

Selle tulemusena saame

$$f_g = KA_{võim} f_{gA} = g \quad f_{gA} : f_g \cdot f_{gA}^{-vt} \text{ joon 4.1.2.},$$

kus g - ringahela ülekande \dot{g} piirväärtus madalatel sagedustel.

Ringülekande g valemist tuleneb, et

$$f_g = \left(\frac{A_{võim}}{A} \right) f_{gA}.$$

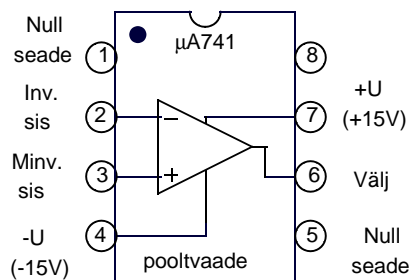
Saame seega, et $f_g A = f_{gA} A_{võim} = f_T^{10}$.

Siit järeldub, et tagasisidestatud võimendi võimendusteguri ja sagedusriba laiuse korrutis võrdub sagedusega, kus tagasisidestamata võimendi võimendustegur võrdub ühega.

Tagasiside mõjub ka skeemi sisend - ja väljundtakistustele, moonutustele. Neid omadusi vaatleme lähemalt konkreetsete rakenduste juures.

4.2 Operatsioonvõimendid

Operatsioonvõimendid on oma universaalsuse tõttu üheks enamlevinumaks võimendite liigiks. Ta kujutab endast meie poolt varemvaadatud diferentsiaalsisendiga võimendit, tänu millele saadakse kõrge alalisvoolu stabiilsus ning võimalus koostada skeeme inverteeriva ja/või mitteinverteeriva sisendiga. Reeglina omavad operatsioonvõimendid suurt võimendustegurit (10000...1000000), kõrget sisendtakistust ja suhteliselt madalat väljundtakistust. Tavaliselt võimaldavad nad saavutada väljundsignaali ulatuse toitepingeni välja (levinud on siin sümmeetriline toide, on võimalus ka ühepolaarseteks toiteks). Üheks levinumaks operatsioonvõimendiks on $\mu A741C$ ehk lihtsalt 741 (joon. 4.2.1),



Joon. 4.2.1

see on ränikristallil valmistatud 20 transistorist ja 11 takistist koosnev laiatarbeskeem.

Operatsioonvõimendile (OV) on omased järgmised reeglid:

1. OV väljund püüdleb selles suunas, et sisendsignaali erinevus viia nulliks. Kuna tagasisideta OV võimendustegur on väga suur, siis juba mõnekümne mikrovoldine sisendpinge viib OV väljundpinge

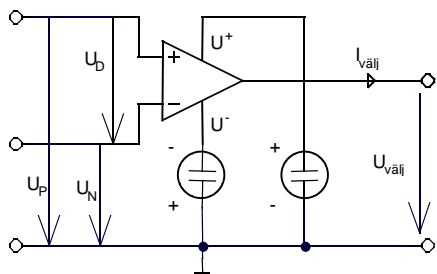
¹⁰ Ribalaiust tähistatakse tihti ka BW-ga.

maksimaalväärtuseni (piiramiseni), siis ei pruugi selle mõnekmne mikrovoldise pingega sisendis arvestada (võttes selle võrdseks nulliga). Tegelikult muidugi ei tähenda see reegel mitte seda, et OV ise reguleerib oma sisendpinget; reaalstes rakendustes toimub selline regulatsioon tavaliselt mingi OV- välise skeemi abil.

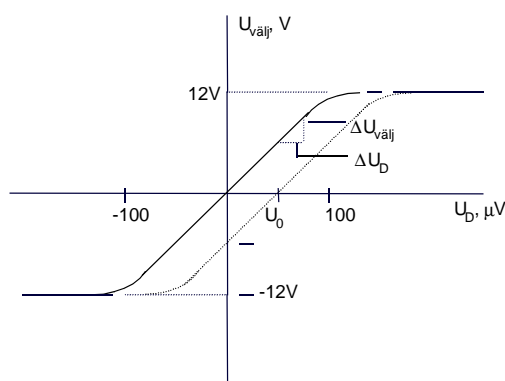
Näiteks kasutades OV-d kui võrdlusskeemi eesmärgiga lähendada mingit suurust etteantuga - minimiseerida veasignaali.

2. OV sisend voolu ei tarbi. Tegelikult muidugi on sisendvool olemas (741 tarbib sisendis 0,08 mikroamprit, väljatransistorsisendiga OV- d tarbivad mõned pikoamprid), kuid praktilistes rakendustes tavaliselt ei pruugi nende vooludega arvestada.

Järgnevalt vaatleme veidi lähemalt OV põhiparameetreid ja omadusi. Vaatleme joonist 4.2.2 juba meile tuttava diferentsiaalse



Joon. 4.2.2



Joon. 4.2.3

sisendskeemiga. P sisend on siin mitteinverteeriv, skeemil tähistatakse seda tavaliselt + tähisega. N sisend on inverteeriv (-tähis). Sisendsignaali vahe (diferentsiaalsignaali) $U_d = U_p - U_n$. Selleks, et kindlustada OV töö nii positiivsete kui ka negatiivsete sisendsignaalidega, kasutatakse sümmeetrilist toidet (tavaliselt +/- 15 V). Põhimõtteskeemides jäetakse tihti toiteahelad välja joonistamata. Kuna tegelikud OV ei ole ideaalsed, siis järgnevalt vaatleme olulisi OV kirjeldavaid parameetreid, millised siis näitavad kuivõrd erineb reaalne OV ideaalsest.

Diferentsiaalne võimendustegur avaldub

$$A_D = \Delta U_{\text{välj}} / \Delta U_D = \Delta U_{\text{välj}} / \Delta(U_p - U_n) = \begin{cases} \Delta U_{\text{välj}} / \Delta U_p & \text{kui } U_n = \text{const}, \\ -\Delta U_{\text{välj}} / \Delta U_n & \text{kui } U_p = \text{const}. \end{cases}$$

Seda nimetatakse ka OV enda (st tagasisideta) võimendusteguriks. Joonisel 4.2.3 on toodud tüüpiline väljundpinge sõltuvus sisendpingest. Ideaalsel OV-l läbib karakteristik 0-punkti, reaalsel on see karakteristik mõnevõrra nihutatud. Selleks siis, et väljundpinge oleks nullise sisendpinge korral null, tuleb anda sisendisse teatud alalispinge - nulli nihkepinge. Olles suurusjärgus mõned millivoldid, pole alati (tavaliselt vahelduvsignaali võimendites) oluline saavutada nullist alalispinget. Nulli nihkepinge sisseviimiseks on osadel OV-del selleks ettenähtud vastav sisendviik.

