

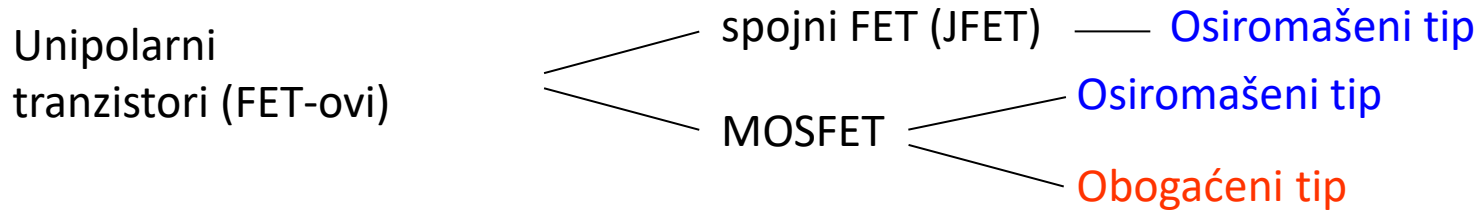


# ELEKTRONIKA

## Predavanje 12

### POJAČALA S UNIPOLARNIM TRANZISTORIMA DINAMIČKI UVJETI RADA FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE POJAČALA

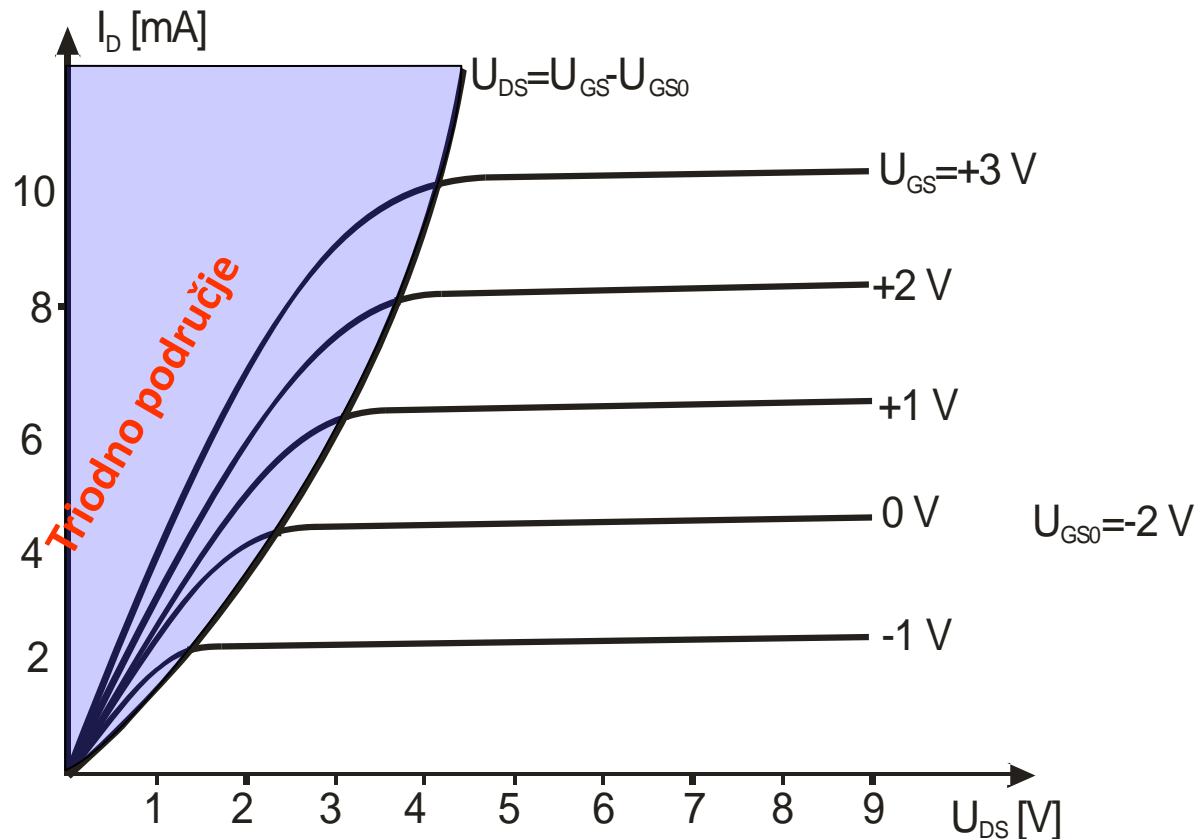
# Definicija statičkih uvjeta



- MOSFET-ovi osiromašenog tipa mogu raditi i s negativnim i s pozitivnim naponom na upravljačkoj elektrodi.
- Zajedničko svojstvo svih FET-ova: **vrlo visok ulazni otpor** između upravljačke elektrode (vrata) i uvoda.
- Upravljanje se vrši naponskim signalom.

# Izlazne karakteristike FET-a

- Izlazne statičke karakteristike idealnog n-kanalnog MOSFET-a osiromašenog tipa:



# Triodno područje

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

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

- K je konstanta MOSFET-a određena izrazom:

$$K = \mu_0 \frac{\epsilon_{0x}}{t_{0x}} \cdot \frac{w}{L} \quad (2)$$

gdje je  $\mu_0$  površinska pokretljivost slobodnih elektrona u kanalu između uvoda i odvoda,  $\epsilon_{0x}$  je dielektrička konstanta,  $t_{0x}$  je debljina sloja  $\text{SiO}_2$  iznad područja kanala,  $w$  je širina, a  $L$  duljina kanala.

# Područje zasićenja

- Zbog pojava na površini silicija i na međupovršini između silicija i oksidnog sloja površinska je pokretljivost manja od volumne.
- Područje karakteristika gdje je  $U_{DS} > U_{GS} - U_{GS0}$  opisano je jednačbom:

$$I_D = \frac{K}{2} (U_{GS} - U_{GS0})^2 \quad (3)$$

- Pri naponu  $U_{GS}=0$  struja  $I_D = \frac{K}{2} (-U_{GS0})^2 = I_{DSS}$  pa se relacija (3) može pisati kao:

$$I_D = I_{DSS} \left( 1 - \frac{U_{GS}}{U_{GS0}} \right)^2 \quad (4)$$

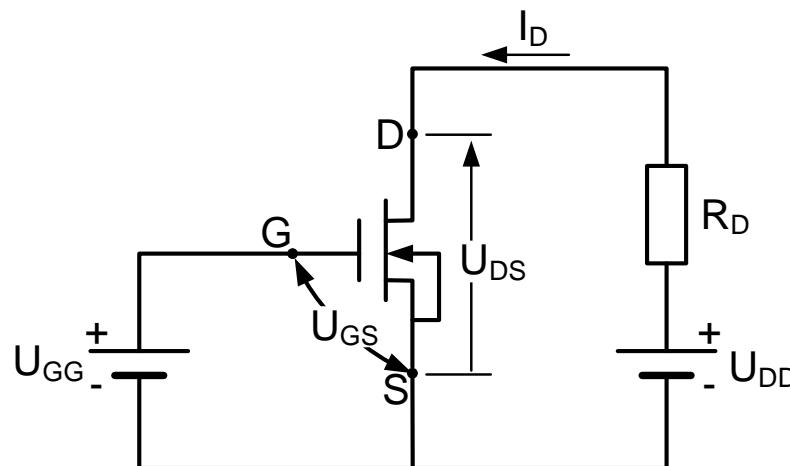
- Struja  $I_{DSS}$  je struja odvoda u području zasićenja pri naponu  $U_{GS}=0$ .

