

3. TRANSISTORSKEEMID

3.1 Transistorastmete lihtsustatud käsitlus

3.1.1 Transistori lihtsustatud mudel

Transistorastmete lihtsustatud käsitluses võetakse aluseks lihtsustatud transistori mudel, kus vaadeldakse transistori kui vooluvõimendit. Seetõttu kollektorvool avaldub võrdelisena baasivoolu ja vooluvõimendusteguriga: $I_k = \beta I_b$. Sellist käsitlust kasutatakse transistori alalispingerežiimide lihtsustatud arvutustes ning alalis- ja madalsageduslike võimendustegurite hindamiseks, selle rakenduseks tuleb aga võtta teadmiseks kolm põhimõtet:

1. Kollektorpotentsiaal peab olema kõrgem emitteri potentsiaal (vaatleme siin npn transistor näidet);
2. Baas-emitter ja baas-kollektor siirded töötavad kui dioodid, tavalise pingestuse korral b-e siire on avatud ja b-k siire on suletud.
3. Igat transistori iseloomustatakse lubatud I_k , I_b , U_{ce} , $U_{bevastu}$, kaovõimsusega P_c , temperatuuri jt suurustega, milliseid ei või ületada.

Vaatlema teist reeglit. Siit tulenevalt ei saa meelevaldselt suurendada b-e vahelist siirde päripinget. Kui see ületab 0,6...0,8 volti, tekib väga suur baasivool. Seega, pinged baasil ja emitteril on seotud järgmiselt: $U_b \approx U_e + 0,6V$ ($U_b = U_e + U_{be}$). Samas märgime, et kollektori vool ei ole määratud b-c siirde kui diodi vooluga; see diod on vastupingestatud. Samuti ei sõltu kollektori vool oluliselt kollektoripingest, b-c vahemik on vaadeldav kui voolu generaator, mis tagab voolu sõltumatu pealerakendatud pingest. Siin tuleb juba arvestada transistori tööpõhimõttest tingitud protsesse, millede tõttu emittersiirde suuremale avanemisele vastab kollektorvoolu kasv ja mille tulemusena saadakse ülaltoodud seos kollektorvoolu ja baasivoolu vahel.

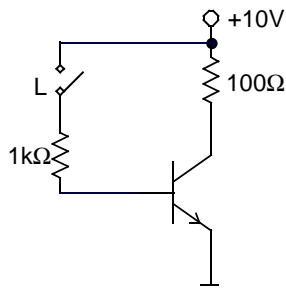
Kui 1...3 on täidetud, siis I_c on võrdeline I_b -ga:

$$I_c = \beta I_b .$$

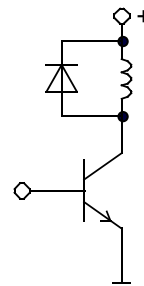
Parameetrit β ei saa lugeda õnnestunuks transistori kirjeldavaks parameetriks juba sellepärast, et sama transistori tüübi juures see võib olla näiteks vahemikus 50...250.

3.1.2 Transistorvõtte

Kuna transistori lihtsustatud mudel ei võimalda käsitleda võtme töökiirusega seotud probleeme, piirdume siin lülitirežiimile vastavate vooluseoste väljatoomisega. Kui võtme töökiirus pole oluline, on need vooluseosed piisavad võtme konstrueerimiseks. Vaatleme skeemi (joon. 3.1.1). Transistori avamiseks ühendame kontaktid juhtahelas, andes sellega baasile siiret avava pinge ja sellest tingitud baasivoolu. Kui transistor on avatud (transistorvõtme "kontaktid" ühendatud), on b-e siire ka avatud, pingelang siirdel on ca 0,6V (Ge transistoridel 0,15..0,2V).



Joon. 3.1.1



Joon. 3.1.2

Seetõttu langeb baasihela takistusele pingelang 9,4 V ja takistit ning baasiiret läbib 9,4 mA-ne vool. Siit ei pea järelduma, et kollektorahelas voolab β korda suurem vool, s.o. kui $\beta = 100$, 940 mA-ne vool. Viimane sõltub lisaks baasivoolule ja vooluvõimendustegurile ka kollektori toitepingest ja kollektori koormustakistusest. Kui kollektori toitepinge (või koormustakistus) ei taga β -kordset kollektorivoolu, siis transistoris ilmneb küllastusastme suurenemine. Märkime veel, et küllastuses on väikesevõimsuselise transistori kollektorpinge sõltuvalt koormuse suurusest ja transistori tüübist 0,05...0,2 piires, võimsustransistoridel rohkemgi [vt Abo. Raadiolülitused]. Tuleb aga ka märkida, et väikeste baasi-kollektori vaheliste pingete korral vooluvõimendustegur mõnevõrra väheneb. Tavaliselt valitakse baasivoolu valikul 4...5 kordne varu, liiga suur varu aeglustab tunduvalt transistori küllastusest sulgeolekusse üleminekut. Kindlustamaks transistorivõtme temperatuuristabiilsust sulgeolekus ühendatakse baas emitteriga (või Ge-transistoride korral isegi baasi sulgeva täiendava pingeallikaga) üle suhteliselt kõrgeoomilise takisti. Antud kollektortakistuse 100 oomi ja $\beta = 100$ korral piisaks baasihelas olevast 4...5 kiloomilisest takistist.

Induktiivkoormuse korral, nagu varem ka märgitud, sillatakse induktiivkoormus diodiga (joon. 3.1.2).