Pärast nulli kompensatsiooni on võimalik nulli triiv, tingituna ajalisest faktorist, temperatuuri ning toitepingete muutustest:

$$\Delta U_0(v, t, U_b) = \left(\frac{\partial U_0}{\partial v}\right)\Delta v + \left(\frac{\partial U_0}{\partial t}\right)\Delta t + \left(\frac{\partial U_0}{\partial U_b}\right)\Delta U_b$$

Selles valemis on järgmised suurused:

$\frac{\partial U_0}{\partial v}$ -temperatuuritriiv, olles tavaliselt 3...10 mikrovolti/°C;

$\frac{\partial U_0}{\partial t}$ -ajaline triiv, mõned mikrovoldid kuus;

$\frac{\partial U_0}{\partial U_b}$ -triiv summaarse toitepinge muutusest, 10...100 mikrovolti toitepinge ühe voldi kohta.

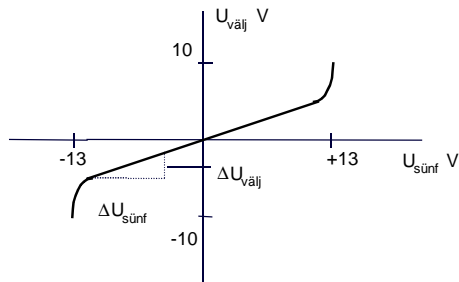
Edaspidi eeldame, et nihkepinge on kompenseeritud. Siis tuleneb, et

$$U_{välj} = A_D \quad U_D = A_D(U_P - U_N).$$

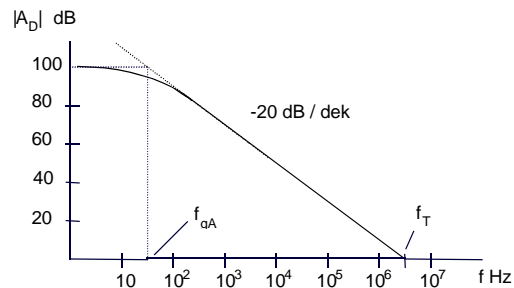
Pöördume veelkord sümmeetrilise häire mahasurumisteguri juurde. Ideaalsel juhul, andes sisenditesse ühesugused pinged, peaks väljundpinge võrduma nulliga. Reaalselt see nii ei ole, ilmneb sümmeetrilise signaali võimendustegur

$$A_{sümf} = \Delta U_{välj} / \Delta U_{sümf}.$$

Nagu nähtub jooniselt 4.2.4, on väga suure sünfaasse signaali



Joon. 4.2.4



Joon. 4.2.5

korral selle ülekanne ka suur. Niisiis, sünfaasse häire (signaali) mahasurumise tegur avaldub

$$SSMT = A_{dif} / A_{sümf}.$$

Selle tüüpilisteks väärtusteks on 10 000...100 000.

OV stabiilsuse tagamiseks peaks tema karakteristik langema kokku esimest järku (RC)

madalpääsfiltriga, seda vähemalt sageduseni, kus diferentsiaalne võimendus $A_{dif} = 1$ (joon. 4.2.5). Selle filtri ülekanne on teatavasti

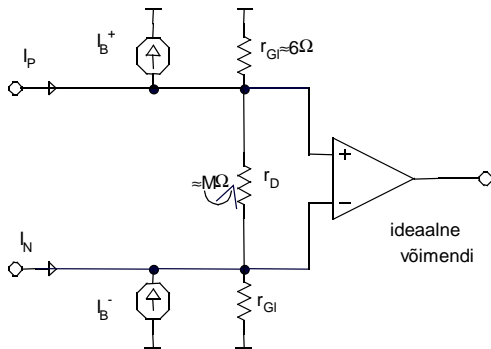
$$\dot{A}_D = \frac{A_D}{1 + j(f/f_{gA})},$$

kus A_D on võimenduse piirväärtus madalatel sagedustel. Üle lõikesageduse f_{gA} , mis vastab 3dB karakteristiku langusele, on võimendi ülekande moodul pöördvõrdeline sagedusega. Seega tagatakse seos

$$|A_D|f = A_D f_{gA} = f_T.$$

Sagedusel f_T on diferentsiaalvõimenduse moodul $|A_d| = 1$. Nagu nähtub varasemast valemist, on piirsagedus f_T võrdne võimendusteguri ja ribalaiuse korrutisega.

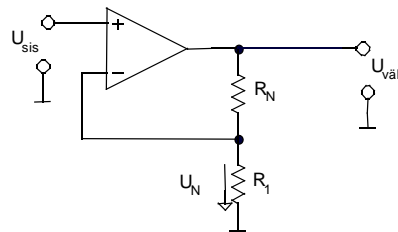
Sisendtakistuse juures eristatakse sisendtakistust r_D ja r_{GI} diferentsiaalse ja sümmeetrilise signaali suhtes (joon. 4.2.6). Eristatakse ka sisendtakistust vahelduv- ja alalissignaali suhtes.



Signaalile: $I_B = \frac{1}{2}(I_B^+ - I_B^-)$

0 – nihke vool: $I_0 = |I_B^+ - I_B^-|$

Joon. 4.2.6



Joon. 4.2.7

Järgnevalt vaatleme kahte OV põhilülitust - mitteinverteeriv ja inverteeriv võimendi ning nende põhiparameetreid.

4.2.1 Mitteinverteeriv võimendi OV-1

Kasutades tagasisideahelana pingejagurit ja pinge mahaarvamiseks (lahutamiseks) OV diferentsiaalseid sisendeid, saame joon. 4.2.7 toodud sisendsignaali mitteinverteeriva skeemi. Tagasiside tegur K avaldub siin kui $R_1/(R_1 + R_N)$. Lähtudes idealiseeritult, saame OV

võimendusteguriks

$$A = U_{\text{välj}} / U_{\text{sis}} = 1/K = 1 + R_N / R_1.$$

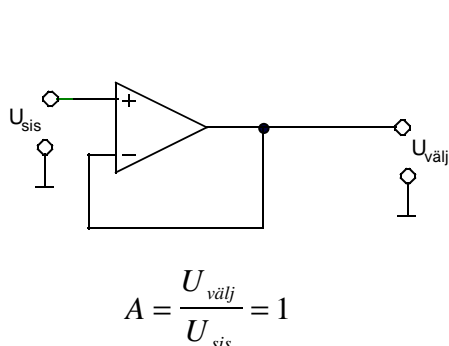
Kasutades reaalsel OV-d osutub, et signaalide lahutamise sisendis ei toimu ideaalselt, kuna sünfaasse signaali mahasurumistegur (SSMT, valemite tähistame edaspidi kui G) omab lõplikku suurust. Eeldades nihkepinge võrdseks nulliga, saame $U_{\text{sümf}} = U_{\text{sis}}$ ja $U_{\text{dif}} = U_{\text{sis}} - KU_{\text{välj}}$ korral