# Područja rada FET-a

---

- Triodno područje – područje relativno malog iznosa dinamičkog otpora.
- U triodnom se području idealni FET ne može u izlaznom krugu tretirati ni kao idealni naponski ni kao idealni strujni izvor.
- Područje zasićenja – područje konstantne struje odvoda pri konstantnom naponu  $U_{GS}$ , idealni FET se u tom području ponaša kao idealni strujni izvor.
- Da bi se MOSFET doveo u statičku radnu točku u području zasićenja, potrebno je osigurati odgovarajuće napone  $U_{DS}$  i  $U_{GS}$ :

# Statički uvjeti rada MOSFET-a

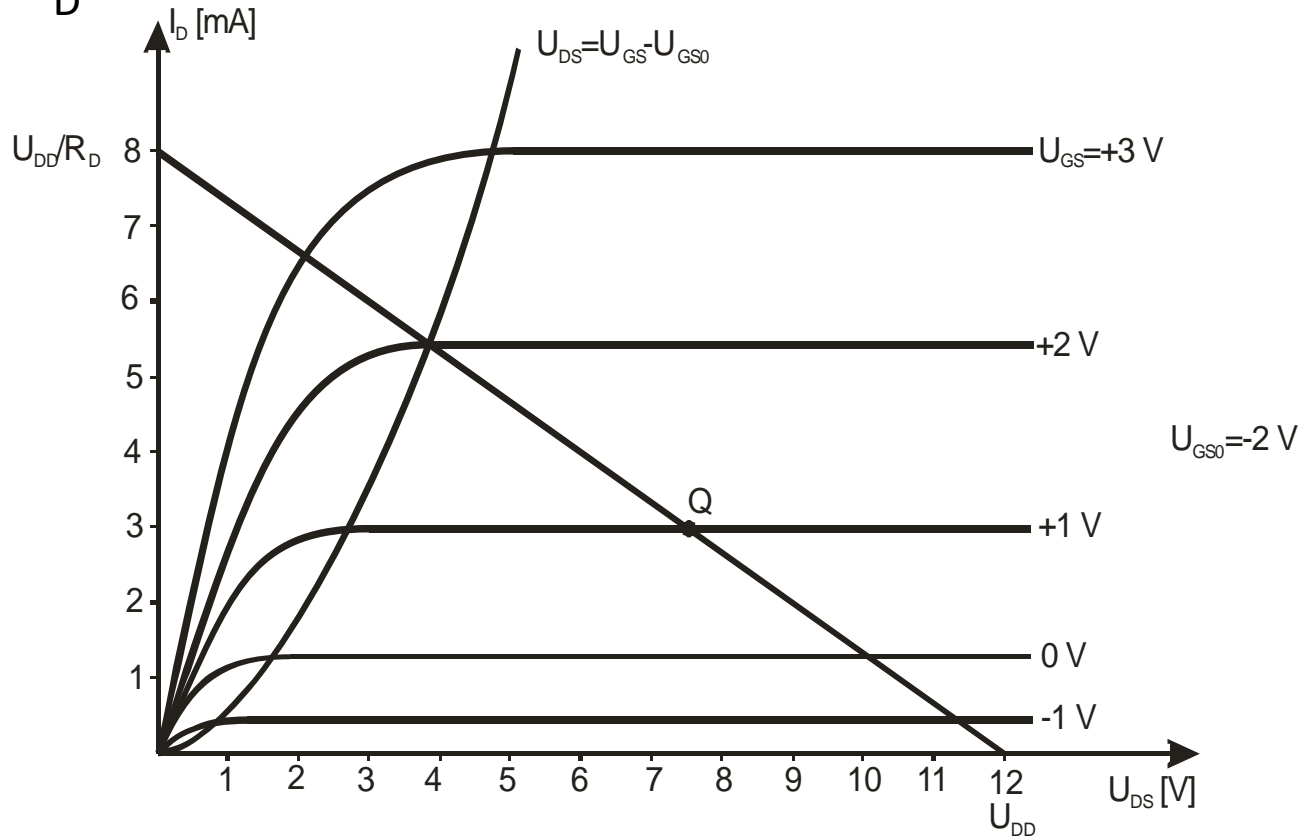


*n-kanalni MOSFET. Definicija statičkih uvjeta.*

- Pozitivan predznak napona  $U_{GS}=U_{GG}$  znači da n-kanalni MOSFET osiromašenog tipa radi u obogaćenom modu. Ako bi  $U_{GG}$  bio negativan, MOSFET bi radio u osiromašenom modu. 
$$U_{DD} = U_{DS} + I_D \cdot R_D \quad (5)$$
- Iz izlaznog kruga slijedi jednačba radnog pravca:

# Statički radni pravac i statička radna točka FET-a

- Odsječak radnog pravca na apscisi je  $U_{DD}$ , a na ordinati  $U_{DD}/R_D$ :

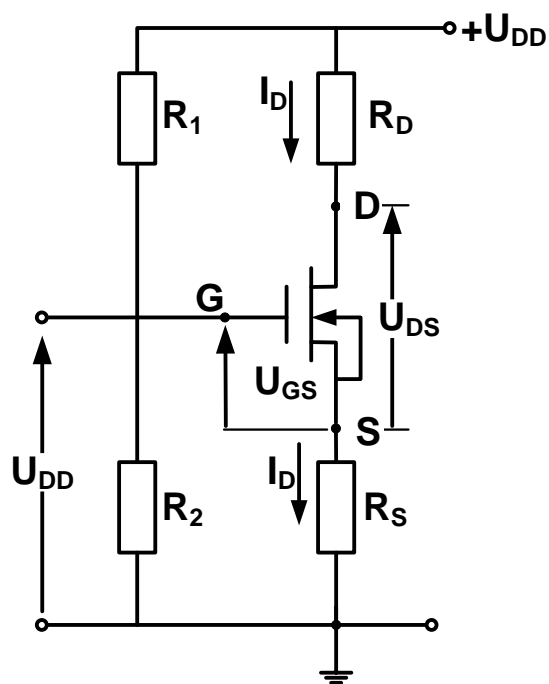


- U odabranoj statičkoj radnoj točki napon  $U_{GS} = +1\text{ V}$ .



# Praktična izvedba sklopa za podešavanje DC uvjeta

- Praktična izvedba sklopa za podešavanje istosmjernih uvjeta (statičke radne točke):



Budući da je istosmjerna struja vrata jednaka nuli, istosmjerni napon  $U_{GG}$  iznosi:

$$U_{GG} = U_{DD} \frac{R_2}{R_1 + R_2} \quad (6)$$

Za ulazni krug sklopa (krug vrata-uvod) vrijedi jednadžba naponske ravnoteže:

$$U_{GG} = U_{GS} + I_D \cdot R_S \quad (7)$$

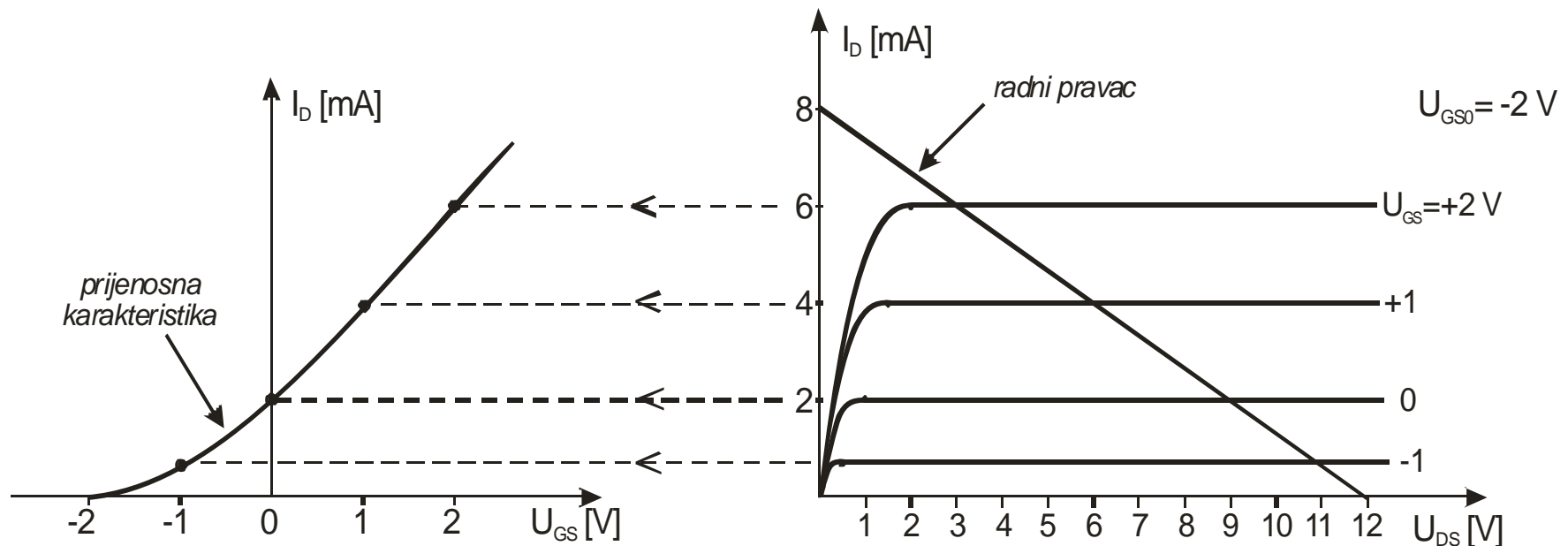
Napon  $U_{GG}$ , odnosno potencijal elektrode G prema uzemljenoj točki je stalan i određen je relacijom (6). Stoga svaka promjena potencijala točke S (uvoda) prema uzemljenju uvjetuje odgovarajuću promjenu napona  $U_{GS}$ , odnosno struje  $I_D$ .

