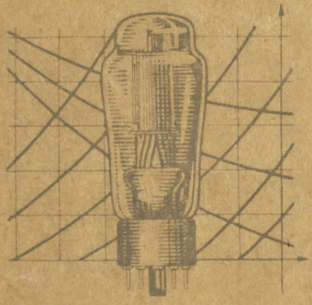
A. PÕDRUS

ELEKTROVAAKUM-SEADISED



RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“

ARH

A. PÕDRUS

ELEKTROVAAKUM-SEADISED

TOIMETANUD
DOTS. HELMUT RIIKOJA

RK
„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“
TALLINN 1949

Raamat käsitleb elektrovaakumseadistes esinevaid nähtusi, nende seadiste liigitelu, üksikute seadiste kirjeldust ning kasutamisvõimalusi. Ka antakse tabelid NSV Liidus toodetavate elektrovaakumseadiste andmetega. Raamat on määratud õpikuks sidetehnikumide õpilastele ja käsiraamatuks tehnikutele, ta võib aga kasulik olla ka elektrotehnika aladel õppivaile üliõpilastele ja teistele raadio- ning elektrotehnikaga tegelejaile.

Bibliotheca Universitatis Tartuensis
1945: 01319
15245
A- 18165
ARHIIVKOGU

Eessõna.

Elektrontorusid kasutatakse praegusel ajal väga laialatuslikult sideseadmetes. Eriti tähtsat kohta omavad nad raadiotehnikas, kus nad on seadmete põhilisteks osadeks. Peale selle rakendatakse neid veel paljudes teisteski tehnikaharudes. Nende korralikust töötamisest sõltub kogu seadme kasutamiskõlblikkus.

Side tähtsus rahuaegses elus on suur ja veelgi suuremat tähtsust omab ta sõjaajal, mil nõutakse katkestusteta sidet niihästi rindel kui ka tagalas. Suure Isamaasõja kogemused on näidanud, kui suure tähtsusega on raadioside tänapäeva manööversõjas, kus nõutakse kõikide väeliikide kooskõlastatud tegevust.

Niihästi sideks kui ka mitmesugusteks muudeks ülesanneteks kasutatavad raadioseadmed arenevad kiiresti — muutudes üha keerukamaiks, ja nende teenindamine ning ehitamine nõuab kvalifitseeritud kaadrit. Seepärast peavad noored eriteadlased üksikasjaliselt tundma raadioseadmeid ja nende üksikosi, esmajärjekorras aga elektrontorusid.

Elektrontorusid käsitellakse tehnikumides eri õppeainena raadiotehnika ja traatsidetehnika erialade õpetamisel. Käesolevas raamatus on aine osade järjekorra määramisel võetud aluseks sidetehnikumide vastava õppeaine — elektrovaakumseadiste — õppekavades ettenähtud järjestus. Materjali ulatus aga ületab õppekava mitmes osas, et raamat saaks olla kasulik käsiraamatuna ka iseõppijaile ja praktikas tegutsejaile.

Et käesolevas teoses käsiteldud materjali pole eesti keeles seni ulatuslikumalt trükis avaldatud, siis puuduvad rea mõistete kohta ühtsed oskussõnad ja valemite tähised. Siin on kasutatud valemite tähiseid ja oskussõnu, mis määrati kindlaks kirjastuse poolt moodustatud vastavas komisjonis. Seetõttu esineb oskussõnade ja tähiste seas rohkesti uudseid, milledest suur osa muutub kahtlemata üldtarvitatavaiks, osa aga võib-olla heidetakse elava keele poolt kõrvale.

Avaldan suurimat tänu Tallinna Polütehnilise Instituudi elekterside kateedri juhatajale dotsent H. Riikojale väärtuslike näpunäidete ja käsikirja juures tehtud sisulise korrektuuri eest ja sm. A. Isotammele käsikirja kohta koostatud retsensiooni eest, milles esiletoodud soovitused on käsikirja lõplikul koostamisel arvesse võetud.

Tallinn, märtsis 1949.

Autor.

Saateks.

Elektrienergia kasutamise võimalust on tunduvalt laiendanud elektrovaakumseadiste leiutamine, millede tegevus põhineb vabade elektronide ja ioonide liikumisele vaakumis. Need seadised on võimaldanud rakendada elektrienergiat kõige mitmekesisemaiks tööstuslikeks ja sõjalisteks otstarveteks ning on andnud kogu elektrotehnikale täiesti uudsed arengusuunad.

Ainult tänu elektrovaakumseadistele osutus võimalikuks rahuldavalt lahendada suursagedusvoolude tekitamise, võimendamise, alaldamise jne. probleeme. Suursagedusvool on aga raadiotehnika, kaugnägemise, helifilmi, raadiolokatsiooni ja muude tänapäeva tehnika väga tähtsate alade aluseks. Elektrontorud on leidnud kasutamist ka tootmisprotsesside automatiseerimisel ja telemehhaniseerimisel, arstiteaduses, elektroenergeetikas, mitmekesistes teaduslikes uurimistes jne. Nende rakendamine on kujundanud täiesti uue tehnikaharu — elektroonika.

Esimene elektrontoru Venemaal valmistati 1912.—1913. a. Peterburi Elektrotehnika Instituudis V. Kovalenkovi ja Skritski poolt.

Elektrontorude tööstus aga on meie kodumaal loodud alles nõukogude korra ajal. Esimesed tööstuslikud elektrontorud valmistati Nižegorodski raadiolaboratooriumis aastal 1918 NSVL Teaduste Akadeemia kirjavahetaja-liikme prof. M. Bontš-Brujevitši poolt. Sealsamas raadiolaboratooriumis ehitas Bontš-Brujevitš

1919. a. ka esimesed võimsad generaatortorud — võimsusega üks kilovatt. Need olid tol ajal võimsamaiks maailmas ja kujutasid endist esimesi vesijahutusega elektrontorusid. Bontš-Brujevitš kujundas ka elektrontoru tegutsemise teooria, sõltumata euroopa ja ameerika teadlastest. Hiljem valmistati tema juhtimisel 5-kilovatine ja 1923. a. juba 25-kilovatine generaatortoru.

Siit peale algas kiire elektrontorude tööstuse areng. Akadeemik A. Tsernõšov esimesena maailmas tegi ettepaneku valmistada elektrontorusid kaudselt köetava katoodiga. See ettepanek sai tema enda poolt ka praktiliselt rakendatud.

Nõukogude tööstus hakkas tootma väga suures valikus vastuvõtu- ja generaatortorusid. Aastal 1923 lasti turule esimene NSV Liidu ökonoomne elektrontoru tüüp „Mikro". Alates aastaist 1923—1924 hakkas nõukogude elektrovaakumtööstus sammuma kiiret tõusuteed. Nõukogude teadlaste poolt loodi mitmesuguseid elektrontorude konstruktsioone ja anti menetlusi nende massiliseks tootmiseks. Neist võiks nimetada S. Vekšinskit, A. Šapošnikovi ja eriti S. Zusmanovskit, J. Katsmani ning S. Moškovitšit, kelledele on väikese võimsusega elektrontorude („raadiolampide") eritüüpide leiutamise eest määratud Stalini preemia. Erilist edu on saavutanud võimsate generaatortorude valmistamisel S. Zusmanovski, A. Mints, N. Oganov jt.

Eriti raadiolokatsioonis suurt tähtsust omav ülilühilainete tekitamiseks kasutatav magnetron põhineb nõukogude inseneride D. Maljarovi ja N. Aleksejevi poolt 1936.—1937. aastail loodud konstruktsioonile, mille kirjeldus avaldati 1940. aastal nõukogude tehnika-ajakirjas „Журнал технической физики".

Ülisuursageduslike voolude tekitamiseks vajalike magnetroni, klüstroni jt. seadiste mitmeid konstruktsi-

oone on kujundanud ning tegelnud nende katselise ja teoreetilise uurimisega S. Gvozdover, S. Zusmanovski, V. Sarajev, A. Fedossejev jt.

Esimesed kaugnägemise katsed toimusid teatavasti mehaanilisel teel. Aga juba 1907. a. oli vene teadlane B. Rosing andnud elektron-kaugnägemise põhimõtte, mille praktilise rakendamise idee andis aastal 1931 nõukogude teadlane S. Katajev.

Praegu toodab meie tööstus kaugnägemistehnikas, mõõtmistehnikas, raadiolokatsioonis jne. vajalikke mitmesuguseid elektronkiiretorusid. Sel alal peab mainima D. Zernovi jt. töid automaatikas ja telemehaanikas kasutatavate elektronjaotajate loomisel. Olulist tähtsust omavad G. Grinbergi poolt loodud meetodid elektrostaatiliste ja elektromagnetiliste väljade arvutamiseks mitmesuguseis keerukais olukordades. Peamist huvi ja praktilist tähtsust omab tema poolt sõja-aastail loodud teooria elektronkiirte elektrilisest ja magnetilisest fokuseerimisest.

Massiliselt toodetakse P. Timofejevi, N. Hlebnikovi, M. Štšipalovi jt. poolt kujundatud ajakohaseid fotorakke, mida hulgaliselt vajatakse helifilmis, automaatikas jne. Siin olgu nimetatud, et fotoefekti avastajaks ja fotoelemendi loojaks on viljakas vene teadlane, füüsika professor Aleksander Stoletov.

Esimesena maailmas tõestas katseliselt voolude mitmeastmelise võimendamise võimalikkust elektronide sekundaaremissiooni teel 1930. a. L. Kubetski. Rakendades seda põhimõtet on tema enda, P. Timofejevi, R. Aronovitši, E. Kormakova jt. poolt loodud mitmeid originaalseid elektronkordistajaid, mis omavad tähtsust automaatikas, helifilmis ja muudes tehnikaharudes.

Kaugnägemissaatjais vajalike ikonokoopide kujundamisel on nõukogude eriteadlased G. Braude, S. Katajev,

P. Timofejev, P. Šmakov jt. loonud rea originaalseid konstruktsioone.

Mitmetel teaduse ja tehnika aladel olulist tähtsust omavate nõukogude elektronmikroskoopide loojaina on tuttavad Stalini preemia laureaadid A. Lebedev, V. Vertsner, N. Zandin, aga ka J. Kušnir, N. Suškin jt.

Nõukogude Liidus leiutati esmakordselt vahendid katoodi pinnast elektrivälja toimel elektronide eraldamise näol tekkiva, nn. elektronide külmemiteerimise praktiliseks rakendamiseks. Teadlaste V. Krassovski, V. Sorokina jt. poolt ehitati kütteta kenotronid, mis sobivad kõrgepingeliste nõrkade voolude alaldamiseks.

Teadlased P. Timofejev, V. Sorokina, K. Jumatov, M. Butslov jt. on loonud rea originaalse konstruktsiooniga eriotstarbelisi elektrovaakumseadiseid.

Klaaskestaga elavhõbedaaur-suunajaid hakati Nõukogude Liidus ehitama 1921. a. NSVL Teaduste Akadeemia kirjavahetaja-liikme, prof. V. Vologdini ja M. Spitsõni juhatusel. Metallkestaga võimsate elavhõbedaaur-alaldajate valmistamist alustati 1927. a. Kirovi-nimelises tehases „Elektrosila" ins. V. Krapivini juhatusel. Metallkestaga alaldajad andsid 600-voldise pingega kuni 500 amprit voolu. Juba 1935. a. tootis aga tehas alaldajaid, mis andsid 5000-amprilist voolu pingega 800 volti.

Tiratronide tootmist alustati tehases „Svetlana" 1931. a. Esimesed nii klaas- kui ka metallkestas ignitronide laboratoorsed eksemplarid Nõukogude Liidus kujundati ja valmistati Üleliidulises Elektrotehnika Instituudis 1935. a.

Liigpingekaitsmetena kasutatavate gaaslahendite esimeseks valmistajaks Nõukogude Liidus oli akadeemik A. Tsernõšov.

Elektroonika alal on Nõukogude Liidus teostatud hulk laialt tuntud teaduslikke uurimusi. Nii näiteks

on teinud mitmeid avastusi fotoelektronide levimiskiiruse alal P. Lukirski, S. Priležajev, P. Timofejev, A. Pjatnitski, J. Kušnir jt., fotoefekti teooria alal I. Tamm ja S. Šubin, elektronide liikumise alal vaakumis N. Kaptsov, S. Gvozdover, G. Spivak, M. Grehhova, S. Belljustin jt., elavhõbeda-aur-suunajates esinevate toimuste alal A. Utjovski ja G. Petrov, nende arvutamiseks on andnud meetodi L. Neiman, esimesi tüüritavate elavhõbe-suunajate uurijaid on prof. K. Krug, samuti on õige mitmeid muid tähtsaid uurimusi teostanud ning avastusi andnud rida teisi nõukogude teadlasi.

Käesoleval ajal omab meie kodumaa hästiarenenud elektrovaakumseadiste tööstust, mis laseb välja peaaegu kõiki teadaolevaid elektrovaakumseadiste tüüpe.

Vastutav toimetaja.

Esimene osa.

SISSEJUHATUS.

I peatükk.

Üldmõisted.

§ 1. Elektron- ja ioonseadiste määrang. Elektron- ja ioonseadisteks nimetatakse seadiseid, milledes kasutatakse elektrivoolu toimel vaakumis või hõrendatud gaasides tekkivaid nähtusi.

Et ka gaas- või metalliaurtäidisega seadistes on tegemist suhteliselt madala rõhuga (ehkki mitte täieliku vaakumiga, siiski suhteliselt suure hõrenduse ehk vaakumiga), nimetatakse kõiki neid seadiseid sageli ühise nimetusega — elektrovaakumseadisteks. Selliseid elektrovaakumseadiseid, milledes on kasutatud vaakumis asetsevat elektrijuhti läbiva elektrivoolu toimet, nimetatakse elektrilahenduseta elektrovaakumseadisteks, näiteks elektri-hõõglambid, raudvesiniktakistid, vaakumis asetsevad termoelemendid jt.

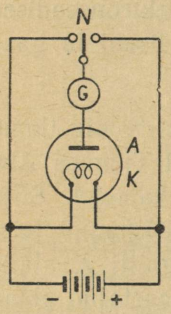
Elektrilahendusega elektrovaakumseadisteks nimetatakse niisuguseid elektrovaakumseadiseid, milledes elektrivool moodustub elektronide liikumisena vaakumis või ioonide ja elektronide liikumisena hõredalt gaasiga või metalliauruga täidetud ruumis. Vastavalt sellele, kas vool moodustub elektronide liikumisena või elektronide ja ioonide liikumisena, liigitatakse need seadised elektronseadisteks ja ioonseadisteks. Nii kuuluvad elektron-vaakumseadiste rühma elektrontorud, elektronkiire-

torud jt. ning ioonseadiste rühma — gasotronid, elavhõbedaaur-suunajad jne. Arvestades asjaolu, et niihästi ühtedes kui ka teistes seadistes on peamisteks voolu tekitajaiks elektronid, kasutatakse elektrilahendusega elektrovaakumseadiste üldnimetusena sageli ka nimetust elektronseadised, eristades suurvaakum- ehk vaakumelektronseadiseid ja gaastäidisega elektronseadiseid.

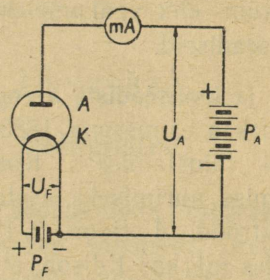
§ 2. **Elektron- ja ioonseadiste areng.** Elektrivoolu ilmnemist vaakumis märkas esimesena 1883. aastal Thomas Alva Edison hõõglambi täiustamiseks teostatud katsetel. Söest hõõgniidi pihustumise uurimiseks asetas ta hõõglampi teise, plaadikujulise elektroodi *A* (joon. 2. 1). Hõõgniiti *K* alalisvooluga kuumutades märkas Edison, et lampi asetatud plaadi ja patarei plussklemmi vahele ühendatud galvanomeeter *G* näitas vooluringis voolu. Kui aga plaat ühendati (ümberlüliti *N* abil) galvanomeetri kaudu patarei miinusklemmiga, siis vooluringis voolu polnud. Samuti ei ilmnenud voolu galvanomeetri ühendamisel patarei mistahes klemmiga, kui hõõgniit polnud küllaldaselt kuum. Kirjeldatud nähtus, mida nimetatakse Edisoni efektiks, leidis seletuse alles pärast seda, kui XIX sajandi lõpul J. J. Thomsoni ja teiste füüsikute uurimised näitasid, et kuumutatud kehadest väljuvad negatiivset elektrilaengut omavad osakesed — e l e k t r o n i d. Tekitades vaakumis elektrivoolu, satuvad nad oma negatiivse laengu tõttu plaadile ainult siis, kui plaat omab hõõgniidi suhtes positiivset potentsiaali.

