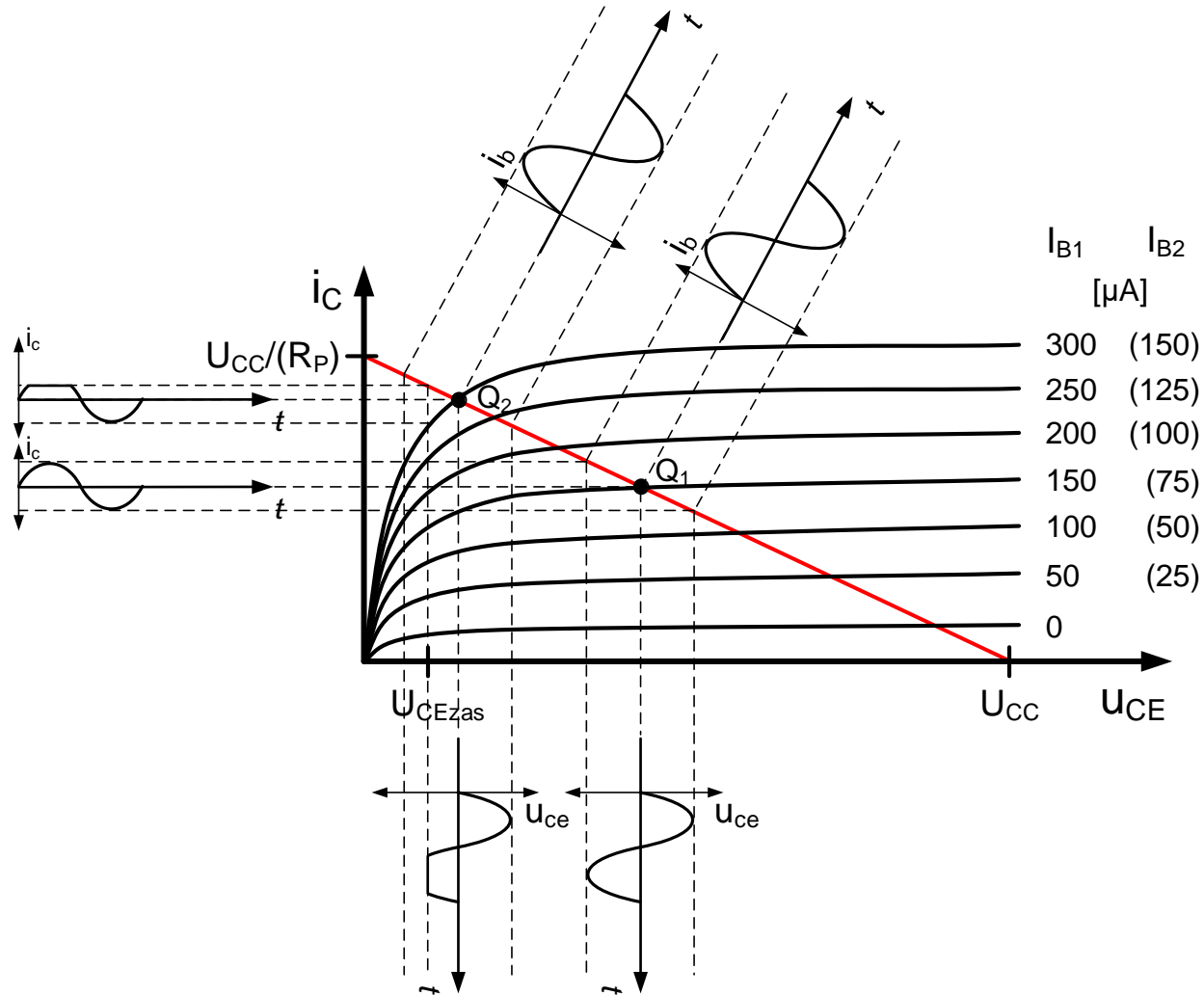
Pojačala s bipolarnim tranzistorom (16)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Jedan od mogućih uzroka promjene parametra β je njegov iznos koji se u masovnoj proizvodnji razlikuje kod tranzistora iste serije (u rasponu od 100 do 300).
- To znači da će se u identičnim sklopovima koristiti tranzistori s različitim faktorom strujnog pojačanja β .
- Budući je struja baze I_B neovisna o iznosu strujnog pojačanja svi tranzistori u identičnim sklopovima imat će istu struju baze.
- Struja kolektora u statičkoj radnoj točki I_{CQ} razlikovat će se od sklopa do sklopa u skladu s iznosima faktora strujnog pojačanja β .
- Posljedice ove pojave prikazane su na sljedećoj slici gdje su prikazane izlazne karakteristike dvaju tranzistora istog tipa pri čemu je za istu struju kolektora drugom tranzistoru potrebna upola manja struja baze (dva puta veći faktor strujnog pojačanja).



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (17)

- Stabilnost karakteristika pojačala:



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (18)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Pod pretpostavkom da je sklop u oba slučaja napajan istosmjernom strujom baze od $150\text{ }\mu\text{A}$ statička radna točka prvog tranzistora je Q_1 , a drugog Q_2 .
- Budući statička radna točka Q_1 leži otprilike na sredini normalnog aktivnog područja sinusna struja baze i_b koja ispunjava uvjete za rad u režimu malih signala generira sinusnu struju i_c u krugu kolektora i sinusni napon u_{ce} između kolektora i emitera.
- Kod drugog tranzistora s dvostruko većim faktorom strujnog pojačanja β , statička radna točka Q_2 uz isti iznos struje baze kao i u prethodnom slučaju leži blizu granice između normalnog aktivnog područja i područja zasićenja.
- Ovakav položaj statičke radne dovodi do toga da pozitivni prirast struje baze tjera tranzistor u zasićenje pri čemu izlazne veličine i_c i u_{ce} ne prate oblikom ulaznu veličinu i_b što rezultira visokim stupnjem izobličenja struje i_c i napona u_{ce} .



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (19)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Ako bi se upotrijebio tranzistor s još većim faktorom strujnog pojačanja β , statička radna točka bi otišla duboko u područje zasićenja i izmjenična struja baze male amplitude ne bi mogla generirati izmjeničnu komponentu struje kolektora i napona između kolektora i emitera jer bi za vrijeme obje poluperiode tranzistor ostao u području zasićenja.
- U tom slučaju tranzistor degenerira u dvije propusno polarizirane diode gubeći svojstvo pojačavanja električnih signala.
- Ako bi se u istom sklopu upotrijebio tranzistor istog tipa, ali s malim iznosom faktora strujnog pojačanja β , tada bi statička radna točka Q uz isti iznos struje baze I_{BQ} kao u prethodnim slučajevima ležala na statičkom radnom pravcu niže od točke Q_1 , u blizini zapornog područja.
- Tijekom negativne poluperiode struje baze i_b statička radna točka bi otišla u zaporno područje što bi uzrokovalo izobličenja struje kolektora i_c i napona između kolektora i emitera u_{ce} .



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (20)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Iz prethodne analize jasno je da je navedeni sklop nepouzdan u serijskoj proizvodnji jer će zbog rasipanja iznosa faktora strujnog pojačanja β postojati rasipanje istosmjerne struje kolektora I_{CQ} u statičkoj radnoj točki.
- Rasipanje istosmjerne struje kolektora istovremeno znači i rasipanje hibridnih parametara te rasipanje strujnog i naponskog pojačanja kao i ulaznog i izlaznog otpora sklopa.
- U ekstremnim slučajevima doći će do bijega statičke radne točke u područje zasićenja ili u blizinu područja zapiranja gdje su izobličenja signala toliko velika da se sklop ne može koristiti kao pojačalo.
- Do sličnog efekta kao zbog rasipanja faktora β dovodi i temperaturna ovisnost ovog parametra.
- Pri porastu temperature dolazi do smanjenja rekombinacije u bazi tranzistora, čime se povećava transportni faktor baze odnosno faktor β .



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (21)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Budući s porastom temperature raste β , uz napajanje konstantnom strujom baze I_{BQ} , statička radna točka će po statičkom radnom pravcu putovati prema području zasićenja na isti način kao i u slučaju rasipanja iznosa faktora β .
- Porast temperature djeluje na veličine U_{BEQ} i I_{CE0} pri čemu napon U_{BEQ} uz konstantnu struju I_{BQ} opada s porastom temperature.
- Temperaturni koeficijent napona U_{BEQ} je negativan i tipično iznosi:

$$\left. \frac{\Delta U_{BEQ}}{\Delta T} \right|_{I_{BQ}} = [-1,5 \text{ } -2,5] \frac{mV}{^{\circ}C}$$

- Pritom, višim iznosima struje baze odgovaraju niži apsolutni iznosi temperaturnog koeficijenta napona.
- Porast temperature dovodi do porasta struje I_{BQ} , međutim kako je U_{CC} puno veći od U_{BEQ} temperaturna ovisnost struje baze I_{BQ} neće doći do većeg izražaja.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (22)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- U izrazu za struju kolektora I_{CQ} član $\beta U_{BEQ}/R_B$ osjetno je manji po iznosu od prvog člana $\beta U_{CC}/R_B$ te imanji manji utjecaj na iznos struje I_{CQ} .
- Osim toga, prvi član raste s temperaturom jednako brzo kao faktor strujnog pojačanja β , dok drugi član znatno manje ovisi o temperaturi jer porast faktora strujnog pojačanja β prati pad napona U_{BEQ} s porastom temperature.
- Temperaturna ovisnost napona U_{BEQ} u ovom slučaju nema značajnijeg utjecaja na stabilnost statičke radne točke.
- Reverzna struja zasićenja I_{CEO} raste eksponencijalno s temperaturom, međutim zbog malog iznosa kod silicijskih tranzistora ova struja ne utječe značajnije na stabilnost statičke radne točke.
- Temperaturni koeficijenti:
 - Faktor strujnog pojačanja β : **pozitivan**,
 - Napon U_{BEQ} : **negativan**,
 - Struja I_{CBO} (I_{CEO}): **pozitivan**.



