

TTÜ ELEKTRIAJAMITE JA JÕUELEKTROONIKA INSTITUUT

ELEKTROONIKA JA JÕUPOOLJUHTTEHNIKA

Koostajad: R. Jansikene ja J. Joller

TALLINN 2003

SISUKORD

1	SISSEJUHATUS.....	3
1.1	ELEKTROONIKA KUI TEADUSHARU.....	3
1.2	TÄHTSAID AASTARVE ELEKTROONIKA AJALOOST	5
2	ELEKTROONIKA PASSIIVKOMPONENDID	7
2.1	TAKISTID	7
2.2	KONDENSAATORID	12
2.3	INDUKTIIVPOOLID.....	15
2.4	TRAFOD.....	16
2.5	PASSIIVKOMPONENTIDE TUNNUSUURUSED JA MARKEERIMINE	20
3	ELEKTROONIKA PÕHIKOMPONENDID.....	28
3.1	POOLJUHTIDE STRUKTUUR JA ELEKTRILISED OMADUSED	28
3.2	PN-SIIRE.....	29
3.3	POOLJUHTDIOODID	31
3.4	POOLJUHTSTABILITRON	36
3.5	LIHTTÜRISTOR	38
3.6	SÜMISTOR.....	43
3.7	SULETAV TÜRISTOR (GTO)	44
3.8	BIPOLAARTRANSISTORID	46
3.9	VÄLJATRANSISTORID	53
3.10	IGBT- JÕUTRANSISTOR	60
3.11	LIITRANSISTORID	63
4	OPTOELEKTROONIKASEADISED.....	64
4.1	VALGUSDIOODID	64
4.2	LASERDIOOD	65
4.3	FOTODIOOD	66
4.4	FOTOTRANSISTOR.....	67
4.5	FOTOTÜRISTOR.....	68
4.6	OPTRON.....	68
4.7	KIUDOPTIKA	69
5	ELEKTROONIKALÜLITUSED	72
5.1	ELEKTROONIKALÜLITUSTE SKEEMID JA NENDE LUGEMINE	72
5.2	TRANSISTORVÕIMENDI	74
5.3	SIGNAALIGENERAATORID	96
5.4	KVARTSGENERAATORID	100
5.5	MULTIVIBRAATOR JA MONOVIBRAATOR	101
6	ELEKTROONIKALÜLITUSTE INTEGREERIMINE	102
6.1	INTEGRAALLÜLITUSTE VALMISTAMINE	102
6.2	ANALOGLÜLITUSED.....	105
6.3	DIGITAALLÜLITUSED.....	105
6.4	INTEGRAALLÜLITUSTE KASUTAMINE	108
7	JÕUELEKTROONIKALÜLITUSED	109
7.1	VÕIMSUSKAOD JÕUELEKTROONIKASEADISTES.....	109
7.2	ALALDID JA VAHELDID	111

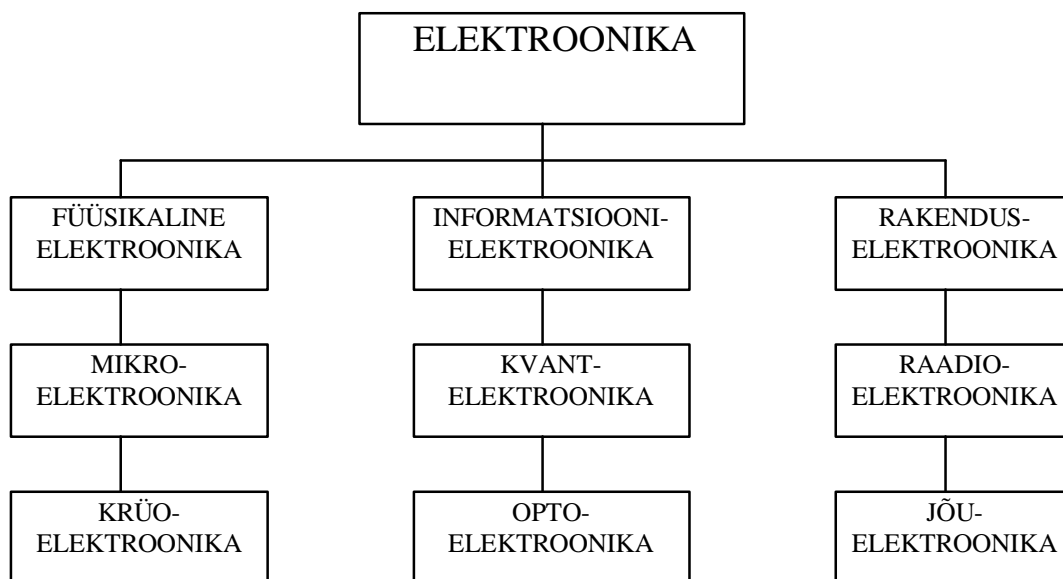
1 SISSEJUHATUS

1.1 Elektroonika kui teadusharu

Elektroonika on teaduse ja tehnika haru, mis uurib ja rakendab vaakumis, gaasides, pooljuhtides jt. keskkondades ning nende piiril liikuvate laengutega seoses olevaid nähtusi.

Elektroonika kui teadusharu on tihedalt läbi põimunud füüsika, elektrotehnika, raadiotehnika ja paljude teiste teadusharudega ning on kaasajal üks kiiremini arenevaid valdkondi. Nüüdiselektroonika on seotud praktiliselt kõigi inimtegevuse sfääridega nagu teadus, tööstus, arvutustehnika, meditsiin jt. Raadioelektroonika, tööstuselektroonika, tuumaelektroonika jne. tähistavad elektroonika rakendamist antud aladel.

Elektroonika jaguneb mitmesugusteks eriharudeks. Lühülevaade elektroonika eriharudest ja nendevahelistest sidemetest on toodud joonisel 1.1.



Joon. 1.1 Elektroonika eriharud.

Füüsikaline elektroonika uurib elektroonika nähtusi teoreetiliselt ja katseliselt ning käsitleb elektronseadiste loomise üldisi põhimõtteid.

Rakenduselektroonika tegeleb elektronseadiste (võimendite, alaldite, mõõteriistade jt) konstrueerimise, tootmise ja rakendamisega peaaegu kõigis inimtegevuse valdkondades, näiteks teaduses, tööstuses, sides, sõjanduses, meditsiinis ja mujal. Elektroonikat rakendatakse ka materjalide töötlemisel (elektronkiir-töötlus).

Raadioelektronika on rakenduselektronika vanim haru, millele pani aluse raadiotelegraafi leiutamine 19. sajandi lõpul. Mõnikord käsitletakse raadioelektronikana raadiotehnikat koos elektroonikaga.

Jõuelektronika tegeleb elektrienergia parameetrite (pinge, vool, võimsus, sagedus jt) muundamise ja juhtimisega elektrooniliste vahendite abil. Tänapäeva jõuelektronika hõlmab elektrienergia muundamist, lülitamist ja juhtimist jõupooljuhtseadistele põhinevate muundurite abil.

Mikroelektronika on elektronika haru, mille eesmärk on üliväikese massi ja mõõtmetega, erineva keerukusega elektronlülituste ja sõlmede loomine ning rakendamine.

Informatsioonielektronika tegeleb elektronseadiste kasutamisega signaalide (sõnumite, andmete) edastamiseks, salvestamiseks ja töötlemiseks.

Optoelektronika tegeleb pooljuhtidel põhinevate kiirgussignaalide allikate ja vastuvõtjatega ning valgusjuhtidega, mis võimaldavad suurendada elektronaparatuuri toimekiirust ning tõsta häirekindlust.

Kvantelektronika tähtsamad saavutused on kvantkellad ning kvantgeneraatorid (laserid) ja kvantvõimendid (maserid).

Krioelektronika uurib ülijuhtivuse kasutamist elektron- ja pooljuhtseadistes.

Sageli eristatakse ka *analoog-* ja *digitaalelektronikat*, mis tähendab pidevate ehk analoogsignaalide ning loogiliste nivooide ehk digitaalsignaalide kasutamist elektroonikaaparatuuris.

Elektronika põhimõisteks on *elektronseadis*. Elektronseadiste baasil koostatakse *elektronikaaparatuur*.

Elektronseadis on seadis, mille töö põhineb elektronide või elektronide ja ionide liikumisel ning kontsentratsiooni muutumisel vaakumis, gaasis, tahkes aines, plasmas või vedelikus.

Elektronikas kasutatavate põhiseadiste liigituse aluseks võetakse reeglina voolu tekitamise põhimõte. Vool elektronseadistes tekib, kas ainult elektronide või elektronide ja ionide liikumise tulemusena. Pooljuhtseadistes tekib vool elektronide ja aukude liikumise tulemusena.

Lähtudes eeltoodud liigituse alusest eristatakse kolme liiki elektronseadiseid:

- **elektronvaakumseadised;**
- **ioonseadised** (gaaslahendusseadised);
- **pooljuhtseadised.**

Elektronvaakumseadistes tekib vool elektronide liikumise tulemusena kõrgvaakumis (hõrendus $10^{-6} \dots 10^{-4}$ Pa). Nende seadiste hulka kuuluvad elektronlambid, elektronkiiretorud jt. seadised. Tänapäeval kasutatakse elektronlampe

elektroonikaaparatuuri koostamisel suhteliselt harva. Peamiselt kasutatakse neid ainult suure võimsusega võimsusvõimendite lõppastmetes ja suure võimsusega raadiosaatjates. Laialdast kasutamist leiavad elektronkiiretorud. *Elektronkiiretoru* on elektronvaakumseadis, milles katoodilt väljuv elektronivoog formeeritakse elektronkiireks, mille intensiivsust tüüritakse elektri- ning magnetväljadega. Elektronkiiretorudest on levinumad *kineskoobid* (muundavad televisioonisignaali kujutiseks), *ostsillograafitorud* (võimaldavad jälgida elektrilisi suurusi) ja *televisioonisaatetorud* (muundavad nähtava kujutise televisioonisignaaliks).

Ioonseadiste töö põhineb elektrilahendusel gaasides või metalliaurudes. Neis kasutatakse peamiselt vääriskaase (Ne ; Ar ; Kr jt) ning elavhõbedauru. Vool seadises tekib nii elektronide kui ionide liikumise tulemusena. Enamlevinud ioonseadised on neonlambid, huumlambid ja türatronid.

Pooljuhtseadistes tekib vool vabade elektronide ja aukude liikumisena tahkes kehas või vedelikus (pooljuhtmaterjalis). Pooljuhtseadised on kaasajal kõige laialdasemalt kasutusel elektroonikaaparatuuri ja seadmete koostamisel. Nende eelisteks on väike energiatarve, väikesed mõõtmed, mass ja maksumus, suur mehaaniline tugevus, pikk tööiga ja eksploatatsiooni lihtsus. Tuntumad pooljuhtseadised on diodid, stabilitronid, türistorid ja transistorid.

1.2 Tähtsaid aastaarve elektroonika ajaloost

- 1895 - raadiotelegraafi leiutamine (Aleksandr Popov ja Guglielmo Marconi). Antud aastaarvu loetakse raadioelektroonika sünniaastaks. Sellega pandi alus raadiotehnikale.
- 1897 - G. Marconi patenteeris raadiotelegraafi.
- 1901 - esimene raadioside üle Atlandi ookeani (G. Marconi).
- 1904 - kahe elektroodiga elektronlambi leiutamine (John Fleming).
- 1914 - USA teadlane Dr. Irwing Langmuir soovitas kasutada elavhõbedaga täidetud diodelektronlampi vahelduvpinge alaldustsüklis (elavhõbealaldi tööpõhimõte).
- 1921 - teaduskonverentsil 01.06.21 formuleeris saksa teadlane F. W. Meyer jõu- elektroonika arengusuunad.
- 1933 - USA firma *Westinghouse Company* alustab ignitronide tootmist. Samal aastal võetakse Saksamaal mootori voolu juhtimiseks esmakordselt kasutusele küllastuv magnetahel (magnetvõimendi).
- 1943 - Rootsi firmas ASEA töötati magnetvõimendite baasil välja juhitavad muundurid (transducers).
- 1947 - valmistati esimene punkttransistor (J. Bardeen ja W. H. Brattain).
- 1956 - USA teadlased John Moll-i juhtimisel valmistasid esimese tüüritava räni-ventiili (türistori).
- 1959 - valmistati esimene integraallülitus (J. S. Kilby, R. Noyce). Seda aastat võib lugeda mikroelektroonika sünniaastaks.
- 1967 - valmistati esimene 256-bitine püsimalukiip.
- 1971 - valmistati esimene 4-bitine mikroprotsessor *Intel 4004*.
- 1980 - võeti kasutusele jõuväljatransistorid.
- 1985 - võeti kasutusele isoleeritud paisuga bipolaartransistorid (*IGBT- Insulated Gate Bipolar Transistor*).

1990 - antakse välja USA patent ühekristallilise mikroprotsessori leiutamise kohta (*Single Chip Integrated Circuit Computer Architecture* - Gilbert Hyatt).
Patenditaotlus oli esitatud aastal 1970.

1993 - firma Intel valmistas mikroprotsessori Pentium taktsagedusega üle 60 MHz.

1.3 Elektroonika arengusuunad

Elektroonikas ei saa olla mingit arengut ilma pooljuhtide arenguta: elementaarfunktsiooni teostamise hind on viimase neljakümne aasta jooksul langenud 30 % aastas. Mitte ükski teine tööstusharu ei ole kogenud nii pikka aasta-aastalt märkimisväärset hindade langust. Veel enam, uute tehnoloogiate võimalused on sellised, et see suundumus võib jätkuda kuni aastani 2010, s.t. kuuskümmend aastat pärast transistori leiutamist. Pooljuhtide rakendused on laienenud sama kiiresti kui on arenenud tehnoloogia, esmalt elektroonilises varustuses ja siis mehaanika alal. See on "kindla üleoleku" fenomeen.

Jõuelektronika vallas jätkub pooljuhtseadiste areng nende omaduste parandamisega. Kõige perspektiivsemateks peetakse *IGBT (Insulated Gate Bipolar Transistor)* ja *MOSFET (Metal Oxide Semiconductor Field Effect Transistor)* transistore ning pingega juhitavaid türistore. Pooljuhtseadistele pole lähimate aastakümnete jooksul võistlusvõimelist alternatiivi ette näha.

Põhiprobleemiks on kujunenud elektromagnetiline ühildatavus (*electromagnetic compatibility*), mis hõlmab elektromagnetiliste häirete, kommutatsiooni liigpingete ja jõu- ning juhtahelate galvaanilise eraldamise probleeme.

Laialdaselt tulevad kasutusele isekohastuvad-, iseõppivad-, ja mudeli järgi juhitavad süsteemid, milliseid sageli nimetatakse *intellektuaalseteks süsteemideks*. Energiakokkuhoiu vajaduse tõttu laieneb sagedusmuundurite kasutusvaldkond. Sagedusmuundureid juhitakse üha enam vektorjuhtimise põhimõttel (*Space Vector Control*).

Seoses sagedusmuundurite pideva täiustumisega on oodata elektertranspordi üleminekut alalisvoolusüsteemilt vahelduvvoolusüsteemile, kusjuures veomootoritena tulevad kasutusele lühisrootoriga asünkroonmootorid, mis muudab elektertranspordi seadmed oluliselt odavamaks. Konkurentsivõimelisemaks muutuvad ka elektriautod.

Energiavarustuse töökindluse tõstmiseks laieneb katkematu elektritoitesüsteemide *UPS (Uninterrupted Power System)* kasutamine. Oluliselt laieneb katkematu elektritoitesüsteemide kasutamine elektri- ja soojusenergiat koostootvates elektrijaamades, mis võimaldab tõsta nii elektri- kui soojusenergiavarustuse töökindlust.

Pulsilaiusmodulatsiooni põhimõtte võetakse kasutusele kõigis võimsates alaldites ja vaheldites ja muundurite projekteerimisel rakendatakse laialdaselt mudeleid, mis kirjeldavad pooljuhtseadiste elektrilisi ja soojuslikke omadusi ning töökindlust. Jõuintegraallülituste ning intelligentsete jõumoodulite *IPM (Intelligent Power Module)* rakendamisega muutuvad üha olulisemaks muundurite topoloogia (kuju, geomeetria) probleemid.

Muundurite tehnoloogia läheneb oma füüsikaliste võimaluste piirile. Muundurite edasine areng on määratud peamiselt pooljuhtseadiste arenguga kuid ideaalne jõuahelate lüliti jääb siiski unistuseks.

2 ELEKTROONIKA PASSIIVKOMPONENDID

2.1 Takistid

Voolutugevus elektriahelas sõltub peale pingest veel juhi omadusest, mida nimetatakse *elektritakistuseks*.

Elektritakistus on juhi omadus avaldada vastupanu elektrivoolule ning ta avaldub pingest ja voolu suhtega $R = \frac{U}{I}$.

Elektritakistuse ühikuks on V(volt)/A (amper) = Ω (oom).

Juhi takistus on võrdeline tema pikkusega ja pöördvõrdeline tema ristlõike pindalaga ning sõltub lisaks materjali temperatuurist.

Juhi takistus arvutatakse järgmise valemiga:

$$R = \rho \frac{l}{S},$$

kus ρ - materjali eritakistus, $\Omega \cdot m$,

l - juhi pikkus, m,

S - juhi ristlõike pindala, m^2 .

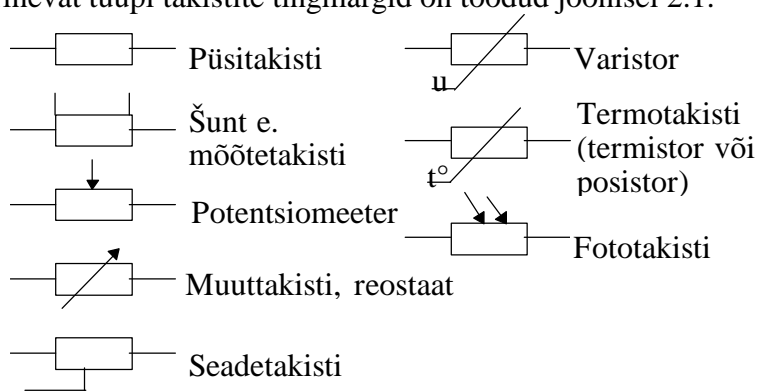
Materjali eritakistus on antud aine ühikulise pikkuse ja ristlõikega juhi takistus. Materjalide eritakistused on toodud füüsika- ja elektrotehnika-alastes teatmematerjalides (näiteks vase eritakistus $\rho = 0,0175 \cdot 10^{-6} \Omega \cdot m$).

Aine takistuse temperatuurisõltuvust iseloomustab *takistuse temperatuuritegur*, mis samuti antakse eelnimetatud teatmematerjalides. Takistuse temperatuuriteguri ühikuks on pöördkelvin K^{-1} (näiteks vase takistuse temperatuuritegur $\alpha = 0,004 K^{-1}$).

Otstarbelt ja ehituselt jagunevad takistid *püsitakistiteks* ja *muuttakistiteks*. **Püsitakistiks nimetatakse kindla takistusega juhti või seadet. Muuttakisti on takisti, mille takistus on sujuvalt muudetav.** Püsitakistite eriliigiks on *mõõtetekistid* ehk *šundid*, mida kasutatakse mõõtriistades vooluanduritena. Muuttakisti võib ühendusviisi järgi olla, kas *potentsiomeeter* (ühendatakse kolme klemmiga) või *reostaat* (ühendatakse kahe klemmiga). Muuttakistite hulka kuuluvad ka *seadetakistid*.

Takistuse muutumise seaduspärasuse järgi eristatakse *lineaar- ja mittelineaartakisteid*. Lineaartakisti (tavalise takisti) pingelang on võrdeline vooluga; mittelineaartakisti takistus sõltub välismõjuritest – pingest (varistoridel),

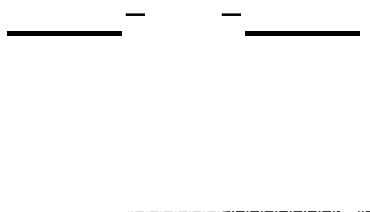
temperatuurist (termotakistitel), valguskiirgusest (fototakistitel) või muudest suurustest. Erinevat tüüpi takistite tingmärgid on toodud joonisel 2.1.



Joonis 2.1. Takistite tingmärgid.

Takistuskeha kuju järgi liigitatakse takistid *kihttakistiteks*, mille isoleerainest alus on kaetud takistusmaterjali kihiga, ja *masstakistiteks*, mille silindriline või risttahukakujuline takistuskeha koosneb tervenesti takistusmaterjalist, ja *traattakistiteks*.

Takistusmaterjaliks on kiht- ja masstakistitel, kas süsinik, süsiniku ja boori segu, metallisulamid, metallioksiidid, grafiidi või tahma ning sideaine paagutatud segu ja pooljuhtmaterjalid. Traattakistiteil on enamasti traadi materjaliks konstantaan (vase ja nikli sulam) või nikroom (nikli ja kroomi sulam). Püsitakisti ja potentsiomeetri levinumad väliskujud on toodud joonisel 2.2.



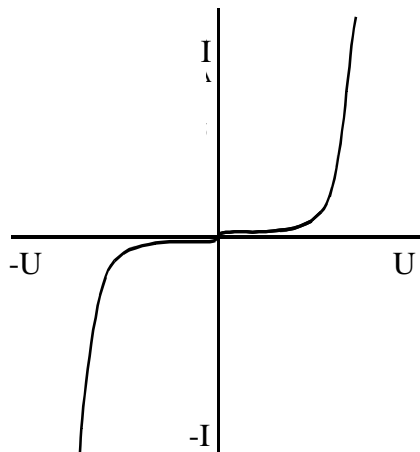
Joonis 2.2. Takisti ja potentsiomeeter.

Takistite põhilisteks tunnussuurusteks on *elektriline takistus*, *elektriline võimsus* ja *takistushälve*. Põhjalikumalt vaadeldakse takistite tunnussuursi ja markeerimist alajaotuses 2.5.

Järgnevalt vaatleme mittelineaartakistite - *varistoride*, *termotakistite* ja *fototakistite* elektrilisi omadusi ja põhilisi tunnussuursi.

Varistor on mittelineaarne pooljuhttakisti (metalloksiidtakisti), mille takistus alaneb järsult alates teatud pingest.

Varistori tunnusjoon on sümmeetriline nullpunkti suhtes, mis võimaldab neid kasutada nii alalis- kui vahelduvvooluahelais. Varistori põhiline rakendus on pingepiirikud ja liigpingekaitse. Varistori tähtsaimaks tunnusjooneks on *pinge-voolu tunnusjoon* $I = f(U)$. Varistori pinge-voolu tunnusjoon on toodud joonisel 2.3.



Joonis 2.3 Varistori pinge-voolu tunnusjoon.

Varistoride põhiparameetrid on järgmised:

1. *Nimipinge efektiivväärtus* U_n näitab kestvalt lubatavat pinge efektiivväärtust (ruutkeskmist väärtust), mille puhul ei ületata varistori lubatvat hajuvõimsust. Varistore toodetakse nimipingetele kuni 660 V. Lisaks antakse ka nimi-alalispinge.
2. *Liigituspinge* U_{lg} näitab alalispinget, mille puhul varistori läbib kindla väärtusega vool, nn. *liigitusvool* (tavaliselt 1 mA).
3. *Staatiline e. alalisvoolutakistus* $R = U / I$.
4. *Diferentsiaaltakistus* $R_d = \Delta U / \Delta I$.
5. *Mittelineaarsustegur* $\beta = R / R_d$.
6. *Voolu temperatuuritegur* näitab varistori voolu suhtelist muutust 1 K kohta püsival pingel. Metalloksiidvaristoride temperatuuritegur on ca -0.05 % / K.

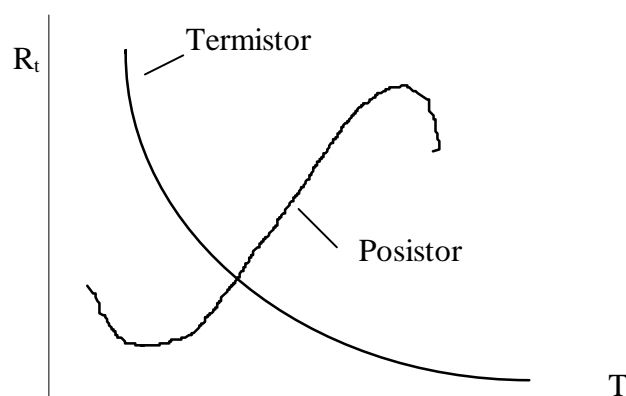
Termotakisti on pooljuhtseadis, mille takistus muutub sõltuvalt temperatuurist, kusjuures kusjuures takistus võib muutuda teda läbiva voolu soojusliku toime tõttu või ümbrustemperatuuri muutuse tõttu.

Termotakistil on suur takistuse temperatuuritegur, mis on kas positiivne või negatiivne. Positiivse takistuse temperatuuriteguriga termotakisteid nimetatakse *posistorideks* (PTC) negatiivse takistuse temperatuuriteguriga termotakisteid aga *termistorideks* (NTC). Eristatakse otse- ja kaudkuumutusega termotakisteid. Pooljuht-takistusmaterjaliks on vase, mangaani ja koobalti oksiidid, baariumtitaanaat jt. ainete segud. Termistorid on varda-, ketta-, tableti-, plaadi- või helmekujulised, posistorid

aga tableti või plaadikujulised. Kaitseks välismõjude eest kaetakse posistorid ja termistorid niiskuskindla lakiga või ümbritsetakse hermeetilise kestaga.

Termotakisteid kasutatakse elektriahelate ja võimendite temperatuuristabiliseerimiseks, mõõteriistades positiivse takistuse temperatuuriteguri kompenseerimiseks, samuti temperatuuri mõõtmiseks, reguleerimiseks ja kontrolliks. PTC termotakisteid kasutatakse peamiselt seadmete liigtemperatuurikaitseks, voolu piiramiseks ja stabiliseerimiseks ning ka kontaktivabaks lülitamiseks.

Termotakisti tähtsaimaks tunnusjooneks on *termiline tunnusjoon* $R_t = f(T)$, mis kujutab endast termotakisti takistuse sõltuvust temperatuurist. Posistori ja termistori termilised tunnusjooned on toodud joonisel 2.4.



Joonis 2.4. Posistori ja termistori termilised tunnusjooned.

Termistoride põhiparameetrid on järgmised:

1. *Nimitakistus* R_n , mis on termotakisti takistus vähima hajuvõimsuse korral; posistoridel antakse takistukordsus positiivse takistuse temperatuuriteguriga vahemikus R_{\max}/R_{\min} .
2. *Vähim hajuvõimsus* P_{\min} , millele vastav vool kuumutab termotakistit niivõrd vähe, et tema takistus ei muutu üle 1%, kui termistor asub 20°C temperatuuriga keskkonnas.
3. *Suurim hajuvõimsus* P_{\max} väljendab võimsust, millele vastav vool kuumutab termotakisti kõrgeima lubatud temperatuurini, kui termistor asub 20°C temperatuuriga keskkonnas.
4. *Soojuslik ajakonstant* τ on aeg sekundites, mis kulub termotakisti jahtumiseks etteantud temperatuurilt 100°C temperatuurile 63°C, kui ta asetada 0°C õhu keskkonda.

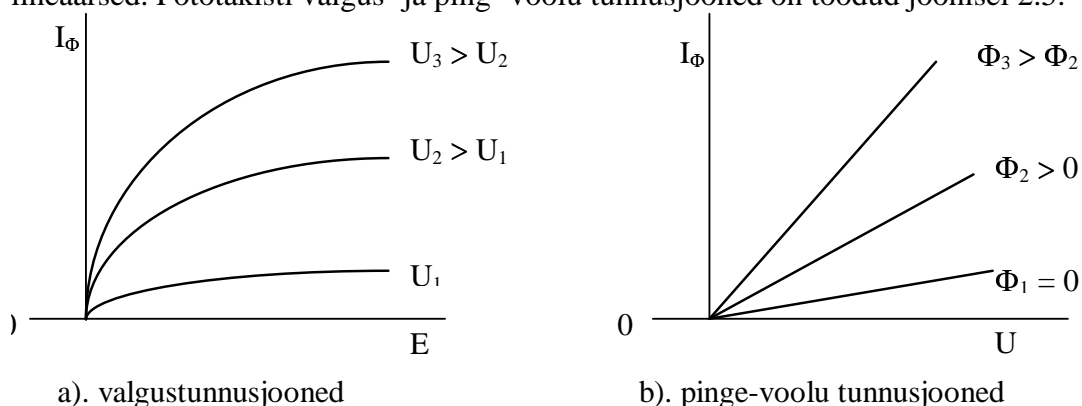
Termotalistite eriliik on *bolomeetrid*, mida kasutatakse elektromagnetilise kiirguse intensiivsuse mõõtmiseks nähtavas või infrapunases kiirgusalas temperatuuri kaugmõõtmisüsteemides.

Fototakisti on pooljuhtseadis, mille takistus väheneb valguskiirguse (nähtava valguse või infrapunase kiirguse) toimel.

Takistuse muutus põhineb sisefotoefektil, mis avaldub elektronide siirdumises juhtivustsooni valguskiirguse mõjul. Kui ühendada fototakisti elektriahelasse jadamisi koormustakistiga, siis sõltub ahela vool ja seega ka koormustakistil tekkiv pingelang fototakisti valgustundliku pinna valgustustihedusest (valgusvoo pindtihedusest).

Konstruktiivselt kujutab fototakisti dielektrilist plaadikest, millele on vaakumpihustamise teel kantud takistuskiht (valgustundlik element). Valgustundliku elemendi materjalina on kasutusel kaadmiumseleniid, kaadmiumsulfiid või pliisulfiid. Element kaetakse vajalikku spektraalkiirgust läbilaskva lakiga või paigutatakse aknaga varustatud hermeetilisse kesta. Fototakisteid kasutatakse valgusmõõtelülitustes ja fotoreleedes.

Fototakisti omadusi iseloomustavad *valgustunnusjooned*, *pinge-voolu tunnusjooned* ja *spektraaltunnusjooned*. Valgustunnusjooned kujutavad endast fotovoolu I_Φ ja valgusvoo pindtiheduse E vahelist sõltuvust. Pinge-voolu tunnusjooned väljendavad fotovoolu I_Φ ja koormustakisti pigelangu U vahelist sõltuvust erinevate valgusvoogude Φ_1 , Φ_2 ja Φ_3 korral. Spektraaltunnusjooned aga väljendavad suhtelise fotovoolu ja valguse lainepikkuse vahelist sõltuvust. Fototakisti valgustunnusjooned on mittelineaarsed, pinge- voolu tunnusjooned on lubatava hajuvõimsuse piires lineaarsed. Fototakisti valgus- ja ping- voolu tunnusjooned on toodud joonisel 2.5.



Joonis. 2.5. Fototakisti valgus- ja pinge-voolu tunnusjooned.

Fototakisti põhiparameetrid on järgmised:

1. *Pimetakistus* R_p on valgustamata fototakisti takistus 20°C juures. Näiteks kaadmiumsulfiidil ca $R_p = 1 \text{ M}\Omega$. Vahel antakse ka valgusvoo pindtiheduse 200 lx korral.
2. *Takistuskordsus* R_p / R_v väljendab pimetakistuse suhet takistusse 200 lx valgusvoo pindtiheduse korral etteantud lainepikkusel. Kaadmiumsulfiidil $R_p / R_v < 10000$.
3. *Pimevool* I_p on valgustamata fototakistit suurimal lubatud pingel vool läbiv vool.
4. *Valgusvool* I_v on vool, mis läbib fototakistit valgusvoo pindtiheduse 200 lx korral nimipingel. *Fotovool* on valgus- ja pimevoolu vahe.

5. *Eritundlikkus* K on fotovoolu suhe kiirgusvoo ja pinge korrutisse.

Fotootakistitel on väikesed mõõtmed, suur tundlikkus ja praktiliselt piiramatu tööiga; nende puudustest tuleb nimetada suhteliselt suurt pimevoolu, tunnusjoonte mittelineaarsust, suurt inertsi ja omaduste temperatuurisõltuvust.

2.2 Kondensaatorid

Juhile antud elektrilaeng muudab tema potentsiaali, kusjuures potentsiaali muutus sõltub peale laengu suuruse ka juhi omadusest, mida nimetatakse *elektrimahtuvuseks*.

Juhi elektrimahtuvus C on suurus, mida mõõdetakse elektrilaenguga Q , mis muudab selle juhi potentsiaali ϕ ühe ühiku võrra:

$$C = \frac{Q}{\phi}.$$

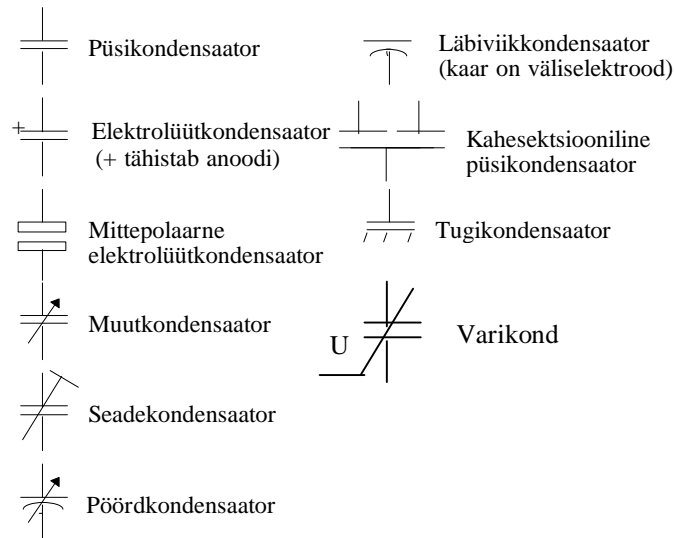
Elektrimahtuvuse ühikuks on C (kulon)/V (volt) = F (farad).

1 F on niisuguse juhi mahtuvus, mille potentsiaali laeng 1 C muudab 1 V võrra. 1 F on suhteliselt suur elektrimahtuvus, mis on võrreldav maakera elektrimahtuvusega ning seetõttu kasutatakse sageli ühikuid μF (mikrofarad) = 10^{-6} F ja pF (pikofarad) = 10^{-12} F.

Kondensaatorid jaotatakse *püsi- ja muutkondensaatoriteks*. **Püsikondensaator on kindla mahtuvusega seadis. Muutkondensaatorite mahtuvus on sujuvalt muudetav.** Püsikondensaatorid liigitatakse dielektriku tüübi järgi paber-, plast-, keraamika-, vilk-, klaas- ja elektrolüüt-kondensaatoriteks. Elektrolüüt-kondensaatorid võivad olla polaarsed ja mittepolaarsed. **Polaarse elektrolüüt-kondensaatori vooluahelasse ühendamisel tuleb ilmtingimata arvestada polaarsust. Vale polaarsusega ühenduse korral kondensaator puruneb.**

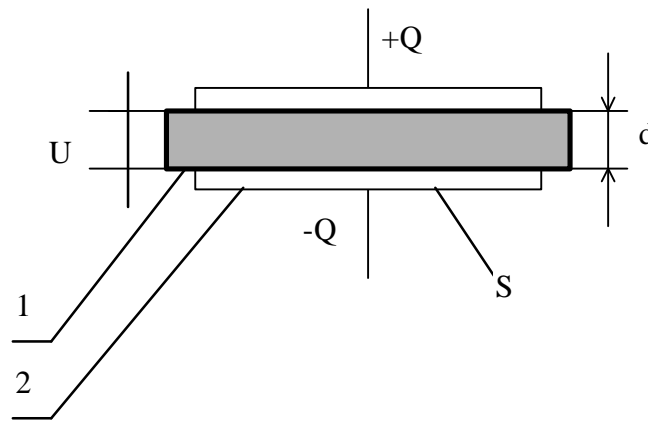
Muutkondensaatorid jagunevad *häälestus- ja seadekondensaatoriteks*. Häälestuskondensaatorid on mõeldud korduvaks reguleerimiseks, seadekondensaatorid ühekordseks seadistamiseks. Enamasti on kõik muutkondensaatorid pöördkondensaatorid.

Kondensaatorite tingmärgid on toodud joonisel 2.6.



Joonis 2.6. Kondensaatorite tingmärgid.

Lihtsamal juhul koosnevad kondensaatorid kahest rööpsest metallplaadist mille vahel on dielektrik (isoleeraine), nagu õhk, vilk, keraamika, elektrotehniline paber jt. materjalid. Lamekondensaatori ehitus on näidatud joonisel 2.7.



1 - dielektrik; 2 - metallplaat; S - plaadi pindala; d - dielektriku paksus.

Joonis 2.7. Lamekondensaatori ehitus.

Amdes ühele plaadile positiivse laengu +Q, tekib teisel plaadil samasuur negatiivne laeng -Q ja plaatide vahel pinge U. Lamekondensaatori elektrilise mahtuvuse saab arvutada valemiga:

$$C = \varepsilon \varepsilon_0 \frac{S}{d},$$

kus ε - suhteline dielektriline läbitavus,

ε_0 - dielektriline konstant ($\varepsilon_0 \approx 8,85 \cdot 10^{-12}$ F/m),

S - plaatide pindala,

d - dielektriku paksus.

Suhteline dielektriline läbitavus ϵ näitab mitu korda on laengutevahel mõjuv jõud selles keskkonnas väiksem kui vaakumis (vaakumi korral $\epsilon = 1$).

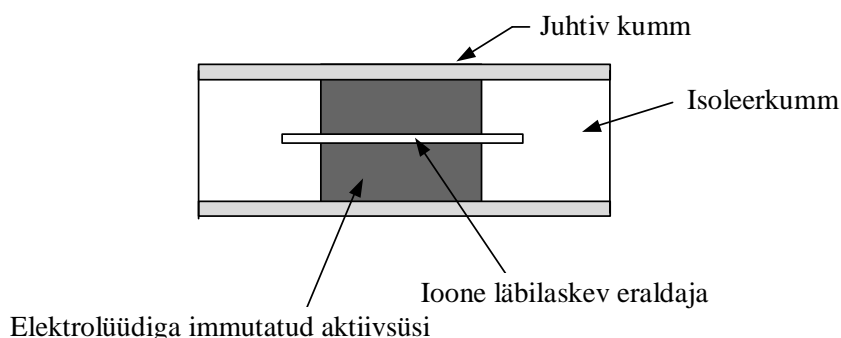
Kahest rööpsest metallplaadist koosneva lamekondensaatori elektrimahtuvus on võrdeline plaatide kohakuti oleva pindalaga ja pöördvõrdeline plaatidevahelise kaugusega ja sõltub lisaks plaatidevahelise dielektriku suhtelisest dielektrilisest läbitavusest.

Kondensaatorite põhilisteks tunnussuurusteks on *elektriline mahtuvus*, *suurim lubatav tööpinge* ja *mahtuvushälve*. Põhjalikumalt vaadeldakse kondensaatorite tunnussuursusi ja markeerimist alajaotuses 2.5.

Suurema mahtuvuse saamiseks võib kondensaatoreid lülitada rööbiti. Sellise ühenduse korral võib kondensaatorpatareid vaadelda ekvivalentkondensaatorina, mille plaatide pindala on suurenenud. Jadaühenduses kondensaatorite kogumahtuvuse pöördarv võrdub üksikute kondensaatorite mahtuvuste pöördarvude summaga kuna plaatidevahelised kaugused liituvad. Ebameeldivuste vältimiseks soovitatakse kokku ühendada ühesuguste nimiandmetega kondensaatoreid.

Kondensaatoreid, mille mahtuvus sõltub neile rakendatud pingest, temperatuurist või magnetvälja tugevusest nimetatakse *varikondideks*. Enamlevinud varikondid on senjettkeraamilised kondensaatorid, mille mahtuvus ja elektroodidele rakendatud pinge on omavahel mittelineaarses sõltuvuses. Varikonde kasutatakse parameetrilistes voolu- ja pingestabilisaatorites, võimsus- ja pingevõimendites, sageduskordistites ja mujal.

Väga suure mahtuvusega on *kahekihilised*- ehk *ülikondensaatorid* (*backup capacitors*, *supercap*, *golden cap*). Nad kujutavad endast kondensaatori ja akupatarei vahepealseid seadmeid. Erinevalt teistest kondensaatoritest puudub neil dielektrik. Kahekihiliste kondensaatorite tööpõhimõte oli tuntud juba 1879 aastal (teooria töötas välja Helmholtz). Nende töö põhineb kahel elektrilaengu kihil ja nähtusel, et vastasmärgilised laengud tõmbuvad. Laengute tõmbumise tulemusena moodustuvad kahe keskkonna vahel kontaktpinna erinevatel pooltel positiivne ja negatiivne laengukiht. Kondensaator koostatakse mitmest elemendist, mis ühendatakse jadamisi. Iga element koosneb kahest aktiivsöe kihist, mis on immutatud elektrolüüdiga. Aktiivsöe kihtide vahel paikneb ioone läbilaskev eraldaja (*ion-permeable separator*). Ülikondensaatori üksiku elemendi ehitus on näidatud joonisel 2.8.



Joonis 2.7. Ülikondensaatori üksiku elemendi ehitus.

Aktiivsöekihid ja eraldaja on ümbritsetud isoleerkummiga. Kui kondensaator pingestatakse, siis laetakse anoodikihi aktiivsöe osakesed positiivselt ja katoodikihi aktiivsöe osakesed negatiivselt. Elektrolüüdi negatiivsed ioonid läbivad eraldaja ja kogunevada anoodkihile positiivsete aktiivsöe osakeste ümber. Sama põhimõtte järgi kogunevad positiivsed ioonid katoodkihile. Selliselt salvestuvad väga suured elektrilaengud ülikondensaatoris. Näiteks ühe grammi aktiivsöepulbri abil võib teoreetiliselt saada mahtuvuse 200...400 F. Kui elektrolüüt sisaldab vett, siis on ühe elemendi suurimaks lubatud pingeks 1,2 V kuna suurema pinge toimet laguneb vesi vesinikuks ja hapnikuks.

Tänapäeval toodetakse ülikondensaatoreid mahtuvusega üle 2500 F ja pingega üle 2,5 V ning nimivooluga üle 400 A (*THUNDERPAK™ Integrated Ultracapacitor Energy Storage System*). Ülikondensaatoreid kasutatakse mäluseadmetes, mikroprotsessorites ning lühiajaliseks elektrienergia salvestamiseks eesmärgiga kasutada seda mikromasinate käivitamiseks, releede lülitamiseks ja süüteimpulsside formeerimiseks.

2.3 Induktiivpoolid

Silinderpooli iga keerd aheldab (ümbritseb) teatud magnetvoogu Φ . Pooli kõikide keerdudega aheldatud magnetvoogu nimetatakse selle pooli *aheldusvooks* ja tähistatakse tähega ψ (psii):

$$\psi = w \cdot \Phi,$$

kus w on pooli keerdude arv.

