

$$(3.12.20c) \quad C_E = C_{s1} \frac{R_g + h_{11E}}{h_{11B}} = C_{s2} \frac{R_C + h_{11E}}{h_{11B}} = C_{s3} \frac{R_C + R_p}{h_{11B}}$$

Primenom ovog izraza, na osnovu brojnih vrednosti ostalih elemenata sa Sl. 3.12.7, dobilo bi se $C_E = 275 \mu\text{F}$. Imajući u vidu da je u pojačavaču sa Sl. 3.12.7 upotrebljen kondenzator C_E od $100 \mu\text{F}$, pojačavač ima nešto veću donju graničnu frekvenciju nego što je gore izračunato. Kao što se vidi sa Sl. 3.12.9 ona iznosi 250 Hz.

Na visokim frekvencijama saglasno razmatranjima u prethodnom odeljku, za pojačanje može da se koristi izraz (3.12.17) s tim što se zamenjuju formule (3.9.24) (3.9.26.a) i (3.9.28). I dalje ostaje problem neunilateralnosti i stoga će sledeća razmatranja da se odnose na frekventno područje kada je Z_μ vrlo velika impedansa s tim što će se računavati Miller-ova kapacitivnost na ulazu.

Drugim rečima, biće upotrebljen unilateralizovani model sa Sl. 3.7.6. Na osnovu toga u (3.9.26a), (3.9.24) i (3.9.28) biće $\tau_2=0$, $\tau_4=0$, $\tau_\mu=0$, i $\tau_6=0$. Stoga će se koristiti za pojačanje (3.9.26c), za ulaznu impedansu (3.9.25), a za izlaznu impedansu će se smatrati da je konstantna. Smenom u (3.12.17) dobija se

$$(3.12.21a) \quad A_v = \frac{A_{v0}}{(1 + j\omega\tau_1)^2 (1 + j\omega\tau_a)(1 + j\omega\tau_b)}$$

gde je $\tau_a = \tau_3 R_g / (R_g + R_u)$ i $\tau_b = \tau_3 R_{iz} / (R_u + R_{iz})$. Imajući u vidu brojne vrednosti za τ_1 i τ_3 možemo smatrati da je $\omega_v \tau_1 \ll \omega_v \tau_a, \omega_v \tau_b$, pa se u okolini gornje granične frekvencije može računati samo sa

$$(3.12.21.b) \quad A_v = \frac{A_{v0}}{(1 + j\omega\tau_a)(1 + j\omega\tau_b)}$$

Smenom brojnih vrednosti dobija se $\tau_a = \tau_3/3$, i $\tau_b = \tau_3/8.4$. Sad se za približnu vrednost granične frekvencije dobija

$$(3.12.21c) \quad \omega_v = \sqrt{-\frac{1}{2} \left(\frac{1}{\tau_a^2} + \frac{1}{\tau_b^2} \right)} + \sqrt{\frac{1}{4} \left(\frac{1}{\tau_a^4} + \frac{1}{\tau_b^4} + \frac{6}{\tau_a^2 \tau_b^2} \right)}$$

Kada se zamene brojne vrednosti dobija se $\omega_v = 3.2/\tau_3$ ili $f_v = 1.08 \text{ MHz}$

Kompletna frekvencijska karakteristika pojačavača sa Sl. 3.12.7 je prikazana na Sl. 3.12.9. Ona je dobijena analizom metodom potencijala čvorova uz primenu računara. Može se uočiti da je gornja granična frekvencija oko 930 kHz, što je manje nego gore izračunata vrednost, ali ipak opravdava aproksimaciju koja je činjena.

3.12.3 Napomene o analizi i osobinama višestepenih pojačavača

U ovom odeljku biće navedene neke specifičnosti analize višestepenih pojačavača kao i neki opšti zaključci o njihovim osobinama.

Razmotrimo najpre analizu pojačavača koji nije unilateralan. Na osnovu dosadašnjeg izlaganja može se zaključiti da ovakav pojačavač ne može da bude analiziran drugačije nego upotrebom univerzalnog postupka za analizu kola. Ovde će biti pokazano da se ipak može obaviti analiza ovakvog pojačavača uz primenu odgovarajuće procedure koja, naravno, ne može biti preporučena kada se analizira suviše složeno kolo kao što je dvostepeni pojačavač na visokim frekvencijama. Najpre će biti ponovo razmotren dvostepeni pojačavač sa bipolarnim tranzistorima na srednjim frekvencijama propusnog opsega. Ako se upotrebi hibridni model, na osnovu Sl. 3.12.8, nastaje kolo prikazano na Sl. 3.12.10. Za ovo kolo možemo pisati

$$(3.12.22) \quad A_0 = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p J_p}{(R_g + R'_B) J_g} = -\frac{R_p}{R_g + R'_B} A_{s0}$$

gde je $R'_B = R_B R_{u1} / (R_B + R_{u1})$. Ostaje da se odredi R_{u1} i A_{s0} . Ulazna otpornost prvog stepena data je sa

$$(3.12.23) \quad R_{u1} = \frac{h_{11E} + h_{11E} R''_C}{1 + h_{22E} R''_C}$$

pri čemu je $R''_C = R'_C R_{u2} / (R'_C + R_{u2})$, što znači da sada treba odrediti R_{u2} . Tako imamo

$$(3.12.24) \quad R_{u2} = \frac{h_{11E} + h_{11E} R'_p}{1 + h_{22E} R'_p}$$

Time su određeni svi elementi potrebni za izračunavanje ulazne otpornosti neunilateralnog pojačavača.

Za strujno pojačanje možemo pisati

$$(3.12.25) \quad A_{s0} = \frac{J_p}{J_g} = \frac{J_p}{J_g} \frac{J_{C2}}{J_2} \frac{J_2}{J_{C1}} \frac{J_{C1}}{J_1} \frac{J_1}{J_g}$$

s tim što je $J_p / J_{C2} = R_C / (R_C + R_p)$,

$$J_{C2} / J_2 = h_{21E} / (1 + h_{22E} R'_p),$$

$$J_2 / J_{C1} = R'_C / (R'_C + R_{u2})$$

$$J_{C1} / J_1 = h_{21E} / (1 + h_{22E} R''_C)$$

i $J_1 / J_g = R_B / (R_B + R_{u1})$.

Treba napomenuti da će isti postupak biti primenjiv i ako su h-parametri tranzistora funkcije frekvencije (na niskim ili na visokim frekvencijama).

Ekvivalentni postupak može da bude primenjen i na pojačavače sa FETima.

Na osnovu kola sa Sl. 3.12.2, smenom modela tranzistora, dobija se kolo sa Sl. 3.12.11. Analizom ovog kola lako dobijamo

$$(3.12.26) \quad A_0 = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_1} \frac{V_1}{V_u} \frac{V_u}{V_g},$$

gde je $V_p/V_1 = -SR_i R''_D / (R_i + R''_D)$

$$V_1/V_u = -SR_i R'_D / (R_i + R'_D)$$

$$i \quad V_u/V_g = R_G / (R_G + R_G).$$

Na sličan način mogu se analizirati i višestepeni pojačavači koji nisu konstituisani samo od osnovnih pojačavača sa zajedničkim sorsom.

Razmotrimo sada neke specifičnosti vezane za određivanje granične frekvencije. Naime, dešavalo se više puta da izraz za pojačanje makar u drugoj aproksimaciji, sadrži samo višestruke nule i polove ili samo višestruke polove. U takvim situacijama granična frekvencija može da se odredi na jednostavan način.

Na niskim frekvencijama obično nastaje sledeći izraz za pojačanje

$$(3.12.27) \quad A_n = A_0 \left(\frac{jf/f_n}{1 + jf/f_n} \right)^r = \frac{A_0}{(1 - jf_n/f)^r}$$

Ako je tako, granična frekvencija se dobija kao

$$(3.12.28) \quad f_g = f_n / \sqrt{\sqrt{2} - 1}.$$

Na sličan način određujemo graničnu frekvenciju ako je pojačanje na visokim frekvencijama dato sa

$$(3.12.29) \quad A_v = A_0 / (1 + jf/f_v)^r.$$

Za graničnu frekvenciju dobija se

$$(3.12.30) \quad f_g = f_v \cdot \sqrt{\sqrt{2} - 1}.$$

Analizom izraza (3.12.28) i (3.12.30) lako zaključujemo da pri kaskadnom sprezanju identičnih pojačavača dolazi do sužavanja propusnog opsega i sa gornje i sa donje strane. Višestepeni pojačavač uvek ima uži propusni opseg od osnovnog pojačavača sa najužim propusnim opsegom koji učestvuje u kaskadi. Naravno, pojačanje na centralnoj frekvenciji propusnog opsega, ili tzv. nominalno pojačanje, jednako je proizvodu nominalnih pojačanja kaskadno vezanih stepeni. Na osnovu ovoga zaključujemo da se kaskadnom spregom mogu ostvariti vrlo velika pojačanja, ali se pri tome gubi na propusnom opsegu. Stoga je od velikog značaja da se raspolaže sa takvim komponentama (tranzistorima) koji omogućavaju da se što veće pojačanje i što širi propusni opseg dobije u okviru jednog osnovnog stepena.

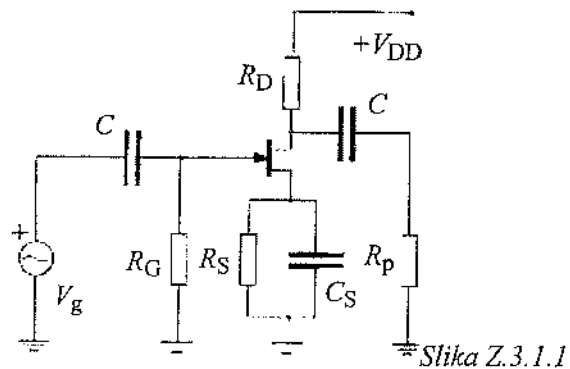
Najzad, biće napravljeno malo poredjenje pojačavača koji koriste BJT i JFET kao pojačavački element. Posmatranjem karakteristika i brojnih vrednosti koje su date u ovom i prethodnom odeljku, zaključujemo da pojačavač sa BJT, zbog toga što BJT ima znatno veću strminu od JFET-a, daje neuporedivo veće pojačanje. U primerima dvostepenih pojačavača iz ove glave pojačavač sa BJT ima za oko 20 dB veće pojačanje nego pojačavač sa JFET-om. Pri tome kod ovog drugog uzeta je znatno veća otpornost za R_p , što

uvećava njegovo pojačanje u velikoj meri.

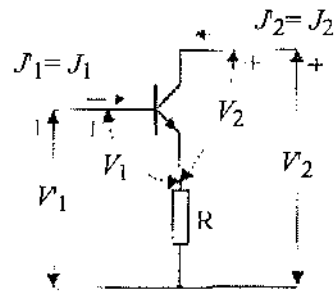
U isto vreme, pojačavač sa JFET-om ispoljava širi propusni oseg. Treba, međjutim, imati u vidu da je dobitak na širini u propusnom opsegu (odnos propusnih opsega 1:4), znatno manji od gubitka na pojačanju. Stoga se u elektronici najčešće koriste višestepeni pojačavači sa bipolarnim tranzistorima, a JFET i MOSFET će biti upotrebljeni samo tamo gde to nalažu neki dodatni zahtevi.

3.13 ZADACI

Zadatak 3.1. Na Sl. Z.3.1.1 prikazano je kolo pojačavača sa JFET-om u spoju sa zajedničkim sorsom. Napisati izraz za trenutnu vrednost napona na drejnu tranzistora i potrošaču ako je poznato: $V_{DD}=12$ V, $R_g=1$ M Ω , $R_D=1$ k Ω , $R_p=1$ k Ω , $R_S=0.2$ k Ω , $v_g = V_{gm} \cos(\omega t)$, $V_{gm} = 1$ mV i $C \rightarrow \infty$. Poznate su izlazne karakteristike tranzistora u spoju sa zajedničkim sorsom i prikazane su na Sl. Z.3.1.2. Smatrati da je frekvencija signala takva da reaktivne osobine kola ne dolaze do izražaja (srednje frekvencije).



Slika Z.3.1.1



Slika Z.3.2.1

Zadatak 3.2.

a) Odrediti ekvivalentne h parametre za kolo sa Sl. Z.3.2.1 ako su h parametri aktivnog elementa poznati.