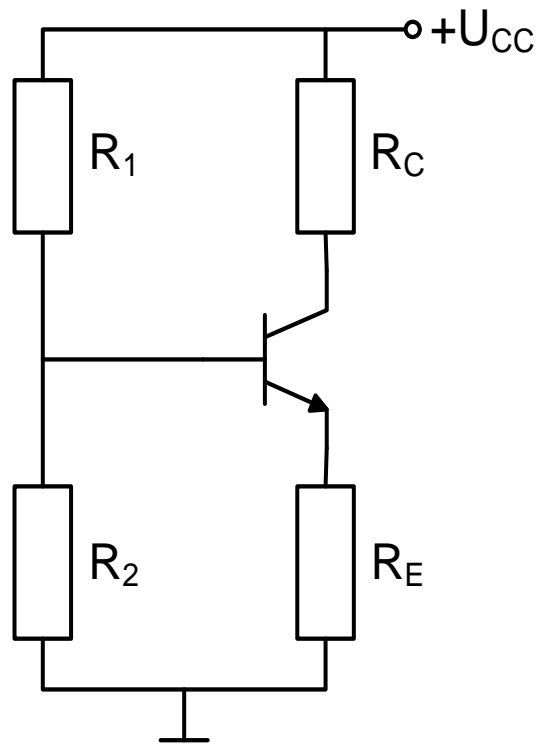
Pojačala s bipolarnim tranzistorom (23)

- Stabilnost karakteristika pojačala:
- Iz provedene analize slijedi da je razmatrani sklop jako ovisan rasipanju faktora strujnog pojačanja β i o temperaturi, prije svega zbog temperaturne ovisnosti faktora strujnog pojačanja β .
- Da bi sklop bio stabilniji i temperaturno manje osjetljiv potrebno je izvršiti stabilizaciju statičke radne točke, najčešće korištenjem dviju metoda odnosno tehnika stabilizacije statičke radne točke Q:
 - Stabilizacijska tehnika pomoću emitorske degeneracije.
 - Kompenzacijska tehnika.



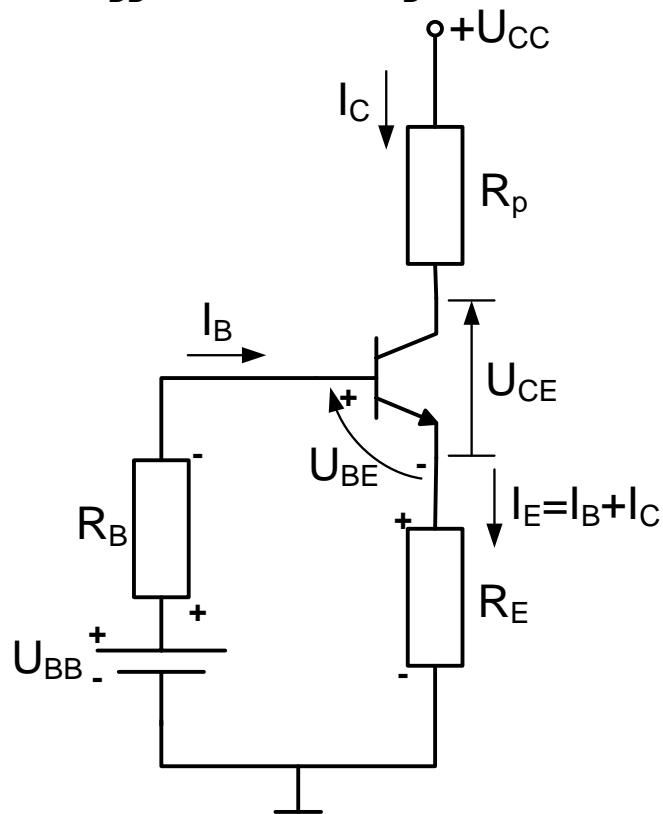
Pojačala s bipolarnim tranzistorom (24)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:
- Ako se visokoomski otpornik u bazi R_B zamijeni niskoomskim otpornim djeliteľem R_1 - R_2 , te otpor trošila R_p zamijeni s R_C tada se praktična izvedba pojačala u statičkim uvjetima rada može prikazati sljedećom slikom:



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (25)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:
- Transformacija niskoomskog djelitelja na bazi prema Theveninovu teoremu:
- Djelitelj napona u krugu baze R_1 - R_2 može se nadomjestiti izvorom i otporom (U_{BB} , odnosno R_B).



$$U_{BB} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot U_{CC}$$

$$R_B = \frac{R_1 \cdot R_2}{R_1 + R_2} = R_1 \parallel R_2$$

$$U_{BB} = I_B \cdot R_B + U_{BE} + (I_B + I_C) \cdot R_E \quad (1)$$

$$U_{CC} = I_C \cdot R_P + U_{CE} + (I_B + I_C) \cdot R_E \quad (2)$$

$$I_C = \beta I_B + (1 + \beta) I_{CB0} \quad (3)$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (26)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:
- Ukoliko faktor strujnog pojačanja nije poznat tada se izraz (3) koji povezuje struju baze i kolektora ne može iskoristiti u određivanju statičke radne točke, kao treća jednačba uzima se osnovna strujna jednačba tranzistora:

$$I_E = I_C + I_B$$

- Sada sustav jednačbi ima sljedeći oblik:

$$U_{BB} = I_B \cdot R_B + U_{BE} + (I_B + I_C) \cdot R_E \quad (1)$$

$$U_{CC} = I_C \cdot R_C + U_{CE} + (I_B + I_C) \cdot R_E \quad (2)$$

$$I_E = I_B + I_C \quad (3)$$

- Ako se iz jednačbe ulaznog kruga (1) izrazi struja kolektora dobije se:

$$I_C = \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} - I_B \left(\frac{R_B}{R_E} + 1 \right)$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (27)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:
- Uvrštavanjem izraza za struju kolektora u jednađbu izlaznog kruga (2) dobije se:

$$U_{CE} = U_{CC} - (U_{BB} - U_{BE}) \left(\frac{R_C}{R_E} + 1 \right) + I_B (R_B + R_E) \left(\frac{R_C}{R_E} + 1 \right) - I_B \cdot R_E$$

- Ukoliko su zadani sljedeći podaci: $U_{CC}=22,5 \text{ V}$, $R_C=5,6 \text{ k}\Omega$, $R_E=1 \text{ k}\Omega$, $R_1=90 \text{ k}\Omega$, $R_2=10 \text{ k}\Omega$, $U_{BE}=U_{BEakt}=0,6 \text{ V}$, njihovim uvrštavanjem u gornju jednađbu dobije se **prednaponska krivulja**:

$$U_{CE} = 65 \cdot 10^3 I_B + 11,6 \quad [\text{V}]$$

- Uvrštavanjem iznosa struje baze prikazanih u izlaznoj karakteristici $I_C=f(U_{CE})$ dobije se nekoliko točaka prednaponske krivulje prema tablici:



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (28)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:

$I_B [\mu A]$	15	30	45	60	75
$U_{CE} [V]$	12,58	13,55	14,53	15,50	16,48

- Zatim je u izlazne karakteristike potrebno ucrtati statički radni pravac određen jednađbom izlaznog kruga, (2) koja se zanemarivanjem struje baze odnosno uz aproksimaciju $I_C = I_E$ može prikazati kao:

$$U_{CC} = I_C \cdot (R_C + R_E) + U_{CE} \quad (2)$$

- Statički radni pravac je jednoznačno određen s dvije točke, npr:

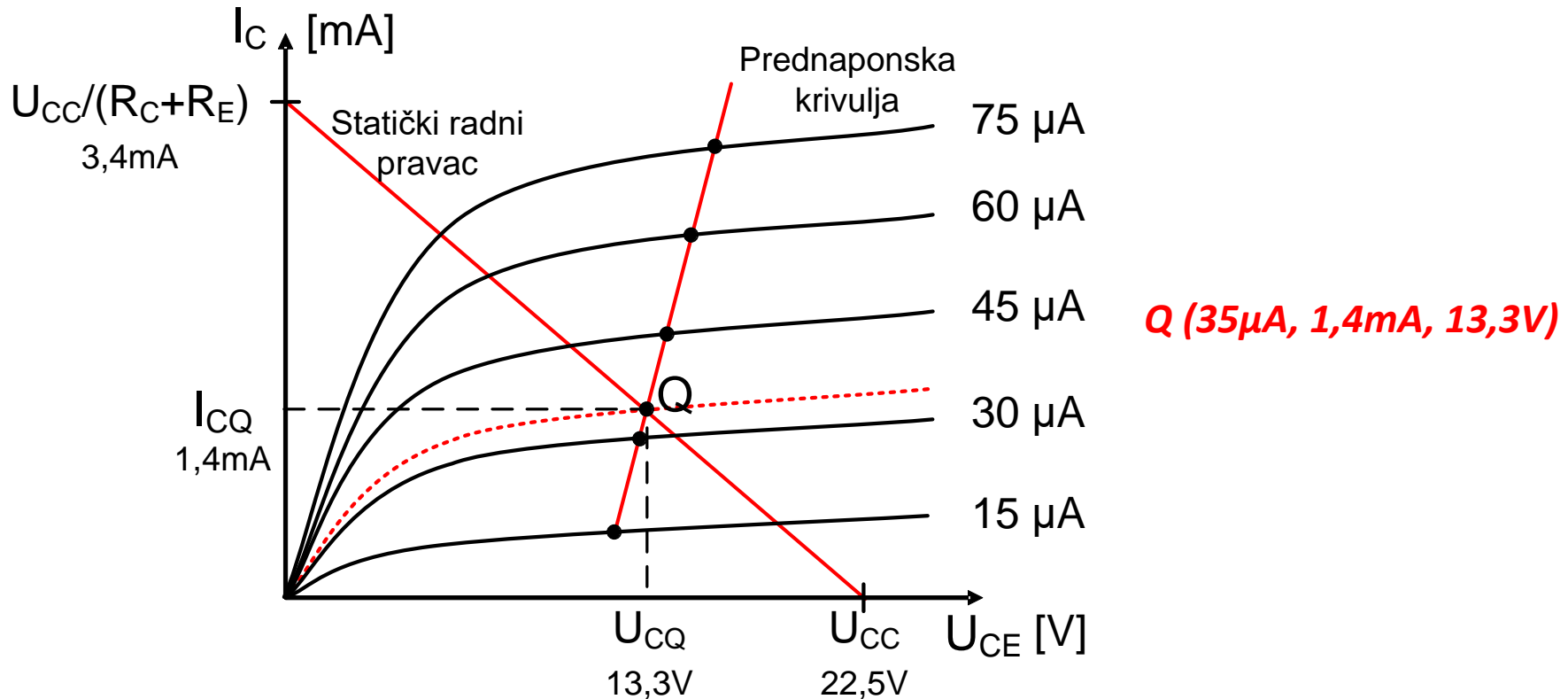
– Za $U_{CE}=0$;
$$I_C = \frac{U_{CC}}{R_C + R_E} = \frac{22,5V}{5,6k\Omega + 1k\Omega} = 3,4mA$$