Aheldusvoo ühikuks on $V \cdot s = Wb$ (veeber).

Silinderpooli aheldusvoog leitakse valemiga:

$$\psi = \mu \mu_0 \frac{I w^2}{l} S,$$

kus μ_0 - magnetiline konstant ($\mu_0 = 4\pi \cdot 10^{-7}$ H/m),

μ - suhteline magnetiline läbitavus,

I - pooli läbiv vool,

w - pooli keerdude arv,

S - juhi ristlõike pindala,

l - juhi pikkus.

Pooli aheldusvoog sõltub mitmest tehnoloogilisest suurusest (juhi pikkus, keerdude arv jt), mis vaadeldava pooli puhul ei muutu ja voolust, mis võib olla muutuv. Iseloomustamiseks pooli magnetilisi omadusi kasutatakse *induktiivsuse* mõistet.

Pooli aheldusvoo ja voolu suhe on püsisuurus, mis iseloomustab pooli magnetilisi omadusi ning teda nimetatakse induktiivsuseks:

$$L = \frac{\psi}{I}.$$

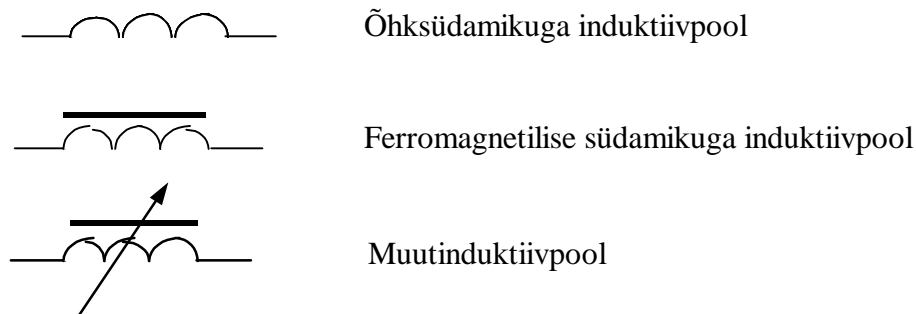
Induktiivsuse ühikuks on $Wb/A = V \cdot s/A = H$ (henri).

Pooli induktiivsuse arvutusvalemi saame aheldusvoo valemi jagamisel vooluga:

$$L = \mu\mu_0 \frac{w^2}{l} S.$$

Antud valem on rakendatav õhksüdamikuga poolide puhul, mille pikkus ületab tunduvalt läbimõõdu ja ferromagnetilise südamikuga poolide puhul magneetimiskõvera sirgjoonelises osas.

Kindla induktiivsusega seadmeid nimetatakse püsiinduktiivpoolideks. Induktiivpoole kasutatakse peamiselt võnkeringide ning filtrite elemendina. Pool koosneb mähisest, poolialusest ja südamikust. Poolialus ja südamik võivad vahel ka puududa (õhksüdamikuga poolid). Toodetakse mitmesuguseid püsiinduktiivpoole, kuid sobivate tunnussuurustega valmis pooli puudumisel tuleb see ise valmistada. Sageli kasutatakse võnkeringide häälestamisel ka muudetava induktiivsusega poole ehk *muutinduktiivpoole*. Induktiivpoolide tingmärgid on toodud joonisel 2.8.



Joonis 2.8. Induktiivpoolide tingmärgid.

Õhksüdamikuga induktiivpoolide (mähiste) induktiivsus on suhteliselt väike (millihenrides). Kui poolil on suure magnetilise läbitavusega terassüdamik ja suur keerdude arv, siis võib tema induktiivsus ulatuda mõne henrini. Selliseid poole nimetatakse *paispoolideks* ehk *drosseliteks*.

Induktiivpoolide põhilised tunnussuurused on *induktiivsus* ja *nimivool*, vahelduvvoolu korral ka *töösagedus*. Põhjalikumalt vaadeldakse induktiivpoolide tunnussuurusi ja markeerimist alajaotuses 2.5.

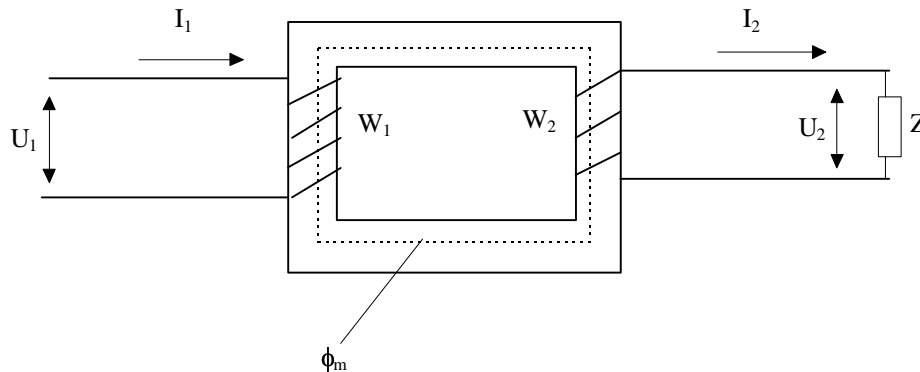
Enamasti kasutatakse poolides pehmemagnetferriidist (nikkeltsink-, liitiumtsink- või mangaantsinkferriit) või magnetodielektrikust (karbonüülrauast) südamikke. Võidakse kasutada ka diamagnetilisi südamikke, mis vähendavad pooli induktiivsust. Eristatakse varrassüdamikke, plaatsüdamikke, rõngassüdamikke, ummissüdamikke ja E-kujulisi südamikke.

Pooli mähistena eristatakse tihemähist, samm-mähist, ristmähist, sektsioonmähist, vabamähist ja mitmekihilist mähist. Mähised valmistatakse enamasti isoleeritud vasktraadist kõrgsagedusel mõnikord ka hõbetatud vasktraadist.

2.4 Trafod

Trafo on elektromagnetiline seade, mis on ette nähtud vahelduvpinge muutmiseks jääval sagedusel.

Trafo töö põhineb elektromagnetilise induktsiooni seadusel. Lihsamal juhul koosneb trafo ühest *primaarmähisest*, ühest *sekundaarmähisest* ja *ferromagnetilisest südamikust*. Trafo ehitus on toodud joonisel 2.9.



U_1 - primaarpinge; U_2 - sekundaarpinge; Z - komplekstakistus;
 I_1 - primaarvool; I_2 - sekundaarvool; ϕ_m - südamiku magnetvoog;
 w_1 - primaarmähise keerdude arv; w_2 - sekundaarmähise keerdude arv.

Joonis 2.9. Kahe mähisega trafo ehitus

Primaarmähist läbiv vahelduvvool tekitab terassüdamikus vahelduvmagnetvoo, mis indutseerib mõlemas mähises elektromotoorjõu efektiivväärtusega:

$$E_1 = 4,44 f w_1 \phi_m,$$

$$E_2 = 4,44 f w_2 \phi_m,$$

kus f on vahelduvpinge sagedus.

Eelnevate võrduste jagamisel saame:

$$\frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k,$$

kus k on *trafo ülekandetegur*.

Trafo koormamisel komplekstakistusega Z , tekib sekundaarmähises vool I_2 ning klemmidel pinge U_2 . Trafomähistes tekivad pingelangud ning $E_1 > U_1$ ja $E_2 > U_2$, kuna aga pingelangud on suhteliselt väikesed ning võime lugeda $U_1 \approx E_1$ ja $U_2 \approx E_2$, siis

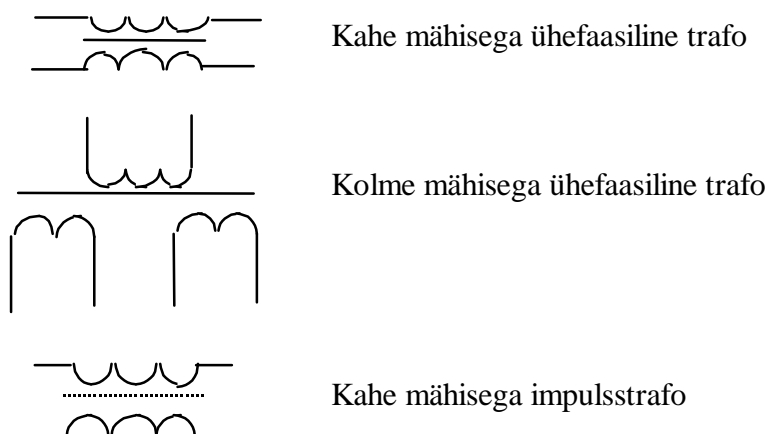
$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{E_1}{E_2} = \frac{w_1}{w_2} = k,$$

Trafomähiste pinged on võrdelised mähiste keerdude arvudega, voolud aga pöördvõrdelised:

$$\frac{U_1}{U_2} \approx \frac{I_2}{I_1} = k,$$

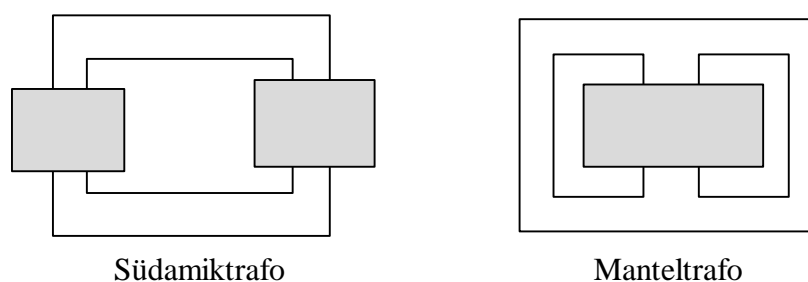
Trafomähiste voolud on pöördvõrdelised mähiste pingetega. Toodetakse pinget madaldavaid ($k > 1$) ja pinget tõstavaid trafosi ($k < 1$).

Trafo primaarmähis ühendatakse toiteallikaga ja sekundaarmähis koormusega. Trafo on *pöörata*v s.t. energiavoo suuna võib muuta vastupidiseks. Elektroonikaseadmetes kasutatavad trafod võivad olla ühe- või kolmefaasilised (kasutatakse ka suurema faaside arvuga trafosi). Kolmefaasilisi trafosi kasutatakse enamasti elektroonikaseadmete toiteplokkides ning aladites ja vaheldites pingete sobitamiseks. Kolmefaasiliste trafode mähised ühendatakse kas tähte või kolmnurka. Võimsaid kolmefaasilise trafosi (jõutrafosi) kasutatakse elektrienergia ülekandmisel ja jaotamisel ning seetõttu käesolevas õpikus neil pikemalt ei peatuta. Ühefaasiliste trafode tingmärgid on toodud joonisel 2.10.



Joonis 2.10. Ühefaasiliste trafode tingmärgid.

Trafode mähised valmistatakse kas ümarast või kandilisest vask või alumiiniumjuhtmest, mis isoleeritakse laki, puuvillkedruse või kaablipaberiga. Magnetahelad (südamikud) valmistatakse elektrotehnilisest terasplekist. Väiketrafoode (impulsstrafod, eraldustrafod jt) südamikud valmistatakse sageli ferriidist rõngakujulistena. Südamiku kuju järgi eristatakse *südamik- ja manteltrafosi*. Trafode südamike kujud on toodud joonisel 2.11.



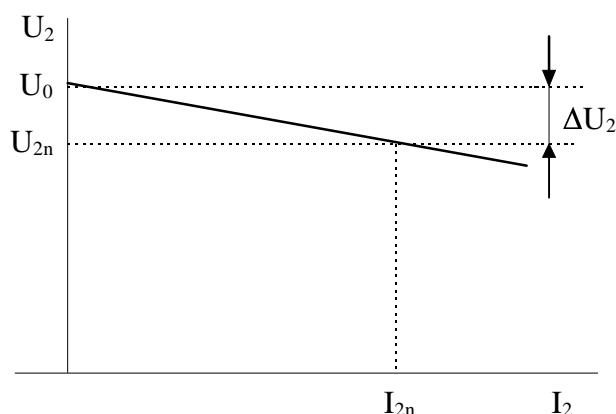
Joonis 2.11. Trafosüdamike kujud.

Trafode põhilised tunnussuurused on:

1. Primaar- ja sekundaarpinge, U_{1n} , U_{2n} .
2. Ülekandetegur, k .
3. Primaar- ja sekundaarvool, I_{1n} , I_{2n} .
4. Niminäivvõimsus, $S = U_{1n} \cdot I_{1n} = U_{2n} \cdot I_{2n}$.

5. *Nimisagedus*, f_n .
6. *Lühisepinge* on pinge, mis tuleb rakendada trafo primaarmähisele, et sekundaarpoole lühise korral tekiks primaarmähises nimivooluga võrdne vool (antakse tavaliselt protsentides $\Delta U_{1\%}$). Trafode paralleeltööle lülitamisel peavad nende lühisepinged olema võrdsed.

Trafo tähtsaimaks tunnusjooneks on *pinge-voolu tunnusjoon* $U_2 = f(I_2)$, mis väljendab sekundaarpinge ja sekundaarvoolu vahelist sõltuvust. Koormuse kasvamisel suureneb trafo sekundaarvool ning sekundaarmähise pingelangu suurenemise tõttu väheneb sekundaarpinge. Trafo pinge-voolu tunnusjoon on toodud joonisel 2.12.



Joonis 2.12. Trafo pinge-voolu tunnusjoon

Pinge-voolu tunnusjoonelt saab määrata trafo pingemuutuse $\Delta U_{\%}$, mis näitab kui palju langeb trafo sekundaarpinge üleminekul tühijooksult nimikoormusele:

$$\Delta U_{\%} = \frac{U_0 - U_{2n}}{U_0} \cdot 100,$$

kus U_0 on sekundaarpinge tühijooksul ja U_{2n} sekundaarnimipinge.

Sõltuvalt töösagedusest ja signaali iseloomust liigitatakse trafod järgmiselt:

- *Madalsagedustrafod.*

Madalsagedustrafode töösagedused on reeglina vahemikus mõnekümnest mõne tuhande hertsini. Siia kuuluvad *võrgu toitetraford* (töösagedused 50 või 60 Hz), mida kasutatakse elektroonikaseadmete toiteplokkides ning nende võimsus võib olla küllat suur. Jõu- ja juhtahelate galvaaniliseks eraldamiseks kasutatakse *eraldustrafosi* (*isolating transformers*). Eraldustrafode eriliigiks on *modemitrafod*, mida kasutatakse modemi ja Telecom võrgu galvaaniliseks eraldamiseks. Elektriohutuse tagamiseks toodetakse *ohutus-eraldustrafosi* (*safety isolating transformers*), millede sekundaarpinge ei ületa 50 V. Elektriliste mänguasjade valmistamisel kasutatakse *mänguasjatrafosi* (*toy transformers*), millede sekundaarpinge ei ületa 24 V.

Madalsagedustrafode eriliigiks on *autotrafod* (*autotransformers*). Autotrafodel on ainult üks mähis, mille osa keerde on primaar- ja sekundaarahelale ühised. Väiksema materjalikulu tõttu on neil kõrgem kasutegur. Autotrafosi toodetakse ühe- ja kolmefaasilisi ning reguleeritava ja mittereguleeritava pingega. Reguleeritava pingega

autotrafosi kasutatakse ainult madalpingeseadmetes (laboriseadmed, valgustusseadmed, kommutaator mootorid jt) pingeregulaatoritena. **Kaitsevääkepingeallikatena (12...24 V) autotrafosi kasutada pole lubatud kuna nad ei taga galvaanilist eraldatust.**

Mööteriistade mõõtepiirkonna laiendamiseks ja mõõteahelate galvaaniliseks eraldamiseks kõrgepingelistest ahelatest kasutatakse *möötetrafosi*. Möötetrafod jagunevad *voolu- ja pingetrafodeks*.

Helisagedusvõimendites kasutatakse väikesi madalsagedustrafosi, mille töösagedused on vahemikus 20 Hz kuni 20 kHz. Neid kasutatakse sageli mikrofoni ja võimendi sisendi vaheliseks sobituseks.

- *Kesksagedustrafod.*

Kesksagedustrafode hulka kuuluvad kõik *helisagedustrafod* (töösagedused kuni 20 kHz). Levinumad neist on *väljundtrafod* (*output transformers*), mida kasutatakse helisagedusvõimendites väljundtakistuse (*impedance*) sobitamiseks valjuhääldi sisetakistusega.

- *Kõrgsagedustrafod.*

Kõrgsagedustrafode hulka kuuluvad *impulsstoiteplokkide- ja kõrgsageduspingemuundurite trafod*. Raadiotehnikas kasutatavaid kõrgsagedustrafosi nimetatakse *vahesagedustrafodeks* (*intermediate frequency transformers*). Neid toodetakse sagedustele 455 kHz (AM) ja 10,7 MHz (FM).

- *Impulsstrafod.*

Impulsstrafosi kasutatakse pinge- ja vooluimpulsside kujundamiseks ja muundamiseks ning impulssahelate galvaaniliseks eraldamiseks. Levinumad impulsstrafod on *jõupooljuhtide ohjuritrafod* ja *impulss-eraldustrafod*.

2.5 Pasiivkomponentide tunnussuurused ja markeerimine

Takistid

Takistite tunnussuurused:

1. Nimitakistus R_n .

Nimitakistuse väärtused vastavad standarditele E6, E12, E24 või E96 (tähele E järgnev number näitab nimiväärtuste arvu reas. Nimitakistuste väärtused on toodud tabelis 2.1.

Tabel 2.1 Rahvusvahelised takistite nimitakistuse standardväärtused.

Rida	Nimitakistused*
E6	1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8
E12	1,0 1,2 1,5 1,8 2,2 2,7 3,3 3,9 4,7 5,6 6,8 8,2
E24	1,0 1,1 1,2 1,3 1,5 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,7 3,0 3,3 3,6 3,9 4,3 4,7 5,1 5,6 6,2 6,8 7,5 8,2 9,1
E96	1,00 1,02 1,05 1,07 1,10 1,13 1,15 1,18 1,21 1,24 1,27 1,30 1,33 1,37 1,40

	1,43	1,47	1,50	1,54	1,58	1,62	1,65	1,69	1,74	1,78	1,82	1,87	1,91	2,00	2,05
	2,10	2,15	2,21	2,26	2,32	2,37	2,43	2,49	2,55	2,61	2,67	2,74	2,80	2,87	2,94
	3,01	3,09	3,16	3,24	3,32	3,40	3,48	3,57	3,65	3,74	3,83	3,92	4,02	4,12	4,22
	4,32	4,42	4,53	4,64											

* Nimitakistuste väärtused (Ω , $k\Omega$, $M\Omega$) võivad olla kas 0.1, 1.0, 10 või 100 kordsed tabelis toodud väärtusest.

2. Takistushälve.

Takistushälve näitab, mitu protsenti võib takisti tegelik takistus erineda nimiväärtusest. Üldotstarbeliste takistite takistushälbed on 20 % (rida E6), 10 % (rida E12), 5 % (rida E24) ja 2 % (rida E96). Täppistakistite hälve võib olla 1 %, 0,5 %, 0,2 % ja veelgi vähem.

Takistid, mis määravad lülituse töötalitlusi, tuleb valida vähemalt hälbega 5 % või täpsemad.

3. Nimivõimsus P_n .

Takisti nimivõimsus P_n on suurim võimsus, millele vastavat soojusvõimsust on takisti võimeline üle kuumenemata etteantud keskkonnatemperatuuril kestvalt hajutama. Püsitakistite levinumad nimivõimsused on 0,125; 0,25; 0,5; 1; 2; 5 ja 10 W.

Takistil eralduv võimsus:

$$P = \frac{U^2}{R} = I^2 R$$

peab olema väiksem või võrdne nimivõimsusega eeldusel, et keskkonnatemperatuur ei ületa lubatud väärtust. Kui keskkonnatemperatuur ületab lubatud väärtust, siis tuleb eralduvat võimsust vähendada.

4. Suurim lubatud tööpinge U_{max} .

Suurim tööpinge on pinge, mida takisti kestvalt talub, ilma et tekiks läbilööki. Suurte takistuse väärtuste korral võib juhtuda, et arvutuslik tööpinge on suurem lubatust, kusjuures nimivõimsust ei ületata.

5. Suurim lubatav temperatuur t_{max} .

Suurima lubatava temperatuuri juures takisti võib veel püsivalt töötada. Tavaliselt metallkiht- või süsinikkihttakistitel on lubatav temperatuur 155°C.

6. Müratase E_m .

Müratase iseloomustab suhteline müra-elektromotoorjõud, mis on takistis tekkiva müra-elektromotoorjõu ($\mu V/V$) efektiivväärtus talle rakendatava 1 V kohta.

7. Takistuse temperatuuritegur α_R

Takistuse temperatuuritegur näitab takistuse suhtelist muutust temperatuuri muutumisel 1 K võrra.

8. Takisti omamahtuvus C_R .

Takisti omamahtuvusega tuleb arvestada ülikõrgsagedustel.

9. Takisti omainduktiivsus L_R .

Takisti omainduktiivsus on suurem spiraalse takistuskihiga või -traadiga takistitel. Takisti omainduktiivsus avaldab mõju ülikõrgsagedustel.

Järgnevalt vaatleme takistite tähistamist elektrilistel põhimõtteskeemidel ning enamlevinud püsi- ja muuttakistite ehitust ja markeerimist.

Takistid kuni 976Ω tähistatakse takistusele vastava numbriga (tähti ei kasutata); näiteks takistusele 91Ω vastab 91. Takistid $1...976 \text{ k}\Omega$ tähistatakse takistusele vastava numbriga, mille järgi kirjutatakse täht k; näiteks takistusele $270 \text{ k}\Omega$ vastab 270 k. Takistid $1...976 \text{ M}\Omega$ tähistatakse takistusele vastava numbriga, mille järgi kirjutatakse täht M; näiteks takistusele $27 \text{ M}\Omega$ vastab 27 M.

Püsitakistitest levinuimad on *metallkihttakistid (metal film resistors)* ja *süsinikkihttakistid (carbon film resistors)*. Metallkihttakisti koosneb isoleerainest torust, mida katab metallisulamist või metallioksiidist kiht, mis on kaetud emailvärviga. Süsinikkihttakisti koosneb keraamilisest vardast, millele on kantud õhuke süsinikukiht, mis on kaetud emailvärviga.

Metallikihttakistite nimivõimsus on takisti samade mõõtmete juures ca 2 korda suurem kui süsinikkihttakistitel. Mürategur on ligikaudu samades piirides $1... 5 \mu\text{V/V}$. Süsinikkihttakistite hälve on tavaliselt $\pm 5\%$, metallikihttakistite hälve on tavaliselt väiksem ning võib ulatuda isegi $0,1\%$. Süsinikkihttakistitel on seevastu suurem nimipinge ulatudes ca 500 V-ni, metallikihttakistite maksimaalselt 350 V vastu. Takistuse temperatuuritegur on parematel süsinikkihttakistitel $500 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$ (500 miljondikku ühe $^\circ\text{C}$ kohta) ja parematel metallikihttakistitel $15 \text{ ppm}/^\circ\text{C}$.

Paksukihiliste *metallglasuurkihttakistite* lubatav pinge ulatub kuni 3500 V-ni. Neid toodetakse tavaliselt ainult suure takistusega (alates $1 \text{ M}\Omega$). Nende võimsus on võrreldav süsinikkihttakistitega.

Traattakistid koosnevad portselantorust, millele (või ka mille sisse) on mähitud takistustraata. Mähist katab kuumakindel klaasemailist kaitsekiht. Maksimaalne takistus on piiratud ca $1 \text{ M}\Omega$. Suurim tööpinge on maksimaalselt 3000 V. *Pretsisoontraattakistid* mähitakse vähendatud induktiivsusega (bifilaarmähis). Traattakisteid valmistatakse kõige suurematele võimsustele – kuni 100 W (metallist jahutusradiaatori korral).

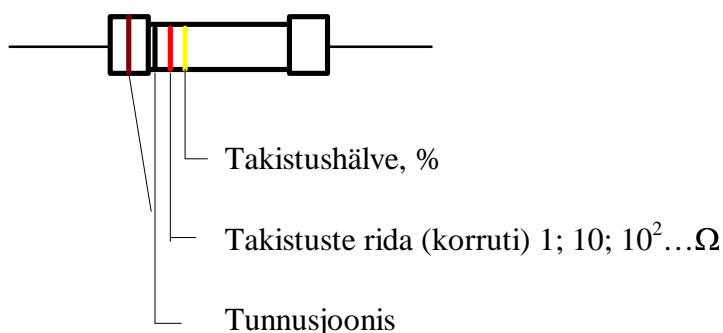
Muuttakistid koosnevad tavaliselt takistuskehast või -traadist, mille pinnal liigub hari. Takistuskeha materjaliks on kas süsinik, kompositsioonmaterjal või metallkeraamika. Eristatakse *pöörd- ja lükandtakisteid*.

Muuttakistid jagunevad otstarbe järgi häälestus- ja seadetakistiteks. Seadetakisteid kasutatakse näiteks helitugevuse ja tämbriregulaatorites, seadetakisteid lülituse soovitud parameetrite saamiseks. Seadetakistid on tavaliselt mõeldud nupust keeramiseks või nihutamiseks, seadetakisti võlli keeratakse kruvikeerajaga ja vahel on võll ka nihkumise vältimiseks mutriga kontreeritav. Kasutatakse ka täpset seadet võimaldavaid *reduktoriga seadetakisteid*.

Muuttakistite iseloomustamiseks kasutatakse neidsamu tunnussuurusi, mis püsitakistitelgi. Tavaliselt kasutatakse takistuste ridasid E6 või E12. Seadetakisti tähtsateks parameetriteks on *seadetunnusjoon* ja *kulumiskindlus*.

Seadetunnusjoon näitab muuttakisti takistuse sõltuvust pöördenurgast või liuguri nihkest. Toodetakse lineaarseid, logaritmilisi ja eksponentsiaalseid muuttakisteid. Kulumiskindlus on liuguri edasi-tagasi liikumiste arv, mida muuttakisti peab taluma ilma et tema omadused halveneksid. Häälestustakistitel on kulumiskindlus 5000...20000, seadetakistitel kuni 1000.

Tavaliselt kasutatakse väiksemate metallkiht- ja süsinikkihttakistite (seeriad E ja R) tunnussuuste märkimiseks värvikoodi. Takistite põhilised tunnussuurused märgitakse takistile nelja kuni kuue eri värvi rõnga abil (joonis 2.13). Värvidele vastavad suurused antakse värvikooditabelites.



Joonis 2.13. Takisti markeerimine nelja värvilise rõnga abil.

Kui kaks või kolm värvirõngast näitavad tunnusjoonist, siis viimane tunnusjoonis numbritena 0...9 näitab nullide arvu (näit. 100 - 10 Ω; 101 - 100 Ω; 103 - 10 kΩ jne).

Suurematel takistitel märgitakse takistuse väärtus vahetult takistile, kasutades järgnevat markeeringut; tähed R või E tähistavad oome (näit. 0R1 - 0,1 Ω ja 0E1 - 0,1Ω); täht k tähistab kilo-ooime (näit. 4k7 - 4,7 kΩ) ja täht M tähistab megaoome (näit. 22M - 22 MΩ).

Kondensaatorid.

Kondensaatorite tunnussuurused:

1. Nimimahtuvus C_n .

Kondensaatorite nimimahtuvus vastab standardridadele E6, E12 ja E24

E6: 1,0 1,5 2,2 3,3 4,7 6,8

E12: 1,0 1,2 1,5 1,8 2,2 2,7 3,3 3,9 4,7 5,6 6,8 8,2

E24: 1,0 1,1 1,2 1,5 1,6 1,8 2,0 2,2 2,4 2,7 3,0 3,3 3,6 3,9 4,3 4,7 5,1 5,6 6,2 7,5 8,2 9,1

Nimimahtuvuste väärtused võivad olla 10 kordsed ridade väärtused. Kui ühikuks on pF, siis $n = 0, 1, 2, 3$; kui μF , siis $n = -1, 0, 1, \dots, 6$.

Vanemate NSV Liidu päritolu elektrolüütcondensaatorite nimimahtuvused olid 0,5; 1; 2; 5; 10; 20; 30; 50; 100; 200; 500; 1000; 2000; 5000; 10000 μF .

2. Mahtuvushälve $\Delta C, \%$.

Näitab, mitu % võib kondensaatori mahtuvus erineda nimimahtuvusest. Rea E6 korral on $\Delta C = \pm 20\%$, rea E12 korral on $\Delta C = \pm 10\%$ ja rea E24 korral on $\Delta C = \pm 5\%$. Täppis- ehk *pretsisioonkondensaatorite* mahtuvushälve võib olla $\pm 2\%$, $\pm 1\%$ ja alla selle. Elektrolüütcondensaatorite hälbed ulatuvad $+100, -20\%$ -ni.

3. Nimipinge U_n .

On suurim alalispinge ja (või) vahelduvpinge amplituudväärtus, millega kondensaator võib pidevalt töötada. Kondensaatoreid katsetatakse tavaliselt 1,5...3 korda nimipingest kõrgemal proovipingel. Kondensaatori läbilöögipinge on proovipingest suurem pinge, mille juures tekkib dielektriku läbilööök.

4. Mahtuvuse temperatuuritegur $\alpha, 1/\text{K}$

Näitab mahtuvuse suhtelist muutust temperatuuri muutumisel 1 K võrra. α on normeeritud ainult nendel kondensaatoritel, mida kasutatakse võnkeringides. Keraamilistel kondensaatoritel $\alpha = (-2200 \dots +420)10^{-6}$, klaaskondensaatoritel $\alpha = (-330 \dots +120)10^{-6}$, vilkkondensaatoritel $\alpha = \pm(5 \dots +200)10^{-6}$.

5. Isolatsioonitakistus R_{is} .

Näitab kondensaatori dielektriku kvaliteeti. Mida suurem takistus, seda kvaliteetsem kondensaator. Isolatsioonitakistus määrab kondensaatori lekkevoolu väärtuse. Teatud juhtudel on aga vaja isolatsioonitakistust alandada, näiteks raadiohäirete filtrites. Elektrolüütcondensaatoritel normeertakse lekkevool.

6. Kaonurga tangens, $\tan \delta$.

Näitab kondensaatoris tekkivat energikadu $P = Q \tan \delta$, kus Q on reaktiivvõimsus. Kondensaatori hüvetegur $Q_k = 1 / \tan \delta$.

7. Reaktiivvõimsus Q , var.

Näitab kondensaatori maksimaalset reaktiivvõimsust vahelduvpingel. Reaktiivvõimsust arvestatakse suure võimsusega vooluahelates.

8. Erimahtuvus, F/m^3 .

Näitab kondensaatori mahtuvust mahuühiku kohta. Kõige väiksem erimahtuvus on õhkkondensaatoritel, suurim elektrolüütcondensaatoritel.

9. Omainduktiivsus, L_c .

Näitab kondensaatori induktiivsust. Väikseima omainduktiivsusega on keraamikakondensaatorid. Omainduktiivsusega tuleb arvestada kõrgsagedustel.

10. Tagatud tööiga, h .

On tavaliselt üle 5000 tunni. Mõningatel elektrolüüt-kondensaatoritel aga üle 1000 tunni.

11. Maksimaalne töötemperatuur t_{max} , °C.

Kondensaatorite maksimaalne töötemperatuur ulatub kuni + 200 °C - ni.

Erineva dielektriku tüübiga kondensaatorite kasutusvaldkond on väga lai. Kondensaatoreid kasutatakse alalispingeahelates, madalsageduslikes vahelduvpingeahelates ning kõrg- ja ülikõrgsageduslikes resonantsahelates. Ülevaate erinevate dielektrikutega kondensaatorite kasutusalaadest annab tabel 2.2.

Tabel 2.2. Erinevate dielektrikutega kondensaatorite parameetrid ja kasutusalaad.

Liik	R_{js} , GΩ	$\tan \delta \times 10^3$	f_{max} , Hz	t_{max} , °C	Kasutusalaad
Plast-kondensaatorid	10...100	1...15	sajad MHz	100.00	Alalis-, liit-, impulss- ja madalsagedusvooluahelad ja kõrgsagedusahelad. Võnkeringidesse ei sobi.
Keraamika-kondensaatorid*	5...10	1...2	sajad MHz kuni mitmed GHz	85...150	Kõrgsagedusahelad ja võnkeringid
Paber-kondensaatorid	2...10	10...50	mõni MHz	60...100	Alalis-, liit-, impulss- ja madalsagedusvooluahelad
Vilk-kondensaatorid	10...50	0,5...1	sajad MHz	70...100	Alalis-, pulseer-, impulss- ja kõrgsagedusahelad.
Klaas-kondensaatorid	10...150	1...10	sajad MHz	70...155	Sama
Õhkkondensaatorid		0.00	sajad MHz		Raadiovastuvõtjate häälestuskondensaatorid
Elektrolüüt-kondensaatorid	ei normeerita	100...350	-	60...85	Alalis- ja liitvooluahelad

*Senjettidielektrikuga keraamikakondensaatoreid kasutatakse madalsagedusahelates.

Järgnevalt vaatleme kondensaatorite mahtuvuste tähistamist põhimõtteskeemidel ning erinevat tüüpi kondensaatorite markeerimist.

Mahtuvused pikofaradi kümnendmurdosades, kirjutatakse koos ühikuga, näiteks 1,5 pF, mahtuvused 10...9100 pF kirjutatakse ilma ühikuta, näiteks 1200 pF tähistatakse arvuga 1200. Mahtuvused alates 0.01 µF kirjutatakse samuti ilma ühikuta, kuid alati kümnendmurruna (lisatakse koma ja null), näiteks 0,05 µF kirjutatakse 0,05; 5000 µF kirjutatakse 5000,0.

Keraamika- ja plastikkondensaatorite mahtuvuse tähistamiseks kasutatakse sageli kodeeritud tähistust, mis koosneb numbritest ja tähtedest. Kodeeritud tähistuse näide on tabelis 2.3

Tabel 2.3. Kondensaatorite kodeeritud tähistuse selgitus.

Mahtuvuse väärtus	Tähistus	Kodeeritud tähistus*	Mahtuvuse väärtus	Tähistus	Kodeeritud tähistus*
0,39 pF	p 39	-	0,39 μ F	μ 39	394
3,9 pF	3 p 9	-	3,9 μ F	3 μ 9	-
39 pF	39 p	39	39 μ F	39 μ	-
390 pF	390 p	391	390 μ F	390 μ	-
0,39 nF	n 39	391	390 μ F	m 39	-
3,9 nF	3 n 9	392	3900 μ F	3 m 9	-
39 nF	39 n	393	39 000 μ F	39 m	-
390 nF	390 n	394	390 000 μ F	390 m	-

*Kaks esimest kohta näitavad mahtuvuse suurust, kolmas koht näitab nullide arvu. Näide: 393 mahtuvus : 39 000 pF. Kodeeritud tähistus antakse alati pikofaradites.

Keraamikakondensaatorite mahtuvused antakse praktiliselt alati pikofaradites või nanofaradites, kilekondensaatoritel ja elektrolüütikondensaatoritel mikrofaradites. Uusimate ülisuure mahtuvusega kondensaatorite tähistuseks kasutatakse ka faradit. Kilekondensaatorite mahtuvus antakse sageli mikrofaradites ilma ühikut näitamata.

Väikeste plastikkondensaatorite markeerimisel kasutatakse värvikoodi nagu takistite puhul. Kondensaatorite värvikood koosneb tavaliselt viiest eri värvi rõngast.

Keraamikakondensaatorite (dielektriku tüübiga *keraamika klass 2*) markeerimisel kasutatakse tähtede ja numbrites kombinatsiooni, mille abil näidatakse ära takistushälve ning minimaalne- ja maksimaalne töötemperatuur. Takistushälve märkimiseks kasutatakse tähti A; B; C; D; E; F...P; R; S; T; U; V, minimaalse töötemperatuuri märkimiseks tähti X; Y; Z ja maksimaalse töötemperatuuri märkimiseks numbreid 2...9. Näiteks A - $\pm 1,0\%$, Z - $+ 10\text{ }^{\circ}\text{C}$ ja 2 - $+ 45\text{ }^{\circ}\text{C}$.

Induktiivpoolid

Induktiivpoolide tunnussuurused:

1. Pooli induktiivsus, L .

On võrdeline mähise keerdude arvu ruuduga, sõltub mähise kujust ja mõõtmetest ning südamikuga kujust, mõõtmetest ja materjalist.

2. Hüvetegur, Q .

On pooli induktiivtakistuse $x_L = \omega L$ ja energiakadu väljendava kõrgsagedustakistuse jagatis $Q = \omega L / R$. Tavaliselt on hüvetegur südamikuta poolidel 100...600, ferriitsüdamikuga poolidel 60...180.

3. Omamahtuvus, C_L .

On põhjustatud mähise keerdude omavahelisest mahtuvusest ja mahtuvusest ümbritsevate esemete suhtes.

4. Induktiivsuse temperatuuritegur, α_L .

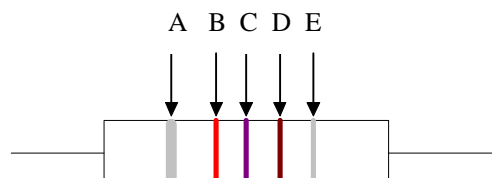
näitab induktiivsuse suhtelist muutust temperatuuri muutumisel 1 K võrra. Tavaliselt on α_L piirides $(10...300)10^{-6}$.

5. Töösagedus, f .

6. Nimivool, I_n .

Elektroonikaseadmetes kasutatakse induktiivpoole (*coils*) ja paispoole ehk drossleid (*chokes*). Paispoolid on mõeldud teatud sagedustest kõrgemate sagedustega voolude tõkestamiseks. Kõrgsagedusahelates kasutatavad paispoolid võivad olla õhk- või ferriitsüdamikuga ning keraamilisel alusel. Toodetakse ka miniatuurseid paispoole pealismontaažiks, millele induktiivsus on vahemikus $1\mu\text{H}...1\text{mH}$.

Suurematel drosselitel ja muutinduktiivpoolidel märgitakse induktiivsuse väärtus vahetult nende poolile ning μH puhul ühikut tavaliselt ei märgita. Miniatuursete paispoolide markeerimisel kasutatakse värvikoodi, mis koosneb viiest erivärvi rõngast. Värvikood näitab tüübitähist, induktiivsuse väärtust ja induktiivsushälvet (joonis 2.14). Joonisel 2.14. on näidatud paispool induktiivsusega $270\mu\text{H} \pm 10\%$.



Joonis 2.14. Miniatuurse paispooli värvikood: A - tüübitähis; B,C,D - induktiivsuse väärtus; E - induktiivsushälve; A - hõbedane; B - punane (2); C - violetne (7); D - pruun ($\cdot 10$); E - hõbedane ($\pm 10\%$)

Trafo

Trafode põhilised tunnussuurused ja pingevoolu tunnusjoon on toodud alajaotuses 2.4, lk.

Trafodel märgitakse põhilised tunnussuurused (primaar- ja sekundaarpinged, niminäivvõimsus, nimisagedus jt) südamikule või mähise väliskattele. Tüübitähistes kasutatakse tähtede ja numbrite kombinatsiooni (näit. autotrafo *PFA 220, 110 V input / 220 V output, 220 VA*). Sageli märgitakse trafode ka mähiste keerdude arvud ja ühendusskeemid.

3 ELEKTROONIKA PÕHIKOMPONENDID

3.1 Pooljuhtide struktuur ja elektrilised omadused

Elektriliste omaduste poolest (peamiselt elektrijuhtivus) asuvad *pooljuhid* juhtide ja dielektrikute vahepeal, seega loetakse pooljuhtideks aineid, mille eritakistus toatemperatuuril on vahemikus $10^{-5} \dots 10^8 \Omega \cdot \text{m}$ (metallide eritakistus $10^{-8} \dots 10^{-6} \Omega \cdot \text{m}$). Enamikel pooljuhtidel on negatiivne takistuse temperatuuritegur, seega absoluutse nulli lähedasel temperatuuril võivad pooljuhid muutuda isolaatoriteks, metallid aga ülijuhtideks. Erinevus metallide (juhtide) ja pooljuhtide elektrijuhtivuse mehhanismis seisneb selles, et metallides on laengukandjateks vabad elektronid, millede hulk temperatuurist praktiliselt ei sõltu, pooljuhtides aga tekivad laengukandjad ainult mingi välisenergia (kiirgus, soojus, pinge jt) rakendamise tulemusena.

Kasutatavad pooljuhtmaterjalid, mis kuuluvad Mendelejevi tabeli IV rühma kujutavad endast kristallilisi kehi. Pooljuhttehnikas kasutatakse lähtematerjalina peamiselt neljavalentset räni (Si) ning kolme- ja viievalentsete ainete ühendit galliumarseniidi (GaAs) ja vähesel määral ka neljavalentset germaaniumi (Ge). Räni ja germaaniumi iga aatomi väliskihis on neli valentselektroni, millest igaüks tiirleb ühtlasi ümber naaberaatomi. Iga aatomipaari ümber tiirlevad kaks valentselektroni moodustavad kovalentsideme. Kovalentsideme korral iga sidet moodustav valentselektronide paar kuulub võrdselt mõlemale naaberaatomile moodustades väga püsiva struktuuri.

Elektronid võivad saada laengukandjateks ja osaleda juhtivusprotsessis ainult juhul kui kovalentsidemed rikutakse. Selleks on tarvis mingit välisenergiat, mis peab ületama elemendi keelutsooni (s.t. aatomite vaheliste seoste siseenergia laiuse). Keelutsooni laius temperatuuril $T = 300 \text{ K}$ on germaaniumil 0,67 eV (elektronvolti) ja ränil 1,12 eV. Elektronid võivad kovalentsidemetest lahkuda vaid absoluutsest nullist kõrgemal temperatuuril.

Vabade elektronide kontsentratsioon on võrdeline pooljuhi temperatuuriga ja pöördvõrdeline keelutsooni laiusega.

Lahkunud elektroni kohta kovalentsidemes nimetatakse *auguks*. Augu võib täita teine elektron, sellest jäänud augu võib täita kolmas jne. Toimub elektroni ja augu rekombinatsioon. Seega toimub aukude nihkumine, mis on suunalt vastupidine elektronide nihkumisele. Puhtas pooljuhis on vabade elektronide arv võrdne aukude arvuga. Harilikes tingimustes (välise energia puudumisel) on elektronide liikumine kristallvõres kaootiline ega tekita elektrivoolu. Vool tekib ainult välise energia mõjul. Elektronid, mis pole aatomitega seotud võivad pooljuhis liikuda ja täita auke. Sel juhul tekkinud elektrijuhtivust nimetatakse *n- juhtivuseks* ehk *elektronjuhtivuseks*, aukude liikumisel aga tekib *p- juhtivus* ehk *aukjuhtivus*.