Esimese kahte elektroodi sisaldava elektronseadise — k a h e e l e k t r o o d i g a e l e k t r o n t o r u (ehk r a a d i o l a m b i, nagu kokkuleppeliselt on rahvapärase nimetusega lubatud nimetada väikese võimsusega ja peamiselt raadiovastuvõtjais kasutatavaid elektronseadiseid) ehitas 1904. aastal J. A. Fleming, ühendades eri patareid hõõgniidi küttevooluringi ja plaadivooluringi (joon. 2. 2). Plaati *A*, mis

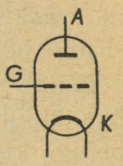
tuleb ühendada alati patarei plussklemmiga, nimetatakse a n o o d i k s, ja sama patarei miinusklemmiga ühendatavat kütteniiti *K* — k a t o o d i k s. Anoodvooluringis olevat patareid nimetatakse a n o o d p a t a r e i k s ja kütteniidi



Joon. 2. 1. Katseseadise skeem läbi õhutühja ruumi kulgeva elektronide-voolu avastamiseks. *K* — lambi hõõgniit, *A* — plaadikujuline elektrood, *G* — galvanomeeter, *N* — ümberlüliti.



Joon 2. 2. Kahe elektroodiga elektrontoru vooluringid. Anoodvooluring: anoodpatarei P_A plussklemm, milliampermeeter mA, anood *A*, elektroodide-vaheline õhutühi ruum, katood *K*, anoodpatarei miinusklemm; küttevooluring: küttepatarei P_F plussklemm, katood *K*, küttepatarei miinusklemm.



Joon. 2. 3. Kolme elektroodiga elektrontoru skeemi kujutav leppemärk: *A* — anood, *K* — katood ja *G* — võre.

(katoodi) kuumutamiseks kasutatavat patareid k ü t t e p a t a r e i k s. Sellist kahe elektroodiga elektrontoru nimetatakse ka d i o o d i k s. Diood laseb voolu läbi ainult ühes suunas.

Dioode kasutati raadiovastuvõtjais suursagedusvoolu detekteerimiseks. Praegu kasutatakse dioode peale selle veel paljudes elektriseadmetes vahelduvvoolu ühesuunaliseks pulseerivvooluks muundamiseks.

Sõltuvalt alaldatava vahelduvvoolu sagedusest (suursagedus, helisagedus, väikesagedus [1]) ja alaldatud voolu kasutamise otstarbest, nimetatakse kahe elektroodiga elektrontorusid veel demodulaatortorudeks, detektortorudeks, kenotronideks jne.

Kolme elektroodiga elektrontoru valmistas esimesena 1907. aastal Lee de Forest, kes asetas katoodi *K* ja anoodi *A* vahele võrgukujulise kolmanda elektroodi — võre *G* (joon. 2. 3). Niisugust kolme elektroodiga elektrontoru nimetatakse trioodiks. Katsed näitasid, et katoodi ja anoodi vahel oleva võre pingega saab mõjutada elektrontoru läbiva voolu tugevust. Kui kanda võrele katoodi suhtes negatiivne pinge, siis vähendab võre poolt negatiivset laengut kandvaile elektronidele mõjuv tõukejõud elektrontoru katoodilt anoodile liikuvate elektronide hulka. Vähenemine on seda suurem, mida kõrgem on võre negatiivne pinge. On aga võre katoodi suhtes positiivne, siis suureneb elektrontoru läbiva voolu tugevus, sest positiivse pingega võre poolt negatiivset laengut kandvaile elektronidele mõjuv tõmbejõud soodustab katoodist väljunud elektronide liikumist anoodile. Nii ongi võimalik trioodi võre pinge muutmise teel muuta elektrontoru anoodvooluringis voolu tugevust. Et pinge tekitamiseks võre ja katoodi vahele ühendatav vahelduvvõimsus võib olla väike, võrreldes anoodvooluringis tekkiva võimsusega,

[1] Käesolevas raamatus kasutatakse suure sagedusega vahelduvvoolude nimetuseks senise ebasobiva nimetuse „kõrgsagedusvool" asemel mõistet õigemini väljendavat nimetust „suursagedusvool". See nimetus on seni trükis alles vähe avaldatud ega ole seetõttu veel suutnud saavutada laia levikut, tohiks aga peagi muutuda üldkasutatavaks.

Samuti on käesolevas raamatus ka väikese sagedusega vahelduvvoolude senine ebakohane nimetus „madalsagedusvool" asendatud kohasema nimetusega „väikesagedusvool".

(Vastutav toimetaja.)

siis saab kolme elektroodiga elektrontoru kasutada võimendajana (releena) ja pealegi praktiliselt inertsivaba võimendajana, sest elektronide mass on väga väike ja nende liikumise kiirus suur.

Esimesi trioode kasutati raadiovastuvõtjais nõrkade helisageduslike vahelduvvoolude võimendamiseks. Hiljem võeti nad tarvitusele ka detekteerimiseks ja suursageduslike vahelduvvoolude võimendamiseks.

Pärast elektrontorude leiutamist sai raadiotehnika areng hoopis uue suuna, mis ongi ta viinud tänapäeva kõrgele tasemele. Peale selle on elektrontorud rakendamist leidnud ka paljudel muudel tehnika aladel. Nii koostati 1913. aastal esimene trioodi abil töötav tagasisidestus-lülitus, mida algul kasutati raadiovastuvõtjais võimenduse suurendamiseks, hiljem aga ka raadiosaateseadmete suursageduslikeks generaatoreis — suursageduslike voolude tekitamiseks. Esimesi niisuguse lülitusega katsetajaid oli vene teadlane N. D. Papaleksi, kes juba 1915. aastal teostas raadio-telefonilise ülekande elektrontoru-generaatori abil töötava raadiosaatja kaudu.

Ajavahemikul 1913.—1920. aastani omandas elektrontoru raadiotehnikas määrava tähtsuse, mille ta on säilitanud tänapäevalgi.

Elektrontorude suhtes üha suurenevate nõudmiste tõttu on töötatud pidevalt nende täiustamise kallal. Nii ehitati aastal 1923 esimene kahe võrega elektrontoru — tetrood ja 1929. aastal kolme võrega elektrontoru — pentood. Seejärel valmistati mitmest ühises kestas asetsevast süsteemist koosnevad liit-elektrontorud ehk liitlambid, näiteks: kaksikdiood, diood-triood, kaksikdiood-triood, diood-pentood jt., 1934.—1935. a. muundus-vastuvõtja segustusastmes kasutatav nelja võrega elektrontoru — heksood, peaaegu samal ajal — samaks otstarbeks määratud viie võrega heptood ning pisut hiljem kuue võrega oktood.

Ülilühilainete tähtsuse suurenedes raadiotehnikas on töötatud ülisuursagedusliku vahelduvvoolu tekitamise ja võimendamise jaoks eriliste seadmete konstrueerimise kallal, millise töö tulemusena on loodud rida uusi elektrovaakumseadiseid, nagu magnetron, klüstron jt.

Elektri- ja raadioseadmete varustamiseks alalisvooluga laialdast kasutamist leidev elavhõbedaaur-suunaja, mis muundab vahelduvvoolu pulseerivvooluks, leiutati aastal 1908. Tema konstruktsiooni on pidevalt täiustatud ja tema omadusi parendatud. Märksa hiljem ehitati esimesed inertgaasiga või elavhõbedaauruga täidetud, köetavat katoodi omavad gasotronid, mida praegusajal laialdaselt kasutatakse. Viimasel ajal on kasutusele võetud võrega varustatud gasotronid — nn. tiratronid.

Samuti on suure arengutee läbi käinud valgusenergiat elektrienergiaks muundavad või valgusenergia abil elektrivoolu tugevust reguleerivad fotoelektrilised elektrontorud — fotorakud, mida praegu kasutatakse helifilmiseadmetes, signalisatsiooniseadmetes, piltide ja kujutiste elektrilisel teel ülekandmise seadmetes ja mitmesugustes telemehaanika seadmetes. Tänapäeval kasutatavate fotoelektriliste seadmete omadused ületavad kaugelt umbes 40 aastat tagasi ehitatud esimeste selletaoliste seadmete omadusi.

Venemaal hakkas teaduslik töö elektrovaakumseadiste alal ja elektrovaakumseadiste tööstus arenema alles nõukogude korra ajal. Pärast Suurt Sotsialistlikku Oktoobrirevolutsiooni loodi Nõukogude Venemaal kodumaine elektrovaakumseadiste tööstus. V. I. Lenini poolt 2. detsembril 1918. a. allakirjutatud määruse alusel organiseeriti Nižni-Novgorodis Posti-Telegraafi Rahvakomissariaadi süsteemis raadiolaboratoorium, kus M. A. Bontš-Brujevitš'i juhatusel valmistati võimendus-elektrontorusid ja maailmas esimesed võimsad veega jahutatavat anoodi omavad generaator-elektrontorud.

1922. aastaks oli Nižni-Novgorodi raadiolaboratoorium kujunenud elektrovaakumseadiste tehaseks, mis laskis välja esimesi massiliselt toodetavaid võimendustorusid ja väikesi generaatortorusid. See tehas ühendati 1928. a. „Svetlana" tehasega, mille laboratooriumi juhatas S. Vekšinski, ja muutus Nõukogudemaa elektrovaakumtööstuse teaduslik-tehniliseks keskuseks. Selle tehase laiendamine ja reorganiseerimine, mitme uue, peaaegu täielikult Nõukogude Liidus valmistatud seadmetega hästisisustatud elektrovaakumseadiste tehase loomine viisaastakute raamides, koos nende tehaste jaoks kodumaiste toormaterjali baaside loomisega, on nõukogude elektrovaakumtööstuse täielikult vabastanud välismaisest sõltuvusest.

§ 3. Elektrovaakumseadiste liigid. Tänapäeval kasutatakse väga mitmesuguseid elektrovaakumseadiseid, mis erinevad üksteisest töötamisviisi, ehituse ja kasutusotstarbe poolest. Et hõlbustada kõigi nende seadiste omaduste tundmaõppimist, selleks on vaja neid liigitada.

Üheks elektrovaakumseadiste liigitamise aluseks võiks olla neid läbiva elektrivoolu iseloom, mis ühtlasi määrab kindlaks neis esinevad füüsikalised protsessid. Selle liigitelu järgi jaguneksid elektrovaakumseadised kahte suurde rühma.

1. Elektrovaakumseadiseid, milledes elektrivoolu moodustavad läbi vaakumi (õhutühja ruumi) liikuvad elektronid, nimetatakse elektronseadisteks.

2. Elektrovaakumseadiseid, milledes elektrivoolu moodustavad ioonid ja elektronid läbivad hõreda gaasi või metalliauruga täidetud ruumi, nimetatakse ioonseadisteks. Voolu tekkimist põhjustavate toimuste iseloomu järgi liigitatakse viimaseid omakorda:

a) huumlahendusseadisteks ehk -torudeks,

b) leeklahendusseadisteks,

c) kõetavkatoodiga leeklahendusseadisteks,
d) sõltuva gaaslahendusega seadisteks.

Peale ülaltoodud liigituse võib elektrovaakumseadiseid liigitada ka teiste tunnuste järgi, kui soovitakse just teatavat tunnust eriti rõhutada. Elektrovaakumseadiste liigituse normide kohaselt võivad liigituse aluseks olla järgnevad tunnused:

1. Ruumis vabalt liikuvate elektrilaengute tüürimisviis: a) mittetüüritavad seadised — mittetüüritava vooluga seadised, b) laengu hulgaga tüüritavad seadised — voolu moodustavate liikuvate elektrilaengute hulga muutmise teel tüüritava vooluga seadised, c) laengu suunaga tüüritavad seadised — liikuvate elektrilaengute suuna muutmise abil tüüritava vooluga seadised, d) laengu liikumiskiirusega tüüritavad seadised — liikuvate elektrilaengute kiiruse muutmisega tüüritavad seadised; tüürimise meetod: a) elektriväljaga ja b) magnetväljaga tüüritavad seadised.

2. Vabalt liikuvate elektronide fookusesse juhtimise ehk fokuseerimise aste: a) fookusesse juhtimata ehk fokuseerimata elektronidega seadised, b) osaliselt fokuseeritud, c) täielikult fokuseeritud — ruumis liikuvate elektronidega seadised; fokuseerimise meetod: a) elektriväljaga ja b) magnetväljaga fokuseeritud seadised.

3. Elektronide emiteerimisviis: a) termoemiteerivad, b) sekundaaremiteerivad, c) fotoemiteerivad jt. seadised.

4. Seadise või mõne tema elektroodi jahutamisviis: a) kiirgusjahutusega seadised — kus elektroodidelt enamik soojust lahkub kiirgumise teel, b) konvektsioonjahutusega seadised — milledes soojus elektroodidelt kantakse ära konvektsiooni teel, juhtides neist mööda kas õhku (õhk-

jahutusega elektrood) või vedelikku (tavaliselt vett — vesijahutusega elektrood).

5. Seadise kesta materjal: a) klaas-, b) keraamika- või c) metallkestaga elektrovaakumseadised, kusjuures viimased võivad omada kas mitte lahti võetavat (kokkujoodetud, kokkukeevitatud) või lahtivõetavat kesta — siseosade vahetamise võimaldamiseks.

6. Energia muundamisviis. Et see rühm haarab enamikku allpool põhjalikumalt käsiteldavaist elektrovaakumseadistest, siis olgu siinkohal sellesse rühma kuuluvate seadiste kohta antud täielikum alaliigitelu:

a) elektrivoolu kuju muundavad elektrovaakumseadised, millede hulka kuuluvad kõik elektron- ja ioonseadised, mida kasutatakse elektrivoolu kuju muundamiseks, näit.: vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks, alalisvoolu muundamiseks vahelduvvooluks jne.,

b) fotoelektrilised seadised, mis põhinevad fotoelektrilise efekti rakendamisel ning mida kasutatakse valgusenergia muundamiseks elektrienergiaks, ja

c) elektron-optilised seadised, mida kasutatakse elektriliste toimuste muundamiseks nähtavaiks kujutisteks või vastupidi.

7. Kasutusotstarve. Vastavalt sellele jagunevad igasse eelmises rühmas tähtede a, b ja c all märgitud allrühma kuuluvad seadised omakorda veelgi reaks liikideks.

§ 4. Elektrovaakumseadiste kasutamise otstarve. Normide kohaselt liigitatakse eelmises paragrahvis nr. 6 all tähtedega a, b ja c märgitud elektrovaakumseadiste allrühmad vastavalt nende kasutamise otstarbele alljärgnevalt.

A. Elektrivoolu kuju muundavad elektrovaakumseadised.

1. Elektrovaakum-suundusseadised. Neid kasutatakse vahelduvvoolu muundamiseks alalisvooluks. Siia

kuuluvad kahe elektroodiga suundus-elektrontorud (kenotronid) ja mitmesugused suundus- ja ioonseadised, nagu: elavhõbedaaur-suunajad, gasotronid, huumsuunajad jt.

2. Väikese võimsusega elektrontorusid ehk raadiolampe[1] kasutatakse peamiselt raadiovastuvõtjais, väikese võimsusega võimendajais, mõõteriistades jne. Nende kõige laialdasemaks kasutamise otstarbeks on vahelduvvoolude tekitamine ja võimendamine. Sel eesmärgil valmistatakse: kolme elektroodiga (ühe võrega) elektrontorusid ehk raadiolampe — trioode, kahe võrega elektrontorusid — tetroode ja kolme võrega elektrontorusid — pentoode. Selleks otstarbeks kasutatakse ka mõningaid liittorusid ehk liitlampe, mis omavad mitut ühisesse kesta monteeritud elektroodide süsteemi. Peale selle kasutatakse selleks ka elektrontorusid, milledes on rakendatud elektroodide sekundaaremissiooni nähtust.

