

3. JÕUPOOLJUHTSEADISED

3.1. Ülevaade

Pooljuhtseadiste kiire arengu alguseks võib lugeda 1940. aastate lõppu, mil USA teadlased J. Bardeen, W.H. Brattain ja W.B. Shockley leiutasid esimesed punkt- ja pindtransistoride tüübid. Kõik kolm said hiljem oma leiutiste eest Nobeli preemia. Kui esialgu kuulus pooljuhttehnika nn. nõrgavoolutehnika valdkonda, siis pärast türistori leiutamist 1956. aastal hakati pooljuhte üha enam rakendama ka energiatehnika aladel, eelkõige elektrimootorite juhtimiseks. Tänapäeval on pooljuhttehnika üha selgemalt jagunemas kahe eri haru vahel. Ühelt poolt toodetakse üha väiksemate mõõtmetega, väiksema energiatarbe ja suurema integratsiooniastmega mikrolülitusi. Teiselt poolt kasvavad aga pidevalt jõupooljuhtseadiste nimipinge ja nimivoolud. Mikrolülituste ja jõupooljuhtlülituste valmistamise tehnoloogiad hakkavad üha enam teineteisest lahkuma.

Jõupooljuhtseadised (*power semiconductor devices*) töötavad lülitustalitluses, mil neil on vaid kaks võimalikku olekut: juhtivolek ja isoleerolek. Juhtivolekus on neil minimaalne päripingelang, isoleerolekus aga minimaalne vool (lekkevool). Seejuures on väga olulised nende järgmised tehnilised omadused:

- 1) suur läbilöögipinge
- 2) väike päripingelang ja väike takistus juhtivas olekus
- 3) väike sisse- ja väljalülitusaeg ehk teisiti öeldes suur toimekiirus
- 4) suur soojussiirdetegur

Kõiki neid omadusi korraga on mingi kindlat tüüpi pooljuhtseadise puhul väga raske saavutada. Tavaliselt on võimatu saavutada samaaegselt suurt läbilöögipinget ja väikest päripingelangu. Bipolaarsete transistoride puhul on võimatu samaaegselt saavutada väikesi pärioolukadusid ning suurt toimekiirust. Sellest järeldub, et eri rakenduste puhul tuleb vastavalt tehnilistele tingimustele rakendada eri tüüpi jõupooljuhtseadiseid. Liite *jõu-* asemel võib pooljuhtseadise tüübinimele vajaduse korral lisada ka seadise omadust tähistava sõnaühendi, nt. *suure võimsusega diood*. Spetsiaalselt tugevvooluahelate (jõuahelate) jaoks mõeldud pooljuhtseadiste (nt. türistoride) puhul pole liite jõu- kasutamine vajalik. Märkigem, et tugev- ja nõrgavooluseadmete vahel pole selget piirjoont. Elektriseadmete puhul ulatuvad juhtahelate (nt. releede väljundkontaktide) voolud kuni 5 amprini. Suuremate voolude puhul võib rääkida jõuahelatest. Mikroelektronika seisukohalt on ka 5 A vool piisavalt suur, et lugeda vastavat ahelat jõuahelaks.

Enamkasutatavateks jõupooljuhtseadisteks on

- jõudiodid
- jõu-bipolaartransistorid
- jõu-väljatransistorid (MOSFET jõutransistorid)
- mittetäielikult juhitud tavatüristorid ehk SCR türistorid
- suletavad türistorid ehk GTO türistorid
- isoleeritud baasiga bipolaartransistorid ehk IGBT transistorid

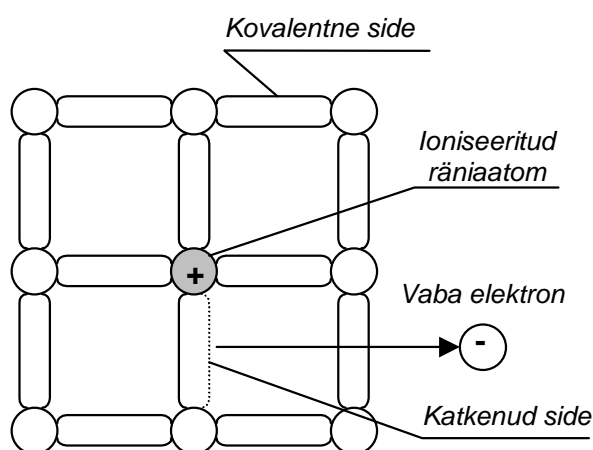
Elektrivool tekib materjalis vabade laengukandjate (nt. elektronide) olemasolu korral. Vabad laengukandjad võivad materjalis vabalt liikuda sõltuvalt rakendatud elektriväljast. Laengukandjate arv materjalis erineb sõltuvalt materjalist väga suurtes piirides. **Metallides**, nagu vases, hõbedas jt. on vabade elektronide ruumtihedus (ehk elektronide arv ruumiühikus) suurusjärgus $10^{23} / \text{cm}^3$. **Isolaatorites**, nt kvartsis, on vabade elektronide tihedus väiksem kui

$10^3 / \text{cm}^3$. Sellest tulenevalt on ka metallide ja isolaatorite elektrijuhtivus väga erinev, ulatudes 10^6 S/cm metallide puhul kuni 10^{-15} S/cm isolaatoritel. Märkusena võib lisada, et juhtivusühiku S (siimensi) asemel kasutatakse inglisekeelses kirjanduses sageli tähist mho , mis tuleneb tagurpidi kirjutatud sõnast ohm e. takistuse tähisest Ω . Mõnede materjalide puhul, nt. räni, ränikarbiidi, galliumarseniidi, puhul on vabade laengukandjate arv ja elektrijuhtivus metallide ja isolaatorite vahepealne. Neid materjale nimetatakse **pooljuhtideks**. Metallides ja isolaatorites on vabade laengukandjate arv ligikaudu konstantne ning seda pole võimalik oluliselt muuta. Pooljuhtide vabade laengukandjate arvu saab muuta suurtes piirides (mitme suurusjärgu ulatuses) nii teatud lisandite viimisega materjali kui ka elektrivälja rakendamisega. Just see pooljuhtide omadus on muutnud need materjalid elektrotehnikas eriti huvipakkuvaks.

3.2. Jõupooljuhtseadiste tööpõhimõte

Elektronid ja augud

Tänapäeval enamlevinud pooljuhtmaterjalil ränil on regulaarse struktuuriga kristallvõre (joonis 3.1). Iga üksik räniaatom on seotud nelja lähima naaberaatomiga elektronide kovalentse sidemega (*covalent bond*). Temperatuuri toimel hakkavad need sidemed katkema. Vastavat protsessi nimetatakse **termoionisatsiooniks** (*thermal ionization*) ning selle tulemusena tekivad materjalis vabad elektronid. Oma kohalt lahkunud negatiivse laenguga elektron jätab kristallvõresse positiivse laenguga tühja koha ehk augu. Selle augu võib mõne aja pärast täita mõni teine elektron, jättes oma endisele kohale uue augu. Nii põhjustab termoionisatsioon võrdse arvu vabu elektrone ja auke. Omajuhtivusliku pooljuhi (*intrinsic semiconductor*) elektronide ja aukude tihedus sõltub pooljuhi keelutsoonist (*energy gap*), mis räni puhul on 1,1 eV, elektroni laengust, Boltzmanni konstandist ja temperatuurist. Toatemperatuuril (300 K) on räni vabade elektronide ja aukude tihedus on suurusjärgus $n_i = 10^{10} / \text{cm}^3$.

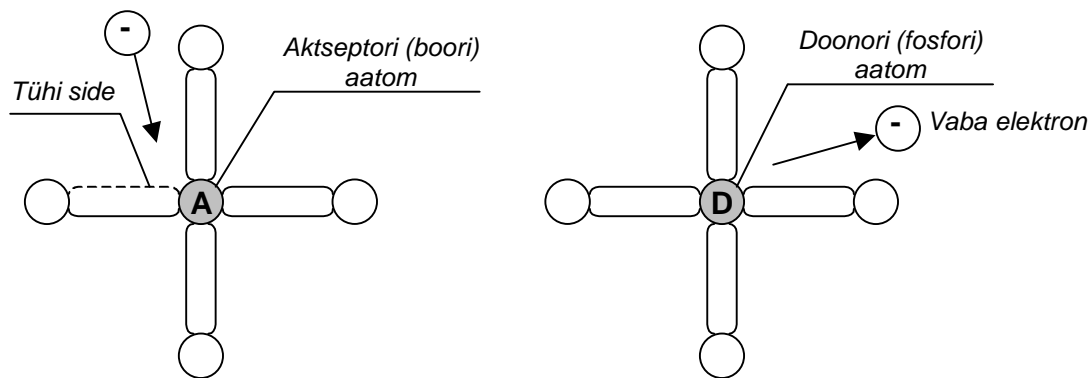


Joonis 3.1. Räni kristallvõre ja vaba elektron

Legeerimine ehk lisandite sisseviimine metalli

Elektronide ja aukude tasakaalu saab muuta pooljuhi legeerimisega (*doping*), s.t. teatud lisandiatomite viimisega pooljuhtmaterjali. Räni puhul kasutatakse legeerimiseks elementide perioodilisustabeli III ja V tulpa elemente nagu nt. boori ja fosforit (räni ise kuulub perioodilisustabeli IV tulpa). Kolmevalentsel booril on ainult 3 elektroni. Seetõttu vajab

neljavalentse räni kristallvõresse sattunud boori aatom ühte lisaelektroni, et taastada kõik neli sidet lähiaatomitega. Seega on boori aatom valmis haarama enda külge vaba elektroni. Nii jääb elektron paigale ning augul tekib võimalus liikuda vabalt läbi kristallvõre. Legeerimise tulemusena tekib ränis rohkem auke ehk **enamuslaengukandjaid** (*majority carriers*) kui vabu elektrone ehk **vähemuslaengukandjaid** (*minority carriers*). Boor etendab räni kristallvõres **aktseptori** rolli. Niisugusel juhul on räni lisanditega legeeritud positiivselt ehk p-tüüpi. Viievalentsel fosforil on 5 elektroni. Seetõttu jääb neljavalentse räni kristallvõresse sattunud fosfori aatomil üks elektron vabaks. Legeerimise tulemusena on räni kristallvõre kõik augud täidetud, s.t. positiivsed laengud on kinni püütud (*trapped or bound holes*). Enamuslaengukandjateks on sel juhul elektronid ja vähemuslaengukandjateks augud. Niisugusel juhul on räni lisanditega legeeritud negatiivselt ehk n-tüüpi. Fosfor etendab räni kristallvõres **doonori** rolli (joonis 3.2).



Joonis 3.2. Ränis legeerimine aktseptorite ja doonoritega

Lisandiaatomite tihedus materjalis on mitu suurusjärku väiksem kui materjali enda aatomite tihedus. Seepärast ei mõjuta lisandiaatomid termioionisatsiooniprotsessi (elektronide ja aukude rekombineerumist) ning aukude tiheduse p_0 ja vabade elektronide tiheduste n_0 korrutis $p_0 n_0 = n_i^2$, on võrdne legeerimata materjali vabade elektronide ja aukude tiheduse ruuduga, isegi juhul kui p_0 ja n_0 pole võrdsed. Sellest järeldub, et legeeritud (*extrinsic*) materjal on elektriliselt neutraalne, kuigi p_0 ja n_0 pole võrdsed.