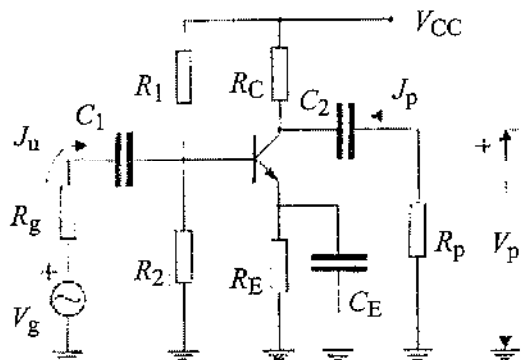
b) Dobijene izraze za ekvivalentne h parametre uprostiti uz uslov da su parametri h_{12} i h_{22} bipolarnog tranzistora jednaki nuli.

Zadatak 3.3. Na Sl. Z.3.3.1 prikazan je jednostepeni pojačavač sa zajedničkim emitorom. Parametri tranzistora su: $h_{11E}=2$ k Ω , $h_{12E}=20 \cdot 10^{-4}$, $h_{21E}=50$ i $h_{22E}=50$ μ A/V. Odrediti sledeće osobine pojačava-

ča na srednjim frekvencijama:

- Strujno pojačanje $A_s = J_p / J_u$,
- Ulaznu otpornost $R_u = V_g / J_u$,
- Izlaznu otpornost $R_{iz} = V_p / J_p$,
- Naponsko pojačanje $A = V_p / V_g$.

Poznato je $R_g = 600 \Omega$, $R_C = R_p = 5 \text{ k}\Omega$, $R_1 = R_2 \rightarrow \infty$, $C_1 = C_2 = C_E \rightarrow \infty$.



Sl. Z.3.3.1

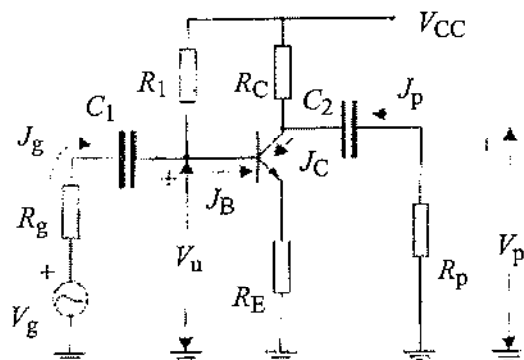
Zadatak 3.4. Kolo na Sl. Z.3.4.1 predstavlja jedno-stepeni pojačavač sa bipolarnim tranzistorom. Pretstavljajući da su kapacitivnosti kondenzatora C_1 i C_2 vrlo velike, odrediti:

- Ulaznu otpornost tranzistora $R_u = V_u / J_B$,
- Izlaznu otpornost tranzistora $R_{iz} = V_p / J_C$,
- Strujno pojačanje $A_s = J_p / J_g$,
- Naponsko pojačanje $A = V_p / V_g$.

Parametri tranzistora su

- $h_{11E} = 1.1 \text{ k}\Omega$, $h_{12E} = 25 \cdot 10^{-4}$, $h_{21E} = 50$, $h_{22E} = 25 \mu\text{A/V}$.
- $g_m = 40 \text{ mA/V}$, $r_\mu = 2.5 \text{ M}\Omega$, $r_C = 160 \text{ k}\Omega$, $r_\pi = 1250 \Omega$ i $r_B = 550 \Omega$.

Elementi kola su: $R_p = R_C = 20 \text{ k}\Omega$, $R_g = 1 \text{ k}\Omega$, $R_1 = 150 \text{ k}\Omega$, $R_E = 1 \text{ k}\Omega$.



Slika Z.3.4.1

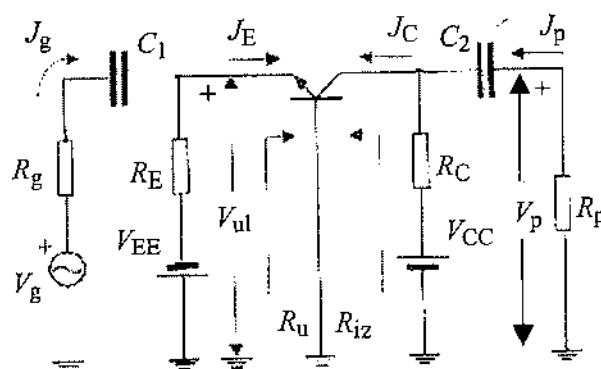
Zadatak 3.5. Na Sl. Z.3.5.1 prikazan je pojačavač u spoju sa zajedničkom bazom. Parametri tranzistora su:

- $h_{11B} = 30 \Omega$, $h_{12B} = 250 \cdot 10^{-6}$, $h_{21B} = -0.982$ i $h_{22B} = 0.35 \mu\text{A/V}$.
- $g_m = 50 \text{ mA/V}$, $r_\pi = 1091 \Omega$, $r_B = 576 \Omega$, $r_C = 120 \text{ k}\Omega$ i $r_\mu = 3.3 \text{ M}\Omega$.

Odrediti:

- ulaznu otpornost tranzistora $R_u = V_u / J_E$,
- izlaznu otpornost tranzistora $R_{iz} = (V_p / J_C) |_{V_g=0}$,
- strujno pojačanje $A_s = J_p / J_g$, i
- naponsko pojačanje $A = V_p / V_g$.

Elementi kola su $R_g = 50 \Omega$, $R_C = R_p = 10 \text{ k}\Omega$, $R_E = 100 \Omega$, $C_1 = C_2 \rightarrow \infty$.

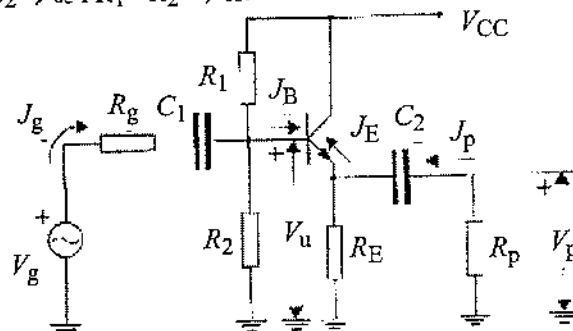


Sl. Z.3.5.1

Zadatak 3.6. Na Sl. Z.3.6.1 prikazan je pojačavač u spoju sa zajedničkim kolektorom. Poznati su parametri tranzistora:

- $h_{11C} = 1.8 \text{ k}\Omega$, $h_{12C} = 1$, $h_{21C} = -81$, $h_{22C} = 40 \mu\text{A/V}$ i
- $g_m = 50 \text{ mA/V}$, $r_\pi = 1600 \Omega$, $r_B = 200 \Omega$, $r_C = 25 \text{ k}\Omega$ i $r_\mu = \infty$.

Elementi kola: $R_p = R_E = 10 \text{ k}\Omega$, $R_g = 600 \Omega$, $C_1 = C_2 \rightarrow \infty$ i $R_1 = R_2 \rightarrow \infty$.



Sl. Z.3.6.1

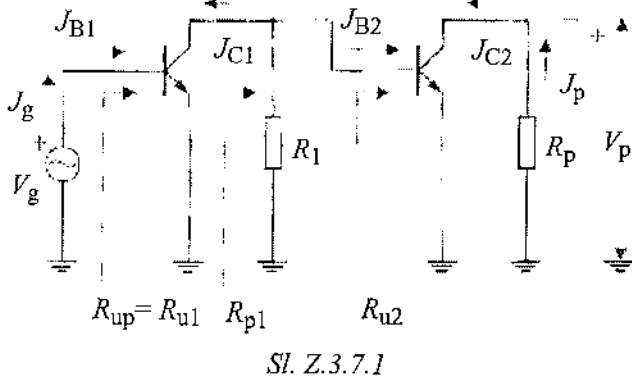
Odrediti:

- ulaznu otpornost tranzistora $R_u = V_u / J_B$,
- izlaznu otpornost tranzistora $R_{iz} = (V_p / J_E) |_{V_g=0}$,
- strujno pojačanje $A_s = J_p / J_g$,
- naponsko pojačanje $A = V_p / V_g$.

Zadatak 3.7. Na Sl. Z.3.7.1 prikazana je šema kola za naizmenični signal dvostepenog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima. Upotrebljeni tranzistori su identični, poznatih h_E parametara: $h_{11E}=1\text{ k}\Omega$, $h_{21E}=2\cdot 10^{-4}$, $h_{22E}=100$ i $h_{22E}=25\text{ }\mu\text{A/V}$. Odrediti:

- ulaznu otpornost pojačavača $R_{up}=V_g/J_g$,
- naponsko pojačanje $A=V_p/V_g$,
- strujno pojačanje $A_s=J_p/J_g$.

Otpornici u kolu imaju vrednost: $R_1=R_p=10\text{ k}\Omega$.

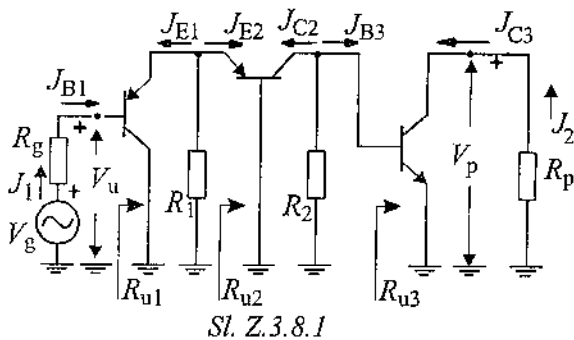


Zadatak 3.8. Šema kola za naizmenični signal trostepenog pojačavača prikazana je na na Sl. Z.3.8.1. Upotrebljeni su identični bipolarni tranzistori čiji su parametri:

- $h_{11E}=3\text{ k}\Omega$, $h_{12E}=10^{-4}$, $h_{21E}=75$, $h_{22E}=1/30\text{ mA/V}$.
- $g_m=34\text{ mA/V}$, $r_\pi=2200\text{ }\Omega$, $r_B=300\text{ }\Omega$, $r_C=33\text{ k}\Omega$ i $r_\mu=22\text{ M}\Omega$.

Odrediti strujno $A_s=J_2/J_1$ i naponsko $A=V_p/V_u$ pojačanje pojačavača.

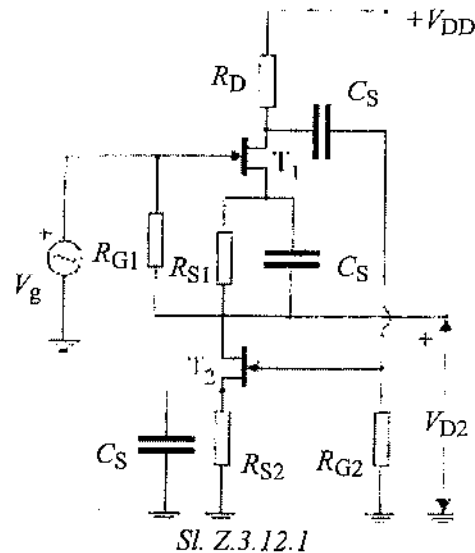
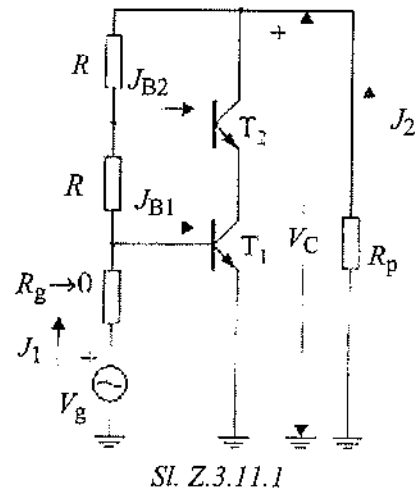
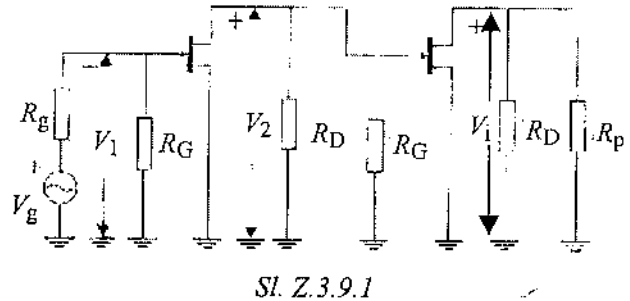
Poznato je $R_g=4\text{ k}\Omega$, $R_1=50\text{ }\Omega$, $R_2=20\text{ k}\Omega$, $R_p=300\text{ }\Omega$.



Zadatak 3.9. Na Sl. Z.3.9.1 prikazano je kolo za naizmenični signal na srednjim frekvencijama propusnog opsega, dvostepenog pojačavača sa JFET-ima. Odrediti naponsko pojačanje datog pojačavača, ako je poznato: $R_D=R_p=1\text{ k}\Omega$, $R_G=1\text{ M}\Omega$ i $R_g=1\text{ k}\Omega$. Parametri tranzistora su: $R_i=10\text{ k}\Omega$ i $S=10\text{ mS}$.