Transistorvõtmete lülitusajad võivad olla murdosad mikrosekunditest. Töökiiruse suurendamiseks kasutatakse mitmeid meetmeid. Põhiliseks on seejuures kiiretoimeliste transistoride kasutamine, küllastusastme vähendamine ja tüürsignaali forsseerimine - näiteks baasihelas oleva takisti kondensaatoriga sildamise abil.

3.1.3 Emitterkordaja

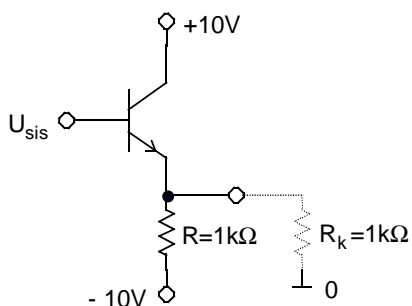
Emitterkordaja (ÜC transistori lülitus) on toodud joonisel 3.1.3. Seda kasutatakse tavaliselt kui takistuste transformaatort - kõrge sisendtakistuse ja madala väljundtakistuse tõttu. Kuna sellise skeemi pingetükanne on lähedane ühele, siis saadakse siin vooluvõimendus. Emitterkordaja sisendtakistus avaldub $r_{sis} = (\beta + 1)R$. Analoogne seos kehtib ka komplekssete suuruste kohta

$Z_{sis} = (\beta + 1)Z_{koorm}$ ehk teistpidi võetuna $Z_{välj} = Z_i / (\beta + 1)$, kus

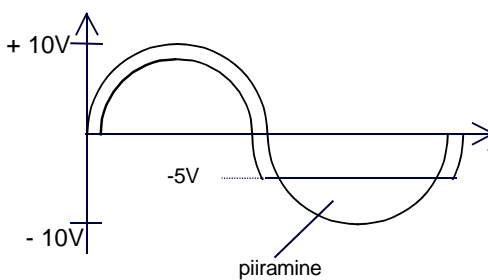
Z_i – signaallallika sisendtakistus . Kuna tavaliselt $Z_{välj} \ll R$, pole

viimases seoses emitterahela takistit R arvestatud.

Siin on tegemist väikesesignaalilise (dünaamilise) väljundtakistusega, mis ei tähenda sugugi, et emitterkordaja tagab alati koormuses suure voolu. Arvestagem sellega, et emitterkordaja väljundsuuruseks on vool läbi transistori kollektorahela. Vaatleme ostsillogramme (joon. 3.1.4). Nii muutub väljundpinge positiivsel



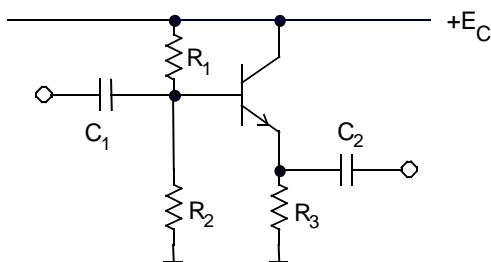
Joon. 3.1.3



Joon. 3.1.4

tasandil ligikaudu positiivse toitepingeni (miinus pingelang U_{ce} , ca $0,1V$), negatiivses osas ulatub see -5 voldini. See on tingitud sellest, et alates teatud sisendpingest ($-4,4V$) transistor sulgub ja väljundisse signaali edasi ei kandu. Antud osas skeemi (joon. 3.1.3) töö parandamiseks tuleb kasutada emitterahelas madalaoomilisemat takistit või kasutada kahetaktilist, npn ja pnp transistoridega skeemi.

Emitterkordajate konstrueerimise näitena vaatleme helisagedusel töötava, $15V$ -e toitepinge ja $1mA$ rahuolukorra vooluga kordaja arvutust (joon. 3.1.5):



Joon. 3.1.5

1. Emitterpinge valik. Sümmeetrilise väljundpinge tagamiseks valitakse $U_e = 0,5E_c$. Saame, et $U_e = 7,5V$.
2. Takisti R_e valik. Kuna rahuolukorra vooluks oli valitud $1 mA$, saame $R_e = 7,5k\Omega$.
3. Pingejaguri takistite valik. Baasipinge on emitterpinge ja transistori avava pinge summa. Siit

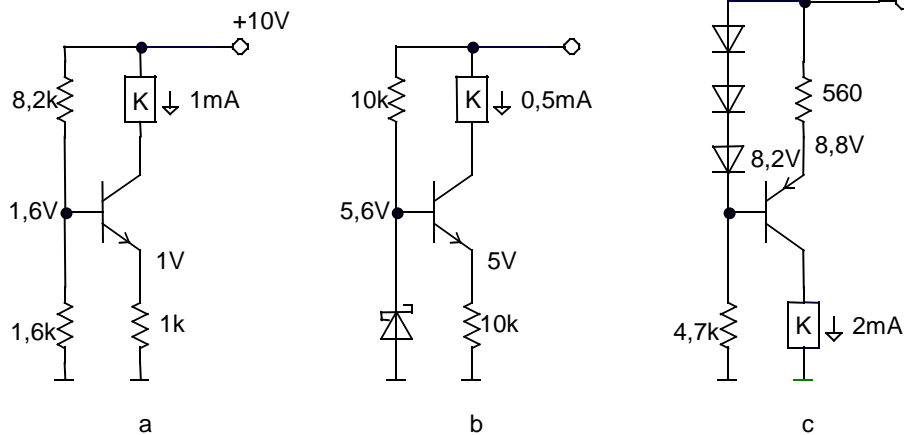
saame, et $U_b = 8,1V$. Järelikult tuleb takistite R_1 ja R_2 suhe $1/1,17$. Eeldades, et emitterkordaja sisendtakistus $\beta R_e \gg$ paralleellülitusest $R_1 \parallel R_2$, seega valime paraleelühenduse (kogutakistuse 75 k-oomilise või väiksema). Valime takistid $R_1 = 130k$ ja $R_2 = 150k$.