Puhta pooljuhi juhtivust nimetatakse *omajuhtivuseks* ja sellist pooljuhti *i- pooljuhiks*. Omajuhtivus toatemperatuuril on väga väike ning seetõttu on i- pooljuhtide kasutusvõimalused piiratud.

Laialdast kasutamist leiavad n.n. *legeeritud pooljuhid*, kus põhiaine kristallvõresse on viidud lisandaine aatomid. Kui näiteks neljavalentse germaaniumi või räni kristalli viia lisandainena sisse viievalentset ainet (fofor, antimoon) jääb ringorbiidil üks lisandi valentselektron vabaks. Selle eemaldamiseks piisab tühisest energiast (0,05...0,01 eV) ning lisandi aatom muutub pärast seda positiivseks iooniks. Niisuguseid lisandeid, mis annavad pooljuhile juhtivuselektroone nimetatakse *doonorlisanditeks*. Doonorlisandid annavad pooljuhile n- juhtivuse. Lisandi kogus on väga väike, näiteks 1µg fosforit 50 g räni kohta vähendab tema eritakistust 100 000 korda. Liikuvaid laenguid, mis on pooljuhis ülekaalus nimetatakse *enamuslaengukandjateks* vastasmärgilisi aga *vähemuslaengukandjateks*. Pooljuhti, kus enamuslaengukandjad on negatiivse laenguga nimetatakse *n- pooljuhiks*.

Kui üks räni aatom asendada kolmevalentse aine (boor) aatomiga, siis jääb üks kovalentside puudulikuks (jääb auk), mille võib täita mõni vaba elektron ning lisandaine aatom muutub negatiivseks iooniks. Lisandaineid, mis kristallvõres hõivavad elektrone nimetatakse *akseptorlisanditeks*. Akseptorlisandid annavad pooljuhile p- juhtivuse. Pooljuhti, kus enamuslaengukandjad on positiivse laenguga (augud) nimetatakse *p- pooljuhiks*.

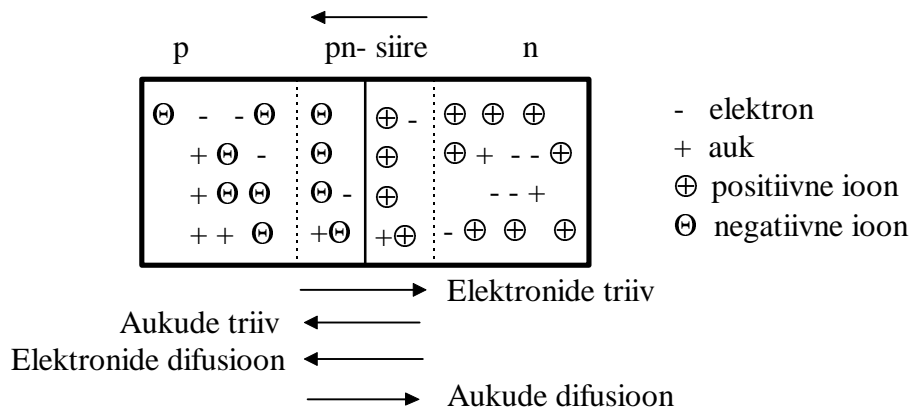
Mistahes pooljuhtmaterjalis on elektronide ja aukude hulk määratud kahe paralleelselt kulgeva protsessi dünaamikaga: ühelt poolt uute elektron-aukpaaride moodustumisega ja teiselt poolt nende rekombineerumisega. Dünaamiline tasakaal taastub juhul kui laengukandjate kontsentratsioonide korrutis lisandis saab võrdseks laengukandjate kontsentratsioonide korrutisega põhiaines antud temperatuuril:

$$n \cdot p = n_i \cdot p_i = n_i^2 = \text{const.}, \text{ kui } T = \text{const.}$$

Toodud seos iseloomustab mistahes pooljuhi tüüpi ning on kasutusel nõutavate elektriliste omadustega pooljuhtide valmistamisel.

3.2 pn-siire

Vaatleme olukorda kui ühendada n- juhtivusega ja p- juhtivusega pooljuhtkristall (joonis 3.1).



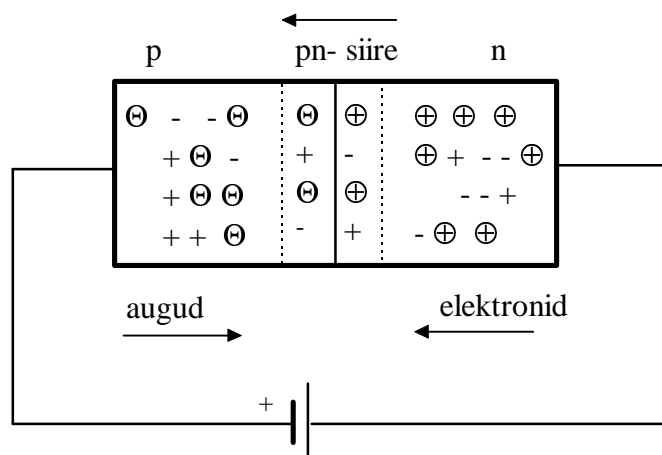
Joonis 3.1. Pingestamata pn- siire

Kuna elektronide kontsentratsioon on n- piirkonnas mitu suurusjärku suurem, siis tungib osa kaootilises soojusliikumises olevaid elektrone sealt p- piirkonda. Seda nähtust nimetatakse *elektronide difusiooniks*. Samuti difundeeruvad augud paiknemistiheduse ühtlustamiseks p- piirkonnast n- piirkonda (*aukude difusioon*). See protsess ei kulge aga laengukandjate kontsentratsiooni ühtlustumiseni kogu kristallis, kuna n- piirkonnast lahkunud elektronidest jääb maha nendega võrdne arv paikseid positiivseid ioone. Samuti tekivad p- piirkonnast eemalduvate aukude tõttu paiksed negatiivsed ioonid. Järelikult tekib n- ja p- piirkondade eralduspiiri juures n- juhtivusega materjalis positiivne ruumilaeng ja p- juhtivusega materjalis negatiivne ruumilaeng. Need vastasmärgiliste laengutega piirkonnad moodustavad kristalli sees elektrivälja n.n. *potentsiaalibarjääri*, mis lõpetab laengukandjate edasise difusiooni (moodustub tõkkekiht).

Laengukandjate vaest tõkkekihti, mis moodustub vastasmärgilistest lisandioonidest eri juhtivusega pooljuhtosade eralduspinna juures nimetatakse pn- siirdeks. Enamasti valmistatakse pn- siirded ebasümmeetrilistena s.t. enamuslaengukandjate kontsentratsioon ühes pooljuhtkihis on teise omast 100...1000 korda suurem.

Vähemuslaengukandjaile mõjub elektriväli kiirendavalt ning nad läbivad siirde takistamatult. Nende laengute liikumine moodustab *triivoolu*. Ka väike osa enamuslaengukandjaid läbib soojusliku liikumisenergia tõttu siirde tekitades *difusioonvoolu*. **Välise energia (pinge, kiirguse jne) puudumisel on triivool ja difusioonvool võrdsed ja vastassuunalised ning nende summa null.**

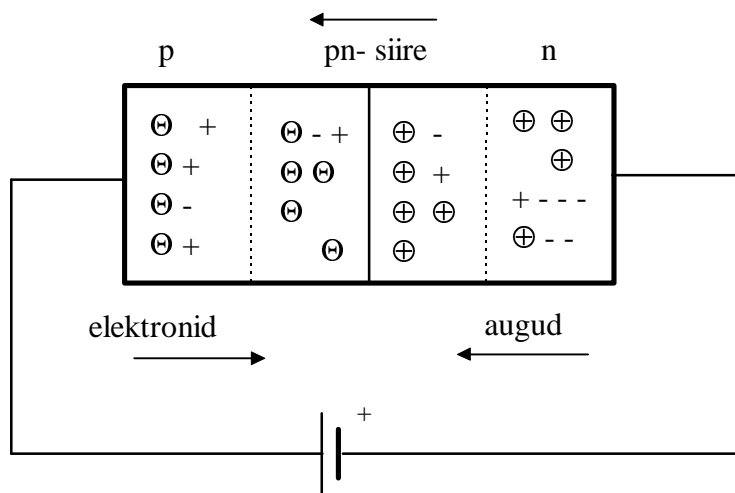
Kui ühendada p- juhtivusega piirkond vooluallika positiivse poolusega ja n- juhtivusega piirkond negatiivse poolusega s.t. rakendada siirdele päripinge mõjub väline elektriväli sisemisele vastu alandades potentsiaalibarjääri (joonis 3.2). Seetõttu on rohkem elektrone suutelised difundeeruma läbi tõkkekihi p- piirkonda ning samal põhjusel tugevneb ka aukude difusioon vastassuunas.



Joonis 3.2. Päripingestatud pn-siire

Resulteeriv difusioonvool on juba madalal pingel (ligikaudu 0,4 V Ge- ja 0,8 V Si-siirde korral) küllalt tugev.

Siirdele vastupinge rakendamisel liitub väline elektriväli siirde oma väljaga samasuunaliselt. Selle tulemusena muutub potentsiaalibarjäär sedavõrd kõrgeks, et enamusaengukandjate difusioon lakkab (joonis 3.3). Vähemusaengukandjad läbivad siirde küll takistamatult, kuid neid tekib toatemperatuuril vähe ja vastuvool jääb nõrgaks.



Joonis 3.3. Vastupingestatud pn-siire

Siirde vastupingestamisel tema takistus kasvab järsult ning siiret läbib vaid nõrk soojuslik *lekkevool*. Sellel nähtusel põhineb vahelduvvoolu aldamine.

Siirde päriivool sõltub pingest ligikaudu eksponentsiaalselt. Vastuvool tugevneb pinge tõstmisel algul aeglaselt aga alates teatud piirpingest s.t. *läbilöögipingest* kiiresti. Samuti kasvab vastuvool kiiresti siirde soojenemisel, sest suureneb vähemusaengukandjate arv. Ka päriivool tugevneb temperatuuri tõustes, kusjuures väheneb päripigelang. Siiret iseloomustatakse *pinge-voolu tunnusjoonega*, mida lähemalt vaadeldakse alajaotuses 3.3.

Temperatuuri tõusmisel üle lubatud väärtuse tekib siirdes *soojusläbilöök*. Soojuse mõjul hakkab siirde temperatuur tõusma, millega kaasneb vastuvoolu tugevnemine, nii, et siire kuumeneb veelgi. Temperatuuri kasvamisel üle lubatud väärtuse siirde struktuur hävib (ränil 150° C, germaaniumil 85° C).

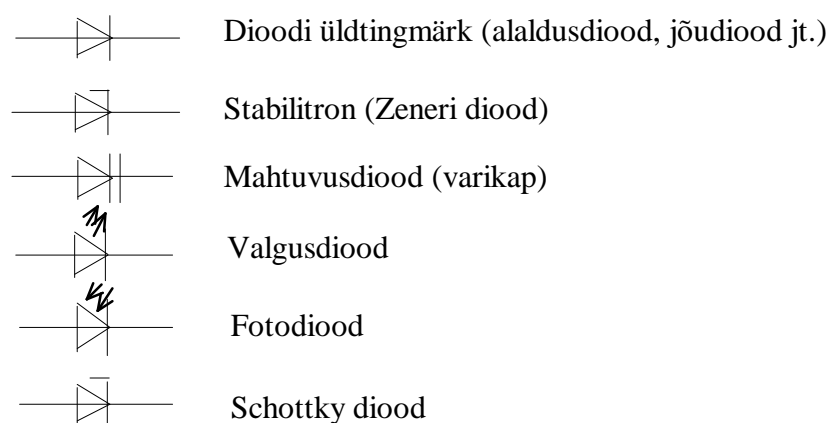
3.3 Pooljuhtdiodid

Pooljuhtdiodid on kahe väljastusega ühe pn- siirdega elektronseadised. Nende valmistamisel kasutatakse lähtematerjalina räni germaaniumi või galliumarseniidi monokristalli, kus lisandite kontsentratsioon ei tohi ületada 10⁻⁸ %. Diodide liigitatakse siirde kuju ja mõõtmete järgi *punkt- ja pinddiodideks*. Punktdiodidel on avaldava kontakti mõõtmed samas suurusjärgus siirde paksusega, pinddiodidel on aga siirde pindala tõkkekihi paksusest palju suurem.

Otstarbe ja kasutusala järgi jaotatakse diodid järgmiselt:

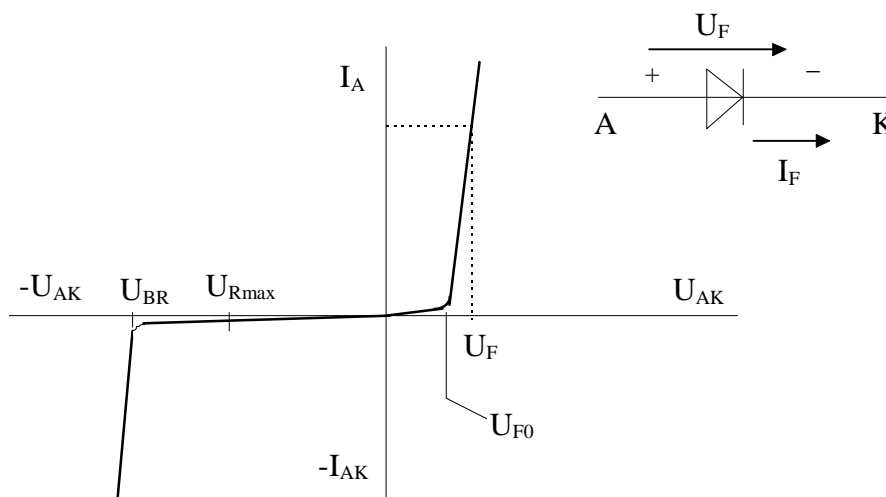
1. Alaldusdiodid.
2. Kõrgsagedusdiodid (*lülitus-, detektor- ja segustidiodid*).
3. Ülikõrgsagedusdiodid (*PIN-diodid, Schottky diodid*).
4. Stabilitronid (*Z-diodid ja temperatuurkompenseeritud tugidiodid*).
5. Siirdeprotsesside liigpingelahendus-diodid (*TAZ-supressordiodid*).
6. Mahtvusdiodid e. varikapid (*Esaki diodid*).
7. Takistusdiodid (*CCR-diodid*).
8. Generaatoridiodid (*Gunni diodid*).
9. Sageduskordistusdiodid (*varaktorid*).
10. Valgusdiodid, laserdiodid, fotodiodid.

Erinevat tüüpi diodide tingmärgid on toodud joonisel 3.4.



Joonis 3.4. Diodide tingmärgid.

Pooljuhtdiodide elektrilisi omadusi iseloomustab pinge voolu tunnusjoon $I_A = (U_{AK})$. Diodi pinge-voolu tunnusjoon on toodud joonisel 3.5.



Joonis 3.5. Diodi pinge-voolu tunnusjoon: A - anood; K - katood; U_F - päripingelang; I_F - päriroom; U_{F0} - kanalipinge; U_{Rmax} - suurim lubatav vastupinge; U_{BR} - läbilöögipinge

Kui diod on päripingestatud, s. t. anoodil on katodi suhtes positiivne pinge, siis juhib diod voolu ja päripingelang on väike. Kui diod on vastupingestatud, siis diodi läbib ainult väga väike vastuvool. Kui vastupinge on suurem kui diodi läbilöögipinge U_{BR} , siis vastuvool kasvab järsult. Normaalses tööolukorras ei tohi pinge läbilöögipinget ületada. Diodi nimipinge on tavaliselt 80 ... 90 % läbilöögipingest. Praktilisel kasutusel võetakse tööpinge 60 ... 70 % läbilöögipingest.

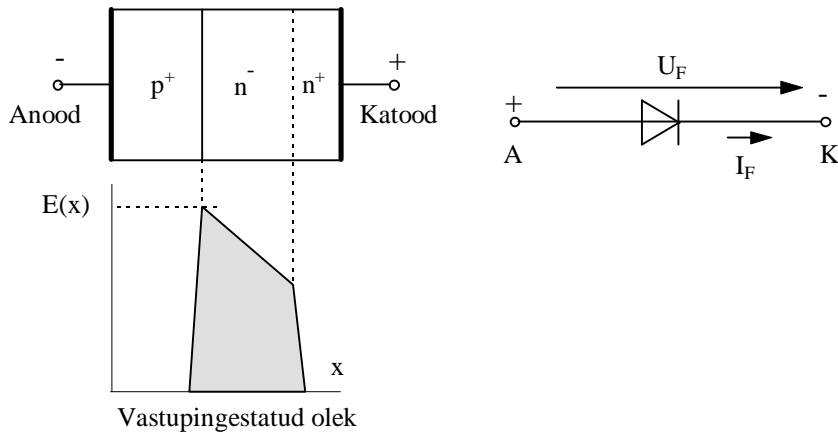
Diodi päripinge saab piisava täpsusega arvutada järgmise valemiga:

$$U_F = U_{F0} + I_d r_T,$$

U_{F0} - kanalipinge, mis kujutab päritunnusjoone lineaarse osa pikenduse ja pingetelje lõikepunkti (ränidiodi kanalipinge $U_{F0} = 0,6 \dots 0,7 \text{ V}$);

r_T - diferentsiaaltakistus, mis vastab päritunnusjoone puutuja tõusu pöördväärtusele (tavaline väärtus on mõni kuni mõnikümmend $\text{m}\Omega$).

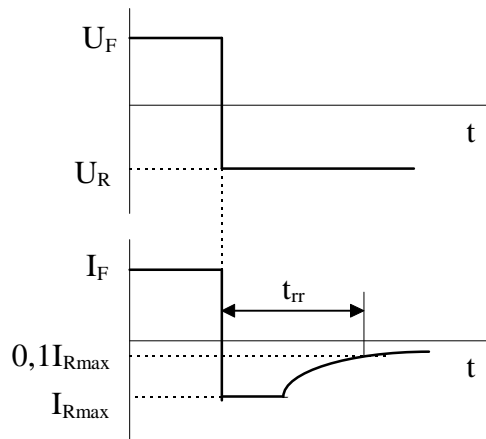
Jõupooljuhtmuundurites kasutatakse *jõudiodide*. Jõudiodide ehituses on suurt tähelepanu pööratud siirde temperatuuri alandamisele, et suurendada diodi lubatud suurimat hajuvõimsust ja alaldatud voolu suurimat lubatud keskväärtust. Jõudiodidelt nõutakse suurt lubatavat vastupinget ja väikest päripingelangu. Jõudiodi pooljuhtkristall sisaldab lisaks tugevalt legeeritud p- ja n- kihile nõrgalt legeeritud n^- või n^+ - kihti (joonis 3.6)



Joonis 3.6. Jõudiodi nõrgalt legeeritud n^- - pooljuhtkihiga pn-siire.

Nõrgalt legeeritud n^- kiht tagab vastupingel madalama ruumilaengu ja elektrivälja tugevuse ning seetõttu suurema lubatava vastupinge. Maksimaalne vastupinge on piiratud siirde lokaalse soojuslabilöögiga ja laviinlabilöögiga (*avalanche effect*), mis seisneb selles, et laengukandjaid kiirendatakse nii tugevasti, et tekib löökionisatsioon ($E = 10^5$ V/cm). Väljatugevus on seotud ruumilaenguga ja see omakorda legeerimisega. Järelikult kõrge vastupinge saamiseks sobib madal legeerimine. Jõudiodide valmistatakse lubatud vooludega, mis ulatuvad kiloampritesse ja vastupingetega, mis ulatuvad kilovoltidesse.

Jõudiodide dünaamilisi omadusi iseloomustab *vastutakistuse taastumiskestus* t_{rr} . See on ajavahemik alates hetkest, mil antud päripinge all oleva diodi ümberlülitamisel etteantud vastupingele diodi vool läbib nullväärtuse, kuni hetkeni, mil ümberlülitamisel kujunev vooluimpulss kahaneb etteantud väärtuseni (joonis 3.7).



Joonis 3.7. Pinge ja voolu kulg diodi ümberlülitamisel vastupingele.

Sõltuvalt rakendusest liigitatakse jõudiodid järgmiselt:

- *Alaldusdioidid* on mõeldud kasutamiseks muundurites, mis töötavad tööstussagedusel (50 Hz). Neil on madal päripingelang, kuid vastutakistuse taastumisketus t_{rr} on suhteliselt pikk. Alaldusdiode on saadaval mitme kiloampriste vooludele ja pingele mitmeid kilovolte. Alaldusdiode võib vajaliku vastupinge või

voolu saamiseks ühendada kas jadamisi või rööbiti. Alaldusdioodide alaliigiks on *laviindiodid*, mille pn-siire on sellise ehitusega, et suure energiaga liigpingeimpulsid (teatud piirini) pole neile ohtlikud.

- *Kiired dioodid* sobivad kasutamiseks kõrgsagedusahelates ja koos kiiretoimeliste lülitustransistoridega. Neil on väga lühike vastutakistuse taastumiskestus (suurusjärgus mõni μs), kuid lubatavad voolud ja pinged on mõnevõrra väiksemad kui räni-alaldusdioodidel (mõnisada amprit ja mõnisada volti). Siia kuuluvad ka eriti kiire toimega GaAs dioodid, millede voolud on tänapäeval kuni 200 A ja pinged kuni 300 V. Nende taastumiskestus on vahemikus 0,1 ns kuni 0,1 μs .

- *Schottky dioodide* päripingelang on siirde erilise ehituse tõttu tunduvalt madalam kui teistel dioodidel. Nende kanalipinge on tavaliselt 0,3 ... 0,35 V piires ja lubatav vastupinge ei ületa tavaliselt 50 ... 100 V. Seetõttu kasutatakse Schottky diode peamiselt madalapingelistes ahelates. Schottky dioodidel ei esine laengusalvestusefekti ja seetõttu on nad eriti kiiretoimelised.

Jõudiodide olulisemad kataloogiandmed on:

U_{RRM} - nimipinge ehk maksimaalne lubatav perioodiliselt korduv vastupinge. Nimipinget tähistatakse dioodi tähistuses nn. pingeklassiga, mis on võrdne $U_{RRM}/100$. Diodi tööpinge soovitatakse valida 0,6 ... 0,75 U_{RRM} .

U_{BR} - suurim mittekorduv vastupinge ehk dioodi läbilöögipinge.

I_{FRMS} - suurim pärivoolu efektiivväärtus.

I_{FAV} - kestvalt lubatud suurim pärivool, s. t. voolu suurim keskvärtus tööstussagedusel siinuse poollaine kujulise voolu korral kindlal dioodi kere (s. t. kontaktpinna) temperatuuril.

I_{FSM} - suurim löökvool, s. t. suurim lubatav üksiku 10 ms kestusega siinuse poollaine kujulise vooluimpulsi amplituudväärtus, mille kordumiste arv ja sagedus on normeeritud.

$\int I^2 dt$ - koormusvoolu soojusliku mõju piirintegraal, s. t. läbiva voolu ruudu ajaintegraali suurim lubatav väärtus.

R_{thjc} - soojustakistus pn-siirde ja kontaktpinna vahel.

Võnkeringide häälestamiseks soovitud sagedusele kasutatakse *mahtvusdiodide* ehk *varikappe*. Varikap on ränipinddiod, mille puhul kasutatakse dioodi p- ja n-piirkonna vahelise mahtuvuse sõltuvust vastupingest. Mahtuvuse katteteguri suurendamiseks rakendatakse mitmekihilisi struktuure, näiteks pnn⁺. Diod toimib siin elektriliselt tüüritava kondensaatorina, mille elektrodidevahelise dielektriku - dioodi tõkkekihi paksus suureneb vastupinge tõstmisel. Ülikõrgsagedustel kasutatakse muutkondensaatorina Schottky barjääriga (pooljuhi ja metalli kontaktpinnal kujunenud pn- siire) dioodi. Toodetakse ka valgusega tüüritavaid varikappe nn. *fotovarikappe*.

Varikappide olulisemad kataloogiandmed on:

C_{tot} - nimimahtuvus on diodi mahtuvus teatud väikesel vastupingel U_R .

$k_C = C_{tot U1}/C_{tot U2}$ - mahtuvuse kattetegur väljendab nimimahtuvuse ja suurimale lubatavale vasupingele U_{rmax} vastava pinge korral ilmneva mahtuvuse suhet.

Q - hüvetegur on varikapi reaktiivtakistuse ja kaotakistuse suhe, $Q = x_C/R_k$. Siirde temperatuuri tõustes väheneb hüvetegur märgatavalt.

$\alpha_C = \Delta C/(C_{tot}\Delta T)$ 1/K - mahtuvuse temperatuuritegur, kus ΔC on temperatuurimuutusest ΔT tingitud mahtuvusemuutus. See tegur on enamikel diodidel $+(1...5)\cdot 10^{-4}$ 1/K.

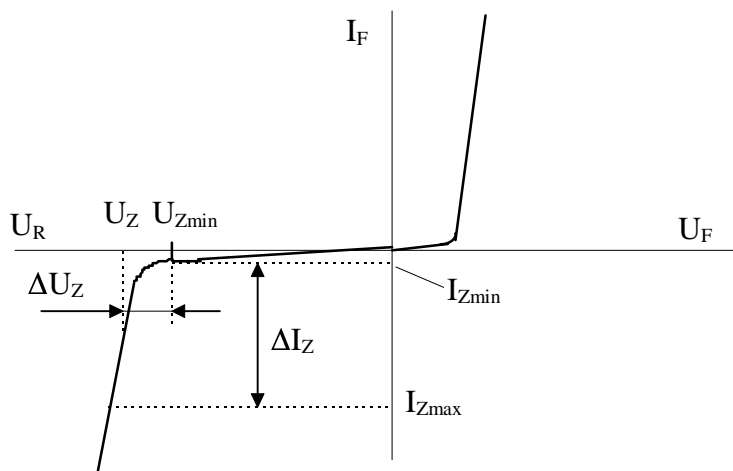
Diodide markeerimisel kasutatakse tähtede ja numbrite kombinatsiooni (Euroopa süsteem *Pro Electron*). Esimene täht näitab pooljuhtmaterjali (A - Ge; B - Si; C - GaAs jne), teine täht näitab diodi liiki (A - üldotstarbeline; B - mahtuvusdiod; P - fotodiod jne) ning tähtedele järgneb tüübi järjenumber. Näitena võib tuua üldotstarbelise germaaniumdiodi AA113.

Väikeste diodide tüüpe tähistatakse sageli diodi korpusele trükitavate värvitäppide või -triipudega. Euroopa süsteemis *Pro Elektron* markeeritakse üldotstarbelisi dioode kahe laia triibuga (katodi pool) ja kahe või kolme kitsa triibuga. Esimene lai triip vastab tüübitähise kahele esimesele tähele, teine lai triip määrab kolmanda tähe.

3.4 Pooljuhtstabilitrone

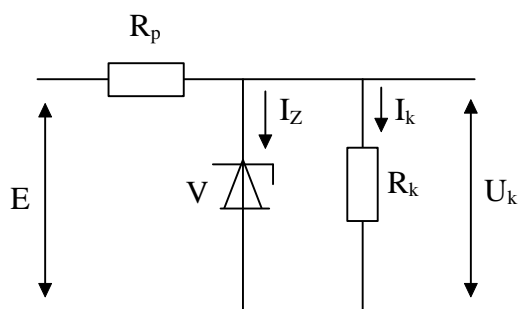
Pooljuhtstabilitrone (Zeneri diod) on ränidiod, mis hoiab pinge temaga rööbitisel koormusel peaegu püsivana kuigi toitepinge või koormustakistus muutub suures ulatuses. Stabilitrone vähendab ka alaldatud pinge pulsatsiooni.

Stabilitronid töötavad pinge-voolu tunnusjoone vastuharul läbilöögiipiirkonnas (joonis 3.8).



Joonis 3.8. Stabilitroni pinge-voolu tunnusjoon: U_Z - stabiliseerpinge; U_{zmin} - minimaalne stabiliseerpinge; I_{zmin} - minimaalne stabiliseervool; I_{zmax} - maksimaalne stabiliseervool

Pinge stabiliseerimiseks koormusel kasutatakse lihtsamal juhul skeemi, mis on toodud joonisel 3.9.



Joonis 3.9. Lihtsa pingestabilisaatori skeem: E - toitepinge; I_Z - stabiliseervool; I_k - koormusvool; R_k - koormustakisti, U_k - pinge koormusel

Piiramistakisti R_p valitakse nii, et toitepinge nimiväärtusel läbiks stabilitrone keskmine vool:

$$I_{zkesk} = \frac{I_{zmax} + I_{zmin}}{2}.$$

Stabiliseerpinge sõltub ränikristalli töötlemise tehnoloogiast ning tema eritakistusest, vool aga siirde mõõtmetest ja jahutustingimustest. Stabilitrone toodetakse pingetele 3...400 V ja vooludele kümnendikest milliampritest mitme amprini. Stabilitrone võib ühendada jadamisi, siis võrdub stabiliseerpinge üksikute stabilitronide stabiliseerpingete summaga.

Kuna ränidiodi pinge-voolu tunnusjoone päriharu on järsult tõusev, saab diodi ka pärisuunas ühendatuna kasutada 0,6...1 V püsiva pinge saamiseks. Selleks toodetud seadiseid nimetatakse *stabistorideks*. Tööpunkt valitakse siin pinge-voolu tunnusjoone järsult tõusval osal. Kõrgema stabiliseerpinge saamiseks paigutatakse ühte korpusesse kaks või kolm diodi.

Stabilitronide seas moodustavad omaette rühmad täppis-, impulss- ja kaheanoodilised seadised.

Täppisstabilitronide stabiliseerpinge sõltub väga vähe temperatuurist. Selle saavutamiseks on neil stabiliseeriva siirdega järjestikku kaks päripingestatavat siiret. Kui stabiliseeriv siire töötab laviinlabilöögi talitluses, siis temperatuuri tõustes pinge temal kasvab, päripingestatud siiretel aga väheneb, nii, et stabilitrone üldine stabiliseerpinge temperatuurist peaaegu ei sõltu.

Impulss-stabilitronid on mõeldud pingeimpulsside piiramiseks. Sel juhul valitakse tööpunkt pinge-voolu tunnusjoonel veidi enne läbilöögipinget.

Kaheanoodilisi stabilitrone kasutatakse pinge kahepoolseks piiramiseks, näiteks elektriahelate kaitseks mõlemasuunaliste liigpingete eest. Nii moodustub kaks vastuühenduses pn- siiret. Viikudega ühendatakse ainult siirete välimised piirkonnad,

s.o. anoodid. Seega stabilitrone pingestamisel töötab kummagi polaarsuse korral üks siire läbilöögi teine temperatuurkompensatsiooni talitluses.

Stabilitronide iseloomulikud tunnussuurused on järgmised:

U_Z - stabiliseerpinge on stabilitronil tekkiv pinge kui teda läbib nimistabiliseervool I_{zn} .

I_{zmin} - vähim lubatav stabiliseervool on stabiliseervoolu vähim väärtus, mille korral läbilöögitalitlus on veel stabiilne.

I_{zmax} - suurim lubatav stabiliseervool on stabiliseervoolu suurim väärtus, mille korral stabilitron veel ülemäära ei kuumene.

r_Z - diferentsiaalvõrk on stabilitroni vahelduvvoolutakistus tööpiirkonnas: $r_Z = \Delta U_Z / \Delta I_Z$.

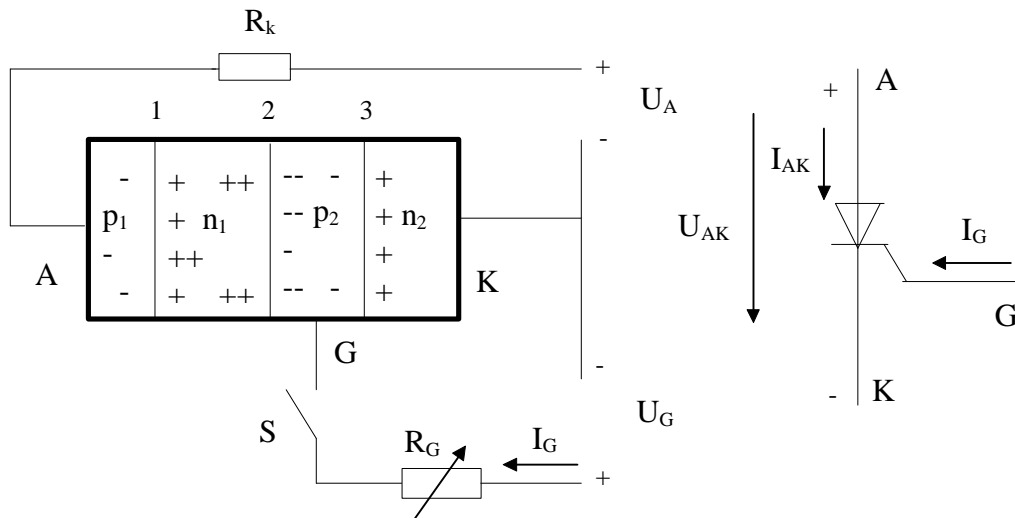
α_{UZ} - pinge temperatuuritegur näitab pinge suhtelist muutust protsentides ühe kraadise temperatuurivahe kohta. Temperatuuritegurit väljendatakse ka stabiliseerpinge muutusena millivoltides kraadi kohta. Temperatuuritegur on tunnelläbilöögiga stabilitronidel negatiivne ja laviinläbilöögil põhinevatel stabilitronidel positiivne, olles seega minimaalne 5...7- voldise stabiliseerpinge korral. Täppisstabilitronidel võib see tegur olla sõltuvalt sisemise temperatuurikompensatsiooni määra, kas positiivne või negatiivne.

Stabilitronide markeering (Euroopa süsteem *Pro Electron*) on analoogiline diodide markeeringuga.

3.5 Lihttüristor

Lihttüristor (üheperatsiooniline türistor) on mitme pn - siirdega pooljuhtseadis, mis päripinge olemasolul pärast tüürvoolu impulssi juhib voolu anoodilt katoodile.

Türistori aluseks on ränikristallist plaat või ketas, millel asetsevad vaheldumisi p- ja n- juhtivusega kihid. Anood- ja katoodväljastuseks on välimised pooljuhtkihid. Jõuelektroonika seadmetes (juhitavad alaldid, vaheldid jm) kasutatavatel türistoridel ehk *jõutüristoridel* on neljakihiline pooljuhtkristall, kusjuures väliskihid on legeritud tugevalt sisemised aga nõrgalt. Nõrgalt legeritud kihid vähendavad vastupingestatud siirde ruumilaengut ja vähendavad elektrivälja tugevust suurendades siirete lubatavat vastupinget. Lihttüristori struktuur ja tingmärk on toodud joonisel 3.10.

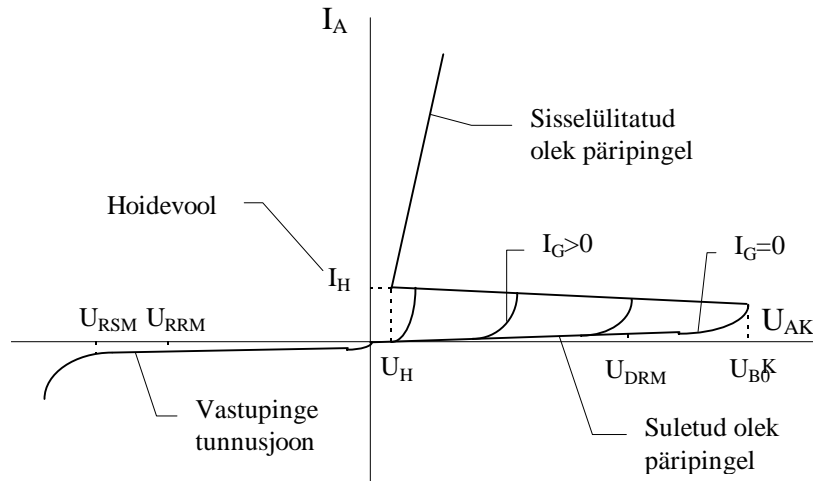


Joonis 3.10. Türistori struktuur ja tingmärk.

Anoodtoiteallikas on reguleeritava pingega U_A , koormustakisti R_k piirab anoodvoolu ja reostaadiga R_G reguleeritakse tüürvoolu. Juhul kui lüliti S on avatud ($I_G = 0$) on päripingestatud türistori äärmised siirded 1 ja 3 samuti päripingestatud, keskmine siire 2 aga vastupingestatud. Keskmisel siirdel on potentsiaalibarjäär kõrgem kui äärmistel. Madalatel anoodpingetel on türistori läbiv vool väike (μA , mA), mis kujuneb põhiliselt vähemuslaengukandjate soojusliikumisest läbi vastupingestatud siirde 2. Pinge edasisel suurenemisel see vool märkimisväärselt ei kasva. Anoodpinge teatud väärtusest alates suureneb anoodvool järsult, sest siirde takistus väheneb laviinlabilöögi tõttu nullini. Seda pinget nimetatakse *blokeerpingeks* U_{B0} . Blokeerpingel türistor avaneb.

Blokeerpinge U_{B0} vähendamiseks tuleb alandada vastupingestatud siirde potentsiaalibarjääri. Selle saavutamiseks ühendatakse tüürelektroodiga sõltumatu toiteallikas pingega $U_G = (0,3 \dots 10)$ V. Lüliti S sulgemisel tekib tüürahelas tüürvool I_G , mida on võimalik muuta reostaadi R_G abil. Tüürvoolu muutmiseega on *sisselülituspinget* (avanemispinget) võimalik muuta suurtes piirides.

Kui türistor on vastupingestatud, s.t. $U_{AK} < 0$, läbib türistori ainult väga väike vastuvool, kuna välimised siirded on vastupingestatud. Kui vastupinge on suurem kui türistori läbilöögipinget U_{RSM} , siis vastuvool kasvab järsult. **Vastupinge ei tohi läbilöögipinget kunagi ületada.** Türistori pinge-voolu tunnusjoon on kujutatud joonisel 3.11.



Joonis 3.11. Türistori pinge-voolu tunnusjoon

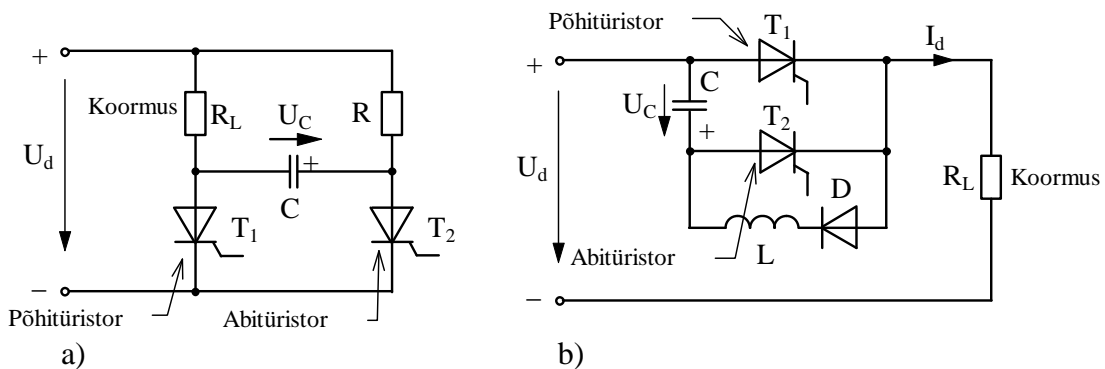
Türistor jääb avatud olekusse ka pärast tüürimpulsi lõppu ja sulgub siis kui anoodvool muutub väiksemaks hoidevoolust I_H .

Tüürvoolu suurendamisel blokeerpinge U_{B0} väheneb ja hakkab lähenema kanalipingele (ca. 1 V).

Türistori avanemisel tüürvoolu $I_G = 0$ korral suurema pingega kui blokeerpinge U_{B0} võib türistor rikneda.

Lihttüristore (*SCR - Silicon Controlled Rectifier*) kasutatakse reeglina muundurites, kus väljalülitamine toimub vahelduvpinge mõjul nagu võrguga sünkroniseeritud tüüritavad alaldid, vaheldid ja lihtsad vahelduvpingeregulaatorid. Lihttüristore kasutatakse ka akulaadiates, keevitusagregaatides, asünkroonmootorite sujuvkäivitites, kontaktivabades käivitites ja teistes seadmetes.

Lihttüristoride kasutamisel alalisvooluahelates tuleb nende sulgemiseks kasutada *sulgahelaid* (sundkommutatsiooniahelaid). Mõned lihtsamad sulgahelate põhimõtteskeemid on toodud joonisel 3.12.



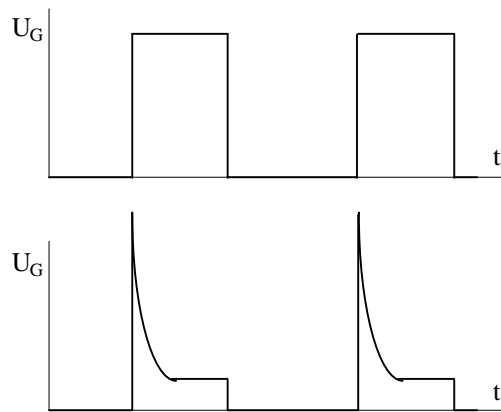
Joonis 3.12. Lihttüristori sulgahelate skeemid

Joonisel 3.12, a) kujutatud sulgeahel töötab järgmiselt. Põhitüristori T_1 avatud (voolujuhtivas) olekus voolab vool läbi koormuse R_L . Kondensaator C laadub läbi takisti R ja pinge U_C tõuseb praktiliselt toitepingeni. Põhitüristori T_1 sulgemiseks avatakse abitüristor T_2 . Selle tulemusel ühendatakse kondensaator C negatiivse potentsiaaliga. Et kondensaatori pinge U_C ei saa hetkeliselt nulliks muutuda, siis muutub pinge türistori T_1 anoodil katoodi suhtes negatiivseks. Kui pinge türistoril T_1 on negatiivne, siis ei saa ta voolu juhtida ja ta sulgub. Koormusvool kommuteerub kondensaatorile ja kondensaator laadub läbi koormuse ja türistori T_2 ning pinge türistori anoodil muutub uuesti positiivseks. Selle ajaga peavad türistori sulgeomadused jõudma taastuda. Koormusvool kahaneb nullini. Takisti R väärtus peab olema valitud selline, et türistori T_2 vool jääks lõppolekus hoidevoolust I_H väiksemaks, mis tagab ka T_2 sulgumise. Sulgeahela (joonis 3.12, a) puuduseks on see, et türistori avatud oleku kestust ei saa perioodi jooksul suures ulatuses muuta, kuna kondensaator peab põhitüristori avatud oleku jooksul laaduma läbi suure takistuse.