– Za $I_C=0$;
$$U_{CE} = U_{CC} = 22,5V$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (29)

- Praktična izvedba pojačala s bipolarnim tranzistorom u statičkim uvjetima:

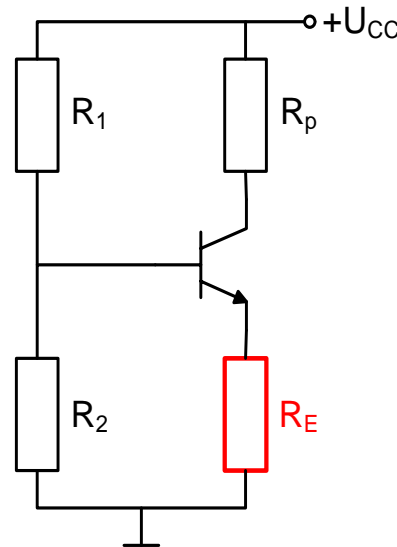


- Presjecište statičkog radnog pravca i prednaponske krivulje predstavlja statičku radnu točku!!!



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (30)

- Stabilizacija statičke radne točke pomoću emitterske degeneracije:
- Prikazani sklop je tipična izvedba kojom se osigurava temperaturna stabilnost statičke radne točke. Stabilnost se postiže otpornikom R_E u krugu emitera.



- U dinamičkim uvjetima rada otpornik R_E ima određeni negativni utjecaj (smanjuje iznos naponskog pojačanja) na pojačanje sklopa pa se ovakva stabilizacija radne točke naziva **stabilizacijom pomoću emitterske degeneracije**.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (31)

- Stabilizacija statičke radne točke pomoću emitterske degeneracije:
- Stabilizirajuće djelovanje otpornikom R_E u može se objasniti na sljedeći način:
 - Uz pretpostavku da je izmjenični signal u sklopu jednak nuli u sklopu postoje samo istosmjerne komponente napona i struja.
 - Ako se poveća istosmjerna komponenta struje kolektora I_C dolazi do porasta struje I_E jer je struja emitera zbroj struja I_B i I_C .
 - Porastom struje I_E raste pad napona na otporniku R_E odnosno raste istosmjerni potencijal emitera.
 - Porastom potencijala emitera smanjuje se napon propusne polarizacije emiter-baza te struja baze I_B opada.
 - Struja kolektora I_C proporcionalna je struji baze I_B što dovodi do smanjenja struje kolektora I_C čiji je porast uzrokovao neželjenu promjenu statičkih uvjeta.
- Simbolički zapisano: $I_C \nearrow I_E \nearrow U_{RE} \nearrow U_{BE} \searrow I_B \searrow I_C \searrow$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (32)

- Stabilizacija statičke radne točke pomoću emitorske degeneracije:
- Uvrštavanjem izraza za struju kolektora (3) u jednadžbu ulaznog kruga (1) dobije se:

$$I_C = \frac{\beta(U_{BB} - U_{BE}) + I_{CE0}(R_B + R_E)}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

- Ako je zadovoljen uvjet $(1 + \beta)R_E \gg R_B$ te ako je $\beta \gg 1$, tada se prethodni izraz reducira:

$$I_C \approx \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} + \frac{I_{CE0}}{1 + \beta} \left(1 + \frac{R_B}{R_E} \right)$$

- Budući da je kod silicijskih tranzistora $I_{CE0} \ll 0$, izraz za kolektorsku struju može se svesti na jednostavan oblik:

$$I_{CQ} \approx \frac{U_{BB} - U_{BEQ}}{R_E}$$

gdje je U_{BEQ} napon U_{BE} u radnoj točki Q.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (33)

- Stabilizacija statičke radne točke pomoću emitterske degeneracije:
- Ako se zanemari struja baze I_B odnosno ako je $\beta \gg 1$ jednačba izlaznog kruga glasi:

$$U_{CC} = U_{CE} + I_C \cdot (R_P + R_E)$$

- Uvrštavanjem dobivenog izraza za struju kolektora u jednačbu izlaznog kruga dobije se napon U_{CE} u statičkoj radnoj točki:

$$U_{CE} = U_{CEQ} = U_{CC} - (U_{BB} - U_{BEQ}) \left(1 + \frac{R_P}{R_E} \right)$$

- Na temelju prethodno izvedenih izraza jasno je da struja I_{CQ} i napon U_{CQ} (struja kolektora i napon između kolektora i emitera u statičkoj radnoj točki Q) ne ovisi o parametrima tranzistora koji su funkcija temperature, već samo o vrijednosti otpornika R_E !!!!



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (34)

- Utjecaj temperature na stabilnost statičke radne točke:
- Može se odrediti iz izraza za kolektorsku struju u statičkoj radnoj točki:

$$I_C \approx \frac{U_{BB} - U_{BE}}{R_E} + I_{CBO} \left(1 + \frac{R_B}{R_E} \right)$$

- S porastom temperature dolazi do pada napona U_{BEQ} pri konstantnoj struji baze I_B i do eksponencijalnog porasta struje I_{CBO} što dovodi do promjene struje kolektora.
- Ako se temperatura poveća za ΔT , napon U_{BEQ} će se smanjiti za ΔU_{BEQ} , a struja I_{CBO} će se povećati za ΔI_{CBO} pa temperaturni koeficijent struje I_{CQ} iznosi:

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta T} = -\frac{1}{R_E} \frac{\Delta U_{BEQ}}{\Delta T} + \left(1 + \frac{R_B}{R_E} \right) \frac{\Delta I_{CBO}}{\Delta T}$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (35)

- Utjecaj temperature na stabilnost statičke radne točke:
- Veličina $\Delta U_{BEQ}/\Delta T$ kod silicijskih tranzistora iznosi -1,5 do -2,5 mV/°C ovisno o iznosu struje kolektora.
- Struja I_{CB0} se udvostruči pri svakih 10°C porasta temperature te se prirast struje I_{CB0} može opisati eksponencijalnim zakonom:

$$\Delta I_{CB0} = I_{CB0} [\exp(a\Delta T) - 1]$$

gdje je a konstanta približnog iznosa 0,07/°C.

- Konačni izraz za određivanje temperaturnog koeficijenta struje kolektora u statičkoj radnoj točki glasi:

$$\frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta T} = -\frac{1}{R_E} \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta T} + \left(1 + \frac{R_B}{R_E}\right) I_{CB0} \frac{\exp(a\Delta T) - 1}{\Delta T}$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (36)

- Utjecaj temperature na stabilnost statičke radne točke:
- **PRIMJER:**
- Neka su zadani sljedeći podatci za silicijski tranzistor: $\Delta T = 30^\circ\text{C}$, $R_E = 200\ \Omega$, $R_B = 5\ \text{k}\Omega$, $I_{CB0} = 0,1\ \mu\text{A}$, $I_{CQ} = 5\ \text{mA}$, $\Delta U_{BEQ}/\Delta T = -2\ \text{mV}/^\circ\text{C}$, $a = 0,07/^\circ\text{C}$.
- U tom slučaju prirast struje ΔI_{CQ} iznosi $0,32\ \text{mA}$, odnosno postotni prirast struje I_{CQ} iznosi $6,4\%$.
- Dobiveni rezultati pokazuju da sklop s emitterskom degeneracijom sa silicijskim tranzistorom pokazuje dobru temperaturnu stabilnost statičke radne točke, u prvom redu zbog malog iznosa struje I_{CB0} .
- U analiziranom primjeru promjena struje I_{CB0} zbog porasta temperature sudjeluje u ukupnoj promjeni struje I_{CQ} samo s $5,8\%$ dok promjena U_{BEQ} zbog porasta temperature sudjeluje u ukupnoj promjeni struje I_{CQ} s $94,2\%$.



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (37)

- Osjetljivost sklopa s emiterskom degeneracijom:
- Prema izrazu za kolektorsku struju:

$$I_C = \frac{\beta(U_{BB} - U_{BE}) + I_{CE0}(R_B + R_E)}{R_B + (1 + \beta)R_E}$$

jasno je da kolektorska struja ovisi o U_{BEQ} , I_{CB0} , β , U_{CC} , R_1 , R_2 i R_E iako neke veličine nisu eksplicitno prikazane nego sadržane u veličinama U_{BB} , I_{CE0} i R_B .

$$I_{CQ} = I_{CQ}(U_{BEQ}, I_{CB0}, \beta, U_{CC}, R_1, R_2, R_E)$$

- Promjena bilo koje od veličina izaziva promjenu struje kolektora I_{CQ} što se može iskazati totalnim diferencijalom:

$$dI_{CQ} = \frac{\partial I_{CQ}}{\partial U_{BEQ}} dU_{BEQ} + \frac{\partial I_{CQ}}{\partial I_{CB0}} dI_{CB0} + \frac{\partial I_{CQ}}{\partial \beta} d\beta + \dots$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (38)

- Osjetljivost sklopa s emitterskom degeneracijom:
- Parcijalne derivacije određuju utjecaj odgovarajuće veličine na promjenu struje I_{CQ} i nazivaju se **faktorima stabilnosti**.
- Definiraju se sljedeći faktori stabilnosti:

- faktor stabilnosti s obzirom na napon U_{BEQ}

$$S_U = \frac{\partial I_{CQ}}{\partial U_{BEQ}}$$

- faktor stabilnosti s obzirom na struju I_{CB0}

$$S_I = \frac{\partial I_{CQ}}{\partial I_{CB0}}$$

- faktor stabilnosti s obzirom na β

$$S_\beta = \frac{\partial I_{CQ}}{\partial \beta}$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (39)