Zadatak 3.10. Na Sl. Z.3.10.1 prikazano je kolo za naizmenični signal trostepenog pojačavača sa JFET-

ima. Odrediti ukupno naponsko pojačanje ($A=V_p/V_g$) ako su upotrebljeni identični tranzistori sa parametrima: $S=10\text{ mS}$ i $R_i=4\text{ k}\Omega$. Elementi kola su: $R_1=40\text{ }\Omega$, $R_2=30\text{ k}\Omega$, $R_D=1\text{ k}\Omega$, $R_p=0.5\text{ k}\Omega$ i $R_G \gg R_g$. [Slika 3.10.1 data je uz rešenje zadatka]

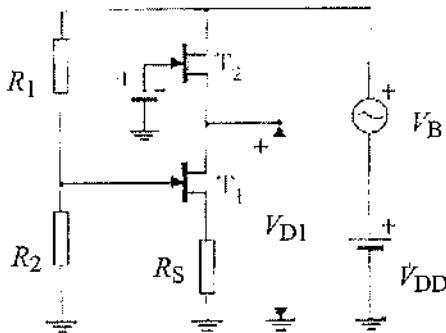


Zadatak 3.11. U kolu kaskodnog pojačavača čija je principijelna šema za naizmenični signal data na Sl. Z.3.11.1 upotrebljeni su identični tranzistori kod kojih su h_{12E} i h_{22E} zanemarljivo mali ($h_{12E}=0$ i $h_{22E}=0$). Ako su poznate vrednosti otpornika u kolu, odrediti naponsko pojačanje $A=V_C/V_g$ i ulaznu otpornost pojačavača $R_u=V_g/J_1$. Poznato je: $R=100$

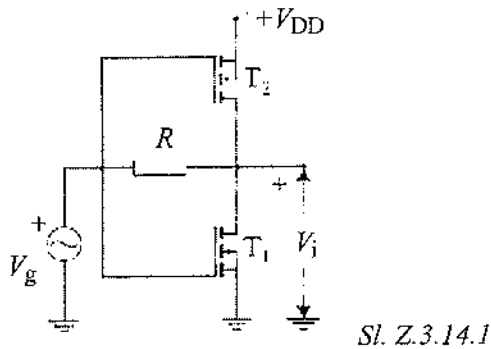
$k\Omega$, $R_p=10\text{ k}\Omega$, $h_{11E}=1\text{ k}\Omega$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=50$ i $h_{22E}=0\text{ S}$.

Zadatak 3.12. U pojačavaču na Sl. Z.3.12.1 upotrebljeni su tranzistori čiji su parametri S_1 , R_{i1} i S_2 , R_{i2} . Smatrati da su reaktanse kondenzatora veoma male za frekvenciju pobudnog signala. Odrediti naponsko pojačanje $A=V_{D2}/V_g$. Smatrati da su R_{G1} , $R_{G2} \rightarrow \infty$. Generisati približan izraz za specijalni slučaj kada su parametri tranzistora identični ($\mu_1=\mu_2=\mu$ i $R_{i1}=R_{i2}=R_i$) i kada je $\mu \gg 1$.

Zadatak 3.13. Napon V_B u kolu sa Sl. Z.3.13.1 predstavlja naizmeničnu komponentu nedovoljno filtriranog napona dobijenog iz mrežnog usmerača kojim se napaja pojačavač. Odrediti odnos R_1/R_2 tako da naizmenična komponenta na drejnu prvog tranzistora V_{D1} , koja potiče od napona V_B bude jednaka nuli. Upotrebljeni tranzistori su identični, poznatih parametara S i R_i .



Sl. Z.3.13.1



Sl. Z.3.14.1

Zadatak 3.14. Odrediti izraz za naponsko pojačanje pojačavača sa Sl. Z.3.14.1 ako su parametri tranzistora identični, a vrednost otpornika R jednaka unutrašnjoj otpornosti tranzistora R_i . Parametri S i R_i tranzistora su poznati.

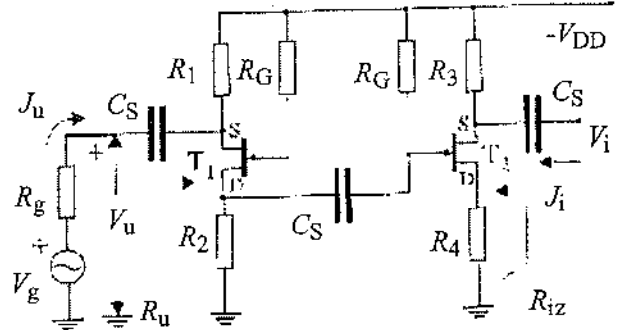
Zadatak 3.15. Za kolo prikazano na Sl. Z.3.15.1 odrediti:

- a) strminu tranzistora,
- b) naponsko pojačanje kola $A=V_i/V_g$,

c) ulaznu otpornost kola $R_u=V_u/J_u$,

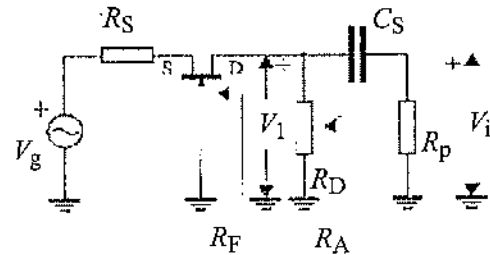
d) izlaznu otpornost kola $R_{iz}=V_i/J_i$.

Poznato je $R_g=0.6\text{ k}\Omega$, $R_1=0.6\text{ k}\Omega$, $R_2=4\text{ k}\Omega$, $R_3=3.6\text{ k}\Omega$, $R_4=10\text{ k}\Omega$, $R_G \rightarrow \infty$, $C_S \rightarrow \infty$, $V_{DD}=12\text{ V}$. Parametri tranzistora su $V_p=-2.4\text{ V}$, $I_{DSS}=8\text{ mA}$ i $R_i \rightarrow \infty$.

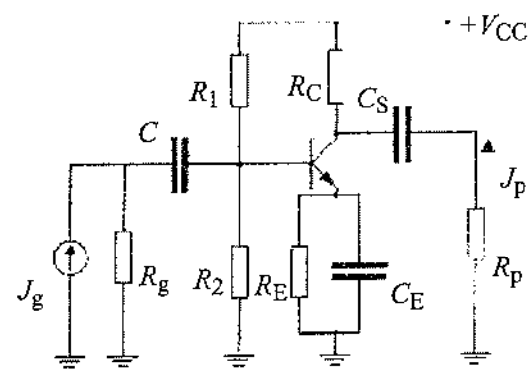


Sl. Z.3.15.1

Zadatak 3.16. JFET upotrebljen u pojačavaču čija je šema za naizmenične signale data na Sl. Z.3.16.1 ima parametre $\mu=30$, $R_i=8\text{ k}\Omega$. Elementi kola su $R_S=1\text{ k}\Omega$, $R_D=20\text{ k}\Omega$, $R_p=100\text{ k}\Omega$ i $C_S=0.1\text{ }\mu\text{F}$. Naći moduo i argument naponskog pojačanja u funkciji frekvencije, i odrediti donju graničnu frekvenciju pojačavača.



Sl. Z.3.16.1

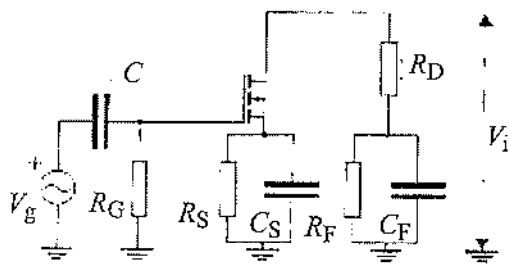


Sl. Z.3.17.1

Zadatak 3.17. Tranzistor u kolu sa Sl. Z.3.17.1 ima parametre: $h_{11E}=1.5\text{ k}\Omega$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0\text{ S}$. Elementi kola su: $R_C=2\text{ k}\Omega$, $R_1=60\text{ k}\Omega$, $R_2=30\text{ k}\Omega$, $R_p=2\text{ k}\Omega$, $R_E=1\text{ k}\Omega$, $R_g=2\text{ k}\Omega$ i $C \rightarrow \infty$. Odrediti strujno pojačanje $A_s=J_p/J_g$:

- a) na srednjim frekvencijama $A_{s0}=J_p/J_g$, ako se uticaj svih kondenzatora u kolu može zanemariti,
- b) ako je $C_E=100\ \mu\text{F}$, $C_S\rightarrow\infty$,
- c) ako je $C_E\rightarrow\infty$, $C_S=1\ \mu\text{F}$,
- d) ako je $C_E=100\ \mu\text{F}$, $C_S=1\ \mu\text{F}$.

Zadatak 3.18. Na Sl. Z.3.18.1 prikazano je kolo pojačavača za naizmenični signal. Odrediti vrednost otpornika R_F i kondenzatora C_F tako da naponsko pojačanje na niskim frekvencijama $A=V_i/V_g$, bude nezavisno od frekvencije. Poznato je $S=10\ \text{mS}$, $R_i\rightarrow\infty$, $R_D=2\ \text{k}\Omega$, $R_S=200\ \Omega$, $C_S=200\ \mu\text{F}$, $R_G\rightarrow\infty$ i $C\rightarrow\infty$.

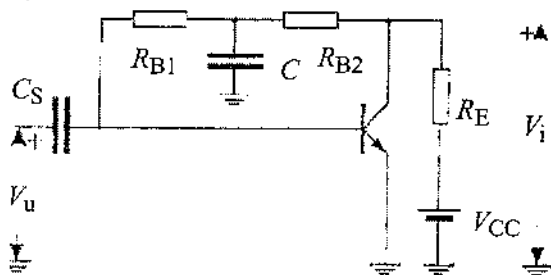


Sl. Z.3.18.1

Zadatak 3.19. Za kolo pojačavača sa Sl. Z.3.19.1 odrediti naponsko pojačanje $A=V_i/V_u$ u funkciji kompleksne frekvencije. Brojne vrednosti su:

1. $h_{11E}=1\ \text{k}\Omega$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=50$, $h_{22E}=0\ \text{S}$,
2. $g_m=62.5\ \text{mA/V}$, $r_\pi=800\ \Omega$, $r_B=200\ \Omega$, $r_C\rightarrow\infty$, $r_\mu\rightarrow\infty$

i $R_{B1}=7\ \text{k}\Omega$, $R_{B2}=6\ \text{k}\Omega$, $R_C=300\ \Omega$, $C=10\ \mu\text{F}$ i $C_S\rightarrow\infty$.



Sl. Z.3.19.1

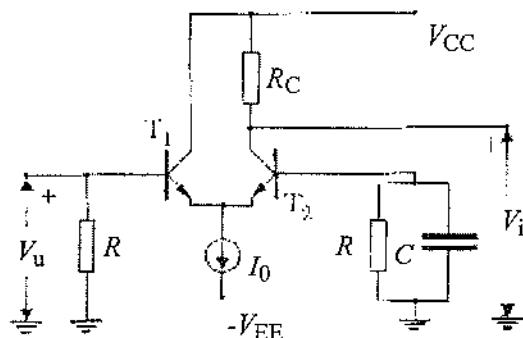
Zadatak 3.20. Asimptotskom aproksimacijom nacrtati karakteristike koje odgovaraju sledećim prenosnim funkcijama:

- a) $A_1(f) = \frac{A_0}{(1 - j f_n/f) \cdot (1 + j f/f_v)}$
- b) $A_2(f) = \frac{A_1(f)}{1 - A_1(f) \cdot B_0}$

Dato je: $A_0=100$, $B_0=0.1$, $f_n=100\ \text{Hz}$, $f_v=10\ \text{kHz}$.

Zadatak 3.21. Odrediti vrednost otpornika R u kolu sa Sl. Z.3.21.1 tako da se nula i pol prenosne funkcije

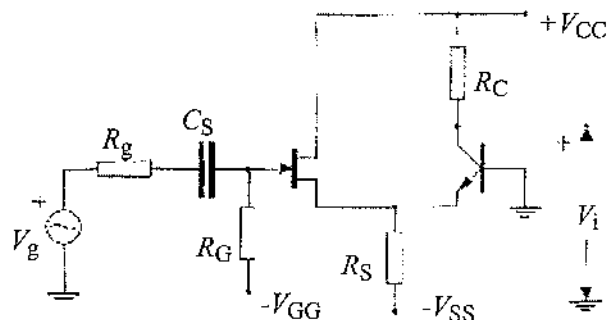
je naponskog pojačanja $A(s)=V_i(s)/V_u(s)$ razlikuju za jednu dekadu. Zatim nacrtati asimptotsku amplitudsku i faznu karakteristiku pojačavača. Tranzistori u kolu su jednaki sa $h_{11}=1\ \text{k}\Omega$, $h_{21E}=100$, $h_{12E}=0$, $h_{22E}=0\ \text{S}$. Elementi kola su $C=1\ \mu\text{F}$ i $R_C=1\ \text{k}\Omega$.