Joonisel 3.12, b) kujutatud sulgeahel on eelnevast tunduvalt kiirem ja võimaldab sisselülituskestust muuta laiades piirides. Skeem töötab järgmiselt. Kui abitüristor T_2 on avatud, siis kondensaator C laadub pingeni $U_C=U_d$. Kui kondensaator on laetud, siis T_2 sulgub. Põhitüristori T_1 avamisel kondensaator C tühjeneb läbi ahela $T_1 - D - L$. Induktiivsuse tõttu vool selles ahelas jätkub ja kondensaator laadub vastupidiselt esialgsele seisule pingeni $U_C=-U_d$. Põhitüristori T_1 sulgemiseks avatakse abitüristor T_2 . Koormusvool kommuteerub kondensaatorile C . Pinge põhitüristoril T_1 muutub negatiivseks ja ta sulgub. Kondensaator laadub läbi koormuse ja türistori T_2 uuesti pingeni $U_C=U_d$. Edasi protsess kordub.

Türistori avamiseks tuleb tüürelektroodile anda katoodi suhtes positiivse pingega tüürvoolu impulss. Tüürvool ja pinge peavad ületama minimaalseid türistori avamiseks vajalikke väärtusi, mis vastavad madalaimale töötemperatuurile. Ühtlasi peab tüürimpulsi vool kasvama piisavalt kiiresti (ca $1 \text{ A}/\mu\text{s}$), et türistor avaneks kiiresti ja täielikult. Tüürimpulsi vool, pinge ja kestus peavad tagama türistori avanemise kogu töötemperatuuri alas. Avanemise kiirendamiseks kasutatakse jõutüristori kahekordset (võimendusastmega tüürelektroodiga) struktuuri, mis võimaldab tüürvoolu ja jaotab selle kogu kristalli pinnale nii, et efektiivne juhtelektroodi ümbermõõt on $0,5 \text{ mm}$ või rohkem ning vahemaa regeneratiivse tüürelektroodi otste vahel on $5 \dots 10 \text{ mm}$.

Sõltuvalt muunduri skeemist antakse türistorile kas üks või mitu lühikest tüürimpulssi. Tüürimpulsi kestus on olenevalt türistori liigist ca $5 - 20 \mu\text{s}$. Lühema kestusega tüürimpulsi korral võib kasutada suuremaid tüürvoolu väärtusi. Tüürimpulss võib olla kas ristkülikukujuline või forsseeritud esifronidiga ristkülikukujuline, (vt. joonis 3.13) mis tagab türistori kiirema sisselülitumise ja väiksema tüürimisvõimsuse.



Joonis 3.13. Türistoride tüürimpulsside kujud

Tüürimpulssid moodustatakse juhtseadmes. Tüürimpulsside vastava kuju formeerib aga samuti ka võimendab tüürimpulssi *tüürlüli*. Levinumaks tüürlülis on impulsstrafoga tüürlüli, mis muudab riskülikimpulssid forsseeritud esifronidiga impulssideks.

Toodetakse mitut liiki üheoperatsioonilisi jõutüristore, mis on mõeldud kasutamiseks erinevates muundurites.

- *Alaldüstüristorid* on mõeldud kasutamiseks tööstussagedusel (50 Hz) võrguga sünkroniseeritud loomuliku kommutatsiooniga muundurites. Põhinõudeks alaldüstüristoridele on madal päripingelang (1,5 ... 3 V) ja suur lubatud vastupinge ning päriool. Alaldüstüristore on saadaval mitme kiloampriste vooludele ja pingetele mitmeid kilovolte. Alaldüstüristore võib vajaliku vastupinge või voolu saamiseks ühendada kas jadamisi või rööbiti. Alaldüstüristoride alaliigiks on laviintüristorid, mille siirded on sellise ehitusega, et suure energiaga liigpingeimpulssid (teatud piirini), pole neile ohtlikud. Alaldüstüristoride väljalülitumisaeg t_q on suhteliselt pikk $t_q > 500 \mu s$.
- *Inverteritüristorid* sobivad kasutamiseks sundkommutatsiooniga muundurites. Inverteritüristoride väljalülitumisaeg $t_q = 150 \dots 500 \mu s$.
- *Kiired türistorid (Fast Thyristors)* sobivad kasutamiseks vaheldites ja kõrgsagedusahelates, kuna neil on lühike sulgumisaeg (kuni $100 \mu s$). Nende lubatavad voolud ja pinged on mõnevõrra väiksemad kui räni-alaldüstüristoridel (mõnisada amprit ja mõnisada volti). Siia kuuluvad ka eriti kiire toimega GaAs türistorid, millede voolud on tänapäeval kuni 200 A ja pinged kuni 300 V.
- *Valgusega tüüritavad türistorid LTT (Light Triggered Thyristor)* lülituvad sisse valgusimpulsi mõjul, mis juhitakse türistori valgustundlikku alasse kiudoptilise valgusjuhi abil. Fototüristorid lülituvad sisse türistori siseneva kiudoptilisse valgusjuhti sisestatud valgusimpulsi mõjul. Optrontüristorid sisaldavad valgusdiodi ja nad lülituvad sisse siis, kui tüürvool läbib valgusdiodi. Valgusega tüüritavad türistorid sobivad hästi kõrgepingelistesse rakendustesse.

- *Sümistorid (TRIAC)*. Sümistori ekvivalendiks on kaks vasturööpselt lülitatud türistori, millel on ühine tüüreelektrood (vt. alajaotus 3.6). Sümistorid sobivad hästi vahelduvpinge regulaatoritesse.

Türistori eriliigiks on *diodtüristor*. Diodtüristor on kahe elektroodiga neljakihiline pnpn - struktuuriga seadis. Diodtüristor erineb tavalisest ehk *triodtüristorist* selle poolest, et tal puudub tüüreelektrood ning seetõttu avaneb ta teatud pingel, mida muuta pole võimalik. Nende struktuur ja tööpõhimõte on aluseks ka triodtüristoride talitlusele. Diodtüristoride osa toodetavate türistoride seas on väga väike.

Alajaotuses 3.3 toodud jõudiodide andmetele lisanduvad üheoperatsioonilistel jõütüristoridel järgmised olulisemad kataloogiandmed:

t_q - türistori sulgumisaeg,

$(du/dt)_{cr}$ - päripinge suurim lubatav kasvamiskiirus suletud olekus,

$(di/dt)_{cr}$ - anoodvoolu suurim lubatav kasvamiskiirus avanemisel,

I_H - hoidevool, millest väiksemal anoodvoolul türistor sulgub,

t_g - türistori avanemisaeg,

U_{GT} - avav tüürpinge,

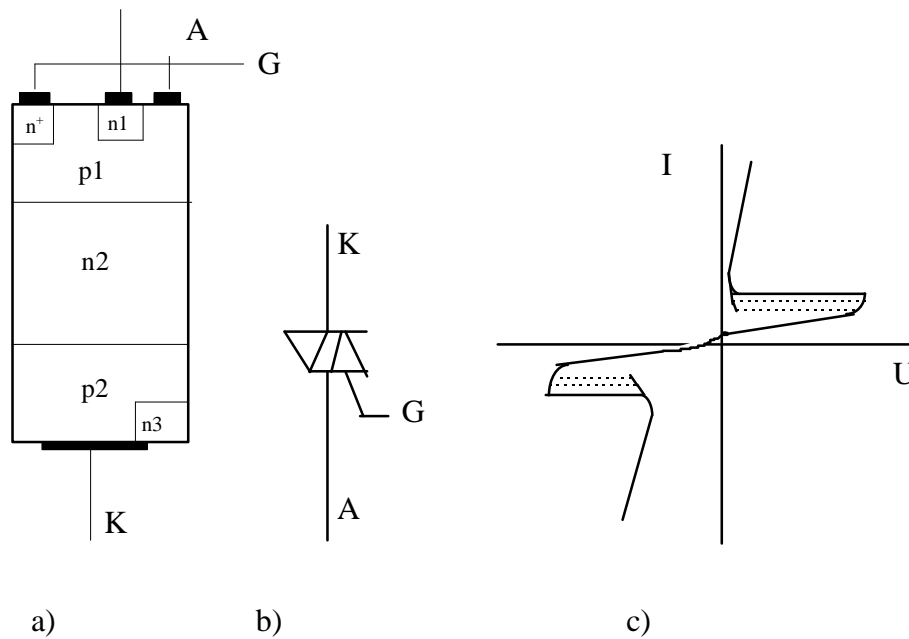
I_{GT} - avav tüürvool.

Türistoride markeerimisel kasutatakse tähtede ja numbrite kombinatsiooni nagu diodide korral. Euroopa süsteemis *Pro Electron* näitab esimene täht pooljuhi materjali (B - räni), teine täht näitab türistori liiki (T - reguleer- ja lülitusseadised, tüüritavad alaldid), kolmas täht tähestiku lõpust (Z, Y, X, ...) osutab kasutamisele tööstus- ja eriaparatuuris. Esimene number markeeringus on registreerimisnumber (näit. 10) ning viimane number näitab suurimat lubatavat vastupinget voltides (näit. 200). Näitena võib tuua tööstusseadmetes kasutatava alaldüstüristori B TX 10 - 200.

3.6 Sümistor

Sümistor ehk sümmeetriline türistor (*TRIAC - Bidirectional Triode Thyristor*) on toimelt võrdväärne kahe vasturööpselt ühendatud diod- või triodtüristoriga. Seega toimub türistori ümberlülitumine mõlemasuunalise pinge korral.

Kahe türistori vasturööpse ühenduse realiseerimisel ühes seadises kujuneb nelja siirdega npnpn - (või pnpnp) struktuur, kusjuures keskmised kihid p1, n2, p2 on mõlemale türistorile ühised. Sümistori struktuur, tingmärk ja pinge-voolu tunnusjoon on toodud joonisel 3.14.



Joonis 3.14. Sümistori struktuur a), tingmärk b) ja pinge-voolu tunnusjoon c)

Kui niisugusele türistorile rakendada pingega n1 kihil, siis on siirdel n1p1 vastupinge ja seega seda läbiv vool on väga nõrk; türistori põhivool läbib siire šunteerivat piirkonda p1. Siire p2n3 on päripingestatud ja läbi selle toimub elektronide injeksioon. Pinge vastupidise polaarsuse korral on siirded pingestatud vastupidiselt.

Tüürelektroodi võib formeerida kristalli nii, et sümistor avaneb kas ainult negatiivse või ainult positiivse tüürimpulsi mõjul, või ka selle ükskõik kumma polaarsuse korral. Viimasel juhul peab tüürelektroodil olema vahetu kontakt nii p1 piirkonnaga kui ka lisaks moodustatud n^+ piirkonnaga.

Sümistori anoodiks nimetatakse leppeliselt seda põhielektroodi, mis on ühendatud tema metallkestaga ning põhielektroode tähistatakse ka numbritega 1 ja 2.

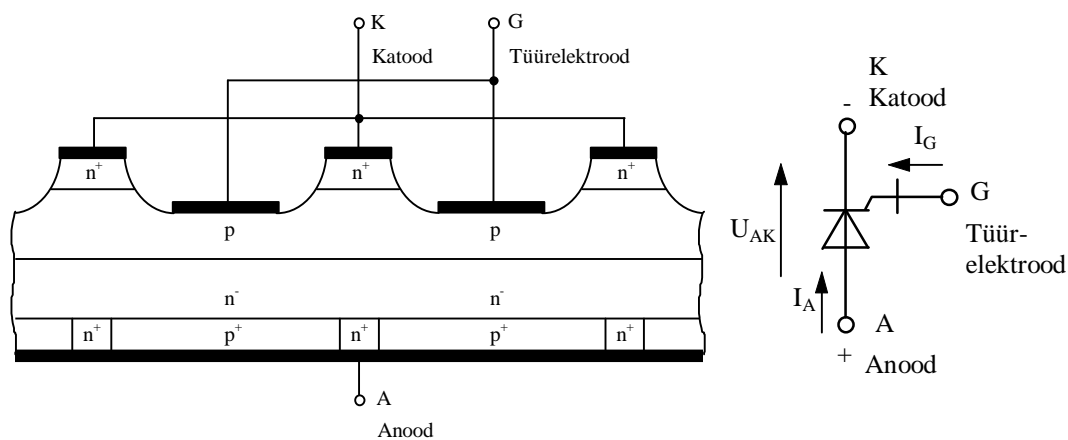
Sümistoride markeerimine süsteemis *Pro Electron* on analoogiline lihttüristoride markeerimisega.

3.7 Suletav türistor (GTO)

Suletav ehk kaheoperatsiooniline GTO-türistor (*Gate Turn Off*) lülitub sisse täpselt samuti nagu üheoperatsiooniline türistor, s. t. tüürelektroodile antakse lühike katoodi suhtes positiivse pingega tüürvoolu impulss. Suletava türistori sulgemiseks antakse tüürlülitusse katoodi suhtes negatiivse pingega võimas tüürvoolu impulss. Kaasaegsetes vaheldites kasutatakse suletavaid türistore üha rohkem (näiteks elektriajamite toiteks). GTO-türistorid on tunduvalt kiiremad üheoperatsioonilistest türistoridest. GTO-sid kasutatakse sagedusteni kuni 500 Hz.

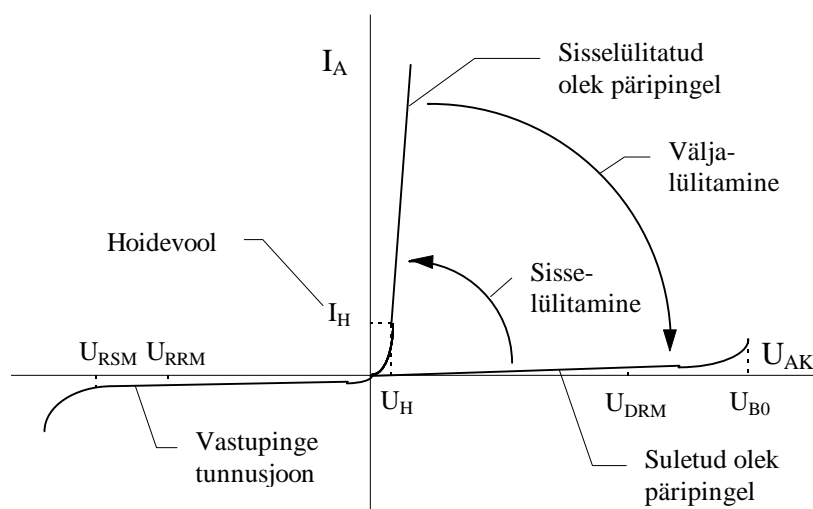
Kaheoperatsiooniliste türistoride pooljuhi struktuur on keerukam kui üheoperatsioonilisel türistoril koosnedes paljudest rakkudest. Väljalülitusvõime

saavutatakse katoodide saarekestena hajutamise ning katoodi ja tüürelektroodi vahelise kauguse vähendamisega. Suletava türistori kristallisegmendi ristlõige ja tingmärk on kujutatud joonisel 3.15.



Joonis 3.15. Suletava türistori kristallisegmendi ristlõige ja tingmärk

Suletava türistori pinge-voolu tunnusjoon on sarnane lihttüristori omaga. Türistori väljalülitamine on kujutletav päritunnusjoone pööramisega päripäeva pingetelje lähedale s.t. türistori takistuse järsu suurenemisena. Suletava türistori pinge-voolu tunnusjoon on näidatud joonisel 3.16.



Joonis 3.16. Suletava türistori pinge-voolu tunnusjoon.

Kuna suletaval türistoril võimendusastmega tüürelektrood puudub, siis peab avamise tüürimpulss olema võimsam kui üheoperatsioonilisel türistoril. Avamise tüürimpulsi vool peab olema suurem minimaalsele töötemperatuurile vastavast tüürvoolu väärtusest (näiteks 5 korda). Avamise tüürimpulsi vool peab kasvama piisavalt kiiresti, enamasti juhtudel ca $100 \text{ A}/\mu\text{s}$ ja selle kestus peab olema vähemalt pool kataloogiandmetes antud minimaalsest sisselülituskestusest. Sellega tagatakse türistori piisavalt kiire ja täielik avanemine kogu töötemperatuuri alal ning väikesed kaod avamisel. Avamise tüürimpulsi voolu maksimaalväärtus on piiratud tüürelektroodi suurima lubatud kaovõimsusega P_{FGM} .

Suletava türistori avatud (voolujuhtivas) olekus peab säilima teatud suurusega positiivne tüürvool, mis tagab türistori avatud oleku ka väikestel voolu väärtustel. Väikestel anoodvoolu väärtustel võivad muidu mõned katoosasaarekesed sulguda ning voolu suurenemisel võivad avatuks jäänud saarekesed liigvoolu tõttu läbi põleda. Kui anoodvool võib järsult kahaneda (suur negatiivne di_F/dt), siis tuleb tüürvoolu avatud olekus suurendada. Türistori temperatuuri kasvades võib avatud oleku tüürvoolu vähendada.

Suletava türistori sulgemiseks antakse tüürlülitusse katoodi suhtes negatiivse pingega võimas tüürvoolu impulss. Suletava türistori sulgemise võib jaotada kolmeks perioodiks. Esimesel perioodil eemaldatakse tüürelektroodi laeng, teisel toimub tüürelektroodi Avalanche laviinläbilööök ja kolmanda perioodi jooksul anoodvool kahaneb. Tüürimpulsi pinge ei tohi ületada teatavat lubatud väärtust. Suletava türistori sulgumisvõime sõltub tugevalt sulgahela parameetritest. Suletud olekus jäetakse tüürelektrood vastupingestatuks, mis tagab maksimaalse blokeerpinge ja du/dt mõju vähenemise. Vahel nõutakse ka takisti ühendamist katoodi ja tüürelektroodi vahele.

Suletava türistori tüürlülitus on keerukam kui üheoperatsioonilisel türistoril kuna välja- lülitamiseks tuleb tagada piisava tugevusega negatiivne tüürvooluimpulss. Tüürlüli täiendavatest toitepingetest saab loobuda kasutades impulsstrafoga lülitust.

Lisaks üheoperatsiooniliste türistoride andmetele on GTO- türistoride olulisemad kataloogiandmed järgmised:

I_{GQ} - sulgeva tüürvooluimpulsi väärtus,

U_{GQ} - sulgeva tüürpinge väärtus,

I_{QM} - suurim võimalik väljalülitatav vool,

β_{off} - vooluvõimendus väljalülitumisel (*turn off gain*),

t_S - sulgeva tüürvoolu kasvamise kestus,

t_{fi} - anoodvoolu kahanemise kestus.

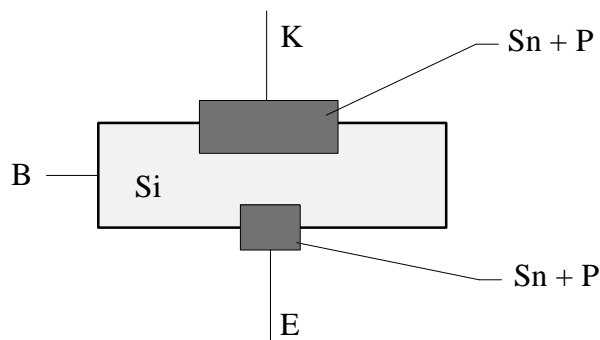
Suletavate türistoride markeerimine on analoogiline lihttüristoride markeerimisega, tuntumad tähistussüsteemid on Euroopa süsteem *Pro Electron*, USA süsteem *JEDEC* ja vene süsteem.

3.8 Bipolaartransistorid

Transistor on kolme väljastusega täielikult tüüritav pooljuhtseadis. Tööpõhimõtte järgi jagatakse nad *bipolaartransistorideks* (juhtivuses osalevad elektronid ja augud) ja *unipolaar* ehk *väljatransistorideks* (jutivuses osalevad elektronid või augud). Järgnevalt vaatleme bipolaartransistori (edaspidi transistor) ehitust ja tööpõhimõtet.

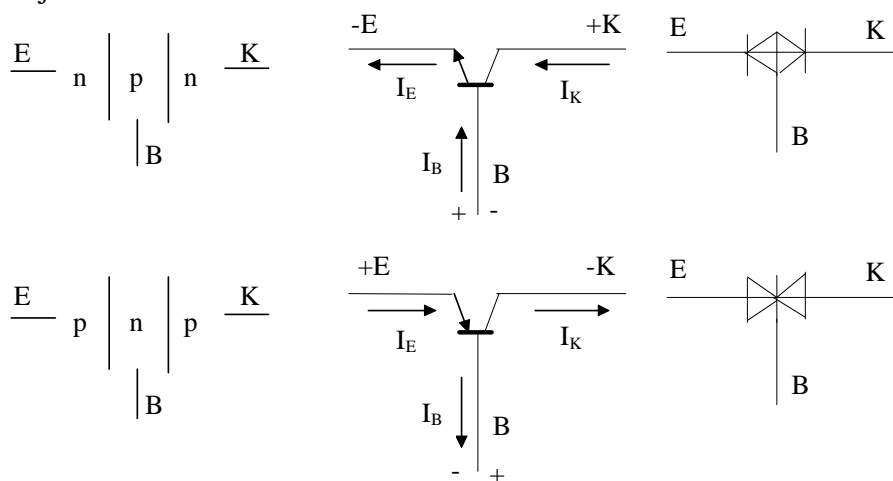
Transistoridest on enamlevinud räni- või germaaniumtransistorid. Transistori valmistamise aluseks võib olla näiteks p- juhtivusega räni monokristall. Sinna tehtud

süvenditesse sulandatakse kaks eri kaalutist tina (Sn) ja fofori (P) segu, et saada kõrglegeeritud n- piirkonnad (joonis 3.17).



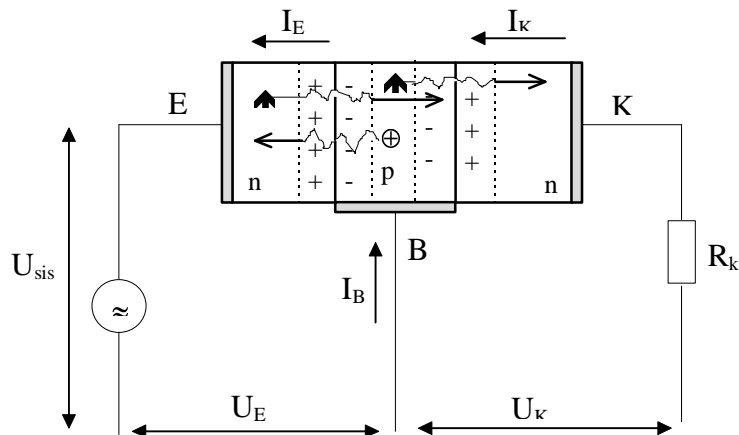
Joonis 3.17. Transistori ehitus ja viikude nimetused: E - emitter, B - baas, K - kollektor

Transistoris tekkivad kolm vahelduva juhtivustüübiga ala, mida eraldavad kaks pn-siiret. **Transistorid võivad olla kas pnp- või npn-struktuuriga (juhtivusega).** Erinevus nende vahel seisneb vaid ühendatavate toiteallikate polaarsuses (voolude suunad vastupidised). Transistori ekvivalendiks on kaks diodi, mis on ühendatud ühise anoodi või katoodiga. Transistoride struktuurid, tingmärgid ja diodaseskeemid on toodud joonisel 3.18.



Joonis 3.18. npn- ja pnp- transistori struktuurid, tingmärgid ja diodaseskeemid.

Vaatleme npn- juhtivusega transistori eeldusel, et mõlema siirde ehitus ja pindalad on ühesugused. Transistori struktuur ja pingestamine on näidatud joonisel 3.19.



Joonis 3.19. npn- transistori struktuur ja pingestamine.

Pingestamata väljundite korral on mõlema siirde läheduses kontsentreerunud lisandioonide ruumlaengud. Ruumlaengute elektriväli kujutab endast kaht ühesugust potentsiaalibarjääri (kahe diodi vastulülitus). Väliste vooluallikate puudumisel on siirde voolud võrdsed nulliga. Transistori kasutamisel võimenduselemendina pingestatakse üks siire päri- ja teine vastassuunas. Esimest nimetatakse emittersiirdeks, teist aga kollektorsiirdeks. Keskmist pooljuhtkihti nimetatakse baasiks. Emitterväljastusega ühendatakse toiteallikas U_E (pingega ca. 1 V) ja sisendsignaali allikas U_{sis} . Kollektorväljastusega ühendatakse toiteallikas U_K (pingega mõnikümme volti) ja koormustakisti R_k . Siirde päripingestamisel potentsiaalibarjäär väheneb ja elektronid injekteeruvad baasi. Samaaegselt liiguvad baasipiirkonnast sealsed enamuslaengukandjad (augud) läbi siirde emitterisse. Need mõlemad komponendid moodustavad emitterivoolu I_E (aukude osa voolu moodustumises on suhteliselt väike). Kokkuleppeline emitterivoolu suund on vastupidine elektronide liikumise suunale.

Baasis muutuvad elektronid vähemuslaengukandjateks liikudes edasi põhiliselt difusiooni teel vasaku siirde poole. Baasi elektriväli praktiliselt elektronide liikumist ei mõjuta, sest nende laengud kompenseeritakse aukude poolt. Difusiooni käigus osa elektrone rekombineerub aukudega, osa hajub kristallvõres, ülejäänud aga kanduvad kollektorsiirde välja mõjul kollektorile. **Kollektorivool moodustub kahest komponendist - emitterist injekteeruvatest laengukandjatest ja kollektori vastupingest.** Kollektor-baasi vastuvool I_{KB0} ei ole muudetav ning sõltub ainult temperatuurist. Suurtes piirides on aga muudetav kollektorivoolu esimene komponent ning selle tüürimiseks kasutatakse välist vooluallikat.

Kollektori- ja emitterivoolu väikeste muutuste korral nimetatakse nende suhet *vooluülekandeeguriks*:

$$\alpha \cong \frac{\Delta I_K}{\Delta I_E},$$

Välisvooluringi kohta kehtib seos:

$$\Delta I_K = \alpha \Delta I_E + I_{KB0},$$

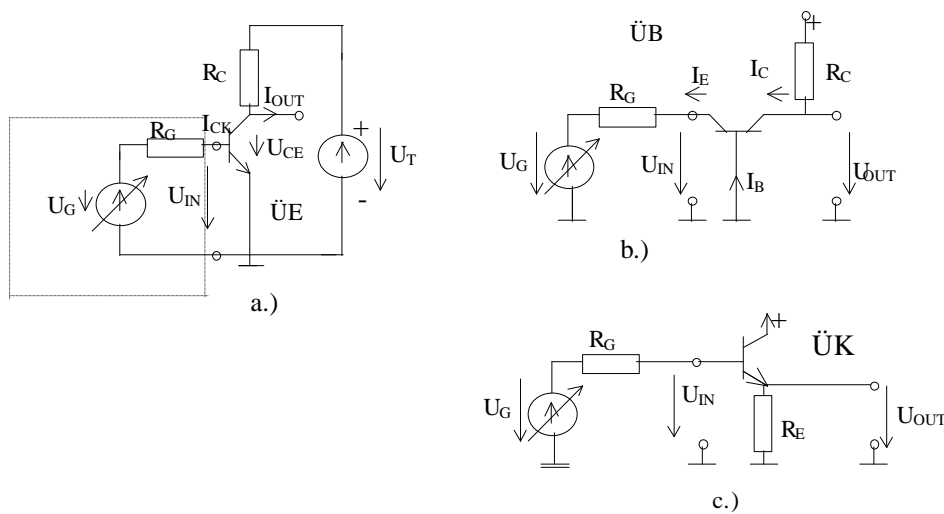
Emitterivoolu aukjuhtivusest tingitud komponent kujutab endast baasivoolu:

$$\Delta I_B = (1 - \alpha)\Delta I_E - I_{KB0}$$

Kollektori- ja emitterivoolu väärtused on ligikaudu võrdsed, kuna I_{KB0} on suhteliselt väike seega $\alpha \approx 1$.

Kollektoriahelasse lülitatud koormustakistil saadakse pingelang, mis võib sisendpinget mitme suurusjärgu võrra ületada. Seega annab lülitus pinge- ja võimsusvõimenduse.

Eeltoodud lülitust nimetatakse *ühisbaaslülituseks* ($\ddot{U}B$), kuna baasiväljastus on ühine nii sisend- kui väljundahelale. Bipolaartransistori kasutatakse veel *ühisemitter* ($\ddot{U}E$)- ja *ühiskollektorlülituses* ($\ddot{U}K$). Need kolm ühendusviisi on aluseks kõikidele transistorlülitustele. Transistoride lülitusviisid on näidatud joonisel 3.20.



Joonis 3.20. Transistori $\ddot{U}E$ -lülitus a), $\ddot{U}B$ -lülitus b) ja $\ddot{U}K$ -lülitus c)

$\ddot{U}E$ - lülitust kasutatakse kõige enam kuna sel juhul tüüritakse väljundvoolu baasivoolu muutmise teel. Ühisemitter lülituse korral võib kollektorivoolu muudu avaldada järgmiselt:

$$\Delta I_K = \frac{\alpha}{1 - \alpha} \cdot \Delta I_B + \frac{1}{1 - \alpha} \cdot I_{KB0} = \beta \cdot \Delta I_B + (1 + \beta) \cdot I_{KB0},$$

kus $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ on *staatiline vooluvõimendustegur*.

Ühisemitter ühenduse korral võib β avaldada järgmiselt:

$$\beta \approx \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B}.$$

$\ddot{U}E$ - lülituse korral võib staatiline vooluvõimendustegur ulatuda kümnetesse tuhandetesse.

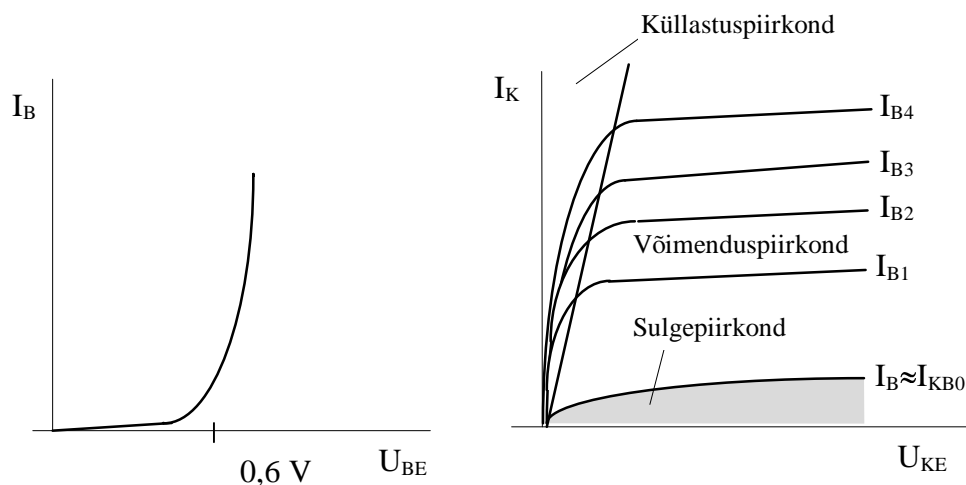
$\ddot{U}B$ - lülituse korral on $\Delta I_K \approx \Delta I_E$, ning sel juhul on sisendtakistus väike. Sisendtakistus avaldub järgmiselt:

$$R_{\text{sis}} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{\Delta I_{BE}}$$

ÜB- lülituse korral on sisendtakistus vahemikus 30...150 Ω.

ÜK- lülituse korral on sisendvooluks baasivool väljundvooluks aga emitterivool. Lülitusviisi iseloomustab suur sisendtakistus.

Transistori väljund- ja sisendsuuruste omavahelisi seoseid väljendavad nende *staatiliste tunnusjoonte* sarjad, mille abil saab hinnata transistori omadusi ja valida talitusviisi. Eristatakse *sisend- ja väljundtunnusjooni*. ÜE- lülituse korral on sisendtunnusjooneks $I_B = f(U_{BE})$ kui $U_{CE} = \text{const.}$ ja väljundtunnusjooneks $I_K = f(U_{KE})$ kui $I_B = \text{const.}$ (joonis 3.21).



Joonis 3.21. ÜE- lülituses transistori sisend- ja väljundtunnusjooned.

Bipolaartransistor võib töötada kolmes põhitalitluses:

1. Võimenditalitluses (aktiivtalitluses) on emittersiire avatud (takistus väike) ja kollektorsiire suletud (takistus suur).
2. Sulgetalitluses on peale kollektorsiirde ka emittersiire suletud, s.t. mõlemal siirdel on vastupinge.
3. Küllastustalitluses on mõlemad siirded avatud. Baasivool võib tugevuselt muutuda võrreldavaks emitterivooluga. Küllastus tekib, kui pinge kollektoril muutub npn-transistoris baasi suhtes negatiivseks; seejuures emitteri suhtes võib ta olla veel positiivne.

Talitusviisi kindlaksmääramisel tuleb arvestada pn- siirde iseärasust, et siire jääb suletuks päripingel, mis on germaaniumi korral alla 0,15...0,2 V, ränisiirdel alla 0,5...0,6 V ja galliumarseniidi korral alla 1,3...1,4 V. Seega tuleb emittersiirde avamiseks rakendada sellele npn- struktuuriga Ge- transistoris pinge vähemalt 0,2...0,3 V, Si- transistoris +0,6...+0,7 V ja GaAs- transistoris 1,4...1,5 V. Selleks, et

kollektorsiire jääks suletuks, s.t. eitekiiks küllastust, peab ÜE- lülituses npn- transistori kollektori ja emitteri vaheline vastupinge olema vähemalt +0,5...+2,5 V.

Transistori kui põhimõtteliselt sümmeetrilise struktuuriga seadist on peale normaallülituse aktiivtalitluse põhimõtteliselt kasutada ka *inversioonaktiivtalitluses*, mispuhul emitteri ja kollektori kohad on vahetatud (emittersiire vastu- ja kollektorsiire päripingestatud). Tegelikult tuleb arvestada emitteri ja kollektori erisugust pindala ning legeritust.

Praktikas kasutatakse transistori *võimenditalitluses* ning *lülititalitluses*. Nõrga signaali võimendamisel asub transistori tööpunkt tunnusoonte lineaarses osas, s.o. võimenduspiirkonnas (joonis 3.21), tugeva signaali, samuti impulss-signaali võimendamisel võimendus- ja ka sulgepiirkonnas. Lülititalitluse korral töötab transistor kõigis kolmes piirkonnas, kusjuures tööpunkt püsib kestvamalt sulge- või küllastuspiirkonnas ja ainult üleminekul ühest piirkonnast teise läbib aktiivpiirkonna.

Nõrga signaali talitluses iseloomustab transistori tööd *diferentsiaalne vooluvõimendustegur*:

$$\beta = \frac{\Delta I_K}{\Delta I_B},$$

Tugeva signaali talitluses aga iseloomustab transistori tööd *integraalne vooluvõimendustegur*:

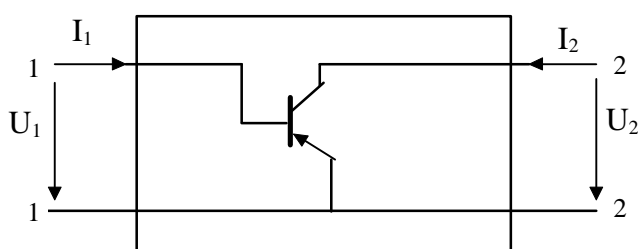
$$B = \frac{I_K - I_{KB0}}{I_B - I_{KB0}} \approx \frac{I_K}{I_B}.$$

Transistori viimiseks küllastustalitluse tuleb baasivoolu suurendada 1,5...3 korda üle kriitilise. Kehtib seos:

$$I_{Bkr} = \frac{I_{Kkk}}{B},$$

kus I_{Kkk} on küllastusvool.

Praktikas kasutatakse transistori parameetrite määramiseks tavaliselt kaudseid meetodeid, mille aluseks on transistori asendamine neliklemmiga (joonis 3.22).



Joonis 3.22. ÜE- lülituses transistor-neliklemm.

Üldjuhul on transistori tunnusooned mittelineaarsed ning sisend- ja väljundsuuruste suhete iseloomustamiseks võib kasutada lineaarseid diferentsiaalvõrrandeid vaid juhul kui signaalide muutused on väikesed. Siit tulenevalt nimetatakse neid *nõrga signaali parameetriteks*. Süsteemi kus sõltumatuteks parameetriteks on sisendvool ja

väljundpinge nimetatakse *hübriid* ehk *H- parameetriteks* (mõõdetakse madalatel sagedustel 50...1000 Hz). Transistori H- parameetrid leitakse järgmistest neliklemmi avaldistest:

$$\begin{aligned}U_1 &= H_{11}I_1 + H_{12}U_2 \\I_2 &= H_{21}I_1 + H_{22}U_2 ,\end{aligned}$$

Avaldame H_{11} , H_{12} , H_{21} ja H_{22} :

$$\begin{aligned}H_{11} &= \frac{U_1}{I_1} - \text{sisendtakistus,} \\H_{12} &= \frac{U_1}{U_2} - \text{pingetagasisidetegur,} \\H_{21} &= \frac{I_2}{I_1} - \text{vooluülekanDETegur,} \\H_{22} &= \frac{I_2}{U_2} - \text{väljundjuhtivus.}\end{aligned}$$

Analoogiliselt leitakse ka takistus ehk *Z- parameetrid* ja juhtivus ehk *Y- parameetrid*:

$$\begin{aligned}U_1 &= Z_{11}I_1 + Z_{12}I_2 \\U_2 &= Z_{21}I_1 + Z_{22}I_2 , \\I_1 &= Y_{11}U_1 + Y_{12}U_2 \\I_2 &= Y_{21}U_1 + Y_{22}U_2 .\end{aligned}$$

Sõltuvalt kasutusalasast toodetakse järgmist tüüpi transistore:

- Madalsagedustransistorid (MS-nõrga signaali ja -jõustransistorid)
- Kõrgsagedustransistorid (KS-transistorid väikestele ja keskmistele võimsustele – lairibavõimenditesse, saatjatesse jne)
- Ülikõrgsagedustransistorid
- Lülitustransistorid
- Kõrgepingetransistorid
- Ühesiidetransistorid (kahe baasiga diodid)

Bipolaartransistoride olulisemad kataloogiandmed on järgmised:

Piirparameetrid:

1. P_C - kollektori suurim lubatud hajuvõimsus.
2. U_{CER} - suurim lubatav kollektoripinge.
3. U_{CB0} - kollektori ja baasi vaheline suurim lubatav vastupinge.
4. U_{EB0} - emitteri ja baasi vaheline suurim lubatav vastupinge (tavaliselt 3...5 V).

5. I_{cmax} - suurim lubatav kollektorivool.
6. I_{CM} - suurim lubatav kollektorimpulssvool.

Jääkvoolud:

1. I_{CB0} - kollektori vastuvool.
2. I_{CE0} - kollektoriahela läbivool (kollektorivool etteantud kollektoripingel katkestatud baasiahela korral).
3. I_{CER} - kollektori ja emitteri vaheline vastuvool (kollektoriahela vool etteantud kollektoripingel kui baasi ja emitteri vahel on etteantud väärtusega takistus).

Võimendusparameetrid:

1. β , h_{21e} või h_{fe} - vooluvõimendustegur.
2. h_{21E} , B või H_{FE} - staatiline vooluülekanalitegur.
3. g_m või y_{21} - läbijuhtivus (väljundvoolu ja sisendpingemuutuse suhe, mA/V).
4. G_p - võimsusvõimendustegur.
5. P_{out} - väljundvõimsus.
6. F - mürategur.

Lülitalitluse parameetrid:

1. U_{BEsat} - baasi ja emitteri vaheline küllastuspinge.
2. U_{CEsat} - kollektori ja emitteri vaheline küllastuspinge.
3. r_{CEsat} - küllastustakistus ($r_{CEsat} = U_{CEsat}/I_C$).

Siirde mahtuvused:

1. C_C - kollektorsiirde mahtuvus.
2. C_E - emittersiirde mahtuvus.
3. τ_C - kollektori tagasisideahela ajakonstant (võrdeline kollektorsiirde mahtuvusega).

Transistoride markeerimisel kasutatakse tähtede ja numbrite kombinatsioone. Levinumad tähistussüsteemid on Euroopa süsteem *Pro Electron*, USA süsteem *JEDEC*, Jaapani süsteem *JIS-C-7012* ja *Vene süsteem*. Täpsem teave transistoride markeerimise kohta on kasutatud kirjanduses [].

3.9 Väljatransistorid

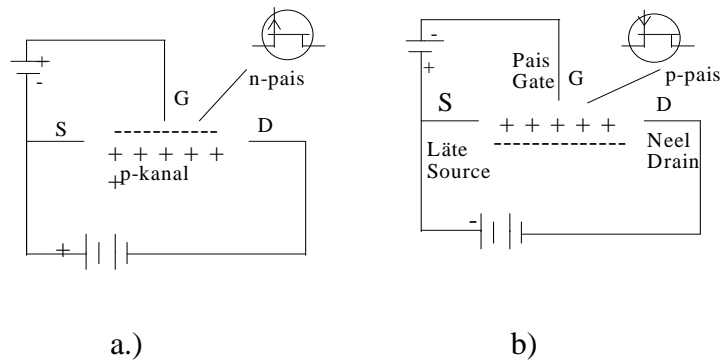
Väljatransistoris tekitab sisendpinge elektrivälja, millega saab mõjutada juhtivat kanalit läbivate ühenimeliste laengukandjate - elektronide või aukude voogu. Juhtiva kanali otstes on elektrodid; neist ühte mille kaudu laengukandjad sisenevad kanalisse nimetatakse *lätteks (source)* ja teist mille kaudu laengukandjad väljuvad kanalist nimetatakse *neeluks (drain)*. Tüüreelektroodi nimetatakse *paisuks (gate)*.

Väljatransistorid on pooljuht-võimenduselemendid, mida erinevalt bipolaar-transistoridest tüüritakse pinge abil. Enamlevinud väljatransistoride tüübid on:

1. pn- väljatransistorid.

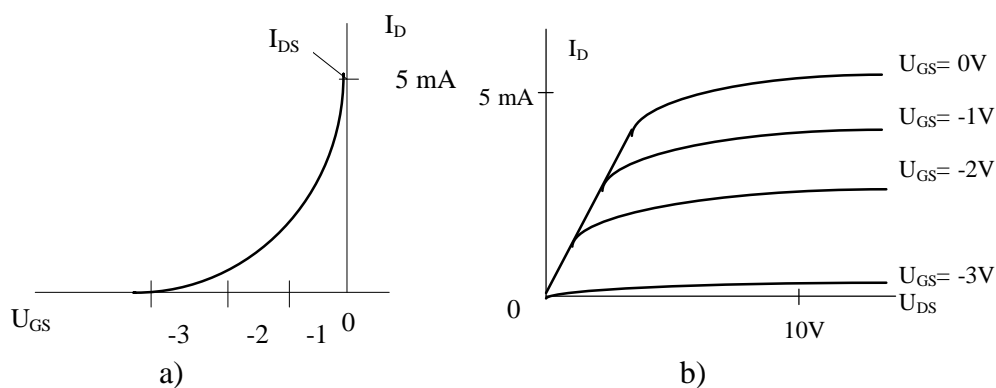
2. MOP-(MOS-)väljatransistorid.
3. Formeeritud kanaliga väljatransistorid (*depletion MOSFET*).
4. Indutseeritava kanaliga MOSFET-väljatransistorid.
5. MOSFET - jõutransistorid.