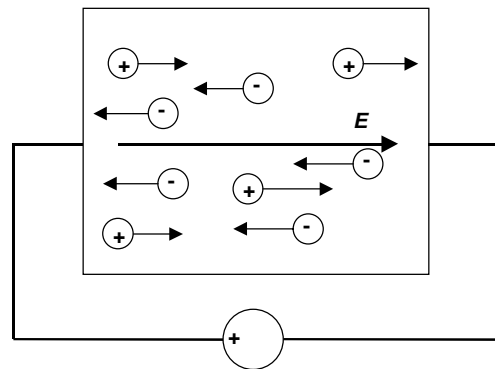
Rekombineerumine

Termilise tasakaalu olukorras toimub liigsete elektronide ja aukude tekkimine ja kadumine sama intensiivsusega. Seda protsessi iseloomustab liigsete laengukandjate eluiga τ (*excess-carrier lifetime*). Enamikel juhtudel võib τ lugeda materjalist sõltuvaks konstantseks suuruseks. Kuid sellel reeglil on ka erandid. Esiteks, jõupooljuhtide korral võib liigsete laengukandjate eluiga oluliselt suureneeda koos pooljuhtseadise temperatuuri tõusuga. Selle tulemuseks on omakorda pooljuhtseadise (nt. bipolaartransistori, türistori või GTO) lülitusaja suurendamine. Teiseks, liigsete laengukandjate suure tiheduse korral hakkab nende eluiga sõltuma tihedusest endast. Alates liigsete laengukandjate teatud tihedusest muutub rekombinatsiooniprotsessi iseloom. Liigsete laengukandjate suure tiheduse korral käivituv nn. Augeri rekombinatsiooniprotsess vähendab liigsete laengukandjate eluiga. Reaalsete seadiste puhul avaldub see nähtus mõnede jõupooljuhtseadiste juhtivuskadude suurendamises suurte voolude piirkonnas. Seega on liigsete laengukandjate elueal oluline mõju jõupooljuhtseadistele. Liiga väikese eluea korral suurenevad pooljuhi juhtivuskadud, liiga suure eluea korral aga aeglustub lülitusprotsess ning suurenevad kommutatsioonikaod.

Pooljuhtseadiste tootmisel on liigsete laengukandjate eluea kontroll väga oluline. Tootmises kasutatakse selleks kahte tehnoloogilist võtet. Esiteks kasutatakse pooljuhtmaterjali legeerimist mingi raskemetalliga (nt. kullaga), kus lisandmetall toimib ränikristallis rekombineerumiskeskmena. Suurem hulk lisandit vähendab liigsete laengukandjate eluiga. Teiseks võimaluseks on pooljuhtkristalli *pommitamine* elektronikiirega (*electron irradiation*) nii, et sissetungivad elektronid lõhuvad pooljuhtmaterjali kristallvõre. Kristallvõre vigastatud kohad moodustavad rekombineerumiskeskmeid. Nende tehnoloogiliste võtetega hoitakse liigsete laengukandjate eluiga täpse kontrolli all ning tootmisprotsessi tulemusena saadakse soovitud omadustega jõupooljuhtseadis.

Triiv ja difusioon

Elektrivool pooljuhis võrdub auguvoo ja vastassuunalise elektronivoo (laenguvoogude) summaga, Vabad laengukandjad liiguvad kahel viisil – triivi ja difusiooni teel. Juhul kui pooljuhile rakendatakse elektrivälja, siis vabade aukude liikumine kiireneb, kusjuures nende kiirusvektor on paralleelne rakendatud elektrivälja suunavektoriga. Elektronide kiirusvektor elektrivälja suunavektoriga vastuparalleelne (joonis 3.3). Kirjeldatud elektrivoolu komponenti nimetatakse **triivivooluks** (*drift component*).



Joonis 3.3. Elektronide ja aukude liikumine (triiv) välise elektrivälja toimel

Juhul kui pooljuhis tekib ebahütlane lisandi kontsentratsiooni jaotus, siis tekib vabade laengukandjate liikumine suurema kontsentratsiooniga alast väiksema kontsentratsiooniga alasse. Niisugusest laengukandjate liikumisest tingitud voolukomponenti nimetatakse **difusioonivooluks** (*diffusion component*). Laengukandjate ruumilist ebahütlust saab tekitada mitmel viisil, sh. ka legeerimise kontsentratsiooni muutmisega.

pn-siirded

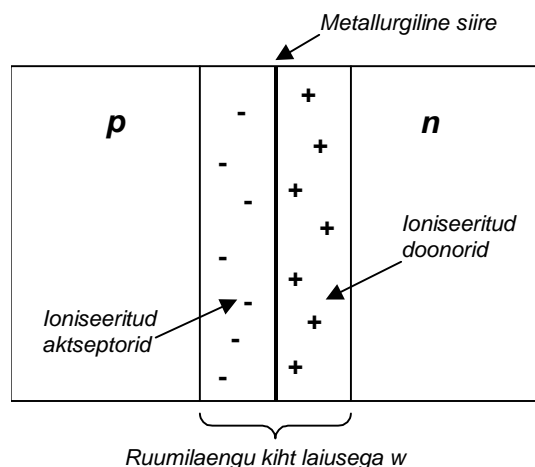
Pooljuhi pn-siire moodustamiseks on vajalik, et ränikristalli *n*-tüüpi juhtivusega pooljuhtala oleks kõrvuti *p*-tüüpi juhtivusalaga. Sel juhul on kõrvuti olevates alades elektronide ja aukude kontsentratsiooni suur erinevus. Nende alade metallurgilisel ühendamisel tekib laengukandjate intensiivne difusioon ja liitekohta läheduses tekivad tugevad ruumilaengud. Elektronid lahkuvad *n*-alast jättes sinna positiivse ruumilaengu ioniseeritud doonoriatomite näol ning moodustavad negatiivse ruumilaengu *p*-alal. Vastupidi, *p*-alast lahkuvad augud jätavad sinna ruumilaengu negatiivsete aktseptorionide näol ning moodustavad positiivse ruumilaengu *n*-alal. Tekkinud ruumilaeng hakkab edasist difusiooni takistama.

Niisuguse siirde saab tekitada ka aktseptorlisandite difundeerimisega *n*-tüüpi juhtivusega pooljuhtalasse. Võib kasutada ka vastupidist toimingut, doonorlisandite difundeerimist *p*-tüüpi pooljuhtalasse. Pooljuhtseadise *pn*-siiret iseloomustab see, kuidas muutuvad

leegerimislisandid siirdealas. Siire üht tüüpi (nt. n -tüüpi) juhtivusega alast teist tüüpi (nt. p -tüüpi) juhtivusega alasse võib toimuda kas astmeliselt või sujuvalt, nt. lineaarselt. Ühel juhul on tegemist astmelise siirdega (*step or abrupt junction*), teisel juhul aga lineaarse siirdega (*linearly graded junction*). Pooljuhtseadise pn -siiret iseloomustab ka leegerimislisandite suhteline tihedus, see kas **aktseptorlisandite** tihedus p -juhtivusallas on suurem või väiksem kui **doonorlisandite** tihedus n -juhtivusallas (joonis 3.4). Jõupooljuhtseadiste puhul on võimalikud mitmesugused kombinatsioonid.

Potentsiaalibarjäär soojusliku tasakaalu olekus

Mõned enamuslaengukandjad võivad siirde ühelt poolelt difundeeruda siirde teisele poolele, kus nad on vähemuses. Nii moodustub siirde mõlemal poolel hõlmav ruumilaengu kiht (*space charge layer*), sest difundeerunud laengukandjad jätavad endast maha liikumatud ioniseeritud lisandid, mille neutraliseerimiseks pole ka piisavat hulka vabu laengukandjaid. Protsessi tulemusena tekib ruumilaeng tihedusega ρ . Ruumilaengu olemasolu põhjustab omakorda elektrivälja, mille tugevus sõltub laengu suuruselt. Elektriväli toimib aga ruumilaengut pärssivalt, sest ta tõrjub elektrone tagasi n -tüüpi juhtivusallasse ja aukusid tagasi p -tüüpi juhtivusallasse. Tasakaal saabub juhul kui difusioonist tingitud laengukandjate voog võrdsustub vastassuunalise elektriväljast tingitud laengukandjate vooga (triiviga). Soojuslikus tasakaaluolekus on pn -siirdel kindel kontaktpotentsiaal. Näiteks räni puhul on pn -siirde kontaktpotentsiaal toatemperatuuril suurusjärgus $\varphi_c = 0,7...0,9$ eV.



Joonis 3.4. Ruumilaengukihiga ehk tõkkekihiga pn siire

Päri- ja vastassuunaliselt pingestatud pn -siire

Välise pinge rakendamisel pn -siirdega pooljuhile tekib olukord, kus enamus pinget langeb ruumilaengukihile ehk nn. **vaesestusalale** (*depletion region*) seetõttu, et viimase elektriline takistus võrreldes materjali ülejäänud aladega on suur. Vaesestusalaks nimetatakse ala seetõttu, et seal puuduvad vabad laengukandjad. Kui rakendatud pinge (+) potentsiaal langeb p -tüüpi juhtivusallasle, toimib väline pinge kontaktpotentsiaalile vastu ja vähendab potentsiaalibarjääri. Sel juhul on pn -siire pärisuunas eelpingestatud (*forward biased*). Kui rakendatud pinge (+) potentsiaal langeb n -tüüpi juhtivusallasle, on tegemist pn -siirde vastassuunalise eelpingega (*reverse biased*) ning potentsiaalibarjäär suureneb (joonis 3.5). Ruumilaengukihi (tõkkekihi) laius peab sel juhul samuti kasvama

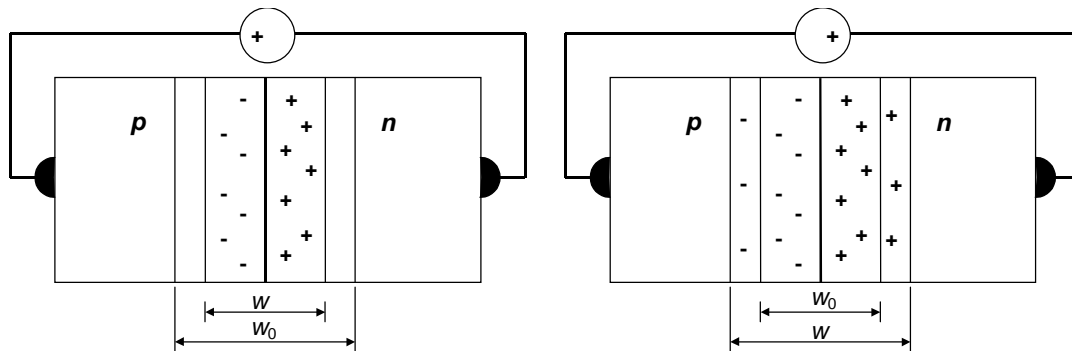
Laengutihedus on võrdne lisanditihedusega (s.o. konstantne). Kogulaengu muutus saab seetõttu toimuda juhul kui muutuvad tõkkekihi mõõtmed. Sellest tulenevalt on

jõupooljuhtseadiste disaini seisukohalt väga oluline pingestatud pooljuhtsiirde tõkkekihi mõõtmete muutmine.

pn-siirde laengute juhtimine

Vastupinge suurendab potentsiaalibarjääri, mis omakorda muudab tõenäosuse, et mõni laengukandjatest difundeerub läbi siirde, kaduvväikeseks. Rakendatud elektrivälja suure tugevuse tõttu tõrjutakse laengukandjad tõkkekihist kiiresti eemale: elektronid n -tüüpi juhtivusalale ja augud p -tüüpi juhtivusalale. Pooljuhtsiiret läbivat väikest lekkevoolu nimetatakse vastusuuna küllastusvooluks (*reverse saturation current*) I_s . Lekkevoolu suurus ei sõltu rakendatud pingest. Küll mõjutab aga lekkevoolu suurust ruumilaengu kihis toimiv soojuslik ionisatsiooniprotsess.