- Osjetljivost sklopa s emiterskom degeneracijom:
- Promjena struje I_{CQ} sada se može izraziti preko faktora stabilnosti:

$$dI_{CQ} = S_U dU_{BEQ} + S_I dI_{CB0} + S_\beta d\beta + \dots$$

- Ako su prirasti veličina U_{BEQ} , I_{CB0} , β i I_{CQ} dovoljno mali, ali konačni, tada se umjesto diferencijala mogu pisati konačni prirasti:

$$\Delta I_{CQ} \approx S_U \Delta U_{BEQ} + S_I \Delta I_{CB0} + S_\beta \Delta \beta + \dots$$

- Uz zanemarivanje člana I_{CE0} u izrazu za struju kolektora pri izvodu S_β dobiju se sljedeći izrazi za faktore stabilnosti:

$$S_U = \frac{\beta}{R_B + (1 + \beta)R_E} \quad S_I = \frac{R_B + R_E}{R_E + \frac{R_B}{1 + \beta}} \quad S_\beta = \frac{(U_{BB} - U_{BEQ})(R_B + R_E)}{[R_B + (1 + \beta)R_E]^2}$$



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (40)

- Osjetljivost sklopa s emitterskom degeneracijom:
- Uz zanemarivanje člana I_{CE0} , S_β se može zapisati i na sljedeći način:

$$S_\beta = \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta)R_E} \cdot \frac{I_{CQ}}{\beta}$$

- Ako je zadovoljen uvjet $(1 + \beta)R_E \gg R_B$ tada se faktori stabilnosti mogu prikazati približnim izrazima:

$$S_U \approx -\frac{\alpha}{R_E}$$

$$S_I \approx 1 + \frac{R_B}{R_E}$$

$$S_\beta = \left(1 + \frac{R_B}{R_E}\right) \frac{I_{CQ}}{\beta(1 + \beta)}$$

- Promjene faktora strujnog pojačanja β često su toliko velike da se umjesto derivacije mogu uzeti konačni prirasti veličina I_{CQ} i β :



Pojačala s bipolarnim tranzistorom (41)

- Osjetljivost sklopa s emiterskom degeneracijom:

$$S_{\beta} = \frac{\Delta I_{CQ}}{\Delta \beta} = \frac{I_{CQ2} - I_{CQ1}}{\beta_2 - \beta_1}$$

- Uz zanemarivanje člana $I_{CE0} (R_B + R_E)$, S_{β} se može zapisati i na sljedeći način:

$$S_{\beta} = \frac{R_B + R_E}{R_B + (1 + \beta_2)R_E} \cdot \frac{I_{CQ1}}{\beta}$$

- Iz dobivenih izraza za faktore stabilnosti jasno je da će promjena struje kolektora ΔI_{CQ} pri promjeni veličina U_{BEQ} , I_{CBO} , β i ostalih veličina biti manja što je otpor R_E veći i što je omjer R_B/R_E manji.



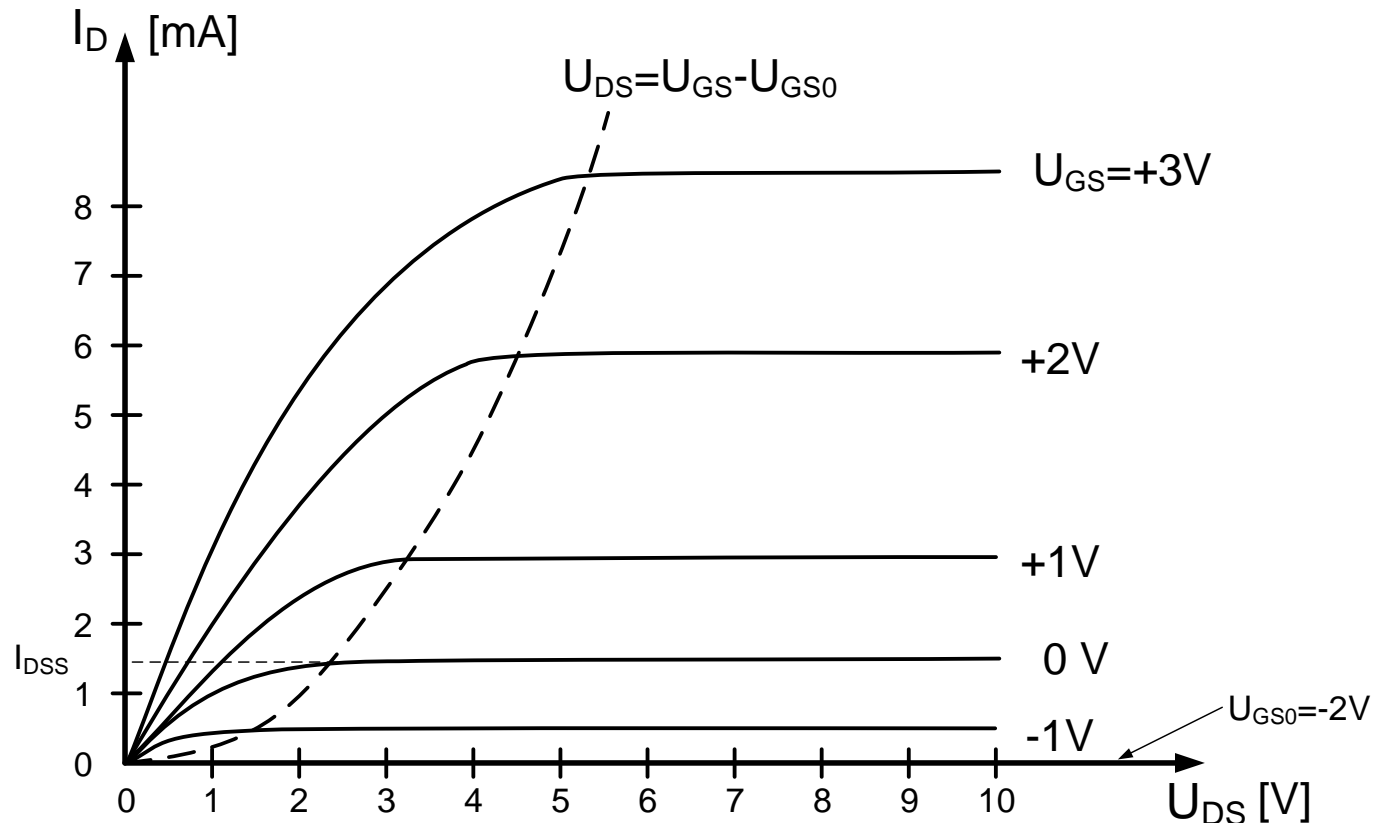
Pojačala s unipolarnim tranzistorom (1)

- Rad unipolarnih tranzistora temelji se na gibanju većinskih nosilaca kroz vodljivi kanal.
- Unipolarni tranzistori izvode se kao:
 - Spojni unipolarni tranzistori (JFET)
 - Unipolarni tranzistori s izoliranom upravljačkom elektrodom (MOSFET)
- Spojni FET-ovi su komponente osiromašenog tipa dok se MOSFET-ovi izvode kao osiromašeni ili obogaćeni tip.
- MOSFET osiromašenog tipa može raditi s dva predznaka napona na upravljačkoj elektrodi dok MOSFET obogaćenog tipa može raditi samo s jednim predznakom napona.
- Bez obzira na izvedbu **zajedničko svojstvo svih FET-ova je vrlo veliki ulazni otpor između upravljačke elektrode (gate) i uvoda (source).**
- Unipolarni tranzistori su naponom (poljem) upravljani elementi za razliku od bipolarnih koji su strujno upravljani elementi i imaju relativno mali ulazni otpor.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (2)

- Izlazne statičke karakteristike idealnoga n-kanalnog MOSFET-a



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (3)

- Lijevo od krivulje $U_{DS} < U_{GS} - U_{GS0}$ je triodno područje – struja odvoda I_D linearno raste s porastom napona U_{DS} , uz stalan iznos napona U_{GS} prema izrazu:

$$I_D = K \left[(U_{GS} - U_{GS0}) U_{DS} - \frac{1}{2} U_{DS}^2 \right]$$

- gdje je K je konstanta MOSFET-a određena izrazom:

$$K = \mu_0 \frac{\varepsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{w}{L}$$

- Značenje veličina iz prethodnih izraza je sljedeće: μ_0 je površinska pokretljivost slobodnih elektrona u kanalu između uvoda i odvoda, ε_{ox} je dielektrična konstanta, t_{ox} je debljina sloja SiO_2 iznad područja kanala, w je širina, a L duljina kanala.
- Napon praga U_{GS0} ovisi o gustoći akceptora u području kanala, o gustoći površinskih stanja, o debljini oksidnog sloja iznad područja kanala i o razlici radova izlaza silicija i metala upravljačke elektrode. Kod n-kanalnog MOSFET-a osiromašenog tipa tipična vrijednost U_{GS0} je od -1 V do -3 V.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (4)

- Desno od krivulje $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$ je područje zasićenja – struja odvoda I_D ne ovisi o promjeni napona U_{DS} , može se izraziti na sljedeći način:

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2$$

- Pri naponu $U_{GS}=0$ struja odvoda I_D u području zasićenja označava se sa I_{DSS} :

$$I_D = \frac{K}{2} (-U_{GS0})^2 = I_{DSS} \Rightarrow K = \frac{2I_{DSS}}{(-U_{GS0})^2}$$

- Izražavanjem konstante K preko struje I_{DSS} , relacija za struju odvoda I_D može se pisati kao:

$$I_D = I_{DSS} \left(1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2$$



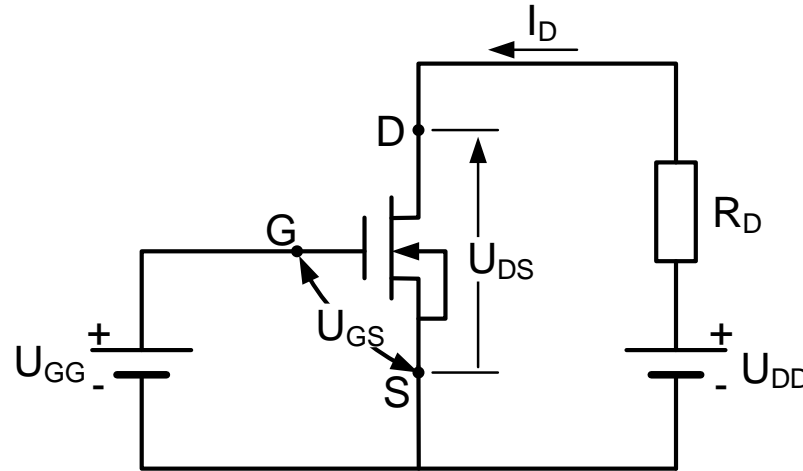
Pojačala s unipolarnim tranzistorom (5)