4. Kondensaator on vajalik eelmise astme alalispinge või maa nivoost lahtisidestuseks. See koos astme poolt tekitatava koormustakistusega (sisendtakistusega) moodustavad kõrgpääsfiltri. Eeldades, et emitterahelasse lülitatava koormuse takistus on palju suurem takistist R_e , saades niiviisi kordaja sisendtakistuseks βR_e - see tähendab 750 k-oomi. Jaguri takistus võrdub 70 k-oomiga. See tähendab, et kondensaatori koormuseks on 63 k-oomi ja et kondensaatori mahtuvus peab olema vähemalt 0,15 mikrofaradit. Siis saadakse 3dB sageduskarakteristiku langus sagedusel alla 20 Hz.
5. Kondensaatori C_2 valik. See kondensaator moodustab koos praegu määratlemata koormustakistusega samuti kõrgpääsfiltri. Me kindlasti ei eksi, kui eeldame, et koormustakistus ei ole väiksem kui takisti R_e takistus. Võttes jällegi alumise piirsageduse allapoole 20 Hz, saame, et kondensaatori C_2 mahtuvus peab olema vähemalt 1 mikrofaradit. Kuna antud skeemis on tegemist kahe järjestikkuse kõrgpääsfiltriga, valime kondensaatorite väärtused mõnevõrra suuremad, näiteks 0,5 ja 5 mikrofaradit.

Mõnikord osutub võimalikuks vältida kondensaatoreid emitterkordajates, kui kasutada sümmeetrilist toidet (vt joon 3.1.3), ühendades transistori baasi kõrgeoomilise takisti kaudu maaga (0-potentsiaaliga) kokku.

3.1.4 Vooluallikas transistoril

Vooluallikat kasutatakse võimendusastmetes dünaamilise koormusena, samuti stabilisaatorites, diferentsiaalastmetes - saavutamaks suurt vahelduvvoolutakistust (vahelduvpingelangu) väikese alalisvoolutakistuse (alalispingelangu) korral. Nii saavutatakse tavalistes ja diferentsiaalvõimendites suurem võimendustegur; kasutades vooluallikat parameetrilises stabilisaatoris ballasttakistuse asemel, saadakse kõrgem stabiliseerimistegur. Käsitleme siin lühidalt bipolaarsel transistoril realiseeritud vooluallikate näiteid (joon. 3.1.6).



Joon. 3.1.6

Niisiis, transistori baasil peab olema pinge $> 0,6V$. See hoiab emittersiirde avatud olekus. Takisti R_e leitakse seosest $R_e = U_e / I_e$, saades $R_e = (U_b - 0,6V) / I_e$. Eeldades, transistori suurt vooluvõimendust, saame, et emittervool on ligikaudu võrdne kollektorvooluga. Nii saame, et

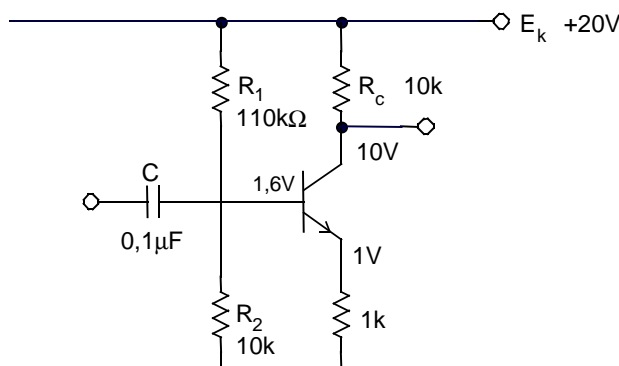
$I_c \approx (U_b - 0,6) / R_e$; kuna avaldises puudub kollektoripinge, saamegi voolu sõltumata pingest U_c senikaua, kuni transistor ei küllastu (kuni täidetakse nõue $U_c > U_e + 0,2V$). Esimene näide (a) on resistiivse pingejaguriga vooluallikas, jaguri kogutakistusega 1.3 k-oomi. Teises (b) on pinge fikseeritud stabilitrini abil. Võib aga kasutada ka mitut järjestikku ühendatud päripidise pingestusega diodi (c). Viimastes skeemides tuleb piisavaks diodide avamiseks tagada neid läbiv mõnemilliampriline vool. Viimane näide annab tänu pnp transistorile võimaluse koormuse ühendamiseks maaga.

Tegelik vooluallikas on erinev ideaalsest. Seda kõigepealt seetõttu, baasipinge on sõltuv kollektorpingest transistori mittenukse läbitavuse D kaudu. Püsiva kollektorvoolu ja baasipinge korral tekitab sellest võimendusteguri β sõltuvus kollektor-emitterivahelisest pingest. Kuna $I_e = I_k + I_b$, siis β muutus kutsub esile kollektor- ja emittervoolu muutuse. Lisaks tuleb veel arvestada parameetrite temperatuurisõltuvusega.