Päripinge vähendab potentsiaalibarjääri ning tekitab triivi- ja difusioonivoolu tasakaalu.



Joonis 3.5. Päri- ja vastupingestatud pn-siire

Laviinläbilöök (avalanche breakdown)

Pooljuhtsiirde vastupinge suurendamine üle teatud piirväärtuse $U_{BD\ back}$ põhjustab voolu järsu suurenemise. Seda voolu nimetatakse vastusuuna läbilöögivooluks (*reverse breakdown current*) või laviinläbilöögiks (*avalanche breakdown*). Pooljuhtdiodi talitlust läbilöögialas tuleb vältida, sest sel juhul on suure vooluga pooljuhtsiirdele samaaegselt rakendatud ka suur pinge, mistõttu suur eralduv võimsus põhjustab seadme kiire riknemise. Läbilööki põhjustab füüsikaliselt nn. põrkeionisatsioon (*impact ionization*).

Põrkeionisatsioon

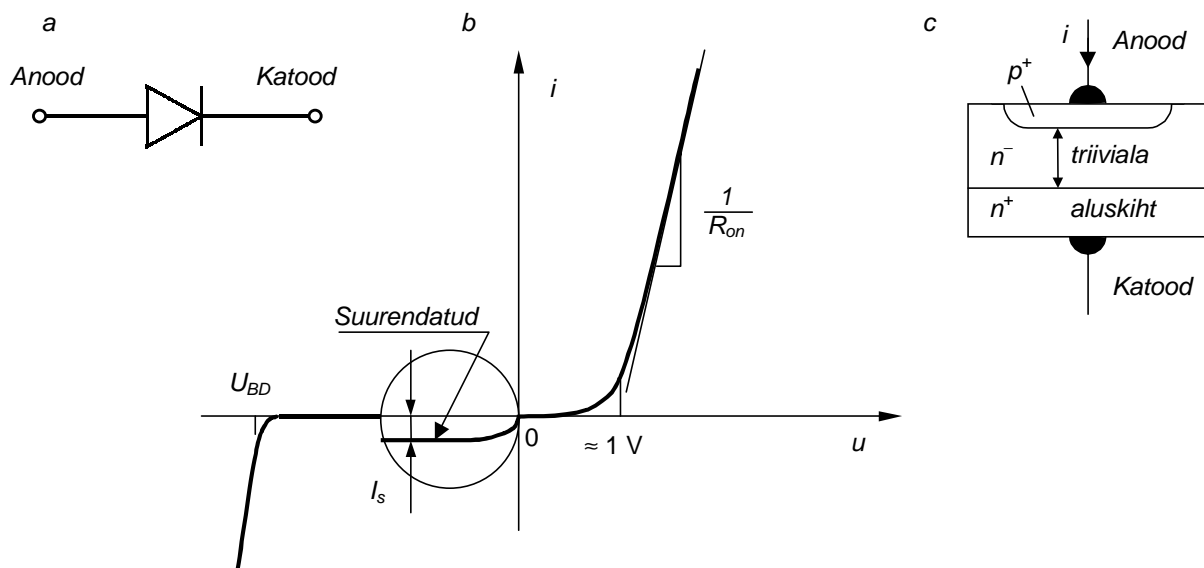
Kui piisavalt suure energiaga vaba elektron põrkab kokku räniaatomiga, võib ta lõhkuda kovalentse sideme ning vabastada uue elektroni. Kui elektroni kineetiline energia on põhjustatud välise elektrivälja poolt nt. ruumilaengu kihi vastupingest, nimetatakse elektroni vabastamist põrkeionisatsiooniks. Protsess võib kulgeda laviinilaoliselt nii, et vabastatud elektron kogub elektriväljas piisava energia ning on suuteline kokkupõrkes räniaatomiga vabastama uue lisaelektroni. Iga elektroni vabanemisel tekib ka positiivselt laetud auk. Laviinprotsess tekitab kiiresti suure hulga vabu elektrone ja vabu auke, koos sellega ka suure voolu ning suure eralduva võimsuse. Põrkeionisatsiooni tekitamiseks on vajalik ligikaudu konstantse tugevusega elektrivälja E_{BD} , mille väärtus sõltub keelutsoonist (*energy gap*), kokkupõrgete vahelisest ajavahemikust, elektroni laengust ja elektroni massist ($m = 10^{-27}$ g). Ráni puhul on E_{BD} arvutuslikuks väärtuseks 300 kV/cm. Katseliselt on leitud laviinläbilöögipingete väärtuseks 200 kV/cm.

Pooljuhtsiirde läbilöögipingete väärtus sõltub siirdekhi lausest. Jõupooljuhtide puhul ulatub läbilöögipingete väärtus sadadest kuni tuhandete voltideni.

3.3. Jõudiodid

Jõupooljuhid, sealhulgas ka jõudiodid on oma ehituselt ja kasutatavate tunnussuuruste poolest keerukamad kui neile vastavad väikesevõimsuselised analoogid. Keerukus tuleneb paljudest täiustustest, mis on vajalikud selleks, et rakendada pooljuhtseadiseid suure võimsusega elektrilülitustes ning jõuseadmetes. Väikese ja suure võimsusega seadmeid eristavad pooljuhtstruktuuri muudatused on üldise iseloomuga, s.t. et neid põhimõtteid, mida rakendatakse jõudiodi juures, saab rakendada ka teiste jõupooljuhtide puhul.

Erinevalt väikesevõimsuselisest diodist, kasutatakse jõudiodi volt-amper-tunnusjoone (vt. joonis 3.6) puhul eksponentsiaalse läbilöögikõvera asemel tema juhtivuse iseloomustamiseks pärisuuna takistust R_{on} . See võimaldab kirjeldada jõudiodi päripingelangu ja kadusid sõltuvalt diodi läbivast voolust. Diodi maksimaalselt lubatud vool sõltub tema pn -siirde pindalast A . Jõudiodide puhul, mille nimivoolud ulatuvad tuhandetesse ampritesse, ulatub pn -siirde pindala A kümnete ruutsentimeetriteni. Jõudiodi pn -siirdes on anoodiga ühenduses oleva p^+ ja katoodipoolse aluskihi (*substrate*) n^+ kihi vahel n^- kiht, mida nimetatakse triivialaks (*drift region*). Kihi paksus sõltub diodi **vastusuuna läbilöögipingest** (*reverse breakdown voltage*). Kihi olemasolu tõttu suureneb ka diodi pärisuunaline oomiline takistus.



Joonis 3.6. Jõudiodi tingmärk (a), pn -siirde volt-amper tunnusjoon (b) ja pn -siirde ristlõige (c).

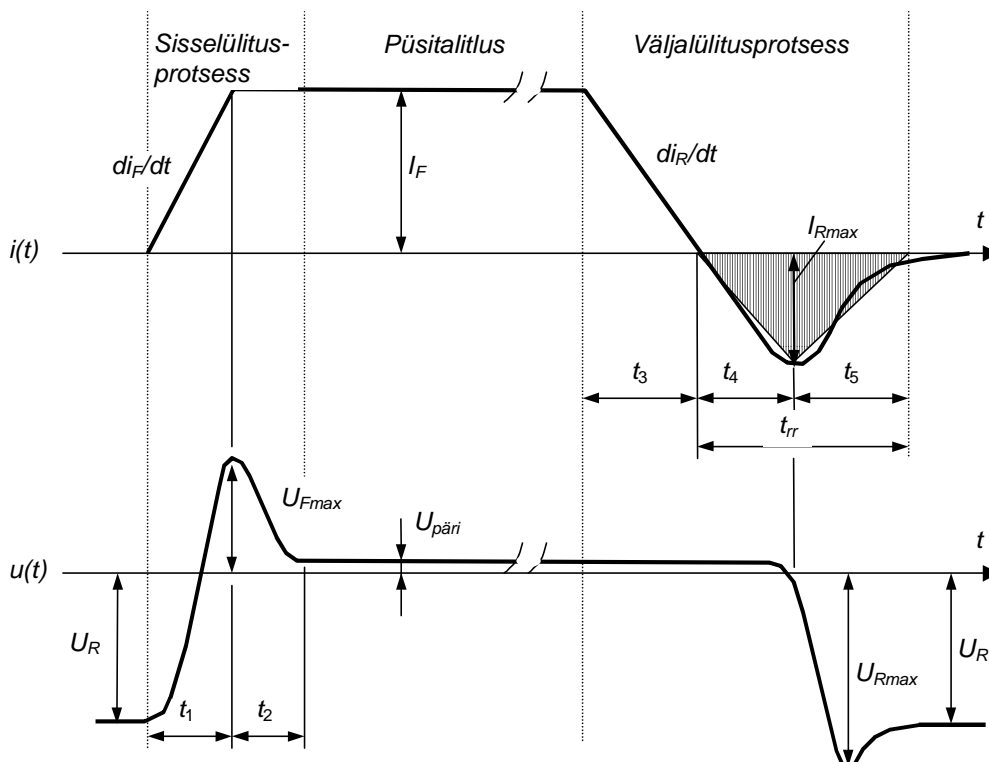
Diodi vastuvool I_s on kuni vastusuuna läbilöögipingeni U_{BD} praktiliselt sõltumatu rakendatud vastupingest. Seda pinget ületades tekib laviinitaoline läbilöök ning diodi vastuvool kasvab väga kiiresti, kusjuures pinge diodil jääb ligikaudu konstantseks. Suure pinge ja suure voolu samaaegne toime põhjustab diodis suure võimsuskao ning siirde kiire kuumenemise, mis viib sekundi murdosa jooksul pooljuhtseadise riknemiseni. Seepärast tuleb diodi läbilööki vältida.

Diodi vastusuuna läbilöögipinge määrab ära diodile maksimaalselt lubatava pinge väärtuse. Selleks, et diodi pingeklass oleks võimalikult kõrge ja lubatud pinge võimalikult suur, kasutatakse jõudiodi disaini puhul kahte olulist võtet. Esiteks, suure läbilöögipinge saamiseks peab vähemalt üks siirdekiht olema vähe legeritud, sest läbilöögipinge on ligilähedaselt pöördvõrdeline triiviala legerimistihedusega. Teiseks, kõrgepingeliste

jõudiodide triivikiht W_d peab olema võimalikult lai (nt 1000 V puhul u. 100 μm), et tagada tõkkekihi piisav laius. Sama läbilöögipinge puhul saab vähendada triivikihi paksust (laiust) või vastupidi, sama triivikihi paksuse juures saab suurendada läbilöögipinget, kui laiendada seal tõkkekihti. Sel juhul on tegemist nn. läbilöökdiodiga (*punch-through diode*). Tõkkekihi piirde kujundamine võimaldab saavutada diodi suuremat läbilöögipinget. Selleks kasutatavad tehnoloogilised võtted muudavad aga jõudiodi disaini keerukamaks.

Jõudiodi juhtivuskaod (*on-state losses*). Enamus diodi võimsuskaost on seotud juhtivusolekuga, kui diodil on päripinge ning seda läbib päriool. Väikesevõimsuseliste diodide puhul on diodi päripingelang ligikaudu konstantne $\delta U_a = 0,7 \dots 1,0$ V. Diodi kaovõimsuse saab sel juhul arvutada lihtsa valemiga $P_{loss} = (0,7 \dots 1,0) I$, kus I on diodi päriool. Jõudiodi puhul kehtib see valem vaid väikeste voolude korral. Suure läbilöögipinge ja triivikihi suure paksuse tõttu avaldub suurtel vooludel ka oomiline takistus. Seega saab jõudiodi päripingelangu arvutada valemiga: $\delta U = \delta U_a + R_{on} I$, kus R_{on} on jõudiodi pärisuuna aktiivtakistus. **Suure lülitussageduse** korral lisanduvad juhtivuskaole kommutatsioonikaod (lülituskaod), mis ilmnevad juhul kui diod läheb juhtivusolekust sulgeolekusse (*off-state*) või vastupidi.