# Izlazni krug FET-a u statičkim uvjetima

Za izlazni krug sklopa na slici vrijedi jednačba naponske ravnoteže:

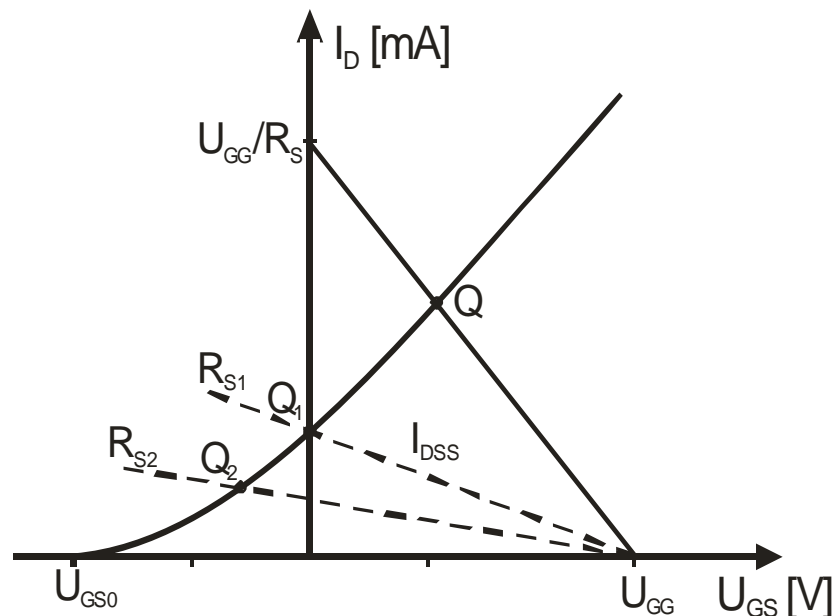
$$U_{DD} = I_D(R_D + R_S) + U_{DS} \quad (8)$$

Koja je ujedno i jednačba radnog pravca u polju izlaznih karakteristika. Pomoću radnog pravca i izlaznih karakteristika može se odrediti prijenosna karakteristika:



# Utjecaj otpora $R_S$ na položaj SRT-e

- Jednadžba (7) je ujedno jednadžba radnog pravca u polju prijenosne karakteristike. Odsječak radnog pravca na apscisi je  $U_{GG}$ , a na ordinati  $U_{GG}/R_S$ .
- Statička radna točka Q određena je sjecištem radnog pravca i prijenosne karakteristike.



- Promjena statičke radne točke promjenom otpora  $R_S$ .
- $Q_1$  ( $R_{S1} > R_S$ ,  $U_{GS}=0$ ) – MOSFET je na granici obogaćenog i osiromašenog područja (moda).
- $Q_2$  ( $U_{GS} < 0$ ) – MOSFET je u osiromašenom modu.
- Dakle,  $R_S$  omogućava rad i u osiromašenom i u obogaćenom modu.

# Dinamička svojstva

- Trenutna totalna vrijednost struje odvoda  $i_D$  određena je trenutnim totalnim vrijednostima napona  $u_{DS}$  i  $u_{GS}$ :

$$i_D = f(u_{DS}, u_{GS}) \quad (9)$$

- Totalni diferencijal struje  $i_D$  je:

$$di_D = \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} du_{DS} + \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} du_{GS} \quad (10)$$

- Diferencijale  $du_{GS}$ ,  $du_{DS}$  i  $di_D$  moguće je aproksimirati konačnim, ali dostatno malim prirastima  $\Delta u_{GS}$ ,  $\Delta u_{DS}$  i  $\Delta i_D$ . Male, ali konačne priraste trenutnih vrijednosti veličina  $u_{GS}$ ,  $u_{DS}$  i  $i_D$  možemo uzeti kao trenutne vrijednosti malih izmjeničnih veličina:

# Dinamička svojstva (2)

$$\left. \begin{aligned} di_D &\approx \Delta i_D \approx i_d \\ du_{DS} &\approx \Delta u_{DS} \approx u_{ds} \\ du_{GS} &\approx \Delta u_{GS} \approx u_{gs} \end{aligned} \right\} \quad (11)$$

- S obzirom na (11), (10) se može pisati u obliku:

$$i_d = \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} u_{ds} + \frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}} u_{gs} \quad (12)$$

- Veličina  $\frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}}$  je recipročna vrijednost dinamičkog otpora u određenoj statičkoj radnoj točki:

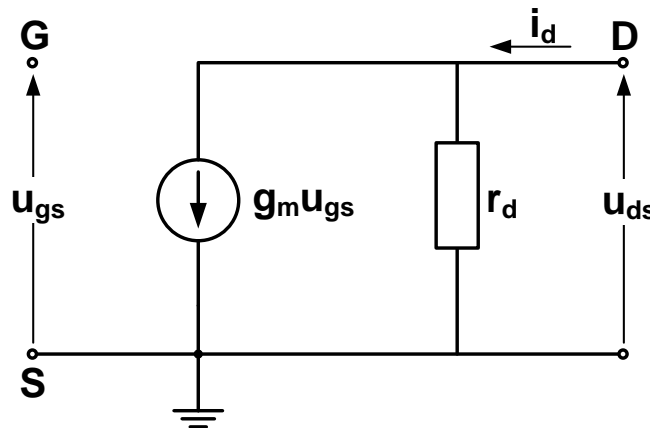
$$\frac{1}{r_d} = \left. \frac{\partial i_D}{\partial u_{DS}} \right|_{U_{GSQ}} \approx \left. \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{DS}} \right|_{U_{GSQ}} \approx \left. \frac{i_d}{u_{ds}} \right|_{U_{GSQ}} \quad (13)$$

# Dinamički uvjeti (3)

- Veličina  $\frac{\partial i_D}{\partial u_{GS}}$  je **strmina**  $g_m$ .
- Konačno se (12) može pisati kao:

$$i_d = g_m u_{gs} + \frac{1}{r_d} u_{ds} \quad (14)$$

- Na temelju relacije (14) može se **u uvjetima malih izmjeničnih signala i srednjih frekvencija** nacrtati nadomjesni sklop:



# Dinamički uvjeti (4)

- Množenjem lijeve i desne strane jednadžbe (14) s veličinom  $r_d$  dobiva se:

$$i_d \cdot r_d = g_m \cdot r_d \cdot u_{gs} + u_{ds} \quad (15)$$

- Umnožak  $g_m r_d$  označava se simbolom  $\mu$  i poznat je kao **faktor pojačanja**, a sama jednadžba

$$g_m \cdot r_d = \mu \quad (16)$$

kao **Barkhausenova jednadžba**.