Pinge U_{be} temperatuurimuutus on ca $-2mV/^\circ C$, läbitavuse mõju avaldub transistoris $dU_{be} \approx -0,001dU_{ce}$. Neid võib viia miinimumini, valides piisavalt kõrge (vähemalt 1V) emitteripinge, viimane omakorda aga tingib emittertakisti kaudu baasi eelpinge muutuse. Nii näiteks 0.1V emitteripinge korral (baasil on 0,7V) 10mV baasipinge muutus annab 10% väljundpinge muutuse, 1V emitteripinge korral aga 1% -se muutuse. Kirjanduses, näiteks [Horowitz; Tietze], on pakutud välja ka täiustatud vooluallikate variandid.

3.1.5 Ühise emitteriga võimendi

Vaatleme vooluallika näidet, kus koormuseks on takisti kollektorahelas (joon. 3.1.7). Kollektoripinge avaldub siin



Joon. 3.1.7

toitepinge ja takistil oleva pingelangu kaudu: $U_c = E_k - I_c R_c$.

Andes baasile signaali, saame kollektorpinge muutuse. Alalispinge lahtisidestuseks anname signaali üle kondensaatori, arvestades jällegi, et transistori sisendis tekkiva kõrgpääsfiltri pääsuriba oleks sobitatud ülekantavate signaalide sagedustega. Eeldame transistori rahuolukorra kollektorvooluks 1mA. Kollektorpingeks saame siis 20 voldise toitepinge ja 10 kiloomilise kollektortakisti korral 10V. Anname nüüd sisendisse vahelduvsignaali u_b . Emitterpinge saame eeldusel, et emitterahelas suhtes töötab transistor emitterkordajana, võrdsena baasipingega: $u_e = u_b$. Emitterpinge muutus (emittervahelduvpinge) tingib

emittervoolu muutuse $i_e = u_e / R_e = u_b / R_e$ ja suure vooluvõimendusteguri

korral ligikaudu samasuure kollektorvoolu muutuse. Järelikult saame kollektorpinge muutuseks

$$u_c = -i_c R_c = -i_e R_c = -u_b (R_c / R_e).$$

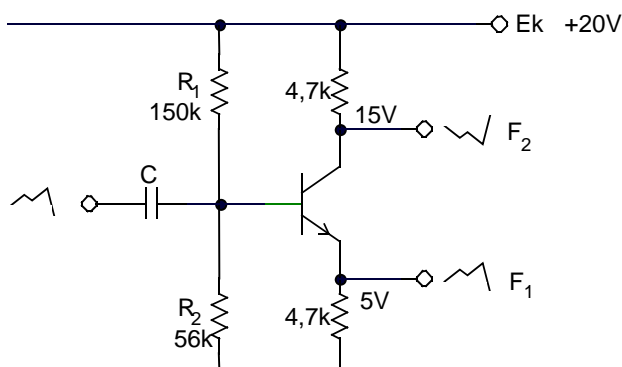
Pangem tähele, oleme saanud pingevõimendi, mille võimendustegur avaldub kollektor- ja emitterkoormustakistuste suhtena $K_u = -R_c / R_e$. Meie näites saame pingevõimenduseks

-10. Miinus märk avaldises viitab 180°-sele faasinihkele.

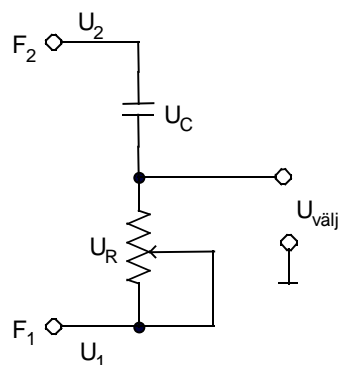
Võimendi sisendtakistus on määratud pingejaguri takistitega (signaali suhtes on paralleelühenduses) ja transistori sisendtakistusega, mis tänu emitterahela takistusele on küllalt kõrge (vt emitterkordaja valemit $r_{sis} = \beta R_e$). Väljundtakistus on määratud kollektorahela takistusega ja transistori kollektori poolt vaadatud väljundtakistusega, millised on samuti signaali suhtes paralleelühenduses. Tuletagem aga meelde, et analoogne skeem oli kollektori poolt vaadatuna vooluallikaks. Teisiti öeldes, kollektoripoolne väljundtakistus on väga kõrge (ulatudes megaoomidesse). Järelikult, sellise võimendi väljundtakistus on määratud kollektorahela takistusega R_c .

3.1.6 Sümmeeriv skeem, faasipööraja

Vajalikuks skeemiks osutub sümmeeriv aste, mis annab sisuliselt kaks vastasfaasis väljundpinget (joon. 3.1.8). Eelmisest



Joon. 3.1.8



Joon. 3.1.9

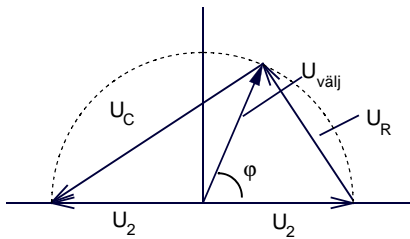
punktidest nähtub, et emitterkordaja faasi ei pööra, aste ühise emitteriga aga seda teeb. Et saada võrdsed väljundpinged, tuleb valida emitteri ja kollektori koormusteks võrdsed takistid. Maksimaalse väljundpinge saamiseks tuleb alalispinge režiim valida nii, et oleks tagatud ühesugused väljundpingete haardeulatused (antud näites pingete 5-voldised tippväärtused).