Võimsuskaod mõjutavad oluliselt jõupooljuhi maksimaalset pinget ja voolu. Sellest tulenevalt on suure läbilöögipingega seadiste puhul raske saavutada suurt pärioolu ning vastupidi suure päriooluga seadiste puhul suurt läbilöögipinget.



Joonis 3.7. Diodi voolu- ja pingediagrammid etteantud sisse- ja väljalülituskiiruse di/dt korral

Jõudiodi puhul on väga oluline tunda diodi lülitusprotsessi, s.t. voolu- ja pingediagramme diodi siirdumisel sulgeolekust juhtivusolekusse ja vastupidi. Voolu ja pinge muutumine jõuahelates on seotud energeetiliste protsessidega, kusjuures tuleb arvestada, et induktiivkomponente sisaldava ahela vool ja mahtvuskomponentide pinge ei saa muutuda hetkeliselt (energianivoo hetkeline muutus eeldab lõpmatu suurt võimsust). Seepärast vaadeldakse jõudiodi lülitusomadusi teatud voolu muutumise kiiruse di/dt puhul. Erilist huvi pakuvad jõudiodide puhul **päripingeimpulss** U_{Fmax} diodi avanemisel (s.o. siirdumisel sulgeolekust juhtivusolekusse) ning **vastuvooluimpulss** diodi sulgumisel.

Suur päripingeimpulss (mitukümmend volti) on põhjustatud nii oomilisest kui ka induktiivsest pingelangust ajal mil toimub laengu eemaldamine ruumilaengu kihist. Seega võib diodi sisselülitumist (avanemist) vaadelda kahe ajavahemiku summana $t_a = t_1 + t_2$, kus t_1 on voolu kasvamisega kuni päri voolu I_F stabiliseerumiseni ning t_2 aeg, mis kulub päri voolu stabiliseerumisest kuni päripinge stabiliseerumiseni. Suure läbilöögipingega (n 1000 V) diodide puhul on ajavahemiku t_1 kestus ligikaudu mõnisada nanosekundit ja t_2 kestus u. mikrosekund. Jõudiodide tootmisel on raske samaaegselt saavutada väikest sisselülitusaega ning väikesi juhtivuskadusid.

Diodi sulgumisaeg moodustub kolme ajavahemiku summana $t_s = t_3 + t_4 + t_5$, kus t_3 on päri voolu vähenemisaeg, t_4 on vastuvoolu kasvamisega ja t_5 on vastupinge U_R stabiliseerumisaeg. Diodi sulgumisel väheneb vool ligikaudu nullini (alles jääb väga väike lekkevool). Vastuvool saavutab oma maksimaalväärtuse ajavahemiku t_4 lõpuks ja väheneb seejärel koos vastupinge taastumisega kiiresti t_5 . Vastuvoolu negatiivse impulsi laeng on võrdeline impulsi pindalaga. Jõudiodi sulgumisel tuleb arvestada, et diodi kiire sulgumine põhjustab ahela induktiivse energia muundumise diodi mahtvuseenergiaks, kusjuures väikese mahtvuse korral võib pinge kasvada ohtlikult suureks.

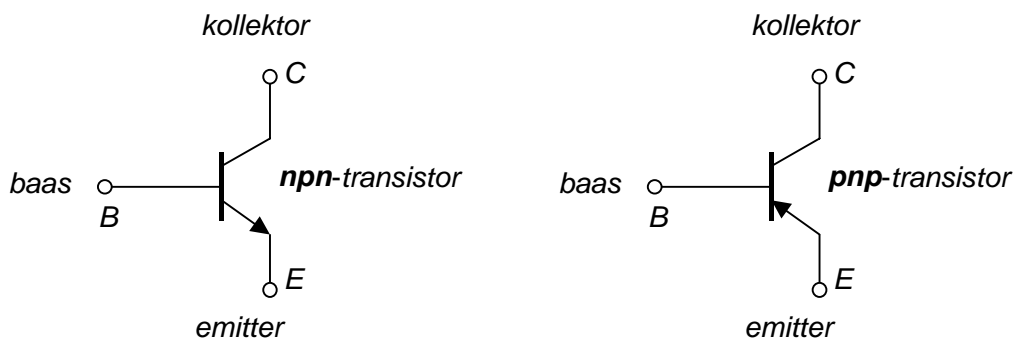
Vastusuuna läbilöögitugevuse taastumine (*reverse recovery*) toimub taastumisaja $t_{rr} = t_4 + t_5$ jooksul, mil vastuvool saavutab oma maksimaalväärtuse I_{Rmax} ning seejärel hakkab kahanema. Vastuvooluimpulsi pindala iseloomustab diodi laengut. Vastuvoolu vähenemisel hakkab kasvama diodi vastupinge, mille maksimaalväärtus on U_{Rmax} .

Schottky diodid

Schottky diodid on suurema toimekiirusega kui *pn*-siirdega diodid, kuid nende läbilöögipinge on suhteliselt väike. Schottky diodi töö põhineb asjaolul, et eri materjalides on elektronidel erinev potentsiaalne energia. Seejuures on elektronide potentsiaalne energia materjalides sidemete tõttu väiksem kui vabadel elektronidel. Kui n-tüüpi pooljuht on ühenduses metalliga, mille elektronidel on väiksem potentsiaalne energia kui pooljuhis olevatel elektronidel, siis on kõrgema potentsiaali tõttu elektronide voog pooljuhist metalli palju suurem kui vastupidine elektronide voog. Sellest tulenevalt laadub metall negatiivse laenguga ja pooljuht omandab positiivse laengu. Nii moodustub metall-pooljuht siire, millel on sarnased omadused nagu *pn*-siirdelgi. Erinevalt *pn*-siirdest toimivad **Schottky diodid ainult enamislaengukandjad**. Märkusena tuleb lisada, et *pn*-siirdel põhinevaid vähemuslaengukandjatega seadiseid nimetatakse bipolaarseteks seadisteks. Schottky diodi päripingelang on u. 0,3 V võrra väiksem kui *pn*-siirdel põhineval diodil. Sellest tulenevalt on väiksemad ka Schottky diodi kaod. Schottky diodide peamiseks eeliseks *pn*-siirdega diodide ees on suurem toimekiirus, sest neil puuduvad vähemuslaengukandjad, mida diodi sisse- ja väljalülitamisel tuleb ümber laadida.

3.4. Bipolaarsed jõutransistorid

Bipolaarsel transistoril on kolm viiku: kollektor, emitter ja baas. Enamikel juhtudel kasutatakse jõuahelates transistori ühise emitteriga lülituses, mille korral baasi kasutatakse juhtsignaali sisendina. Bipolaarsetest jõutransistoridest kasutatakse enamuses *nnp*-transistore, kuid mõnikord ka *pnp*-transistore. Jõutransistorilt nõutakse suurt vastupinget ja suurt pärioolu taluvust. Sellest tulenevalt on ka jõutransistori ehitus erinev signaaliahelates kasutatavate transistoride ehitusest. Transistori läbilöögipinget sõltub kollektori triiviala laiusest, mis ulatub mõnekümnest kuni mõnesaja mikromeetrini. Jõutransistoride läbilöögipinget ulatub sadadesse voltidesse. Jõutransistori emitter ja baas on jaotatud suurele pinnale ning asetsevad teineteise vahel. Tänu sellele väheneb voolu ebäühtlase jaotuse e. kokkusurumise (*current crowding*) oht ning ühtlasi ka transistori aktiivtakistus ja võimsuskaod. Transistori baasi paksus (*base thickness*) peab olema võimalikult väike, et tagada piisavat võimendustegurit. Samas võib liiga õhuke baasikiht vähendada transistori läbilöögipinget. Sellest tulenevalt on bipolaarse jõutransistori baasikihi paksus võrreldes nõrgavoolutransistoridega suhteliselt suur (5...20 μm). Seetõttu on bipolaarse jõutransistori võimendustegur võrreldes nõrgavoolutransistoridega väike.

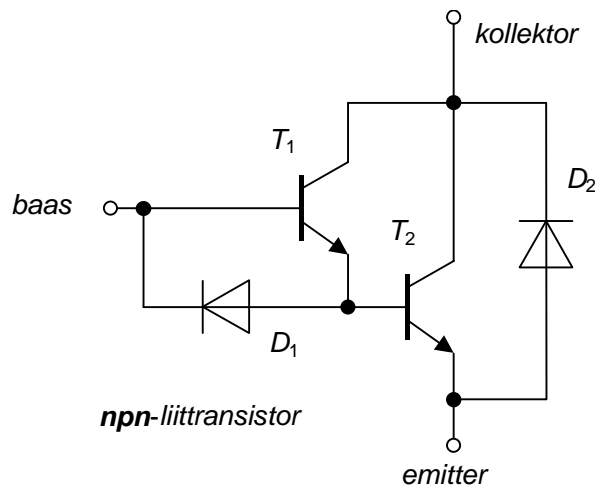


Joonis 3.8. Bipolaartransistoride tingmärgid

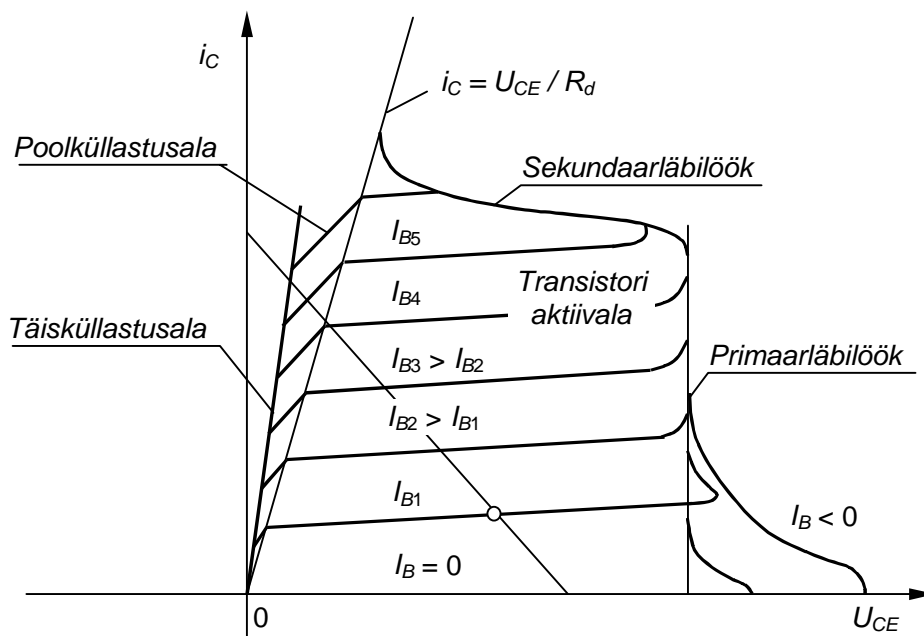
Väikese võimendusteguri tõttu on bipolaarsete jõutransistoride kasutamine paljudel juhtudel tülikas, sest juhtahelates vajatakse eraldi võimendusastet. Üheks võimalikuks lahenduseks jõuahelate lihtsustamiseks on monoliitsete **Darlingtonlülituste** ehk monoliitsete **liittransistoride** kasutamine (joonis 3.9). Kahest bipolaartransistorist koosneva Darlingtonlülituse vooluvõimendustegur $\beta = \beta_1\beta_2 + \beta_1 + \beta_2$. Avaldisest võib järeldada, et Darlingtonlülituse võimendustegur on oluliselt suurem kui üksikul jõutransistoril. Monoliitlülitusse on lisatud ka diodid, D_1 transistori sulgemisprotsessi kiirendamiseks ning vastudiod D_2 .