$$A = A_D / (1 + KA_D) [1 + (1/G)].$$

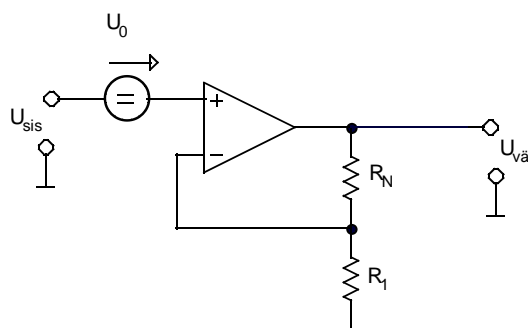
Näeme, et kui siin $G \gg 1$ ja $g = KA_{\text{dif}} \gg 1$, saame varemtoodud idealiseeritud seose.

Oluliseks mitteinverteeriva võimendi erijuhuks on skeem, kus $K = 1$ -st $R_N = 0$ ja R_1 on lõpmatu suur (joon. 4.2.8). Sellise võimendi ülekande võrdub ühega, lülitust nimetatakse ka jälgivskeemiks. Skeem leiab kasutust nagu emitterkordajagi - takistuste transformeerimiseks. Oluliseks eeliseks on siin aga asjaolu, et sisend- ja väljundpinge erinevus on vaid mõni millivolt.

OV eelpepinge mõju leidmiseks vaatleme skeemi 4.2.9. Osutub, et



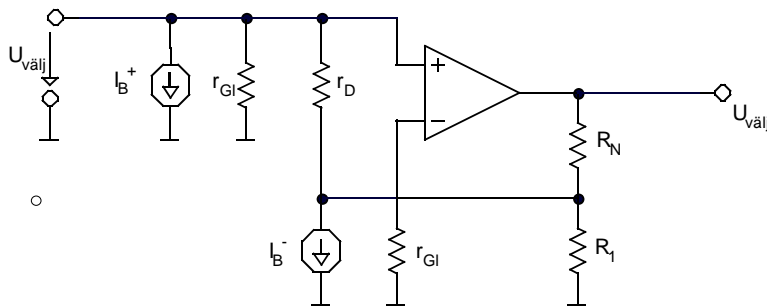
Joon. 4.2.8



Joon. 4.2.9

varemvaadeldud OV lülitustes ja ka jälgivskeemis on eelpepinge lülitatud järjestikku sisendpingega. Seega võimendub ka eelpepinge (selle muutus) nagu sisendpingegi, A korda.

Sisendtakistus. selleks tuleb vaadelda tagasisidestatud OV lülituse aseskeemi (joon. 4.2.10). Tänu tagasisidele on takistusele



Joon. 4.2.10

r_D langev pingeline väike:

$$U_D = U_{välj} / A_{võim} = U_{sis} / g.$$

Seega sellest takistusest voolab läbi vool suurusega U_{sis} / g r_D . Tänu tagasiside tegevusele korrutub sisendtakistus teguriga g . Vastat tagasisidet nimetatakse potentsiomeetriliseks. Seega vastavalt joonisele saame resulteeruvaks sisendtakistuseks

$$r_{sis} = \Delta U_{sis} / \Delta I_{sis} = g r_D || r_{Gl} \approx r_{Gl}.$$

See suurus ületab isegi bipolaarsete sisendtransistoride korral 100 megaoomi. Tuleb rõhutada, et jutt on eranditult diferentsiaalsest sisendtakistusest - st et sisendvoolu muutused on väikesed samal ajal kui sisendvoolu keskväärus (alaliskomponent) I_B võib võtta palju suuremaid väärtusi.

Illustreerime ülaltoodud arvulise näitega. Olgu signaali allikas sisendtakistusega $R_g = 1$ megaoomi.

Olgu nõutud, et võimendi sisendtakistusega sisseviidav viga (signaali muutus sisendtakistuse pealelülilimisel) ei tohi ületada 0,1 %. Seega sisendtakistus peab võrduma

$$r_{sis} \approx r_{Gl} \geq 1 \text{ G}\Omega.$$

Selline sisendtakistus on saavutatav OV tüübiga 741. Ainult et tema sisendvool signaali puudumise korral on $I_B = 200$ nA. Selle voolates läbi signaali allika tekib seal täiendav pingelang 200 mV. Selle võib põhimõtteliselt kompenseerida, kuid alati pole signaali allika takistus täpselt teada. Seetõttu on soovita valida signaali allika takistuse korral üle 50 kiloomi väljatransistoris sisendiga OV. See on parem ka selle tõttu, et väljatransistoridega OV omab kõrgeoomilise signaali allika korral paremaid müraomadusi.

Väljundtakistus. Piirdume siin lõpptulemuse avaldamisega ilma tuletuskäiguta.

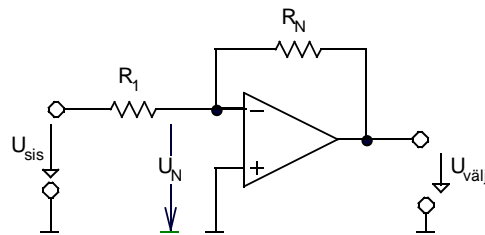
$$r'_{välj} = r_{välj} / (1 + K A_D) \approx r_{välj} / g,$$

seega näiteks võimendusteguri $A = 10$ ja $A_{võim} = 10\,000$ korral tagasisidega haaratud võimendi väljundtakistus väheneb 1 kiloomilt 0,1 oomini. Õeldu on kehtiv 3 dB languste vahelises sagedusribas. Väljaspool seda väljundtakistus hakkab kasvama, kuna suurus $|g|$ väheneb 20 dB

dekaadi kohta. Seejuures hakkab ilmema väljundtakistuse induktiivne iseloom, kõrgematel sagedustel saavutab väljundtakistus tagasisideta võimendi väljundtakistuse.

4.2.2 Inverteeriv võimendi

Siin maandatakse mitteinvertiiv sisend (joon. 4.2.11),



Joon. 4.2.11

sisendsignaali antakse takistusele R_1 . Eeldame, et sisendpinge muutub hetkeliselt nullist kuni U_{sis} . Siis pinge U_N (vt joonist) saab väärtuse

$$U_N = \left[\frac{R_N}{R_N + R_1} \right] U_{\text{sis}},$$

kuna esimesel momendil väljundpinge on veel null. Seega pinge

$U_D = U_P - U_N$ on negatiivne. Tänu suurele võimendustegurile A_D saavutab väljundpinge kiirelt teatud negatiivse väärtuse; ühega võrdneb U_N suurus. Väljundpinge väheneb senikaua, kuni sisendpinge U_N saavutab praktiliselt nullile võrdse väärtuse.