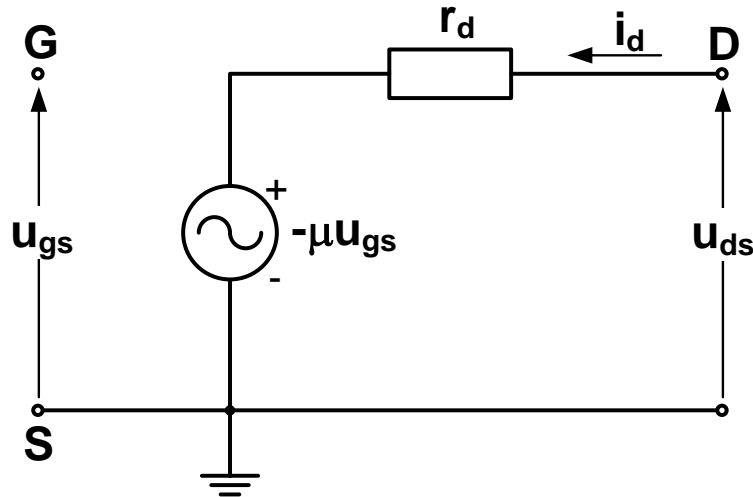
- Dakle, (15) se može pisati kao

$$u_{ds} = -\mu \cdot u_{gs} + i_d \cdot r_d \quad (17)$$

- Na temelju relacije (17) može se nacrtati nadomjesni sklop za mali izmjenični signal s naponskim izvorom.

# Nadomjesni sklop MOSFET-a za mali izmjenični signal

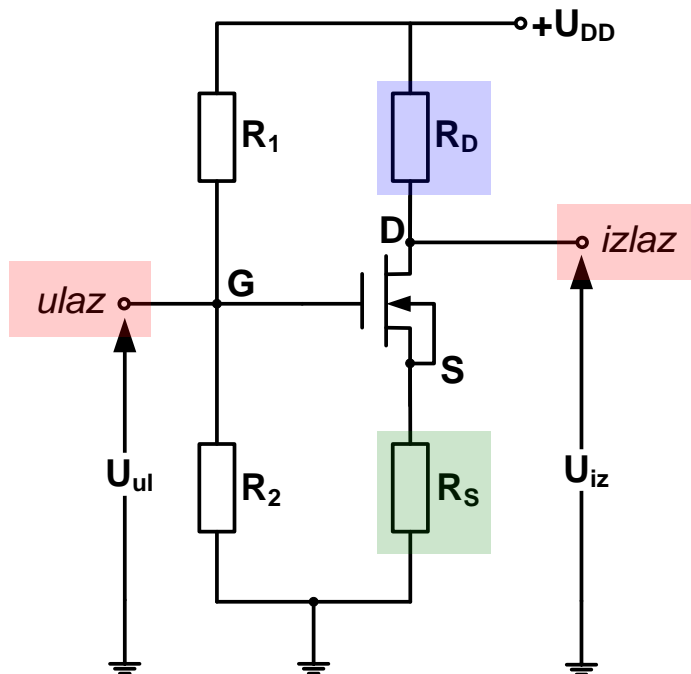
- Nadomjesni sklop MOSFET-a za mali izmjenični signal s naponskim izvorom:





# Pojačalo u spoju zajedničkog uvoda

- Izvedba pojačala u spoju zajedničkog uvoda sa stabilizacijom statičke radne točke pomoću otpornika  $R_S$  u krugu uvoda.



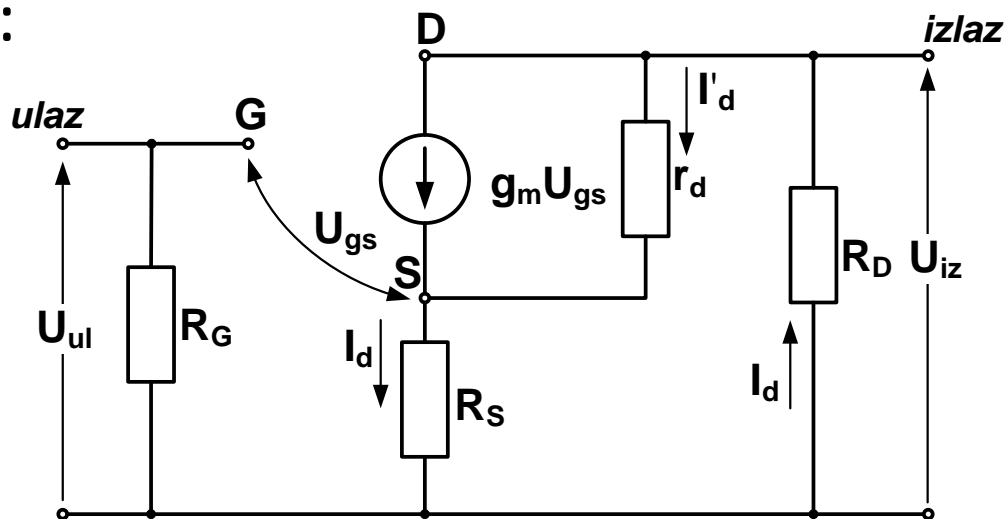
Uvod nije izravno uzemljen već je uzemljen preko otpornika  $R_S$ .

Ulazni signal priključen je na vrata (upravljачku elektrodu G), a izlazni signal se uzima s odvoda D.

Otpornik  $R_D$  je ujedno i trošilo ako na izlaz sklopa nije uključen neki drugi otpornik.

# Nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničkog uvoda

- Nadomjesni sklop pojačala sa slike u dinamičkim uvjetima:



- Iz ulaznog kruga sklopa slijedi:  $U_{gs} = U_{ul} - I_d \cdot R_S$  (18)
- Struja  $I_d$  jednaka je:  $I_d = I'_d + g_m U_{gs}$  (19)

- Iz izlaznog kruga sklopa slijedi:

$$I_d(R_D + R_S) + I_d' r_d = 0 \quad (20)$$

- Iz relacija (18)-(20) slijedi izraz za struju odvoda:

$$I_d = \frac{\mu U_{ul}}{R_D + r_d + (1 + \mu)R_S} \quad (21)$$

gdje je  $\mu = g_m \cdot r_d$ .

- Napon  $U_{iz}$  na trošilu  $R_D$  iznosi:  $U_{iz} = -I_d \cdot R_D$  (22)

- Naponsko pojačanje** je po definiciji:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = -\frac{I_d \cdot R_D}{U_{ul}} = -\frac{\mu R_D}{R_D + r_d + (1 + \mu)R_S} \quad (23)$$

- Otpornik  $R_S$  u krugu uvoda smanjuje naponsko pojačanje. To je **degenerativni utjecaj otpora  $R_S$**  na naponsko pojačanje sklopa.
- **Rješenje: spajanje kondenzatora paralelno otporniku  $R_S$**  (na frekvenciji izmjeničnog signala kondenzator praktički kratko spaja otpornik).
- Tada naponsko pojačanje slijedi iz (23) uz  $R_S=0$ :

$$A_V = -\frac{\mu R_D}{R_D + r_d} \quad (24)$$

- Pojačanje određeno izrazom (24) je veće u odnosu na pojačanje određeno izrazom (23).
- Ako je  $\mu \gg 1$  i  $r_d \gg R_D$  relacija (23) svodi se na oblik:

$$A_V \approx -\frac{g_m}{1 + g_m R_S} \cdot R_D = -g'_m \cdot R_D \quad (25)$$

- Veličina 
$$g'_m = \frac{g_m}{1 + g_m R_S} \quad (26)$$

naziva se **efektivna strmina**.

- Ako je još ispunjen uvjet:

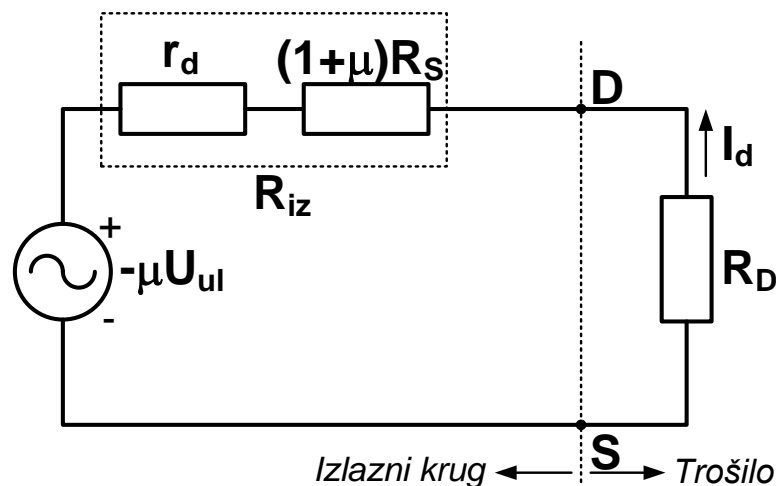
$$g_m R_S \gg 1 \quad (27)$$

tada (25) prelazi u oblik:

$$A_V \approx -\frac{R_D}{R_S} \quad (28)$$

što znači da **naponsko pojačanje ne ovisi o parametrima tranzistora**, već o stabilnim pasivnim komponentama (otpornicima) kojima je moguće ostvariti **naponsko pojačanje s velikom stabilnošću u širokom rasponu temperatura**.