Järgnevalt vaatleme mõnede väljatransistori tüüpide struktuuri, pingevoolu tunnusjooni ja kasutusala. pn- väljatransistore toodetakse p- või n- kanaliga. pn-väljatransistoride struktuurid on toodud joonisel 3.23.



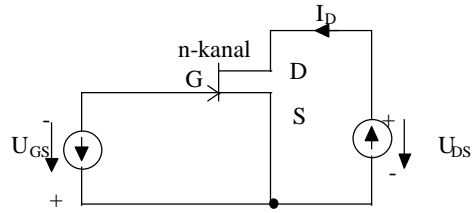
Joonis 3.23. n- kanaliga a) ja p- kanaliga b) väljatransistor.

Kanali moodustab p- või n-juhtivusega kristall, mille otses on läte ja neelu elektroodid. Kanali peale on moodustatud teistpidise juhtivusega ala ehk pais. Kanali ja paisu vahel on pn-siire mille laius kasvab koos rakendatava vastupingega. Kanal on valmistatud väga õhuke (μm ala). Siirde laienemisel kanalis kanalivoolu läbilaskev ristlõige väheneb. Vastupingestatud siirde pingega saab seega neeluvoolu reguleerida. Teatud paisupingel $R_{\text{kanal}} \rightarrow \infty$. See vastab sulgepingele. pn-väljatransistori ei saa tüürida päripingega, sest päripingestatud siirde laiuse sõltuvus pingest on tühine. n-kanaliga pn-väljatransistori ülekandetunnusjoon ja väljundtunnusjooned on kujutatud joonisel 3.24.



Joonis 3.24. pn- väljatransistori ülekandetunnusjoon a) ja väljundtunnusjooned b).

Jooniselt on näha, et väljatransistoride ja bipolaartransistoride tunnusjooned on sarnased. Lülitus pn-väljatransistori tunnusjoonte mõõtmiseks on kujutatud joonisel 3.25.



Joonis 3.25. Lülitus n-kanaliga pn-väljatransistori tunnusjoonte mõõtmiseks.

pn- ja MOSFET väljatransistoride ülekanDETUNNUSJOONE VÕRRAND, kui $U_{GS} > U_P$:

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

ÜlekanDETUNNUSJOONE TÕUS:

$$S = \left. \frac{\partial I_D}{\partial U_{GS}} \right|_{U_{GS} = \text{const.}} \Rightarrow S = \frac{2I_{DS}}{U_P^2} (U_{GS} - U_P) = \frac{2\sqrt{I_{DS} - I_D}}{|U_P|}$$

Kui $I_D = I_{DS}$, siis

$$S_S = \frac{2I_{DS}}{|U_P|}$$

Alas $U_{DS} < U_k$

$$I_D = I_{DS} [2(U_{GS} - U_P)U_{DS} - U_{DS}^2]$$

Diferentsiaalne väljundtakistus:

$$r_{DS} = \frac{\partial U_{DS}}{\partial I_D}, \quad U_{GS} = \text{const.}$$

Diferentsiaalne väljundtakistus väheneb neeluvoolu I_D kasvades $r_{DS} \approx \frac{1}{\sqrt{I_D}}$.

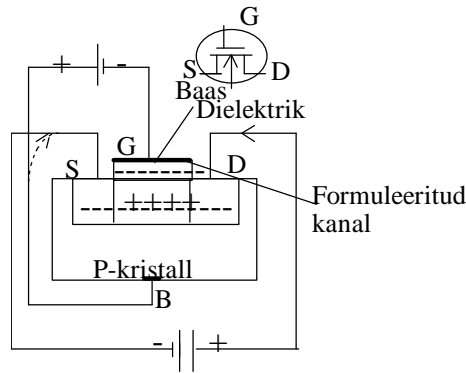
Maksimaalne võimendus: $\mu = S r_{DS} \quad \mu_{(FET)} = 50 \dots 300$.

Diferentsiaalse väljundtakistuse sõltuvus voolust:

$$r_{DS} = \frac{\mu}{S} = \frac{\mu |U_P|}{2\sqrt{I_{DS}}} \cdot \frac{1}{\sqrt{I_D}}$$

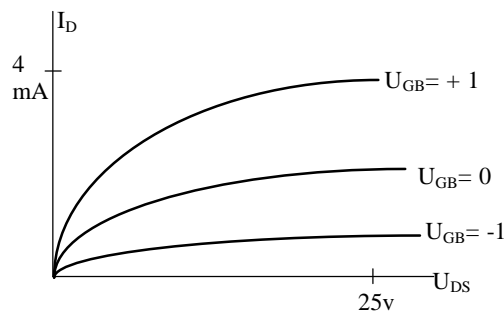
pn- väljatransistore kasutatakse analoog- integraalskeemides, võimendites ning satelliitside süsteemides.

Formeeritud kanaliga väljatransistori baaskristalli on tekitatud õhuke vastandjuhtivusega ala (joonis 3.26) ja sellesse tugevamini legeritud alad, millega ühendatakse S ja D väljastused.



Joonis 3.26. Formeerkanaliga väljatransistor

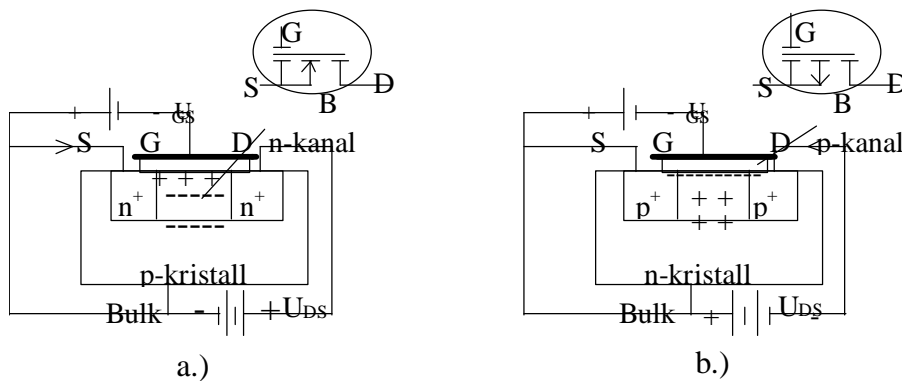
Kanali pinnale on kasvatatud ca 0,1 μm paksune SiO_2 (ränidioksiidi) dielektrikiht ja sellele metallist paisukiht. Kui paisu G ja substraadi (baasi) vahele rakendada negatiivne pinge, siis tõugatakse laengukandjad (elektronid) kanalist välja ja vastavalt suureneb kanalitakistus. Tekib nn. *vaesestustalitlus*. Positiivse U_{GB} korral tõmmatakse kanalisse elektrone juurde ja kanalitakistus väheneb. See on *rikastustalitlus*. Formeeritud n-kanaliga MOSFET-i väljundtunnusjooned on joonisel 3.27.



Joonis 3.27. Formeeritud n-kanaliga MOSFET-transistori väljund-tunnusjooned

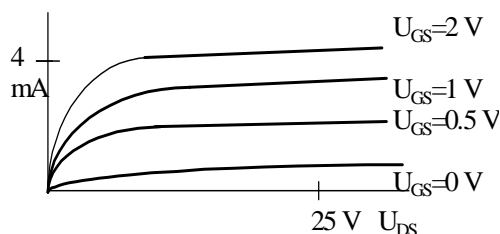
Formeeritud kanaliga MOSFET- transistore kasutatakse digitaal-integraallülitustes ja kõrgsagedusvõimendites.

Järgnevalt vaatleme indutseeritava kanaliga MOSFET- transistoride struktuure (joonis 3.28).



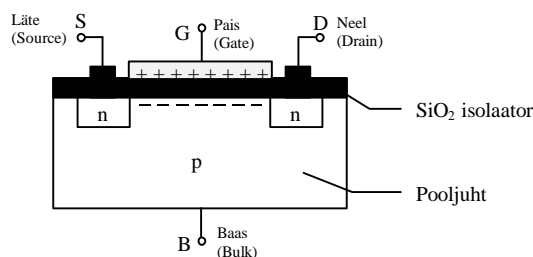
Joonis 3.28. n-kanaliga a) ja p-kanaliga b) indutseeritava kanaliga MOSFET

Kõrgleegeritud lätte ja neelu osa vahel puudub kanal. Kui n-kanaliga MOSFET-i paisu ja lätte vahele rakendada positiivne pinge, mis ületab lävipinged, rikastub n-kanaliga MOSFET-i kristall elektronidega, s.t. tekib rikastustalitus. Vaesestumistalitluses ei ole töö võimalik. Enamasti kasutatakse n-kanaliga MOSFET-transistore. Indutseeritava kanaliga MOSFET-i väljundkarakteristik on kujutatud joonisel 3.29.



Joonis 3.29. Indutseeritava n-kanaliga kanaliga MOSFET-i väljundtunnusjooned

Indutseeritava n-kanaliga MOSFET-i põhimõtteline ehitus on näidatud joonisel 3.30.



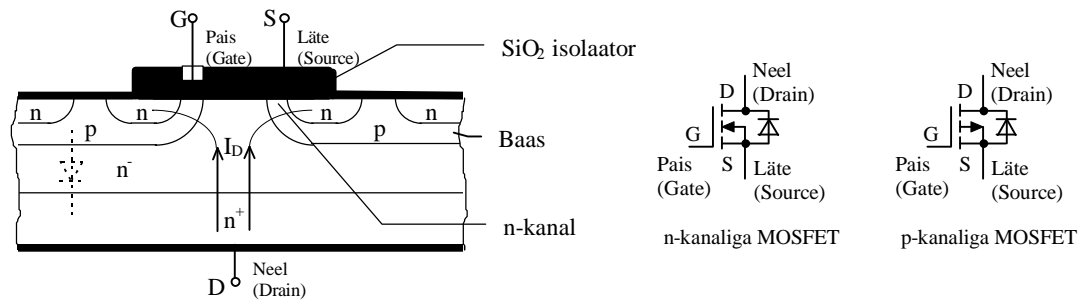
Joonis 3.30. Indutseeritava n-kanaliga MOSFET-i ehitus

Kihid toimivad nagu kondensaator, kusjuures paisu (*gate*) metall ja p-legeeritud pooljuht vastavad kondensaatori plaatidele ning SiO_2 isolaator dielektrikule. Kui paisu G ja baasi B vahele rakendada positiivne pinge U_{GB} , siis kondensaatori plaadid laaduvad, st. paisupoolsel baasi pinnal tekib negatiivsete laengukandjatega rikastatud kiht. Seda laengukandjate kihti nimetatakse n-kanaliks või inversioonikihiks, mille ulatus baasis sõltub pinge U_{GB} suurusest.

Kui neelu D (*drain*) ja lätte S (*source*) vahele rakendada pinge U_{DS} , siis liiguvad negatiivsed laengukandjad horisontaalselt elektrivälja suunas ja ujutavad suletud pn-siirde üle. Seejuures võib U_{DS} joonisel 3.30 kujutatud sümmeetrilise ehituse korral olla nii positiivne kui negatiivne. Vool I_D , mis võib neelu ja lätte vahel voolata, on seda suurem, mida sügavamale baasi kanal ulatub. See vool on juhitud pingega U_{GB} .

Jõu-MOSFET-i struktuur erineb joonisel 3.30. toodust. Neil on sümmeetriline struktuur ning nad koosnevad paljudest rööplülites rakkudest, kus voolusuund on vertikaalne. Jõu-MOSFET-i struktuuriosa näide on toodud joonisel 3.31. Selline mitesümmeetriline MOSFET töötab ainult positiivsel pingel U_{DS} , sest vastasel korral päripingestub pn-siire lätte S ja neelu D vahel. **Seega ei talu MOSFET-transistor vastupinget lättelt neelule**, mis enamiku jõuelektroonika rakenduste puhul pole ka vajalik. Alalispingemuundurite ja pingevaheldite korral on juhtivus vastassuunas

tingimata vajalik. Seetõttu on selline ehitus väga otstarbekas. Vastuhood teostatakse MOSFET-i valmistamisel sageli samas kristallis kiiretoimelise lülitusdiodina.



Joonis 3.31. Jõu-MOSFET-i kristallisegment (vasakul) ja tingmärgid (paremal)

Jõu- MOSFET-il puudub eraldi väljatoodud baasiklemm. Juhtimine toimub seega pinge U_{GB} asemel pingega U_{GS} , mis mõjutab suure hulga rööpsete n-kanalite juhtivust. Vool kulgeb läteelektroodi lähedal ja paisu G elektroodide all horisontaalselt, neelu D lähedal aga vertikaalselt.

Suur lubatav päripinge saavutatakse nõrgalt legeeritud n^- - kihiga. Suurel pingel laieneb ruumilaeng sellesse kihti vähendades elektrivälja tugevust pooljuhis. Nõrgalt legeeritud kihi suurem takistus kompenseeritakse suure arvu kanalite rööpühendusega. Paremaste MOSFET-transistoride kanalitakistus R_{DS} on mõne $m\Omega$ suurusjärgus. Transistoride kanalitakistus on lubatava päripingega seotud järgnevalt:

$$R_{DSon} \sim U_{DSmax}^{2,5}$$

Pingetel kuni 100 V on kanalitakistus võrreldav teiste juhitavate pooljuhtide vastava parameetriga, kuid suurematel lubatavatel pingetel osutub kanalitakistus palju suuremaks. Näiteks 1000 V MOSFET-i kanalitakistus on juba $0,5 \Omega$ suurusjärgus, mis on mitu korda suurem kui näiteks vastavatel IGBT-transistoridel. Samapalju on suuremad ka kaod juhtivas olekus. Kadu juhtivas olekus:

$$P = I_{DM}^2 R_{DSon}$$

Seetõttu kasutatakse MOSFET-jõutransistore kõrgetel pingetel ainult siis, kui nõutav on väga suur lülitussagedus.

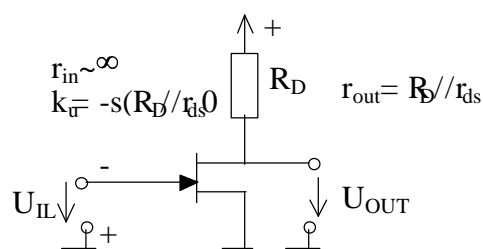
Üheks MOSFET-jõutransistoride omapäraks on kanalitakistuse positiivne temperatuuritegur, mis parandab nende paralleeltöö stabiilsust ja ülekoormuskindlust. Seetõttu on ka tarvidus RC-ahelate (snubberite) järele väiksem. Väikseid RC-ahelaid kasutatakse ainult MOSFET-jõutransistoride kaitseks liigpingete ja pingeresonantside eest induktiivsete ahelate väljalülitamisel. RC-ahelaid kasutatakse ka kõrgetel lülitussagedustel transistori koormuse vähendamiseks.

Väljatransistoridel on väga kõrge piirsagedus. Lülitusajad on ca 10 korda väiksemad analoogiliste bipolaartransistoride omadest. Seega sobivad nad eriti kiireteks

lülititeks, kuid tuleb arvestada nende suhteliselt suurte mahtuvustega. Väljatransistoridel puudub 2. järku läbilöög, mis esineb bipolaarsetel transistoridel madala baasivoolu ja kõrge U_{CE} korral. **Väljatransistoride iseärasuseks on see, et maksimaalselt lubatavat paisupinget ei tohi ületada. Muidu lööb õhuke paisudielektriku kiht läbi ja transistor rikneb. Eriti ohtlikud on staatilised laengud, mis võivad transistori ainult puudutamisel läbi lüüa. MOSFET-ide monteerimisel tuleb seetõttu maandada nii iseennast kui ka töölaud, seade ja jootekolb.** Transpordiks kasutatakse ainult antistaatilisi kilekotte või metalset taarat; transistori jalad pistetakse voolu juhtivasse vahtplasti. Mõningatel MOSFET-idel on paisukaitse sisse ehitatud Z-diod (stabilitron).

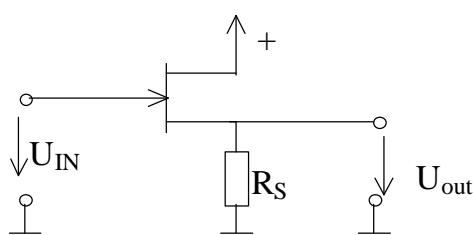
Väljatransistoridel eristatakse kolme ühendusviisi: *ühislätte* ($\dot{U}L$)-, *ühisneelu* ($\dot{U}N$)- ja *ühispaisu* ($\dot{U}P$) lülitust.

Neid ühendusviise kasutatakse olenevalt sellest, milline elektrood on ühendatud konstantse potentsiaaliga. Ühise lättega lülitus vastab bipolaartransistori ühise emitteriga lülitusele. Erinevus seisneb vaid selles, et paisusiire töötab tõkke suunas ja sisendtakistus on väga suur. Ühise lättega lülitus on näidatud joonisel 3.32.

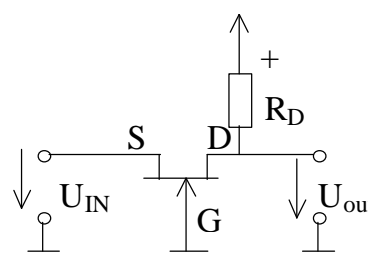


Joonis 3.33. Ühise lättega lülitus

Ühise neeluga lülitus vastab bipolaartransistori ühise kollektoriga lülitusele ning ühise paisuga lülitus ühise baasiga lülitusele. Lülitused on kujutatud joonistel 3.33 ja 3.34.



Joonis 3.33. Ühise neeluga lülitus



Joonis 3.34. Ühise paisuga lülitus

Väljatransistoride ja bipolaartransistoride piirparameerid on sarnased. Tuleb teha asendused $B \rightarrow G$, $S \rightarrow E$, $D \rightarrow C$:

- U_{DSmax} , V ;
- I_{dmax} , A ;
- U_{GSmax} , V ;
- P_{max} , W ;

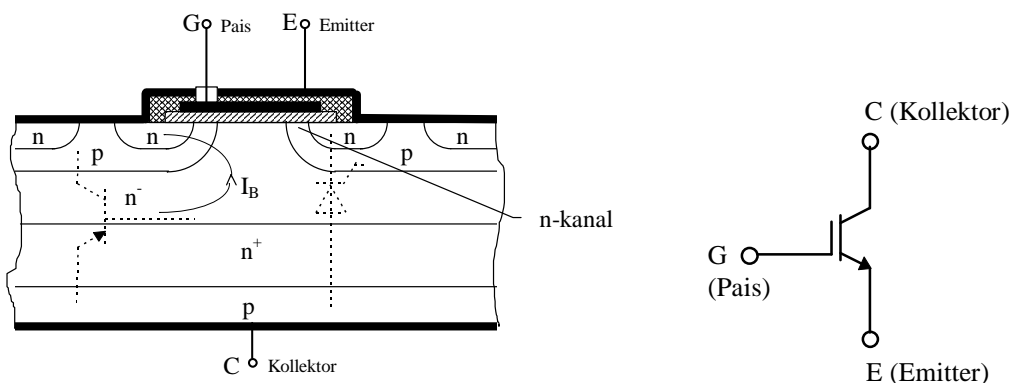
- U_p, V ;
- I_{DS}, A ;
- S_s, A (maks. tõus);
- I_{gmax}, nA (sulgevool);
- I_{dmax}, nA (sulgevool);
- C_{GS}, pF ;
- C_{DS}, pF ;
- f_{max} (piirsagedus, MHz) ;
- t_{on}, ns (ps) ;
- t_{off}, ns (ps) .

Väljatransistoride markeerimisel kasutatakse samu tähistussüsteeme nagu bipolaartransistoride puhul ning kasutusel on samuti tähtede ja numbrite kombinatsioonid [].

3.10 IGBT-jõutransistor

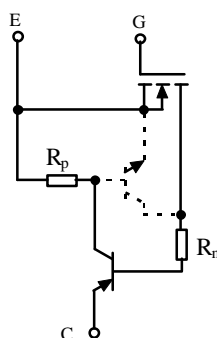
Isoleeritud paisuga bipolaar- ehk IGBT-transistor (*Insulated Gate Bipolar Transistor*) ühendab bipolaar- ja väljatransistori positiivsed omadused. Tal on madal küllastuspinge ja väikesed kaod juhtivas olekus ning ta on pingega juhitav. Lühise suhtes on IGBT vähem tundlik kui bipolaartransistor. Sarnaselt MOSFET-iga on ta väga kiire jõupooljuht, sest viivitused avamisel ja sulgemisel on väikesed. Maksimaalne lülitussagedus ulatub 50 kHz-ni. Põhilisteks rakendusteks on autonoomsed vaheldid, resonantsvaheldid ja alalispingemuundurid. Pingetel üle 600 V ja sagedustel kuni 20 kHz on IGBT-transistorid tänapäeval MOSFET-jõutransistorid peaaegu kõikjalt välja tõrjunud.

IGBT-transistori struktuuri näide ja tingmärk on kujutatud joonisel 3.35. IGBT struktuur on sarnane MOSFET-jõutransistori struktuuriga (joonis 3.31). Ta koosneb samuti paljudest rööbiti ühendatud rakkudest. IGBT struktuur saadakse, kui MOSFET-i struktuurile lisatakse p-juhtivusega kiht. Selle tulemusel tekib lisa-pnp-transistor, mis vähendab transistori takistust juhtivas olekus. IGBT struktuuris pole enam vastudiodi nagu MOSFET-il. IGBT on seetõttu võimeline taluma ka vastupinget.



Joonis 3.35. IGBT-transistori pooljuhi kristallisegmendi ehitus ja tingmärk
 Väiksem takistus avatud olekus saavutatakse sellega, et vool, mis voolab läbi rööpsete n-kanalite, ei lähe otse neeluelektroodile, vaid toimib nagu pnp-transistori baasivool. Seejuures pole võimendus määratud mitte ainult tekkinud pnp-transistori

vooluvõimendusteguriga, vaid ka n-kihi juhtivuse suurenemisega elektron-auk-plasma mõjul. IGBT-transistori transistor-aseskeemil (joonis 3.36) vastab sellele takistuse R_n vähenemine.



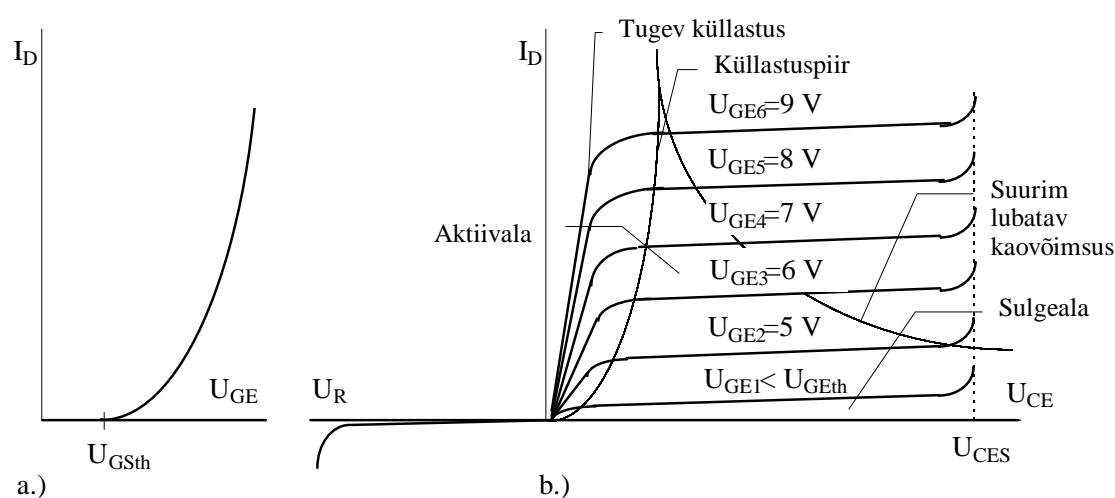
Joonis 3.36. IGBT-transistori aseskeem

IGBT-transistor on loodud ja optimeeritud töötamiseks lülititalitluses ja ta ei sobi lineaarsetesse võimenditesse, kuna väljundtunnusjoone tõus aktiivalas sõltub liiga tugevalt temperatuurist.

IGBT neljakihiline struktuur sisaldab parasiitset türistori, mis võib teatud ebasoodsatel tingimustel (nt. tugev voolutõuge) sisse lülituda ehk lukustuda (*latchup*) ja transistor muutub mittejuhitavaks. Sellises talitluses on transistori kaovõimsus lubamatult suur ning transistor võib rikneda.

Ainuke võimalus parasiittüristori sulgemiseks on voolu vähendamine nii nagu hariliku türistori korral. Parasiittüristori mõju välditakse transistori struktuuri ja geomeetria sobiva valikuga. Kaasaegsetel IGBT-del seda probleemi enam ei esine.

IGBT-transistori sisendtunnusjoon ja väljundtunnusjooned on kujutatud joonisel 3.37.



Joonis 3.37. IGBT-transistori sisendtunnusjoon a) ja väljundtunnusjooned b)

IGBT-transistori tunnusjooned on sarnased MOSFET-transistori tunnusjoontega, kuid mõned IGBT-transistoride tüübid on võimelised taluma ka vastupinget.

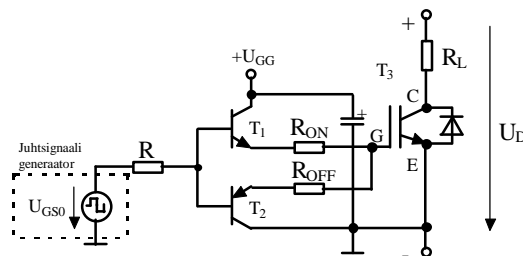
IGBT avamiseks rakendatakse paisule emitteri suhtes positiivne järsu frondiga juhtpinge U_{GE0} . Juhtahela sisetakistuse ja IGBT paisu ja emitteri mahtuvuste tõttu tõuseb tegelik paisupinge U_{GE} aeglasemalt. Kui U_{GE} ületab lävipinge U_{GEth} , siis hakkab tekkima kollektorivool I_C . Ajavahemikku, mis kulub hetkest, kui U_{GE} saavutab 10 % oma lõppväärtusest kuni hetkeni, mil I_C on suurenenud 10 %-ni lõppväärtusest, nimetatakse *avamisviivituseks* t_{don} .

Järgmist ajavahemikku kuni kollektorivoolu suurenemiseni 90 %-ni lõppväärtusest nimetatakse voolu *kasvamiskestuseks* t_r . Selle ajavahemiku jooksul tekib suurem osa avamiskaost. Selleks, et kaovõimsus oleks väike, tuleb juhtahela takistust vähendada. Avamise viivituse t_{don} ja voolu kasvamiskestuse t_r summat nimetatakse avamiskestuseks t_{on} . Kollektorivoolu ülevõnge avamisel on tingitud vastudiodi vastuvoolust.

IGBT sulgemiseks muudetakse juhtpinge U_{GE0} järsult nulliks. U_{GE0} võib muuta ka negatiivseks, kuid see sulgemist enam oluliselt ei kiirenda. Palju tähtsam on juhtahela väike takistus. Kollektorivool I_C hakkab vähenema pärast sulgumisviivituse t_{doff} möödumist. Järgnevalt väheneb I_C voolu kahanemiskestuse t_f jooksul. Sulgumisviivituse t_{doff} ja voolu kahanemiskestuse t_f summat nimetatakse sulgumiskestuseks t_{off} . Kollektori p-kihist sisenevad augud vähendavad IGBT takistust avatud olekus MOS-FET-transistoriga võrreldes. Sulgumisel peavad need laengud transistorist väljuma ja rekombineeruma. Seetõttu ei muutu I_C peale IGBT sulgemist kohe nulliks, vaid säilib nn. sabavool (*tail current*) nagu GTO-türistorilgi. Sabavool tekitab täiendavaid kadusid ja ta on seda suurem, mida madalam on IGBT küllastuspinge. Sabavool sõltub ka temperatuurist.

Lülituskadude vähendamise seisukohalt soovitakse sulgemisel kollektorivoolu võimalikult kiiresti vähendada. Koormuse induktiivsuse ja parasiitinduktiivsuste tõttu võib voolu liiga järsul vähenemisel tekkida transistoril ohtlikult suur pinge, mis võib transistori läbi põletada. Selle vältimiseks kasutatakse induktiivse koormusega rööpseid vabavooludioode, mis võtavad sulgemisel induktiivse voolu enda kanda, või kasutatakse RC-ahelaid. IGBT-transistor ei vaja üldjuhul dünaamiliste koormuste vähendamiseks RC-ahelaid, kuid neid võidakse mõnikord siiski kasutada.

Järgnevalt vaatleme IGBT-transistori lihtsustatud juhtlülitust, mis on kujutatud joonisel 3.38.



Joonis 3.38. IGBT-transistori lihtsustatud juhtlülitus

Juhtlülituses püütakse saavutada võimalikult väike tüürahela takistus. See vähendab mahtuvuste laadumisaegu ja lülituskadusid. Takistused R_{ON} ja R_{OFF} valitakse suurus-

järgus paarkümmend oomi. Konkreetsed soovitused R_{ON} ja R_{OFF} optimaalsete väärtuste valikuks antakse transistori kataloogis.

IGBT siirdeprotsessid sõltuvad otseselt R_{ON} ja R_{OFF} väärtustest ja on nendega küllalt täpselt määratud. Ka muunduri poolt tekitatavaid elektromagnetilisi häireid saab R_{ON} ja R_{OFF} sobiva valikuga vähendada.

IGBT pais on samuti kui MOSFET-il väga tundlik liigpingete suhtes. U_{GE} ei tohi mingil juhul ka mitte lühiajaliselt ületada suurimat lubatavat väärtust, milleks on enamasti ca 20 V. Paisu kaitstakse liigpingete eest kas stabilitronide või varistoridega, mis ühendatakse paisu ja emitteri vahele.

Soovitav on kasutada valmis integraalseid juhtlülitusi (draivereid), mis tagavad siirdeprotsesside parema kvaliteedi, eraldavad galvaaniliselt jõu- ja juhtahelad, kaitsevad lühise ja liigvoolu eest, blokeerivad transistore vastastikku jne. Toodetakse ka sisseehitatud draiveritega jõutransistore ja jõumoduleid.

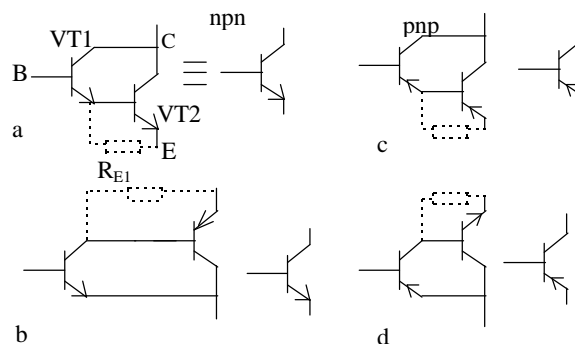
IGBT-transistoride olulisemad kataloogiandmed on järgmised:

V_{CES} - suurim lubatav kollektori ja emitteri vaheline pinge,
 I_C - kestvalt lubatav neelu alalisvool,
 P_{TOT} - lubatav kaovõimsus,
 V_{CESat} - küllastuspinge,
 V_{GES} - paisu ja emitteri vaheline suurim lubatav pinge,
 V_{GEth} - lävipinge,
 R_{thjc} - soojustakistus siirde ja transistori kere kontaktpinna vahel,
 t_{don} - avamisviivitus,
 t_{doff} - sulgemisviivitus,
 t_r - voolu kasvamiskestus avamisel,
 t_f - voolu kahanemiskestus sulgemisel,
 C_{iss} - sisendmahtuvus.

Tuntumad IGBT- transistoride seeriad on S- seeria (omavad lühisekaitset ning võivad lühist taluda 10 μ s jooksul paisu pinge korral 15 V) ja G- seeria (toodetakse lülitustransistoridena sagedustele 50 Hz...80 kHz ning suurtele vooludele ja pingetele).

3.11 Liittransistorid

Liittransistoriks nim. kahe või kolme transistori sellist ühendust, mida saab käsitleda ühe nn. MD-transistorina (MD – *Monolithic Darlington*). Enamlevinud liittransistoride skeemid on näidatud joonisel 3.39.



Joonis 3.39. Liittransistoride skeeme

Jõu- liittransistoridega on võimalik lülitada palju suuremaid voole- ja pingeid kui üksikute transistoridega. Dünaamiliste omaduste poolest jäävad nad aga alla IGBT transistoridele ning lähimas tulevikus kasutatakse jõu- liittransistore üha vähem.

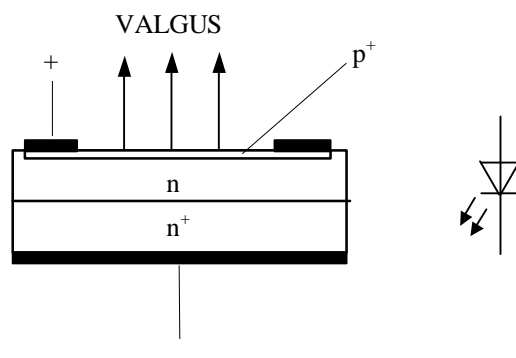
Nõrga signaali talitluses (võimenditalitluses) on võimalik saada liittransistoride abil väga suuri voolu- ja pingevõimendustegureid ning seetõttu kasutatakse neid analoog-integraalskeemides.

Toodetakse ka transistoride *kaskaadlülitusi*. Nad kujutavad endast ühise emitteriga või ühise baasiga transistoristmete jadalülitust, mis annab väga head parameetrid. Kasutatakse ka väljatransistoride kaskaadlülitusi.

4 OPTOELEKTROONIKASEADISED

4.1 Valgusdiodid

Valgusdiod (*LED - Light Emitting Diode*) on pn- siirdega diod, mis muudab elektrienergiat optiliseks kiirguseks tavaliselt spektri nähtavas või infrapunases osas. Teatud ainete kristallis moodustatud pn- siirde (joonis 4.1) päripingestamisel (pluss p-kihil) injekteeruvad augud n-kihti ning elektronid vastassuunas. Need injekteerunud augud ja elektronid rekombineeruvad pn-siirdes ja selle läheduses vastasmärgiliste laengukandjatega ning osa vabanevast energiast eraldub kiirgusena. Kuna p-kiht on kõigest mõne mikromeetri paksune, siis väljub kiirgus kristallist.



Joonis 4.1. Valgusdiodi struktuur ja tingmärk

Kiirguse värvuse määrab pooljuhtmaterjali koostis. Toodetakse ka kahevärvilise kiirgusega valgusdioode. Nendel on tavaliselt kaks eri materjalist siiret ja kolm viiku. Siirdeid läbivate voolude muutmise teel saab siis valida mitmeid värvivarjundeid, näiteks punase ja roheline korral punakaskollasest kollakasroheliseni.

Valgusdioode valmistatakse peamiselt galliumarseniid-fosfiidist (Ga-As-P). Valguse lainepikkuse ala on küllaltki piiratud ning sõltub materjalist. Suurima valgusliku kasuteguriga (1-5%) on infrapunavalgusdioodid. Ülejäänute kasutegur on laias alas proportsionaalne päriooluga. Tavaliselt piisab mõnest mA, et tekitada nähtav valgus. Mõnede eri värvusega valgusdiodide põhiandmed on toodud tabelis 4.1.

Tabel 4.1 Valgusdiodide põhiandmed

Valguse värvus	λ_{\max} , nm	Materjal	U_F , V	I_V , mcd	P_{\max} , μW
Infrapunane	900	GaAs	1,3...1,5	-	50...200
Punane	655	GaAs, GaP	1,6...1,8	1...5	2...10
Punakas-oranž	635	GaAs, GaP	2,0...2,2	5...25	12...60
Kollane	583	GaAs, GaP	2,0...2,2	5...25	13...65
Roheline	563	GaP	2,2...2,4	5...25	14...70
Sinine	490	GaN	3...5	1...4	3...12

Tabelis 4.1 on λ_{\max} valguse lainepikkus, I_V - valgustugevus (mcd - millikandela) ja P_{\max} - suurim valgusvõimsus.

Valguse paremaks suunamiseks on diodil enamasti sfääriline või paraboolne polümeerimaterjalist lääts ning vahel ka nõrgus valgust peegeldav pind. Valgustugevus kasvab alates voolust 1...2 mA enam-vähem võrdeliselt päriooluga.

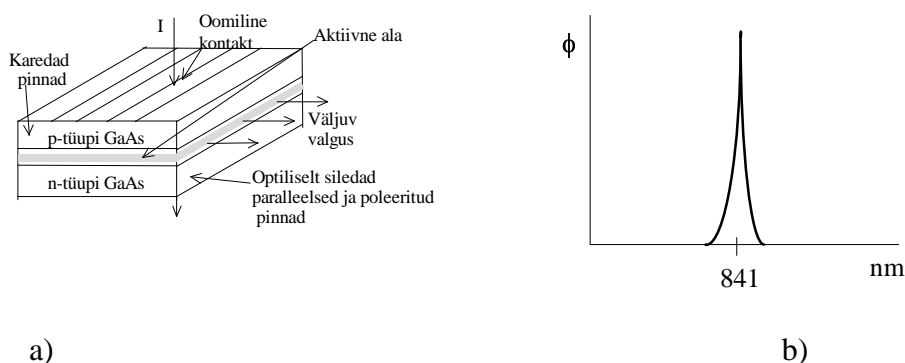
Antud töövooluga võivad valgusdioodid temperatuuril kuni +25°C töötada kestvalt aastaid. Kõrgemal lubataval siirde temperatuuril (enamikul seadistel +70 °C) peab vool olema kaks korda väiksem. **Diiodi asendamisel teisetüübilisega tuleb valida selline eeltakisti, et päriool ei saaks ületada suurimat temale lubatavat voolu, samuti tuleb jälgida polaarsust, sest lubatav vastupinge on sageli madalam päriolingest.** Läbilöögi vältimiseks on otstarbekas ühendada valgusdiodiga vastuparalleelselt ränidiodid.

Valgusdioode toodetakse väga erineva kuju ja sokeldusega, näiteks ümmargusi, ristkülikukujulisi, kolmnurkseid, segmendikujulisi jt. Valgusdioode kasutatakse enamasti valgusindikatsioon-tabloodes.

4.2 Laserdiod

Laserdiodis ehk injektsioonlaseris tekib optiline kiirgus nagu valgusdiodiski elektronide ja aukude rekombineerumisel. Laserdiodis ei toimu see spontaanselt, vaid stimuleeritult (*LASER- Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation* - "valguse võimendus kiirguse stimuleeritud emissiooni kaudu"). Sel juhul tekkinud

kiirgus on *monokromaatne* ja *koherentne* s.t. elektromagnetlainete faaside vahe püsib muutumatuna. Laserdiodi struktuur on näidatud joonisel 4.2.



Joonis 4.2. Laserdiodi struktuur a) ja stimuleeritud kiirguse spektri näide b)

Valguskiirguse tekkimiseks on vaja, et stimuleeritud rekombinatsioonide koos *kvantide* ehk *footonite* eraldumisega toimuks rohkem kui kvantide neeldumisi. Selleks tuleb siirde piirkonnas luua olukord, mispuhul aatomite kõrge energeetiline nivoo-juhtivustsoon- on elektronide poolt hõivatud kui madalam ehk valentstsoon. Selline pöördhõive on kõige lihtsamalt saavutatav laengukandjate intensiivse injeksiooniga heterosiirdesse GaAlAs/GaAs. Selleks on vaja pärivoolu tihedusega vähemalt 5 A siirde ristlõike 1 mm² kohta. Kuna laseri joonmõõtmed siirde tasapinnas on c.a. 0,1 mm, siis kujuneb pöördhõive juba 50 mA vooluga.

Kirjeldatud tingimustel tekibki valguskvante rohkem kui neid neeldub, sest pöördhõive tõttu on valentsvööndi lae lähedal väga vähe elektrone, millele kvandi energia saaks kanduda. Selle tulemusena siirde tasapinnas leviv valguslaine võimeneb (tema amplituud suureneb). Rekombinatsioonide arvu saab suurendada pannes valguskvandid siirde tasapinnas edasi-tagasi liikuma. Selleks moodustatakse *optiline resonator*, lihvides pooljuhi monokristalli kaks otstahku paralleelseteks peegliteks (joonis 4.2, a). Peegeldunud kvandid võivad mitu korda läbida pöördhõivestatud piirkonna, kutsudes esile uute rekombinatsioonide ning seega kvantide tekke. Pärast mitmekordset peegeldumist väljub valguskiir läbi ühe - poolläbipaistva peegli.

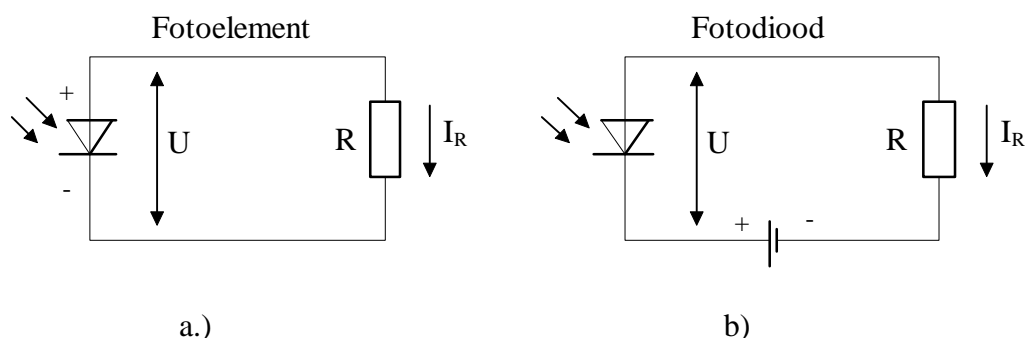
Laserdioode kasutatakse laialdaselt kiudoptikas saatjatena, lasertöötluses, lasersihikutes ja mitmesuguste valgusefektide saamiseks.

4.3 Fotodiod

Fotodiod on fotoelektriline pooljuhtdiod, mille pn- siirde piirkonda langev valgusvoog tekitab seal laengukandjaid (elektron-auk-paare). Siirde elektriväli eraldab tekkinud elektronid ja augud nii, et viimased kogunevad p- kihti, elektronid aga jäävad n- piirkonda. Seetõttu tekib diodi viikude vahel potentsiaalide vahe mida nimetatakse *fotoelektromotoorjõuks*. Seda saab kasutada fotovoolu tekitamiseks diodiga ühendatud koormustakistis R (joonis 4.3, a). Antud juhul töötab diod fotoelemendina. Suurepinnalistest fotoelementidest koostatud n.n. *päikesepatareid* kasutatakse autonoomse elektritoiteallikana.