Tekkinud väljundpinge, millele vastab $U_N \approx 0$, leidmiseks kirjutame Kirchoffi esimese seaduse järgi (eeldades nullist sisendvoolu):

$$U_{\text{sis}}/R_1 + U_{\text{välj}}/R_N \approx 0.$$

Siit saame

$$U_{\text{välj}} \approx -\left(\frac{R_N}{R_1} \right) U_{\text{sis}}.$$

Antud skeemis võib formuleerida negatiivse tagasiside tegevust kui püüdu tagada sellise väljundpinge, milline vastaks sisendpingele

$U_N \approx 0$. Seega on N - sisend on sarnane nullpotentsiaali punktile skeemis, seda punkti nimetatakse ka summeerivaks. Erinevalt mitteinvertiivast võimendist ei oma siin sünfaasi signaali võimendustegur mingit rolli, väljundsignaal on aga sisendsignaali vastasfaasis.

Täpsemaks võimendusteguri avaldamiseks peaksime arvestama pinget U_N väärtust, mis siiski ei võrdu nulliga:

$$U_N = -U_{\text{välj}}/A_D. \text{ Siis } A = -(1-K) \left[A_D / (1 + KA_D) \right].$$

Arvestades, et $K = R_1 / (R_1 + R_N)$ ja eeldades, et $g = KA_D \gg 1$, saame

$$A = -(1 - K)/K = -R_N/R_1.$$

Erinevus ideaalsest olukorrast määratakse ka siin, nagu mitteinverteerivas võimendis, ringahela võimendusteguriga $g = KA_D$.

Võimendit võib ka lihtsamini analüüsida. Selleks teadvustame, et potentsiaal punktis B võrdub maa potentsiaaliga. Seega vastavalt OV põhiomadusele võrdub ka punkti A potentsiaal nulliga. Siit järeldub, et takistil R_N on väljundpingega võrdne pinge ja takistil R_1 on sisendpinge. Seega eeldades, et OV sisendvoolu ei tarbi, saame, et võimendustegur kui väljund- ja sisendpinge suhe avaldub

$$K = -R_N/R_1.$$

Sisendtakistus on siin tunduvalt väiksem kui OV sisendtakistus. Selle võib leida (vt joon.), võttes $U_N \approx 0$. Sellisel juhul saame, et

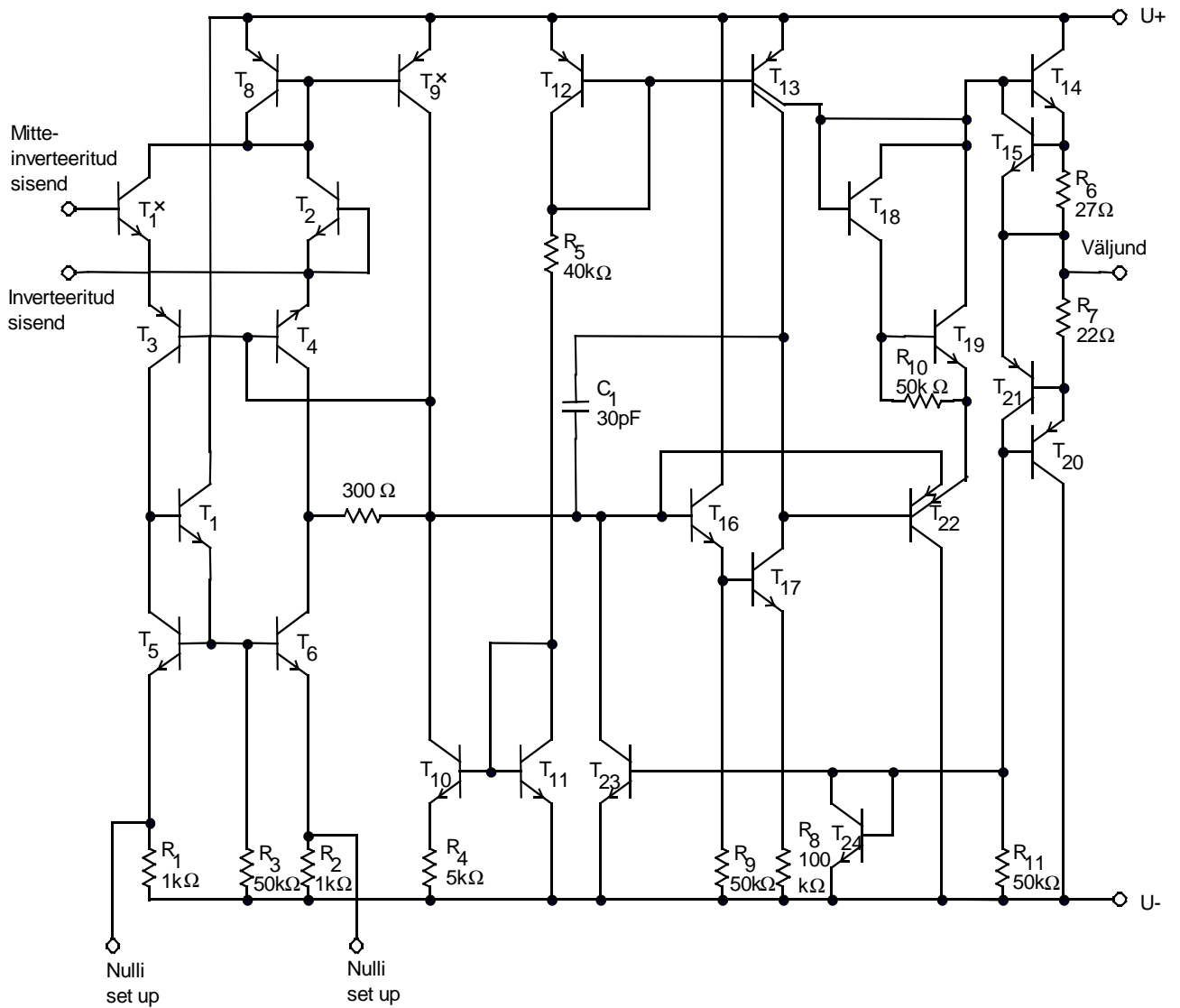
$$r_{sis} \approx R_1.$$

Väljundtakistuse suhtes on nii mitteinverteeriv kui ka inverteeriv võimendi väikeste signaalide režiimis identsed, seega väljundtakistus leitakse neil ühtviisi.