- **Izlazni otpor** pojačala može se odrediti pomoću relacije (21):  $\mu U_{ul} = I_d [r_d + (1 + \mu) R_S] + I_d \cdot R_D$  (29)  
i prema njoj nacrtanog nadomjesnog sklopa:



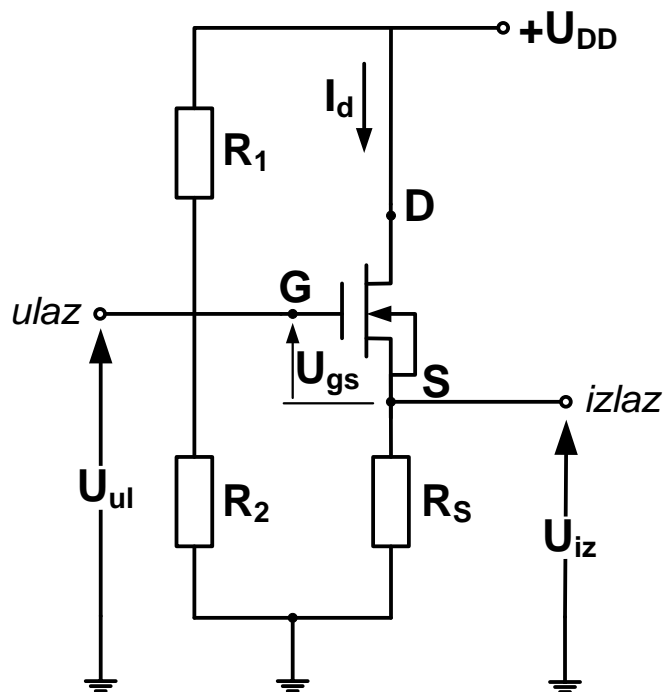
- Dakle, izlazni otpor jednak je:

$$R_{iz} = r_d + (1 + \mu) R_S \quad (30)$$

- 
- Degeneracijom uvoda povećava se izlazni otpor za iznos  $(1+\mu)R_S$ .
  - Ako je otpornik  $R_S$  premošten kondenzatorom, tada  $R_{iz}$ , uz uvjet  $R_S=0$ , jednako je:  $R_{iz} = r_d$  (31)
  - Ulazni otpor jednak je  $R_G$  i ne ovisi o degeneraciji uvoda.

# Pojačalo u spoju zajedničkog odvoda

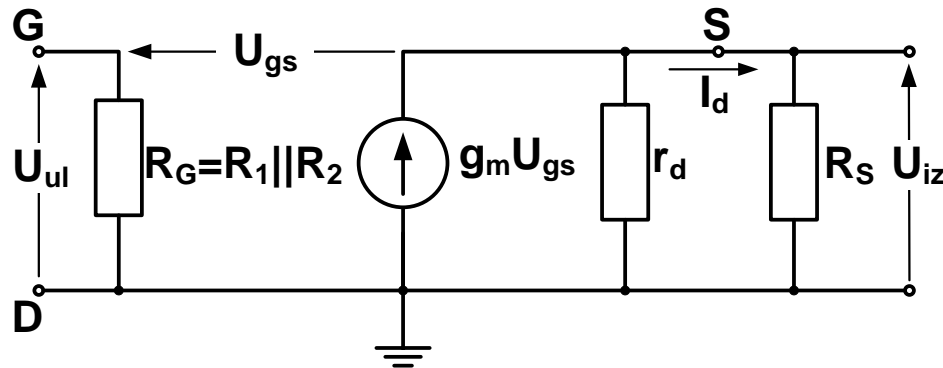
- Osnovni sklop pojačala u spoju zajedničkog odvoda:



- Ulazni signal dovodi se na upravljačku elektrodu G, a izlazni signal se uzima s elektrode izvoda gdje je otpornik  $R_s$  ujedno i trošilo sklopa.



- Nadomjesni sklop pojačala:



- Prema ulaznom krugu osnovnog pojačala može se napisati relacija:  $U_{gs} = U_{ul} - U_{iz}$  (32)

- Za izlazni krug nadomjesnog sklopa vrijedi relacija:

$$U_{iz} = g_m U_{gs} (r_d || R_S) \quad (33)$$

- 
- Izraz za **naponsko pojačanje** sklopa može se odrediti pomoću relacija (32) i (33):

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{g_m (r_d \parallel R_S)}{1 + g_m (r_d \parallel R_S)} \quad (34)$$

- Naponsko pojačanje u spoju zajedničkog odvoda je pozitivno, što znači da sklop ne obrće fazu izmjeničnog signala.  $r_d \gg R_S$  (35)
- Kod realnih sklopova obično je ispunjen uvjet:

$$A_V \approx \frac{g_m}{1 + g_m R_S} \cdot R_S \quad (36)$$

pa se izraz (34) može svesti na jednostavniji oblik:

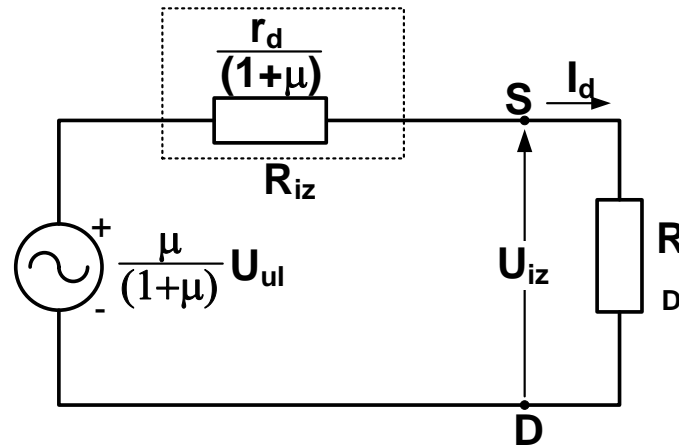
- Ako je uz to ispunjen uvjet  $g_m R_S \gg 1$ , tada je pojačanje  $A_v$  približno jednako jedinici.
- **Izlazni otpor pojačala** može se odrediti na isti način kao i za pojačalo u spoju zajedničkog uvoda.
- Iz izlaznog kruga nadomjesnog sklopa slijedi izraz za struju  $I_d$ :

$$I_d = \frac{U_{iz}}{R_S} = \frac{A_v U_{ul}}{R_S} \quad (37)$$

- Uvrštavanjem izraza za  $A_v$  (34) u izraz (37) dobiva se:

$$\frac{\mu}{1 + \mu} U_{ul} = I_d \frac{r_d}{1 + \mu} + I_d \cdot R_S \quad (38)$$

što odgovara nadomjesnom sklopu:



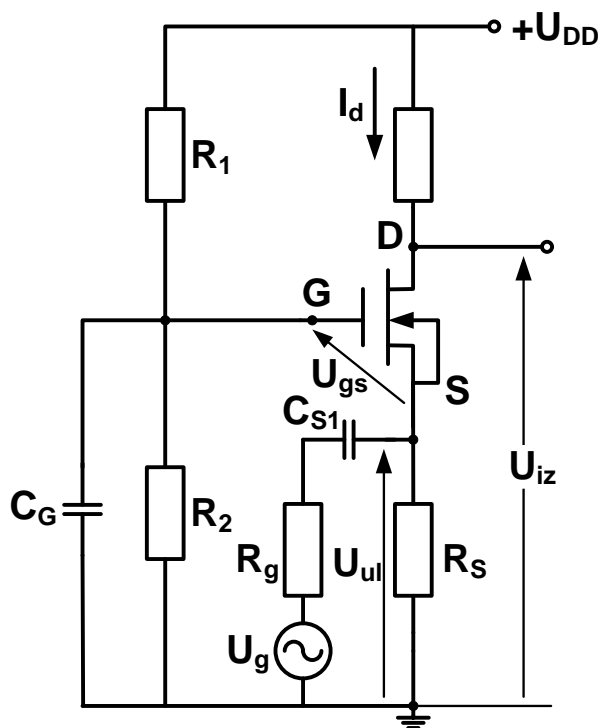
- Dakle, za izlazni otpor pojačala u spoju zajedničkog odvoda može se pisati izraz:

$$R_{iz} = \frac{r_d}{1 + \mu} \quad (39)$$

- Kako je redovito  $\mu \gg 1$ , izlazni otpor je  $R_{iz} \ll r_d$ .