Väikese võimsusega elektrontorud omakorda liigituvad kasutamise otstarbe järgi veel järgmiselt:

a) ostsillaator- ja generaatortorud, mida kasutatakse ülisuursagedusliku (üle 30 MHz), suursagedusliku (20 kHz ... 30 MHz) või helisagedusliku (20 Hz ... 20 kHz) vahelduvpinge tekitamiseks (ostsilleerimiseks) või samasuguse vahelduvvõimsuse tekitamiseks (genereerimiseks);

b) pingevõimendustorud ehk pingevõimendituslambid — elektrontorud ülisuursagedusliku, suursagedusliku või helisagedusliku vahelduvpinge võimendamiseks;

c) võimsusvõimendustorud, mida kasutatakse võimsuse võimendamiseks raadiovastuvõtjate ja heli- või

[1] Ehkki väikese võimsusega elektrontorude kohta on siin rööbiti kasutatud ka rahvapärast nimetust raadiolamp, tuleks siiski eelistada tehniliselt sobivamat nimetust elektrontoru. (Vastutav toimetaja.)

suursageduslikku vahelduvvoolu võimendavate aparaatide lõppastmetes;

d) demodulaatortorud — raadiovastuvõtjates suursageduslikku moduleeritud vahelduvvoolu demoduleerimiseks või detekteerimiseks;

e) segustustorud ehk segustuslambid on elektrontorud, mida kasutatakse muund-raadiovastuvõtjais vastuvõetava suursageduslikku vahelduvvoolu muundamiseks vahe- või liitsageduslikuks (ehk üldiselt muundsageduslikuks) vahelduvvooluks, mis teostub vastuvõetava suursageduslikku ja vastuvõtjas sisalduva ostsillaatori poolt tekitatava ning eelmisest erinevat sagedust omava vahelduvvoolu liitmise teel;

f) muundustorud — elektrontorud, mis peale segustamise ühtlasi tekitavad vastuvõetava suursagedusvooluga liidetavat vahelduvvoolu. Segustus- ja muundustorudena kasutatavat nelja võrega elektrontoru nimetatakse heksoodiks, viie võrega elektrontoru — heptoodiks ja kuue võrega toru — oktoodiks. Peale nende kasutatakse neiks otstarveteks vahel ka liit-elektrontorusid, näit. triood-heksoodi jt.

Et väikese võimsusega elektrontorusid ehk raadiolampe kasutatakse peamiselt raadiovastuvõtjates, siis nimetatakse neid vahel ka vastuvõtulampideks.

3. Suure võimsusega elektrontorusid tarvitatakse suure võimsusega (kilovattidesse ulatuvate võimsuste tekitamiseks, võimendamiseks, moduleerimiseks jne.) elektrontoru-generaatorites, -võimendajates, -modulaatorites jne. Ka suure võimsusega (generaator-, võimendus- jt.) elektrontorud liigituvad ülisuursagedus-, suursagedus- ja helisagedustorudeks. Peale trioodide, tetroodide ja pentoodide kuuluvad sellesse elektrovaakumseadiste rühma ülisuursageduslike (vägasuursageduslike: 30...300 MHz, ultra-

suursageduslike: 300 MHz ... 3 GHz [1] ja supersuursageduslike: 3 ... 30 GHz) generaatortorudena kasutatavad magnetvälja poolt tüüritavad magnetronid ja mitmesugused eri liiki elektronseadised, nagu klüstronid jt. Et suure võimsusega elektrontorusid kasutatakse peamiselt raadiosaatjates, siis nimetatakse neid vahel ka saatetorudeks.

B. Fotoelektrilised seadised, s. o. elektrovaakumseadised, mis on määratud valgusenergia muundamiseks elektrienergiaks, jagunevad järgmiselt:

1. Välis-fotoefektiga seadised: milledes valguse mõjul emiteerivad (eralduvad) katoodist elektronid, muutes elektroodidevahelise ruumi takistust; nende eri liikideks on:

a) ruum-fotorakud, mis omavad kas vaakumit sisaldavat või hõrendatud gaasiga täidetud kesta; vastavalt: vaakum-fotorakud ja gaas-fotorakud, ja

b) fotokordistajad, mis peale tavalise fotokatoodi sisaldavad veel sekundaaremissiooni tekitavaid sekundaarkatoode.

2. Sise-fotoefektiga seadised, millede takistus muutub elektronide vabanemise tõttu valguse mõjul seadise elektroodi molekulidest; nende eri liikideks on:

a) tahked fotorakud ja

b) fotoelemendid, milledes tekib nn. galvaaniline fotoefekt, kutsudes fotoelemendi klemmide vahel esile elektromotoorse jõu.

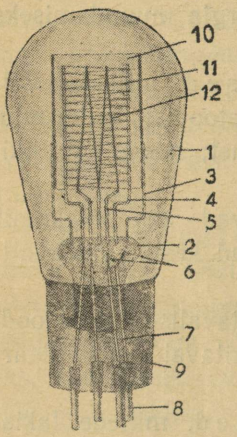
C. Elektron-optilised seadised. Sellesse liiki kuuluvad elektrovaakumseadised, mida kasutatakse elektriliste toimuste muundamiseks nähtavaiks kujutisteks, optiliste kujutiste muundamiseks elektrilisteks toimusteks või kujutises sisalduva valgusspektri koostise muutmiseks. Neist on rohkem levinud:

[1] GHz = gigahertsi = 10^9 Hz.

1. Huumlambid ja huumtorud, mis muundavad elektrienergiat valgusenergiaks.

2. Elektronindikaator, mille ekraani helendava osa laius sõltub pinge kõrgusest tüürelektroodil.

3. Elektronkiiretorud, mis võimaldavad elektriliste toimuste nähtavat jälgimist sellekohasel luminestseeriva ainega kaetud ekraanil. Nad võivad olla kas õhutühjad või hõreda gaasiga täidetud.



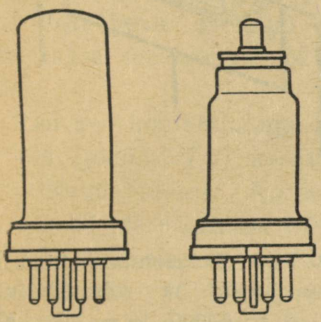
Joon. 5. 1. Klaaskestaga elektrontoru (läbipaistvana kujutatud sokliga): *1* — klaasist kest, *2* — elektroodide-hoidja, *3*, *4* ja *5* — anoodi, võre ja katoodi tugitraadid, *6* — raua ja nikli sulamist traatvahetükid, *7* — ühendusjuhtmed, *8* — kontaktjalad, *9* — sokkel, *10* — anood, *11* — võre, *12* — küttenii t ehk katood.

§ 5. Väikese võimsusega elektrontorude (raadiolampide) ehitus. Elektrontoru peamised osad on alljärgnevad.

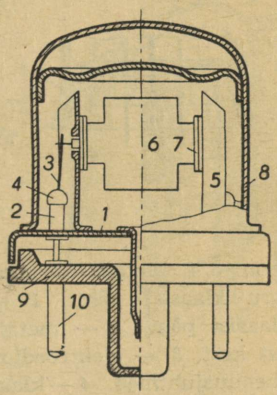
1. Kest ehk kolb, millesse on tekitatud vaakum ja kus asetsevad elektroodid. Kesta materjali järgi nimetatakse elektrontorusid klaas-, metall- või keraamika-elektrontorudeks. Klaaselektrontorude klaasist kest *1* (joonisel 5. 1) on ümmarguse põhjaga koonuse või silindri kujuline. Kolvi alumine ots on suletud tema servade külge sulatatud elektroodide-hoidjaga *2*, mis on samuti klaasist. Elektroodide-hoidja ülemise serva külge on kinnitatud elektroodide niklist tugitraatide *3*, *4* ja *5* alumised otsad. Nende tugitraatide (mis kolvi sees on ühtlasi ka elektroodide ühendusjuhtmeteks) alumiste otste ja väljaspool kolbi asetsevate elektrontoru kontaktjalgade *8* külge kinnitatud vask-ühendusjuhtmete *7* vahele on ühendatud klaasi sees asetsevad raua ja nikli sulamist valmistatud lühikesed traadist va-

hetükid *6*. Neil vahetükkidel on samasuur paisumistegur kui klaasil, mistõttu nende ja klaasi vaheline liitekoht jääb gaasitihedaks ka temperatuuri muutuste puhul.

Metalltorude väliskuju on näha joonisel 5. 2. Elektroodide ühendusjuhtmete väljatoomise viise läbi kesta põhja on näi-



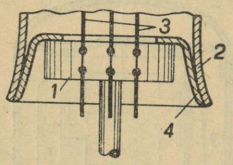
Joon. 5. 2. Metall-elektrontorude väliskuju.



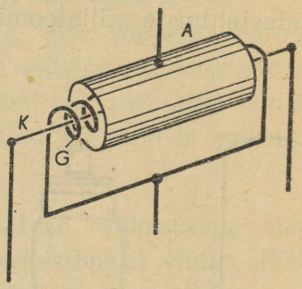
Joon. 5. 3. Metall-elektrontoru metallist põhjaga kest: *1* — metallist põhi, *2* — metallist toruke, *3* — elektroodi ühendusjuhe, *4* — klaasisolaator, *5* — elektroodide kandetugi, *6* — elektroodide süsteem, *7* — vilgukivist isoleerketas, *8* — metallist kest, *9* — sokkel, 10 — kontaktjalg.

datud joonistel 5. 3 ja 5. 4. Elektrontorude metallkestad valmistatakse vähese gaasisisaldusega rauast. Elektroodid kinnitatakse kesta põhja külge. Joonisel 5. 3 toodud ehitusviisi puhul on taldrikukujulise sokli põhja küljes erilisest metallisulamist torukesed. Nende sisse on joodetud klaaspulgad, mida läbivad samast metallisulamist traadid. Et klaasi ja nimetatud metallisulami paisumistegurid on võrdsed, siis on selliselt valmistatud juhtmete läbiviigikohad gaasitihedad. Joonisel 5. 4 toodud ehitusviisi puhul moodustab kolvi põhja klaasketas, mida läbivad erilisest metalli-

sulamist valmistatud juhtmed ja mille servad on joodetud samasuurt paisumistegurit omavast metallisulamist võru siseservade külge. Võru välisserv on keevitatud silindrilise kesta alumise serva külge.



Joon. 5. 4. Metall-elektrontoru klaasist põhi: *1* — klaasist põhi, *2* — metallist kest, *3* — elektroodide ühendusjuhtmed, *4* — klaasiga võrdset paisumistegurit omavast metallist võru.



Joon. 5. 5. Elektrontoru silindrikujuline anood ja spiraalikujuline võre: *A* — anood, *G* — võre, *K* — katood (kütteniit).

2. Elektroodid, mis asetsevad kolvis ja toetuvad tugitraatidele. Anood ja võre valmistatakse kas silindri (joon. 5. 5) või lameda karbi (joon. 5. 6) kujulisena. Väikese võimsusega elektrontoru anoodid valmistatakse niklist ja võred molübdeentraadist.

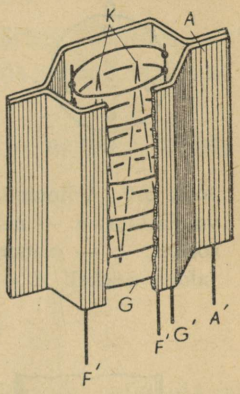
3. Sokkel ja kontaktjalad. Nende kuju ja mõõted on normitud. Kõige enam kasutatavate võimendustorude kontaktjalgade paigutused nähtuvad jooniselt 5. 7.

Nelja kontaktjalaga soklit (joon. 5. 7 *a*) kasutatakse peamiselt otseselt ehk vahetult köetavais trioodides.

Viie kontaktjalaga sokli (joon. 5. 7 *b*) puhul on keskmine kontaktjalg ühendatud trioodi kaudselt köetava katoodiga.

Seitsme kontaktjalaga sokleid (joon. 5. 7 *c*) kasutatakse peamiselt mitme elektroodiga elektrontorude juures. Joonisel

tähistatud kontaktjalgade vastavus elektroodidele on kõigil niisuguse sokliga elektrontorudel ühesugune. Joonisel tähtedega märkimata kontaktjalgu kasutatakse torus olevate ülejäänud elektroodide ühendamiseks. Juhul, kui elektrontorude elektroodide arv on kontaktjalgade arvust väiksem, jäetakse mõned kontaktjalad vabaks. Kui elektrontoru mõne elektroodi ühendamiseks on kasutatud toru kesta peale asetatud klemmi, siis märgitakse see klemm sokli joonise kõrvale.

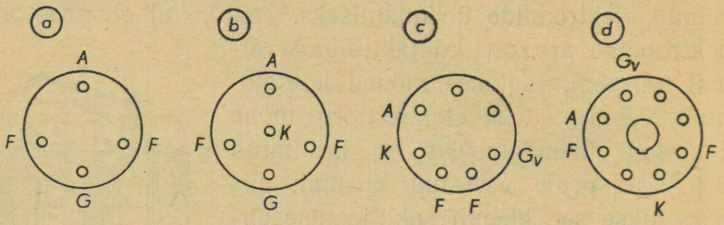


Joon. 5. 6. Elektrontoru lameda karbi kujuline anood *A*, lapiku spiraali kujuline võre *G* ja W-kujuline katood (küttenniit) *K*; küttevoolu ühendusjuhtmed *F'*, võre ühendusjuhe *G'* ja anoodi ühendusjuhe *A'*.

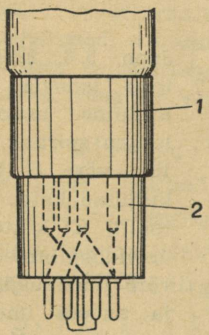
Kaheksa kontaktjalaga (nn. oktaal-) sokleid (joon. 5. 7 *d*) kasutatakse kõigi metalltorude juures. Ka uuemat tüüpi klaastorud varustatakse niisuguse sokliga. Kontaktjalad on asetatud võrdsete vahedega. Et vältida elektrontoru valesti pesasse asetamist, on sokli keskel ümmargune naba, mille ühel küljel on kiilukujuline kand. Elektrontoru asetamisel pesasse satub see kand pesal olevasse vastavasse avasse. Joonisel tähtedega märgitud kontaktjalad on kõigil elektrontorudel ühesugused. Kui elektrontorul on vähem elektroode kui soklil kontaktjalgu — jäetakse osa kontaktjalgadest vabaks. Elektrontoru kesta peal olevad klemmid märgitakse sokli joonise kõrvale.

Asendada elektrontoru teistsugust kontaktjalgade arvu omava elektrontoruga on võimalik järgmisel kolmel viisil: 1) seadmes seni sisaldunud elektrontoru pesa asendatakse uue pesaga, mis uuele elektrontorule sobib; 2) endise elektrontoru sokkel eraldatakse ja kinnitatakse uue elektrontoru sokli külge (joon. 5. 8), ühendades vastavad kontaktjalad

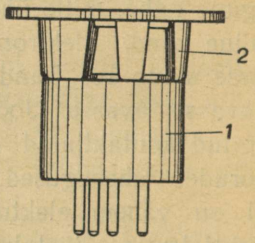
omavahel nende külge joodetavate traatide abil; 3) endise elektrontoru sokkel eraldatakse ja tema peale kinnitatakse



Joon 5.7. Võimendus-elektrontorude kontaktjalgade paigutused alt vaadatuna: *a* — nelja kontaktjalaga sokkel, *b* — viie kontaktjalaga sokkel, *c* — seitsme kontaktjalaga sokkel, *d* — kaheksa kontaktjalaga sokkel. *A* — anood, *G* — võre, *F* — kütteniit, *K* — katood, G_v — varivõre.