4.2.3 Operatsioonvõimendite täpsustatud käsitlus

Vaatleme laiatarbe OV 741 skeemi (joon. 4.2.12). Tal on diferentsiaalaste, mille koormuseks on voolupeegel; edasi järgneb ÜE aste npn transistoril, mis omab samuti aktiivset koormust ja mis annab põhiosa võimendustegurist. Kahetaktiline väljundaste on lülitatud pnp transistoril koostatud emitterkordaja väljundisse.

Selle OV karakteristikud on vaadeldavad paljude juhtude jaoks ideaalsetena; paraku aga mitte kõigi rakenduste korral ei saa me jätta tähelepanuta erinevusi ideaalsest OV-st. Järgnevalt püüamegi vaadelda, mida kujutavad endast ideaalse OV parameetrid ja kui palju nad erinevad reaalistest.



Joon. 4.2.12

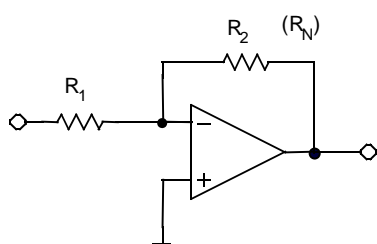
Niisiis, ideaalse OV parameetrid on järgmised:

1. Sisendtakistus (nii diferentsiaalse kui ka sünfaasse signaali suhtes) on lõpmatu suur; sisendvoolud aga võrduvad nulliga.
2. Väljundtakistus (tagasisideta) on null.
3. Pingevõimendustegur on lõpmatu suur.
4. Sünfaasse signaali võimendustegur võrdub nulliga.
5. Väljundpinge võrdub nulliga võrdsete sisendpingete korral mõlemil sisenditel (nihkepinge on null).

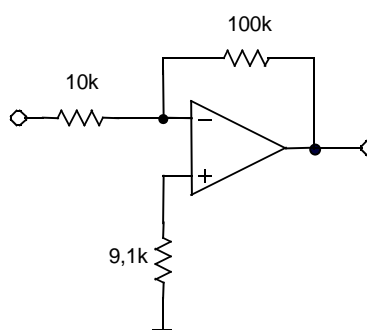
Seejuures ulatuud omadused ei tohi sõltuda temperatuurist, toitepinge muutustest ega ajast. Realsed andmed on toodud vastavates käsiraamatutes, kataloogides. Vaatleme nende parameetrite iseloomustusi.

Sisendvool, nimetatuna ka sisend-eelpingestusvooluks I_{eelp} voola sisendklemmidest sisse (või sõltuvana OV tüübist ka välja). See vool võrdub kokkuühendatud sisendite voolude poolsummagaga; mille mõlemad koostisosad on ligikaudu võrdsed. 741- I on tüüpiliseks 80 nA sisendvool. Sisendvool tekitab eelpinge ja tagasiside takistustel pingelangud; sellest kui väikesed takistused on seal kasutusel, sõltub selle voolu mõju kogu skeemi alalisvoolureziimile ja väljundpinge kõrvalekaldele. Nagu varem öeldud, on bipolaarsete transistoride korral suurusjärguks nanoamprid ja väiksemad voolud, väljatransistoride korral pikoamprid. Kiiretoimelistes OV- s on reeglina suuremad sisendvoolud.

Vaatleme inverteeriva OV näitel (joon. 4.2.13) selle voolu



Joon. 4.2.13



Joon. 4.2.14

mõju. Sisendsignaali olemasolul väljundpinge ei võrdu nulliga. Takistus inverteeriva sisendi poolel määratakse R_1 ja R_2 paralleelühendusega, nihkevool aga võetakse kui läbi R_1 voolav vool. Seetõttu tekitab ta väljundi pingenihe $U_{välj} = I_{eelp} R_2$. Nii tekib OV 741 ja takistite $R_1 = 100$ kiloomi ja

$R_2 = 1$ megoomi ning $I_{eelp} = 200$ nA korral väljundpinge nihkeks $200nA * 1M - oomi = 0,2V$.

Selleks, et vähendada selle voolu mõju, võib teha takistused mõlemitel sisenditel ühesugusteks (joon. 4.2.14). Takistus 9.1. kiloomi on võetud kaalutlusest, et 100 ja 10 kiloomi paralleelühenduse takistus võrdub 9.1 kiloomiga. Soovitav on valida ka tagasiside takistus madalamaoomilisem, sellega väheneb pingelang temal; OV sisendites on tüüpilisteks takistuste väärtusteks 1 kuni 10 kiloomi. Kui ka siin ilmnevad vead, tingituna eelpingevoolust, tuleb valida OV väiksema eelpingevooluga. Nii näiteks OV LM308 $I_{eelp} = 1,5$ nA.

Sisend - nihkevool on sisendvoolude vahe. I_{nihe} on tingitud OV valmistamise ebatäpsusest, kuna täpse sümmeetria tagamisel on ka sisendvoolud võrdsed. Tavaliselt on see vool ca kümnendik eelpingestusvoolust sisendis; 741 jaoks $I_{nihe} = 10$ nA.

Nihkevoolu olemasolul täheldatakse väljundpinge nihet ka alalisvoolu järgi balanseeritud sisendimpedantside korral. Tõsi, see diferentsiaalsete signaal on palju väiksem, kui signaal eelpool vaadeldud voolust sisendtakistuste ebasümmeetria korral. Seega tuleks eelkõige balanseerida OV

sisend; kui sellest ja R_2 vähendamisest ei piisa, tuleb valida OV väiksema sisendvooluga.

Sisendtakistus on sisendtakistus diferentsiaalse signaali kohta (takistus ühe sisendi ja maa vahel maandatud teise sisendi korral). See takistus on tavaliselt palju väiksem kui takistus sünfaasse signaali kohta. Sisendtakistus 741-1 on 2 megaoomi, väljatransistoride korral on see üle teraoomide. Kuna tagasisidehaelatele on omane vähendada diferentsiaalse signaali amplituudi (- TS püüab hoida sisenditel võrdsed pinged).