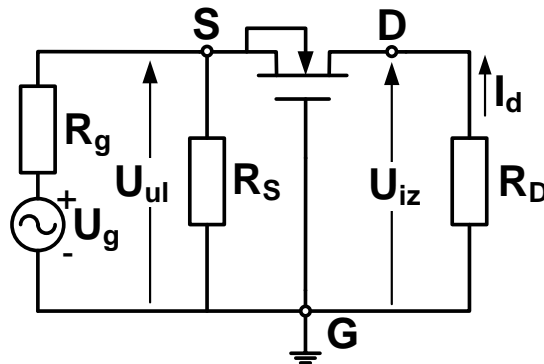
# Pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode

- Osnovni sklop pojačala u spoju upravljačke elektrode (vrata):

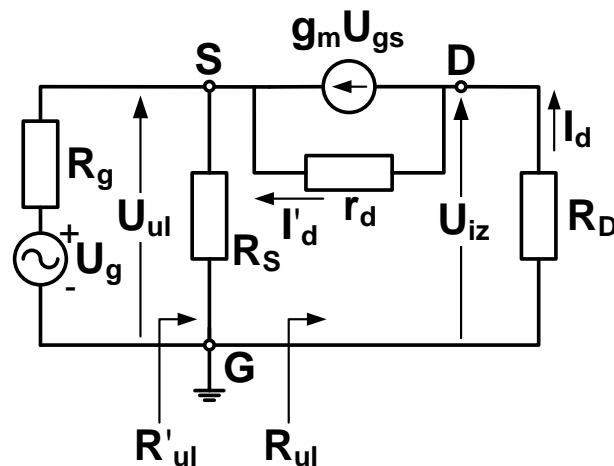


- Izmjenični ulazni signal dovodi se u krug uvoda, a izlazni signal se uzima s odvoda.

- Upravljačka elektroda je za izmjenični signal uzemljena preko kondenzatora  $C_G$ :



- Nadomjesni sklop pojačala u spoju zajedničke upravljačke elektrode:



- Za sklop na slici mogu se napisati ove relacije:

$$U_{ul} = U_{iz} - I_d' \cdot r_d \quad (40)$$

$$I_d' = I_d - g_m U_{gs} \quad (41)$$

$$U_{iz} = -I_d \cdot R_D \quad (42)$$

$$U_{gs} = -U_{ul} \quad (43)$$

- Na temelju gornjih relacija slijedi izraz za struju odvoda:

$$I_d = -\frac{(1 + \mu)U_{ul}}{r_d + R_D} \quad (44)$$

- odnosno naponsko pojačanje:

$$A_V = \frac{U_{iz}}{U_{ul}} = \frac{(1 + \mu)R_D}{r_d + R_D} \quad (45)$$

- Naponsko pojačanje je pozitivan broj što znači da su ulazni i izlazni signal u fazi.
- Nadalje, iz izraza (45) se vidi da naponsko pojačanje raste s otporom trošila od  $A_V=0$  pri  $R_D=0$  do  $A_V=1+\mu$  pri  $R_D \rightarrow \infty$ .
- **Ulazni otpor pojačala**  $R_{ul}$  određen je izrazom:

$$R_{ul} = \frac{U_{ul}}{-I_d} = \frac{U_{ul}}{U_{iz}} \cdot R_D = \frac{R_D}{A_V} \quad (46)$$

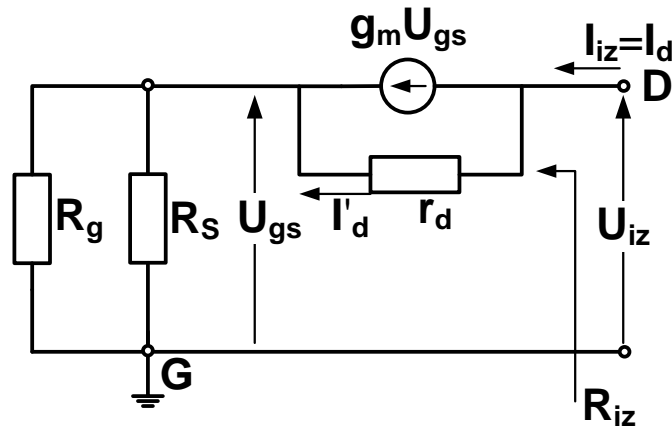
- Odnosno

$$R_{ul} = \frac{R_D + r_d}{1 + \mu} \quad (47)$$

$$R'_{ul} = R_{ul} \parallel R_S \quad (48)$$



- Izlazni otpor se dobiva kao omjer izlaznog napona i izlazne struje pri kratkospojenom naponu  $U_g$ :



- Za sklop na slici mogu se napisati jednađbe:

$$U_{iz} = I'_d \cdot r_d + I_d \cdot R'_g \quad (49)$$

$$I'_d = I_d - g_m U_{gs} \quad (50)$$

$$U_{gs} = -I_d \cdot R'_g \quad (51)$$

- 
- Iz navedenih relacija može se odrediti omjer  $U_{iz}/I_d$ , odnosno izraz za izlazni otpor sklopa:

$$R_{iz} = \frac{U_{iz}}{I_d} = r_d + (1 + \mu)R'_g \quad (52)$$

- Pojačalo u spoju zajedničke upravljačke elektrode ima mali ulazni otpor, a veliki izlazni otpor.

# **FREKVENCIJSKE KARAKTERISTIKE POJAČALA**

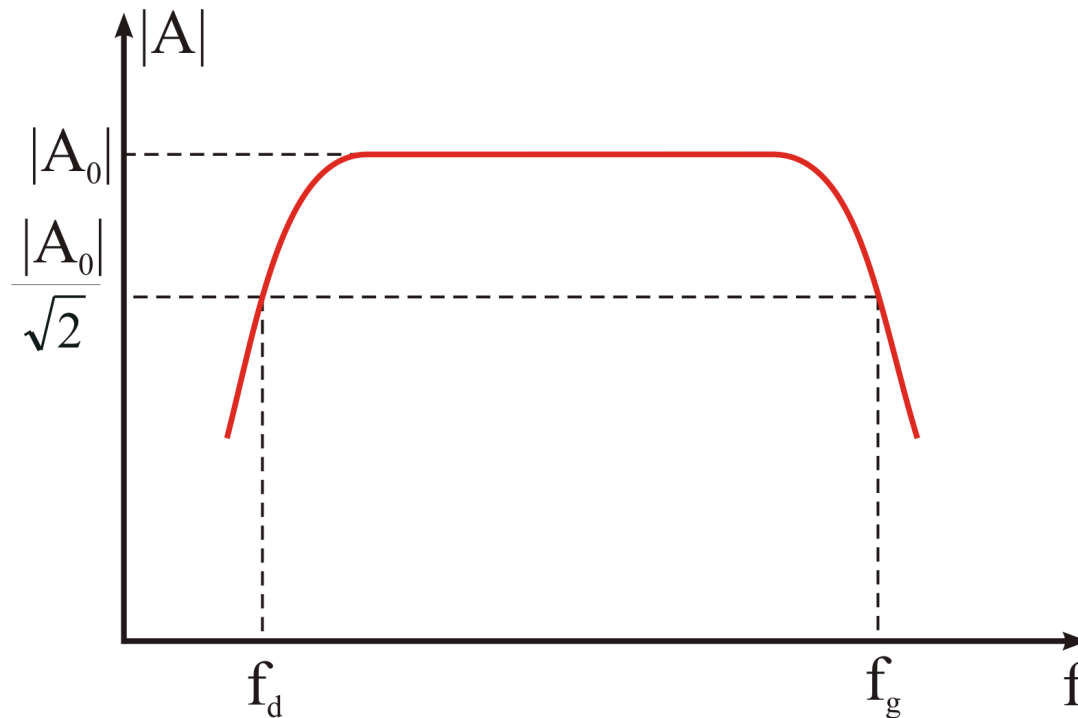
# Frekvencijska područja rada pojačala

---

- S obzirom na frekvenciju priključenog signala rad elektroničkih sklopova može se podijeliti u tri frekvencijska područja:
  - 1) područje niskih frekvencija
  - 2) područje srednjih frekvencija
  - 3) područje visokih frekvencija