Jõutransistori kasutamise seisukohalt on väga olulised tema volt-amper tunnusjooned, s.t. kollektorivoolu sõltuvus kollektori ja emitteri vahelisest pingest (joonis 3.10). Kuna transistori kollektorivool sõltub baasivoolust ja baasivoolu saab reguleerida, siis vastab igale baasivoolu väärtusele eraldi volt-amper-tunnusjoon. Võib lisada, et monoliitse Darlingtonlülituse volt-amper-tunnusjooned on väga lähedased üksiku bipolaartransistori tunnusjoontele. Joonisel on näidatud ainult transistori pärisuuna tunnusjooned. Vastusuuna tunnusjooni pole joonisel näidatud. Transistori kollektori ja emitteri vaheline maksimaalne lubatav pinge U_{CEmax} sõltub vähesel määral baasivoolust (negatiivse baasivoolu korral on läbilöögipinget suurem). Transistori talitlust primaarläbilöögialas (laviinlääbilöögialas) tuleb

vältida, sest sel juhul toimivad transistorile samaaegselt suur vool ja suur pinge (ühtlasi ka suur kaovõimsus), mis viivad kiiresti transistori rikkumiseni. Samuti tuleb vältida transistori sekundaarläbilööki, mil suur võimsuskadu võib tekkida pooljuhi lokaalsetes alades. Jõutransistori ja nõrgavoolutransistori tunnusjooned erinevad põhiliselt selle poolest, et jõutransistoril on olemas lisaks täisküllastusalale (*hard saturation*) ka teatud poolküllastusala (*quasi saturation*). Kui transistori triiviala oomiline takistus on R_d , siis on transistori aktiivala ja poolküllastusala piiriks sirgjoon $i_C = U_{CE} / R_d$. Transistori päripingelang on sel juhul küllalt suur ja koos sellega on suured ka võimsuskadod. Minimaalne päripingelang ja minimaalsed juhtivuskadod saavutatakse transistori täisküllastusolekus. Poolküllastusoleku mõju avaldub transistori lülitusprotsessis, mil transistori siirdumisel sulgeolekust juhtivusolekusse või vastupidi on poolküllastusoleku läbimiseks vaja teatud ajavahemikku. Viimane omakorda suurendab transistori kommutatsiooniprotsesside kestust.

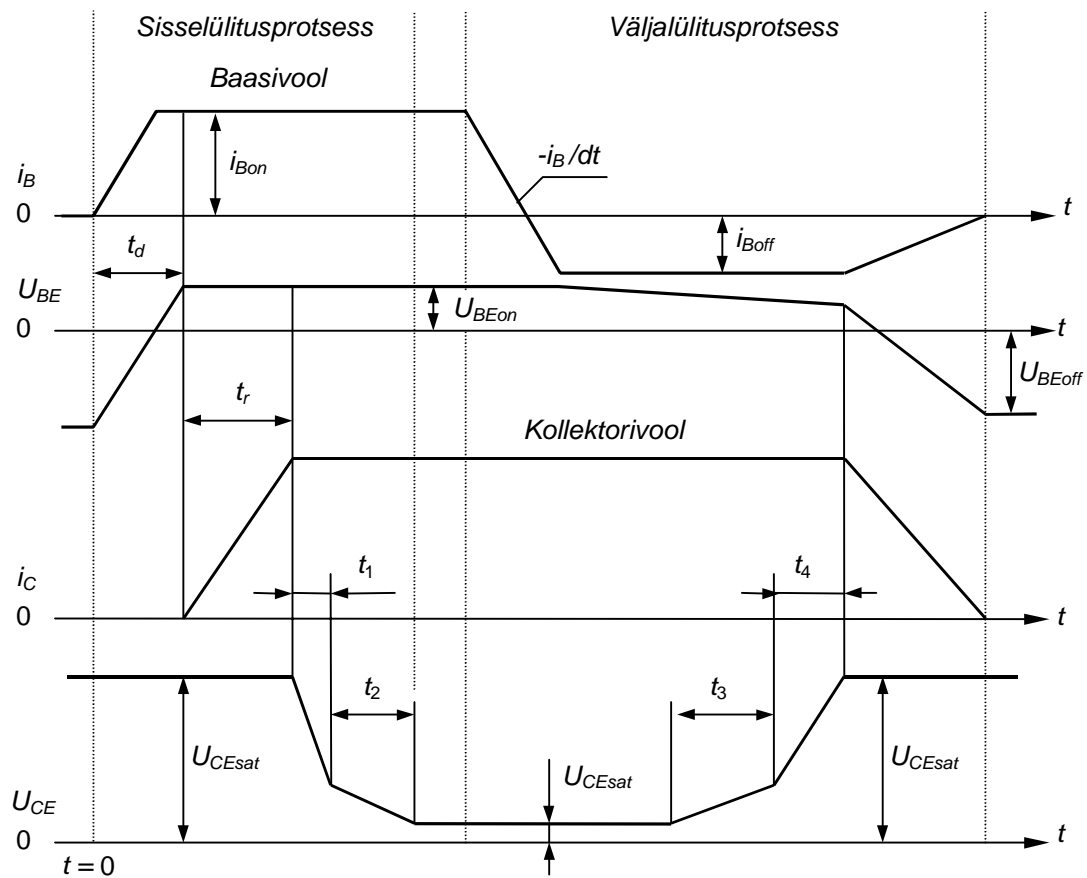


Joonis 3.9. Bipolaartransistoride Darlingtonlülitus



Joonis 3.10. *nnp*-tüüpi bipolaarse jõutransistori volt-ampere-tunnusjooned

Transistori sisselülitusprotsess jadamisi lülitatud induktiivkoormuse puhul on näidatud joonisel 3.11. Baasivoolu kasvamisel kasvab ka baasi ja emitteri vaheline pinge. Baasivool saavutab transistori juhtivusolekule vastava väärtuse I_{Bon} . Kollektorivool hakkab kasvama alates momendist, mil baasi ja emitteri vaheline pinge saavutab väärtuse U_{Bon} . Sisselülitatud transistori kollektorivoolu väärtus on I_0 . Transistori päripingelang väheneb kahes etapis. Esimesel etapi lõpuks jõuab transistor poolküllastusolekusse ning teise etapi lõpuks täisküllastusolekusse. Koos sellega stabiliseerub ka sisselülitatud transistori päripingelang U_{CEsat} . Transistori sulgemine algab baasivoolu vähendamisega. Transistor väljub küllastusolekust jällegi kahes etapis. Pärast kollektori ja emitteri vahelise pinge U_d taastumist väheneb kiiresti ka kollektorivool ning transistor sulgub. Samal ajal muutub nulliks baasivool ning taastub baasi ja emitteri vaheline negatiivne pinge.



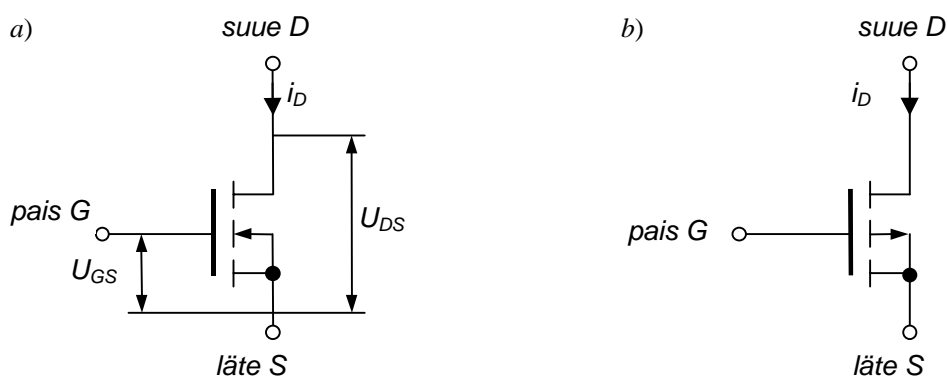
Joonis 3.11. Bipolaartransistori kommutatsiooniprotsessid induktiivkoormuse sisse- ja väljalülitamisel

Kommutatsioonikadude vähendamise seisukohalt on oluline lühendada kommutatsiooniprotsesside kestust. Jõutransistori sulgumist saab kiirendada kui kasutada juhtahelas järsu frondiga negatiivsed baasivoolu impulsse. Bipolaarsete jõutransistoride pingete ja voolude lubatud (ohutu) talitusvahemik (*safe operating area*) on piiratud. Seepärast kasutatakse transistori sisse- ja väljalülitusprotsesside juhtimiseks vastavaid kaitselülitisi (*snubber circuits*).

3.4. MOSFET jõutransistorid

MOSFET ehk metall-oksüüd-pooljuht väljatoimel põhinevaid (*metal-oxide-semiconductor field effect transistor*) jõutransistore kasutatakse 1980 aastate algusest. Tänapäevaks on MOSFET jõutransistorid paljudel kasutusalaadel, eriti seal kus nõutakse suuri lülitussagedusi, bipolaarsed transistorid kõrvale tõrjunud.

Nii nagu bipolaarsed transistorid on eri juhtivusega, kasutatakse ka MOSFET transistoride puhul kaheksugust legerimist, mille tulemusena saadakse *n*-kanaliga või *p*-kanaliga MOSFET transistor (joonis 3.12). MOSFET jõutransistori pooljuhtstruktuur koosneb paljudest rööplülituses rakkudest. Transistoridel on kolm elektroodi (viiku), kusjuures läte ja suudme vahelist voolu juhitakse paisupingega.



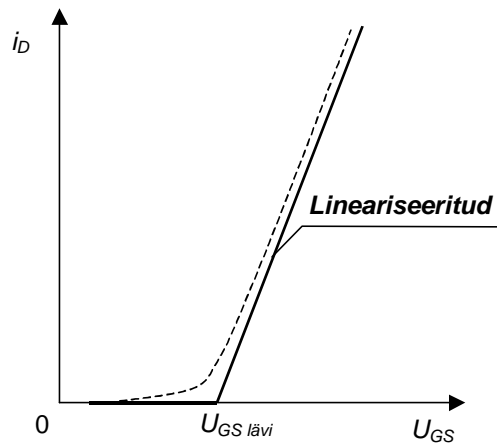
Joonis 3.12. MOSFET transistoride tingmärgid:
a - *n*-kanaliga MOSFET, *b* - *p*-kanaliga MOSFET.

MOSFET transistoride sisend-väljundtunnusjoon (joonis 3.13) ja volt-amper tunnusjooned (joonis 3.14) sarnanevad bipolaarsete transistoride tunnusjoontele, kuid erinevalt viimastest on juhtsignaaliks pinge. Paisupinge ja suudmevoolu vaheline sõltuvus ehk sisend-väljundtunnusjoon iseloomustab transistori võimendustegurit. Alates teatud läviväärtusest võib selle sõltuvuse lugeda ligikaudu lineaarseks (joonis 3.13) ja võimendusteguri konstantseks. Transistor on suletud, kui paisupinge on läviväärtusest $U_{GS\ lävi}$ väiksem. Lävipingega on tavaliselt mõni volt. Et paisupinge puudumisel jääks transistor suletud olekusse, ei tohi suudme ja läte vaheline pinge ületada transistorile lubatud maksimaalset pinget. Viimane on omakorda määratud läbilöögipingega (*breakdown voltage*) U_{DSbd} .