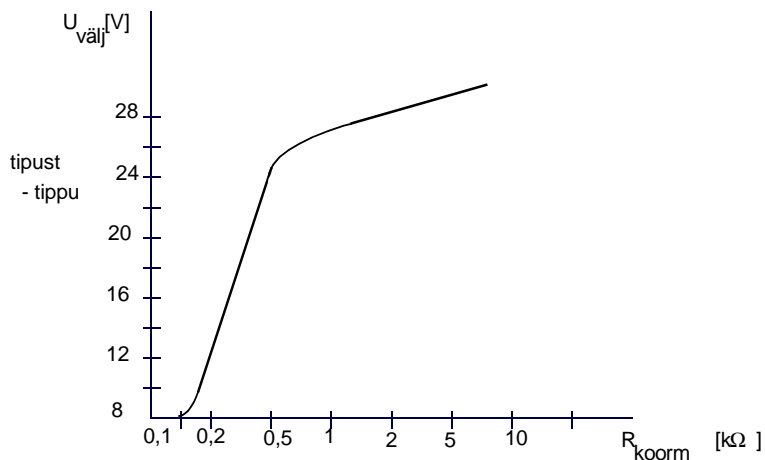
Sünfaasse signaali sisenddiapasoon. OV õigeks tööks on vaja tagada tema sisenditel pingeamplituudid teatud piirides. Nende piiride ületamise korral muutub OV võimendustegur järsult, võides isegi märki muuta. OV 741 ± 15 voldise toite korral on sünfaasse sisendpinge amplituud piiratud ± 12 voldiga. Mõnedel OV võib kas + või - amplituud küündida vastava toitepinge väärtuseni.

Lisaks sellele on sisendpinged piiratud muidugi lubatava sisendpinge piiriga, mille ületamise korral OV läheb rivist välja.

Diferentsiaalse signaali sisenddiapasoon on mõnedel OV -l piiratud väikeste suurustega, nagu näiteks $\pm 0,5$ V, enamikel on aga lubatud sisendpingeks toitepinge väärtus. Lubatud piiride ületamine viib kas signaali moonutusteni või OV riknemisele.

Väljundtakistus; väljundpinge amplituudi sõltuvus koormustakistusest. OV väljundtakistus on tema enda väljundtakistus tagasisideta olukorras. OV 741-1 on see ca 75 oomi, mõnedel väikesevõimsuselistel võib see küündida mõne kiloomini. Tagasisidega võib muuta väljundtakistust väga väikeseks - või muuta (voolutagasisidega) väga suureks. Seetõttu on oluline teda maksimaalset lubatavat väljundvoolu (mis tavaliselt võrdub 20 mA-ga). Pinge $U_{\text{välj}}$ haardeulatus sõltuvana koormustakistusest antakse tihti graafiliselt, antakse ka mõnede tüüpiliste koormustakistuste kohta kehtivad pingeväärtused. OV 741 on võimalik väljundpinge haardeulatus üle 2 kiloomilise koormustakistuse korral 2V väiksem toitepingetest. Kui koormustakistus on 2 kiloomist palju väiksem, siis väljundpinge haardeulatus jääb ka väga väikeseks.

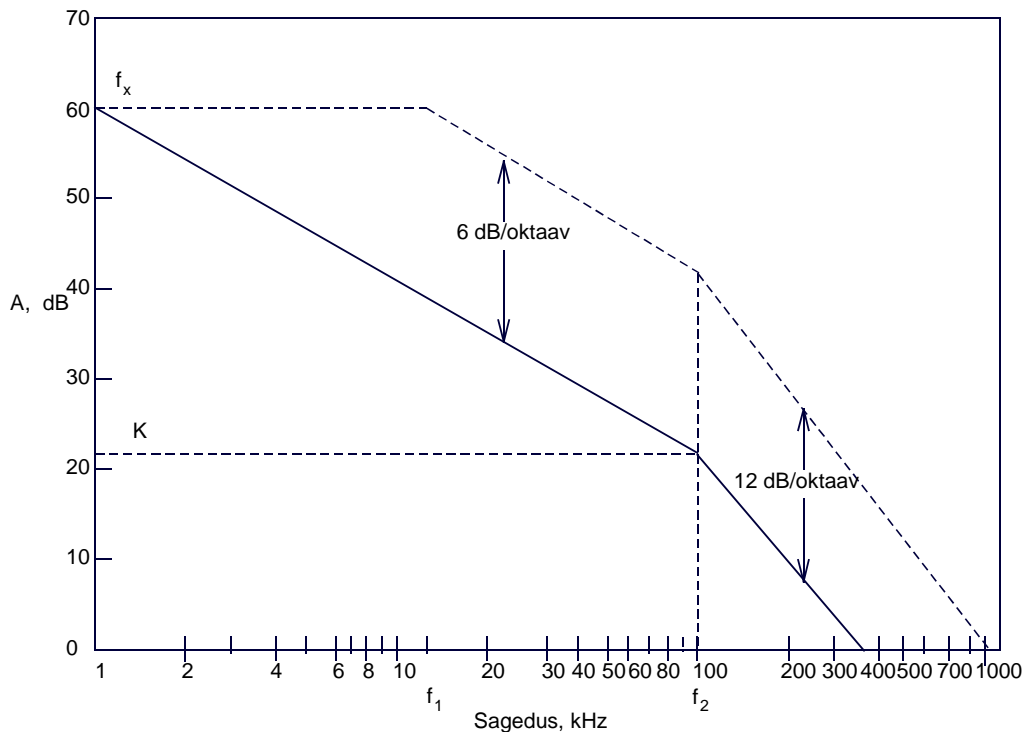
Seega madalaoomiliste koormuste korral on väljundsignaali haardeulatus piiratud. Joonisel 4.2.15 on toodud OV 741 vastav



Joon. 4.2.15

graafik.

Pingevoimendustegur ja faasinihe. Tavaliselt on pingevõimendustegur piirides 100 000 kuni 1 000 000, vähenedes sageduse kasvades ning lõikesagedusel (tavaliselt sagedustel 1 kuni 10 MHz) väheneb üheni. Vastav graafik, koostatuna sisemise sageduskorrektsiooniga OV kohta, näitab, et langus 6 dB/oktaavile (20 dB/dekaadile) algab juba küllalt madalatel sagedustel (OV 741 korral 100 Hz piirkonnas). Sellega tagatakse OV töö stabiilsus (endaergutuse suhtes). See tähendab, et selline karakteristik langus, mis sisuliselt langeb kokku 1. järku MPF sagedusarakteristikuga langusega, kindlustab väljund ja sisendsignaalide vahelise 90 kraadise faasinihke, mis suureneb sageduse kasvades ja saavutab võimenduse vähenemisel üheni piirväärtuse 120...160 kraadi. Teatavasti 180 kraadine faasinihe tähendab positiivset tagasisidet (inverteeriva sisendi suhtes) ning veel ühese võimendusteguri korral aste läheb võnkuma. Seepärast nimetatakse väljund- ja sisendsignaali faasierinevust 180 - st kraadist lõikesagedusel faasivaruks.