- Analizom izlaznih statičkih karakteristika dolazi se do odgovora u kojem području unipolarni tranzistori mogu raditi kao pojačalo:
 - Triodno područje je područje relativno malog iznosa dinamičkog otpora, jer pri konstantnom naponu U_{GS} struja I_D relativno brzo raste s naponom U_{DS} . U ovom području se idealni FET ne može u izlaznom krugu smatrati ni kao idealni strujni ni kao idealni naponski izvor.
 - Područje zasićenja je područje konstantne struje odvoda pri konstantnom naponu U_{GS} , te se u tom području rada idealni FET u izlaznom krugu ponaša kao idealni strujni izvor. U ovom području struja ne ovisi o naponu U_{DS} kao ni otporu otpornika spojenog u krug odvoda.
- **Da bi unipolarni tranzistor mogao raditi kao pojačavački element i pojačavati izmjenični signal, potrebno je statičku radnu točku postaviti u područje zasićenja osiguravanjem odgovarajućih napona U_{DS} i U_{GS} .**



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (6)

- Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda – statički uvjeti



- Postavljanje statičke radne točke MOSFET-a u područje zasićenja postiže se korištenjem istosmjernih izvora elektromotorne sile U_{GG} i U_{DD} .
- Potrošač R_D (R_p) spojen je između odvoda i pozitivne stezaljke istosmjernog izvora u krugu odvoda.
- Budući je ulazni otpor MOSFET-a vrlo velik, napon U_{GS} jednak je naponu U_{GG} bez obzira na iznos unutrašnjeg otpora istosmjernog izvora u krugu upravljačke elektrode te ovaj otpor na slici nije ni nacrtan.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (7)

- U ovom spoju odabran je pozitivan predznak napona $U_{GS}=U_{GG}$ što znači da n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa radi u obogaćenom modu.
- Ako bi U_{GG} bio negativan MOSFET bi radio u osiromašenom modu, naravno ako apsolutni iznos tog negativnog napona ne bi bio veći od apsolutnog iznosa napona praga.
- Jednadžba izlaznog kruga ujedno predstavlja jednadžbu statičkog radnog pravca:

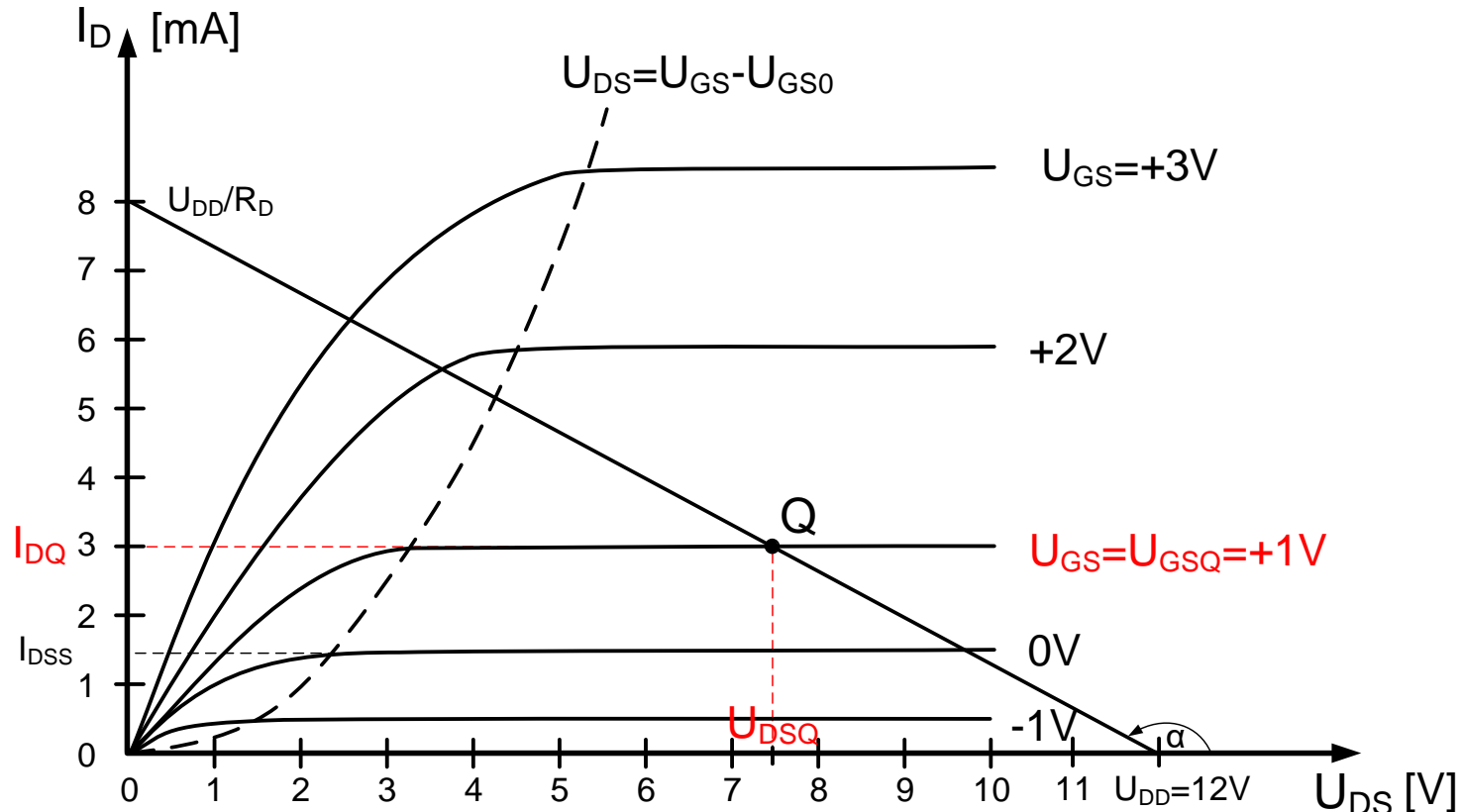
$$U_{DD} = U_{DS} + I_D R_D$$

- Odsječak radnog pravca na apscisi je U_{DD} , a na ordinati U_{DD}/R_D dok je nagib prema apscisi $\text{tg}\alpha=-1/R_D$.
- Jednadžba ulaznog kruga glasi: $U_{GS} = U_{GG}$
- U stvarnim izvedbama pojačala s unipolarnim tranzistorima napajanje ulaznog i izlaznog kruga izvodi se jednim istosmjernim izvorom napajanja U_{DD} umjesto s dva izvora napajanja U_{DD} i U_{GG} .



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (8)

- Statička radna točka unipolarnog tranzistora Q određuje se u izlaznim karakteristikama tranzistora, a definirana je s tri veličine: U_{GSQ} , I_{DQ} , U_{DSQ} .

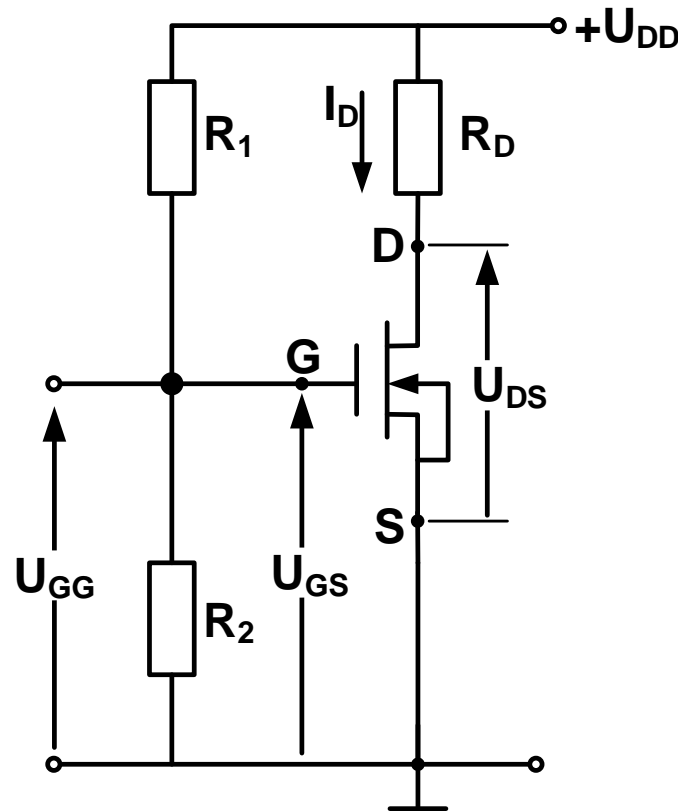


- U odabranoj statičkoj radnoj točki napon u ulaznom krugu iznosi: $U_{GS} = +1$ V.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (9)

- Praktična izvedba pojačala s unipolarnim tranzistorom u spoju zajedničkog uvoda



- Izvedba ovisi o tehnološkoj izvedbi unipolarnog tranzistora (JFET ili MOSFET) te tipu unipolarnog tranzistora (obogaćeni ili osiromašeni tip).