Joon. 5.8. Elektrontoru sokkel *1* tema külge monteeritud teistsugust kontaktjalgade arvu omava sokliga *2*.



Joon. 5.9. Endise elektrontoru soklile *1* monteeritud uue elektrontoru pesa *2*.

uuele elektrontorule sobiv pesa (joon. 5.9), mille kontaktvedrud ühendatakse sokli vastavate jalgadega nende vahele joodetavate traatide abil.

§ 6. Väikese võimsusega elektrontorude tüübitähised. Raadiovastuvõtu- või võimendustoru „nimi" ehk tüübitähis koosneb tähtede ja numbrite rühmast. Praegu kasutatakse vanemate tähistusviiside kõrval ka alljärgnevat tähistusviisi.

Esimene number näitab küttepinge väärtust voltides. Kui küttepinge väärtus ei võrdu täisarvuga, siis näitab see number küttepinge ligikaudset väärtust.

Tähed, mis näitavad toru ehituslikke erinevusi, tähistavad:

Д — dioodi,
Х — duodioodi,
С — trioodi,
Э — tetroodi,
П — pentoodi ja jugatetroodi,
К — varjestatud pentoodi ja jugatetroodi, pikendatud tunnusjoonega,
Ж — varjestatud pentoodi ja jugatetroodi, keskmise pikkusega tunnusjoonega,
А — sagedust muundavat kahe tüürvõrega elektrontoru,
Р — ühe või kahe dioodiga trioodi,
Б — ühe või kahe dioodiga pentoodi,
Н — kaksiktrioodi,
Ф — kaksikpentoodi ja kaksik-jugatetroodi,
Е — elektronindikaatorit,
Ш — maandatud võrega trioodi,
М — magnetroni,
К — klüstronit,
Г — gasotroni,
И — ignitroni,
Т — tiratroni.

Tähele järgnev number eraldab erinevate omadustega elektrontorusid, millede ülejäänud märgid on ühesugused.

Seadise väliskuju näitavatest tähtedest tähendavad:

Б — metallkestaga elektrontoru,
Ж — tõrukujulist elektrontoru,
П — sõrmekujulist elektrontoru,
Л — elektrontoru, mille sokli naba on varustatud lukustiga.

Näiteks tüübitähisega 4С1 märgitud elektrontoru on 4-voldise küttepingega triood.

Endise tähistusviisi kohaselt näitab esimene number küttepinge väärtust voltides. Kui küttepinge väärtus ei võrdu täisarvuga, siis näitab see number küttepinge ligikaudset väärtust.

Teisel kohal olev täht näitab elektrontoru peamist kasutamise otstarvet või ehitust. Selleks kasutatakse järgmist tähistust:

Х — duodiood detekteerimiseks,
С — keskmise võimendusteguri väärtusega triood pinge võimendamiseks,
Ф — suure võimendusteguri väärtusega triood pinge võimendamiseks,
У — väikese võimendusteguri väärtusega triood pinge võimendamiseks,
Н — suure võimendusteguri väärtusega kaksiktriood võimsuse võimendamiseks,
Ж — suursageduspentood (varjestatud),
К — muudetava võimendusteguri väärtusega ehk muudetava tõusuga suursageduspentood,
П — helisageduspentood või jugatetrood võimsuse võimendamiseks,
А — muundusheptood,
Л — segustusheptood,
Д — triood-heksood,
Р — keskmise võimendusteguri väärtusega duodiood-triood,

Г — suure võimendusteguri väärtusega duodiood-triood,
Б — helisageduslik duodiood-pentood pinge võimendamiseks,
Е — trioodi sisaldav elektronindikaator,
И — elektronindikaator.

Kolmandal kohal seisev number näitab teatud ehitusviisiga elektrontoru täiustatud väljalaske järjekorranumbrit.

Viimasel kohal seisev täht näitab järgnevate tähiste abil elektrontoru väliskuju:

С — tavaliste mõõdetega klaastoru,
М — väikesemõõteline klaastoru,
Ж — tõru-tüüpi klaastoru,
Н — alt varjestatud väljekontaktidega metalltoru.

Viimase tähe puudumine tähistab tavalise väliskujuga metalltoru.

Varem mainitud esimese numbri ees olev täht Ш tähistab väikese kahinatasemega elektrontoru.

Näitena olgu selgitatud ülaltoodud süsteemi kohaselt tähistatud elektrontoru tüübitähise tähendused:

6П3С — 6,3 V küttepingega, tavalisi mõõteid omava klaaskestaga jugatetroodi kolmas täiustatud väljalase (vanema tähistusviisi järgi 6Л6); 2С3М — 2 V küttepingega, väikesemõõteline, klaaskestaga, keskmise võimendusteguri väärtusega triood pinge võimendamiseks (vanema tähistusviisi järgi УБ-240).

Vanemate väikese võimsusega vastuvõtu- ja võimendusraadiolampide tähistusviisi järgi koosnes tüübitähis kahest tähest ja arvust. Nendest esimene täht näitas peamist kasutusotstarvet: У — võimendust, П — raadiovastuvõttu ja võimendust, С — eriotstarvet (tavaliselt mitme elektroodiga elektrontoru), Т — traathäälingu-võimendajais kasutatavust, М — võimsusevõimendust, Г — generaatorit, Б — alaldajat. Teisel kohal olev täht näitas katoodi materjali: Т — toreeritud katood, К — karbiidkatood, О — oksüüdkatood, Б —

baariumiga kaetud katood. Arv näitas selle elektrontoru tüübi ümberkujundamise järjekorranumbrit.

Näiteks elektrontoru YO-104 on oksüüdkatoodiga võimendustoru.

Metalltorude jaoks varem kasutatud ameerika tähistusviisi puhul tähendab esimene number ligikaudset küttepinge väärtust. Teisel kohal olev täht on toru tüübi tähis ja kolmandal kohal olev number tähistab välisklemmide külge ühendatud elektroodide arvu.

Näiteks elektrontoru 6K7 on 6,3 V küttepingega, muudetavat tõusu omav suursageduspentood seitsme väljeklemmiga (seega kaudselt köetav).

II peatükk.

Elektronid ja nende liikumine.

§ 7. **Aatomi ehitus.** Uurimised füüsika alal on näidanud, et elemendi kõige väiksem keemiliselt jagamatu osake — aatom — omakorda koosneb veelgi väiksematest osakestest, milledest tähtsamad on:

1) elektron — negatiivse elektrilaengu algosake ehk negatiivne elementaar-elektrilaeng;

2) positron — osake, mille mass võrdub elektroni massiga ja elektrilaeng elektroni laenguga, kuid on positiivne;

3) prooton — kergeima elemendi — vesiniku — aatomi tuum. Tema mass võrdub ligikaudu vesiniku aatomi massiga ja on elektroni massist 1837 korda suurem. Prootoni elektrilaeng on võrdne elektroni laenguga, kuid on positiivne;

4) neutron — osake, mille mass ligikaudu võrdub prootoni massiga, mis aga ei oma elektrilaengut.

Neist osakestest koosnevad kõigi ainete aatomid. Mitmesuguste ainete aatomid erinevad üksteisest ainult aatomit moodustavate ülalloeteldud osakeste arvu poolest.

Iga aine aatom koosneb aatomi tuumast ja selle ümber tiirlevaist elektronidest, moodustades miniatuurse planeetidesüsteemi. Aatomi tuum koosneb prootoneist ja neutroneist, millede koguarv määrab aine massiarvu (ligikaudse aatomkaalu). Aatomi tuuma ümber tiirlevate elektronide arv, mis võrdub aatomi tuumas sisalduvate prootonite arvuga, on iga aine aatomil isesugune ja määrab keemiliste elementide Mendelejevi perioodilises süsteemis aatomi järjestusnumbri.

Nii võiksime öelda, et aatomis sisalduvate prootonite ja neutronite koguarv määrab aine füüsikalised omadused, elektronide arv aga tema keemilised omadused.

Paljude elementide eri aatomite tuumades olevate neutronite arvud (seega ainete massiarvud) on erinevad. Neid erineva neutronite arvuga ühe ning sama aine aatomeid (millede elektronide ja prootonite arvud on võrdsed) nimetatakse selle aine isotoopideks.

Normaalselt on iga aine aatom elektriliselt neutraalne, sest temas on prootonite ja elektronide arvud võrdsed.

Kui aatomi tuuma ümber tiirlevaist elektronidest eraldub mingi välise jõu mõjul kas üks või enam, siis omandab aatom positiivse laengu, mille arvuline väärtus võrdub eraldunud elektronide arvulise väärtusega. Niisugust aatomit nimetatakse positiivseks iooniks ja aatomist elektroni eraldamise protsessi — ioniseerimiseks.

Aatomit, millele on väljastpoolt üks või rohkem elektroni juurde antud ja mis seega omab vastava väärtusega negatiivset laengut, nimetatakse negatiivseks iooniks.

Kaks või suurem arv aatomeid moodustavad ühinedes molekuli. Molekul võib ioniseeruda samuti kui aatomgi kas positiivseks või negatiivseks iooniks. Molekul võib teatud

tingimustes ka poolituda, misjuures ta üks osa muutub positiivseks ja teine osa negatiivseks iooniks. Ioniseerunud (iooonideks muutunud) aatomid või molekulid kaotavad ioniseerumisel oma tavalised keemilised ja füüsikalised omadused, mis nad aga tagasi saavad pärast elektrilaengu kaotamist, s. o. pärast uuesti tavaliseks aine aatomiks või molekuliks muutumist.

Ioonide liikumise kiirus gaasides või aurudes on väiksem, kui seda võiks eeldada nende massi ja laengu järgi. Seda võib seletada ioonide läheduses olevate neutraalsete molekulide polariseerumisega, mille tõttu viimased kaotavad oma elektrilise sümmeetria ning moodustavad iga iooni ümber molekulide pilvekese, mis iooni liikumist aeglustab.

§ 8. Elektroni omadused. Nüüdisaegse vaate järgi füüsikas on elektron negatiivse elektrilaenguga algosake, mille laeng [1]

$e = 1{,}602 \cdot 10^{-19}$ kulonit
$= 1{,}602 \cdot 10^{-20}$ absoluutset elektromagnetilist (CGSM) ühikut
$= 4{,}802 \cdot 10^{-10}$ absoluutset elektrostaatilist (CGSE) ühikut.

Seega sisaldab ühe kuloni suurune negatiivne elektrilaeng $0{,}624 \cdot 10^{19}$ elektroni ja juhtme ristlõiget ühe sekundi vältel läbivad $0{,}624 \cdot 10^{19}$ elektroni tekitavad elektrivoolu, mille tugevus on üks amper (1 C/sek).

Ehkki elektronil puuduvad tavalised aine tunnused, omab

[1] Siin käsiteldavate suuruste ja konstantide kohta leidub kirjanduses mõningal määral erinevaid andmeid. Käesolevas raamatus on kasutatud väärtusi raamatust H. A. Капцов, Электрические явления в газах и вакууме. ОГИЗ Гостехиздат, 1947, mis enamikus on seal koondatud tabelisse 72 lehekülgedel 726 ja 727. (Vastutav toimetaja.)

ta siiski inertsi ja seega ka massi. Seisva või aeglaselt liikuva elektroni massi väärtus on

$$m_e = 9{,}107 \cdot 10^{-28} \text{ grammi}$$

ehk 1837 korda väiksem kui vesiniku aatomi mass. Elektroni mass suureneb elektroni liikumise kiiruse suurenedes. Nii on 100 000 km/sek kiirusega liikuva elektroni mass seisva elektroni massist umbes 6% võrra suurem. Valguse kiirusele (300 000 km/sek) läheneva kiirusega liikuva elektroni mass suureneb tunduvalt.

Elektroni laengu ja massi suhe ehk erilaeng

$$\frac{e}{m_e} = 1{,}759 \cdot 10^8 \frac{\text{C}}{\text{g}}$$

$= 1{,}759 \cdot 10^7$ absoluutset elektromagnetilist (CGSM) ühikut.

$= 5{,}273 \cdot 10^{17}$ absoluutset elektrostaatilist (CGSE) ühikut

Ümmarguse, kerataolisena kujuteldava elektroni raadius on arvutuste andmeil ligikaudu

$$r_e = 2 \cdot 10^{-13} \text{ sentimeetrit.}$$

Elektrone võib esineda kolmes olukorras, millele vastavalt eristatakse: seotud elektrone, mis moodustavad koos aatomi tuumaga aatomi; poolvabu elektrone, mis liiguvad metallis tema molekulide vahel, ja tühjas või hõreda gaasiga täidetud ruumis liikuvaid vabu elektrone.

Aatomisse kuuluvad seotud elektronid avalduvad keemiliste protsesside juures ja ioniseerimisel.

Poolvabad elektronid pole seotud aatomiga või molekuliga. Need elektronid tavalistes tingimustes liiguvad aine sees tema molekulide vahel, põhjustades aine elektrijuhtivust, võttes osa tema soojusjuhtimisest, põhjustades kontaktpotentsiaalide vahet, termoelektriliste ja fotoelektriliste nähtuste esinemist ja ainete termoelektrilist kiirgamist.

Mõningate mõjutuste, näit. aine kuumutamise, tema pinna valgustamise, röntgenikiirtega kiiritamise või vabade elektronidega pommitamise toimel võib osa elektrone ainest lahkuda teda ümbritsevasse ruumi ja seega muutuda vabadeks elektronideks. Niisuguste vabade elektronide liikumine tühjas või hõreda gaasiga täidetud ruumis esineb paljudes tehnilistes seadmetes, nagu: elektrontorudes, ioontorudes, röntgentorudes, huumtorudes, fotorakkudes jne.

Positronid, prootonid ja neutronid kuuluvad aatomi tuuma koostisse ega vabane sealt elektrovaakumseadistes esinevate protsesside puhul, seepärast nende omaduste juures käesolevas teoses ei peatuta.

§ 9. Elektron elektriväljas. Elektroni kui elektrilaengut ümbritseb elektriväli, mille tugevus kera pinnal raadiusega r (kui elektron ise asetseb kera keskpunktis) on

$$E_e = \frac{e}{r^2 \varepsilon}, \tag{9.1}$$

kus E_e on elektroni poolt tekitatud elektrivälja tugevus kera pinnal,

e — elektroni elektrilaengu väärtus,

r — kera raadius,

ε — ruumi dielektrikukonstant.

Kui elektron asetseb oma elektriväljaga teises, välises elektriväljas (joon. 9.1), mille väljatugevus on E, siis mõjub talle mehaaniline jõud

$$F_e = eE. \tag{9.2}$$

Mehaanikast teada oleva seaduse järgi on massi m_e omava liikuva elektroni kineetiline energia

$$W_e = \frac{m_e v_e^2}{2}, \tag{9.3}$$

kus v_e on elektroni liikumise kiirus.

Kui elektroni liikumine toimub kahe plaadi *1* ja *2* (joon. 9.1) vahel olevas elektriväljas, mis on tekitatud nende

plaatide vahel valitseva potentsiaalide vahe $\varphi_2 - \varphi_1 = \underline{U}$ [1] mõjul, siis on elektroni liikumise kiirendamiseks sooritatud töö

$$A_e = e\underline{U}. \qquad (9.4)$$

Et elektroni kineetiline energia ja tema liikumise kiirendamiseks sooritatud töö on võrdsed, siis võime kirjutada, et

$$\frac{m_e v_e^2}{2} = e\underline{U}, \qquad (9.5)$$

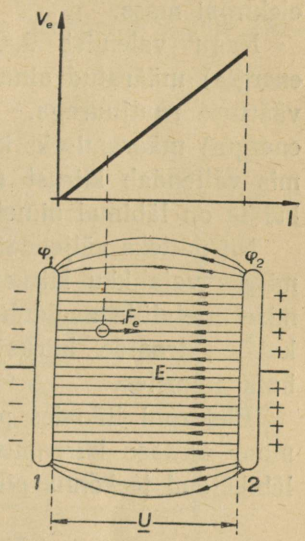
kust tuletame elektroni liikumisel esineva lõppkiiruse, kui tema algkiirus oli null. Seega omandab elektron elektrivälja mõjul kiiruse

$$v_e = \sqrt{\frac{2e\underline{U}}{m}} = 593\sqrt{\underline{U}}\ \frac{\text{km}}{\text{sek}}, \qquad (9.6)$$

kus $\underline{U}$ on läbitav potentsiaalide vahe voltides.