Kasutades vastasfaasides väljundpingeid, on võimalik koostada sujuva faasinihke reguleerimisega skeem (joon. 3.1.9). Pannes takisti või kondensaatori asemele elektroonselt tüüritava elemendi (näiteks reguleeritava takistusena väljatransistori), saame elektroonselt tüüritamisega faasinihke ahela.

3.1.7 Transistori tõus

Vaatleme transistorivõimendit mõnevõrra senisest erinevalt.

Senises käsitluses eeldasime, et pinge emitteril kordab pinget baasil ja et emitterivoolu muutus võrdub kollektorivoolu muutusega, saades nii kätte ka kollektorpinge muutuse. Sellise arutluse tagajärjel saime kätte transistori pingevõimendusteguri. Vaatleme nüüd transistorivõimendit järgnevalt (joon. 3.1.10). Kujutame skeemi ühte osa pingega tüüritava vooluallikana, rahuolukorra vooluga 1 mA ning ülekandega -1mA/V . Ülekande all mõistame siin väljundsuuruse suhet sisendsuurusesse, saades siin juhtivuse ühiku siemensi [Sm]. Saadud suurust $I_{\text{välj}}/U_{\text{sis}}$ nimetame transistori tõusuks S.



Joon. 3.1.9 selgituseks:

Niisiis ühes osas saime võimendi ülekandejuhtivusega (tõusuga) 1mSm/V , mis sisuliselt pole midagi muud kui $1/R_e$. Skeemi teine osa kujutab endast koormustakistust ("muundurit"), mis muudab voolu pingeks. Selle "muunduri" ülekanne on takistuse dimensiooniga, mille rahuolukorrale vastab toitepinge E_c , ülekande takistusele - suurus 10 kV/A (10 k-oomi).

Nende kahe osa ülekannete korrutis annab meile

$$K = SR_c = R_c/R_e = -10.$$

Toodud käsitlusviis on paindlikum senisest. Nii näiteks võib skeemi analüüsida erinevat liiki aktivelementidega (näiteks väljatransistoridega), erinevate koormustega, kaasa arvatud aktiivne koormus (vooluallikas). Tihti osutab see meetod kasulikuks ka operatsioonvõimendite jt võimendite analüüsil.

3.2 Transistorastmete täpsustatud käsitlus

3.2.1 Transistori täpsustatud mudel

Täpsustame kollektorvoolu avaldist. Nimelt on kollektorvool seotud baasipingega Ebbers- Moullé'i (?) valemi kaudu:

$$I_c = I_{kiil} \left[\exp(U_{be}/U_T) - 1 \right],$$

kus termiline potentsiaal $U_T = kT/q$. Toatemperatuuril $U_T = 25,3\text{mV}$.

q- elektroni laeng ($1,6 \cdot 10^{-19}$ kulonit)

k- Boltsmanni tegur ($1,38 \cdot 10^{-23}$ dz/K)

T- absoluutne temperatuur, $K = ^\circ C + 273,16$;

I_{kiil} - transistori küllastusvool (sõltub omakorda temperatuurist), kujutab emittersirde vastuvoolu. Aktiivosas $I_c \gg I_{kiil}$, mistõttu võib valemist liikme -1 välja jätta. Baasivool on siis ligikaudselt seotud kollektorivooluga järgmiselt

$$I_b = I_c \beta \quad \text{või} \quad I_c = \beta I_b.$$

Ülaltoodud I_c valem on kehtiv ka dioodi läbiva voolu pingesõltuvuse avaldamiseks.

Tuleb rõhutada, et transistori kollektorivool sõltub baasi-emitterivahelist pingest, mitte baasivoolust. Baasivoolu avaldamine teguri β kaudu on väga ligikaudne. Kollektorvoolu ja baasipinge eksponentsiaalne sõltuvus on kehtiv suures voolumuutuste diapsoonis, alates nanoampritest kuni milliampriteni.

Ülaltoodust saame teha mõned olulised, edaspidises skeemitehnikas tihti vajaminevad, järeldused:

1. p-n siirde VA - karakteristikute hindamine. Transistori korral näiteks, kui palju on vaja suurendada baasipinget saavutamaks kollektorvoolu 10 kordse suurenemise. Ebberts- Moulle'i valemist tulenevalt saame vastuseks, et baasipinget on vaja suurendada $U_T \lg_e 10$ ehk 60 mV võrra (toatemperatuuril).
2. Emitteripoolne sisendtakistus (väikeste signaalide režiimis). Võttes U_{be} tuletise I_c järgi, saame

$$r_e = U_T / I_c \approx 25 / I_c \text{ oomi, kus voolu } I_c \text{ mõeldakse milliamprites.}$$

Suurus $25 / I_c$ on emittertakistus r_e toatemperatuuril. Ta piirab transistori võimendust ÜE lülituses, viib pingelekande emitterkordajas ühest väiksemaks ja ei võimalda emitterkordajas saada nullist väljundtakistust.

3. Baasipinge temperatuurisõltuvus. Kuna vool I_{kiil} sõltub temperatuurist, väheneb baasi-emitterivaheline pinge 2,1 mV/°C, olles pöördvõrdeline temperatuuriga.
4. Earley (?) efektist tingituna täheldub ka transistorides väljundpinge tagasimõju sisendpingele - üle transistori läbitavuse D. Ligikaudu $dU_{be} \approx -0,001 dU_{ce}$.