Sl. Z.3.21.1

Zadatak 3.22. Za kolo prikazano na Sl. Z.3.22.1 naći naponsko pojačanje $A=V_i/V_u$ na niskim, srednjim i visokim frekvencijama, a zatim skicirati asimptotsku aproksimaciju amplitudske karakteristike tog pojačanja. Odrediti donju i gornju graničnu frekvenciju pojačavača. Pri tome smatrati da su kapacitivnosti bipolarnog tranzistora zanemarive.

Poznato je: $R_g=600\ \Omega$, $R_G=10\ \text{M}\Omega$, $R_S=1\ \text{M}\Omega$, $R_C=5.6\ \text{k}\Omega$ i $C_S=100\ \text{nF}$. Parametri tranzistora su: $S=3.5\ \text{mS}$, $R_i=40\ \text{k}\Omega$, $C_{GS}=C_{GD}=3\ \text{pF}$, $C_{DS}=0\ \text{pF}$ za JFET, i $h_{11E}=1\ \text{k}\Omega$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$, $h_{22E}=0\ \text{S}$ za bipolarni tranzistor.



Sl. Z.3.22.1

Zadatak 3.23. Za kolo prikazano na Sl. Z.3.23.1 odrediti:

- a) strmine tranzistora T_1 i T_2 ,
- b) naponsko pojačanje u funkciji kompleksne frekvencije: $A = V_1(s)/[V_1(s) - V_2(s)]$,
- c) nacrtati asimptotsku aproksimaciju amplitudske karakteristike,
- d) nacrtati faznu karakteristiku,
- e) odrediti donju graničnu frekvenciju kola.

Poznato je: $R_D=6\ \text{k}\Omega$, $R=8\ \text{k}\Omega$, $R_B=200\ \text{k}\Omega$, $R_E=1\ \text{k}\Omega$, $C=1\ \text{nF}$, $C_S\rightarrow\infty$, $V_{DD}=V_{SS}=10\ \text{V}$. Parametri

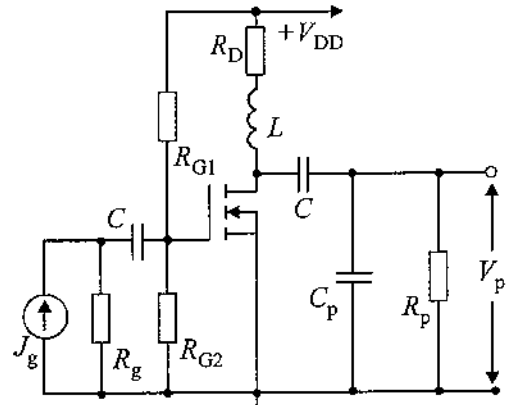
MOSFET-a su: $A_1=A_2=1 \text{ mA/V}^2$, $V_T=2 \text{ V}$, $A_3=A_4=0.5 \text{ mA/V}^2$ i $R_T \rightarrow \infty$. Parametri bipolarnog tranzistora su: $h_{11E}=1 \text{ k}\Omega$, $h_{12E}=0$, $h_{21E}=100$ i $h_{22E}=0 \text{ S}$.

Zadatak 3.24. Na Sl. Z. 3.24.1 prikazan je širokopojasni pojačavač sa zajedničkim sorsom koji u kolu drejna ima ugrađenu induktivnost. Namena ove induktivnosti je uobličavanje amplitudske karakteristike na niskim frekvencijama.

a) Odrediti transimpedansu $Z_T=V_p/J_g$ u simboličkom obliku i napisati je kao

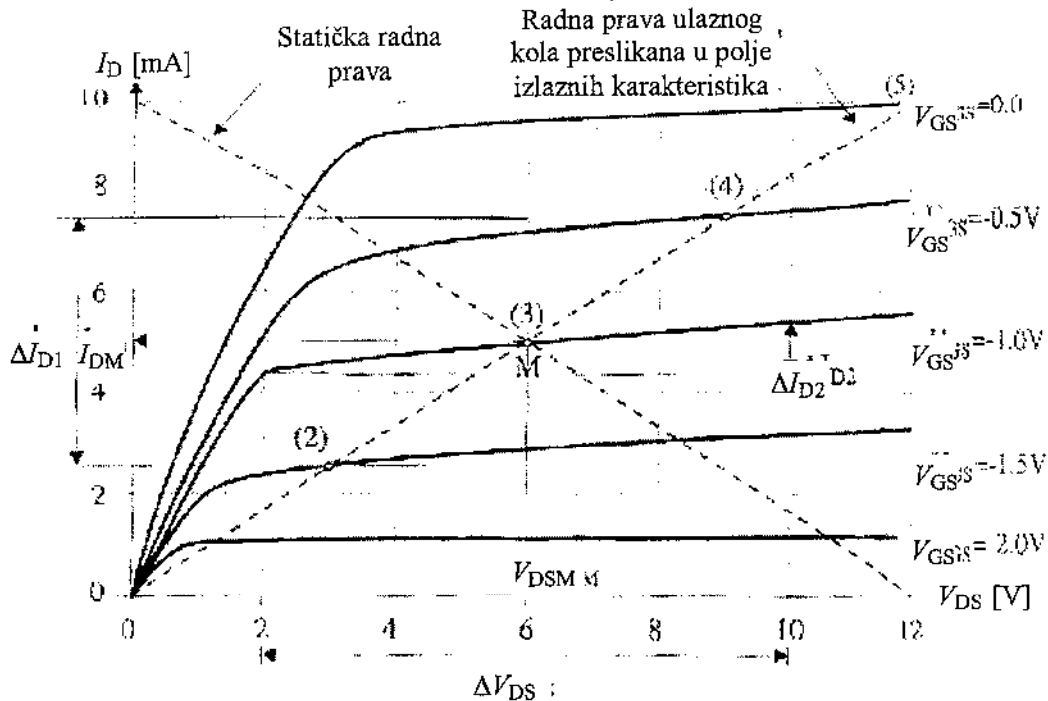
$$(Z.3.24.1) \quad Z_T = Z_T(0) \frac{1 + b_1 s + b_2 s^2}{1 + a_1 s + a_2 s^2 + a_3 s^3}$$

b) Odrediti L tako da bude ispunjen uslov $|a_1|=|b_1|$.



Sl. Z. 3.24.1

Poznato je $R_g=1 \text{ k}\Omega$, $R_D=2 \text{ k}\Omega$, $R_p=R_{G1}=R_{G2}=\infty$, $S=5 \text{ mA/V}$, $R_T=20 \text{ k}\Omega$, $C_{GS}=1 \text{ pF}$, $C_{GD}'=0.1 \text{ pF}$, $C_{DS}=2 \text{ pF}$, $C_p=3 \text{ pF}$, $C=\infty$.



Sl. Z.3.1.2

3.14 REŠENJA ZADATAKA

Rešenje zadatka 3.1 Da bi odredili vremensku zavisnost napona na drejnu tranzistora i potrošaču, treba odrediti njihove jednosmerne i naizmenične komponente.

a) Jednosmerna analiza:

Na Sl. Z.3.1.3 prikazano je kolo za jednosmerni režim. Kako su poznate samo izlazne karakteristike, rešenje će se dobiti u preseku radne prave za izlazno kolo i radne prave za ulazno kolo preslikane u polje izlaznih karakteristika.

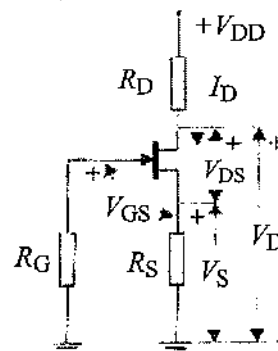
Na osnovu (2.2.2) radna prava za ulazno kolo data je sa:

$$(Z.3.1.1) \quad V_{GS} = -R_S \cdot I_D,$$

a na osnovu (2.2.1) radna prava za izlazno koje data je sa :

$$(Z.3.1.2) \quad V_{DS} = V_{DD} - (R_S + R_D) \cdot I_D$$

Smenom (Z.3.1.1) u (Z.3.1.2) dobija se:



Sl. Z.3.1.3

$$(Z.3.1.3) \quad V_{DS} = V_{DD} + (1 + R_D / R_S) \cdot V_{GS}$$

Zamenom brojnih vrednosti za R_D i R_S dobija se:

$$(Z.3.1.4) \quad V_{DS} = V_{DD} + 6 \cdot V_{GS}$$

Smenom brojnih vrednosti V_{GS} za koje su prikazane karakteristike na Sl. Z.3.1.2, izračunavaju se vrednosti za V_{DS} (tabela Z.3.1.1).

Tabela Z.3.1.1

V_{GS} [V]	0	-0.5	-1	-1.5	-2
V_{DS} [V]	12	9	6	3	0

Na osnovu ovih vrednosti nacrtana je radna prava za izlazno kolo preslikana u polje izlaznih karakteristika.

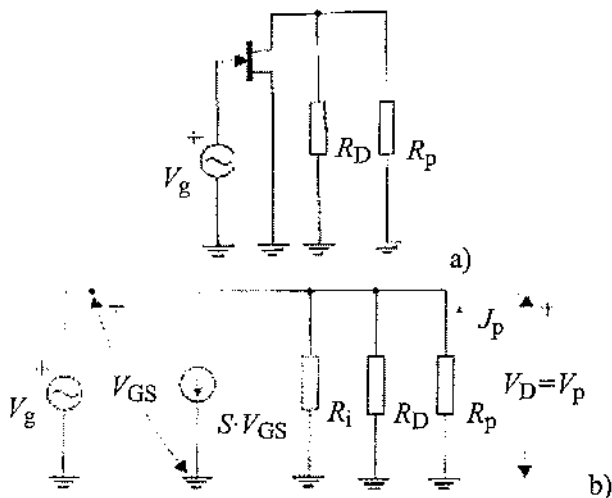
Radna prava za izlazno kolo može se nacrtati na osnovu (Z.3.1.2). Najlakše je provući pravu kroz odsečke na koordinatnim osama i to:

$$(Z.3.1.5) \quad I_D = \frac{V_{DD}}{R_S + R_D} = 10 \text{ mA}, \quad V_{DS} = 0$$

$$(Z.3.1.6) \quad I_D = 0, \quad V_{DS} = V_{DD}$$

Sa Sl. Z.3.1.2 mogu se očitati jednosmerne komponente veličina u radnoj tački: $I_{DM} = 5 \text{ mA}$, $V_{DSM} = 6 \text{ V}$, $V_{GSM} = -1 \text{ V}$, $V_{DM} = V_{DD} - R_D I_{DM} = 7 \text{ V}$.

Na osnovu izlaznih karakteristika određujemo parametre modela tranzistora za male signale, najpre strminu:



Sl. Z.3.1.4

$$(Z.3.1.7) \quad S = \frac{\partial I_D}{\partial V_{GS}} = \frac{\Delta I_D}{\Delta U_{GS} | \Delta V_{DS}=0} = \frac{\Delta I_{D1}}{\Delta U_{GS} | V_{DS}=6V} = 4.4 \text{ mS}$$

a zatim i izlaznu otpornost:

$$(Z.3.1.8) \quad R_i = \frac{\partial V_{DS}}{\partial I_D} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_D} \Big|_{\Delta V_{GS}=0} = \frac{\Delta V_{DS}}{\Delta I_{D2} | V_{GS}=-1V} = 8 \text{ k}\Omega$$

b) Naizmjenična analiza:

Na Sl. Z.3.1.4a dato je odgovarajuće kolo za naizmjenični režim, a na Sl. Z.3.1.4b prikazano je ekvivalentno kolo koje nastaje zamenom modela tranzistora.

Sa Sl. je očigledno da je:

$$(Z.3.1.9) \quad V_{GS} = V_G,$$

a rešavanjem jednačine za čvor drejna dobija se:

$$(Z.3.1.10) \quad J_p = \frac{R_i \parallel R_D}{R_p + R_i \parallel R_D} \cdot S \cdot V_{GS},$$

pa se napon na potrošaču dobija iz:

$$(Z.3.1.11) \quad V_p = -R_p J_p = -\frac{R_i \parallel R_D}{R_p + R_i \parallel R_D} \cdot S \cdot R_p V_g$$

Smenom brojnih vrednosti u (Z.3.1.11) dobija se da je napon na potrošaču (za $V_{gm}=1 \text{ mV}$):

$$V_p - V_D = -2 \text{ mV}$$

Gore data vrednost napona V_p može da se posmatra kao kompleksan broj, te minus predstavlja fazni pomeraj od π u odnosu na ulazni napon V_g .