Nagu sellest nähtub, sõltub elektroni kiirus läbitavast potentsiaalide vahest ja omab suhteliselt suurt väärtust.

Näiteks potentsiaalide vahe puhul 0,1 V on elektroni kiirus 188 km/sek; 1 V puhul — 593 km/sek; 100 V puhul — 5930 km/sek ja 10 000 V puhul 59 300 km/sek.



Joon. 9.1. Elektroni liikumine elektrivälja mõjul ühtlase tugevusega elektriväljas. *1* ja *2* on plaadid, milledele on rakendatud potentsiaalid φ_1 ja φ_2; $\underline{U}$ — plaatidevaheline potentsiaalide vahe, E — elektrivälja tugevus, v_e — elektroni kiirus, l — tee pikkus, F_e — elektronile mõjuv mehaaniline jõud.

[1] Kirjastuses raadiotehniliste oskussõnade ja tähiste ühtlustamise alal tegutsenud komisjon otsustas kasutada alalisvoolu, -pinge ja -võimsuse tähistamiseks vastava suuruse tähist kriipsukesega all: $\underline{I}$, $\underline{U}$, $\underline{P}$, et eristada neid vahelduvsuurustest, missuguse vahetegemise järele on eriline vajadus just raadiotehnikas. (Vastutav toimetaja.)

Suurte kiiruste puhul pole see valem enam kehtiv, sest, nagu eespool on nimetatud, suurte kiiruste puhul suureneb elektroni mass.

Nagu valemist 9.6 nähtub, on elektroni kiirus (ja energia) määratud ainult läbitava potentsiaalide vahe (pinge) väärtuse ruutjuurega. See võimaldab elektroni kiiruse (või energia) määramiseks kasutada elektronvoldi mõistet, mis väljendab kiirust (või energiat), mida elektron omaks, kui ta on läbinud nimetatud potentsiaalide vahe.

Nii näiteks väljendatakse elektronide metallipinnast väljumiseks vajalikku kiirust elektronvoltides. Elektronide langemisel metallile avaldub viimasele üleantav võimsus vattides, kui elektronide kiirus on mõõdetud voltides ja elektronide hulk amprites.

Elektroni liikudes piki ühtlast elektrivälja saab ta liikumine ühtlase kiirenduse, kusjuures tema poolt aja t vältel läbikäidud teekonna pikkus

$$s = v_0 t + \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m_e} t^2, \tag{9.7}$$

kus s on teekonna pikkus;

v_0 — elektroni algkiirus;

t — liikumise aeg;

eE/m_e väljendab elektroni liikumisel esineva kiirenduse väärtust, mis omakorda sõltub elektroni elektrilaengust, elektrivälja tugevusest ja elektroni massist.

Kui elektron ei oma algkiirust ($v_0 = 0$), siis omandab valem 9.7 järgmise kuju:

$$s = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m_e} t^2. \tag{9.8}$$

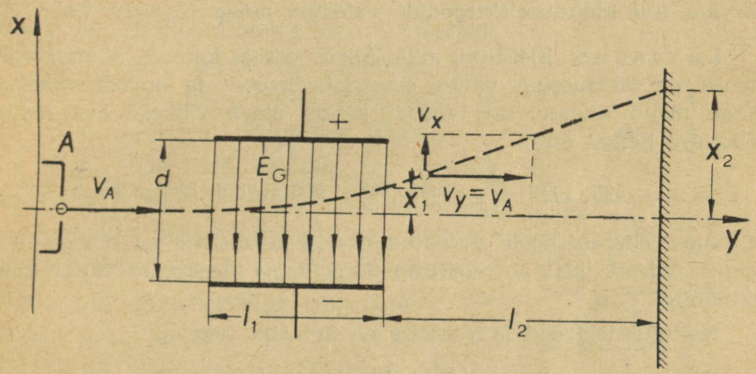
Kui elektronil on algkiirus v_0, mis on suunatud elektriväljale risti, siis toimub ta liikumine selles suunas ühtlase kiirusega, kusjuures

$$s = v_0 t, \tag{9.9}$$

elektron kaldub aga oma esialgselt liikumisteelt kõrvale. Selle kõrvalekaldumise ulatuse võime tuletada valemist 9. 8 ja 9. 9.

Eeldades, et valemis 9. 8 esineva teekonna s siht ühtib koordinaatide x-telje sihiga, nii et

$$s = x = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m_e} t^2$$



Joon. 9. 2. Elektroni liikumine elektronkiiretorus kallutuselektroodidest kuni ekraanini. x ja y — koordinaatide teljed, l_1 — kallutuselektroodide laius, d — kallutuselektroodide kaugus teineteisest, l_2 — kallutuselektroodide serva kaugus ekraanist, E_G — elektriväljatugevus, v_A — elektroni kiirus anoodist A möödumisel, x_1 — elektroni kõrvalekaldumise suurus kallutuselektroodide vahelt väljumisel. Kallutuselektroodide vahelt väljunud elektroni kiirust võib lahutada kaheks komponendiks v_y ja v_x, milledest $v_y = v_A$.

ja valemis 9. 9 esineva teekonna s siht ühtib koordinaatide y-telje sihiga ($s = y = v_0 t$), ning asetades valemisse 9. 8 valemist 9. 9 tuletatud aja väärtuse $t = s/v_0$, mis vastab $t = y/v_0$, saame elektroni liikumistee võrrandi:

$$x = \frac{1}{2} \cdot \frac{eE}{m_e v_0^2} y^2. \qquad (9.10)$$

See võrrand näitab, et niisugusel juhul liigub elektron mööda parabooli, kaldudes elektrivälja mõjul positiivset potentsiaali omava elektroodi poole.

Näide 9.1. Elektronkiiretoru (joon. 106.3) anoodi ja katoodi vaheline pinge $U_A = 900$ V. Kallutuselektroodide paari pikkus $l_1 = 2$ cm ja nende kaugus teineteisest $d = 0{,}5$ cm (joon. 9.2). Kallutuselektroodide ekraanipoolse serva ja ekraani vaheline kaugus $l_2 = 10$ cm. Kui palju kaldub elektronide-kiir ekraani keskpunktist kõrvale, kui kallutuselektroodide vaheline pinge $U_G = 10$ V?

Lahendus: Elektron, mille kiirus pärast katoodi pinnast väljumist on tähtsusetult väike, omandab katoodi ja anoodi vahelise pinge mõjul kiiruse, mis anoodi keskel oleva väikese ava kohta jõudmise hetkel on:

$$v_y = 593 \cdot 10^5 \sqrt{U_A} = 593 \cdot 10^5 \sqrt{900} = 1779 \cdot 10^6 \text{ cm/sek.}$$

Nii suurt ekraani poole suunatud (y-teljega ühtivat või sellega rööpbikut) kiirust säilitab elektron kogu oma teekonna vältel kuni ekraanini.

Kallutuselektroodide vahelise elektrivälja tugevus

$$E_G = \frac{U_G}{d} = \frac{10}{0{,}5} = 20 \text{ V/cm.}$$

Kallutuselektroodide vahelt väljumise hetkel on elektroni y-teljest x-telje suunas kõrvalekaldumise ulatus

$$x_1 = \frac{e}{m_e} \cdot \frac{E_G y^2}{2 v_y^2} = \frac{1{,}759 \cdot 10^7 \cdot 20 \cdot 10^8 \cdot 2^2}{2 \cdot 1779^2 \cdot 10^{12}} = 0{,}0222 \text{ cm,}$$

sest $e/m_e = 1{,}759 \cdot 10^7$ absoluutset elektromagnetilist ühikut ja $1 \text{ V} = 10^8$ absoluutset elektromagnetilist ühikut.

Elektroni poolt positiivset pinget omava kallutuselektroodi suunas läbitav potentsiaalide vahe on:

$$U_x = E_G x_1 = 20 \cdot 0{,}0222 = 0{,}444 \text{ V.}$$

Kiirus x-telje suunas

$$v_x = 593 \cdot 10^5 \sqrt{0{,}444} = 395 \cdot 10^5 \text{ cm/sek.}$$

Kõrvalekaldumine ekraani teljest

$$x = x_1 + \frac{l_2 \cdot v_x}{v_y} = 0{,}0222 + \frac{10 \cdot 395 \cdot 10^5}{1779 \cdot 10^6} = 0{,}244 \text{ cm} = 2{,}44 \text{ mm}.$$

§ 10. Elektron magnetväljas. Kui elektron liigub magnetväljas, mille väljatihedus on B, siis mõjub talle mehaaniline jõud

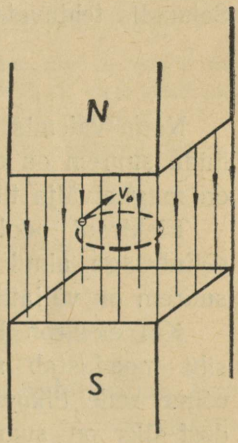
$$F_B = ev_eB \cdot \sin \alpha, \qquad (10.1)$$

kus e on elektroni elektrilaengu väärtus,
α — nurk elektroni liikumise sihi ja magnetvälja sihi vahel ja
v_e — elektroni liikumise kiirus.

Nagu valemist nähtub, ei avalda magnetväli seisvale elektronile mingisugust mõju. Samuti ei avalda magnetväli elektronile mõju ka siis, kui viimane liigub piki magnetvälja (kui $\alpha = 0$, siis ka $\sin \alpha = 0$).

Liigub aga elektron teatava algkiirusega risti magnetväljale, siis mõjub talle jõud

$$F_B' = ev_eB. \qquad (10.2)$$



Joon. 10. 1. Elektroni liikumine magnetväljas. v_e — elektroni liikumise kiirus.

See on igal ajamomendil risti elektroni liikumise sihile ega mõjuta seega elektroni liikumise kiirust, mis jääb ühtlaseks. Järelikult liigub elektron ühtlase tugevusega magnetväljas ringjoont mööda (joon. 10. 1), mille raadiuse pikkuse r_{eB} võime leida mehaanikas tsentrifugaaljõu kohta kehtiva valemi abil, teades, et tsentrifugaaljõud peab võrduma elektroni liikumise sihile risti mõjuva jõuga:

$$\frac{m_e v_e^2}{r_{eB}} = ev_eB,$$

kust:

$$r_{eB} = \frac{m_e v_e^2}{e v_e B} = \frac{m_e v_e}{eB} = \frac{3{,}37\sqrt{U}}{B} \text{ cm}, \qquad (10.3)$$

kus U on elektroni kiirus elektronvoltides ja B — magnetvälja tihedus gaussides. Aeg, mis kulub elektronil suletud ringikujulise teekonna läbimiseks:

$$t_{eB} = \frac{2\pi r}{v_e} = \frac{2\pi m_e}{eB} = \frac{3{,}57 \cdot 10^{-7}}{B} \text{ sek}. \qquad (10.4)$$

Sekundis tehtavate ringide arv (tiirlemise sagedus)

$$f_{eB} = \frac{1}{t_{eB}} = 2{,}8 \cdot 10^6 B \text{ Hz}. \qquad (10.5)$$

Nagu valemist 10.3 näha, on ringi raadius seda suurem, mida suurem on elektroni liikumise kiirus või mida väiksem on magnetvälja tihedus.

Elektroni poolt ühe tiiru sooritamiseks kulutatud aeg sõltub aga ainult väljatihedusest ja on seda lühem, mida suurem on väljatihedus.

Kui elektron liigub magnetväljas nii, et tema liikumise siht moodustab magnetvälja jõujoonte sihiga nurga α, siis võime selle liikumise lahutada kaheks komponendiks, milledest üks on suunatud magnetväljaga risti ($v_1 = v_e \cdot \sin\alpha$) ja teine piki seda ($v_2 = v_e \cdot \cos\alpha$). Kuna liikumise mõlemad komponendid on konstantsed, siis läbib ühtlase tugevusega magnetväljas liikuv elektron kruvikeerme taolise teekonna, mille raadius

$$r_{eB} = \frac{m_e v_e \cdot \sin\alpha}{eB} \qquad (10.6)$$

ja tõus

$$h_B = \frac{2\pi m_e v_e \cdot \cos\alpha}{eB}. \qquad (10.7)$$

Üldiselt allub magnetväljas liikuv elektron samadele mõjutustele kui elektrivool, sest üksiku elektroni liikumine on ekvivalentne elektrivooluga $I = ev_e$.

Kui aga magnetvälja tihedus ajaliselt muutub, siis ei jää elektroni liikumise kiirus enam konstantseks, kuna magnetvälja tugevuse muutumine on alati seoses elektrivälja tekkimisega; see aga põhjustab elektroni liikumise kiiruse muutumist.

Magnetvälja toimet — muuta elektroni liikumise suunda — kasutatakse magnetronides elektronide voo tüürimiseks, elektronkiiretorudes kas liikuvaist elektronidest koosneva kiire kallutamiseks või ka elektronidest koosneva kiire läbimõõdu vähendamiseks (kiire fokuseerimiseks) ja mujal.

Näide 10. 1. Määrata elektroni liikumise tee, kui ta satub ühtlase tihedusega magnetvälja, mille tihedus $B = 50$ G, risti selle jõujoontega, olles enne läbinud potentsiaalide vahe $U = 400$ V.

Lahendus. Nagu eespool nägime, kujutab elektroni tee niisugusel juhul ringjoont, mille raadius

$$r_{eB} = \frac{3{,}37\sqrt{U}}{B} = \frac{3{,}37\sqrt{400}}{50} = 1{,}348 \text{ cm}.$$

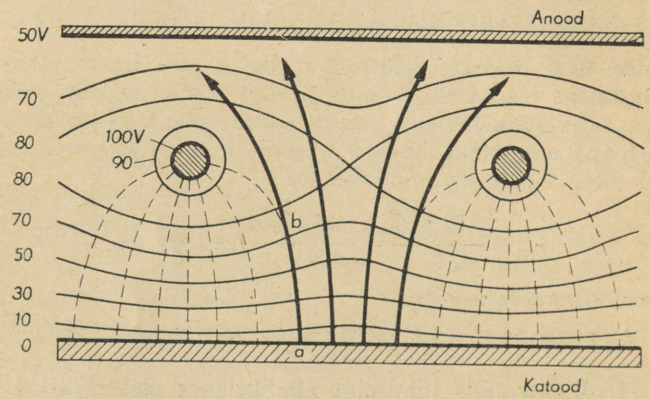
Elektroni tiirlemise sagedus on

$$f_{eB} = 2{,}8 \cdot 10^6 B = 2{,}8 \cdot 10^6 \cdot 50 = 140 \cdot 10^6 \text{ Hz} = 140 \text{ MHz}.$$

§ 11. Elektronide liikumine ebaühtlases elektriväljas. Enamikus elektrovaakumseadistes on elektriväli, milles elektronide liikumine toimub, ebaühtlane. Pealegi muutuvad seadise töötades niihästi selle välja tugevus kui ka elektronidele mõjuvate jõudude suunad. Mitme elektroodiga elektrontorudes määravad elektrivälja tugevuse ja kuju kõigi elektroodide vahelised pinged ühiselt. Mistahes elektroodidevahelise pinge muutumisega on seoses ka nendevahelise välja tugevuse ja kuju muutumine. Elektriväljadest sõltub aga elektronide voo jaotumine üksikute elektroodide vahel, seega ka elektrivoolu tugevus elektroodide vooluringides, mis määrabki elektrontoru elektrilised omadused. Elektrontoru ehituse täiustamisel — tema elektriliste omaduste parendamiseks, samuti ka elektrontorus esinevate protsesside

tundmaõppimiseks on vaja teada elektronide liikumise teid ebaühtlases elektriväljas.