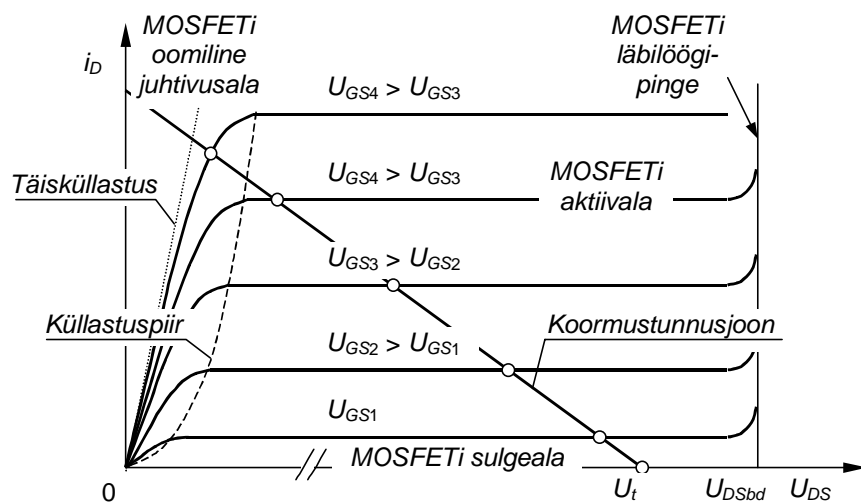
Läviväärtust ületava juhtpinge puhul ($U_{GS} > U_{GS\ lävi}$) tekib transistori läbiv vool ning transistori tööpunkt satub nn. aktiivalasse. Transistori tööpunkti asukoht (joonis 3.14) sõltub välisahela tunnusjoonest ehk koormustunnusjoonest. Ahelale rakendatud toitepinge U_t peab olema väiksem transistori läbilöögipingest. Aktiivalas töötamisel ei sõltu transistori suudmevool i_D transistorile rakendatud pingest U_{DS} vaid ainult paisupingest. Juhtpinge U_{GS} edasisel suurendamisel läheb tööpunkt transistori oomilisse juhtivusalasse, kus tekib märgatav pinge ja voolu vaheline sõltuvus. See tähendab, et avatud (voolu juhtiva) transistori pingelang sõltub teda läbiva voolu suuruselt.

MOSFET transistoride kommutatsiooniprotsessid on tunduvalt kiiremad kui bipolaarsete transistoride puhul (neil puuduvad üleliigsed vähemuslaengukandjad, mida tuleb transistor

sulgemiseks siirdada). Nende lülitusajad on 100...300 ns piires. MOSFET transistori kommutatsiooniprotsessi üksikasjalik kirjeldus on küllalt keerukas, sest arvestada tuleb ka paisu-lätte ja paisu-suudme vahelisi mahtuvusi aga ka välisahela omadusi. Kuna MOSFET jõutransistoride talitus sarnaneb IGBT transistoride talitlusele, viimased on aga jõupooljuhtmuundurites enam levinud kui MOSFET transistorid, siis on raamatus otstarbekas lähemalt vaadelda IGBT transistoride kommutatsiooniprotsesse (vt. pt 3.7).



Joonis 3.13. MOSFET transistori sisend-väljundtunnusjoon



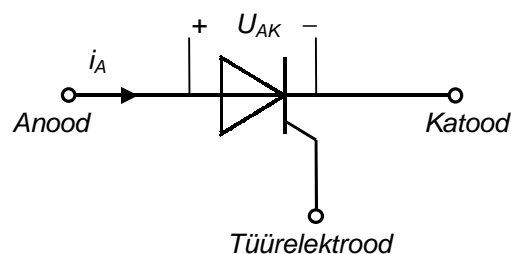
Joonis 3.14. MOSFET transistori volt-ampertunnusjooned

MOSFET jõutransistore kasutatakse enamuses jõumoodulitena, millesse on sisseehitatud ka transistori juhtlülitus (*driver*) ja kaitseahelad.

3.5. Türistorid (SCR)

Türistor on diodi kõrval üks vanemaid jõupooljuhtseadiseid (türistor leiutati 1956. aastal USAs). Pikka aega olid türistorid peamisteks juhitavateks jõupooljuhtseadisteks. Seepärast põhines ka enamuse jõupooljuhtmuundureid türistoridel. Koos türistoride laialdase kasutuselevõtuga arenes välja türistoridega seotud tugevvoolu skeemitehnika. Türistoride, ja türistormuundurite tootmisega on olulisel määral seotud ka Eesti. Nimelt alustati türistoride ja neil põhinevate muundurite valmistamist Tallinna Elektrotehnikatehases juba 1960. aastate algul. 1960. aastatel töötati Tallinna Tehnikaülikooli elektriajamite kateedris välja mitmed originaalsed türistormuundurite (juhitavate alaldite, sagedusmuundurite, vahelduvpinge-regulaatorite jms.) skeemilahendused. Elektrotehnikatehases toodetud türistorid ja muundurid olid aga sel perioodil tehniliste omaduste poolest konkurentsivõimelised maailma parimate omataoliste toodetega.

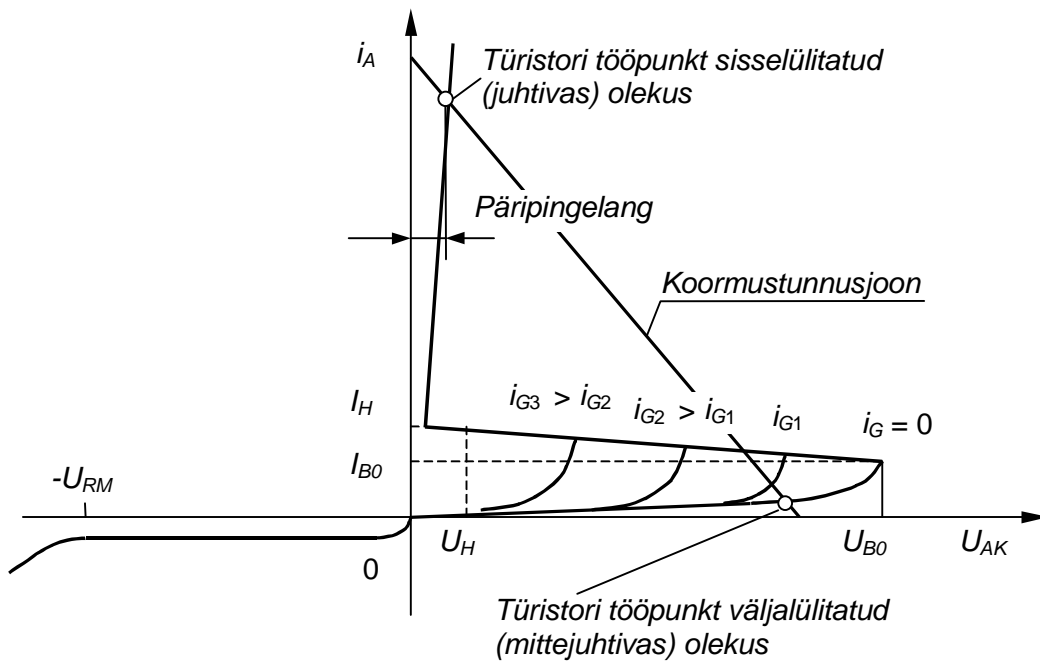
Türistor (*silicon controlled rectifier, SCR*) on kolme elektroodiga jõupooljuhtseadis (joonis 3.15), mis tüürvoolu puudumisel on suletud olekus, s.t. vaatamata anoodi ja katoodi vahelise positiivse pinge olemasolule ei teki türistori läbivat voolu. Tüürvooluimpulss avab türistori. Pärast seda jääb türistor juhtivasse olekusse, kuni teda läbib nullilähedast läviväärtust (hoidevoolu) ületav positiivne vool. Kuna türistori sulgemine tüürvoolu abil pole võimalik, saab teda hõlpsasti kasutada vaid neis ahelates, kus türistor sulgub voolusuuna loomulikult muutumisel, nt. vahelduvvooluahelates. Türistori niisugust sulgemisviisi nimetatakse **loomulikult kommutatsiooniks**. Alalisvooluahelates saab türistore sulgeda vaid spetsiaalsete sundkommutatsioonilülituste abil. Kuna tänapäeval toodetakse lisaks kirjeldatud nn. harilikele türistoridele ka juhtahela kaudu suletavaid ehk GTO (*gate turn off*) tüüpi jm. türistoride tüüpe, siis nimetatakse harilikke türistore üheoperatsioonilisteks või ka alaldüstüristorideks, sest need sobivad kõige paremini vahelduvpinge alaldamiseks.



Joonis 3.15. Türistori tingmärk

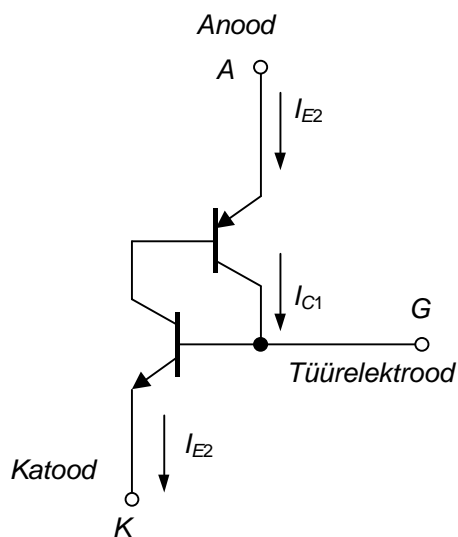
Türistori volt-ampere tunnusjoon on näidatud joonisel 3.16. Vastupingestatud türistori ehk vastusuuna volt-ampere tunnusjoon on sarnane diodi vastavale tunnusjoonele, s.t. vastupingega türistori läbib väike lekkevool. Türistori maksimaalne lubatud vastupinge ulatub kuni tuhandete voltideni. Pärisuunas on türistoril kaks võimalikku stabiilset olekut. Suletud türistori läbib pärisuunas väike lekkevool. Avatud türistori läbib suur vool (türistoride maksimaalsed voolud ulatuvad tuhandetesse ampritesse). Avatud türistoril tekib väike pingelang (1...2 V). Türistori kahte stabiilset olekut ühendab tunnusjoone mittestabiilne ala. Tüürvool mõjutab volt-ampere tunnusjoone väljaulatava osa suurust ja koos sellega ka ümberlülituspinget (*break-over voltage* U_{BO}). Tüürimpulsi olemasolul avaneb türistor päripinge toimel ning jääb avatuks, kui teda läbib hoidevoolust I_H (*holding current*) suurem vool. Voolu vähenemisel alla hoidevoolu türistor sulgub ning jääb suletuks kuni järjekordse

tüürimpulsi saabumiseni. Tänapäeval on türistorid suurima lubatud voolu ja suurima lubatud pingega jõupooljuhtseadised.