Izraz za trenutnu vrednost napona na drejnu je:

$$(Z.3.1.12) \quad v_D(t) = V_{DM} + V_D \cdot \cos(\omega t) = 7 - 2 \cdot 10^{-3} \cdot \cos(\omega t) \text{ [V]}$$

a napon na potrošaču nema jednosmernu komponentu:

$$(Z.3.1.13) \quad v_p(t) = -2 \cdot \cos(\omega t) \text{ [mV]}$$



Rešenje zadatka 3.2

a) Jednačine ekvivalentnog četvoropola opisanog h parametarima su:

$$(Z.3.2.1) \quad V_1 = h'_{11} J_1 + h'_{12} V_2$$

$$(Z.3.2.2) \quad J_2 = h'_{21} J_1 + h'_{22} V_2,$$

dok su jednačine bipolarnog tranzistora kao četvoropola sa h parametrima:

$$(Z.3.2.3) \quad V_1 = h_{11} \cdot J_1 + h_{12} \cdot V_2,$$

$$(Z.3.2.4) \quad J_2 = h_{21} \cdot J_1 + h_{22} \cdot V_2.$$

Na osnovu kola sa Sl. Z.3.2.1 mogu se napisati izrazi za V_1 i V_2 u funkciji napona i struja ekvivalentnog četvoropola:

$$(Z.3.2.5) \quad V_1 = V_1' - R \cdot (J_1 + J_2),$$

$$(Z.3.2.6) \quad V_2 = V_2' - R \cdot (J_1 + J_2).$$

Sada se (Z.3.2.6), zajedno sa uslovom $J_1 = J_1$ može zameniti u jednačinu (Z.3.2.4), odakle se dobija:

$$(Z.3.2.7) \quad J_2 = h_{21} J_1 + h_{22} [V_2' - R \cdot (J_1 + J_2)].$$

Sređivanjem (Z.3.2.7) dobija se izraz za struju J_2 u funkciji J_1 i napona V_2 :

$$(Z.3.2.8) \quad J_2 = \frac{h_{21} - R \cdot h_{22}}{1 + h_{22} R} \cdot J_1 + \frac{h_{22}}{1 + h_{22} R} \cdot V_2.$$

Iz jednačine (Z.3.2.8) se dobijaju vrednosti za parametre h'_{21} i h'_{22} :

$$(Z.3.2.9) \quad h'_{21} = \frac{h_{21} - R \cdot h_{22}}{1 + h_{22}R} \quad \text{i} \quad h'_{22} = \frac{h_{22}}{1 + h_{22}R}$$

Na sličan način zamenom vrednosti napona (Z.3.2.5) i (Z.3.2.6) i struja tranzistora u (Z.3.2.3) preko istog ekvivalentnog kola dobija se:

$$(Z.3.2.10) \quad V'_1 - R \cdot (J'_1 + J'_2) = h_{11}J'_1 + h_{12}[V'_2 - R \cdot (J'_1 + J'_2)]$$

i sređivanjem:

$$(Z.3.2.11) \quad V'_1 = [h_{11} + R \cdot (1 - h_{12})] \cdot J'_1 + R \cdot (1 - h_{12}) \cdot J'_2 + h_{12}V'_2$$

Ako se (Z.3.2.8) zameni u (Z.3.2.11) dobija se druga jednačina, koja sada definiše V'_1 u funkciji J'_1 i V'_2 :

$$(Z.3.2.12) \quad V'_1 = \left[h_{11} + R(1 - h_{12}) \frac{1 + h_{21}}{1 + h_{22}R} \right] J'_1 + \left[h_{12} + R(1 - h_{12}) \frac{h_{22}}{1 + h_{22}R} \right] V'_2$$

Najzad, iz (Z.3.2.12) je lako uočiti vrednosti h_{11} i h_{12} :

$$(Z.3.2.13a) \quad h'_{11} = h_{11} + R(1 - h_{12}) \frac{1 + h_{21}}{1 + h_{22}R}$$

$$(Z.3.2.13b) \quad h'_{12} = h_{12} + R(1 - h_{12}) \frac{h_{22}}{1 + h_{22}R}$$

Napomena:

Mada je na Sl. Z.3.2.1 prikazan tranzistor sa zajedničkim emitorom, dobijeni rezultati su opšti i važe za svaku konfiguraciju kada je između zajedničke elektrode i mase priključen otpornik.

b) Ako se pretpostavi da je $h'_{12} \approx 0$ i $h'_{22} \approx 0$, što važi samo za bipolarni tranzistor u sprezi sa zajedničkim emitorom i zajedničkom bazom, dobijaju se uprošćeni izrazi za ekvivalentne h parametre: $h'_{11} \approx h_{11} + R \cdot (1 + h_{21})$, $h'_{12} = h_{12} + h_{22}R \approx 0$, $h'_{21} \approx h_{21}$ i $h'_{22} = h_{22} \approx 0$.



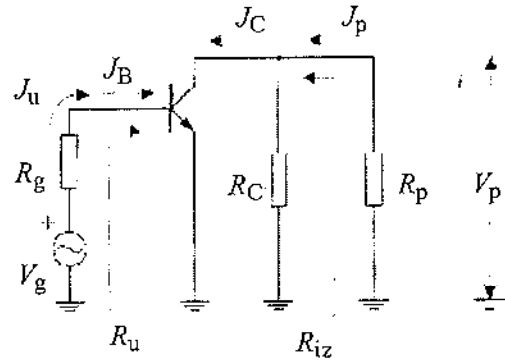
Rešenje zadatka 3.3 Za naizmenični režim kondenzatori, kao i idealni jednosmerni naponski izvori predstavljaju kratke spojeve, pa je kolo za naizmenični režim dato na Sl. Z.3.3.2.

a) Strujno pojačanje je količnik struje kroz potrošač i ulazne struje. Ovaj količnik se može rastaviti na sledeći način:

$$(Z.3.3.1) \quad A_s = \frac{J_p}{J_u} = \frac{J_p}{J_C} \cdot \frac{J_C}{J_B} \cdot \frac{J_B}{J_u}$$

Srednji član je strujno pojačanje samog tranzistora u spoju sa zajedničkim emitorom, za koje važe iz-

razi:



Sl. Z.3.3.2

$$(Z.3.3.2a) \quad \frac{J_C}{J_B} = \frac{h_{21}E}{1 + h_{22}E(R_C \parallel R_p)}$$

$$(Z.3.3.2b) \quad \frac{J_C}{J_B} = \frac{r_\pi (g_m r_\mu - 1)}{r_\pi + r_\mu + r'_C (g_m r_\pi + 1)}$$

gde je $r'_C = R_C \parallel R_p$ i $R'_p = R_C \parallel R_p$.

Prvi član u (Z.3.3.1) je običan strujni razdelnik:

$$(Z.3.3.3) \quad J_p / J_C = R_C / (R_C + R_p),$$

a zadnji član je određen time što su struje J_B i J_u jednake:

$$(Z.3.3.4) \quad J_B / J_u = 1.$$

Smenom (Z.3.3.2), (Z.3.3.3) i (Z.3.3.4) u (Z.3.3.1) dobija se:

$$(Z.3.3.5a) \quad A_s = \frac{R_C}{R_C + R_p} \cdot \frac{h_{21}E}{1 + h_{22}E(R_C \parallel R_p)} \cdot 1 \approx 24.4$$

odnosno

$$(Z.3.3.5b) \quad A_s = \frac{R_C}{R_C + R_p} \frac{g_m r_\pi}{1 + (g_m r_\pi) r'_C / r_\mu} \cdot 1 \approx 25.$$

b) Ulazna otpornost:

$$(Z.3.3.6a) \quad R_u = \frac{V_g}{J_u} = \frac{h_{11}E + \Delta h_E \cdot (R_C \parallel R_p)}{1 + h_{22}E \cdot (R_C \parallel R_p)} = 1.90 \text{ k}\Omega$$

ili

$$(Z.3.3.6b) \quad R_u = r_B + r_\pi \frac{1}{1 + \frac{r_\pi (1 + g_m r'_C)}{r_\mu + r'_C}} = 1.94 \text{ k}\Omega$$

c) Izlazna otpornost:

$$(Z.3.3.7a) \quad R_{iz} = \frac{V_p}{J_p} = \frac{h_{11}E + R_g}{\Delta h_E + h_{22}E R_g} \parallel R_C = (74.3 \text{ k}\Omega) \parallel (5 \text{ k}\Omega) = 4.7 \text{ k}\Omega$$

ili

$$R_{iz} = R_C \left\| \left\{ \frac{1}{r_C} + \frac{1}{r_\mu} \left[1 + \frac{g_m r_\mu - 1}{1 + r_\mu \left(\frac{1}{R_g + r_B} + \frac{1}{r_\pi} \right)} \right] \right\}^{-1} \right\| = 4.75 \text{ k}\Omega.$$

d) Naponsko pojačanje je količnik napona na potrošaču i napona na generatoru. Ovi naponi se mogu predstaviti preko struja, odakle se, zamenom strujnog pojačanja, dobija traženo naponsko pojačanje:

$$A = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p \cdot J_p}{(R_g + R_{ul}) \cdot J_u} = -\frac{R_p}{R_g + R_{ul}} \cdot A_s = -46.8.$$



Rešenje zadatka 3.4 Električna šema kola za naizmenični režim data je na Sl. Z.3.4.2. Na osnovu zadatka Z.3.2 mogu da se izračunaju ekvivalentni h parametri četvoropola koga čine tranzistor i emitorski otpornik R_E :

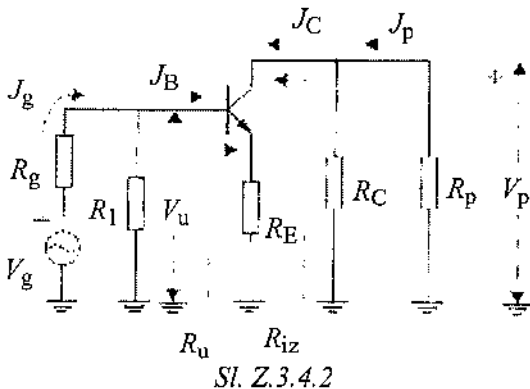
$$(Z.3.4.1) \quad h'_{11E} = h_{11E} + (1 + h_{21E}) \cdot R_E = 52.1 \text{ k}\Omega,$$

$$(Z.3.4.2) \quad h'_{12E} = h_{12E} + \frac{h_{22E} R_E}{1 + h_{22E} R_E} \approx h_{12E} + h_{22E} \cdot R_E = 25 \cdot 10^{-3},$$

$$(Z.3.4.3) \quad h'_{21E} = \frac{h_{21E} - R_E h_{22E}}{1 + h_{22E} R_E} \approx h_{21E} = 50,$$

$$(Z.3.4.4) \quad h'_{22E} = \frac{h_{22E}}{1 + h_{22E} \cdot R_E} \approx h_{22E} = 25 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}},$$

$$(Z.3.4.5) \quad \Delta h'E = h'_{11} h'_{22} - h'_{12} \cdot h'_{21} = 52.5 \cdot 10^{-3}.$$



Ako se u kolu sa Sl. Z.3.4.2 tranzistor i R_E zamene ekvivalentnim tranzistorom, kolo se svodi na ono prikazano na Sl. Z.3.3.2 pa mogu da se koriste ranije izvedeni izrazi. Dakle:

a) Ulazna otpornost tranzistora je:

$$(Z.3.4.6) \quad R_u = \frac{V_u}{J_B} = \frac{h'_{11E} + \Delta h'E (R_C \parallel R_p)}{1 + h'_{22E} (R_C \parallel R_p)} = 42 \text{ k}\Omega.$$

b) Izlazna otpornost tranzistora je:

$$(Z.3.4.7) \quad R_{iz} = \frac{V_p}{J_C} = \frac{h'_{11E} + R_g \parallel R_1}{\Delta h'E + h'_{22E} (R_g \parallel R_1)} = 685 \text{ k}\Omega.$$

c) Strujno pojačanje pojačavača dato je izrazom:

$$(Z.3.4.8) \quad A_s = \frac{J_p}{J_g} = \frac{J_p}{J_C} \cdot \frac{J_C}{J_B} \cdot \frac{J_B}{J_g} = \frac{R_C}{R_C + R_p} \cdot \frac{J_C}{J_B} \cdot \frac{R_1}{R_1 + R_{ul}}$$

gde je strujno pojačanje tranzistora:

$$(Z.3.4.9) \quad \frac{J_C}{J_B} = \frac{h'_{21E}}{1 + h'_{22E} (R_C \parallel R_p)} = 40.$$

Prema tome, strujno pojačanje pojačavača iznosi: $A_s = 15.625$.