3.2.2 Võimendi ÜE lülituses

Varemalt avaldasime ÜE võimendi ülekande kollektor- ja emittertakistuste olemasolu korral, saades pingevõimenduseks nende suhte. Välise emittertakistuse puudumise korral peaks selle avaldise järgi tulema lõpmatu suur pingevõimendus. Tegelikult on emitterahelas alati takistus olemas - seesama transistorisisene emittertakistus $r_e = 25 / I_c [mA]$ oomi. Seda tuleb arvestada, kui emitterile külgeühendatav takistus on väike või puudub hoopis. Näiteks, võttes eelpooltoodud võimendi, saame välise emittertakisti puudumise korral pingevõimendusks $-10 \text{ kiloomi} / r_e$, ehk -400. Sisendtakistuse valem vajab ka korrektiive, olles nüüd βr_e ehk 2,5 k-oomi ($I_c = 1 \text{ mA}$). Edaspidi teeme vahet ÜE (R_e -ga) ja maandatud emitteriga ($R_e = 0$) lülituste vahel.

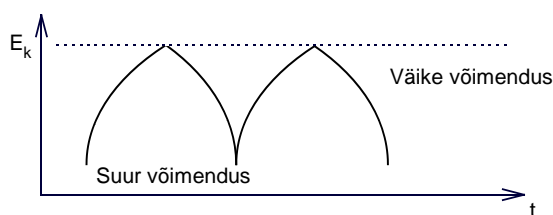
Transistori tõusu saab avaldada ka kui $S = (I_{kiil} / U_T) e^{U_{be} / U_T} = I_c / U_T$. Tulemusest nähtub, et tõus sõltub kollektorvoolust ja ei sõltu konkreetsest transistorist. Samale tulemusele jõuame, pöördudes tagasi varasema tõusu avaldise juurde, kus $S = 1 / r_e$, r_e aga sõltub kollektorvoolust, olles toatemperatuuril võrdne $r_e = 25 / I_c$.

Järgnevalt vaatleme maandatud emitteriga skeemi lähemalt. Osutub, et emittertakisti ärajätmisele kaasnev suurem võimendustegur toob kaasa rida puudusi, mis tingib tihti täiendavate meetmete (näiteks kogu võimendit haarava negatiivse tagasiside) kasutuselevõttu. Nendeks puudusteks on:

1. Mittelineaarsus. Võimendusteguri avaldub

$$K = -SR_c = -R_c/r_e = -R_c I_c [mA]/25. \quad I_c = 1 \text{ mA korral } K = -400.$$

Siit nähtub, et võimendus sõltub kollektorvoolust, kollektorvool aga sõltub omakorda sisendsignaalist. Olemegi saanud sisendsignaalist sõltuva võimendusteguri ehk mittelineaarse võimendi sellest tulenevate mittelineaar moonutustega. See ilmneb seda rohkem, mida suurem on sisendsignaali. nii näiteks kolmnurkse signaali korral sisendis saame väljundis joonisel 3.2.1 toodud



Joon. 3.2.1

signaali.

Pannes emitterahelasse takisti $R_e \gg r_e$, saame moonutateta võimenduse küllalt suurte signaali amplituudide korral.

2. Sisendtakistus avaldub ligikaudu $Z_{sis} \approx \beta r_e = 25\beta/I_c [mA]$ oomi. Ka siin tuleb arvestada kollektorvoolu muutustega väljundpinge muutustega korral - seega signaali amplituudi muutustega kaasneva sisendtakistuse muutumisega. Signaali allika sisetakistus ja transistori sisendtakistus moodustavad mittelineaarse pingejaguri.

Jällegi parandab olukorda siin emittertakisti R_e kasutamine.

3. Eelpinge. Kasutades siin eelpingestuseks pingejagurit, tekib töörežiimi otsene sõltuvus temperatuurist. Kuna baasipinge on sõltuv temperatuurist, muutudes $-2,1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ (kuna muutub $I_{küll}$). See viib selleni, et kollektorvool kümnekordistub 30° -se temperatuurimuutuse korral. Selline tööpunkti ebastabiilsus viib transistori kas küllastusse või sulgeolukorda. Nii näiteks, valides tööpunkti poole kollektori toitepinge peale, läheb transistor küllastusse juba 8°C temperatuuri tõusu korral.

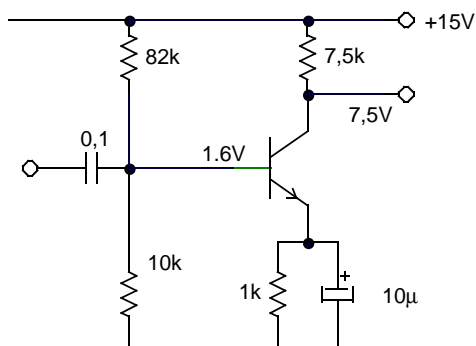
Ka siin annab emittertakisti, ka suhteliselt madala oomiline, olulise efekti.