Joonis 3.16. Türistori volt-amper tunnusjoon

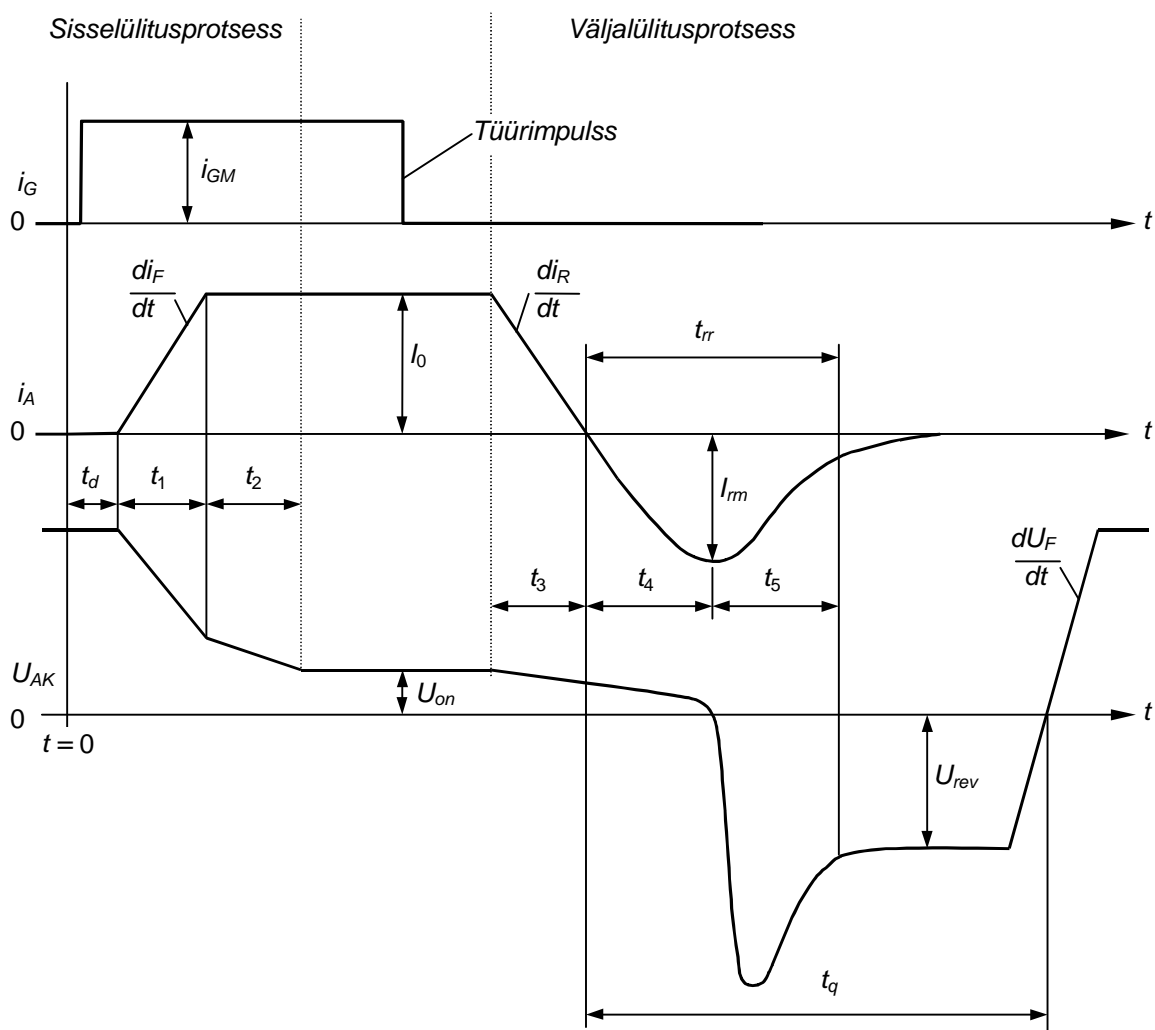
Türistori talitlust saab modelleerida kahest eri tüüpi bipolaarsest transistorist koosneva askeemiga (joonis 3.17).



Joonis 3.17. Türistori askeem

Türistori dünaamilisi omadusi iseloomustavad kõige paremini kommutatsiooniprotsessi ajadiagrammid (joonis 3.18). Seejuures on olulised nii türistori avanemis- kui ka sulgumisprotsessi dünaamilised omadused.

Türistori pooljuhtkristall on enamasti suure tableti kujuline. Tüürvool juhatakse türistori tüürelektroodi abil. Türistori avanemine algab tüürelektroodi all ja anoodvool laotub kiirusega $u \approx 0,1 \text{ mm}/\mu\text{s}$ kogu türistori pinnale. Avanemise hetkel võib pooljuhtsiire lokaalselt üle kuumeneda, mistõttu tuleb piirata päri voolu i_F kasvamise kiirust di_F/dt . Suurim lubatud $(di_F/dt)_{lub}$ väärtus (tavaliselt sadakond amprit mikrosekundis) on türistori oluline tehniline parameeter. Avanemise kiirendamiseks kasutatakse türistori tüürelektroodi erilist kuju. Kogu sisselülitusprotsess koosneb kolmest ajavahemikust: sisselülitusviivitusest t_d (turn-on delay), voolu kasvamisajast t_1 (rise time) ja voolu laotumisajast t_2 (spreading time).



Joonis 3.18. Türistori kommutatsiooniprotsess sisselülitamisel tüürimpulsiga ning väljalülitamisel pärast voolu suuna muutumist

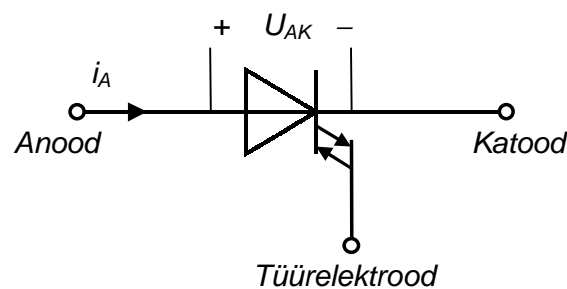
Üheoperatsioonilise türistori sulgumine sarnaneb diodi sulgumisega. Türistori sulgemiseks tuleb tema anoodvoolu vähendada allapoole hoidevoolu I_h . Voolu kahanemiskiirus sõltub ahela induktiivsusest, sest $di/dt = -u/L$. Laengukandjate arv väheneb türistoris rekombinat-

siooni teel. Türistor jääb avatuks (juhtivaks) ja voolu suund muutub vastupidiseks. Elektron-auk-plasma jääklaengu tõttu kestab avatud olek hetkeni, mil vastuvool saavutab maksimaalväärtuse I_{rm} . Selle hetkeni on pinge türistoril nulli lähedane, s.t. türistor juhib voolu (joonis 3.18). Edasi sulguvad aja läbilöögitugevuse taastumisaja (*reverse recovery time*) $t_{rr} = t_4 + t_5$ jooksul järgemööda mõlemad välimised pn-siirded ja türistori vastupinge U_r stabiliseerub. Väljalülitumise lõpus on keskmises pn-siirdes laengukandjad veel alles. Need laengukandjad peavad rekombineeruma enne päripinge rakendamist. Türistori sulgeomadused taastuvad sulgemisaja t_q jooksul, mida arvestatakse hetkest, mil vool muutub negatiivseks, kuni hetkeni, mil türistorile lubatakse taas positiivset väärtusega päripinget.

Kui suletud türistorile rakendada päripinge, tekib türistori keskmise, vastupingestatud pn-siirde alas siirde mahtuvusest põhjustatud ruumilaeng. Pingemuutus du/dt tekitab mahtuvusliku voolu. See vool toimib nagu tüürvool ja võib põhjustada türistori soovimatu avanemise. Päripinge kasvamiskiiruse suurim lubatud väärtus $(du/dt)_{lub}$ on türistori oluline tehniline parameeter, mille arvvärtus sõltuvalt türistori tüübist ulatub kuni mõnesaja voldini mikrosekundis. Kui türistorile taaskrakendatakse päripinge enne sulgemisaja möödumist, tekib uuesti ka pärisuunaline vool ja türistor võib uuesti avaneda, ilma et selleks oleks vaja rakendada tüürimpulssi.

3.6. Suletav ehk GTO jõutüristor

Suletav ehk GTO (*gate turn off*) jõutüristor (kaheoperatsiooniline türistor) lülitub sisse täpselt samuti nagu üheoperatsiooniline türistor, s.t. tüürelektroodile antakse katoodi suhtes positiivse pinge tüürvooluimpulss (joonis 3.19). Türistori sulgemiseks antakse tüürelektroodile katoodi suhtes negatiivse pingega võimas tüürvooluimpulss. Kuna tüürahela kaudu suletavate GTO jõutüristoride kasutamine on võrreldes üheoperatsiooniliste SCR türistoridega palju mugavam, siis nende kasutusala nüüdisajamites ja muudes rakendustes on hakanud laienema. Peale selle on GTO türistorid võrreldes SCR türistoridega ka palju kiiremad.

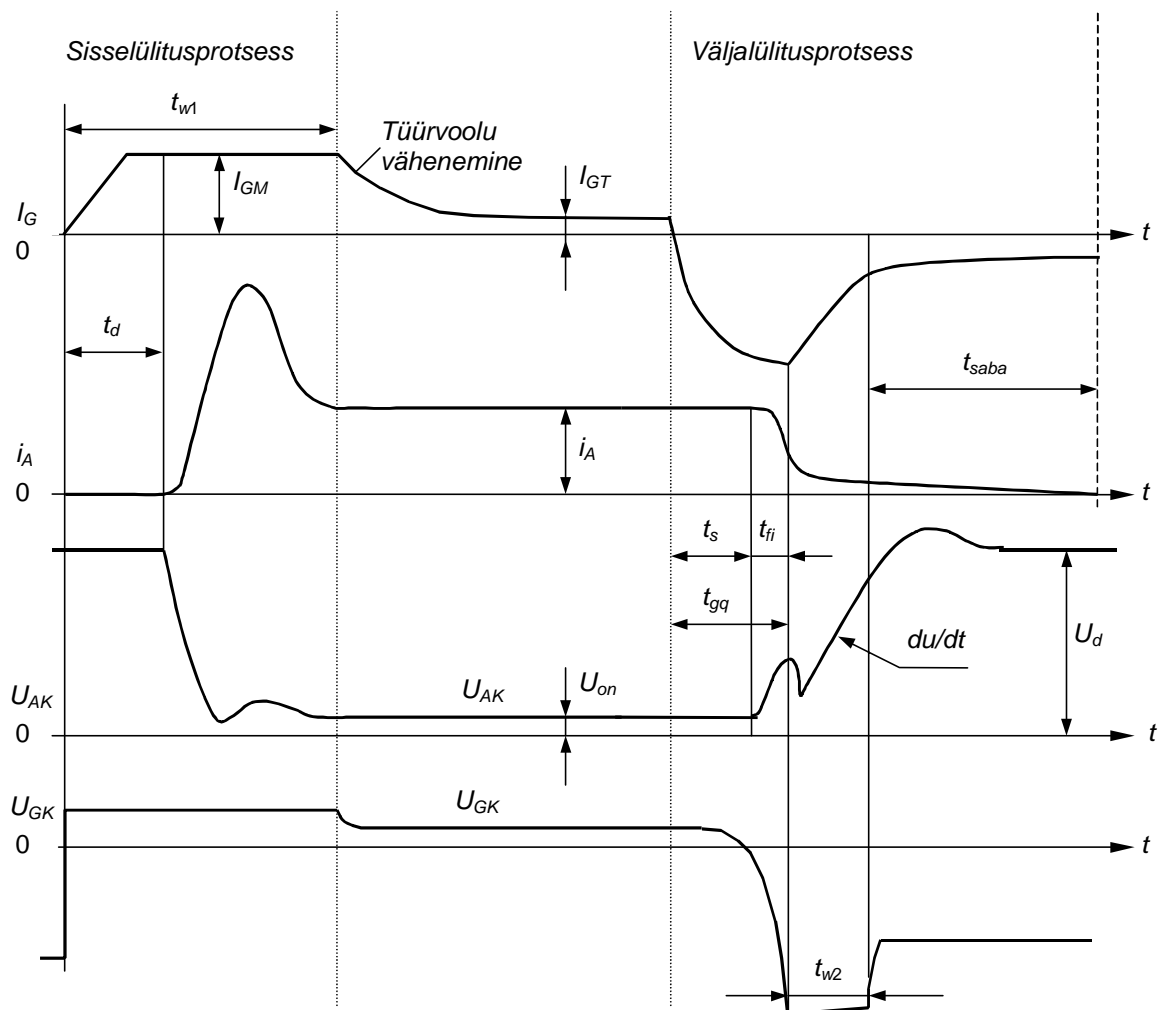


Joonis 3.19. GTO türistori tingmärk

Kuna GTO türistoril regeneratiivne tüürelektrood puudub, peab tema avanemise tüürimpulss olema võimsam kui üheoperatsioonilisel türistoril. Avamise tüürimpulsi vool ja voolu kasvamise kiirus peavad olema suhteliselt suured ning tüürimpulsi kestus peab olema suurem kataloogis antud minimaalsest sisselülituskestusest. Nende tingimuste täitmisel tagatakse türistori piisavalt kiire ja täielik avanemine töötemperatuuril ning väikesed kommutatsioonikaod. Avatud olekus peab GTO türistoril säilima teatud positiivne tüürvool, mis tagab türistori avatud oleku ka väikestel anoodvoolu väärtustel. Väikestel anoodvoolu

väärtustel on jaotatud pooljuhtstruktuuriga GTO türistori puhul oht, et osa katoosaaarekesi võib sulguda ning voolu taassuurenemisel võivad avatuks jäänud saarekesed liigvoolu tõttu läbi põleda. Juhul kui türistori töötamisel avatud olekus võib anoodvoolu väärtus järsult väheneda ja tekib türistori sulgumise oht, tuleb türistori tüürvoolu avatud olekus suurendada. Türistori temperatuuri kasvades võib avatud oleku tüürvoolu vähendada.