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (10)

- Ukoliko se koristi MOSFET osiromašenog tipa, izvedba pojačala ovisi o modu (režimu) rada unipolarnog tranzistora koji može biti obogaćeni ili osiromašeni mod rada.
- U svakom od navedenih slučajeva nastoji se izvesti napajanje korištenjem samo jednog istosmjernog izvora napajanja.
- Ako se koristi MOSFET obogaćenog tipa ili MOSFET osiromašenog tipa koji radi u obogaćenom modu tada su predznaci napona U_{GS} i U_{DS} isti, te se iznos napona U_{GS} najlakše podešava djeliteľem napona R_1 - R_2 iz istog istosmjernog izvora napajanja iz kojeg se dobiva i napon U_{DD} .
- Napon U_{DD} je pozitivnom stezaljkom priključen u krug odvoda jer se koristi n-kanalni FET, a ista se izvedba može koristiti i za p-kanalni FET ako se negativna stezaljka istosmjernog izvora napona U_{DD} spoji na odvod.
- Budući je istosmjerna struja upravljačke elektrode jednaka nuli istosmjerni napon U_{GS} dan je izrazom:

$$U_{GG} = U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2}$$



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (11)

- Statički radni pravac isti je kao kod prethodne izvedbe sklopa i dan je jednažbom:

$$U_{DD} = U_{DS} + I_D R_D$$

- Ako se na statičkom radnom pravcu odabere položaj radne točke odnosno radna točka Q, tada je na temelju poznatih napona U_{DD} i $U_{GS}=U_{GSQ}$ moguće odrediti omjer otpora R_1 i R_2 prema izrazu:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{U_{DD}}{U_{GSQ}} - 1$$

- Ovim izrazom određen je omjer (odnos vrijednosti) otpora otpornika, ali ne definira njihove apsolutne iznose koje je potrebno odrediti s obzirom na iznos ulaznog otpora.
- U dinamičkim uvjetima (istosmjerni izvor napona je kratki spoj, R_1 je spojen na masu) otpor naponskog djelila $R_G=R_1 || R_2$ koji se se dodaje paralelno ulaznim stezaljkama FET-a predstavljat će ulazni dinamički otpor pojačala.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (12)

- Budući se FET kao pojačavačka komponenta upravlja naponskim signalom (strminsko pojačalo) potrebno je da ukupni ulazni otpor koji je paralelni spoj otpora R_G i ulaznog otpora FET-a koji je jako velik (beskonačan) ostane što veći. Ukupni ulazni otpor dan je izrazom:

$$R_{ul} = R_1 \parallel R_2$$

- Iz izraza za omjer otpora otpornika R_1 i R_2 te izraza za ulazni otpor, apsolutne vrijednosti otpora otpornika R_1 i R_2 za zadane vrijednosti ulaznog otpora R_{ul} i napona U_{DD} i U_{GSQ} određene su sljedećim izrazima:

$$R_1 = R_{ul} \frac{U_{DD}}{U_{GSQ}}$$

$$R_2 = R_{ul} \frac{U_{DD}}{U_{DD} - U_{GSQ}}$$



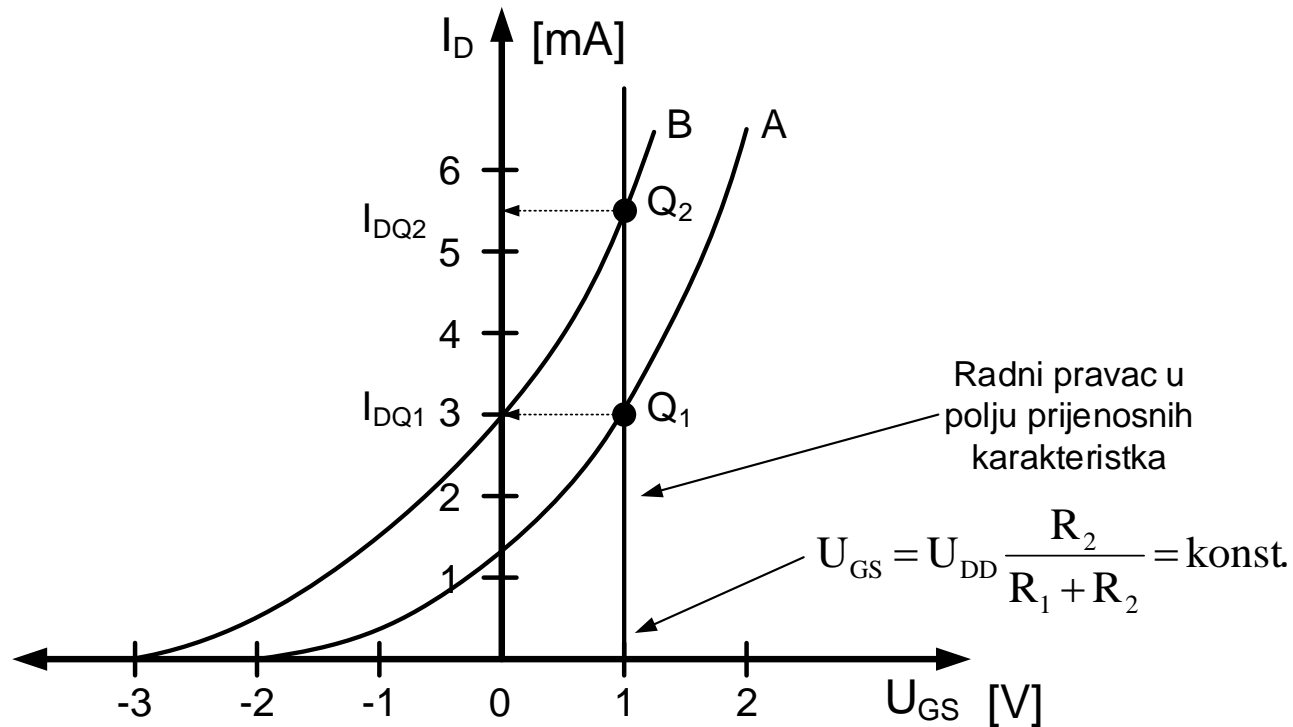
Pojačala s unipolarnim tranzistorom (13)

- Ako je potrebno da sklop uz napon $U_{DD}=12\text{ V}$ radi pri naponu $U_{GSQ}=1\text{ V}$ te da ima ulazni otpor $R_{ul}=100\text{ k}\Omega$ tada se korištenjem prethodnih relacija mogu izračunati vrijednosti otpora naponskog djelitelja R_1 - R_2 koje iznose:
 $R_1=1,2\text{ M}\Omega$ i $R_2=109\text{ k}\Omega$.
- Analizirani spoj pojačala u spoju zajedničkog uvoda je jednostavan, ali nedostatak mu je rad s konstantnim naponom U_{GS} .
- Ako se korištenjem istog tipa unipolarnog tranzistora realizira veća serija identičnih sklopova treba uzeti u obzir efekt rasipanja prijenosnih karakteristika koja se javlja od tranzistora do tranzistora.
- Ovo znači da će uz konstantni napon U_{GS} rasipanje prijenosnih karakteristika dovesti do različitih struja odvoda u statičkoj radnoj točki te da će svaki tranzistor raditi s drugim iznosom strmine odnosno s drugim iznosom naponskog pojačanja.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (14)

- Pojava rasipanja prijenosnih karakteristika dana je sljedećom slikom.

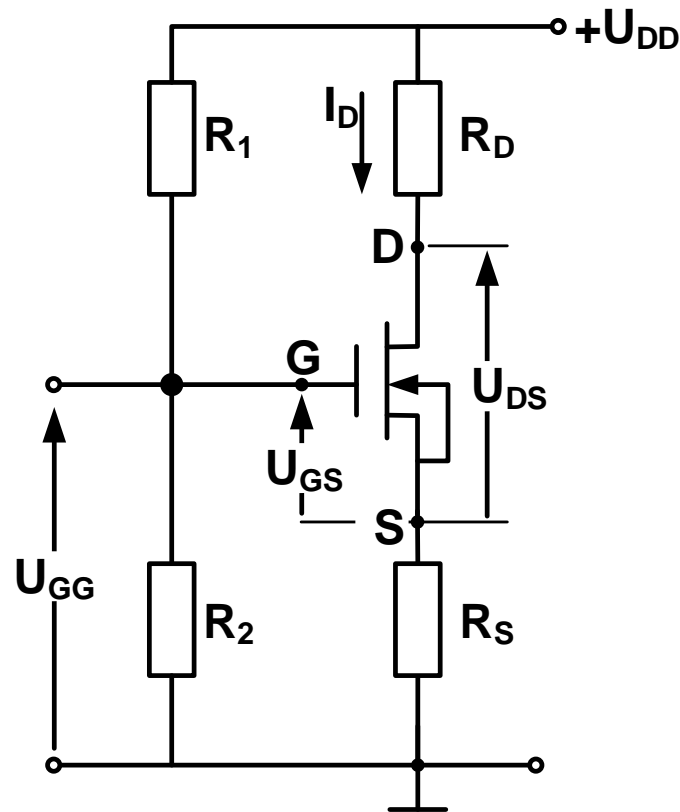


- Na slici su s A i B označene granične prijenosne karakteristike istog tipa FET-a, a s Q_1 i Q_2 granični položaji statičke radne točke.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (15)

- Kako bi se smanjio ili u potpunosti eliminirao efekt rasipanja prijenosnih karakteristika i statičke radne točke Q, u krug uvoda dodaje se otpornik otpora R_S prema sljedećoj slici.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (16)

- Stabilizirajuće djelovanje otpornika R_S može se objasniti na sljedeći način: ako se prijenosna karakteristika FET-a pomakne prema gore u I_D - U_{GS} koordinatnom sustavu doći će do porasta struje odvoda, a time i do porasta pada napona na otporu R_S , odnosno potencijala točke S.
- Budući je napon U_{GG} (potencijal upravljačke elektrode G) prema masi konstantan i određen djeliteľem napona R_1 - R_2 , a potencijal točke S je porastao, napon U_{GS} određen sljedećom jednadžbom se smanjuje.