Joon. 4.2.16

Sisendile taandatud nihkepinge. Sellise parameetri sissetoomine on tingitud OV valmistamise tehnoloogia ebatäpsustest põhjustatud sisendastmete ebasümmeetriast. Kui ühendada kokku sisendid nullise sisendsignaali korral, siis ilmneb, et võimendi väljund on küllastuses - sisendi nihkepinge võimendatuna OV võimendusteguriga annab väljundis kas + või - toitepinge suuruse pingenihe. Sellist pealeantavat pingete vahet sisendis, mis on vajalik väljundi nullise pinge saavutamiseks, nimetatakse sisendisse taandatud nihkepingseks ehk lihtsalt sisendpinge nihkeks. Tavaliselt on nuli reguleerimine OV- s ettenähtud vastavate sisendite kaudu. Nii näiteks OV 741 on selleks 1 ja 5 viik. Nende viikud vahele ühendatakse 10 kiloomine potentsiomeeter, mille keskväljavõte on ühendatud - toitepingega.

Täpsetes skeemides tuleb arvestada veel sisendpinge triiviga sõltuvana temperatuuri ja ajafaktorist. OV- 1 741 antakse selle tüüpsuuruseks 2 mV (selle jagunemist temperatuuri ja ajafaktori vahel tavaliselt ei täpsustata). OV OP-07 -s on saavutatud lasermeetodiga sisendpingete kokkujooks, mis tagab nihkepinge temperatuurisõltuvuse 0,2 mikrovolti/ kraadile ning ajalise nihke piirides 0,2 mikrovolti/kuus.

Niisiis, nihkepinge tõttu sisendis ilmneb nullise sisendsignaali korral väljundpinge nihe, võrdues

$$U_{välj} = KU_{nihe}.$$

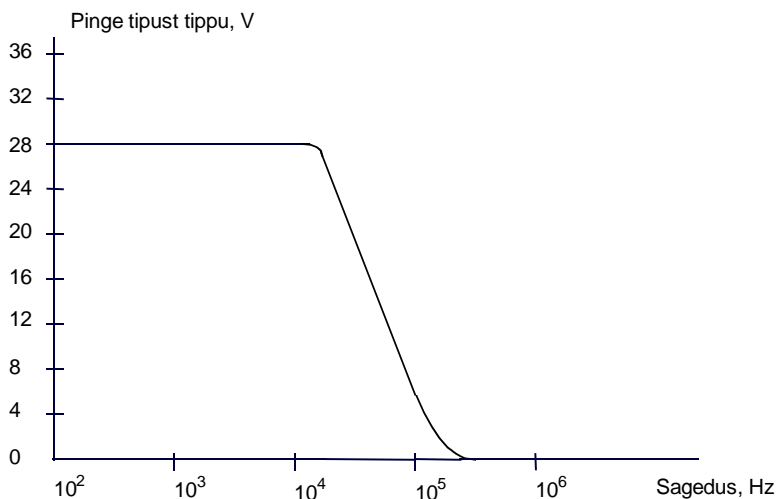
Vaadeldav invertteeriv OV võimendusteruri 100 korral annab maandatud sisendi korral väljundis nihkepinge $\pm 0,6V$ ($U_{nihe\ max} = 6mV$). Siin võib pakkuda järgmised lahendusteed:

- kui alalispingevõimendus pole oluline, võib kondensaatori abil vähendada alalissignaali võimenduse üheni nagu edaspidi vaadeldavas helivõimendis, kus sisendsignaali edasikannmiseks kasutatakse mahtuvuslikku sidestust;
- häälestada OV nulli OV valmistava firma poolt soovitatud reguleerskeemiga;
- kasutada OV vähendatud nihkepingega.

Pinge kasvu kiirus. OV sisemised mahtuvused ja väikesed sisemised voolud piiravad väljundpinge muutuse kiirust isegi suurte sisendpingete erinevuste korral. OV 741 korral saadakse maksimaalselt 0,5V/mikrosekundis; kiiretoimelistel ca 100 V/mikrosekundis; ülikiires puhver - OV- s LH0063C aga 6000V/mikrosekundis. See piirab näiteks siinussignaali korral sisendis teatud sageduse ületamisel signaali amplituudi väljundis. Seetõttu tuuakse OV passis graafik, illustreerimaks väljundpinge amplituudi haaret (maksimaalset väärtust) sõltuvana signaali sagedusest. Siinussignaali sagedusega f hertzi ja amplituudiga a volti, on vajalik pinge kasvu kiirus $2\pi Af$ volti / sekundis.

Välise korrektsiooniga OV -es sõltub pinge kasvu kiirus kasutatavast korrektsioonahelast. Uldiselt, korrektsioonidele, ettenähtuna ühese võimenduse juures, vastab kõige aeglasem kasvu kiirus; see suureneb ca 30 korda sajakordsele võimendusele ettenähtud korrektsioonil.

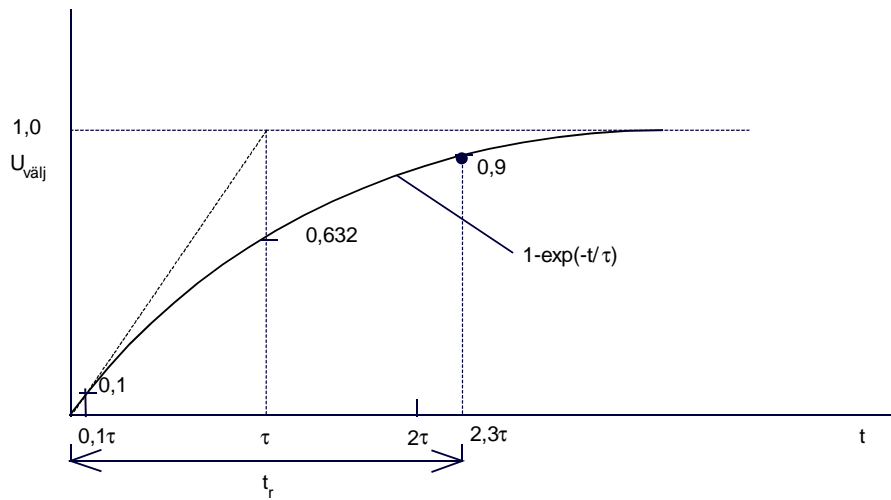
Niisiis, kuna pinge kasvu kiirus on piiratud, hakkab siinuse amplituud väljundis alates teatud piirsagedusest, langema. Joonisel 4.2.17 on toodud OV 741 vastav sõltuvus kasvukiiruse 0,5 V/mikrosekundis korral. Kiiruse s korral väljundsignaal on piiratud



Joon. 4.2.17

tipust tippu väärtusega $A \leq s/\pi f$ siinussignaali sageduse f korral. Sellega seletub languse osa kaldega $1/f$. Horisontaalne osa viitab amplituudi piiramisele toitepingega.