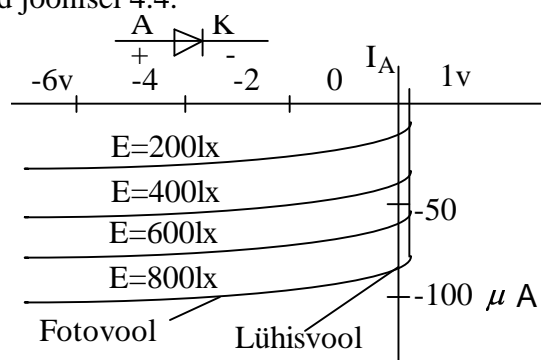
Fotodioode kasutatakse ka koos välise toiteallikaga, mille pinget rakendatakse diodile tõkkesuunas (joonis 4.3, b). Valgustuse puudumisel läbib diodi nõrk vastuvool I_R

(pimevool). Siirde langeva valguse mõjul tema juhtivus suureneb ning vastavalt tugevneb ka teda läbiv üldvool. Vool kasvab seda enam, mida tugevam on valgusvool.



Joonis 4.3. Fotodiiodide lülitusviisid

Kuna fotodiiodi vastuvool kasvab valgustiheduse kasvades, siis on võimalik kasutada teda valgustiheduse mõõtmiseks (luksmeetrid). Fotodiiodi pingevoolu tunnusjoon on toodud joonisel 4.4.

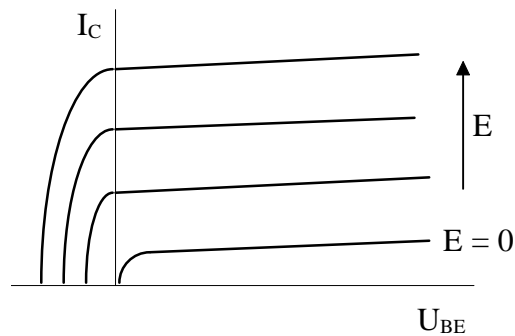


Joonis 4.4. Fotodiiodi pingevoolu tunnusjooned

Fotovoolu võimendamiseks tuleb tema väljundisse ühendada võimendi, milleks reeglina kasutatakse operatsioonivõimendit. Sageli on vajalik võimendi selline lülitus, et ta toimiks voolu-pinge muundurina.

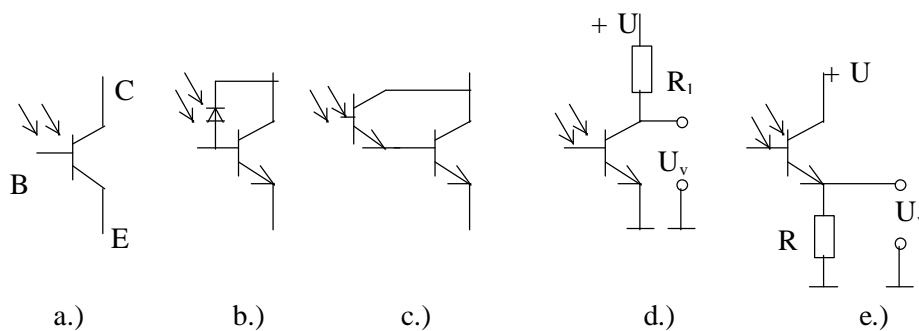
4.4 Fototransistor

Fototransistor on bipolaar- või väljatransistori struktuuriga fotoelektriline seadis, mille väljundvool on tüüritav valgusvooga. Bipolaartransistori poolläbipaistva baasikihi kaudu siirde piirkonda langev valgus suurendab kollektorsirde vastuvoolu. Suurenenud kollektorsirde vool toimib baasivooluna, mistõttu resulteeriv kollektorivool suureneb vooluülekande teguri kordselt. Sellest tulenevalt on fototransistor 50...200 korda fotodiiodist tundlikum. Fototransistori väljundtunnusjooned on näidatud joonisel 4.5.



Joonis 4.5. Fototransistori väljundtunnusjooned

Fototransistori baas võib olla välja toodud või mitte (nn. fotoduodididel). Eriti suurt vooluvõimendust võimaldab nn. *darlington-fototransistor* (*foto-darlington*). Fototransistoride piirsagedus on ca 300 kHz, darlington-fototransistoridel ca 30 kHz. Fototransistori tingmärk, aseskeem, foto-darlington ja fotovastuvõtjate skeemid on toodud joonisel 4.6.



Joonis 4.6. Fototransistori tingmärk a), aseskeem b), foto-darlington c) ja fotovastuvõtjate skeemid d), e)

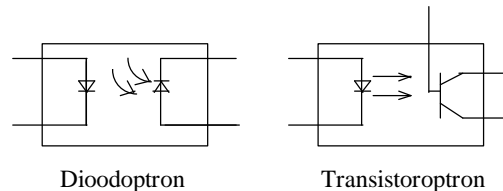
4.5 Fototüristor

Fototüristor (*LTT - Light Triggered Thyristor*) erineb türistorist selle poolest, et tüürvooluna toimib fotovool, mis tekib türistori baasides neelduva valguse toimetel. Suletud türistori anodi ja katodi vaheline takistus on ligikaudu 100 megaoomi ning türistori avanemisel väheneb see kuni 0,1 oomini. Ümberlülituskestus on vahemikus 0,1...1 μ s. Fototüristor võimaldab lülitada nõrga valgussignaali abil tugeva voolu ja kõrge pingega elektriahelaid.

4.6 Optron

Optroniks ehk optopaariks nim. valgusdiodi ja *fotovastuvõtja* (fototakisti, fotodiod, fototransistor, fototüristor) kombinatsiooni, mis võimaldab sisendvoolu muuta mistahes potentsiaalil asuvaks väljundvooluks. Optronis on kiirusallikas optiliselt sidestatud fotovastuvõtjaga. Optiline keskkond on isoleermaterjalist (optiline liim, klaas, vilk jm), mille murdumisnäitaja läheneb valgusdiodi omale, et vähendada peegeldumiskadu. Optron võib kuuluda ka integraallülituse koosseisu. Kiirusallikaks on reeglina infrapunases alas kiirgav valgusdiod. Fotovastuvõtjatena kasutatakse peale eelnimetatute ka ühesiirde- ja MOP- transistore, fotovarikappe jm.

Optronite põhiomadus seisneb selles, et nende väljund on sisendist elektriliselt eraldatud (isolatsioonitakistus sadades gigaoomides ning läbivmahtuvus ca. 1 pF). Seetõttu kasutatakse oprone peamiselt elektriahelate galvaaniliseks lahtisidestamiseks (galvaaniliseks eraldamiseks). Oproneid kasutatakse ka kontaktivabade lülititena ja anduritena (peegeloptronid). Diod- ja transistoroptroni skeemid on toodud joonisel 4.7.



Joonis 4.7. Optronite skeeme

Oproneid kasutatakse nii analoog- kui ka digitaalsignaali ülekandmiseks. Analoogsignaali puhul kasutatakse nn. *lineaarseid oproneid*, mille ülekandetegur $\alpha = I_V / I_S = \text{const}$. Digitaalsignaali ülekandmisel pole lineaarsus tingimata vajalik. Erinevate opronite võrdlus on toodud tabelis 4.2.

Tabel 4.2 Optronite võrdlus

Vastuvõtja	Ülekandetegur $\alpha = I_V / I_S$	Piirsagedus
Fotodiod	ca 0,1 %	10 MHz
Fototransistor	10...300 %	300 kHz
Foto-liittransistor	100...1000 %	30 kHz

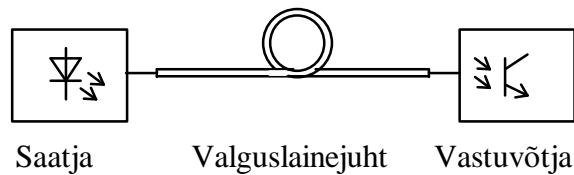
Türistoroptronid võimaldavad kontaktivabalt lülitada amplitesse ulatuva vooluga ahelaid, kusjuures kommuteeritav võimsus ületab tüürvõimsuse miljoneid kordi. Ümberlülitamiskiirus on seejuures 1...50 μs . Lülitina kasutatakse ka diod- ja transistoroptrone. Diodoptronis võib fotodiod töötada ka *fotogeneraatorina*, tekitades elektromotoorjõudu kuni 0,8 V.

Fototakistiga oproneid iseloomustab pingevoolu tunnusjoone hea lineaarsus ja madal müratase. Nende väljundtakistust saab sisendahela abil muuta kuni saja miljoni kordselt. Puuduseks on väike toimekiirus (0,01...1 s) ja parameetrite suur temperatuurisõltuvus.

Tähtsaimad opronitootjad on *Helwett-Packard*, *Motorola*, *Siemens Litronics*, *AEG-Telefunken*, *Clairex* ja *TRW-optron*.

4.7 Kiudoptika

Kiudoptika on teaduse ja tehnika haru, mis uurib valguse levimist peentes kiududes. Kiudoptika seadiseid kasutatakse peamiselt informatsiooni optiliseks ülekandeks nii analoog- kui digitaalsignaali näol. Lihtsaima kiudoptilise infoedastus-süsteemi saame, kui valguslainetuhi ühte otsa ühendame saatja ja teise vastuvõtja (joonis 4.8).



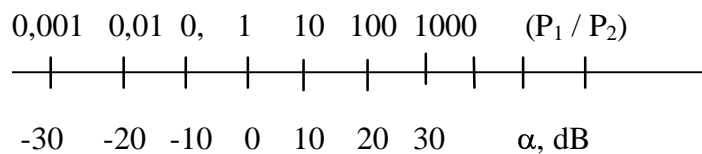
Joonis 4.8 Kiudoptiline infoedastussüsteem

Spetsiaalsest valgusjuhist kiudu siseneb saatjapoolses otsas valguskiir, mis langedes suure nurga all kiu seinale, peegeldub täielikult ja pärast mitmekordseid peegeldumisi väljub kiu vastuvõtjapoolsest otsast mõnevõrra väiksema intensiivsusega. Valguse neeldumist valgusjuhis iseloomustab sumbuvus:

$$\alpha = 10 \log (P_1 / P_2), \text{ dB},$$

kus P_1 on sisendvõimsus ja P_2 väljundvõimsus.

Sumbuvuse skaala seos sisend- ja väljundvõimsuse suhtega on toodud joonisel 4.9.



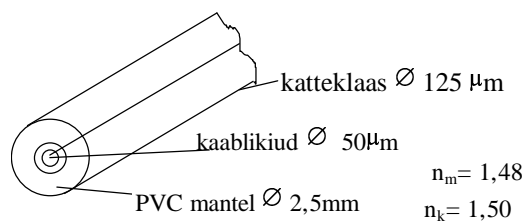
Joonis 4.9. Sumbuvuse skaala.

Tabelis 4.3 on toodud mõningate keskkondade sumbuvestegurid.

Tabel 4.3. Keskkondade sumbuvestegurid.

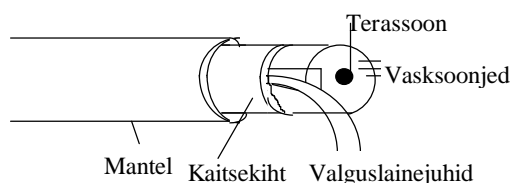
Keskkond	Sumbuvus, dB/km	Sumbuvusele 30 dB vastav vahemaa, m
Aknaklaas	50 000	0,6
Optiline klaas	3 000	10
Tihe udu	500	60
Linnaõhk	10	3 000
Valgusjuht		
$\lambda = 0,85 \mu\text{m}$	3	10 000
$\lambda = 1,55 \mu\text{m}$	0,3	100 000

Valguse neeldumise vähendamiseks valmistatakse valguslainejuht kahekihilisena. Sisemist suure murdumisnäitajaga kihti ümbritseb väiksema murdumisnäitajaga kattekiht. Kiu läbimõõt on mõnest mikromeetrist pikemate vahemaade korral kuni mõne millimeetrini lähiülekande korral. Valguslainejuht ümbritsetakse täiendavalt plastmantliga. Valguslainejuhi ehitus on kujutatud joonisel 4.10.



Joonis 4.10. Valguslainejuhi ehitus.

Sidesüsteemides kasutatakse valguskaableid, mis sisaldavad mitmeid valguslainejuhte, terasest tugevdussoont, mitmes. vaskjuhte ja on kaitstud kaitsekatete ja soomusega. Valguskaabli ehituse näide on kujutatud joonisel 4.11.



Joonis 4.11. Valguskaabli ehitus.

Valguskaableid valmistatakse nii klaaskiust kui plastikust. Klaaskiud-valguskaablid on harilikult paremad, nende sumbuvus on ca 2-3 dB/km olenevalt lainepikkusest. Plastikablite sumbuvus on 150 - 2000 dB/km. Plastikkiud valmistatakse tavaliselt jämedamad - ca 1 mm läbimõõduga.

Saatja põhiliseks elemendiks on kas valgusdiodid või laserdiodid. Valgusdiodidel põhinevate saatjate maksimaalne töösagedus on ca 100 MHz, laserdiodidel põhinevad saatjad võivad töötada kuni sageduseni ca 10 GHz.

Saatjate põhiprobleemiks on nende mittelineaarsused ja valgusvoo sõltuvus. Saatjate mittelineaarsuse tõttu on kiudoptikas kasutusel peamiselt digitaalmodulatsioon. Ühe biti informatsiooni kindlaks ülekandmiseks valguslainekaabliga vajatakse ca 20 valguskvanti.

Vastuvõtjate põhielemendiks on kas fotodiodid (pin- või *Avalanche* fotodiodid) või fototransistor. pin-fotodiodiga vastuvõtjate maksimaalne töösagedus võib ulatuda 10 GHz-ni. Vastuvõtjate tähtsaim parameeter on tundlikkus (mV/µW).

Kiudoptiliste infoedastussüsteemide võimalustest annavad ülevaate tabelid 4.4 ja 4.5.

Tabel 4.4. Lähi- ja kaugside valguslaine-ülekande võrdlus

	Lähiülekanne	Kaugülekanne
Ülekandekiirus	< 2 Mbit/s	2 Mbit/s ... 1 Gbit/s
Valgusjuht südamikü Ø	>= 200 µm	50 µm
välis Ø	>= 250 µm	125 µm
sumbuvus	10 ... 30 dB/km	< 3 dB/km
Saatja	LED	...34 Mbit/s LED, üle 34 Mbit/s LD

Vastuvõtja	FD	FD või APD
Pistikud ja ühendused	Odavad ja väikeste tolerantsinõuetega	Kallid ja suurte tolerantsinõuetega

Tabel 4.5. Multipleks valguslainejuht-infoedastussüsteemi võimalused

Aste	Ülekandekiirus Mbit/s	Telefonikanalite arv maks. tk	Värviteleviseiooni-kanalite maksimaalne arv, tk
1	2	30	-
2	8	120	-
3	34	480	-
4	140	1920	2
5	565	7680	8
6	2400	30 720	32

5 ELEKTROONIKALÜLITUSED

5.1 Elektroonikalülituste skeemid ja nende lugemine

Elektroonikalülituste koostamine ja elektroonikaseadmete valmistamine ilma skeemita pole mõeldav. Konstrueerimist tuleb alati alustada skeemist, kus on näidatud elementide omavahelised ühendused.

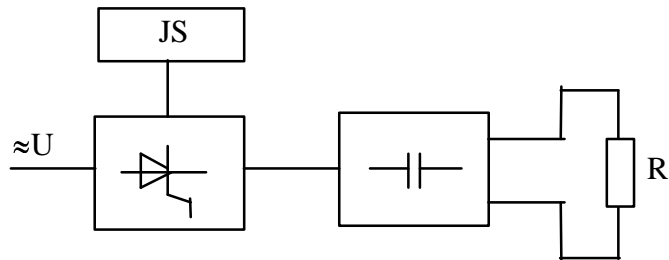
Elektroonikaseadmete skeem on vajalik nii selle valmistamisel, kasutamisel kui ka remontimisel. Ühe ja sama seadme jaoks saab koostada väga erinevaid skeeme. Vastavalt otstarbele liigitatakse elektriskeemid järgmiselt:

1. *Struktuuriskeemid.*
2. *Talitlusskeemid (funktsionaalskeemid).*
3. *Põhimõtteskeemid.*
4. *Montaažiskeemid.*
5. *Välisühenduste skeemid.*
6. *Üldskeemid.*
7. *Paigutusskeemid.*
8. *Kombineeritud skeemid.*

Elektroonikaseadmete valmistamisel osutuvad vajalikuks struktuuriskeem, talitlusskeem, põhimõtteskeem, montaažiskeem ja kombineeritud skeem. Tihti tuleb siiski lähtuda vaid põhimõtteskeemist ja montaažiskeemist või ainult põhimõtteskeemist.

Elektroonikaseadmete projekteerimist alustatakse struktuuriskeemi koostamisest. Seadme osi (astmed, plokid) kujutatakse struktuuriskeemil peamiselt ristkülikutena kuhu sageli märgitakse ka seadme osa põhielemendi tüüp (transistor, türistor, integraalskeem jt) ja selle funktsioon. Kasutatakse ka moodust, kus struktuuriskeemi kujutavad ristkülikud nummerdatakse ja lisatakse selgitavad märkused numbrite kohta. Seadme osi kujutavate ristkülikute asemel on joonestatakse mõnikord ka ringid.

Ristkülikute (astmete, plokkide) vahelisi ühendusi või seoseid kujutatakse struktuuriskeemil joontega. Noolega joon näitab ühe seadme osa mõju teisele. Mehaanilist seost seadme osade vahel tähistatakse tihti kahe joonega. Need seadme osad, mis pidevalt ei tööta ühendatakse tavaliselt punktiirjoonega. Joonisel 5.1 on toodud näitena tüüritava alaldi struktuuriskeem.



Joonis 5.1. Tüüritava alaldi struktuuriskeem

Talitlusskeemid (funktsionaalskeemid) selgitavad seadme tööpõhimõtet ja selles toimuvaid protsesse. Üksikosad ja elemendid võivad olla kujutatud tingmärkidega. Samuti talitlusskeemis nagu struktuuriskeemiski võivad vajalikud seadmed või elemendid olla kujutatud ristkülikutena, (seda siis, kui puudub vastav tingmärk) millesse on märgitud seadme nimetus ja tüüp.

Struktuuriskeemide ja talitlusskeemide alusel ei valmistata elektroonikaseadmeid. Nende abil analüüsitakse elektronseadme tööpõhimõtet. Struktuuriskeemi alusel koostatakse põhimõtteskeem.

Põhimõtteskeemil kujutatakse kõik elemendid, mis on vajalikud ettenähtud elektriliste protsesside või operatsioonide toimumiseks, samuti nende vahelised ühendused. **Kõik elemendid põhimõtteskeemidel kujutatakse tingmärkidega ning lülitusaparaadid näidatakse väljalülitatud olekus.**

Jõuelektronika lülitustel eristatakse *energia-* ehk *jõuahelaid* ja *info-* ehk *juhtahelaid*. **Skeemidel on otstarbekas jõu- ja juhtahelaid eristada joone jämedusega s.t. jõuahelad joonestada jämedama joonega. Jõuahelad joonestatakse skeemi vasakpoolsele või ülemisele osale.**

Eristatakse ka *koondatud* ja *laotatud põhimõtteskeeme*. Koondatud skeemidel kujutatakse elementide koostisosad (näiteks releede mähised ja kontaktid) koos või lähestikku. Laotatud põhimõtteskeemidel on põhinõudeks skeemi selgus ja loetavus. Järjestikku ühendatud osad näidatakse võimalikult ühel sirgel. Vooluringid võivad olla skeemi äärel ka nummerdatud araabia numritega. Üksikelementide eraldamiseks ja nende kokkukuuluvuse näitamiseks kasutatakse tähtedest ja numbritest koosnevaid tähiseid. Skeemid joonestatakse ühe- või mitmejooneskeemidena.

Põhimõtteskeem on hädavajalik elektroonikaseadmete valmistamise kõikidel etappidel - nii konstrueerimisel, monteerimisel, montaaži kontrollimisel kui ka

häälestamisel (seadistamisel). Põhimõtteskeem aga ei iseloomusta elektroonikakomponentide ja -sõlmede kuju ega anna nende mõõtmeid.

Elektroonikaseadmete valmistamisel on otstarbekas arusaamatuste ja vigade vältimiseks projekteerida montaažiskeem. Kaasajal enamlevinud on *triiki-montaažiskeemid*. **Montaažiskeemid annavad üsna täpse ettekujutuse elektroonikaseadme komponentidest, sõlmedest ja nendevahelistest elektrilistest ühendustest.** Montaažiskeemidel võivad olla näidatud ka seadmetevahelised ühendused (välisühenduste skeemid) või seadme komponentidevahelised ühendused (siseühenduste skeemid). **Seadmed või komponendid kujutatakse geomeetriliste kujunditena või tingmärkidena. Komponentide ja osade paigutus ning mõõtmekujutatakse kas ligikaudu või mõõtkavas.** Juhtmed nummerdatakse või varustatakse aadressidega (seadme ja klemmi numbritega, kuhu juhe suundub).

Montaažiskeemile märgitakse tihti ka vastava komponendi elektrilised parameetrid või lisatakse tabelid milles tuuakse ära elektrilised parameetrid.

Kombineeritud skeemidel kujutatakse mitut liiki elemente ja sidemeid (elektrilisi, pneumaatilisi, mehaanilisi jt). Kombineerituks nimetatakse ka skeemi, mis peab täitma mitut otstarvet (näiteks põhimõtteskeemil on vaja näidata välisühendused).

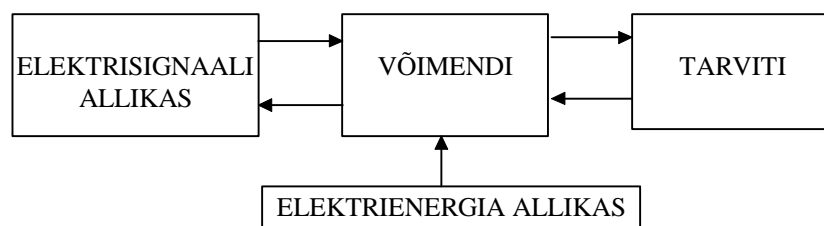
Elektroonikaalases kirjanduses esitatakse mitmesuguste elektroonikaseadmete põhimõtteskeemid, kuid harvemini tuuakse nende kõrval ka montaažiskeemid. Montaažiskeemi koostamine jääb sageli elektroonikaseadme valmistaja ülesandeks. Samuti on käesoleva õpiku viiendas peatükis ning ka järgnevates peamine tähelepanu pööratud elektroonikalülituste (võimendid, pulsigeneraatorid jt) põhimõtteskeemide üldarusaadavale kirjeldamisele.

5.2 Transistorvõimendi

Järgnevalt vaatleme, mida kujutab endast elektrisignaali *võimendamine* ehk võimendamine kui protsess.

Võimendamine on protsess, mille käigus välise energiaallika arvel suureneb või suurenevad elektrisignaali parameeter või parameetrid (pinge, vool, võimsus).

Võimendamise sooritamiseks on ilmtingimata vajalikud elektrisignaali allikas (annab võimendatava signaali), võimendi, elektrienergia allikas ja tarviti (joonis 5.2).



Joonis 5.2. Võimendusprotsess

Võimendi on elektroonikalülitus või seadis, mis teostab võimendamist. Võimendeid võib liigitada mitmete tunnuste alusel ning üheks võimaluseks on liigitamine võimenduselemendi tüübi (elektronlamp, transistor jne) järgi. Transistorvõimendis on võimenduselemendiks bipolaar- või väljatransistor. Võimendeid liigitatakse veel signaali liigi järgi (harmooniliste signaalide- ja impulssvõimendid), signaali sageduse järgi (heli- ja kõrgsagedusvõimendid), otatarbe järgi (pinge-, voolu-, võimsusvõimendid jt) ja võimendusastmete arvu järgi (ühe- ja mitmeastmelised).

Transistorvõimendi tähtsamad tunnussuurused on:

1. Sisendtakistus, R_G .
2. Väljundtakistus, R_L .
3. Sisendpinge, U_s .
4. Väljundpinge, U_v .
5. Sisendvool, I_s .
6. Väljundvool, I_v .
7. Võimendustegur, k .
8. Moonutused.
9. Müra.

Kuute esimest tunnussuurust vaadeldakse käesolevas alajaotuses põhjalikumalt võimendusastmete töö kirjeldamisel järgnevalt aga vaatleme kolme viimast.

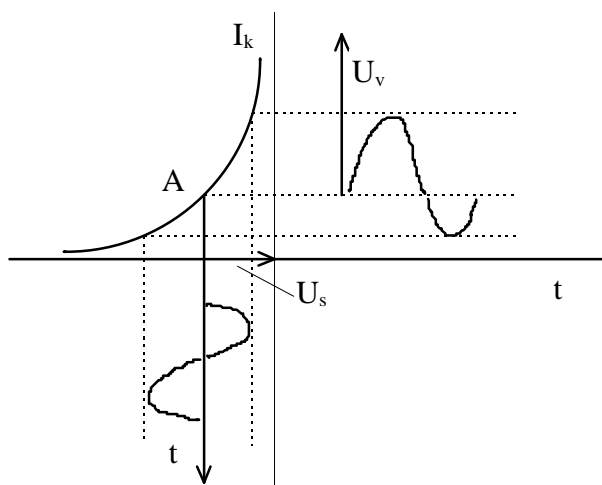
Võimendustegur on väljund ja sisendsignaali suhe, mis näitab mitu korda on sisendsignaal väiksem väljundsignaalist. Eristatakse järgmisi võimendustegureid:

- pingevõimendustegur $k_U = \frac{U_v}{U_s}$,
- vooluvõimendustegur $k_I = \frac{I_v}{I_s}$,
- võimsusvõimendustegur $k_P = \frac{P_v}{P_s}$.

Moonutused on võimendi poolsed elektrisignaali tunnusjoonte mittesoovitud muutused. Kui võimendi sisendpinge (sisendsignaal) pole kaduväike, siis tekivad moonutused transistori tunnusjoonte mittelineaarsusest. Neid moonutusi nimetatakse *mittelineaarmoonutusteks*. Mittelineaarmoonutusi iseloomustatakse *klirrfaktoriga*.

Müraks nimetatakse võimendis endas tekkivaid sisemisi nähtusi, mis segavalt muudavad võimendi signaali. Müra põhjustavad soojuslikud- ja voolu mürad takistites, signaali muutused võimenduselementides jms.

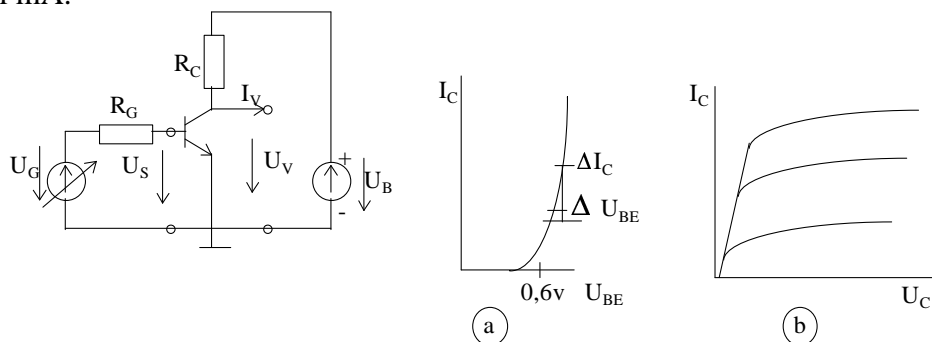
Ühe võimenduselemendiga lihtvõimendit nimetatakse *võimendusastmeks*. Võimendusprotsess lihtvõimendis on kujutatud joonisel 5.3.



Joonis 5.3. Võimendusprotsess lihtvõimendis

Võimendeid iseloomustatakse *võimendusklassiga*, mis kujutab endast võimendi tööpunkti asendit sõltuvalt talitlusest (A- klass, B- klass).
Võimendis esinevad *tagasitoimed* (tagasisided), mis kujutavad endast väljundsuuruse tagasimõju sisendsuurusele.

Järgnevalt vaatleme ÜE- lülituses transistorvõimendusastme tööd, selleks rakendame joonisel 5.4 kujutatud skeemi sisendisse pinge $U_S \approx 0,6 \text{ V}$, et kollektorivool oleks mõni mA.



Joonis 5.4. Ühise emitteriga võimendusastme lülitusskeem, a) sisendtunnusjoon ja b) väljundtunnusjooned

Suurendame sisendpinget väikse pinge ΔU_S võrra. Kuna väljundtunnusjooned on praktiliselt horisontaalsed, siis eeldame, et kollektorivool I_C sõltub ainult sisendpingest U_{BE} ja ei sõltu U_{CE} -st.

Voolu I_C juurdekasv:

$$\Delta I_C \approx S \cdot \Delta U_{BE} = S \cdot \Delta U_S,$$

$$S = \frac{\partial I_C}{\partial U_{BE}}, \quad \text{kui } U_{CE} = \text{const.}$$

Kuna kollektorivool kulgeb läbi kollektoritakistuse R_C , siis suureneb pingelang kollektoritakistusel ning väljundpinge väheneb suuruse ΔU_V võrra:

$$\Delta U_V = -\Delta I_C \cdot R_C \approx -S \cdot R_C \cdot \Delta U_S .$$

Pingevoimendus:

$$A = \frac{\Delta U_V}{\Delta U_S} \approx -S \cdot R_C .$$

Pingevoimenduse täpseks arvutamiseks kasutatakse transistori põhivõrrandit:

$$dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{dU_{CE}}{r_{CE}} ,$$

kuhu asendame suurused $I_V = 0$ korral: $U_{BE} = U_S$, $U_{CE} = U_V$, $dU_V = -dI_C \cdot R_C$.

Saame:

$$-\frac{dU_V}{R_C} = S \cdot dU_S + \frac{dU_V}{r_{CE}} ,$$

siit

$$dU_V = -S dU_S (r_{CE} \parallel R_C) \quad (\text{rööpühendus: } \frac{R_C \cdot r_{CE}}{R_C + r_{CE}}).$$

Pingevoimendus:

$$A = \frac{dU_V}{dU_S} = -S \cdot (R_C \parallel r_{CE})$$

Kuna aga $S = \frac{I_C}{U_T}$ (arvutamiseks pole vaja teada transistori andmeid), siis piirjuhtumil,

kui $r_{CE} \gg R_C$, on transistori võimendus:

$$A = -R_C \cdot S = \frac{-R_C \cdot I_C}{U_T} .$$

Seega on pingevõimendus proportsionaalne pingelanguga kollektoritakistusel R_C .

Näide: Arvutada ÜE-võimendusastme pingevõimendus, kui $I_C = 1 \text{ mA}$, $R_C = 5 \text{ k}\Omega$.

$$\text{Lahendus: } S = \frac{I_C}{U_T} = \frac{1 \text{ mA}}{26 \text{ mV}} = 38,5 \frac{\text{mA}}{\text{V}} .$$

Kollektorivoolu $I_C = 1 \text{ mA}$ korral on r_{CE} tavaline väärtus ca $100 \text{ k}\Omega$. Pingevoimendus $A = -S (R_C \parallel r_{CE}) = -38,5 \cdot 10^{-3} \cdot (5 \cdot 10^3 \parallel 100 \cdot 10^3) = -183$.

Arvestades, et $R_C \ll r_{CE}$ saame:

$$A = \frac{-I_C \cdot R_C}{U_T} = \frac{-1 \cdot 10^{-3} \cdot 5 \cdot 10^3}{26 \cdot 10^{-3}} = -192 .$$

Kui $R_C \gg r_{CE}$, siis maksimaalne pingevõimendus:

$$\mu = \lim_{R_C \rightarrow \infty} |A| = \lim_{R_C \rightarrow \infty} S(R_C \| r_{CE}) = S \cdot r_{CE}$$

Maksimaalne pingevõimendus ei sõltu voolust I_C , kuna

$$S = \frac{I_C}{U_T} \text{ ja } r_{CE} = \frac{U_Y}{I_C} ,$$

Early pinge $U_Y \approx 100 \text{ V}$. Ülekandetunnusjoone tõus S on kollektorivooluga proportsionaalne ning r_{CE} pöördvõrdeline kollektorivooluga. Maksimaalne pingevõimendus:

$$\mu = S \cdot r_{CE} = \frac{I_C \cdot U_Y}{U_T \cdot I_C} = \frac{U_Y}{U_T} .$$

Maksimaalse pingevõimenduse tavalised väärtused on npn-transistoridel 3000...7500 ning pnp-transistoridel 1500...5500.

Pingevõimenduse arvutamisel ei arvestanud me eelpool signaali allika sisetakistusega R_g ja koormustakistusega R_L . Et nende mõju arvestada, tuleb sisse tuua 2 täiendavat suurust: võimendi sisend- ja väljundtakistus.

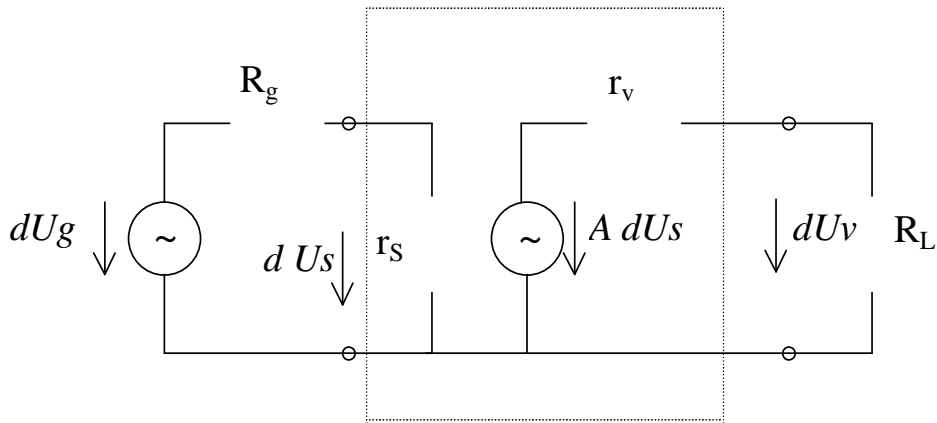
Võimendi sisendtakistus:

$$r_s = \frac{\partial U_s}{\partial I_s} , \quad I_V = 0.$$

Sisendtakistust tuleb mõõta võimendi tühijooksu olukorras, s. t. $I_V = 0$. Joonise 5.5 kohaselt väheneb võimendi sisendpinge signaali allika sisetakistuse tõttu:

$$dU_s = \frac{r_s \cdot dU_g}{r_s + R_g} .$$

Kui see pinge korrutada pingevõimendusteguriga A , siis saame võimendi väljundpinge tühijooksuolukorras.



Joonis 5.5. Võimendi aseskeem sisend- ja välisakistuse mõju selgitamiseks.

Sisendtakistuse r_s arvutamiseks kasutame valemit (1. põhivõrrand):

$$dI_B = \frac{dU_{BE}}{r_{BE}} .$$

Võttes $dU_{BE} = dU_S$ ja $dI_B = dI_S$, saame:

$$dI_S = \frac{dU_S}{r_{BE}}$$

$$r_s = r_{BE} = \frac{\beta}{S} = \frac{\beta \cdot U_T}{I_C} .$$

Sisendtakistus on seega seda suurem, mida väiksem on kollektorivool ja mida suurem on vooluvõimendus β .

Võimendi kollektorivool I_C valitakse sellisel, et sisendtakistus r_s oleks tunduvalt suurem kui R_g .

Pingevoimenduse arvutamiseks võimendi koormatud olekus vajatakse võimendi väljundtakistust r_v . Võimendi väljundtakistus määrab, kui palju võimendi väljundpinge langeb, kui vool kasvab dI_V võrra konstantse pinge U_g korral. Väljundtakistus

$$r_v = - \frac{\partial U_V}{\partial I_V} \quad , \quad U_g = \text{const.}$$

Võimendi koormustakistus R_L ja väljundtakistus r_v moodustavad pingejaguri, s. t. pingevõimendus langeb teguri $\frac{R_L}{R_L + r_v}$ võrra.

Pingevoimenduse koormusolukorras võib leida järgmiselt:

$$A_b = \left. \frac{\partial U_V}{\partial U_S} \right|_{R_L} = A \cdot \frac{R_L}{r_V + R_L}$$

ja arvestades signaali allika tühijooksupinget

$$A_{i\ddot{o}o} = \left. \frac{\partial U_V}{\partial U_S} \right|_{R_L, R_g} = \frac{r_S}{r_S + R_g} \cdot A \cdot \frac{R_L}{r_V + R_L}.$$

Väljundtakistuse arvutamiseks rakendame Kirchhoffi 1. seadust ühise emitteriga võimendi väljundis

$$-dI_C - dI_V - \frac{dU_V}{R_C} = 0.$$

Asetades selle põhivõrrandisse $dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{dU_{CE}}{r_{CE}}$ saame:

$$-dI_V - \frac{dU_V}{R_C} = S \cdot dU_{BE} + \frac{dU_V}{r_{CE}}.$$

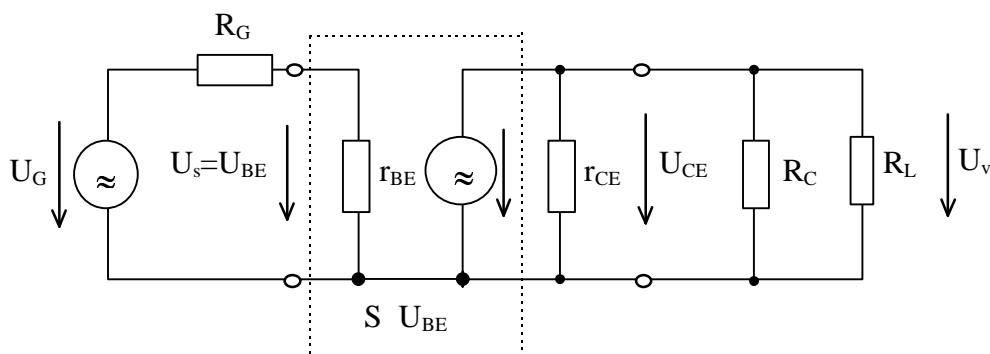
Kuna $dU_{BE} \approx 0$, $dU_g = 0$ korral

$$r_V = -\frac{dU_V}{dI_V} = \frac{R_C \cdot r_{CE}}{R_C + r_{CE}} = R_C \parallel r_{CE}.$$

Teades võimendi väljundtakistust võib arvutada pingevõimenduse tööolukorras:

$$A_{i\ddot{o}o} = \frac{A \cdot R_L}{r_V + R_L} = -S \cdot \frac{R_C \cdot r_{CE} \cdot R_L}{R_C r_{CE} + R_L R_C + R_L r_{CE}} = -S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_L).$$

Niisiis tuleb nõrga signaali puhul arvestada kolme takistuse – R_C , r_{CE} ja R_L – rööpühendusega. Vastav askeem on toodud joonisel 5.6.



Joonis 5.6. Võimendi askeem nõrga signaali olukorras.

Kui sisendsignaali U_S muutus pole kaduvväike, siis tekivad moonutused transistori ülekanDETUNNUSJOONE tugeva mittelineaarsuse tõttu. MittelineaarMoonutusI iseloomustatakse *klirrfaktoriga* (k):

$$k = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} \hat{U}_n^2}}{U_o} * 100\%,$$

kus n – pinge kõrgema harmoonilise järk.

Klirrfaktor väljendab pinge kõrgemate harmooniliste efektiivväärtuse suhet põhiharmoonilise efektiivväärtusse. Kui sisendpinge on jõudepunktis siinuseline

$$U_S(t) = U_{SA} + \hat{U}_S \sin \omega t.$$

Kollektorivool (valemist $I_C = I_{CO} \cdot e^{\frac{U_{BE}}{U_T}}$):

$$I_C(t) = I_{CO} \cdot e^{\frac{U_{SA}}{U_T}} \cdot e^{\frac{\hat{U}_S \sin \omega t}{U_T}}.$$

Arendades funktsiooni teise poole ritta, saame:

$$I_C(t) = I_{CO} e^{\frac{U_{SA}}{U_T}} \left[1 + \frac{\hat{U}_S}{U_T} \sin \omega t + \frac{\hat{U}_S^2}{4U_T^2} (1 - \cos 2\omega t) + \dots \right].$$

Siit võime eraldada põhiharmoonilise ja esimese harmoonilise amplituudi. Ligikaudne klirrfaktori valem:

$$k \approx \frac{\hat{I}_{C1}}{\hat{I}_{CD}} = \frac{\hat{U}_S}{4U_T}.$$

Klirrfaktor on seega võrdeline sisendpinge amplituudiga ning ei sõltu jõudepunktist.

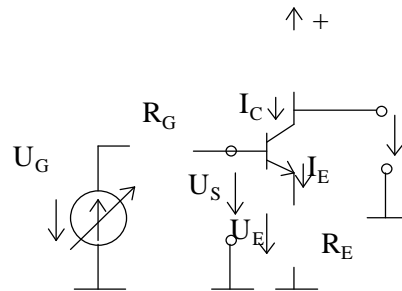
Näide: Arvutada, kui suur tohib olla sisendpinge amplituud, et ml.moonutus ei ületaks 1%:

$$U_{S_{\max}} = \frac{4U_T}{100} \approx 1mV.$$

Pingevõimenduse $A \approx 200$ korral on vastav väljundpinge amplituud ca. 200 mV.

MittelineaarMoonutusI vähendamiseks võib kasutada tagasisidet. Selleks sidestatakse osa väljundsignaalist tagasi sisendisse nii, et see toimib sisendsignaalile vastu. Sellega aga väheneb ka võimendus. Siiski saab tagasiside abil saavutada olukorra, kus võimendus sõltub põhiliselt takistuste vahekorrast ning vähem transistori mittelineaarsest sisendtunnusjoonest.

Joonisel 5.7 on kujutatud lülitus, milles tagasiside toimub emitteriahelasse lülitatud takisti R_E kaudu. Suurendades pinget U_S suureneb I_C . Kuna aga $I_E \approx I_C$, siis kasvab pingelang $U_E = I_E \cdot R_E$ samapalju.



Joonis 5.7. Ühise emitteriga lülitus vastusidega voolu järgi.