# Frekvencijska karakteristika pojačala

- Frekvencijska karakteristika pojačala – ovisnost pojačanja o frekvenciji



# Frekvencijska karakteristika pojačala (2)

---

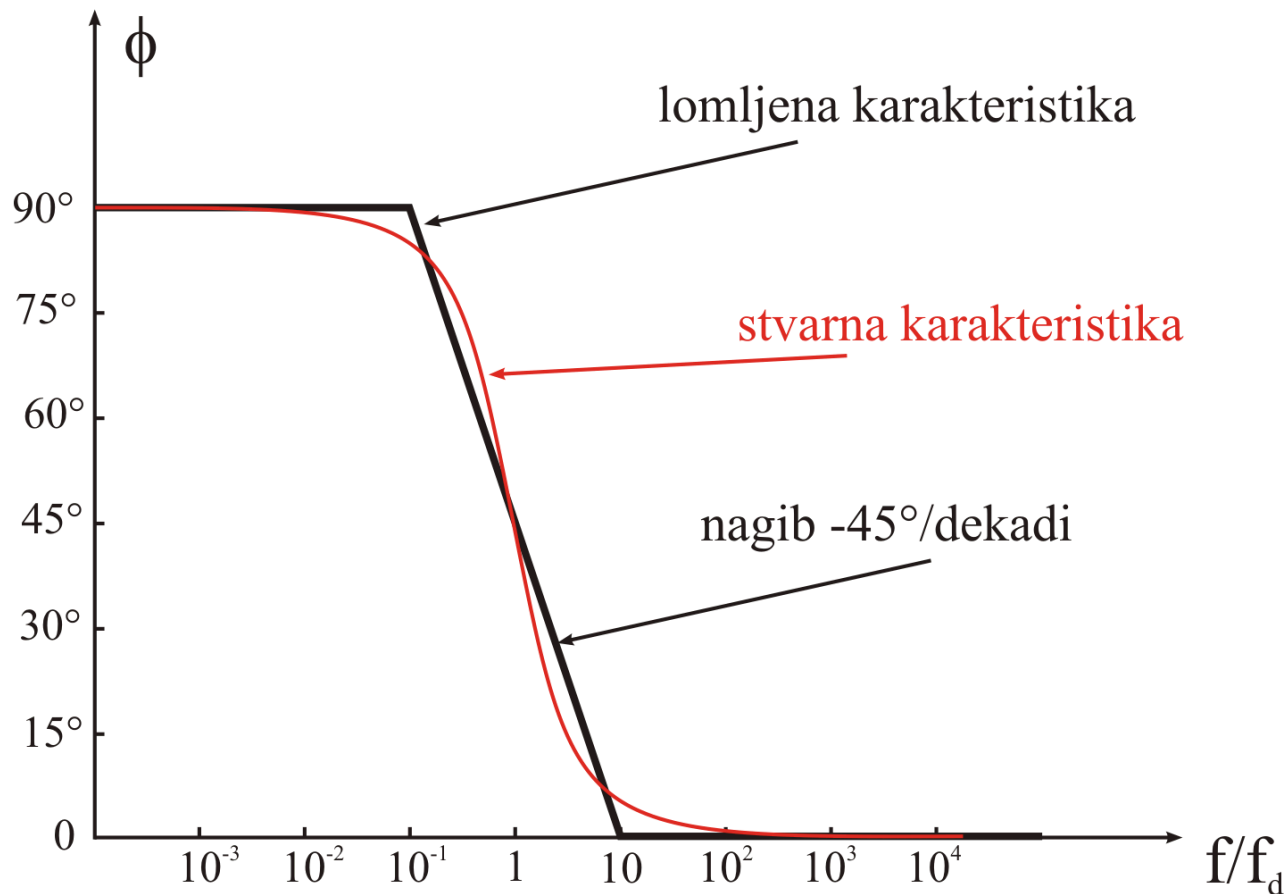
- U području srednjih frekvencija pojačanje ne ovisi o frekvenciji (referentno pojačanje  $A_0$ ).
- U točkama u kojima je vrijednost pojačanja  $A_0/\sqrt{2}$  definirane su dvije karakteristične frekvencije: gornja i donja granična frekvencija.
- Postojanje donje granične frekvencije uvjetovano je konstrukcijom sklopa (vezni kondenzatori na ulazu i izlazu pojačala).
- Gornja granična frekvencija je rezultat fizikalnih pojava u radu tranzistora.
- Gornja granična frekvencija može se povećati izborom odgovarajućeg tranzistora i konstrukcijom sklopa, ali je njen iznos uvijek konačan.
- Frekvencijska karakteristika idealnog pojačala bila bi horizontalan pravac.

# Frekvencijska karakteristika pojačala (3)

---

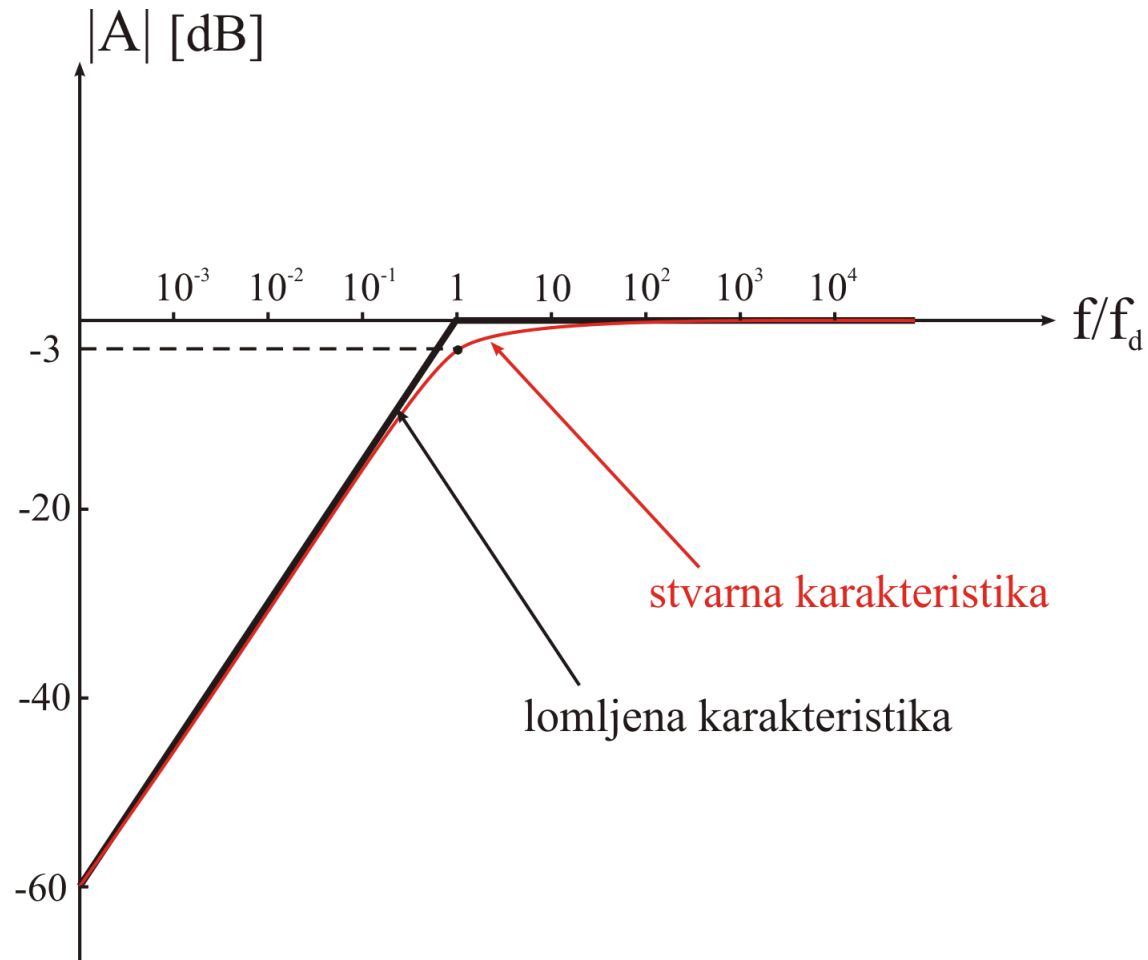
- Realna pojačala uvijek unose određeni fazni pomak između izlaznog i ulaznog signala. Taj pomak je posljedica konačnog vremena nabijanja i pražnjenja barijernih kapaciteta, konačnog vremena proleta nosilaca naboja kroz tranzistor i djelovanja vremenskih konstanti pasivnih dijelova pojačala.