Impulsssignaali korral sisendis täheldub väljundpinge kuju moonutus. Nii näiteks võtab impulsi esifront joon. 4.2.18 toodud



Joon. 4.2.18

kuju. Kasvu kiirus on seotud OV läbilaskeribaga BW, siit tuleneb parameetri t_r^{11} - kasvuaja - seos ribalaiusega:

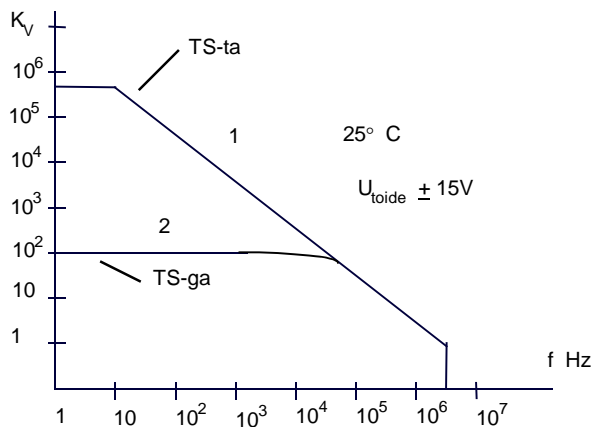
$$t_r BW = 0,35.$$

Kasvuaeg t_r määratakse tavaliselt ajaga, mis kulub signaali kasvust oma 10%-lt nivoolt kuni 90% - sele nivoole.

Temperatuurimõju. Kõik ülaltoodud parameetrid on sõltuvad temperatuurist. Tavaliselt aga skeemi tööd see oluliselt ei mõjuta. Nii näiteks väikesed võimendusteguri muutused ei avaldu tänu kasutatavale negatiivsele tagasisidele. Tavaliselt on temperatuurimuutuste mõju parameetrite muutusele väiksem kui parameetrite erinevus üksikute OV eksemplaride vahel. Erandi moodustab vaid sisendi nihkepinge ja -vool. Nende temperatuurisõltuvus annab väljundpinge triivi. Täpsusmõõtmistel tuleks siin kasutada vastavaid OV-id.

Võimendustegur avatud tagasisideahela korral. Joonisel 4.2.19 on toodud tagasisideta võimendi sageduskarakteristik (1) ja tagasisidega (2). Tänu sellele, et tagasisideta võimendi võimendustegur hakkab teatud sagedusest (siin 1kHz-st) alanema, hakkab vähenema ka teatud momendist tagasisidega võimendi ülekannet. See algab sageduskarakteristikul kohast, kus tagasisideta võimendi

¹¹ f_{rise}



Joon. 4.2.19

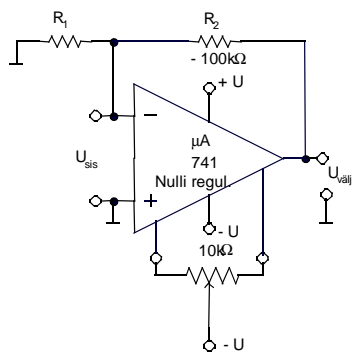
võimendus läheneb väärtusele R_2/R_1 (VT joon.). Toodud karakteristik on joonistatud OV 741 karakteristiku järgi; sagedusel 1 kHz langeb tagasisideta võimendi võimendus 1000 -ni, lõikesageduseks on 1MHz. Siit tuleneb, et kui selle OV baasil ehitada tagasisidestatud võimendi võimendusega 1000, siis 1kHz sageduse korral esineb märgatav võimenduse langus; võimendusteguri 100 korral aga mitte.

Meie kursuse maht ei võimalda ülaltoodud parameetrite ja OV endi sügavamat käsitlust. Küllalt põhjalikult käsitletakse neid Sidney Soklofi raamatus Analog Integrated Circuits. Meie edasine suund oleks OV koostatavate rakenduslike skeemide käsitus.

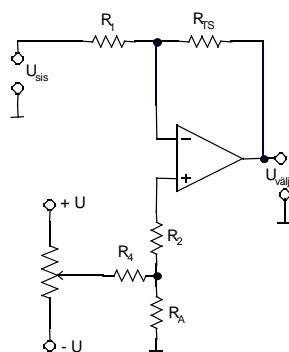
4.3 Skeeminäiteid operatsioonvõimenditel

4.3.1 Sisemine ja väline nullnihke kompenseerimine

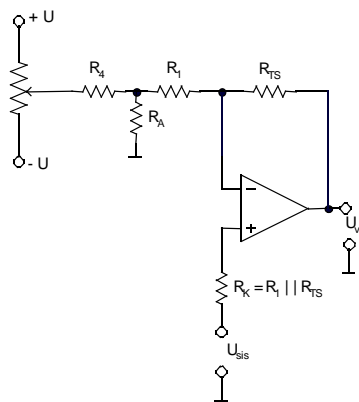
Paljudel OV-l on ette nähtud nn sisemine nullnihke kompenseerimise võimalus. Nii näiteks 741-l sooritatakse see joon. 4.3.1. järgi. Kus see võimalus puudub, tuleb väljundpinge null paika panna välimise skeemi abil (joon. 4.3.2 ja 4.3.3; nihkevoolust tingitud nullikompensatsiooni lisatakistusega sisendis vaatlesime juba varem (joon.)).



Joon. 4.3.1



Joon. 4.3.2¹²



Joon. 4.3.3

Näited vastavad invertteeritud ja mitteinvertteeritud võimenditele.

4.3.2 Integraator ja diferentsaator

Vaatleme joonist 4.3.4. Teatavasti ideaalne integraator annab väljundis signaali, milline on võrdeline sisendsignaali

¹² NB! Joon. 4.3.2 kohta. $R_1 = 20k$ $R_{TS} = 200k\Omega \Rightarrow R_k$ vaja $18,2k$

$$(R_1 \parallel R_{TS}) U = \pm 15V ; I_{eelp} = 0,8\mu A , U_{nihe\max} = 20mV :$$

$$R_4 \approx \pm U / 20I_{nihe} = 15 / \frac{16}{16} = 800k\Omega . \text{ Valime väiksema } R_4 = 400k\Omega .$$

$$R_A / R_4 = U_{nihe\max} / |U| \Rightarrow R_A = (U_{nihe\max} / |U|) R_4 = 400k \cdot (20/15) = 540\Omega .$$

$$R_2 = R_K - R_A = 18,2 - 0,54 = 17,66k (= 18k)$$