Baas-emitterpinge $U_{BE} = U_S - U_E$ muutus on võrreldes ΔU_E - ga suhteliselt väike. Tekkiv emitteripinge muutus ΔU_{BE} toimib seega vastu sisendpinge muutusele ΔU_S ja vähendab võimendust. Tekib vastuside. Kuna see on põhjustatud emitterivoolu poolt, nimetatakse seda kas *vooluvastusideks*, *jadavastusideks* või *jadavooluvastusideks*.

Esimeses lähenduses võib jätta U_{BE} muutuse arvestamata. Siis $\Delta U_E \approx \Delta U_S$. Kuna R_C vool on praktiliselt sama, mis R_E -l, siis takistuse R_C pingelangu muutus on tegur $\frac{R_C}{R_E}$ korda suurem, kui ΔU_E .

Vastusidestatud võimendusastme pingevõimendus: $A = \frac{\Delta U_V}{\Delta U_S} \approx -\frac{R_C}{R_E}$,

s. t. võrrandisse ei lähe enam sisse ükski transistori parameeter.

Pingevõimenduse täpseks arvutamiseks kirjutame joonise 5.7. järgi seosed:

$$\begin{aligned} dU_{BE} &= dU_S - dU_E; dU_V = -R_C \cdot dI_C; \\ dU_{CE} &= dU_V - dU_E; dU_E \approx R_E \cdot dI_C \end{aligned}$$

ja asetame need transistori põhivõrrandisse

$$dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{dU_{CE}}{r_{CE}}.$$

Kui $S \cdot r_{CE} = \mu \gg 1$, siis:

$$A = \frac{dU_V}{dU_S} = -\frac{S \cdot R_C}{1 + S \cdot R_E + \frac{R_C}{R_E}} = -\frac{R_C}{R_E + \frac{1}{S} + \frac{R_C}{\mu}}.$$

Piirjuhtumite vaatlemiseks käsitleme pingevõimenduse pöördväärtust:

$$-\frac{1}{A} = \frac{1}{S(R_C \parallel r_{CE})} + \frac{R_E}{R_C}.$$

Juhtum 1: $R_E \rightarrow 0 \Rightarrow A \rightarrow -S(R_C \parallel r_{CE})$, seega nagu oodata oligi väärtusele, mis vastab vastusideta olukorrale.

Juhtum 2: Tugeva vastuside $\frac{R_C}{R_E} \ll S(R_C \parallel r_{CE})$ korral saame

$$A = -\frac{R_C}{R_E},$$

mis vastab esialgsele lähendusele.

Juhtum 3: $R_C \ll r_{CE}$, siis saame üldvalemist

$$A \approx -\frac{S \cdot R_C}{1 + S \cdot R_E} = -\frac{R_C}{R_E + \frac{1}{S}}.$$

Et $A = -R_C \cdot S$, siis taandatud ülekanetunnusjoone tõus

$$S_{red} = \frac{S}{1 + S \cdot R_E} = \frac{1}{R_E + \frac{1}{S}}.$$

S_{red} näitab R_E abil tagasisidestatud transistori ülekanetunnusjoone tõusu.

Pingevoimendus:

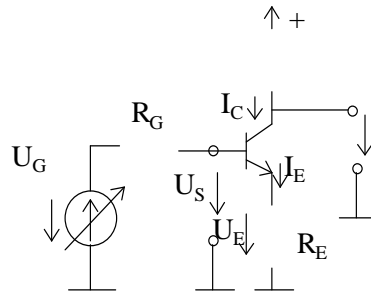
$$A = -S_{red} \cdot R_C.$$

Nagu nägime, vooluvastuside vähendab pinget U_{BE} muutust ja seega pingevõimendust. Kuna seetõttu ka sisendvool dI_B väheneb, siis suureneb samapalju sisendtakistus, kui väheneb pingevõimendus. Lähendusega $r_{CE} \gg R_C$ saame:

$$r_S = r_{BE}(1 + S \cdot R_E) = r_{BE} + \beta \cdot R_E = \beta \left(\frac{1}{S} + R_E \right).$$

Väljundtakistus suureneb veidi vastuside mõjul ja läheneb tugeva vastuside korral R_C väärtusele.

Teine vastusidestamise võimalus seisneb selles, et osa väljundpingest liidetakse sisendpingele. Pingevastusidega skeem on toodud joonisel 5.8.



Joonis 5.8 ÜE- lülitus pingevastusidega.

Kuna ühise emitteriga lülitus on inverteeriv võimendi, siis sisendpinge väheneb läbi takisti R_N sisendisse antava väljundpinge mõjul (*rööp-pingevastuside*). Lülituse talitluse selgitamiseks suurendame sisendpinget ΔU_S võrra. Sellega suureneb U_{BE} ja väljundpinge väheneb väärtuse $|\Delta U_V| \gg \Delta U_S$ võrra. Eeldusel, et takistus R_N pole palju suurem kui r_{BE} , siis $\Delta I_B \ll \Delta I_N$. Kui takisti R_1 valida nii, et $\Delta U_S \ll \Delta U_{BE}$, siis

$$\Delta I_S \approx \frac{\Delta U_S}{R_1}.$$

Väljundpinge muutuseks saame:

$$\Delta U_V = \Delta U_{BE} - \Delta I_N \cdot R_N \approx -\Delta I_N \cdot R_N \approx -\frac{R_N}{R_1} \cdot \Delta U_S.$$

Pingeõimenduse täpseks arvutamiseks rakendame Kirchoffi 1. seadust transistori baasil ja kollektoril:

$$\begin{aligned} dI_S - dI_B - dI_N &= 0 \\ dI_N - dI_C - \frac{dU_V}{R_C} &= 0 \end{aligned}$$

Asendades

$$dI_S = \frac{dU_S - dU_{BE}}{R_1} \quad \text{ja} \quad dI_N = \frac{dU_{BE} - dU_V}{R_N}$$

ja kasutades transistori põhivõrrandeid

$$\begin{cases} dI_B = \frac{dU_{BE}}{r_{BE}} \\ dI_C = S \cdot dU_{BE} + \frac{dU_{CE}}{r_{CE}} \end{cases}$$

saame pingevõimenduse arvutamiseks võrrandi

$$\frac{1}{A} = \frac{dU_S}{dU_V} = - \frac{1 + \frac{R_1}{(r_{BE} \parallel R_N)}}{\left(S - \frac{1}{R_N}\right)(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} - \frac{R_1}{R_N}.$$

Lähendusega $R_N \gg \frac{1}{S}$ saame:

$$\frac{1}{A} = - \frac{1 + (R_1 \parallel r_{BE} \parallel R_N)}{S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} - \frac{R_1}{R_N}.$$

Kui $R_1 \rightarrow 0$, siis saame ootuspäraselt $A = -S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)$. Takistuse R_N väärtust ei ole seetõttu mõistlik valida R_C suhtes väikest, kuna pingevõimendus väheneks järsult. Eelnevas selgituses oli juttu, et R_N ei tohi olla ka palju suurem r_{BE} väärtusest, kuna siis tagasiside ei toimi. Enamasti valitakse $R_N \approx R_C \approx r_{BE}$. Tugeva vastuside korral, kui $R_1 \approx R_N$, on pingevõimendus

$$A = - \frac{R_N}{R_1},$$

mis vastab eelpool arvatule.

Väljundpinge muutus:

$$\Delta U_V = -S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N) \Delta U_{BE}.$$

Voolu I_N muutus:

$$\Delta I_N = \frac{\Delta U_{BE} - \Delta U_V}{R_N} \approx \frac{\Delta U_{BE}}{R_N} \cdot S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N).$$

Vastusidetakistus R_N toimib sisendtakistuse suhtes nagu takistus $\frac{R_N}{S \cdot (R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)}$

baasi ja massi vahel. Seega sisendtakistus:

$$r_S = R_1 + \left[r_{BE} \parallel \frac{R_N}{S(R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N)} \right] \approx R_1.$$

Väljundtakistus väheneb pingevastuside tõttu, kuna kollektoripinge kasvades baasivool suureneb läbi takistuse R_N . Seetõttu vastab väljundpinge muutusele suurem kollektorivoolu muutus. Väljundtakistus pingevastuside korral:

$$r_V = \frac{\partial U_V}{\partial I_V} \Big|_{U_g = \text{const.}} \approx \left[\frac{R_N}{\beta} \left(1 + \frac{r_{BE}}{R_1 + R_g} \right) \right] \parallel R_C \parallel r_{CE} \parallel R_N.$$

Sõltuvalt rakendusest kasutatakse ka ühise baasi ja ühise kollektoriga võimendusastmeid.

Ühisbaasiga võimendusastme sisendtakistus on madal ning seetõttu teda madalsagedusvõimendites praktiliselt ei kasutata. Väikese sisendmahtuvuse tõttu (kollektor-baas mahtuvus on ühendatud massiga) sobib see lülitus kõrgsagedusvõimenditesse. Vooluvastusideks saab kasutada signaaliallika takistust R_G .

Ühiskollektoriga võimendusastme (*emitterjärguri*) väljundtakistus on väga väike ja sisendtakistus väga suur. Väljundtakistus on seega ca. 6000 korda sisendtakistusest suurem. See võimaldab emitterjärgurit kasutada nn. *impedantsimuundurina* suure väljundtakistusega signaaliallika või võimendusastme ning väikese sisendtakistusega võimendusastme vahel. Signaaligeneraator töötab praktiliselt tühijooksul ja väljundtakistus on väga väike. Seega on emitterjärguri abil võimalik omavahel ühendada suure ja väikse takistusega astmeid ilma suure pingelanguseta.

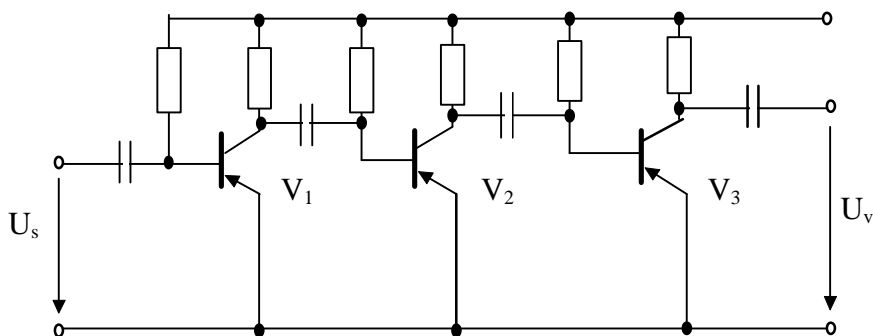
Üks emitterjärguri omapära on see, et teda ei või siiski väga tugevasti koormata, sest takisti R_L on rööbiti takistiga R_E . Kui aga R_L on R_E -ga võrreldes liiga väike, tekivad moonutused seega tuleb koormustakisti R_L valida lähtudes võrratusest $R_L \geq R_E$.

Väljatransitoridega võimendites kasutatakse kõige sagedamini ühise lättega ja ühise neeluga lülitust.

Ühise lättega võimendusaste vastab bipolaatransistori ühise emitteriga lülitusele. Erinevus seisneb selles, et pais-kanal diood töötab tõkkesuunas. Seega on sisendvool praktiliselt null ja sisendtakistus on väga suur. Lülituse analüüsiks võib kasutada ühise emitteriga võimendusastme analüüsi tulemusi. Ühise lättega võimendusastme pingevõimendustegur arvutatakse sarnaselt ühise emitteriga lülitusega. Maksimaalne pingevõimendus on võimendusalas praktiliselt konstantne. n-kanaliga väljatransistoridel on maksimaalne pingevõimendus 100...300; p-kanaliga transistoridel 50...150. Väljatransistoride pingevõimendus on seega ainult 10 % bipolaartransistoride omast. Erinevalt bipolaartransistorist sõltub mittelineaarne moonutus e. klirrfaktor lisaks sisendpinge amplituudile ka tööpunkti.

Ühise neeluga võimendusastme e. *lättejärguri* sisendtakistus on suurem kui ühise lättega lülitusel. See on üldiselt vähemtähtis, kuna see on ka ühise lättega lülitusel väga suur. Tema eeliseks on see et lülituse sisendmahtuvus on mõnevõrra väiksem. Erinevalt ühise lättega lülitusest on aga lättejärguri väljundtakistus sõltumatu signaaliallika takistusest.

Kui ühe astme võimendus ei ole küllaldane siis kasutatakse mitmeastmelisi võimendeid. Esimese astme võimendatud signaal antakse teise astmesse, seal võimendatakse veelkordselt ning antakse edasi kolmandasse astmesse jne. (joonis 5.9)



Joonis 5.9. Kolmeastmeline transistorvõimendi.

Mitmeastmelise võimendi võimendustegur võrdub üksikute astmete võimendustegurite korrutisega:

$$k = k_1 \cdot k_2 \cdot k_3 \cdot \dots \cdot k_n.$$

Transistorvõimendi eriliigiks on *diferentsiaalvõimendi*. Diferentsiaalvõimendi on kahe sisendi ja kahe väljundiga alalispingevõimendi. Diferentsiaalvõimendile on iseloomulik vooluallikas ühises emitterjuhisis, mis hoiab emittervoolude summa $I_K = I_{E1} + I_{E2}$ alati konstantse.

5.3 Operatsioonivõimendi

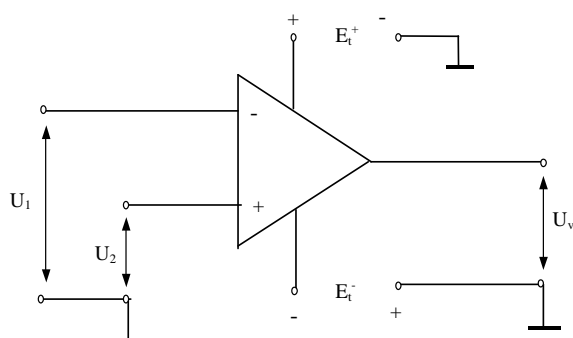
Operatsioonivõimendi (OV) on suure võimendusega alalisvooluvõimendi. Põhimõtteliselt pole tavalisel võimendil ja operatsioonivõimendil (OV) vahet. Mõlemad on ette nähtud sisendsignaali võimendamiseks. Erinevus seisneb selles, et ***operatsioonivõimendi on ehitatud selliselt, et tema töö on põhiliselt määratav väliste ahelate ja tagasisidega.*** Teda kasutatakse peamiselt aktiivelemendina tagasisidestatud elektroonikalülitustes. Enamasti kasutatakse operatsioonivõimendeid signaaligeneraatorite, ping- ja voolustabilisaatorite, aktiivfiltrite jm. elektroonikaaparatuuri valmistamisel. Algselt kasutati operatsioonivõimendeid matemaatiliste operatsioonide sooritamiseks (siit ka nimetus).

Tänapäeval toodetakse väga laias valikus integreeritud monoliit-operatsioonvõimendeid, mille omadused on peaaegu ideaalsed ja nende kasutamine on palju lihtsam kui üksiku transistori kasutamine võimenduselemendina. Seetõttu on OV transistorid väga suures ulatuses lineaarsetest skeemidest välja tõrjunud. Enamikul juhtudel piisab vähestest teadmistest, et valida õige OV ja ehitada vajalik skeem kuid mõnikord on siiski vaja teada ka OV siseehitust.

Operatsioonivõimendid valmistatakse *diferentssisendiga* ning *kahepoolse toitega* alalisvooluvõimenditena. Sisendid jagunevad *inverteerivaks-* ja *mitteinverteerivaks* sisendiks. Inverteeriva sisendi tähiseks skeemil on “-“ ja mitteinvertiveeriva sisendi tähiseks on “+”.

Pingemuutus mitteinvertiveerival sisendil põhjustab väljundpinge samamärgilise, invertiveerival sisendil aga vastasmärgilise muutuse.

Joonisel 5.10 on näidatud OV tingmärk suurendatud kujul ning OV pingestamine kahepoolse toiteallikaga.



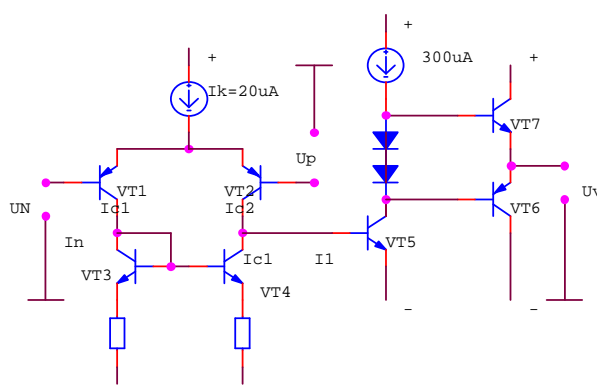
Joonis 5.10. Operatsioonivõimendi pingestamine

OV sisendpingete vahet $U_D = U_1 - U_2$ nimetatakse *diferentspingeks*, aritmeetilist keskmist $U_{ii} = \frac{U_1 + U_2}{2}$ aga *ühispingeks*.

Operatsioonivõimendi väljastuste pinged mõõdetakse nullpunkti suhtes, milleks võetakse tavaliselt toiteallika ühispunkt.

OV- d koostatakse otsesidestusvõimenditena, milles on sisendaste, vaheastmed ja lõppaste. Sisendtakistuse suurendamiseks kasutatakse mikrovooludega töötavaid suure võimendusteguriga bipolaartransistore, liitansistore või väljatransistore.

Operatsioonivõimendi peab võimendama alalispinget, seetõttu on OV sisendastmeks alati diferentsiaalaste. Väljundastmeks on enamasti emitterjärgur, mis võimaldab madalat väljundtakistust. Operatsioonivõimendi lihtsaim skeem on kujutatud joonisel 5.11. Et VT2 ei läheks juba väikese positiivse ühissignaali korral küllastusse, siis tuleb VT2 kollektori algpotentsiaal valida ca. $0,5 \pm V$.



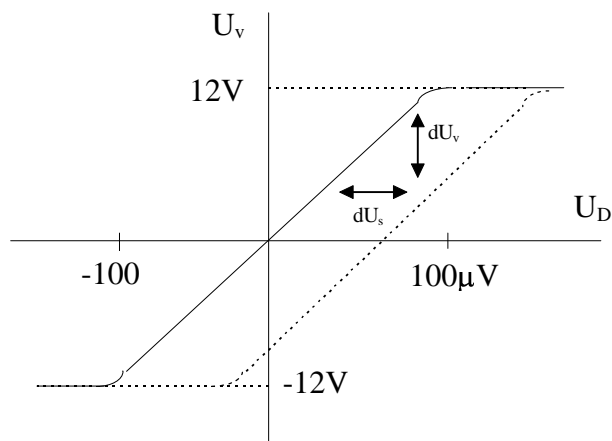
Joonis 5.11. Operatsioonivõimendi põhimõtteskeem.

Transistorid VT1 ja VT2 moodustavad diferentsiaalvõimendi. Vooluallikas VT4 töötab kui VT2 kollektoritakisti, mille vool aga on I_{C1} , sest VT3 ja VT4 moodustavad voolupeegli. Seega on tagatud, et diferentsiaalvõimendi väljavool $I_1 = I_{C1} - I_{C2}$, mis

parandab ühissignaali nõrgendit. VT3 ja VT4 emitteritakistite abil saab nullpunkti paika häälestada. VT5 moodustab darlington-võimendusastme, mille kollektoritakistit asendab vooluallikas. VT6 ja VT7 moodustavad komplementaarse vastastakt emitterjärguri.

Operatsioonivõimendi põhilised tunnussuurused on järgmised:

1. *Võimendustegur ehk diferentsisignaali võimendus* k_D on väljundpinge ja selle esile kutsunud diferentsiaalpinge suhe. Antakse 0- sagedusel ja nimitingimustel. Diferentsisignaali võimendus k_D vastab OV võimendusele ilma tagasisideta (*open loop gain*). OV väljundpinge on praktiliselt kogu alas ($U_{Vmin} \dots U_{Vmax}$) lineaarselt sõltuv diferentspingest. Kui maksimaalne pinge on saavutatud, siis väljundpinge enam ei kasva ja jääb ca. 3 V madalamaks kui toitepinge. ± 15 V toitepingel on U_{Vmax} ja U_{Vmin} vastavalt ± 12 V. Väljundpinge sõltuvus diferentspingest on kujutatud joonisel 5.12. Ideaalse OV korral $k_D \rightarrow \infty$, realsel $k_D = 10^4 \dots 10^5$.
2. *Ühissignaali nõrgendustegur* $\chi_{\ddot{u}}$ (*CMRR- Common Mode Rejection Ratio*) on võimendusteguri ja ühispinge ülekandeteguri suhe. Ühispinge ülekandegur on väljundpinge ja selle esile kutsunud ühispinge suhe. Ühissignaali nõrgendustegur väljendatakse reeglina detsibellides (dB).
3. *Nihkepinge* U_N on diferentsiaalpinge, mis tuleb rakendada OV sisendite vahele, et väljundpinge oleks 0. Nihkepinge muutumist, mida põhjustab temperatuuri muutumine, toitepinge muutus ja komponentide omaduste ajaline ebastabiilsus, nimetatakse *nihkepinge triiviks*.
4. *Sisendvool* I_{sis} on sisendite voolude aritmeetiline keskmine sisendpinge puudumisel.
5. *Sisendtakistus diferentsisignaalile* $R_{d\ sis}$ on ekvivalentne sisendite vaheline takistus nõrga signaali korral. Bipolaar-sisendtransistoridega OV-de $R_{d\ sis}$ on mõni $M\Omega$. Sisendvool läbi sisendtakistuse on ainult mõni nA. Oluliselt suuremad on sisendi algvoolud (*input line current*). mis on bipolaartransistoride korral 20...200 nA, väljatransistoride korral mõni pA.
6. *Sisendtakistus ühissignaalile* $R_{\ddot{u}\ sis}$ on ekvivalentne takistus sisendi ja 0- klemmi vahel.
7. *Suurimad väljundpinged* U^+_v , U^-_v on suurim võimalik positiivne ja negatiivne väljundpinge etteantud koormustakistuse korral.
8. *Ühikvõimenduse sagedus* f_1 on sagedus, mille korral võimendusteguri moodul on võrdne ühega.
9. *Talituskiirus* v_u on väljundpinge suurim muutumise kiirus diferentspinge hüppelisel muutumisel.

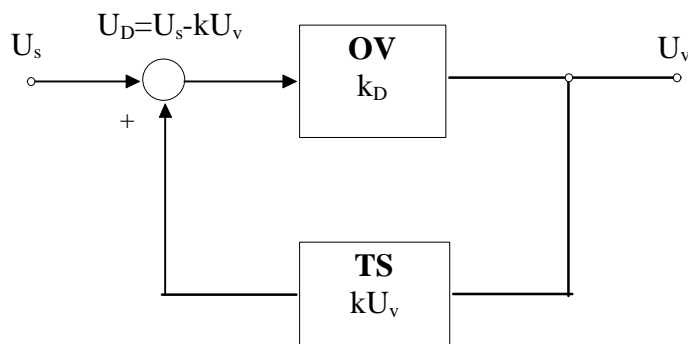


Joonis 5.12. OV ülekandetunnusjoon.

Lähtudes eeltoodud tunnussuurustest peavad reaalsel operatsioonivõimenditel olema järgmised omadused:

- sisendi ja väljundi nulline nihkepinge
- stabiilne nullpunkt
- suur sisend ja väike väljundtakistus
- suur pingevõimendus
- defineeritud sagedusarakteristik.

Enamasti kasutatakse OV- de tagasisidestatud lülitusi. Operatsioonivõimendi tagasiside tööpõhimõtet selgitab joonis 5.13.



Joonis 5.13. Tagasisidestatud OV struktuuriskeem.

Üks osa väljundpingest U_v antakse läbi tagasisideahela sisendisse tagasi, kui see pinge sisendpingest lahutatakse nagu joonisel 5.13, siis on tegemist vastusidega, kui aga liidetakse, siis pärisidega. Järgnevalt vaatleme ainult vastusidet.

Oletame, et sisendpinge kasvab hüppeliselt nullist kuni pingeni U_s . Esimesel hetkel on pinge U_v ja ka vastusidepinge kU_v võrdsed nulliga. Seega on OV sisendpinge alghetkel $U_D = U_s$. See pinge võimendub k_D korda ja väljundpinge U_v kasvab kiiresti

positiivseks ja seega kasvab ka kU_v vähendades OV sisendpinget U_D . See, et väljundpinge vähendab sisendpinget, on vastusidele tüüpiline. Siit võib järeldada, et kujuneb välja stabiilne lõppolukord, mis vastab sellisele väljundpingele, mille puhul kehtib:

$$U_v = k_D U_D = k_D(U_s - kU_v).$$

Lahendades võrrandi U_v järgi saame vastusidestatud OV võimenduse:

$$k_D = \frac{U_v}{U_s} = \frac{k_D}{1 + kk_D},$$

Juhul kui $kk_D \gg 1$, siis $k_D \approx 1/k$ ja võimendus on määratud välise ahelaga ning ei sõltu võimendustegurist k_D .

Lihtsamal juhul koosneb tagasisideahel takistitest pingejagurist. Lülitus töötab siis kui lineaarne võimendi, mille võimendus on määratud takistuste suhtega. Kui tagasisides kasutada RC-ahelaid, saame aktiivse filtri, kui aga kasutada näiteks dioode või transistore, siis saame realiseerida mittelineaarseid arvutustehteid. Neid juhtumeid vaatleme hiljem täpsemalt.

Järgnevalt vaatleme lähemalt oomilist tagasisidet. Tagasisideahela võimendusteguri (*loop gain*) leiame järgmiselt:

$$g = kk_D \approx \frac{k_D}{k},$$

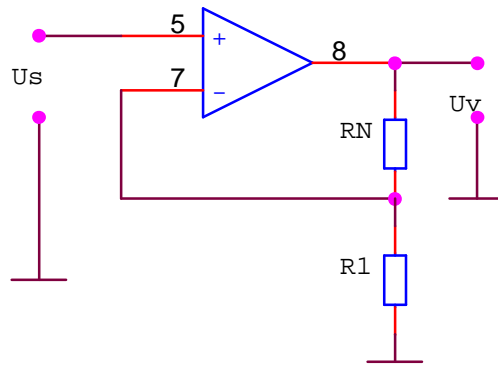
Joonisel 5.13. näidatud ahel kujutab endast lihtsat reguleerimissüsteemi, mille väljundpinge läheneb suurusele $kU_v \approx U_s$. Reguleerimistäpsus on määratud tagasisideahela võimendusteguriga g . Inverteeriva võimendiga saab realiseerida *konstandiga korrutamise tehet*.

Kui vastusideahelana kasutada lihtsat pingejagurit nagu joonisel 5.14, siis saame mitteinvertseeriva võimendi põhilülituse. Tagasisidetegur $k = \frac{R_1}{R_1 + R_N}$ ja eeldusel, et

OV on ideaalne, saame võimendusteguri $A = \frac{U_v}{U_s} = \frac{1}{k} = 1 + \frac{R_N}{R_1}$ Reaalse

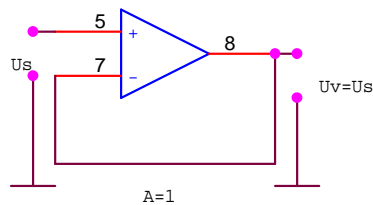
operatsioonivõimendi korral $A = \frac{k_D}{(1 + kk_D)(1 + \frac{1}{G})}$, kus G on ühissignaali

nõrgendustegur.



Joonis 5.14. Mitteinverteeriv võimendi.

Kui $k = 1$, st. $R_1 = \infty$ ja $R_N = 0$, siis saame *pingejärguri*, mis on kujutatud joonisel 5.15.



Joonis 5.15. Pingejärgur

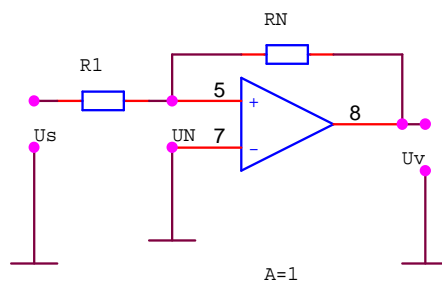
Pingejärgurit kasutatakse analoogiliselt emitterjärguriga impedantsimuundurina. Ainuke erinevus seisneb selles, et pingejärguri sisend- ja väljundpinge vaheline nihkepinge on ainult mõni mV.

Mitteinverteeriva võimendi *diferentsiaalne sisendtakistus*:

$$r_S = g_{r_D} \parallel r_G \approx r_G = 10^9 \Omega \text{ (bipolaartransistori sisendi korral).}$$

Sisendtakistus on veelgi suurem väljatransistoris sisendiga OV puhul. Neid on soovitatav kasutada, kui signaalliallika sisetakistus $R_G = 50 \text{ k}\Omega$. Lisaks on nende mürapinged väiksemad.

Inverteeriva võimendi skeemi saame, kui "+" sisendi ühendame massiga, sisendpinge anname läbi takisti R_1 "-" sisenduse ja tagasisidesignaali anname läbi takisti R_N OV "+" sisendisse nagu on näidatud joonisel 5.16.

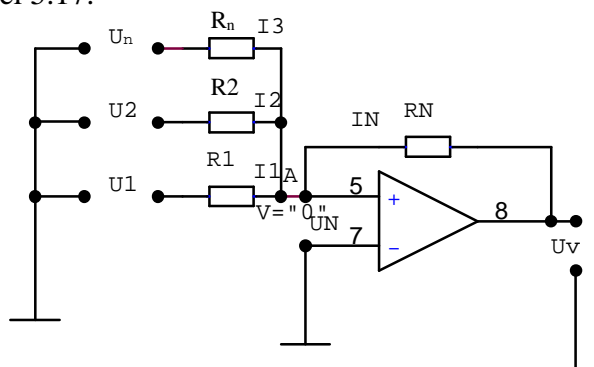


Joonis 5.16. Inverteeriv võimendi

Inverteeriva OV võimendustegur avaldub takistuste suhtena:

$$A = -\frac{R_N}{R_1}.$$

Pingete *liitmiseks* saab kasutada inverteerivat operatsioonivõimendit nagu on kujutatud joonisel 5.17.

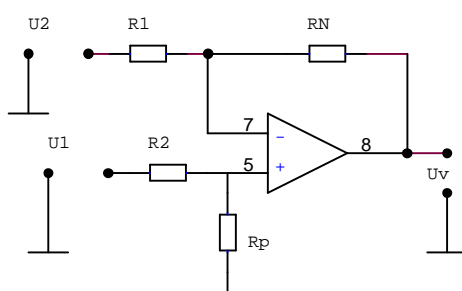


Joonis 5.17. Summaator

Summaatori väljundpinge on võrdne sisendpingete summaga:

$$U_v = -I_N \cdot R_N = -\left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n}\right).$$

Summaatoriga on võimalik ka pingeid *lahutada*. Üheks võimaluseks on siin pingete lahutamise taandamine liitmisele. Teine võimalus lahutamistehte realiseerimiseks on anda miinusmärgiga pinged "-" sisendisse ja "+" märgiga pinged "+" sisendisse nagu on näidatud joonisel 5.18.



Joonis 5.18. OV lülitus pingete lahutamiseks

Sellisel juhtumil on väljundpinge:

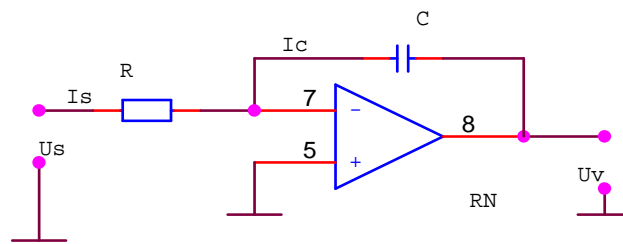
$$U_v = \alpha (U_2 - U_1),$$

$$\text{kus } \alpha = \frac{R_N}{R_1} = \frac{R_p}{R_2} + 1.$$

Joonisel 5.18 toodud lülitust võib laiendada ka rohkemale arvule sisenditele, kuid tuleb tagada, et mõlema sisendi võimendustegurite summad oleksid võrdsed.

Sageli kasutatakse operatsioonivõimendeid *integreerivates*- ja *diferentseerivates* lülitustes ning pingete võrdlemiseks ehk *komparaatorlülitustes*. Järgenevalt vaatlemegi eelmainitud lülitusi ja nende talitlust.

Inverteeriva integraatori skeem on kujutatud joonisel 5.19. Integraatori väljundpinge on võrdne sisendpinge integraaliga aja järgi.



Joonis 5.19. Inverteeriv integraator

Inverteeriva integraatori väljundpinge avaldub kujul:

$$U_v = -\frac{1}{RC} \int_0^t U_s(t) dt + U_{v0},$$

kus U_{v0} on algpinge (integreerimise algtingimus).

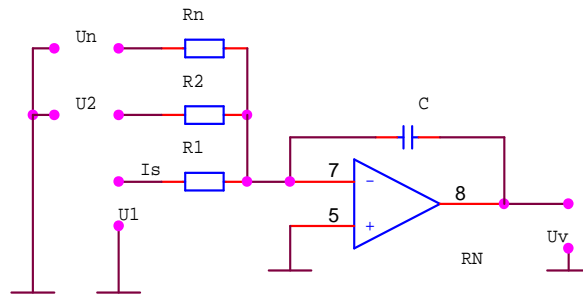
Kui sisendpinge on konstantne siis võib kasutada väljundpinge leidmiseks avaldist:

$$U_v = -\frac{U_s}{RC} t + U_{v0}.$$

Konstantse sisendpinge U_s korral kasvab inverteeriva integraatori väljundpinge praktiliselt lineaarselt ning seetõttu sobib ta hästi kolmnurkpinge ja saehammaspinge genereerimiseks. Samuti võib kasutada mitteinvertivat integraatorit.

Inverteeriva integraatori valmistamiseks sobivad väikese nihkepinge ja suure sisendtakistusega OV-d (näiteks väljatransistorsisendiga OV-d).

Samuti kui inverteeriva võimendi võib summaatoriks ehitada ka inverteeriva integraatori (joonis 5.20).



Joonis 5.20. Integreeriv summaator

Integreeriva summaatori väljundpinge:

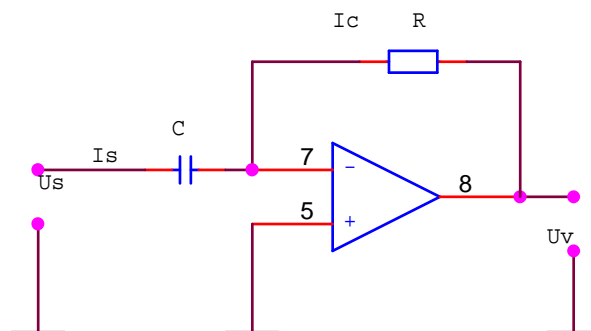
$$U_v = -\frac{1}{C} \int_0^t \left(\frac{U_1}{R_1} + \frac{U_2}{R_2} + \dots + \frac{U_n}{R_n} \right) dt + U_{v0}.$$

Diferentsiaatori põhilülitus on toodud joonisel 5.21. Diferentsiaatori väljundpinge on võrdne tema sisendpinge tuletisega aja järgi. Diferentsiaatori väljundpinge leiame kasutades Kirchoffi I seadust:

$$C \frac{dU_s}{dt} + \frac{U_v}{R} = 0,$$

eelnevast diferentsiaalvõrrandist saame:

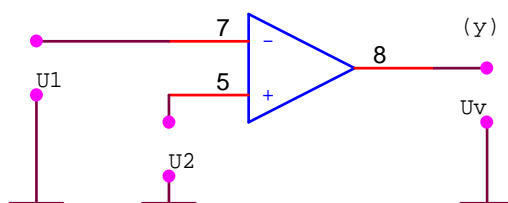
$$U_v = -RC \frac{dU_s}{dt}.$$



Joonis 5.20. Diferentsiaator

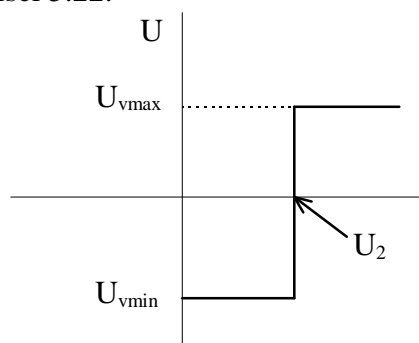
Sellise diferentsiaatori puuduseks on asjaolu, et kõrgel sagedusel töötab ta halvasti, kuna OV sagedustunnusjoon piirab maksimaalset töökiirust. Samuti on diferentsiaator mahtuvuslik koormus, mis võib muuta eelnevad võimendusastmed ebastabiilseks. Veidi parandab olukorda takisti lülitamine järjestikku kondensaatoriga C.

Pingete võrdlemiseks kasutatakse operatsioonivõimendit *komparaatorlülituses*. Komparaatorlülitusi kasutatakse samamärgiliste ja erimärgiliste pingete võrdlemiseks. Lülitus samamärgiliste pingete võrdlemiseks on toodud joonisel 5.21.



Joonis 5.21. Komparaator samamärgiliste pingete võrdlemiseks

Suure diferentsiaalsignaali võimenduse tõttu piisab väga väikesest sisendpingete erinevusest, et väljundpinge hüppaks ühelt maksimaalselt väljundpinge väärtuselt teisele. Kui $U_1 > U_2$, siis $U_v = U_{vmax}$, kui $U_2 > U_1$, siis $U_v = U_{vmin}$. Komparaatori väljundpinge muutmise kiirus on ca $1V/\mu s$ ja $U_{vmax} = 12 V \pm 3V$ ($U_{vmin} = -12 V \pm 3V$). Pinge hüpe $-12V$ pingele $+12V$ kestab seega ca $24 \mu s$. $0V$ - ga komparaatori pingete diagramm on toodud joonisel 5.22.



Joonis 5.22. Komparaatori pingete diagramm

Mõningates rakendustes on see liiga aeglane ja ümberlülitumise kiirendamiseks kas loobutakse sageduskorrektuurist või kasutatakse spetsiaalseid komparaatoreid, mis on mõeldud tööks ilma vastusideta. Spetsiaalsed komparaatorid võimaldavad ümberlülitumisega 2-3 ns piires. Reeglina on spetsiaalsete komparaatorite väljundis signaalipeegli muundur, mis võimaldab vahetult komparaatori väljundisse ühendada digitaalseid integraalskeeme.

Operatsioonivõimendite baasil koostatakse ka madalsageduslikke võimsusvõimendeid (helisagedusvõimendeid), mille omadused on määratud tagasisideahelaga. Võimsusvõimenditele esitatavaks põhinõudeks on suur väljundvõimsus. Pingevõimendus mängib vähemtähtsat rolli ja tema tavaliseks väärtuseks on 1. Seega toimub võimendamine põhiliselt vooluvõimendusega. Võimsusvõimendite väljundvool peab saama muutuda nii positiivseks kui negatiivseks. Võimsusvõimenduse määravad siin lõppastme transistorid.

5.3 Signaaligeneraatorid

Signaaligeneraatorid (elektronigeneraatorid) on seadmed, mis võimendusseadiste abil muundavad toiteallika energia etteantud sageduse ja kujuga elektrivõnkumiste

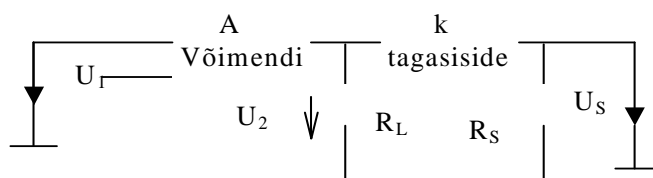
energiaks. Signaaligeneraatorite sisemise liigituse aluseks on nende talitluse juhtimis põhimõte. Selle alusel eristatakse *võõrergutusega signaaligeneraatoreid*, mille talitlust juhitakse välisest vahelduvpingeallikast ja *iseergutuvaid signaaligeneraatoreid*.

Väljundvõnkumiste kuju järgi eristatakse harmoonilise (siinus-) võnkumise ja mittesiinuselise (ristküliku-, saehamba- jne) kujulise võnkumise generaatoreid. Viimaseid nimetatakse *relaksatsioon-* ehk *pulsigeneraatoriteks* (impulssgeneraatoriteks).

Harmooniliste võnkumiste generaatorid jagunevad *LC-* ja *RC-* generaatoriteks. LC - generaatorites säilitatakse harmoonilist võnkumist resonantavõnkeringi või mingi teise resoneeriva elemendi (näiteks kvarts) abil, RC- generaatorites aga võimendi tagasisideahelasse ühendatud faseeriva RC- ahela abil.

Väikese võimsusega LC- generaatoreid kasutatakse mõõte- ja juhtseadmetes ning juhtgeneraatorina raadiosaatjates. Keskmise ja suure võimsusega LC- generaatoreid kasutatakse materjalide ultrahelitäötlusseadmetes, induktsioonkuumutusseadmetes ja elektronmikroskoopides. RC- generaatoreid kasutatakse juhtgeneraatoritena vaheldites ning samuti mõõteaparatuuris.

Järgnevalt vaatleme siinusvõnkumiste tekitamist lihtsa LC- generaatori abil. LC- generaatori põhimõtteline ehitus on näidatud joonisel 5.23.

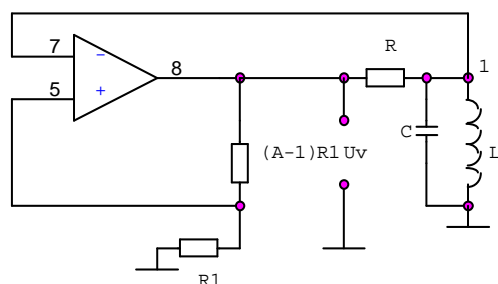


Joonis 5.23. LC- generaatori struktuuriskeem.

Võimendi võimendab sisendpinget U_1 A korda. Seejuures tekib pingete U_2 ja U_1 vahel teatud faasinihe α . Võimendi väljundisse on ühendatud koormustakisti R_L ja sagedusest sõltuvte parameetritega tagasisideahel, mis võib olla näiteks resonantsvõnkering. Tagasisidepinge $U_s = kU_2$. Faasinihet U_s ja U_2 vahel tähistame β - ga.

Et kontrollida, kas signaaligeneraator (ostsillaator) on töövõimeline, lahutatakse tagasisideahel, kuid selle koormiseks jääb võimendi sisendtakistusega võrdne takistus R_s . Järgnevalt antakse võimendi sisendisse vahelduvpinge U_1 ja mõõdetakse pinget U_3 . Signaaligeneraator on võnkevõimeline, kui $U_1 = U_3$. Siit tuleneb võnketingimus $U_1 = U_3 = kAU_1$.

Ahela võimendus $g = kA = 1$. Siit tulenevalt $|g| = |k| \cdot |A| = 1$, mida nim. amplituuditingimuseks ja $\alpha + \beta = 0, 2\pi, \dots$, mida nimetatakse faasitingimuseks. Faasitingimus näitab, et võnkumine saab tekkida ainult siis, kui väljundpinge on *sisendpingega faasis*. See, milline on väljundpinge kuju ja sagedus, on määratud tagasisideahela parameetriga. Operatsioonivõimendiga LC-generaatori põhimõtteskeem on toodud joonisel 5.24.