Suure arvu tegurite tõttu on ebaühtlases elektriväljas elektronide liikumise teede kindlaksmääramine küllaltki keerukas ülesanne. Enamikul juhtudel kasutatakse selleks katselisi või poolkatselisi meetodeid. Väga piltliku ülevaate elektronide liikumisest annab vastav mehaaniline mudel, milles elektrivälja kujutab õhuke pinguletõmmatud kummi,



Joon. 11. 1. Elektronide liikumine ebaühtlases elektriväljas. Nooli kujutavate joontega on näidatud võre traatide vahekohast väljuvate elektronide tee.

millel veerevad elektrone kujutavad väikesed metallist kuulikesed. Teiseks levinenumaks meetodiks on Lukoškovi, Iljinski ja Tamaridze poolt väljatöötatud graafilis-analüütiline meetod, mille juures kasutatakse elektrivoolu abil vedelikus tekitatud elektrivälja pilti.

Nagu nägime §-is 9, liigub algkiirust mitteomav elektron ühtlases elektriväljas elektrivälja jõujoont mööda. Ebaühtlases elektriväljas aga ei lange elektroni liikumise tee kogu ulatuses ühte elektrivälja jõujoonte sihiga, mille selgituseks on toodud joonis 11. 1. Sellel joonisel on kujutatud ebaüht-

lase elektrivälja pilt silindrikujulisest anoodist, spiraalikujulisest võrest ja sirgest katoodist koosnevas elektrovaakumseadises. Elektrivälja tekitavate pingete väärtused on järgmised: võrel on katoodi suhtes + 100 V, anoodil on katoodi suhtes + 50 V, seega on võrel anoodi suhtes + 50 V. Joonisel kujutavad peened pidevad jooned elektrivälja ühtlase potentsiaaliga punkte (pindu) ehk nn. ekvipotentsiaalpindu (nivoopindu) ja kriipsjooned — elektriväljas mõjuvate jõudude suundi, nn. jõujooni. Viimased on alati ekvipotentsiaalpindadega risti. Joonisel on märgitud ainult võre ja katoodi vahel oleva elektrivälja jõujooned; võre ja anoodi ning katoodi ja anoodi vaheliste elektriväljade jõujooni pole näidatud. Katoodi punktist *a* väljunud elektron omab väga väikest algkiirust, mistõttu ta liigub peaaegu täpselt piki elektrivälja jõujoont, kuni piirkonnani, kus elektrivälja tugevus tunduvalt muutub — näiteks punktini *b*. Ulatuses *a* — *b* on väljatugevus (ehk potentsiaali gradient) võrdlemisi suur, mistõttu punkti *b* jõudmisel omab elektron juba suhteliselt suurt kiirust (üle 70 elektronvoldi). Punktist *b* alates muutub elektrivälja tugevus tunduvalt suuremal määral ja ühtlasi muutub ka elektrivälja jõujoonte suund. Omandatud kiiruse mõjul läheb elektroni tee elektrivälja jõujoone suunast juba märgatavalt lahku, nagu seda näitab joonisel elektroni liikumise teed tähistav jäme joon. Joonisel on näidatud katoodi neljast punktist väljuva elektroni teekonnad. Eeltoodust selgub, et elektroni tee paindub seda rohkem, mida lähemalt elektron võre traadist mööda lendab. Alates aga võre traadist risti katoodile püstitatavast teljest kuni teatava kauguseni sellest teljest, langevad katoodi pinnast väljunud elektronid juba võrele.

Nagu eeltoodust selgub, toimub joonisel kujutatud ebaühtlase elektrivälja puhul katoodi pinnast rööbiti eemale lendavate elektronide hajumine. Seega sarnaneb niisuguse ebaühtlase elektrivälja toime optikas kasutatava hajutava läätse

toimega. Elektroodide sobiva asetusega ja pingete sobiva valikuga on võimalik tekitada ka niisuguseid ebaühtlasi elektrivälju, mis koondavad liikuvaid elektrone väikese läbimõõduga joaks. Kirjeldatud nähtusi kasutatakse paljudes elektrovaakumseadistes.

§ 12. Elektronide liikumine gaasides. Elektroni liikumist vaakumis mõjutavad ainult tema enda algkiirus, elekriväli ja magnetväli. Mittetäielikus vaakumis leidub aga gaasi või auru molekule, mida elektron oma teekonnal võib kohata ja mis omakorda tema liikumist ja teekonda mõjutavad. Ka võib, nagu eespool nägime, elektroodidevaheline elektrivool koosneda mitte ainult elektronide voost, vaid voolu moodustamisest võib osa võtta suurem või väiksem arv elektrilaengut omavaid ioone.

Praegusaegne tehnika ei võimalda tekitada täielikku vaakumit. Laboratoorsel teel on võimalik saavutada vaakumit kuni 10^{-9} torri (ehk mm Hg, s. o. millimeetrit elavhõbedasammast), mis on umbes 10^{-12} at. Tööstuslikult valmistatakse elektrovaakumseadiseid, milledes gaasirõhk on 10^{-6} ... 10^{-7} torri. Selle rõhu puhul leidub elektrovaakumseadise igas kuupsentimeetris siiski veel mitukümmend miljardit gaasi molekuli.

Vaatamata aatomite ja elektronide väga väikestele läbimõõtudele, põrkavad katoodilt mõnele teisele elektroodile lendavad üksikud elektronid oma suure arvu tõttu pidevalt kokku nende teele sattuvate gaasi molekulidega. Ülaltähendatud gaasirõhu ja mõnemillimeetrilise elektroodidevahelise kauguse puhul tabab näiteks läbistikku iga kümnetuhandes elektron oma teel gaasi või auru molekuli.

Kokkupõrgete arv sõltub gaasi või auru rõhust (molekulide arvust elektrontoru sisemuse ühes mahuühikus) ja elektroni poolt läbitud tee pikkusest. Seepärast võib keskmiselt võtta kokkupõrke hindeks iga elektroni keskmist vaba

tee pikkust ühest kokkupõrkekohast järgmise kokkupõrkekohani. Elektronide vaba tee keskmise pikkuse hindamiseks võib kasutada gaaside kineetilisest teooriast[1] tuntud seost:

$$\frac{l_{p1}}{l_{p2}} = \frac{p_2}{p_1}, \qquad (12.1)$$

kus l_{p1} ja l_{p2} on elektronide keskmised vaba tee pikkused nendele vastavate gaasirõhkude p_1 ja p_2 puhul.

Elektronide ja gaasi molekulide kokkupõrkekohtade vaheline keskmine vaba tee on gaasi molekulide omavaheliste kokkupõrkekohtade vahelisest keskmisest vabast teest (ühesuguse rõhu ja ühesuguse temperatuuri juures) $4\sqrt{2} = 5{,}65$ korda pikem. Elektronide keskmine vaba tee pikkus l_p, mõõdetuna sentimeetrites rõhu $p = 1$ torr ja temperatuuri $t = 20^0$ C juures, on näiteks: vesinikul (H_2) — 0,0817, heeliumil (He) — 0,1259, neoonil (Ne) — 0,0787, argoonil (Ar) — 0,0450, lämmastikul (N_2) — 0,0415, hapnikul (O_2) — 0,0455, õhul — 0,0434 ja elavhõbedaaurul (Hg) — 0,0149.

Nagu katsed on näidanud, sõltub elektronide vaba tee pikkus veel elektroni liikumise kiirusest, mistõttu ülaltähendatud arvudele tuleb vaadata kui ligikaudsetele.

Mida suurem on elektronide vaba tee pikkus, võrreldes anoodi kaugusega katoodist, seda väiksem on võimalus, et elektron oma teekonnal tabab gaasi molekuli.

Elektroni ja gaasi molekuli kokkupõrke tagajärg sõltub elektroni kiirusest. Suhteliselt aeglaselt liikuva elektroni kokkupõrge molekuliga on e l a s t n e, kui ta kiirus on k r i i t i l i s e s t k i i r u s e s t väiksem ja kui molekul, millega ta kokku põrkab, kuulub i n e r t g a a s i l e või metalli (näit. elavhõbeda) aurule. Et elektroni mass molekuli massiga võrreldes on väga väike (näiteks elavhõbeda molekuli massist on ta rohkem kui 365 000 korda väiksem), siis

[1] V. A. Mihelson. Füüsika I. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1946. XIV peatükk: Gaasid.

annab ta elastsel kokkupõrkel molekulile üle ainult väga väikese osa oma kineetilisest energiast, mis muudab küll molekuli liikumise kiirust, kuid ei kutsu molekulis esile mingisuguseid muutusi.

Seega toimub elektrivool elektronide liikumise näol ainult inertgaasides ja metalli aurudes ja sealgi ainult juhul, kui elektronide kiirus on suhteliselt väike.

Mitteinertsete ainete gaasi või auru molekulidega kokku põrgates ei toimu kokkupõrge ka elektroni väikeste kiiruste puhul elastselt, vaid elektron liitub molekuliga, mille tulemusena tekib negatiivne ioon.

Ületab aga elektroni liikumise kiirus teatava *kriitilise kiiruse*, siis tema kokkupõrge mistahes aine gaasi molekuliga lakkab olemast elastne. Niisuguse *mitteelastse* kokkupõrke tagajärjeks on molekuli ergutamine kiirgamisele või ta muutumine iooniks.

Molekul on kiirgamisele ergutatud siis, kui ta saab elektronilt niisuguse annuse energiat, mis ta normaalselt energianivoolt viib tema jaoks võimalikule kõrgemale energianivoole [1]. Kiirgamisele ergutatud molekul saadab energiakvandi [2] näol endast üleliigse energia välja, s. o. ta kiirgab teatava võnkesagedusega valgust, saavutades sellega uuesti oma normaalse energianivoo.

Kui molekuliga kokkupõrkava elektroni kiirus (kineetilise energia sisaldus) on molekuli ergutamiseks vajalikust kiirusest väiksem, siis toimub kokkupõrge elastselt. Molekuli ergutamiseks vajalik väikseim elektroni kiirus on igal gaasi- või metalliaurul erinev. Seda molekuli ergutamiseks vajalikku

[1] R. Hollmann. Elektrotehnika I. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1947. § 86: Aatomi ehitus ja ionisatsioon, § 87: Perifeerne elektronide grupp, § 88: Molekul ja § 89: Elektroni liikumine gaasis.

[2] V. A. Mihelson. Füüsika II köide. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. Neljas jagu, XVIII peatükk, § 1: Valguse olemus. XXVII peatükk: Kvantide optika.

väikseimat kiirust nimetatakse *ergutuspotentsiaaliks* ja mõõdetakse *elektronvoltides*. Suurema kiiruse puhul võib elektron molekuliga kokku põrgates molekulist eraldada ühe või mitu elektroni, mille tagajärjel *molekul muutub positiivseks iooniks*. Seda nähtust nimetatakse *tõukeionisatsiooniks* ja selle esilekutsumiseks vajalikku elektroni kiirust *ionisatsioonipotentsiaaliks*.

Tabelis 12. 1 on toodud mõningate ainete ergutuspotentsiaali ja ionisatsioonipotentsiaali väärtused elektronvoltides.

Tabel 12. 1.

Ergutus- ja ionisatsioonipotentsiaalid elektronvoltides.

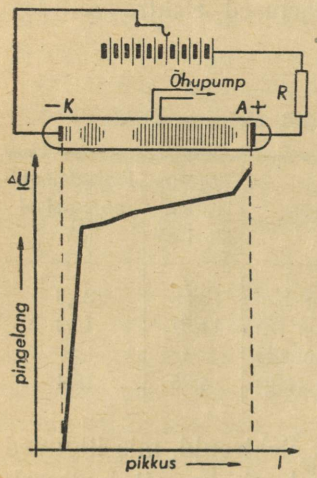
Gaas	Ergutus-potentsiaal eV	Ionisatsiooni-potentsiaal eV	Gaas	Ergutus-potentsiaal eV	Ionisatsiooni-potentsiaal eV
Vesinik (H)	10,10	15,9	Neoon (Ne)	16,58	21,8
Heelium (He)	19,77	24,5	Argoon (Ar)	11,57	15,3
Lämmastik (N)	8,20	16,9	Elavhõbeda-		
Hapnik (O)	7,90	15,5	aur (Hg)	4,86	10,4

Katsed on näidanud, et mitte kõik elektronid, mis liiguvad kiiremini, kui on vaja molekuli ergutamiseks või ioniseerimiseks, ei kutsu esile kiirgamise või ioniseerimise nähtust, vaid ainult teatav osa neist. Viimase suurus sõltub gaasist ja elektroni kiirusest.

Põrkab elektron kokku juba varem ergutatud molekuliga, siis on selle ioniseerimiseks vaja väiksemat kiirust kui normaalset energianivood omava molekuli ioniseerimiseks. Niisuguse *astmeliselt toimuva ioniseerimise* tõttu võib ioniseerimine toimuda ka selliste elektronide poolt, mis ei oma ioniseerimiseks vajalikku kiirust.

Samasugust ergutavat või ioniseerivat toimet kui liiku-

vad elektronid, võivad avaldada ka ergutatud molekulid ja ioonid. Kui ergutatud molekul või ioon omab suuremat liikumisenergia tagavara, kui on vaja selle molekuli ergutamiseks või ioniseerimiseks, millega ta oma liikumisel kokku põrkab, siis see molekul ergutub või ioniseerub samuti kui elektroniga kokku põrgates. On aga liikuva molekuli liikumisenergia tagavara väiksem, siis on kokkupõrge teise molekuliga elastne.



Joon. 12. 1. Pinge jagunemine hõrendatud gaasi sisaldavas torus. *A* — anood, *K* — katood, *R* — voolutugevust piirav takisti.

Gaasis liikuvate elektronide toime paremaks selgitamiseks vaatleme joonisel 12. 1 kujutatud katseseadmes ilmnevaid nähtusi.

Kui ühendada klaastorus paiknevad elektroodid pingeallikaga ja kui torus oleva gaasi rõhk vastab normaalsele õhurõhule (760 torri), ei ilmne vooluringis tavaliste mõõteriistade abil mõõdetava tugevusega voolu ka kuitahes kõrgete pingete puhul. Eriti suure tundlikkusega mõõteriistade abil võib voolu olemasolu siiski kindlaks teha, selle voolu tugevus on aga äärmiselt väike (10^{-15} kuni 10^{-11} A). Niisuguse, väga nõrga voolu moodustavad pingeallika negatiivse klemmiga ühendatud elektroodi (katoodi *K*) pinnast tavalise toatemperatuuri juures väljuvad elektronid, mis gaasi molekulide vahel liikudes ja viimastega elastselt kokku põrgates suunduvad pluss-elektroodile (anoodile *A*).

Elektroodidevahelise pinge tõstmisel umbes 30 kV-le elekt-

roodidevahelise kauguse ühe sentimeetri kohta, tekib elektroodide vahel vool ülelöögi näol. Kui vähendada torus gaasirõhku gaasi väljapumpamise teel, ilmneb vool juba märksa madalama pinge juures. Seda pinget nimetatakse *süütepingeks*. Voolu tekkimist põhjustab tõukeionisatsiooni ilmnemine. Katoodist väljunud elektronid, liikudes gaasi molekulide vahel, saavutavad anoodpinge mõjul niivõrd suure kiiruse, et suudavad gaasi molekulidega kokku põrgates lõhestada viimaseid ioonideks ja elektronideks. Molekulidevahelise vaba tee küllalt suure pikkuse tõttu omavad eraldunud elektronid niivõrd suurt kineetilist energiat, et nad gaasi molekulidega kokku põrgates omakorda lõhestavad neid. Et niiviisi laviinikujuliselt tugevnev vool ei muutuks liiga tugevaks ega saaks purustada toru, ühendatakse vooluringi küllaldase takistusega takisti.

Elektroodidevahelist pinget vähendades katkeb vool süütepingest madalama pinge puhul, sest elektroodidevaheline gaas on juba ioniseeritud. Seda pinge väärtust nimetatakse *kustumispingeks*. Kustumispingest madalama pinge puhul ei saavuta elektronid nii suurt kiirust, et nad molekulidega kokku põrgates suudaksid neid lõhestada, vaid nad ühinevad torus sisalduvate positiivsete ioonidega ja moodustavad uuesti elektriliselt neutraalseid gaasi molekule. See ühinemine toimub pidevalt ka voolu kulgedes, siis aga ületab juurdetekkivate ioonide ja elektronide arv sama aja vältel ühinevate ioonide ja elektronide arvu [1].