3.2.3 ÜE võimendusastme eelpingestus

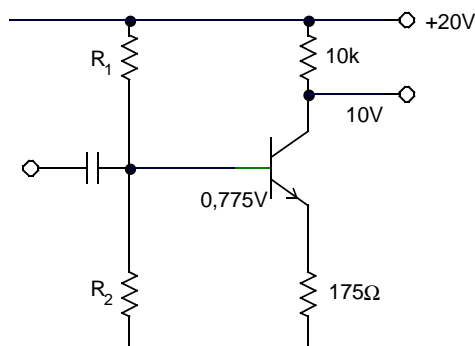
A. Emittertakistuse sildamine kondensaatoriga.

Stabiilse eelpingestuse saab varemvaadeldud emitterahelasse lülitatava takistiga R_e , tekitades

alalisvoolu järgi negatiivse tagasiside. Kui seejuures on oluline suur vahelduvsignaali võimendus tegur, lühistatakse see takisti kas täielikult või osaliselt kondensaatoriga (täielikult - joon. 3.2.2). Eelpinge



Joon. 3.2.2

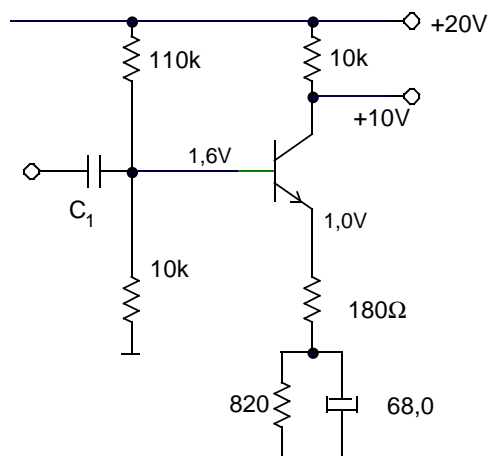


Joon. 3.2.3

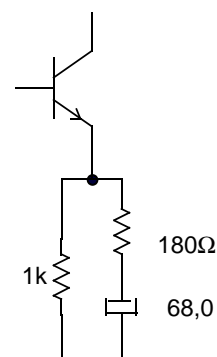
arvutuste lihtsustuseks valime takisti R_e võrdseks $0,1 R_k$ -ga. Shunteeriva kondensaatori mahtuvuse valime sellise, et selle takistus madalaimal töösagedusel oleks palju väiksem võrrelduna transistorisese emittertakistusega r_e . Antud näites on kondensaatori takistus 650 hertzil 25 oomi. Eralduskondensaatori valikul astme sisendis tuleb arvestada pingejaguri takistust (10 k Ω) ja sellega paralleelset transistori sisendtakistust, mis antud juhul on β kordne r_e (vahelduvsignaali suhtes on R_e shunteeritud); antud juhul siis $25\Omega \cdot 100 = 2,5 k\Omega$.

Vaatleme üht projekteerimisnäidet. Olgu vajalik 20Hz kuni 20kHz diapsoonis võimendi pingevõimendusteguriga 50, rahuolukorra vooluga 1 mA toitepinge +20V juures. Selle ülesande lahendamisel saame lihtsustatud skeemiks joonisel 3.2.3. toodud variandi. Kollektortakisti on valitud kaalutlusest, et rahuolukorras oleks kollektorpinge pool toitepingest. Emittertakisti on valitud, lähtudes vajalikust võimendustegurist ja r_e mõjust, $25/I_c$ mA komponendist. Probleem tekib siin aga selles, et emitterpinge on siin vaid 0,175 V, mis tingib selle pinge märgatava ebastabiilsuse. Seda seetõttu, et pinge baas-emitter vahemikus on ligikaudu 0,7V ja sõltub temperatuurist $-2,1 \text{ mV}/^\circ\text{C}$ kohta, baasipinge aga hoitakse konstantsena pingejaguri $R_1 R_2$ abil. Nii võib veenduda, et 20 kraadne temperatuuritõus suurendab kollektorvoolu 25% võrra.

Olukorra saab lahendada, lülitades emitterahelasse täiendav, kondensaatoriga sillatud takisti, mis tänu kondensaatorile ei vähenda vahelduvpinge võimendust, küll aga suurendab astme tööpunkti stabiilsust alalispinge järgi (Joon.3.2.4). Muud kaalutlused skeemielementide valikuks jäävad samaks, mahtuvusega sillatud lisatakisti väärtus valitakse kaalutlusest $0,1 R_k$, mis tagab piisava temperatuuristabiilsuse. Baasipinge on valitud selline, mis tagab emittervooluks 1 mA (eeldusel, et eelpinge ahela takistus on ca kümnendik baasi alalisvoolu takistusest (siin ca 100 k Ω). Emitterahela kondensaatori takistus peab olema palju väiksem kui 180 oomi. Teine võimalus olukorra lahendamiseks on toodud joonisel 3.2.5.