$$U_{GS} = U_{GG} + I_D R_S$$

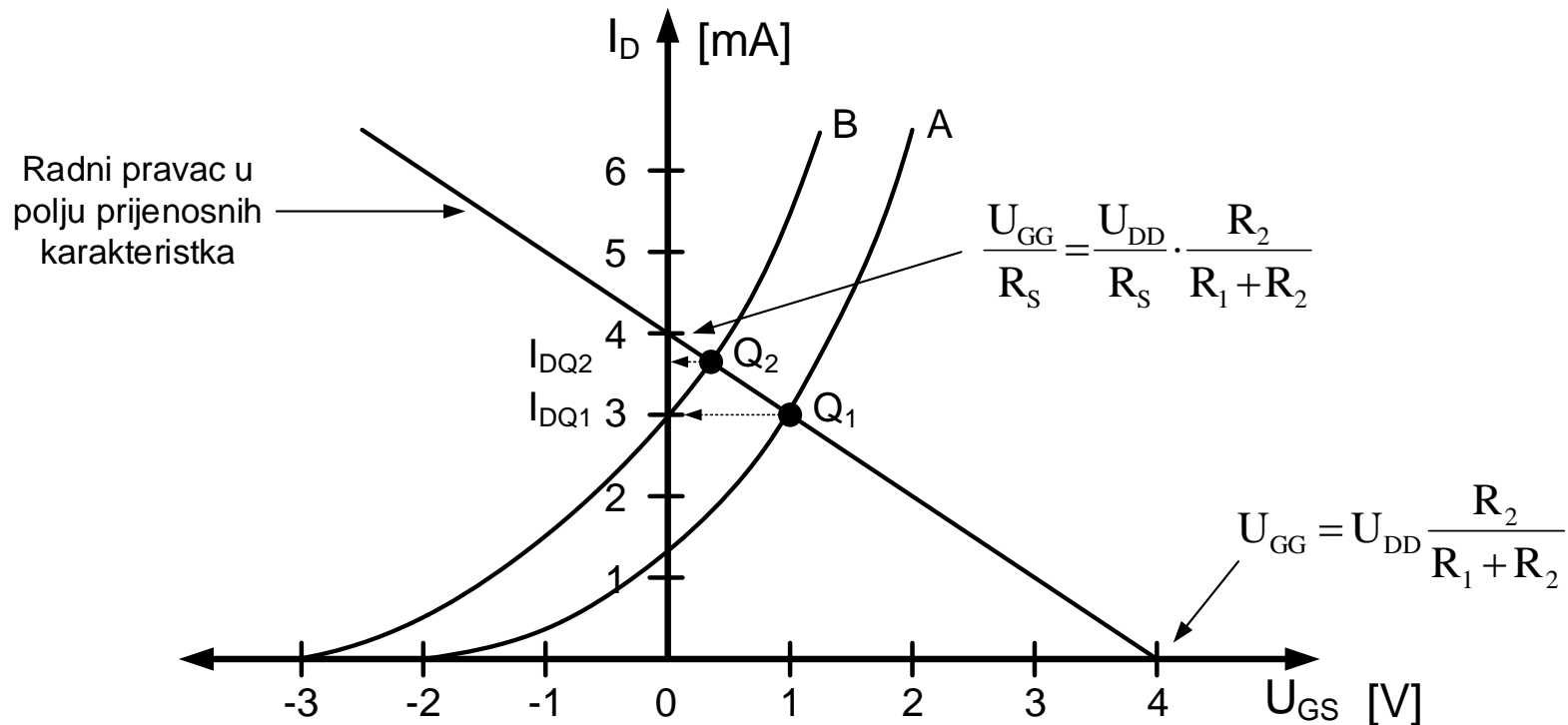
- Smanjenje napona U_{GS} rezultira smanjenjem struje I_D što predstavlja stabilizirajuće djelovanje otpornika R_S u krugu uvoda.
- Jednadžba izlaznog kruga sada je određena jednadžbom:

$$U_{DD} = U_{DS} + I_D (R_D + R_S)$$



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (17)

- Ako se radni pravac ucрта u polje izlaznih karakteristika dobije se prijenosna karakteristika za zadani iznos otpora $R_D + R_S$ i napona U_{DD} .

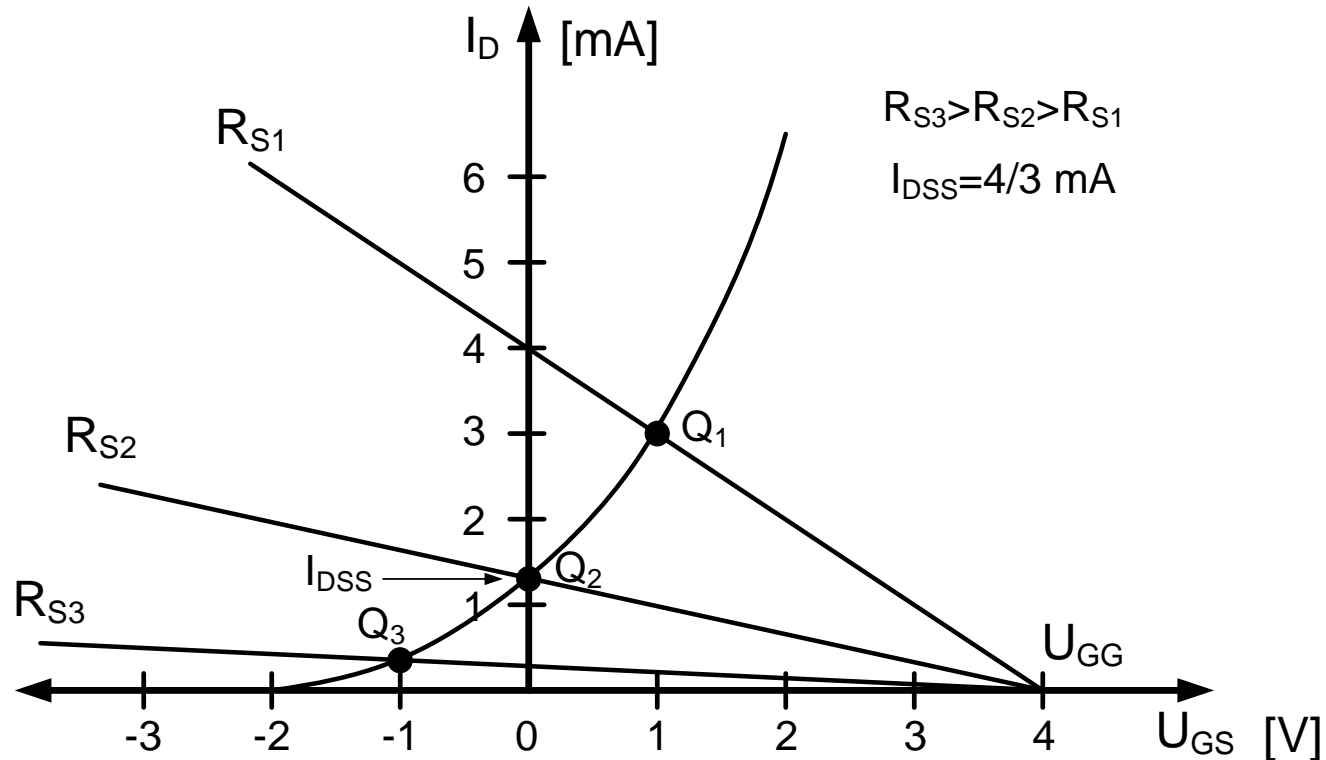


Pojačala s unipolarnim tranzistorom (18)

- Ako se zanemari konačni, ali mali nagib izlaznih karakteristika u području zasićenja, prijenosna karakteristika će imati isti oblik za različite vrijednosti otpora $R_D + R_S$.
- Odsječak radnog pravca na apscisi je U_{GG} , a na ordinati U_{GG}/R_S .
- Uz isto rasipanje prijenosnih karakteristika kao u prethodnom slučaju, dobije se znatno manje rasipanje struje odvoda u statičkoj radnoj točki, odnosno puno manje rasipanje iznosa strmine FET-a i naponskog pojačanja.
- Što je vrijednost otpora otpornika R_S veća statički radni pravac će imati manji nagib te će se struje odvoda u točkama Q_1 i Q_2 manje razlikovati.
- Svakom statičkom radnom pravcu odgovara isti napon U_{GG} , ali drugačiji nagib što znači da se pravci razlikuju samo po vrijednosti otpora R_S .
- Promjenom vrijednosti otpora otpornika R_S mijenjat će se nagib statičkog radnog pravca i položaj statičke radne točke u širokim granicama kako je prikazano na sljedećoj slici.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (19)



- Radna točka Q_1 kojoj odgovara vrijednosti otpora R_{S1} leži u području pozitivnih napona U_{GS} te n-kanalni MOSFET radi u obogaćenom modu.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (20)

- Radna točka Q_2 kojoj odgovara vrijednost otpora $R_{S2} > R_{S1}$ leži na ordinati gdje je napon $U_{GS}=0$, te MOSFET radi na granici obogaćenog i osiromašenog moda.
- Radna točka Q_3 kojoj odgovara otpor $R_{S3} > R_{S2}$ leži u području negativnih napona U_{GS} te MOSFET radi u osiromašenom modu.
- Iz ovog je vidljivo da izvedba sklopa s otpornikom u uvodu osim što osigurava stabilniji rad omogućava rad unipolarnog tranzistora i u osiromašenom i u obogaćenom modu ovisno o iznosu otpora R_S .
- Vrijednost otpora R_{S2} predstavlja graničnu vrijednost otpora R_S između osiromašenog i obogaćenog moda rada.
- Iz odsječka statičkog radnog pravca na ordinati (I_{DSS}) u polju prijenosnih karakteristika uz $R_S=R_{S2}$ vrijedi izraz:

$$\frac{U_{GG}}{R_{S2}} = \frac{U_{DD}}{R_{S2}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = I_{DSS}$$



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (21)

- Budući je struja I_{DSS} struja odvoda pri $U_{GS}=0$, otpor R_{S2} u tom slučaju iznosi:

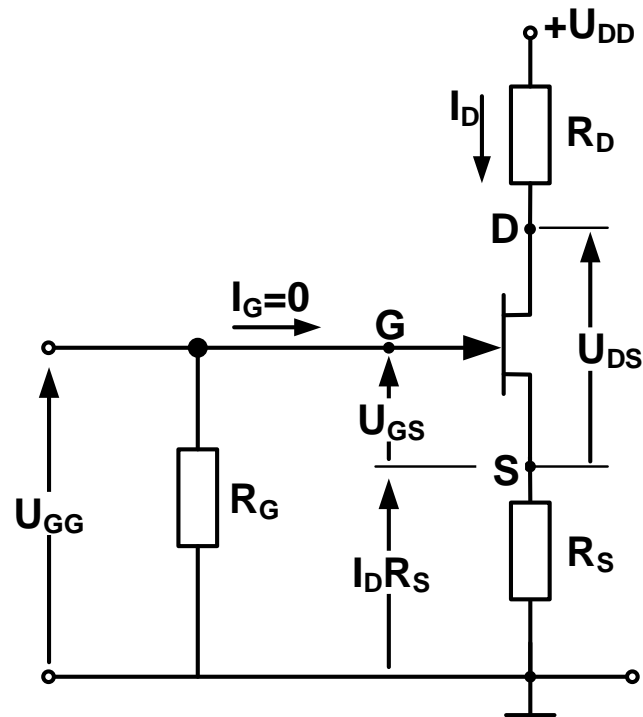
$$R_{S2} = \frac{U_{DD}}{I_{DSS}} \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} = \frac{U_{GG}}{I_{DSS}}$$

- Ukoliko su zadane numeričke vrijednosti npr. $U_{GG}=4$ V i $I_{DSS}=4/3$ mA prema prethodnom izrazu otpornik R_{S2} ima vrijednost otpora 3 kΩ.
- Ako je potrebno da MOSFET radi u obogaćenom modu R_S mora biti manji od 3 kΩ, a za rad u osiromašenom modu veći od 3 kΩ.
- S obzirom na mogućnost odabira položaja statičke radne točke promjenom vrijednosti otpora R_S , ova izvedba sklopa može se osim za n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa primijeniti i za n-kanalni MOSFET obogaćenog tipa ili za n-kanalni JFET, a uz promjenu polariteta napona U_{DD} i za sve p-kanalne izvedbe unipolarnih tranzistora.
- Za razliku od MOSFET-ova koji mogu biti osiromašenog i obogaćenog tipa spojni unipolarni tranzistori JFET-ovi su uvijek elementi osiromašenog tipa te je predznak napona U_{GS} uvijek suprotan predznaku napona U_{DS} .



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (22)

- Osim već prikazane izvedbe pojačala s unipolarnim tranzistorima (gdje je moguće promijeniti samo tip tranzistora) za spoj JFET-a u spoju zajedničkog uvoda češće se koristi izvedba pojačala prikazana na sljedećoj slici:



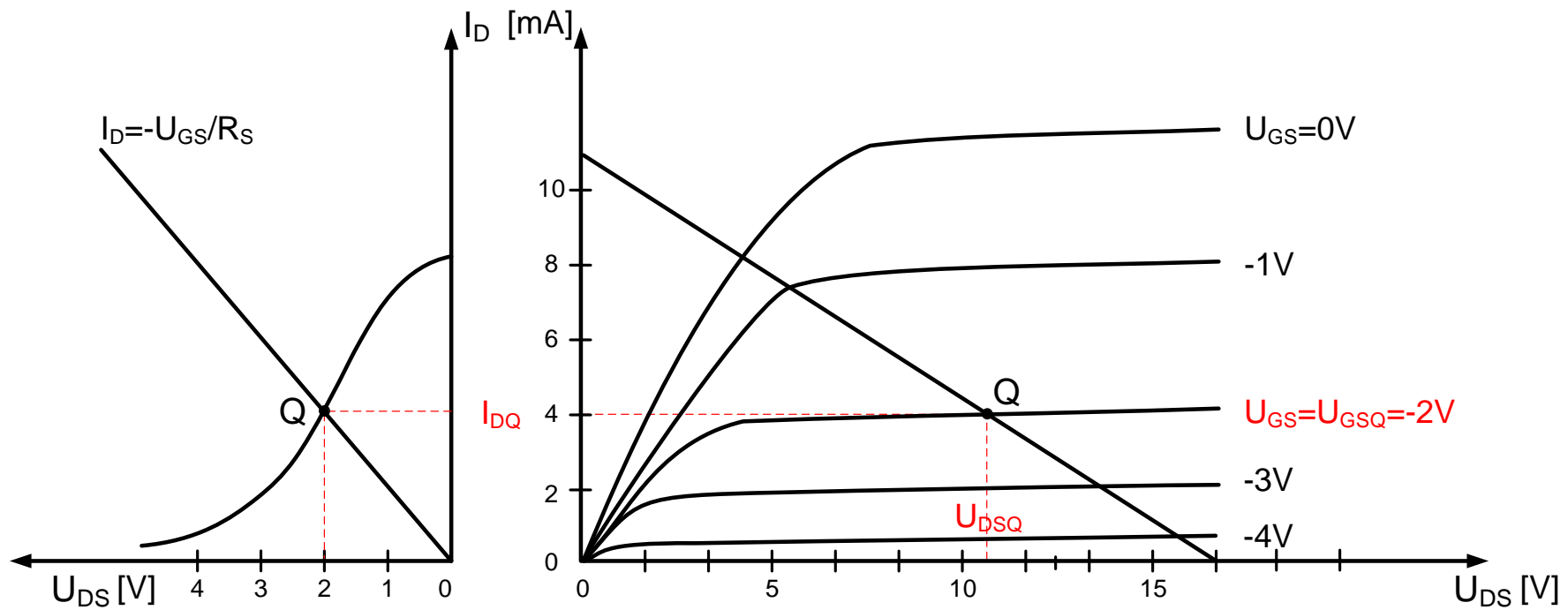
- Izvedba sklopa se može smatrati posebnim slučajem prethodne izvedbe u slučaju kada je $R_1 = \infty$, a $R_2 = R_G$.



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (23)

- Jednadžba izlaznog kruga dana je kao i u prethodnom sklopu, a jednadžba ulaznog kruga dobije se uz zanemarenje struje upravljačke elektrode $I_G=0$:

$$U_{GG} = U_{GS} + I_D R_S = I_G R_G = 0 \Rightarrow I_D = -\frac{U_{GS}}{R_S}$$



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (24)

- Temperaturna ovisnost sklopova s unipolarnim tranzistorima
- Sklopovi s unipolarnim tranzistorima (MOSFET i JFET) pokazuju bolju temperaturnu stabilnost od sklopova s bipolarnim tranzistorima.
- Struja odvoda n-kanalnog MOSFET-a u statičkoj radnoj točki I_{DQ} dana je izrazom:

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad K = \mu_0 \frac{\epsilon_{ox}}{t_{ox}} \cdot \frac{w}{L}$$

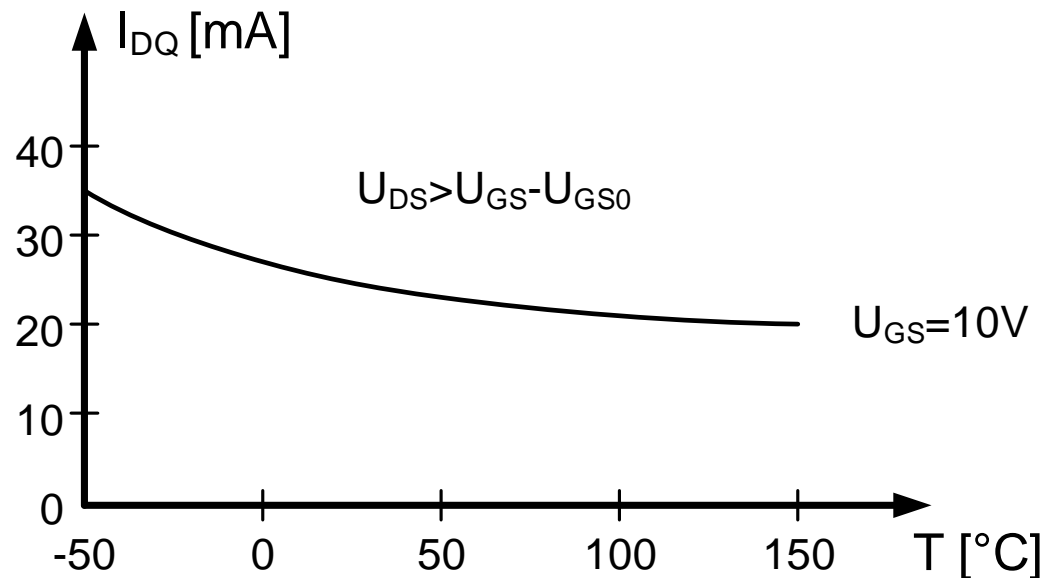
- Temperaturna ovisnost struje I_{DQ} posljedica je utjecaja temperature na veličine K i U_{GS0} .
- Temperaturna ovisnost konstante K izazvana je utjecajem temperature na površinsku pokretljivost elektrona u kanalu (površinska pokretljivost razlikuje se po iznosu i temperaturnoj osjetljivosti od volumne).
- Istraživanja pokazuju da se površinska pokretljivost šupljina i elektrona u siliciju u području temperatura od -55 do +125°C ponaša po sljedećem zakonu:

$$\mu \cong \frac{1}{T}$$



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (25)

- Temperaturna ovisnost sklopova s unipolarnim tranzistorima
- Napon praga U_{GS0} opada s porastom temperature u području od -55 do +125°C približno linearno.
- Pad površinske pokretljivosti pri porastu temperature uzrokuje pad struje odvoda I_{DQ} dok pad napona praga U_{GS0} s porastom temperature uzrokuje porast struje I_{DQ} .



Pojačala s unipolarnim tranzistorom (26)

- Temperaturna ovisnost sklopova s unipolarnim tranzistorima
- Utjecaj površinske pokretljivosti i napona praga su suprotnog djelovanja na struju I_{DQ} pri čemu je utjecaj pada pokretljivosti pet puta veći od utjecaja pada napona praga tako da struja I_{DQ} opada pri porastu temperature.
- Budući da struja odvoda pri porastu temperature u području zasićenja opada, može se reći da unipolarni tranzistori postaju električki slabije aktivni pri višim temperaturama.
- To svojstvo unipolarnih tranzistora čini ih u pogledu temperature stabilnosti boljima od bipolarnih jer bipolarni tranzistori zbog porasta faktora strujnog pojačanja s porastom temperature postaju električki aktivniji na višim temperaturama.
- Zbog manje temperature osjetljivosti unipolarni tranzistori nisu u opasnosti od termičkog uništenja ako je statička radna točka Q u polju izlaznih karakteristika smještena ispod hiperbole maksimalnih dozvoljenih gubitaka u krugu odvoda.