Gaasi madala rõhu puhul on elektronide vaba tee pikkused suuremad, mistõttu elektronid molekulidega kokku põrgates omandavad molekulide lõhestamiseks vajaliku kineetilise energia juba madalama pinge puhul.

---

[1] V. A. Mihelson. Füüsika II köide. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. Kolmas jagu, XVI peatükk, § 1: Ionisatsioon ja molisatsioon gaasides.

Eriti madala gaasirõhu puhul on elektronidevahelises ruumis gaasi molekule niivõrd vähe ja seega ka elektronide vaba tee pikkus niivõrd suur, et elektronid liikudes ei taba praktiliselt ühtegi gaasi molekuli. Seega pole ioniseerumine võimalik ja elektroodide vahel ei ole nimetamisväärset voolu (kui mitte arvestada eespoolmainitud 10^{-15} ... 10^{-11}-amprilist voolu), ükskõik kui kõrget pinget me elektroodide vahele ka ei ühendaks. Seega osutub vaakum väga heaks isolaatoriks.

Hõrendatud gaasiga täidetud ruumis tekib ioonide liikumisena esinev elektrivool peaaegu üheaegselt toru helendumisega (valguse kiirgamisega), sest elektronide vaba tee pikkused kuni kokkupõrkamiseni molekulidega pole võrdsed. Järelikult pole võrdsed ka nende kiirused ning molekulide ergutamine valguse kiirgamisele ja ioniseerimine toimuvad praktiliselt üheaegselt. Seejuures oleneb valguse (nn. huumvalguse) värvus (lainepikkus) gaasist ja valguse jaotus piki toru — gaasi rõhust. Pingejaotust piki toru iseloomustab joonisel 12. 1 toodud kõver. Nagu sellest nähtub, pole pingelang kogu toru pikkusel ühtlane, vaid hüppeline.

Huumvalguse nähtusi kasutatakse elektrienergia inertsivabalt valgusenergiaks muundamisel, mis leiab rakendamist pilditelegraafi- ja kaugnägemistehnikas. Toru täidisgaasina kasutatakse seejuures neooni või naatriumiauru. Suursagedustehnikas kasutatakse vastava ehitusega huumtorusid laotuspinge tekitamiseks, pinge stabiliseerimiseks, õrn-liigpingekaitsmeteks, vahelduvvoolu alaldamiseks jne.

Elektrontorus peab elektrivool kulgema läbi elektroodidevahelise ruumi elektronide voo näol, vastandina ioontorudele, kus elektrivoolu moodustab peamiselt ioonide liikumine. Absoluutselt tühja ruumi pole elektrontorus praktiliselt võimalik tekitada ega ka säilitada, vaid alati leidub seal gaasi või auru, mille molekulid ioniseeruvad, kui elektronid oma teekonnal nendega kokku põrkavad. Selle ioonidest

moodustuva voolu tugevus peab olema elektronidest moodustuva vooluga võrreldes niivõrd väike (1/1000 ... 1/10 000), et ta elektrontoru normaalset töötamist ei segaks. Ioonidest moodustuva voolu tugevus sõltub elektrontorus leiduva gaasi tihedusest, temperatuurist jne., mis võivad muutuda, muutes seega ka elektrontoru elektrilisi omadusi. Gaasi sisaldumine elektrontorus lühendab ka selle iga. Näiteks vähendab hapnik katoodi emissioonvoolu tugevust, ühinedes katoodi välispinna ainega. Samuti mõjuvad katoodi emiteerimisvõimet vähendavalt lämmastik, veeaur, süsihappegaas jt. Gaasi ioniseerimisel tekkinud rasked positiivsed ioonid hävitavad katoodile langedes eriti kiirelt toorium- ja baariumkatoodide emiteerivat pinda. Ka põhjustavad positiivsed ioonid katoodi pihustumist, sellega elektrontoru iga veelgi vähendades. Ioonide kahjustava toime vältimiseks on elektrontorus tingimata tarvilik hea vaakum.

Elektrontorus vajaliku vaakumi saavutamine tänapäeval kasutada olevate pumpade abil ei tekita tööstustes erilisi raskusi. Raskem aga on gaasi või veeauru kõrvaldamine, mida leidub elektrontoru valmistamiseks kasutatavas metallis või õhukese kihina elektrontoru klaaskesta sisepinnal, kust ta elektrontoru töötades kuumuse tõttu võib aja jooksul eraiduda — vähendades vaakumi väärtust.

Oksüüdkatoodiga elektrontorudes toimub katoodi emissioonvoolu tõttu viimase elektrolüütiline lagunemine, mistõttu tekib gaasi (hapnikku) ja väheneb vaakum.

Elektrontorus kasutatakse vaakumi vähenemise vältimiseks järgnevaid abinõusid.

1. Elektrontoru seesmised metallosad valmistatakse niisugustest metallidest, millede gaasisisaldus on väike. Sellisteks metallideks on nikkel, molübdeen ja tantaal. Nendest tantaal ei erita gaasi isegi väga kõrgete temperatuuride juures (kollakasvalgena hõõgudes).

Ex Bibl. Univ. Tart.

2. Elektrontorust gaasi väljapumpamise ajal kuumuta-

takse tema kesta ja siseosi kõrgema temperatuurini, kui hiljem tekib töötades, ja sunnitakse seega gaasi eralduma juba pumpamise ajal. Elektrontoru klaaskesta kuumutatakse sellekohases kuumutusahjus, metallist siseosade kuumutamiseks kasutatakse aga kas elektrontoru vooluringide koormamist normaalsetest tugevamate vooludega või kuumutamist suursagedusliku pöörisvooluga. Viimasel juhul asetatakse elektrontoru suursagedusliku voolu poolt tekitatud magnetvälja, kus ta metallosades indutseeruvad soojusttekitavad pöörisvoolud.

3. Elektrontoru kesta asetatakse niisuguseid aineid, mis neelavad võimalikult palju gaasi (nn. getterid). Sellisteks aineteks on magneesium, kaltsium, baarium jt. Neist iga aine neelab eri gaase. Näiteks magneesium neelab hästi hapnikku, kuid halvasti lämmastikku ja vesinikku. Praktikas kasutatakse sagedasti baariumi sulamit magneesiumi, kaltsiumi või alumiiniumiga, mis asetatakse elektrontoru kolbi. Pärast eelnenud pumpamist kuumutatakse elektrontoru siseosi suursagedusliku pöörisvooluga nii, et see sulam aurub ja elektrontoru kesta sisepinnale sadeneb, suurendades seega vaakumit tarviliku määrani. Magneesium seob oksüüdkatoodi poolt eritatavat hapnikku veel hiljemgi.

Sagedasti kasutatakse sama põhimõtet ka volframkatoodiga elektrontoru vaakumi suurendamiseks. Selleks kuumutatakse katoodi teatud aja vältel normaalsest kõrgema temperatuurini, ühendades selleks ajaks toruga normaalse võreja anoodpinge. Selle tagajärjel volfram aurub. Tekkinud aur gaasiide molekulidega ühinedes annab ühendid WO_3, WN_2 ja $W(CO)_6$, mis elektrostaatilise välja mõjul sadestuvad elektrontoru klaaskesta sisepinnale. Selle tagajärjel suureneb vaakum. Niisugune vaakumi suurendamise menetlus ei anna tagajärgi, kui elektrontorus leidub veeauru (H_2O), sest vesinik (H) ei ühine volframiga. Kõrge temperatuurini kuumutatud tantaal absorbeerib vesinikku, mispärast saatetorude anood valmistataksegi sageli tantaalist.

§ 13. Elektronid metallis. Elektroniteooria järgi eralduvad metallides elektronid kergesti aatomitest, mis seega muutuvad positiivseteks ioonideks. Viimastevahelises ruumis aga liiguvad eraldunud elektronid takistamatult ja korrapäratult. See liikumine toimub nii, et igal ajamomendil ületab vaadeldava ruumi piire igas suunas võrdne arv elektrone, mistõttu elektrilaengu üldpaigutus jääb endiseks ja elektronide liikumine ei põhjusta elektrilaengu ümberpaiknemist ega elektrivoolu. Neid metallis takistamatult liikuda võivaid elektrone nimetatakse poolvabadeks elektronideks.

Metallis korrapäratult liikuvad elektronid omandavad välise elektrivälja mõjul, sõltuvalt välja tugevusest, suuremal või väiksemal määral suunatud liikumise, moodustades seega elektrivoolu. See elektronide liikumine toimub teatava hõõrdumisega, mis moodustab materjali elektrilise takistuse. Isolaatorites poolvabu elektrone pole, seetõttu ei saagi neis tekkida elektrivoolu.

Metalli aatomitevahelises vabas ruumis liikudes omavad elektronid kõikvõimalikke liikumiskiirusi v_e, mis rühmituvad Maxwelli tõenäosuse lause alusel mingi keskmise kiiruse v_k ümber järgmiselt:

$$dz = \frac{z}{v_k\sqrt{\pi}} \cdot e^{-\frac{v}{v_k}} \cdot dv, \qquad (13.1)$$

kus dz on niisuguste elektronide arv, millede kiirused on piirides v kuni $v + dv$,

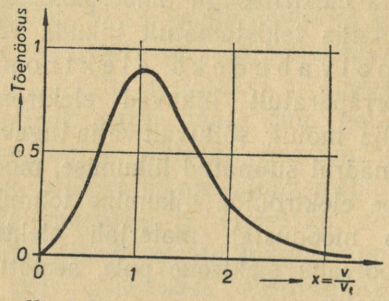
v_k — antud suunas liikuvate elektronide keskmine kiirus antud temperatuuri juures,

z — ühes suunas liikuvate elektronide koguarv,

e — loomulikkude logaritmide alus = 2,718.

Joonisel 13. 1 on toodud Maxwelli lause graafiline kujutus. Abstsisside teljele on kantud elektroni tegeliku kiiruse suhe kõige tõenäolisema kiirusega, mida omab suurim arv elekt-

rone, ja ordinaatteljele tõenäosus, et vaadeldav elektron omab seda tõenäolisemat kiirust x-kordselt ületavat kiirust. Kõver näitab, et on olemas teatav tõenäolisem kiirus v_t, mida omab suurim arv elektrone. Ülejäänud elektronidest omab osa suuremaid, osa väiksemaid kiirusi. Mida rohkem mingi kiirus tõenäolisemast kiirusest erineb, seda väiksem arv elektrone niisugust kiirust omab.



Joon. 13.1. Maxwell'i lause graafiline kujutus: elektronide kiiruste tõenäoline jaotus.

Temperatuuri tõustes suurenevad kõigi elektronide kiirused ja seega ka tõenäolisem kiirus v_t.

Liikuvate poolvabade elektronide kineetiline (liikumise) energia on võrdeline aine absoluutse temperatuuriga, millist seost võib väljendada valemiga:

$$\frac{m_e v_k^2}{2} = k_b T, \qquad (13.2)$$

kus m_e on elektroni mass,

v_k — elektronide keskmine kiirus antud temperatuuri juures,

T — aine absoluutne temperatuur ($T = t^0\,\mathrm{C} + 273$) Kelvin'i kraadides (^{0}K),

k_b — Boltzmann'i konstant, mille väärtus on $1{,}3805 \cdot 10^{-16}$ ergi/^{0}K.

Valemist 13. 2

$$v_k = \sqrt{\frac{2k_b T}{m_e}} = 0{,}5505 \cdot 10^6 \sqrt{T} \text{ cm/sek}$$

ja valem 9. 6 järgi

$$v_e = 593 \cdot 10^5 \sqrt{U} \text{ cm/sek},$$

neist

$$U_T = \frac{v_k^2}{v_e^2} \cdot T = \frac{T}{11\,603} = 8{,}6 \cdot 10^{-5} T, \qquad (13.3)$$

mida nimetatakse temperatuuripingeks.

Näiteks on $T = 1000^0$ K juures elektronide keskmine kiirus $v_k = 174 \cdot 10^5$ cm/sek = 174 km/sek.

Näiteks, kui $T = 2320^0$ K, siis $U_T = 0{,}2$ V, ja kui $T = 11\,603^0$ K, siis $U_T = 1$ V.

Siit nähtub, et temperatuuri tõustes kõrgeneb ka temperatuuripinge ja suureneb elektronide liikumise keskmine kiirus ning elektronide kineetiline energia.

Eeldus, et poolvabade elektronide liikumiskiirused on jaotatud Maxwelli teooria kohaselt, võimaldas leida rahuldava seletuse reale füüsikalistele nähtustele (näiteks metallide elektri- ja soojusjuhtivus jt.), ei võimaldanud aga anda rahuldavat seletust metallide soojusmahutavuse muutumise seaduste kohta.

Praegu tunnustatava teooria järgi ei allu poolvabade elektronide kiiruste jaotus Maxwelli seadusele, vaid teistele, tunduvalt keerukamatele seadustele. Et aga ka see uus teooria annab käesolevas raamatus kirjeldatud nähtuste kohta samad tulemused mis eespoolmainitud seadus, siis ongi siin piirdutud ainult eeltooduga.

III peatükk.

Elektronide emissioon.

§ 14. Elektronide väljumine metalli pinnast. Metalli aatomitevahelises vabas ruumis sihitult liikuvaist elektronidest tabab osa metalli pinda seestpoolt, tahtes metalli pinnast väljuda. Molekulide külgetõmbejõud hoiab neid aga tagasi, nende väljumist metalli pinnast takistades. Metalli sees molekulide külgetõmbejõud elektronide liikumist ei mõjuta, kuna seal need jõud mõjuvad igas suunas võrdselt ja seetõttu tasakaalustuvad. Metalli pinda seestpoolt risti tabavaist elektronidest saavad pinnast väljuda ainult need, mille kiirus (kineetiline energia) on küllaldane selleks, et elektroni metalli pinda läbides sooritada teatava väärtusega tööd.

Elektroni metalli pinnast väljumiseks vajalikku minimaalset kiirust (kineetilist energiat) väljendatakse voltides ja seda nimetatakse *väljumistööks* U_e. Väljumistöö väärtus on igal materjalil erisugune. Näiteks volframil on see 4,5 V, tooriumil — 3,3 V, tooriumiga kaetud volframil — 2,6 V, kaltsiumil ja strontsiumil — umbes 1,8 V ja baariumil 1,5 V.

Et elektron saaks metalli pinnast väljuda, selleks tuleb talle anda neid väärtusi ületav kiirus. Alljärgnevalt vaatleme üksikasjalisemalt elektronidele metalli pinnast väljumiseks vajaliku kiiruse andmise menetlusi: 1) temperatuuri, 2) elektrivälja, 3) kiiresti liikuvate elektronidega pommitamise (elektronide kineetilise energia) ja 4) kiirgusenergia (valguse jt.) abil mõjutamist.

Elektronide väljumist ehk eritumist aine pinnast nimetatakse *elektronide emissiooniks* ja ajaühikus väljuvate elektronide hulka — *emissioonvooluks*.

§ 15. Elektronide emiteerimine temperatuuri mõjul. Võrreldes metalli pinnast väljumiseks vajalikku poolvabade

elektronide minimaalset kiirust (§ 14) nende (temperatuurist sõltuva) keskmise kiirusega (§ 13), selgub, et metalli temperatuuri tõstmisega pole praktiliselt võimalik saavutada olukorda, kus poolvabade elektronide keskmine kiirus (v_k) ületaks metalli pinnast väljumiseks vajalikku kiirust. Nii kõrge temperatuurini kuumutatud metall muutuks auruks. Suurima võimaliku piirini kuumutatud metalli keskmine temperatuuripinge U_T on ikkagi veel ligi 20 korda väiksem vajalikust väljumistööst U_e.

Maxwelli teooria järgi (§ 13) omavad metallis liikuvad poolvabad elektronid kõiki võimalikke kiirusi. Järelikult omab teatav arv poolvabu elektrone ka hariliku toatemperatuuri juures kiirust, mis metalli pinnast väljumiseks vajalikku kiirust ületab ja mistõttu need elektronid metalli pinnast ka väljuvad. Nende arv on aga niivõrd väike, et nende poolt moodustatavat voolu pole võimalik tavaliselt kasutatavate mõõteriistadega mõõta.