# Primjer: Jednostavna RC mreža – Fazna karakteristika



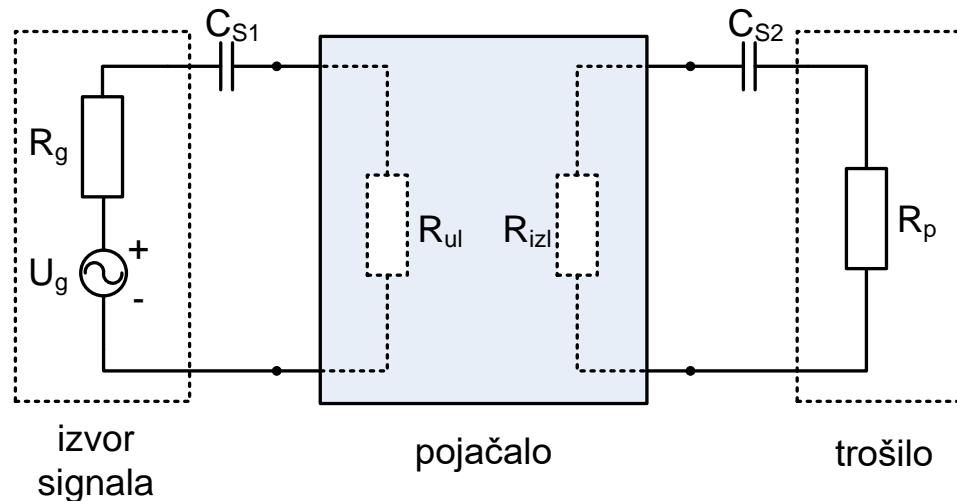


# Primjer: Jednostavna RC mreža - amplitudna karakteristika



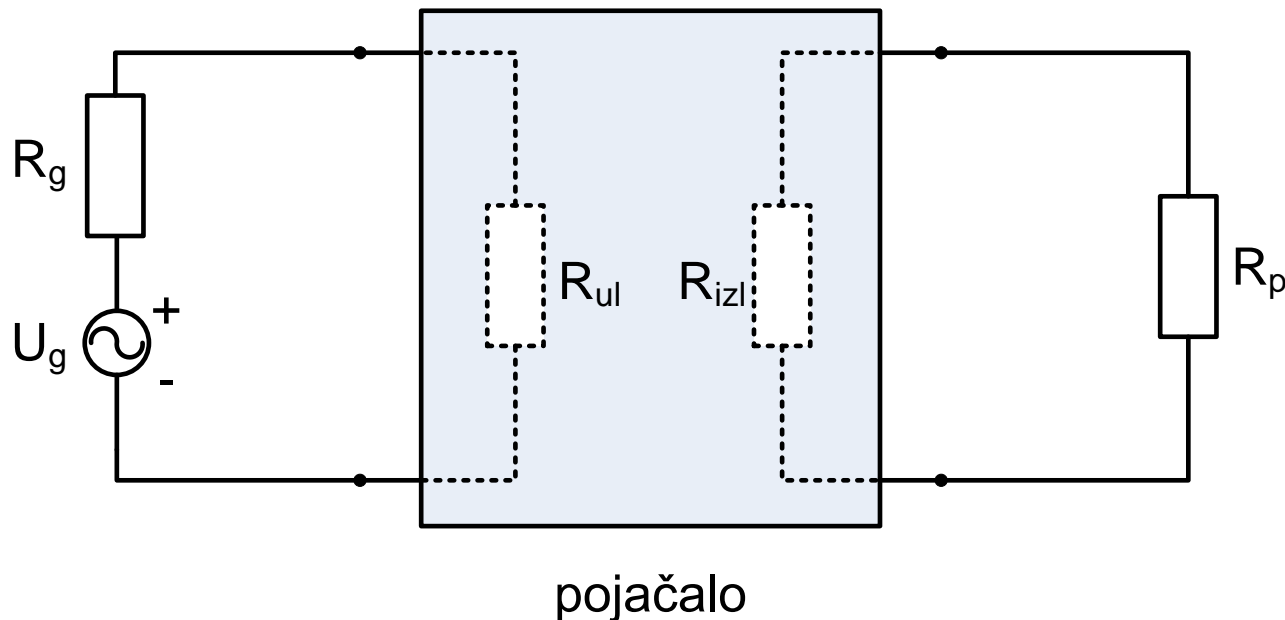
# 1) Područje niskih frekvencija

- U području niskih frekvencija potrebno je uzeti u obzir pad napona na kondenzatorima koji su serijski vezani u sklopu.
- Na slici je prikazano pojačalo s **veznim kondenzatorima**  $C_{S1}$  i  $C_{S2}$  koji u statičkim uvjetima odjeljuju izvor signala i trošilo od sklopa pojačala.



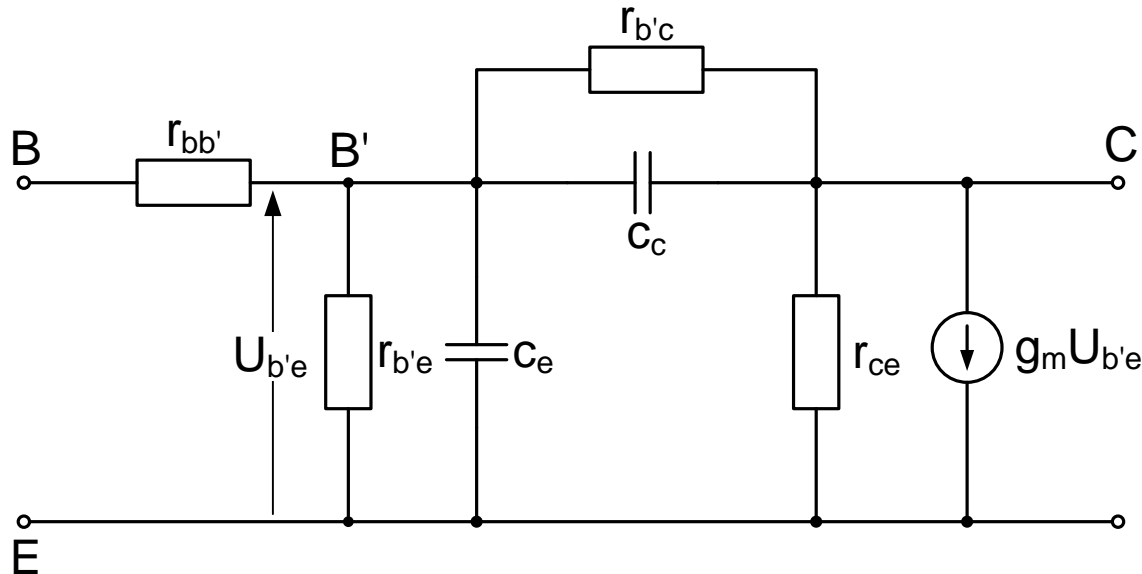
## 2) Područje srednjih frekvencija

- Mogu se zanemariti utjecaji kapacitivnih komponenata sklopa.
- U dinamičkim uvjetima vezni se kondenzatori u ulaznom i izlaznom krugu pojačala kratko spajaju:



### 3) Područje visokih frekvencija

- Pojave na visokim frekvencijama moguće je analizirati primjenom Giacolettovog modela tranzistora:



- Giacolettov model (hibridni  $\pi$ -model) uključuje barijernu i difuzijsku kapacitivnost tranzistora koje su ključne za ponašanje tranzistora na visokim frekvencijama.