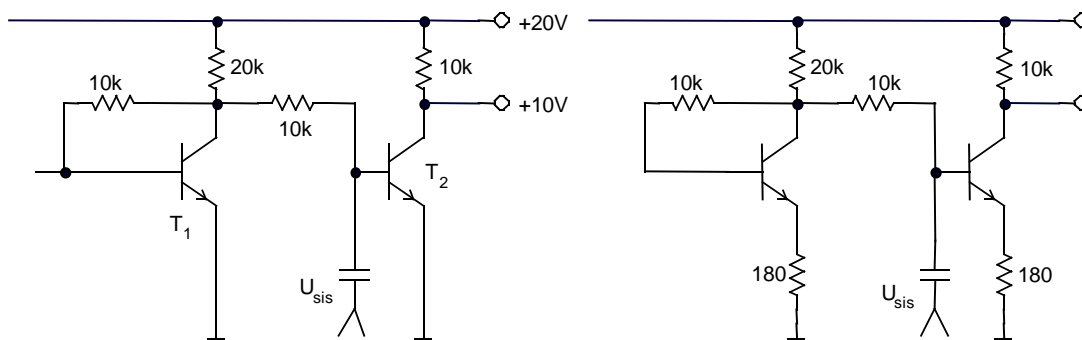
Joon. 3.2.4



Joon. 3.2.5

B. Lisatransistori kasutamine

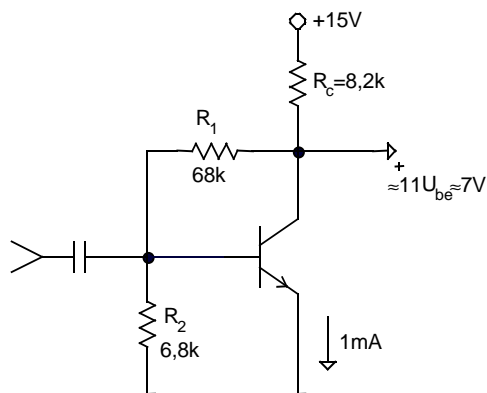
Toodud võimalus on eriti efektiivne paaristransistoride korral, samuti mikroskeemiseseks kasutuseks. Skeemis (joon. 3.2.6) saadakse eelpinge lisatransistori T_2 abil, mis ühtlasi tagab ka automaatse temperatuurikompensatsiooni. Selle transistori kollektorvool on näiteks 1 mA, kollektori potentsiaal on nullilähedane - täpsemini - maa potentsiaalst baasi-emitterpinge võrra kõrgem. Kui mõlemad transistorid on valmistatud ühel ja samal alusel (kristallil), siis nende parameetrid on ühesugused ja transistoril T_2 tekib eelpinge, mis tekitab ka tema kollektorvoolu 1 mA ja tema kollektorpinge 10 k Ω kollektortakisti korral on 10 volti. Seega on tagatud sümmeetriline tööpunkt +/- 10 V signaali läbiminekuks. Temperatuuri mõju on antud skeemis tänu transistoride identsusele kompenseeritud.



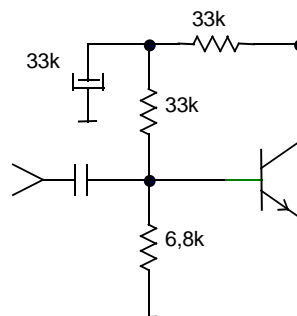
Joon. 3.2.6

C. Tagasiside kasutamine alalisvoolu järgi

Vaatleme joonist 3.2.7. Skeemis võetakse eelpinge transistori



Joon. 3.2.7



Joon. 3.2.8

kollektorilt. Baasipinge ületab maa potentsiaali avatud diodi (B-E siire) pinge võrra. Kuna eelpinge võetakse jagurilt ülekandega 10:1 - ga, siis kollektoripinge ületab maa potentsiaali avatud diodi 11 - kordse pinge võrra, olles seega ca 7 V. Toodud skeem vähendab ka transistori küllastusohu, mis võib ilmneda tavalise pingestuse juures, kui transistori võimendustegur β juhtub olema väga suur. Skeemi saab kasutada juhul, kui ei ole nõutav kõrge tööpunkti stabiilsus. Kollektori tööpunkti temperatuuritriiv küünib antud skeemis ca 1 voldini. Suurem tööpunkti stabiilsus saadakse mitme astme haaramisega tagasiside ahelasse, nende variantide poole pöördume veidi hiljem. Siintoodud tagasiside vähendab astme sisend- ja väljundtakistust. Sisendsignaali suhtes takistus R_1 mõjub väiksemana oma tegelikust väärtusest. See on tingitud astme pingevõimendusest ning võimendatud signaali tagasikandumisest sisendisse üle takisti R_1 . Selle vältimiseks kasutatakse lahtisidestust tagasisidest vahelduvvoolu (signaalisageduse) järgi (joon. 3.2.8). Võib ka suurendada eelpingetakistit, kuid siis hakkab eelpinge baasivool suuremat mõju avaldama.

Märkusi ÜE skeemi võimenduse kohta.

Esiolgu võib tunduda, et pingevõimendustegurit saab suurendada kollektorvoolu tõstmisega, kuna transistori sisemine emittertakistus r_e väheneb voolu kasvades. Tegelikult tuleb aga siis suurema kollektorvoolu tagamiseks vähendada kollektortakistust, mis viib võimenduse vähenemiseni. Tegelikult kujuneb välja olukord, kui rahuolukorra kollektoripinge on pool toitepingest U_{toide} , saame võimenduseks $K = 20U_{toide}$ - ja seda praktiliselt sõltumatu rahuolukorra kollektorvoolust.

Erandi moodustab olukord, kus kollektorkoormuseks kasutatakse aktiivset koormust - näiteks transistori voolugeneraatori lülituses. Siis saadakse suur võimendustegur tänu voolugeneraatori suurele dünaamilisele sisetakistusele ja väikesele alalispingelangule.

3.2.4 Voolupeegel

Ülalvaadeldud eelpingestusskemilt lisatransistoriga saab üle minna nn voolupeegli (joon. 3.2.9 a) käsitlusele. Voolupeegli töö