Suletava GTO türistori kommutatsiooniprotsessi voolude ja pingete diagrammid on näidatud joonisel 3.20. Sisselülitusprotsess on üldjoontes sama kui tavatüristori puhul ja koosneb sisselülitusviivitusest t_d (turn-on delay) ning voolu kasvamis- ja stabiliseerumisaegast. Türistori sulgemiseks antakse tüürelektroodile katoodi suhtes negatiivse potentsiaaliga võimas tüürvooluimpulss. GTO türistori sulgumisprotsessi võib jaotada kolmeks etapiks. Esimesel etapil eemaldatakse laadimisaja (storage time) t_s kestel türistori katoodilähedastest siiretest elektron-auk-plasmas salvestunud laeng tüürelektroodi laeng, teisel etapil toimub ajavahemiku t_{fi} kestel anodi voolu vähenemine (fall time) ja tüürelektroodi laviinlabilöök t_{w2} . Kolmanda etapi jooksul on türistor peaaegu sulgunud kuid mõnda aega jätkub veel nn. sabavool. Suletud türistori puhul on sabavool kahanenud nulliks. Tüürelektrood jäetakse suletud olekus vastupingestatuks, mis tagab maksimaalse blokeerpinge ja du/dt mõju vähenemise. Induktiivkoormusel on tingimata vajalik RCD (takisti, kondenssaator, diod) kaitseahel, mis piirab du/dt väärtust türistori sulgemisel.

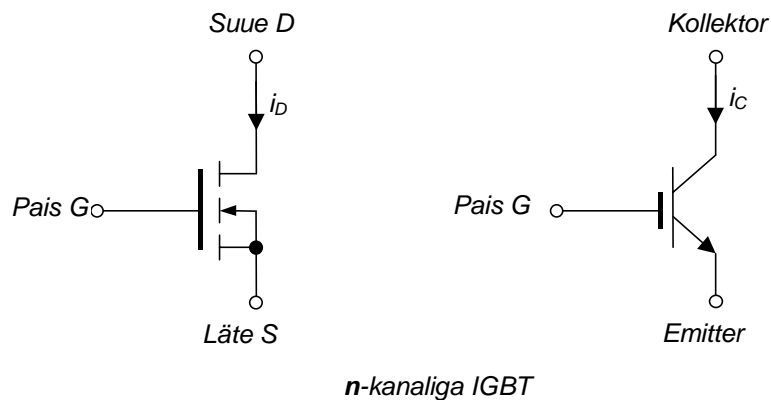


Joonis 3.20. GTO türistori kommutatsiooniprotsessi voolude ja pingete diagrammid väljalülitumisel

3.7. Isoleeritud paisuga bipolaarsed transistorid, IGBT

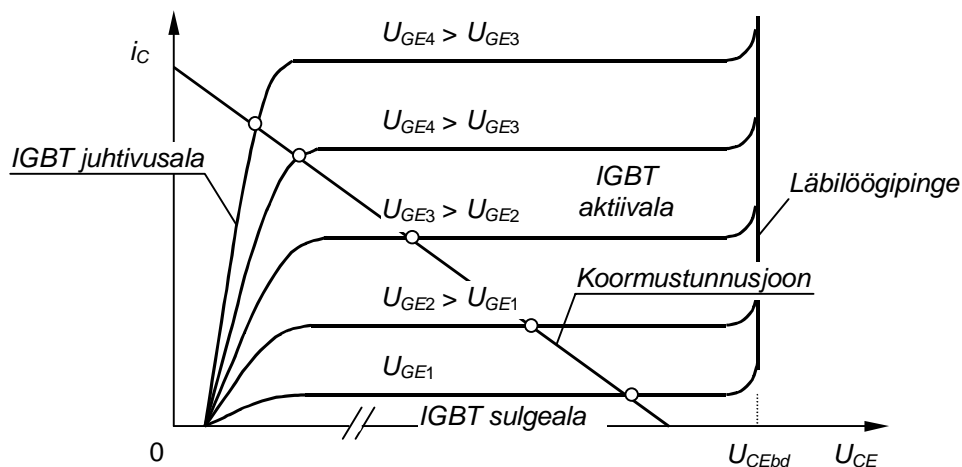
Bipolaarsete transistoride ja MOSFET transistoride omadused erinevad ning täiendavad teineteist. Bipolaarsetel transistoridel on väiksemad juhtivuskaod, eriti suurema nimivastupinge korral. Samal ajal on nende kommutatsiooniprotsess aeglasem ja seetõttu ka suuremad kommutatsioonikaod. Seda asjaolu on püütud ära kasutada ning luua jõupooljuhtseadis, millel on samaaegselt väikesed juhtivus- ja kommutatsioonikaod. Niisugusteks seadisteks on isoleeritud paisuga (baasiga) bipolaarsed transistorid (*insulated gate bipolar transistor*).

n -kanaliga IGBT transistori vertikaalne struktuur on sarnane MOSFET transistorile, erinedes vaid selle poolest, et struktuuri on lisandunud p^+ kiht, mis ühtlasi moodustab transistori neelu (kollektori). n -kanaliga IGBT transistori tingmärk on esitatud joonisel. Enamuses kasutatakse skeemides tingmärgi teist varianti. p -kanaliga IGBT transistoridel on noolte suund vastupidised.



Joonis 3.21. n -kanaliga IGBT transistori tingmärgid

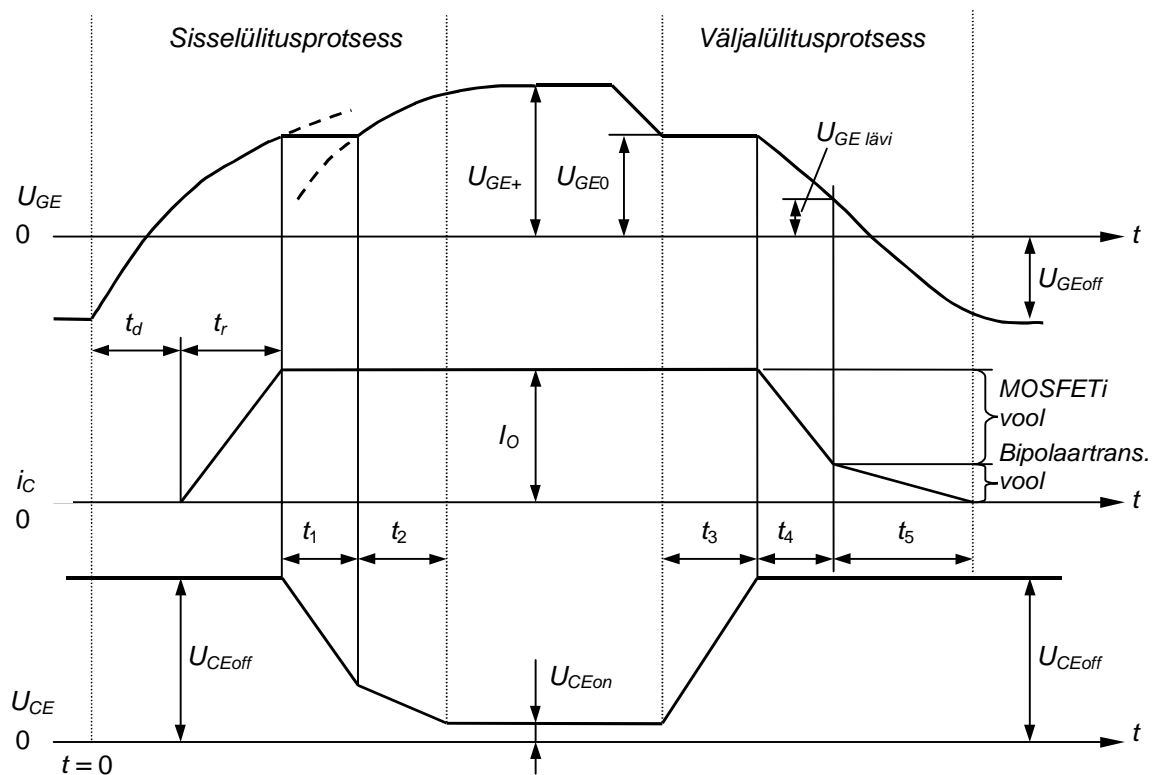
n -kanaliga IGBT transistori volt-ampere tunnusjooned on väga sarnased nõrgavoolutehnikas kasutatava nnp -tüüpi bipolaartransistori tunnusjoontega, välja arvatud see, et juhtsuuruseks loetakse IGBT transistoride puhul paisu pinge, mitte aga baasivoolu (nagu nnp -transistori puhul).



Joonis 3.22. IGBT transistori volt-ampere tunnusjooned

IGBT transistori kommutatsiooniprotsessid on näidatud joonisel 3.23. Suures osas on need protsessid sarnased MOSFET transistori kommutatsiooniprotsessidele. Joonisel vaadeldakse induktiivse koormuse kommutatsiooniprotsessi. Sel juhul ei saa koormusvool induktiivsuse salvestatud energia tõttu kiiresti muutuda ning kommutatsiooniprotsessi seisukohalt võib koormust vaadelda vooluallikana. Paisu juhatakse muudetava pingega pingest. Transistori sisselülitusviivituse t_{don} kasvab paisu ja läte vaheline pinge kuni väärtuseni U_{GSth} , millest alates hakkab kasvama transistori neelu (kollektorivool) I_D . Kui vool on saavutanud oma püsiväärtuse I_0 , väheneb transistori neelu-lätte vaheline pinge kuni pingeni U_{DSon} .

Transistori sulgumisel kasvab neelu-lätte vaheline pinge kuni neelupingeni U_D , seejärel väheneb neelu vool kahe etapi jooksul nullini. Esimesel etapil kahaneb vool IGBT transistori MOSFET sisendahela väljalülitumise arvel. Teine etapp vastab bipolaarse väljaundahela väljalülitumisele.



Joonis 3.23. IGBT transistori kommutatsiooniprotsessid

Tänapäeva elektriaparatuuride tootmisel on IGBT transistorid peamised kommutatsioonielemendid. Väiksematel võimsustel kasutatakse IGBT transistore nn. arukates jõupooljuhtmoodulites (*intelligent power module, IPM*), mis koosnevad peale jõutransistoride veel teistest jõuahela komponentidest (vastudiodidest, kaitseahelatest). Samuti on jõupooljuhtmoodulitesse sisse ehitatud transistoride juhtahelad ning juht- ja jõuahelate galvaaniliseks eraldamiseks ette nähtud seadised (nt. optronsensid).