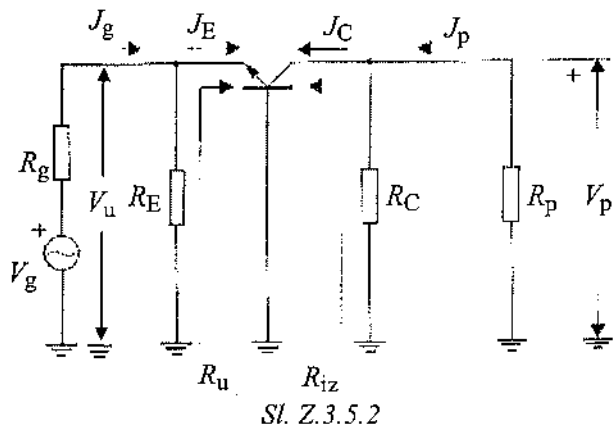
d) Naponsko pojačanje pojačavača se može predstaviti kao:

$$(Z.3.4.10) \quad A = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p J_p}{(R_g + R_1 \parallel R_{ul}) J_u} = -\frac{R_p}{R_g + R_1 \parallel R_{ul}} \cdot A_s = -9.242.$$

Može se primetiti da je naponsko pojačanje relativno malo, što je posledica uticaja otpornika u kolu emitora tranzistora.



Rešenje zadatka 3.5 Kolo za naizmenični signal dobija se kratkospajanjem izvora jednosmernih napona i kondenzatora velike kapacitivnosti i prikazano je na Sl. Z.3.5.2.



Izrazi za ulaznu i izlaznu otpornost pojačavača sa zajedničkom bazom biće uzeti iz odeljaka 3.6.3 i 3.7.4.3.

a) Stoga je ulazna otpornost tranzistora:

$$(Z.3.5.1a) \quad R_u = \frac{V_u}{J_E} = \frac{h_{11B} + \Delta h_B (R_C \parallel R_p)}{1 + h_{22B} (R_C \parallel R_p)} = 31.2 \Omega$$

Alternativno

$$(Z.3.5.1b) \quad R_u = \frac{V_u}{J_E} = \frac{(r_\pi + r_B)(r_C + R_p)}{R_p + r_C + R_0} \approx \frac{r_\pi + r_B}{1 + g_m r_\pi} = 30 \Omega$$

gde je $R_0 = r_\pi + r_B + (g_m r_\pi) r_C \approx 40.43 \text{ M}\Omega$.

b) Izlazna otpornost je:

$$(Z.3.5.2a) \quad R_{iz} = \frac{V_p}{J_C} = \frac{h_{11B} + (R_E \parallel R_g)}{\Delta h_B + h_{22B} (R_E \parallel R_g)} = 236.5 \text{ k}\Omega$$

Alternativno

$$(Z.3.5.2b) \quad R_{iz} = r_C + \frac{R_0 R'_g}{R'_g + r_B + r_\pi} = 239.9 \text{ k}\Omega$$

Pri tome je $R'_g = R_g R_E / (R_g + R_E)$.

c) Strujno pojačanje se dobija iz:

$$(Z.3.5.3) \quad A_s = \frac{J_p}{J_g} = \frac{J_p}{J_C} \cdot \frac{J_C}{J_E} \cdot \frac{J_E}{J_g}$$

Prvi i treći član se računaju iz strujnih razdelnika:

$$(Z.3.5.4) \quad J_p / J_C = R_C / (R_C + R_p) = 0.5$$

i

$$(Z.3.5.5) \quad J_E / J_g = R_E / (R_E + R_{ul}) = \begin{cases} 0.762 \\ 0.769 \end{cases}$$

Srednji član predstavlja strujno pojačanje tranzistora:

$$(Z.3.5.6a) \quad J_C / J_E = h_{21B} / [1 + h_{22B} R_C \parallel R_p] = -0.98$$

Alternativno

$$(Z.3.5.6b) \quad J_C / J_E = (-V_p / R'_p) / J_E = -1 / [1 + (r_C + R'_p) / R_0] \approx -0.982$$

pri čemu je $R'_p = R_p R_C / (R_p + R_C)$.

Smenom (Z.3.5.4), (Z.3.5.5) i (Z.3.5.6) u

$$(Z.3.5.3) \text{ dobija se da je: } A_s = \begin{cases} -0.373 \\ -0.378 \end{cases}$$

d) Naponsko pojačanje dobija se iz:

$$(Z.3.5.7) \quad A = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p J_p}{(R_g + R_E \parallel R_{ul}) \cdot J_g} = -\frac{R_p}{R_g + R_E \parallel R_{ul}} \cdot A_s = \begin{cases} 50.15 \\ 51.68 \end{cases}$$

Kao što se vidi iz (Z.3.5.1) i (Z.3.5.2), stepen sa zajedničkom bazom, karakterišu mala ulazna i

velika izlazna otpornost, te može da posluži za sprezanje realnog strujnog generatora za potrošač velike otpornosti. Ne treba zaboraviti, međutim, da paralelno sa navedenim otpornostima deluju otpornici R_E i R_C , respektivno. Tako, generator vidi paralelnu vezu R_E sa R_u , koja sada iznosi

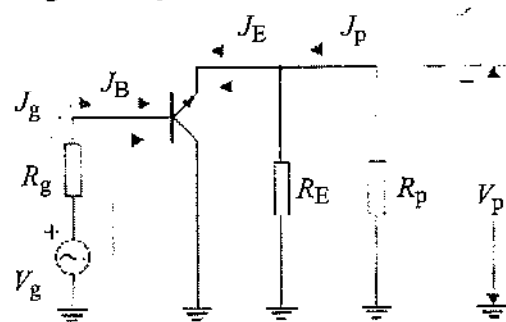
$$(31.2 \cdot 100) / (31.2 + 100) = 23.78 \Omega,$$

a potrošač vidi paralelnu vezu R_{iz} i R_C , koja sada iznosi **samo**

$$(236.5 \cdot 5) / (236.5 + 5) = 4.89 \text{ k}\Omega.$$



Rešenje zadatka 3.6 Ekvivalentno kolo za naizmenični signal dato je na Sl. Z.3.6.2.



a) Ulazna otpornost je data sa:

$$(Z.3.6.1a) \quad R_{ul} = \frac{h_{11C} + \Delta h_C (R_E \parallel R_p)}{1 + h_{22C} (R_E \parallel R_p)} = 339 \text{ k}\Omega$$

Alternativno

$$(Z.3.6.1b) \quad R_{ul} = r_C + r_\pi + (1 + g_m r_\pi) r'_C = 339.2 \text{ k}\Omega$$

gde je $r'_C = r_C \parallel R_E \parallel R_p = 4.17 \text{ k}\Omega$.

b) Izlazna otpornost:

$$(Z.3.6.2a) \quad R_{iz} = \frac{h_{11C} + R_g}{\Delta h_C + h_{22C} R_g} = 29.6 \Omega$$

Alternativno

$$(Z.3.6.2b) \quad R_{iz} \approx \frac{R_g + r_B + r_\pi}{1 + g_m r_\pi} = 29.6 \Omega$$

c) Strujno pojačanje se izračunava iz:

$$(Z.3.6.3) \quad A_s = \frac{J_p}{J_g} = \frac{J_p}{J_E} \cdot \frac{J_E}{J_B} \cdot \frac{J_B}{J_g}$$

gde je:

$$(Z.3.6.4) \quad \frac{J_p}{J_E} = \frac{R_E}{R_E + R_p}$$

$$(Z.3.6.5) \quad J_B / J_g = 1,$$

$$(Z.3.6.6a) \quad \frac{J_E}{J_B} = A_S = \frac{h_{21C}}{1 + h_{22C}(R_E \parallel R_p)}$$

Alternativno

$$(Z.3.6.6b) \quad A_S = \frac{-(g_m r_\pi + 1)r_C / (r_C + R'_p)}{1 + [r_\pi + (g_m r_\pi + 1)r'_C] / r_\mu}$$

gde je $R'_p = R_p \parallel R_E$.

Smenom zadnje tri jednačine u (Z.3.6.3) dobija se:

$$(Z.3.6.7) \quad A_S = -33.75.$$

d) Naponsko pojačanje se izračunava kao:

$$(Z.3.6.8) \quad A_n = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p J_p}{(R_g + R_{ul}) J_u} = -\frac{R_p}{R_g + R_{ul}} \cdot A_S = 0.99.$$

Stepen sa zajedničkim kolektorom ima veliku ulaznu otpornost, a malu izlaznu. Naponsko pojačanje mu je vrlo blisko jedinici, i manje od jedan. Zato se ovaj stepen koristi kao transformator impedansi između generatora velike unutrašnje otpornosti i potrošača čija je otpornost mala.



Rešenje zadatka 3.7

a) Ulazna otpornost celog pojačavača jednaka je ulaznoj otpornosti prvog stepena.

$$(Z.3.7.1) \quad R_{up} = R_{ul} = \frac{h_{11E} + \Delta h_E R_{p1}}{1 + h_{22E} R_{p1}}$$

Pri tome treba voditi računa da je otpornost potrošača prvog stepena jednaka paralelnoj vezi R_{u2} i R_1 :

$$(Z.3.7.2a) \quad R_{p1} = R_1 \parallel R_{u2}.$$

Ulazna otpornost drugog stepena se može izračunati iz:

$$(Z.3.7.2b) \quad R_{u2} = \frac{h_{11E} + \Delta h_E R_p}{1 + h_{22E} R_p} = 840 \Omega.$$

Zamenom (Z.3.7.2b) u (Z.3.7.2a), a potom i dobijenog izraza u (Z.3.7.1) dobija se vrednost ulazne otpornosti pojačavača: $R_{up} = 985 \Omega$.

b) Strujno pojačanje je količnik izlazne struje i struje generatora, i može se rastaviti na sledeći način:

$$(Z.3.7.3) \quad A_S = \frac{J_p}{J_g} = \frac{J_p}{J_{C2}} \cdot \frac{J_{C2}}{J_{B2}} \cdot \frac{J_{B2}}{J_{C1}} \cdot \frac{J_{C1}}{J_{B1}} \cdot \frac{J_{B1}}{J_g}$$

Prvi i peti član proizvoda su jedinice, jer je $J_p = J_{C2}$ i $J_{B1} = J_g$:

$$(Z.3.7.4) \quad \frac{J_p}{J_{C2}} = \frac{J_{B1}}{J_g} = 1.$$

Drugi član je strujno pojačanje drugog tranzistora:

$$(Z.3.7.5) \quad \frac{J_{C2}}{J_{B2}} = \frac{h_{21E}}{1 + h_{22E} R_p} = 80,$$

a četvrti je strujno pojačanje prvog tranzistora (opterećenje se uzima kao pri izračunavanju ulazne otpornosti):

$$(Z.3.7.6) \quad \frac{J_{C1}}{J_{B1}} = \frac{h_{21E}}{1 + h_{22E} R_{p1}} \approx 98.1.$$

Najzad, srednji član izračunava se iz strujnog razdelnika:

$$(Z.3.7.7) \quad \frac{J_{B2}}{J_{C1}} = -\frac{R_1}{R_1 + R_{u2}} = 0.922.$$

Smenom (Z.3.7.4), (Z.3.7.5), (Z.3.7.6) i (Z.3.7.7) u (Z.3.7.3) dobija se ukupna vrednost za strujno pojačanje dvostepenog pojačavača sa Sl. Z.3.7.1: $A_S = 7236$.

c) Kao i u prethodnim primerima, napone na ulazu i izlazu predstavljamo kao padove napona koje ostvaruju ulazna i izlazna struja na odgovarajućim otpornostima, R_{up} i R_p , respektivno. Dakle, naponsko pojačanje će biti jednako:

$$(Z.3.7.8) \quad A = \frac{V_p}{V_g} = \frac{-R_p J_p}{R_{up} J_g} = -\frac{R_p}{R_{up}} \cdot A_S \approx 9.34 \cdot 10^4.$$

Treba uočiti da je ukupno naponsko pojačanje pozitivna veličina, jer i prvi i drugi stepen obrću fazu.



Rešenje zadatka 3.8 U datom kolu zastupljene su sve tri vrste sprege bipolarnog tranzistora. Prvi stepen je pojačavač sa zajedničkim kolektorom, drugi je sa zajedničkom bazom, a treći sa zajedničkim emitorom.