Joonis 5.24. LC- generaator

Mitteinverteeriv võimendi võimendab sisenpinget U_1 võimendusteguri A korda. Kuna võimendi väljund on madalaoomiline, siis summutab takisti ivõnkumist. Rakendades punktis 1 Kirchhoffi 1 seadust saame:

$$\frac{U_2 - U_1}{R} - C \frac{dU_1}{dt} - \frac{1}{L} \int U_1 dt = 0 \quad \left| \frac{d}{dt} \cdot \frac{1}{C} \right.$$

Asendades $U_2 = AU_1$ saame pinge U_1 diferentsiaalvõrrandi:

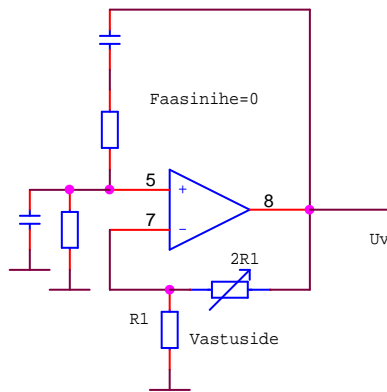
$$\frac{d^2 U_1}{dt^2} + \frac{1-A}{RC} \cdot \frac{dU_1}{dt} + \frac{1}{LC} \cdot U_1 = 0,$$

mille lahendiks on:

$$U_1(t) = U_0 e^{-\gamma t} \cdot \sin(\sqrt{\omega_0^2 - \gamma^2} \cdot t) \quad \gamma = \frac{1-A}{2RC}$$

Kui $\gamma > 0$, st. $A < 1$, siis on võnkumised sumbuvad, kui $\gamma = 0$, st. $A = 1$, siis tekib konstantse sageduse ja amplituudiga siinusvõnkumine. Võnkesagedus $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$. Kui $\gamma < 0$, st. $A > 1$, siis väljundpinge amplituud kasvab eksponentsiaalselt kuni piiramiseni. Seega siinuselise väljunpinge saamiseks peab $A = 1$.

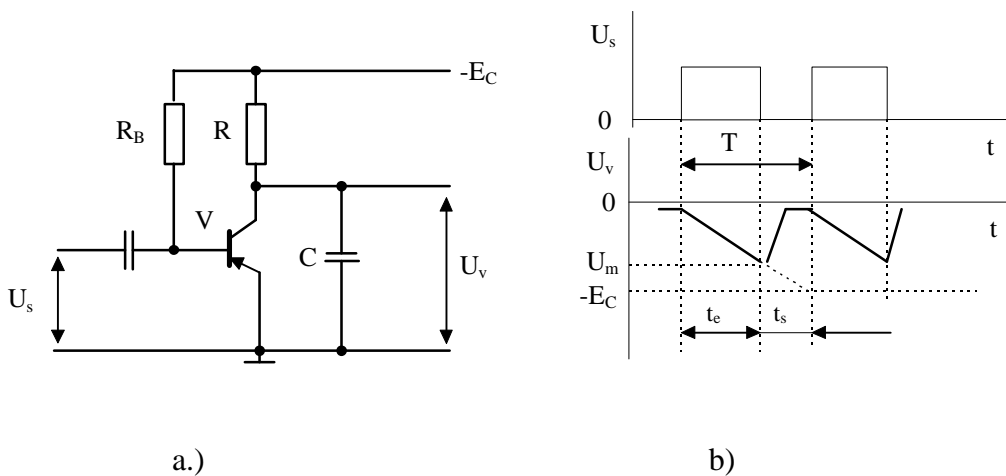
Madalasagedustel (alla 15 ... 20 kHz) kasutatakse enamasti RC-generaatoreid, kuna LC-generaatorite L ja C väärtused läheks väga suureks. Põhimõtteliselt võib võnkeringi asendada RC-ribafiltriga või nn. Wiener-Robinsoni sillaga. Joonis 5.25 kujutab lihtsat Wiener-Robinsoni sillaga generaatorit, mis võimaldab väljundsagedust reguleerida ca 10 Hz .. 1 MHz.



Joonis 5.25. RC- generaator

Wieni silla faasinihe kvaasi-resonantsagedusel ω_0 on null, s. t. ta võib anda nii positiivse kui negatiivse tagasiside kusjuures ω_0 määrabki väljundsageduse.

Saehammaspingegeneraatoreid kasutatakse laialdaselt ostsilloskoopides ja televiisorites elektronkiire laotamiseks ekraanidel pingete võrdlemiseks, reguleeritava viivituse saamiseks ning pidevate suuruste muutmiseks diskreetseiks. Lihtsa saehammaspingegeneraatori skeem ja pingete ajadiagrammid on näidatud joonisel 5.26.



Joonis 5.26. Saehammaspingegeneraatori skeem a) ja pingete ajadiagrammid b)

Sisendimpulsi U_s saabumiseni on lüliti suletud (küllastatud) takistuse $R_B \leq BR$ (B-baasi voolu ülekandetegur) vastava valiku tõttu on pinge kondensaatoril C tegelikult võrdne nulliga. Positiivse käivituspulsi saabumisel lüliti avaneb ning kondensaator hakkab laaduma. Pinge kondensaatoril leitakse avaldisest:

$$U_C = (E_C - I_{CB0}) \left(1 - e^{-t/(RC)}\right) \approx E_C \left(1 - e^{-t/(RC)}\right).$$

Käivitusimpulsi lõppemishetkel lülitatakse sulgub ja baasivool suureneb järsult. Kuid transistor jääb aktiivtalitlusse, sest kollektoripinge võrdub pingega kondensaatoril C. Järgnevalt tühjeneb kondensaator läbi transistori väljundtakistuse.

Saehammaspinge mittelineaarsustegur

$$\varepsilon = U_m / E_C,$$

Pärikäigukestus

$$t_e = CU_m / I_{Csat} = \varepsilon \cdot CE_C / I_{Csat} = \varepsilon \cdot CR.$$

Tagasikäigukestus

$$t_s = t_e / (s - 1),$$

kus s on transistori küllastustegur.

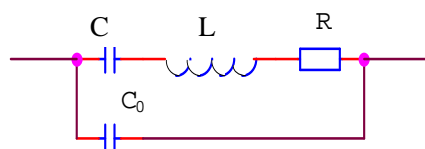
Saehammaspingegeneraatoreid valmistatakse samuti väljatransistoride ja operatsioonivõimendite (integraator) baasil. Lülitustes võib kasutada ka voolu stabiliseerivat transistori ning tüüritavat kompenseerivat pingeaallikat.

5.4 Kvartsgeneraatorid

Senivaadeldud generaatorite signaali sageduse stabiilsus pole paljude rakenduste jaoks (näiteks taimerid, kellad, raadiosaatjad jne) sageli piisav. Sellest puudusest on vabad kvartsgeneraatorid.

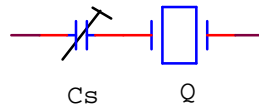
Kvartskristallis tekitatakse elektrivälja mõjul mehaanilised võnked, mis elektriliselt toimivad nagu kõrge hüveteguriga võnkering. Kvartsgeneraatorite sagedus sõltub väga vähe temperatuurist. Saavutatav sageduse stabiilsus $\frac{\Delta f}{f} = 10^{-6} \dots 10^{-10}$.

Kvartskristalli elektriline aseskeem on kujutatud joonisel 5.27. L ja C väärtused on määratud kristalli mehaaniliste omadustega, kus R iseloomustab sumbuvus. Sagedusega 4MHz kvartsil L=100mH, C₀=5pF, C=0,015pF, R = 100Ω.



Joonis 5.27. Kvartskristalli elektriline aseskeem

Kvartsi resonantsisagedust saab kitsas ulatuses reguleerida järjestikku ühendatud seadekondensaatoriga nagu on näidatud joonisel 5.28.

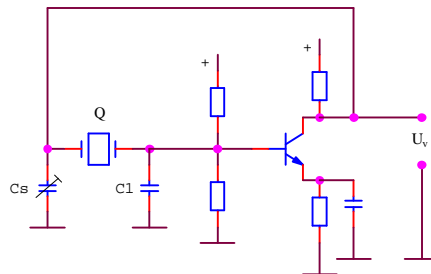


Joonis 5.28. Resonantssageduse reguleerimine

Seega sageduse muutus:

$$\frac{\Delta f}{f} = \frac{C}{2(C_0 + C_s)}.$$

Kvartsgeneraatoreid toodetakse nii põhilainele kui kvartskristalli kõrgematele harmoonilistele (3; 5; 7 jne). Põhilainel töötavatest skeemidest võiks siinkohal tuua *Pierce – generaatori* (joonis 5.29).



Joonis 5.29. Pierce generaator

5.5 Multivibraator ja monovibraator

Multivibraatorid ja monovibraatorid kuuluvad relaksatsioonigeneraatorite hulka, mis genereerivad siinuselisest järsult erinevat võnkumist, kusjuures võnkesagedus sõltub lülituse reaktiivelementidest milleks on enamasti kondensaatorid. Multivibraatoreid kasutatakse laialdaselt riskülikimpulsside tekitamiseks.

Multivibraatoritel eristatakse kolme liiki talitlust:

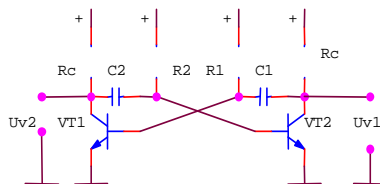
- *isevõnketalitlust*
- *ootetalitlust*
- *sünkroniseerimis (sagedusjaguri) talitlust.*

Isevõnkumistalitluses on multivibraatoril kaks kvaasitasakaaluolekut, mille kestel toimuvad suhteliselt aeglasel voolude ja pingete muutused. Kvaasitasakaaluolekud lõpevad voolude ja pingete hüpetega lülituses. Selles talitluses siirdub multivibraatorilma välismõjutuseta hüppega kordamööda ühest kvaasitasakaaluolekust teise, s.t. on endaergutusega generaator. Genereeritavate impulsside parameetrid (amplituud, laius, sagedus jt) sõltuvad ainult lülituselementide parameetritest. Isevõnketalitluses multivibraatorilt vajatakse tavaliselt püsiva sagedusega võnkumist kuid ilma eriaabinõudeta on sageduse stabiilsus üsna madal. Destabiliseerivate tegurite (temperatuur, toitepinge kõikumine) toimel ulatub sagedushälve mõne protsendini.

Ootetalitluses on multivibraatoril üks tasakaaluolek. Ootetalitlusest viiakse lülitus üle kvaasistabiilsesse olekusse välise käivitusimpulsi abil, lähteolekusse tagastumine toimub sisemiste protsesside toimetel. Selle tsükli vältel genereeritakse üks impulss, mille parameetrid on määratud lülituselementide parameetritega. Käivitusimpulsside jada korral võrdub väljundimpulsside sagedus käivitusimpulsside sagedusega. Ootetalitlust kasutatakse harilikult etteantud laiuse ja kujuga impulsside formeerimiseks. Ootetalitluses töötavat multivibraatorit nimetatakse ka *monovibraatoriks*, *ootemultivibraatoriks*, *ühetaktiliseks relaksaatoriks* või *kippreleeks*.

Sünkroniseerimistalitluses antakse isevõnkuvale multivibraatorile väline sünkroniseeriv siinus- või impulsspinge. Selle mõjul muutub multivibraatori väljundimpulsside sagedus sünkroniseerimispinge sageduse kordseks.

Isevõnkuva kollektorbaassidestuses multivibraatori skeem on toodud joonisel 5.30.



Joonis 5.30. Multivibraatori põhimõtteskeem

Multivibraatoril on kaks kvaasitasakaaluolekut. Ühes neist on transistor VT1 suletud ja VT2 küllastatud, teises olekus on olukord vastupidine. Tekivad hüpped, mis kordamööda muudavad transistori olekut ja mille järel laadub üks ja hakkab laaduma teine impulsi laiust määrav kondensaator. Kuna multivibraator töötab isevõnketalitluses, võib protsessi hakata kirjeldama suvalisest hetkest, näiteks, pärast järjekordset ümberlülitamist, kui VT1 on küllastatud ja VT2 suletud.

Multivibraatoreid valmistatakse ka operatsioonivõimendite, loogikaelementide, väljatransistoride ning dinistoride baasil.

6 ELEKTROONIKALÜLITUSTE INTEGREERIMINE

6.1 Integraallülituste valmistamine

Integraallülitus (IL) koosneb paljudest elektroonikakomponentidest, mis koos nendevaheliste ühendustega on valmistatud ühtses tehnoloogiatükis. IL-e põhikomponendiks on transistor.

Integraallülituseks nimetatakse elektroonilist seadist, mis sisaldab 1 cm³ kohta vähemalt 5 üksikosa (transistori, diodi, takistit jne)

IL-ide valmistamisel rakendatakse *planaarmenetlust* (lad. “planum”- tasapind), mispühul lülituse struktuur moodustatakse räniplaadi õhukeses, mõne μm paksuses pindkihis ja pinnal. Tavaliselt valmistatakse kogu IL ühtse tehnoloogiaga, seadmed on paigaldatud ühtsesse kesta ning on omavahel seotud. Planaarmenetlusel valmistatud IL-i nimetatakse *monoliitintegraallülitusteks*. Peale monoliitlülituste valmistatakse ka nn. *hübriidintegraallülitusi*. Hübriidintegraallülituses on eraldi valmistatud seadised monteeritud isoleeralusele.

Integraallülitused jagunevad otstarbalt *analoog-* ja *digitaal integraallülitusteks*. Analoo-integraallülitusi kasutatakse pideva elektrisignaali võimendamiseks, muundamiseks ja genereerimiseks. Digitaal-integraallülitusi kasutatakse digitaalsete signaalide (loogikasignaalide) töötlemiseks ja ülekandmiseks. Transistorid töötavad digitaalsetes IL-des praktiliselt alati lülititalitluses.

Toodetakse ka mitmesuguseid *elemendikomplekte*: takistid, diodid, transistorid jne, kus elemendid pole omavahel ühendatud.

Monoliit-IL-te valmistamisel kasutatakse lähtematerjalina suuri, erimenetlusel kasvatatud väga puhtaid räni monokristalle, mis ei tohi sisaldada rohkem kui ühe soovimatu lisandiatomi miljardi räniatomi kohta. Ränikristalli silindrist läbimõõduga 150 mm või rohkem saetakse 1mm paksused kettad. Ühel kettal saab korraga valmistada sajad või tuhanded IL-d. Ketta peegelsiledaks poleeritud pinnale tekitatakse termiliselt ränidioksiidist (SiO_2) kaitsekiht. Pinnaosadelt kuhu on tarvis manustada lisandeid eemaldatakse oksiidikiht *fotolitograafiat* kasutades. Esmalt kaetakse pind polümeerse valgustundliku materjali (fotoresist) ühtlase kihiga. Sellele asetatakse vajaliku mustri (läbipastvate osadega) *fotošabloon* ehk *mask*. Ultraviolettkiirgusega eksponeerimisel tekib mustri varjatud kujutis, mille ilmutamise järel fotoresist lahustub kohtades, mida on vaja edasi töödelda, ja polümeriseerub ülejäänud pinnal moodustades happekindla kaitsekihi. Kaitsmata pinnaosadelt eemaldatakse ränidioksiid söövitamise teel.

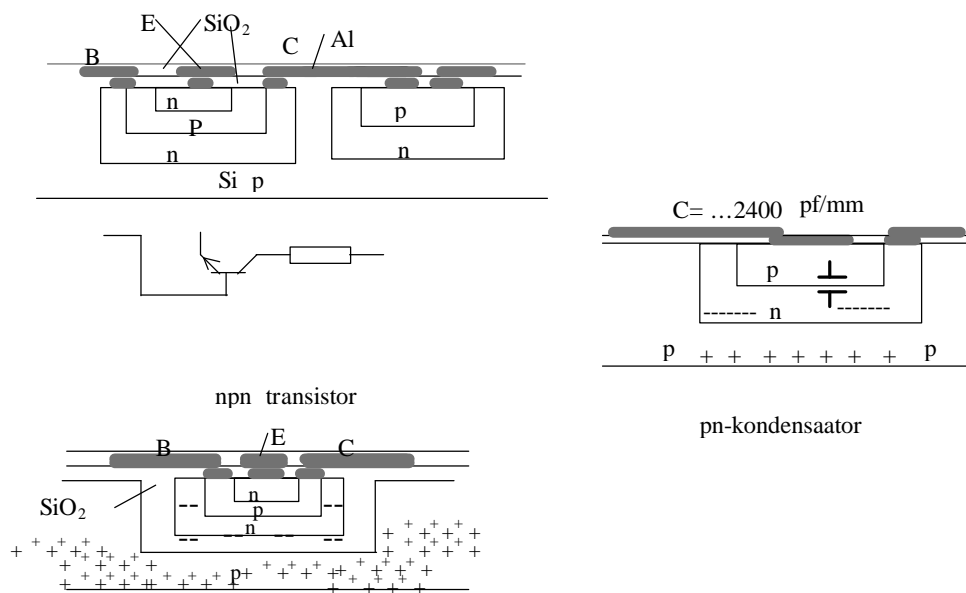
Suurem osa IL struktuure moodustatakse räniplaadi pinnal. Seda tehakse *epitaksiaalselt* s.t. aluskristallile kasvatatakse kristallvõret jätkav kiht. Selleks juhitakse ca. 1000°C temperatuuril üle aluskristalli gaasilises olekus räniühendit koos tarvilike lisanditega. Aluskristallil gaas laguneb ja pinnale moodustub ränikiht.

Sobiva aine gaasist kantakse valmistatava IL pinnale läbi maski ka elementidevahelised ühendused ja transistoride elektroodid samuti isoleerkiled. Komponentidevahelise isolatsioonina kasutatakse peamiselt vastupingestatud pn-siirdeid.

Valmis IL- id kontrollitakse üle ja eraldatakse üksteisest näiteks laserkiire abil. Töökorras kiibid kinnitatakse korpuse alusele ja IL-i kontaktpinnad ühendatakse viikudega. Lõpuks ümbritsetakse IL hermeetilise korpusega.

IL kavandatakse nii, et ta ei sisaldaks suure võimsusega takisteid ega suure mahtuvusega kondensaatoreid, sest need hõivaksid palju rohkem kristallipinda kui transistorid (nende joonmõõtmel on mikromeetrites). Väljatransistori kanali pikkusega väljendatakse integraaltehnoloogia arengujärke: 1,5 μm - st on jõutud 0,35

μm - tehnoloogiani. Takisti, kondensaatori ja transistori valmistamine epitaksiaal-planaarmeetodil on näidatud joonisel 6.1.



Joonis 6.1. Transistori, takisti ja kondensaatori valmistamine epitaksiaal-planaarmeetodil

Pn-isolatsiooni puuduseks on suur mahtuvus, mis vähendab IL-te piirsagedusi, kusjuures oksiidikihi kasutamine isolatsioonina võimaldab saavutada tunduvalt suuremaid piirsagedusi.

Tehnoloogiliselt on kõige paremate omadustega indutseeritava kanaliga MOP-transistorid, mis on lihtsad valmistada, neid pole vaja alusest isoleerida ja seetõttu võib neid tihedamalt paigutada. MOP-kanal sobib hästi ka takistiks kuid MOP-skeemid on tundlikud staatiliste pingete suhtes.

Hübriidlülituste komponendid on tavaliselt paremate omadustega, kuid ei võimalda nii suurt tihedust ja on kallimad ning seetõttu valmistatakse ka *kombineeritud integraallülitusi*.

IL-te erakordselt laiale nomenklatuurile ja tootvate firmade rohkusele vaatamata kasutatakse suhteliselt piiratud hulka standardkorpuse. Korpustel tähistega *DIL* (*dual in-line package* - kahes reas viikudega korpus) või *DIP* (*dual in-line, plastic package* - kahes reas viikudega plastikkorpus) väljuvad viigud kahelt küljelt ja on painutatud alla. Korpuse materjaliks on enamjaolt epoksüplast, keraamika või metallkeraamika. Viike on kummaski reas 2...32.

Planaarkorpusel *FP* (*flat package*) on lintviigud kahes reas korpuse tasapinnas. Korpuse materjaliks on plast, keraamika või metallklaas. Monteeritakse trükkplaadi pinnale (mitte aukudesse). Jäikade astmeliste viikudega korpused *SOP* on samuti ette nähtud pealismontaažiks. Plastikkorpusel *SIP* (*single in-line package*) on viigud ühes reas, *QUIP* ja *QUIC* korpustel neljas reas (kummalgi pool kahes reas). Piiratult on kasutusel ka transistorikorpused.

IL-ide tähistuses kasutatakse tähtede ja numbrite kombinatsiooni. Iga firma markeerib tooteid oma süsteemi järgi (ainult Euroopa firmad kasutavad, kas või osaliselt, pooljuhtseadiste tähistussüsteemi *Pro Electron*). Järgnevalt vaatleme näitena tähistussüsteemi *Pro Electron*. Esimene täht näitab IL- i liiki (S- digitaal, T- analoog), teine täht on firmatähis (D) ning kolmas täht näitab töötemperatuuri (näiteks A - normimata, B - 0...125°C jne). Tähtedele järgnev arv on toote seerianumber (näiteks TDA2030). Levinumateks tähistussüsteemideks on veel *Advanced Micro Devices-AMD* (USA), *Hitachi Ltd.* (Jaapan), *Intel* (USA), *Mitsubishi Electric Corp.* (Jaapan), *Philips* (Holland) jt.

6.2 Analooglülitused

Levinumad analoog IL- id on operatsioonivõimendid (vt. alajaotus 5.3). Toodetakse täppis-, müravaeseid-, laiaribalisi-, väikese voolutarbega ja madala toitepingega-, suure väljundpingega- ja suure väljundvooluga operatsioonivõimendeid.

OV- d koosnevad tavaliselt diferentslülituses sisendastmest, pingevõimendist ja vastastakt väljundastmest. Suure võimendusteguri tõttu vajab OV sageduskorrektsiooni, et ära hoida genereerimist. Toodetakse sise- ja väliskorrektsiooniga OV- sid.

Analoogl IL- idena valmistatakse ka helisagedusvõimendeid. Integraalne helisagedusvõimendi suurendab signaali allika (tuuner, magnetofon, plaadimängija) signaali võimsust kõlarisse või kuularisse juhtimiseks vajaliku tasemeni. Võimendisse on enamasti sisse ehitatud lülitused kaitseks liigkoormuse ja väljundi lühise eest. Võimendi tuleb monteerida radiaatorile, mis suudab hajutada lülituse maksimaalsel väljundvõimsusel hajuvat võimsust. See on enamasti 1,5...2 korda suurem nimivõimsusest.

Peale operatsioonivõimendite ja helisagedusvõimendite toodetakse veel järgmisi analooglülitusi:

- impulsiformeerikuid
- signaaligeneraatoreid
- detektoreid
- toiteallikaid, pingestabilisaatoreid
- modulaatoreid
- seadisekomplekte
- filtreid
- signaalimuundureid (AD-, DA- jne).

Vastavalt tellija soovile valmistatakse nn. tellija IL- e *ASIC* (*Application Specific Integrated Circuit*), mis sisaldavad nii analoog- kui digitaalkomponente.

6.3 Digitaallülitused

Digitaallülituste hulka kuuluvad järgmised integraallülitused:

- loogika IL-d
- lülitid

- trigerid
- mälud
- multipleksorid
- dekodeerid, koodimuundurid
- aritmeetikafunktsioonid
- taimerid
- protsessorid jne.

Järgnevalt vaatleme põhjalikumalt loogika integraallülituste ehitust. Loogikalülituste talitus põhineb transistorlülititel. Neist koostatakse loogikaelemendid, viimastest trigerid ning loogikaelementidest ja trigeritest mitmesuguse otstarbega liitlülitusi, nagu registrid, loendurid, dekodeerid, impulsikommutaatorid jne.

Enamlevinud loogika IL- id on *TTL* (bipolaartransistoridega), *KMOP* (komplementaarsete *MOP*- transistoridega), *CMOS* (komplementaarsete *MOS*, n- ja p-kanaliga transistoridega), *VMOS* (V-kujulise kanaliga *MOS*- transistoridega), *JMOS* (pn-siirde väljatransistoridega) ja *NMOS* (n-kanaliga MOSFET-idega).

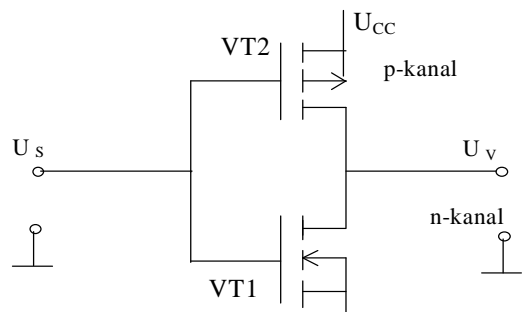
Loogikaelemente iseloomustavad ja võimaldavad omavahel võrrelda järgmised tunnussuurused:

1. *Staatiline- ja dünaamiline võimsustarve* on baaselemendi tarbitav keskmine võimsus vastavalt lülituse püsiolukorras ja ümberlülitamisel. Dünaamiline võimsustarve kasvab koos sagedusega.
2. *Toimekiirus* on signaali hilistus elemendi sisse ja väljalülitamisel.
3. *Ümberlülitusenergia* on inverteri dünaamilise võimsustarve ja hilistuse korrutis.
4. *Staatiline häirekindlus* on vähim häirepinge loogikaelemendi väljundis, mis võib põhjustada sinna ühendatud loogikaelemendi ümberlülitumise.
5. *Koormatavus* määrab elementide sisendite suurima arvu, mille tohib ühendada eelmise loogikaelemendi väljundisse.

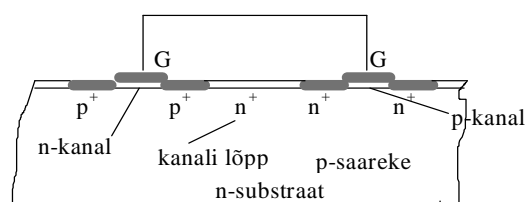
Alates 1960.a. on olnud laialt kasutusel USA firma *Texas Instruments* väljatöötatud transistor-transistorloogika (*TTL*-) seeriad. Nimetus väljendab seda, et nii lülituse sisendis kui väljundis on transistorid (sõna “loogika” on siin lülitite tähenduses). Standardse *TTL*- seeria 74SN00 binaarloogika baaselemendi *NAND* sisendis on *AND*- funktsiooni realiseeriv mitmeemitteriline transistor ja väljundis inverterina toimiv vastastaktaste.

Märksa paremate omadustega on seeriad, milles kasutatakse Schottky barjääriga transistore. Nende struktuuris on baasi ja kollektori vahel Schottky barjäär, mis vähendab siirde avamise lävipinget (0,7 voldilt 0,2...0,3 voldini) hoides ära transistori küllastumise. Seetõttu tõuseb loogikaelemendi töösagedus ja suureneb pingelang emittersiidel, mistõttu väheneb kollektorivool püsitalitluses.

Tänapäeval enamkasutatavad loogikalülitused valmistatakse väljatransistoride baasil (*KMOP*- loogikalülitused). Järgnevalt vaatleme lüliti (inverteri) skeemi, mis koosneb indutseerkanaliga *MOP*- transistoride komplementaarsest paarist s.t. üks p- teine n- kanaliga (*CMOS*). *CMOS* inverteri põhimõtteskeem ja struktuur on toodud joonisel 6.2.



a.)



b.)

Joonis 6.2. Lihtsaima *CMOS*-inverteri põhimõtteskeem a) ja struktuur b)

Transistorid on toiteahelas järjestikku. Kui pingeniivo kokkuühendatud paisudel on madal (signaal 0), siis on VT1 suletud, kuid VT2 avatud, sest tema pais on lätte suhtes negatiivne. Kuna avatud transistori kanali takistus on väike (sajad oomid), siis jääb tema pingelang alla 0,05 V, nii et väljundisse rakendub kogu toitepinge s.t. väljundis on signaal 1. Kui sisendsignaali tase muutub kõrgeks (keskmiselt pool toitepingest), siis VT1 avaneb, VT2 sulgub ja väljundsignaali väärtus läheneb nullile ($< 0,05$ V). Tingituna inverteri ülekandetusjoonte hajuvusest jääb ümberlülitumise lävipinge vahemikku $(1/3 \dots 2/3) U_{CC}$. Vastavalt on häirekindluse varu nii maa kui ka toitesiini suhtes vähemalt $0,33 U_{CC}$. Toitepinge võib olla stabiliseerimata ja erineda tunduvalt nimiväärtusest.

Kuna *KMOP*-inverteri üks transistoridest on alati suletud, siis püsiolukorras on energiatarve tühine (vool alla $1\mu A$). Ümberlülitamisel läbib inverterit vooluimpulss seetõttu, et hetkeks on osaliselt avatud mõlemad transistorid ja energiat kulub transistoride sisemahtuvuste ja ühendusjuhtidevaheliste mahtuvuste laadimiseks. Sellest tulenevalt kasvab energiatarve koos sagedusega, olles kümnetesse megahertsidesse uletuvatel taktsagedustel samas suurusjärgus *TTL*- inverteri omaga.

Kaasajal toodetakse põhiliselt *KMOP*- transistoridega integraallülitusi. Nende edasine areng on toimunud toitepinge alandamise suunas - pingeni 3,3 ja edasi 2,5 V, sest 0,35 μm - tehnoloogia korral osutuks 5 V pinge transistoridele juba ohtlikult kõrgeks.

6.4 Integraallülituste kasutamine

Integraallülituste väikeste mõõtmete tõttu on nendesse kuuluvate transistoride suurim lubatav vastupinge madal ja piir-hajuvõimsus väike. Seepärast tuleb kasutusele võtta abinõud lülituse liigkoormuse vältimiseks. IL- i toitepinge ei tohi ületada nimipinget sõltuvalt tüübist üldiselt mitte rohkem kui 5...10%.

Enamiku IL- ide kõrgem lubatav ümbrusetemperatuur on 75 või 85°C. IL- id peavad jääma eemale soojenevatest detailidest ning väljaspoole trafode magnetvälja.

Ümmarguse korpusega IL-i viigud painutatakse nii, et tema põhi jääks plaadist vähemalt 3 mm kaugusele. Painderaadius ei või olla väiksem viigu läbimõõdust või paksusest ja paindekoha kaugus korpusest peab olema vähemalt 1 mm. DIL- korpus jääb trükkplaadist astmeliste viikude poolt määratud kaugusele. Paindviikudega lamekorpused liimitakse tavaliselt plaadile.

Integraalkomponentidele, eriti kui nad sisaldavad MOP- ja Schottky barjääriga transistore, on vaatamata kaitseahelatele ohtlik staatiline elekter, mis halvendab lülituse omadusi või põhjustab dielektriku ja siirete läbilöögi (lülituse riknemise). Elektrostaatilise laengu lülitusse sattumise vältimiseks tuleb kasutada töötamisel maandatud käevõru ja töölaual maandatud metallplaati.

Kasutamata sisendviigud ühendatakse TTL- elementidel toiteallikaga läbi 1...2 k Ω takisti (igale takistile kuni 25 viiku), KMOP- loogikaelementidel toiteallikaga või kasutatud sisendviikudega. KMOP- komponentide viigud, millelt lähtuvad trükkplaadilt väljuvad juhtmed, tuleb maandada 1 M Ω takisti kaudu.

Häirepingete maandamiseks tuleb joota iga TTL- komponendi toiteviigu külge 0,01...0,02 μ F keraamiline šunteerimiskondensaator. KMOP- ahelates piisab ühest 0,1 μ F kondensaatorist viie komponendi kohta.

Komponente tuleb hoida kuni kasutamiseni tehasepakendis või metallfooliumis.

7 JÕUELEKTROONIKALÜLITUSED

7.1 Võimsuskaod jõuelektronikaseadistes

Läbiva voolu toimel tekib jõupooljuhtseadisel pingelang ja seega ka *kaovõimsus*, mille tõttu pooljuhtkristall kuumeneb. Seadise temperatuuri hoidmiseks lubatud piirides tuleb seega soojust pidevalt ära juhtida, s.t. seadist jahutada. Temperatuur tõuseb eksponentsiaalselt ja stabiliseerub sellel väärtusel, mille puhul siirdes tekkinud soojusvõimsus (kaovõimsus) ja jahuti poolt eemaldatav soojusvõimsus on võrdsed. Kuna kõik detailid omavad soojustakistust ja tekitavad temperatuurilangu osutub seejuures kõige kuumemaks pn- siire. Ülejäänud osade (jõupooljuhi kontaktpinnad, jahutusradiaator) temperatuurid on madalamad.

Jõupooljuhtide kaod jagunevad *juhtivuskadudeks* ja *lülituskadudeks*. Juhtivuskaod tekivad jõupooljuhi avatud (voolujuhtivas) olekus voolu ja päripingelangu mõjul. Vastuvoolude ja -pingete poolt tekitatud kaod on reeglina väikesed. Lülituskaod tekivad jõupooljuhi piiratud avanemis- ja sulgumiskiiruse tõttu ning pn- siiretes salvestunud laengute mõjul. Juhtivuskaod hetkväärtus leitakse valemist

$$P_{juh} = u_{juh} i,$$

kus i on voolu hetkväärtus ja u_{juh} pooljuhi päripingelang.

Juhtivuskaovõimsuse keskvärtus võrdub pooljuhi päripingelangu ja pärioolu korrutise keskvärtusega:

$$P_{juh} = \frac{1}{t} \int_0^t u_{juh} i dt = U_{juh} I_d,$$

kus t on vabalt valitud ajavahemik. Juhtivuskadude hulka kuuluvad ka *juhtimiskaod* (tüürahelas või baasiahelas eralduv võimsus), mis aga on jõuahela kadudega võrreldes niivõrd väike, et need võib jätta arvestamata.

Jõudiodi ja jõutüristori juhtivuskaovõimsuse keskvärtuse saame voolu keskvärtuse I_k ja efektiivväärtuse I_e järgi arvutada valemiga

$$P_{juh} = U_{F0} I_k + r_T I_e^2 = U_{F0} I_k + r_T F^2 I_e^2,$$

kus F on pärioolu kujutegur.

Muundurite pooljuhte läbivad voolud on enamasti nelinurkimpulsside või siinuse poollaine kujulised. Nelinurkimpulsside korral on voolu kujutegur

$$F = \sqrt{\frac{360}{\lambda}},$$

kus λ on juhtivusnurk ehk pooljuhti läbiva vooluimpulsi kestus elektrilistes kraadides. Siinuselise voolu kujutegur $F = 1,11$ ja siinuspoollainekujulise voolu kujutegur $F = 1.57$.

Lülituskadu jaguneb *avamis-* ja *sulgemiskaoks*. Lülituskadude täpseks arvutamiseks on vaja teada pinge ja voolu diagramme jõupooljuhi avanemisel ja sulgumisel. Avanemise kaoenergia määrab järgmine integraal:

$$W_{sl} = \int_0^{t_{sl}} u_{juh} idt ,$$

kus t_{sl} on avanemiskestus.

Analoogiliselt eelneva integraaliga määratakse ka sulgumise kaoenergia

$$W_{vl} = \int_0^{t_{vl}} u_{juh} idt ,$$

kus t_{vl} on sulgumiskestus.

Lülituskaovõimsuse tervikuna määrab lülitussagedus ning avanemise- ja sulgumise kaoenergia summa

$$P_{lül} = f(W_{sl} + W_{vl}) ,$$

kus f on lülitussagedus.

Tavaliselt kasutatakse kadude arvutamiseks pinge- ja voolukõverate lineaarset lähendust, s.t. kõverad asendatakse sirgloikudega, mida on lihtsam integreerida. Levinumate impulsside kujudele vastavad lülituskaod on antud diagrammidena jõupooljuhtide kataloogides.

Jõutüristoridel ja jõudiodidel tekib avanemishetkel kadu siiretes salvestunud laengute tekitatud vooluimpulsi tõttu:

$$P_{vl} = fU_R Q_f ,$$

kus U_R on vastupinge ja Q_f jääklaeng, mis kantakse pooljuhist välja vastuvoolu kahanemise ajal, kui vastupinge on juba rakendunud.

Madalatel sagedustel (näiteks võrgusagedus) moodustavad lülituskaod kaovõimsusest ainult mõne protsendi ning neid võib mitte arvestada. Kui aga vool kasvab avanemishetkel kiiresti või lülitussagedus on suur, tuleb lülituskadusi tingimata arvestada. Lülituskadude täpne arvutus on keerukas kuna tuleb arvestada voolu ja pinge kasvukiirusi lülitushetkel. Voolu ja pinge kasvukiirused aga sõltuvad tugevalt kaitseahelatest, ahela induktiivsustest ja mahtuvustest ning seetõttu on otstarbekas kaovõimsusi simuleerida arvutil.

Kaovõimsus tervikuna on võrdne juhtivuskao ja lülituskao summaga

$$P_{\Sigma} = P_{juh} + P_{lül} .$$

Pooljuhi suurima kestvalt lubatud kaovõimsuse määrab siirde suurim lubatav temperatuur. Tööprotsessi vältel ei tohi pn- siirde temperatuur mistahes koormusvoolu väärtuse ega vooluimpulsside kuju korral seda väärtust isegi lühiajaliselt ega lokaalselt ületada.

Kaovõimsus P_{Σ} ei tohi ületada pooljuhile lubatud väärtust, mis on määratud avaldisega

$$P_{\Sigma} \leq P_{TOT} = \frac{T_{j\max} - T_{amb}}{R_{thja}},$$

kus $T_{j\max}$ on siirde suurim lubatav temperatuur, T_{amb} jahutuskeskkonna (õhk, vesi jt) temperatuur, R_{thja} soojustakistus siirde ja jahutuskeskkonna vahel.

Jõupooljuhi jahutus peab olema piisav, et ei tekiks ülekuumenemist, mille tulemusel jõupooljuht võib kiiresti rikneda. Jõupooljuhtide väikese soojusmahtuvuse tõttu on nende jahutus kriitilisem kui teistel skeemielementidel (näiteks trafodel), sest soojuslikud siirdeprotsessid on kiiremad.

Jõupooljuhtide jahutamiseks kasutatakse:

- loomulikke õhkjahutust,
- sund-õhkjahutust,
- vedelikjahutust,
- aurustusjahutust.

Loomuliku õhkjahutuse korral jahutatakse jõupooljuhti loomuliku konvektsiooni teel liikuva õhuvooluga. Jahutuse intensiivsuse suurendamiseks kasutatakse alumiiniumist ribilisi jahutuskehi (radiaatoreid).

Sund-õhkjahutuse korral tagatakse jahutusõhu vajalik kogus ja liikumiskiirus jahutusventilaatoriga.

Vedelikjahutuse korral juhitakse soojus ära vedeliku (vee, trafoõli, glütseriini vms) abil. Eriti efektiivselt toimib jahutus vedeliku aurustamisega, mille puhul vedelik aurustis keeb. Vedeliku aurustumine eemaldab jahutist täiendavalt soojusenergiat. Tavaliselt kasutatakse sellistes jahutites alarõhu all olevat vett, mis keeb näiteks 70°C juures. Veeaur suundub välisesse soojusvahetisse, milles aur jahtub ja kondenseerub.

7.2 Alaldid ja vaheldid

Alaldi abil muundatakse siinuseline vahelduvpinge pulsseerivaks alalispingeks. Alaldid jagunevad *tüüritavateks* ja *mittetüüritavateks*. Mittetüüritav alaldi koosneb diodidest, tüüritav aga türistoridest. Kasutatakse ka *osaliselt tüüritavaid* alaldeid, mis sisaldavad nii diode kui türistore.

Tüüritavate- ja osaliselt tüüritavate alaldite väljundpinget saab reguleerida türistoride sisselülitamishetke (tüürnurga) muutmisega alates türistoridel päripinge tekkimise hetkest. Mittetüüritava alaldi väljundpinget saab muuta vaid vahelduvpinge muutmisega.

Kui tüüritava alaldi türistoride viivitus avanemisel on suur ja väljundpinge on madalam koormuse pingest siis tagastub koormusesse salvestunud energia vahelduvvooluvõrku. Seda olukorda nimetatakse *vahelditalitluseks* ja seadet, mis on projekteeritud niimoodi töötama *võrguga sünkroniseeritud vaheldiks* (inverteriks).

Võrguga sünkroniseeritud alaldid ja vaheldid vajavad töötamiseks võrgupinge olemasolu. Voolu kulg ühest muunduri harust teise ja ventiilide sulgumine toimub sisendpingete mõjul s.t. tegemist on *loomuliku kommutatsiooniga*. **Tüüritavad alaldid ja võrguga sünkroniseeritud vaheldid moodustavad pööratava süsteemi s.t. ühed ja samad tüüritavad muundurid võivad üldjuhul töötada nii alaldina kui vaheldina.**

Enamkasutatavad muundurite lülitused on standardiseeritud. Muundurite (alaldite ja vaheldite) põhilülitused ja saksa standardi (DIN) kohased tähised on järgmised:

- ühefaasiline poolperioodmuundur M1,
- ühefaasiline keskväljavõttega muundur M2,
- kolmefaasiline keskväljavõttega muundur M3,
- ühefaasiline sildlülituses muundur B2,
- kolmefaasiline sildlülituses muundur B6.

Esimesel kohal olev täht näitab lülituse tüüpi (M- keskväljavõttega lülitus, B- sildlülitus), esimesele tähele järgnev number (1, 2, 3 või 6) näitab väljundpinge pulsside arvu ühes sisendpinge perioodis (pulsilisust), teine täht näitab tüüritavust (C- tüüritav, U- mittetüüritav, Z- osaliselt tüüritav) ja kolmas täht näitab jõupooljuhtide lülitusviisi (A- ühise anoodiga, K- ühise katoodiga).

Suure võimsuse korral kasutatakse ka kuuefaasilisi lülitusi, kolmefaasilisi nulldiodiga lülitusi ning mimeid teisi. Täpsem ülevaade muundurite põhilülitustest ja nende elektrilistest skeemidest on toodud kasutatud kirjanduses [1].

Käesolevas peatükis käsitletakse põhjalikumalt ühefaasilise tüüritava poolperioodalaldi, ühefaasilise tüüritava sildalaldi ja kolmefaasilise tüüritava sildalaldi skeeme, tööpõhimõtet ning pingete ja voolude diagramme.

Ühefaasilist poolperioodlülitust kasutatakse väikesevõimsuselistes alaldites ja vaheldites.

Märkus: muundurid M1, M2, M3, B2 ja B6 lugeda

<http://www.ene.ttu.ee/elektriamid/> AAV3361 materjalist "Jõuelektronika".