Kako su dati h_E parametri tranzistora, potrebno je izračunati odgovarajuće h_B i h_C parametre:

$$h_{11C} = h_{11E} = 3 \text{ k}\Omega, \quad h_{12C} = 1 - h_{12E} = 1,$$

$$h_{21C} = -(1 + h_{21E}) = -76 \text{ i } h_{22C} = h_{22E} = \frac{1 \text{ mA}}{30 \text{ V}},$$

$$h_{11B} = \frac{h_{11E}}{1 + h_{21E}} = 0.04 \text{ k}\Omega,$$

$$h_{12B} = \frac{\Delta h_E - h_{12E}}{1 + h_{21E}} = \frac{1}{760},$$

$$h_{21B} = -\frac{h_{21E}}{1 + h_{21E}} = -\frac{75}{76},$$

$$h_{22B} = \frac{h_{22E}}{1 + h_{21E}} = 0.439 \frac{\mu\text{A}}{\text{V}}.$$

Najpre treba izračunati ulazne otpornosti sva tri stepena. Pri tome, polazi se od trećeg stepena jer je

njegova otpornost opterećenja poznata R_p :

$$(Z.3.8.1a) \quad R_{u3} = \frac{h_{11E} + \Delta h_E R_p}{1 + h_{22E} R_p} = 3 \text{ k}\Omega$$

ili

$$(Z.3.8.1b) \quad R_{u3} = r_B + r_\pi \left/ \left[1 + \frac{r_\pi (1 + g_m r'_C)}{r_\mu + r'_C} \right] \right. = 3 \text{ k}\Omega.$$

Ovde je $r'_C = r_C \parallel R_p$.

Drugi stepen je u sprezi sa zajedničkom bazom sa potrošačem koga čine otpornik R_2 u paraleli sa R_{u3} :

$$(Z.3.8.2a) \quad R_{u2} = \frac{h_{11B} + \Delta h_B (R_2 \parallel R_{u3})}{1 + h_{22B} (R_2 \parallel R_{u3})} = 43 \Omega$$

ili

$$(Z.3.8.2b) \quad R_{u2} = \frac{(r_\pi + r_B)(r_C + R_2 \parallel R_{u3})}{R_2 \parallel R_{u3} + r_C + R_0} \approx \frac{r_\pi + r_B}{1 + g_m r_\pi} = 43 \Omega.$$

Ovde je $R_0 = r_\pi + r_B + (g_m r_\pi) r_C$.

Najzad, za stepen sa zajedničkim kolektorom potrošač je paralelna veza otpornosti R_1 i R_{u2} , a ulazna otpornost mu je:

$$(Z.3.8.3a) \quad R_{u1} = \frac{h_{11C} + \Delta h_C (R_1 \parallel R_{u2})}{1 + h_{22C} (R_1 \parallel R_{u2})} = 4.7 \text{ k}\Omega$$

ili

$$(Z.3.8.3b) \quad R_{u1} \approx r_B + r_\pi + (1 + g_m r_\pi) r'_C = 4.7 \text{ k}\Omega.$$

Ovde je $r'_C = r_C \parallel R_{u2} \parallel R_1$.

Strujno pojačanje se nalazi rasčlanjivanjem koeficijenta izlazne i ulazne struje:

$$(Z.3.8.4) \quad A_s = \frac{J_2}{J_1} = \frac{J_2}{J_{C3}} \cdot \frac{J_{C3}}{J_{B3}} \cdot \frac{J_{B3}}{J_{C2}} \times \frac{J_{C2}}{J_{E2}} \cdot \frac{J_{E2}}{J_{E1}} \cdot \frac{J_{E1}}{J_{B1}} \cdot \frac{J_{B1}}{J_1}.$$

Pošto su $J_2 = J_{C3}$ i $J_{B1} = J_1$, to je:

$$(Z.3.8.5) \quad \frac{J_2}{J_{C3}} = \frac{J_{B1}}{J_1} = 1.$$

Dalja izračunavanja teku slično kao u prethodnim zadacima. Sledeća tri člana se izračunavaju kao odgovarajuća strujna pojačanja pojedinih tranzistora.

$$(Z.3.8.6a) \quad \frac{J_{C3}}{J_{B3}} = \frac{h_{21E}}{1 + h_{22E} R_p} = 74.26,$$

ili

$$(Z.3.8.6a) \quad \frac{J_{C3}}{J_{B3}} = \frac{g_m r_\pi r_C / (r_C + R_p)}{1 + (g_m r_\pi) r'_C / r_\mu} = 74.26.$$

Ovde je $r'_C = r_C \parallel R_p$.

$$(Z.3.8.7a) \quad \frac{J_{C2}}{J_{E2}} = h_{21B} / (1 + h_{22B} R'_2) = -0.986.$$

ili

$$(Z.3.8.7b) \quad \frac{J_{C2}}{J_{E2}} \approx -1 / [1 + (r_C + R'_2) / R_0] = -0.986.$$

Ovde je $R'_2 = R_{u3} \parallel R_2$.

$$(Z.3.8.8a) \quad \frac{J_{C1}}{J_{E1}} = h_{21C} / (1 + h_{22C} R'_1) = -70.76.$$

ili

$$(Z.3.8.8b) \quad \frac{J_{C1}}{J_{E1}} = \frac{-(g_m r_\pi + 1) r_C / (r_C + R'_1)}{1 + [r_\pi + (g_m r_\pi + 1) r'_C] / r_\mu} \approx -70.76$$

gde je $R'_1 = R_{u2} \parallel R_1$ i $r'_C = r_C \parallel R_{u2} \parallel R_1$.

Preostali činioci se izračunavaju kao strujni razdelnici:

$$(Z.3.8.9) \quad \frac{J_{B3}}{J_{C2}} = -\frac{R_2}{R_2 + R_{u3}} = -0.87,$$

$$(Z.3.8.10) \quad \frac{J_{E2}}{J_{E1}} = -\frac{R_E}{R_E + R_{u2}} = -0.556.$$

Smenom brojnih vrednosti u (Z.3.8.4) dobija se strujno pojačanje: $A_s = 2504$.

Ukupno strujno pojačanje A_s je pozitivno.

Naponsko pojačanje može se dobiti preko strujnog na sledeći način:

$$(Z.3.8.11) \quad A = \frac{V_p}{V_u} = \frac{-R_p J_2}{R_{u1} J_1} = -\frac{R_p}{R_{u1}} A_s = -159.8.$$



Rešenje zadatka 3.9 Izraz za naponsko pojačanje jednog stepena u sprezi sa zajedničkim sorsom je:

$$(Z.3.9.1) \quad A = -S \frac{R_i R_D}{R_i + R_D}.$$

Sa Sl. Z.3.9.1 se vidi da su u kolu dva ovakva stepena, te je ukupno naponsko pojačanje:

$$(Z.3.9.2) \quad A = \frac{V_1}{V_g} = \frac{V_1}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_g}$$

Treba uočiti da je u kolu drejna drugog tranzistora i potrošač, pa je ukupna otpornost kojom je opterećen ovaj stepen paralelna veza R_D i R_p . Stoga je:

$$(Z.3.9.3) \quad \frac{V_1}{V_2} = A_2 = -S \cdot \frac{R_i (R_D \parallel R_p)}{R_i + (R_D \parallel R_p)} = 4.76.$$

Dalje, za naizmenični režim, u kolu drejna prvog stepena paralelno otporniku R_D vezan je i otpornik iz kola gejta drugog stepena, pa će izraz za pojačanje imati oblik:

$$(Z.3.9.4) \quad \frac{V_2}{V_1} = A_1 = -S \cdot \frac{R_i (R_D \parallel R_G)}{R_i + (R_D \parallel R_G)} \approx -9.08.$$

Zadnji činilac se dobija iz naponskog razdelnika:

$$(Z.3.9.5) \quad \frac{V_1}{V_g} = \frac{R_G}{R_G + R_g} \approx 1,$$

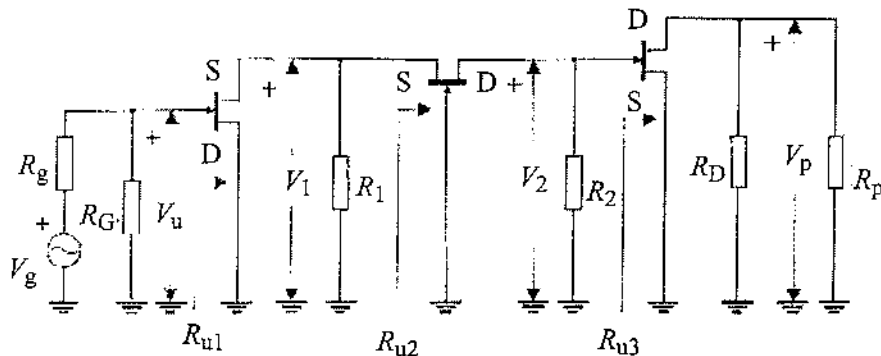
a zamenom brojnihi vrednosti u (Z.3.9.2) dobija se da je ukupno naponsko pojačanje: $A = 43.22$.

Čitaocu se preporučuje da uporedi ovu brojnu vrednost sa pojačanjem dvostepenog pojačavača sa bipolarnim tranzistorima iz Zadatka 3.7.



Rešenje zadatka 3.10 Ukupno naponsko pojačanje trostepenog pojačavača sa JFET-ima izračunaćemo kao:

$$(Z.3.10.1) \quad A = \frac{V_p}{V_g} = \frac{V_p}{V_2} \cdot \frac{V_2}{V_1} \cdot \frac{V_1}{V_u} \cdot \frac{V_u}{V_g} = A_3 \cdot A_2 \cdot A_1 \cdot \frac{V_u}{V_g}$$



Sl. Z.3.10.1

Kako je $R_G \gg R_g$, a ulazna otpornost prvog stepena $R_{u1} \rightarrow \infty$ (spoj sa zajedničkim sorsom), to se izraz za poslednji član izraza (Z.3.10.1) može svesti na:

$$(Z.3.10.2) \quad \frac{V_u}{V_g} = \frac{R_G}{R_g + R_G} \approx 1,$$

a izraz za ukupno naponsko pojačanje biće redukovana na proizvod pojačanja pojedinihi stepena:

$$(Z.3.10.3) \quad A = A_1 \cdot A_2 \cdot A_3.$$

Odgovarajuća pojačanja se izračunavaju prema poznatim formulama. Za prvi pojačavački stepen (zajednički drejn), s obzirom da je u kolu sorsa paralelna veza otpornosti R_1 i ulazne otpornosti drugog stepena R_{u2} , izraz za pojačanje bi bio:

$$(Z.3.10.4) \quad A_1 = \frac{\mu \cdot (R_1 \parallel R_{u2})}{R_i + (\mu + 1) \cdot (R_1 \parallel R_{u2})},$$

gde je koeficijent naponskog pojačanja:

$$(Z.3.10.5) \quad \mu = S \cdot R_i = 40,$$

dok se ulazna otpornost dobija iz sledećeg izraza (spoj sa zajedničkim gejtom):

$$(Z.3.10.6) \quad R_{u2} = \frac{R_i + (R_2 \parallel R_{u3})}{\mu + 1} \approx \frac{R_i + R_2}{\mu + 1} = 829 \Omega$$

jer $R_{u3} \rightarrow \infty$. Zamenom (Z.3.10.5) i (Z.3.10.6) u (Z.3.10.4) dobija se: $A_1 = 0.274$.

U kolu drejna drugog stepena (zajednički gejt) nalazi se R_2 u paraleli sa $R_{u3} \rightarrow \infty$, pa je pojačanje:

$$(Z.3.10.7) \quad A_2 = \frac{(\mu + 1) \cdot R_2}{R_i + R_2} = 36.18.$$

Pojačanje trećeg stepena (zajednički sors) izračunava se na već poznati način:

$$(Z.3.10.8) \quad A_3 = -\frac{\mu \cdot (R_D \parallel R_p)}{R_i + (R_D \parallel R_p)} = -3.15.$$

Najzad, ukupno naponsko pojačanje iznosi: $A = 31.23$.



Rešenje zadatka 3.11 Smenom modela tranzistora (sa $h_{12E} = 0$ i $h_{22E} = 0$) u kolo sa Sl. Z.3.11.1 dobija se kolo prikazano na Sl. Z.3.11.2, pri čemu je $V_C = V_p$.

Metodom potencijala čvorova posfavićemo jednačine za kolo sa Sl. Z.3.11.2:

$$(Z.3.11.1) \quad B_2: \quad \frac{V_{B2} - V_g}{R} + \frac{V_{B2} - V_E}{h_{11E}} + \frac{V_{B2} - V_C}{R} = 0,$$

$$(Z.3.11.2) \quad E: \quad h_{21E} J_{B1} + (V_E - V_{B2}) / h_{11E} - h_{21E} J_{B2} = 0$$

$$(Z.3.11.3) \quad C: \quad V_C / R_p + h_{21E} J_{B2} + (V_C - V_{B2}) / R = 0.$$

Struje J_{B1} i J_{B2} mogu da se eliminišu pomoću (Sl. Z.3.11.2):

$$(Z.3.11.4) \quad J_{B1} = V_g / h_{11E},$$

$$(Z.3.11.5) \quad J_{B2} = (V_{B2} - V_E) / h_{11E}.$$

Zamenom (Z.3.11.4) i (Z.3.11.5) u (Z.3.11.1)-(Z.3.11.3) i sređivanjem istih jednačina dobija se željeni sistem jednačina:

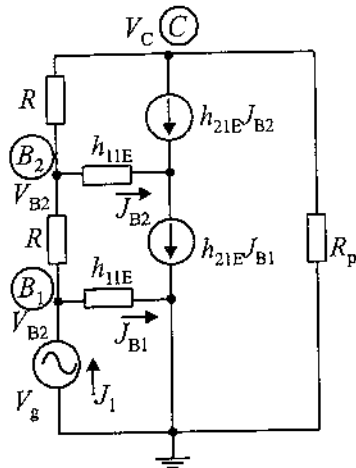
$$(Z.3.11.6) \quad (2/R + 1/h_{11E}) \cdot V_{B2} - (1/h_{11E}) \cdot V_E - (1/R) \cdot V_C = V_g / R,$$

$$(Z.3.11.7) \quad -\frac{1+h_{21E}}{h_{11E}} \cdot V_{B2} + \frac{1+h_{21E}}{h_{11E}} \cdot V_E =$$

$$= -\frac{h_{21E}}{h_{11E}} \cdot V_g,$$

$$(Z.3.11.8) \quad \left(\frac{h_{21E}}{h_{11E}} - \frac{1}{R} \right) \cdot V_{B2} - \frac{h_{21E}}{h_{11E}} \cdot V_E +$$

$$+ \left(\frac{1}{R_p} + \frac{1}{R} \right) \cdot V_C = 0.$$



Sl. Z.3.11.2

Rešavanjem sistema jednačina (Z.3.11.6) - (Z.3.11.8), može se naći izlazni napon (V_C), odakle direktno proizilazi i naponsko pojačanje:

$$(Z.3.11.9) \quad A = \frac{V_C}{V_g} =$$

$$= \frac{R_p}{2R + R_p} \left[1 - h_{21E} \frac{1 + 2h_{21E}}{1 + h_{21E}} \frac{R}{h_{11E}} \right] =$$

$$= -471.5.$$

Za dobijanje ulazne otpornosti treba odrediti vrednost struje J_1 . U tom cilju postavimo jednačinu za čvor B_1 :

$$(Z.3.11.10) \quad -J_1 + V/h_{11E} + (V_g - V_{B2})/R = 0.$$

Deljenjem zadnje jednačine sa V_g dobija se:

$$(Z.3.11.11) \quad -J_1/V_g + 1/h_{11E} + \frac{1 - V_{B2}/V_g}{R} = 0.$$

Potrebno je, dakle, izračunati V_{B2} iz sistema (Z.3.11.6) - (Z.3.11.8) i zameniti u (Z.3.11.11). Za V_{B2} se dobija:

$$(P.3.11.12) \quad V_{B2} = V_g \frac{R + R_p - \left[\frac{R}{1 + h_{21E}} + R_p \right] \frac{h_{21E}R}{h_{11E}}}{2R + R_p}$$

i posle smene u (Z.3.11.11) ulazna otpornost poprima sledeći oblik:

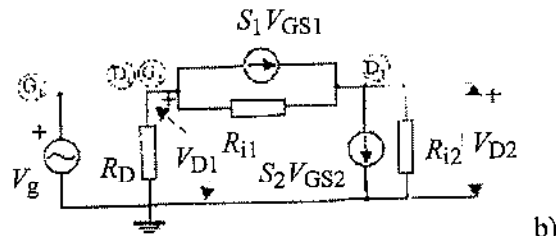
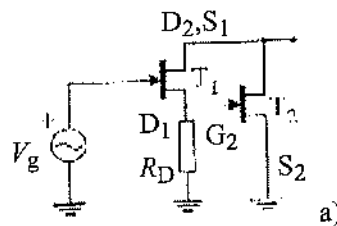
$$(Z.3.11.13) \quad \frac{1}{R_u} = \frac{J_1}{V_g} = \frac{1}{h_{11E}} + \frac{1 - V_{B2}/V_g}{R}$$

$$= \frac{1 + \frac{2R + R_p}{h_{11E}} + \left[\frac{R}{1 + h_{21E}} + R_p \right] \frac{h_{21E}}{h_{11E}}}{2R + R_p}$$

pa je $R_u = 259.6 \Omega$.



Rešenje zadatka 3.12 Kolo za naizmeničnu struju ima izgled dat na Sl. Z.3.12.2a, pa se zamenom modela tranzistora dobija ekvivalentno kolo prikazano na Sl. Z.3.12.2b.



Sl. Z.3.12.2

Nađimo prvo izraze za napone gejnt-sors za oba tranzistora. Oni se mogu predstaviti preko na sledeći način:

$$(Z.3.12.1) \quad V_{GS1} = V_g - V_{D2}$$

$$(Z.3.12.2) \quad V_{GS2} = V_{D1}.$$

U kolu ostaju praktično dva nepoznata napona čvorova: V_{D1} i V_{D2} . Postavićemo jednačine po metodu potencijala čvorova u kojima kao nepoznate, figurišu ovi naponi.

$$(Z.3.12.3) \quad D_2: \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) \cdot V_{D2} - \frac{1}{R_1} \cdot V_{D1} +$$

$$+ S_2 \cdot V_{GS2} - S_1 \cdot V_{GS1} = 0$$

$$(Z.3.12.4) \quad D_1: \frac{-1}{R_{11}} \cdot V_{D2} + \left(\frac{1}{R_{11}} + \frac{1}{R_D} \right) \cdot V_{D1} +$$

$$+ S_1 \cdot V_{GS1} = 0$$

Zamenom V_{GS1} i V_{GS2} iz (Z.3.12.1) i (Z.3.12.2) i sređivanjem, dobija se sistem od dve jednačine sa dve nepoznate:

$$(Z.3.12.5) \quad \left(\frac{1}{R_2} + \frac{1}{R_1} \right) \cdot V_{D2} - \frac{1}{R_1} \cdot V_{D1} +$$

$$+ S_2 \cdot V_{GS2} - S_1 \cdot V_{GS1} = 0$$

$$(Z.3.12.6) \quad -\frac{1}{R_{i1}} \cdot V_{D2} + \left(\frac{1}{R_{i1}} + \frac{1}{R_D} \right) \cdot V_{D1} + S_1 V_{GS1} = 0$$

Rešenje ćemo potražiti metodom determinanti. Tako je:

$$(Z.3.12.7) \quad \Delta = \frac{[\mu_2(1+\mu_1)+1] + \frac{R_{i1}}{R_D} + (1+\mu_1)\frac{R_{i2}}{R_D}}{R_{i1}R_{i2}}$$

$$(Z.3.12.8) \quad \Delta_2 = [S_1(1+S_2R_D)/R_D] \cdot V_g,$$

odakle je moguće naći traženo naponsko pojačanje:

$$(Z.3.12.9) \quad A = \frac{V_{D2}}{V_g} = \frac{1}{V_g} \frac{\Delta_2}{\Delta} = \frac{\mu_1(R_{i2} + \mu_2 R_D)}{R_{i1} + R_{i2}(1+\mu_1) + R_D[1+\mu_2(1+\mu_1)]}$$

U specijalnom slučaju kada je $\mu_1 = \mu_2 = \mu$ i $R_{i1} = R_{i2} = R_i$ i kada je $\mu \gg 1$, dobija se

$$(Z.3.12.9) \quad A = 1.$$



Rešenje zadatka 3.13 Šema kola za naizmenični signal data je na Sl. Z.3.13.2a. Smenom modela tranzistora dobija se ekvivalentno kolo prikazano na Sl. Z.3.13.2b.

Kontrolišuće veličine naponom kontrolisanih strujnih generatora mogu se izraziti kao:

$$(Z.3.13.1) \quad V_{GS1} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_B - V_{S1},$$

$$(Z.3.13.2) \quad V_{GS2} = -V_{D1} = -V_{S2}.$$

Primenom metoda potencijala čvorova za analizu kola sa Sl. Z.3.13.2 dobija se sistem:

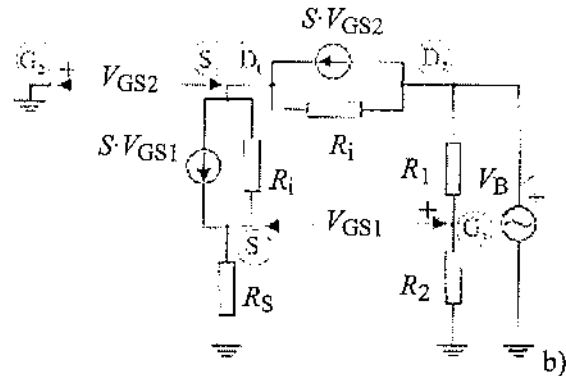
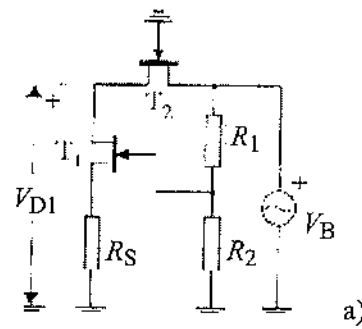
$$(Z.3.13.3) \quad S_2: \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_i} \right) \cdot V_{S2} - \frac{1}{R_i} \cdot V_{S1} - \frac{1}{R_i} \cdot V_B + S \cdot (V_{GS1} - V_{GS2}) = 0$$

$$(Z.3.13.4) \quad S_1: -\frac{V_{S2}}{R_i} + \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_S} \right) V_{S1} - S \cdot V_{GS1} = 0.$$

Smenom V_{GS1} i V_{GS2} iz (Z.3.13.1) i (Z.3.13.2) u (Z.3.13.3) i (Z.3.13.4) sistem poprima prepoznatljiv oblik, gde su V_{S1} i V_{S2} nepoznate promenljive.

$$(Z.3.13.5) \quad (2/R_i + S) \cdot V_{S2} - (1/R_i + S) \cdot V_{S1} = V_B \cdot \left(\frac{1}{R_i} - S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \right)$$

$$(Z.3.13.6) \quad -\frac{1}{R_i} \cdot V_{S2} + \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_S} + S \right) \cdot V_{S1} = S \cdot \frac{R_2}{R_1 + R_2} \cdot V_B.$$



Sl. Z.3.13.2

Kako je $V_{D1} = V_{S2}$, izjednačavanjem $V_{S2} = 0$ V dobićemo traženi odnos otpornosti. V_{S2} se izračunava preko:

$$(Z.3.13.7) \quad V_{S2} = \Delta_2 / \Delta,$$

pa je očigledno da će V_{S2} biti jednak nuli samo ako je $\Delta_2 = 0$. Iz ovog uslova nalazimo da je:

$$(Z.3.13.8) \quad \left(\frac{1}{R_i} - \frac{SR_2}{R_1 + R_2} \right) \left(\frac{1}{R_i} + \frac{1}{R_S} + S \right) + \left(\frac{1}{R_i} + S \right) \frac{SR_2}{R_1 + R_2} = 0,$$

što posle sredjivanja daje:

$$(Z.3.13.9) \quad \frac{R_1}{R_2} = \frac{\mu R_i}{R_i + \mu(1 + R_S)} - 1$$



Rešenje zadatka 3.15 Kolo za naizmenični režim prikazano je na Sl. Z.3.14.2a. Zamenom linearnog modela MOS tranzistora za niske frekvencije u pomenuto kolo dobija se ekvivalentna šema prikazana na Sl. Z.3.14.2b.

Za jedini nepoznati napon čvora važi:

$$(Z.3.14.1) \quad (1/R + 1/R_i + 1/R_i) \cdot V_i + S \cdot V_{GS1} + S \cdot V_{GS2} = V_u / R.$$

Kako je:

$$(Z.3.14.2) \quad V_{GS1} = V_{GS2} = V_u,$$

može se odmah naći izlazni napon kao:

$$(Z.3.14.3) \quad V_i = \frac{1/R - 2 \cdot S}{1/R + 2/R_i} \cdot V_u.$$