Kõrge temperatuurini kuumutatud metalli puhul, kus näiteks $\frac{U_e}{U_T} = 20$, on tõenäoline, et metalli pinnast väljumiseks minimaalselt vajalikku kiirust ületavat kiirust omavate elektronide arv on $e^{-\frac{U_e}{U_T}} = e^{-20} \approx 10^{-9}$, seega 10^9 korda väiksem keskmise kiirusega elektronide arvust. Kuigi ka kõrge temperatuurini kuumutatud metalli pinnast väljuvate elektronide arv on sealt mitteväljuvate elektronide arvust rohkem kui 10^9 korda väiksem, siiski moodustavad need väljuvad elektronid praktikas kasutamiseks küllaldase tugevusega voolu, sest metallis olevate poolvabade elektronide arv on suur.

Elektronide emissioonvoolu tugevuse sõltuvust temperatuurist uuris esimesena O. W. Richardson, kes gaaside kinee-

tilise teooria seadusi eeskujuks võttes koostas elektronide emissioonvoolu pindtiheduse jaoks valemi:

$$j_{eT} = aT^{\frac{1}{2}} e^{-\frac{b}{T}} \text{ A/cm}^2, \qquad (15.1)$$

kus j_{eT} on metalli pinnast soojuse mõjul väljuvaist elektronidest moodustuv emissioonvool amprites emiteeriva pinna ühe ruutsentimeetri kohta ehk soojusliku emissioonvoolu pindtihedus [A/cm^2], T — metalli absoluutne temperatuur [^{0}K], a ja b — metalli omadusi iseloomustavad tegurid.

Aluseks võttes termodünaamikas kasutatavaid seadusi, koostas hiljem Dushman elektronide emissioonvoolu pindtiheduse jaoks uue valemi:

$$j_{eT} = AT^2 e^{-\frac{b_0}{T}} \text{ A/cm}^2, \qquad (15.2)$$

kus A ja b_0 on metalli omadusi iseloomustavad tegurid, mille väärtused on toodud tabelis 15. 1.

Tabel 15. 1.

Katoodi materjali iseloomustavad tegurid.

Katoodi materjal	A	b_0
Volfram	60,2	52 700
Molübdeen	60,2	51 500
Tantaal	60,2	47 200
Toorium	60,2	38 900
Baarium	60	24 500
Tseesium	162	21 000

Joonisel 15. 1 on näidatud 0,1 mm läbimõõduga 10 cm pikkuse volframtraadist katoodi emissioonvoolu sõltuvus temperatuurist. Nagu jooniselt näha, tugevneb emissioonvool temperatuuri tõustes kuni 2200^0 K vähe, sellest edasi aga

juba tunduvalt. Näiteks temperatuuri tõustes 2400° K kuni 2500° K, s. o. 4% võrra, tugevneb emissioonvool ligi 150% võrra. Tuleb aga arvesse võtta seda, et mida kõrgem on temperatuur, seda kiiremini hävib kuumutatud keha aurumise tagajärjel.

Näide 15.1. Arvutada volframtraadist katoodi emissioonvool I_e temperatuuril $T = 2500^0$ K, kui katoodi pikkus $l_K = 10$ cm ja läbimõõt $d_K = 0{,}1$ mm.

Lahendus. Katoodi emiteeriva pinna suurus:

$$Q_K = \pi d_K l_K = \pi \cdot 0{,}01 \cdot 10 = 0{,}314 \text{ cm}^2.$$

Dushmani valemi (15.2) järgi on emissioonvoolu pindtihedus

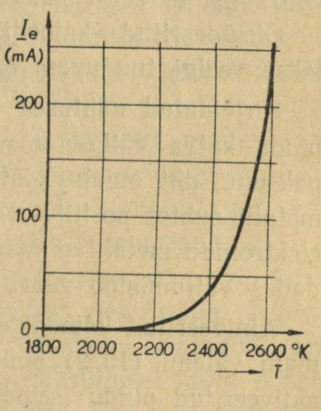
$$j_{eT} = AT^2 e^{-\frac{b_0}{T}} = 60{,}2 \cdot 2500^2 \cdot e^{-\frac{52\,700}{2\,500}} \approx 0{,}26 \text{ A}.$$

Kogu katoodi emissioonvool

$$I_{eT} = j_{eT} Q_K = 0{,}26 \cdot 0{,}314 \approx 0{,}0816 \text{ A} = 81{,}6 \text{ mA}.$$

Kuigi uuemate vaadete järgi Dushmani valemi alused pole õiged, samuti kui eespool käsiteldud Maxwelli lausegi, ei erine mõõtmisel saadavad tulemused siiski märgatavalt arvutusega saadavaist tulemustest.

Katsed on näidanud, et emissioonvoolu tugevus sõltub suurel määral emiteeriva metalli pinna puhtusest. Kui näiteks katoodi valmistamiseks kasutatud metalli pind on kaetud ühe molekuli paksuselt mingi muu niisuguse metalliga, mille väl-



Joon. 15.1. Volframtraadist katoodi emissioonvoolu sõltuvus temperatuurist.

jumistöö U_e on teda kandva metalli väljumistööst väiksem, siis on sellise kahest metallist koosneva katoodi emissioonvool tugevam kui kummalgi metallil eraldi. Niisuguseid, teise metalli ühe molekuli paksuse kihiga kaetud katoode nimetatakse aktiveeritud katoodideks. Näiteks aktiveeritakse volframist, molübdeenist või niklist katoode leelismetalli või leelismuldmetalli kihiga. Et leelismetallidest pole võimalik valmistada kõrget temperatuuri taluvaid õhukesi metallikihte, siis kasutatakse neid ainult külmade (näit. foto-) katoodide valmistamiseks. Kuumade katoodide (termokatoodide) valmistamiseks kasutatakse tavaliselt baariumi, tooriumi või tseesiumi.

Katoodi aktiveerimisega saavutatav katoodi väljumistöö vähenemine võimaldab palju madalama katoodi temperatuuri juures saada suhteliselt tugevat emissioonvoolu. Nii on emissioonvool tooriumiga aktiveeritud volframkatoodil 1500° K temperatuuri juures 10^3 korda ja tseesiumiga kaetud volframil 650° K juures 10^{20} korda suurem kui puhtast volframist katoodil samasuguste temperatuuride juures.

Oksüdeeritud katoodi pinna aktiveerimisega saavutatakse veelgi tunduvam emissioonvoolu suurenemine.

Kirjeldatud nähtused on seletatavad sellega, et katoodi pinda katva väiksema väljumistööga metalli ühe molekuli paksune kiht omab kontaktpotentsiaali tõttu teda kandva metalli suhtes positiivset potentsiaali. See potentsiaal mõjub elektronide metalli pinnast väljumisele kaasaaitavalt, vähendades väljumistöö väärtust.

Aktiveeritud katoodi emissioonvoolu saab määrata Dushmani valemi (15. 2) abil. Seejuures tuleb silmas pidada, et aktiveeritud pindu iseloomustavate tegurite A ja b_0 väärtused sõltuvad aktiveeritud pinna ühtlusest.

Tabel 15.2.

Tegurid aktiveeritud pinnaga katoodi emissioonvoolu arvutamiseks.

Katoodi materjal	A	b_0
Toorium volframil	3,0	30 500
Toorium volframkarbiidil	$1{,}15 \cdot 10^{-2}$	17 400
Baariumoksüüd ja strontsiumoksüüd niklil	$2{,}6 \cdot 10^{-3}$	9 350
Baariumoksüüd volframil	$0{,}2 \cdot 10^{-3} \ldots 20 \cdot 10^{-3}$	11 200

§ 16. Elektronide emissioon välise elektrivälja mõjul ja Schottky efekt. Et katoodist tavalisel toatemperatuuril saada praktiliselt kasutatava tugevusega emissioonvoolu, on vaja väga tugevat elektrivälja — umbes 10^7 V/cm. See on tingitud sellest, et katoodi pinnast väljuvate elektronide mõjul tekib katoodi pinna läheduses väga tugev elektriväli, milles katoodi pind esineb pluss-elektroodina. Selle elektrivälja ulatus on väga väike — vastab ligikaudselt aatomite omavahelisele kaugusele. Selle väikese ruumi ulatuses on aga väljatugevuse muutus väga suur ja annabki seetõttu ühe sentimeetri pikkuse kohta arvutatuna eelnimetatud väärtusega (10^7 V/cm) väljatugevuse, mida peaks väline elektriväli ületama, et suurel arvul elektronidel oleks võimalik katoodi pinnast väljuda ja sellest eemalduda. Katoodi pinnast väljuda ja sellest eemalduda saavad ainult need vähesed elektronid, mis omavad selleks küllaldaselt suurt kineetilist energiat.

Juhul, kui katoodi pind pole absoluutselt sile, vaid omab kõrgendikke ja teravikke, on välise elektrivälja tugevus nende teravike kohal väga suur ja tema emissioonvoolu tugevdav mõju on palju tunduvam. Niisugusel juhul ei anna välisest elektriväljast tingitud lisa-emissioonvoolu mitte kogu emiteeriva keha pind ühtlaselt, vaid ainult selle üksikud punktid — peamiselt teravikud.

Välise elektrivälja poolt avalduvat, metalli pinnast elektronide väljumisele soodustavat toimet uuris esimesena Schottky, mistõttu seda nähtust nimetataksegi Schottky efektiks.

Katoodi temperatuurist ja katoodi ümbritseva välise elektrivälja tugevusest sõltuva üldise emissioonvoolu pindtihedust saab leida valemiga:

$$j_{eü} = j_{eT} \cdot e^{4{,}389 \frac{E_K^{\frac{1}{2}}}{T_K}}, \qquad (16.1)$$

kus j_{eT} on termoelektrilise emissioonvoolu pindtihedus [A/cm²],

$j_{eü}$ — kogu emissioonvoolu pindtihedus [A/cm²],

E_K — välise elektrivälja tugevus katoodi pinnal, voltides sentimeetrile [V/cm],

T_K — katoodi absoluutne temperatuur [°K].

Näide 16.1. Leida näites 15.1 toodud katoodi kogu emissioonvool, kui katood asetseb silindrilise anoodi telgjoonel, mille läbimõõt $d_A = 2$ cm ja kui anoodpinge $U_A = 500$ V.

Elektrivälja tugevus[1] katoodi pinnal

$$E_K = \frac{U_A}{r_K \ln \frac{r_A}{r_k}} = \frac{500}{0{,}005 \cdot \ln \frac{1}{0{,}005}} \approx 18\,850 \frac{\text{V}}{\text{cm}},$$

kus r_K on katoodi raadius [cm] ja r_A — anoodi raadius [cm].

Emissioonvool

$$I_{eü} = I_{eT} \cdot e^{4{,}389 \frac{E_K^{\frac{1}{2}}}{T_K}} = 81{,}6 \cdot e^{4{,}389 \frac{\sqrt{18850}}{2500}} = 81{,}6 \cdot e^{0{,}242} =$$

$$= 81{,}6 \cdot 1{,}27 = 104 \text{ mA}.$$

Nagu arvutusest näha, tugevdab 500 V anoodpinge termoelektrilist emissioonvoolu 27% võrra.

[1] R. Hollmann. Elektrotehnika I, lk. 119, valem 122.

§ 17. Elektronide emissioon metalli pinnale langevate elektronide mõjul ja dünatronefekt. Langeb metalli pinnale kiiresti liikuvate elektronide voog, siis võib alati märgata ka teist, selle pinna poolt tulevat, vastassuunalist elektronide voogu. Viimasest kujunduvat emissioonvoolu nimetatakse *sekundaaremissioonvooluks* ja seda nähtust ennast sageli ka dünatronefektiks.

Metallile suure kiirusega langevad elektronid annavad metallis leiduvate elektronidega kokku põrgates viimastele nii suure kiiruse, mis ületab metalli pinnast väljumiseks vajaliku väljumistöö (mille suurus $U_e = 1 \ldots 4{,}5$ V) ja mille tõttu need saavad metalli pinnast väljuda. Osa neist metalli sees kiirelt liikuvaist elektronidest tababki metalli pinda seestpoolt ja väljubki metalli pinnast, moodustades sel teel sekundaaremissioonvoolu. Sekundaaremissioonvoolu tugevus sõltub peamiselt metallile langevate elektronide arvust, elektronide kiirusest ja elektronide metalli pinnale langemise nurgast, ning vähesel määral ka metalli väljumistöö väärtusest. Sekundaaremissiooni väärtust väljendatakse suhtelise arvuga, mis näitab, mitu elektroni metallile langev nn. *primaarne elektron* keskmiselt metalli pinnast välja lööb. Praktiliselt määratakse see suhteline arv elektroodile langevate elektronide ja sealt väljuvate ning elektroodist eemalduvate elektronide poolt moodustatud voolude tugevust mõõtes ja viimast esimesega jagades.

Metallile langevate elektronide väikese kiiruse puhul (kui nende kiirus vastab ainult mõnele voldile) koosneb metalli pinnast eemalduv elektronide voog peamiselt ainult metalli pinnalt tagasipõrganud elektronidest. Metallile langevate elektronide suurte (üle 15 V) kiiruste puhul aga koosneb see voog peamiselt neist elektronidest, mis metallile langevailt elektronidelt saadava kineetilise energia toimel metallist väljuvad. Kui suureneb veelgi metallile langevate elektronide kiirus, suureneb ka sekundaaremissioon, kuid ainult

teatava piirini (100 kuni 600 V), mis sõltub peamiselt metalli pinna koostisest ja kujust. Edasisel elektronide kiiruse suurendamisel hakkab sekundaaremissioonvool aeglaselt nõrgenema.

Sekundaaremissioon sõltub veel metallile langevate elektronide langemisnurgast, olles 90°-lise langemisnurga puhul kõige väiksem, teiselt poolt aga seda suurem, mida väiksema langemisnurga all elektronid metalli pinda tabavad.

Mõõtmistel on selgunud, et puhtate metallide puhul ei ületa sekundaaremissiooni väärtust väljendav suhteline arv ehk sekundaaremissiooni-tegur σ väärtust „üks". Gaasist mitte täielikult puhastatud metalli puhul on sekundaaremissiooni-tegur 3...4 ning aktiveeritud metalli puhul 8...10. Metalli pinna sobiva koostise puhul aga võib ta väärtus tõusta kuni 20-ni. Metalli väljumistöö väärtus sekundaaremissiooni väärtust tunduvalt ei mõjuta, mis seletub sellega, et ta on sekundaaremissiooni põhjustavate elektronide kiirusega võrreldes väike (1 kuni 4,5 V).

Sekundaarelektronide kiirused jaotuvad metalli pinnast väljumisel Maxwelli tõenäosuse teooria kohaselt mingisuguse keskmise kiiruse ümber, mis on ligikaudu 5 ja 15 V vahel, samal ajal kui primaarelektronide kiirused olid 100 kuni 1000 V. Seega on sekundaarelektronide kiirused metalli pinnast väljumisel väga väikesed, võrreldes primaarelektronide kiirustega.

Nõukogude Liidu teadlaste Hlebnikovi, Morgulise jt. poolt sekundaaremissiooni alal teostatud arvukad uurimised on tõestanud, et protsessid, mis põhjustavad sekundaaremissiooni, ei toimu mitte metalli pinnal, vaid metalli sees. Metalli tunginud primaarelektronid annavad seal oma liikumisenergia üle nende teele sattuvaile metallis leiduvaile poolvabadele elektronidele. Selle juures sõltub primaarelektronide metalli tungimise sügavus nende kiirusest. Metallis olevad poolvabad elektronid saavad primaar-

elektroniga kokku põrgates küll metalli sisemuse poole suunatud kiiruse, kuid metallis leiduva suure hulga poolvabade elektronide omavaheliste kokkupõrgete tagajärjel omandab osa neist siiski metalli pinna poole suunatud liikumise. Jõudnud metalli pinnale, väljuvad niisugused elektronid metallist, kui neil on väljumistööd ületav kiirus.

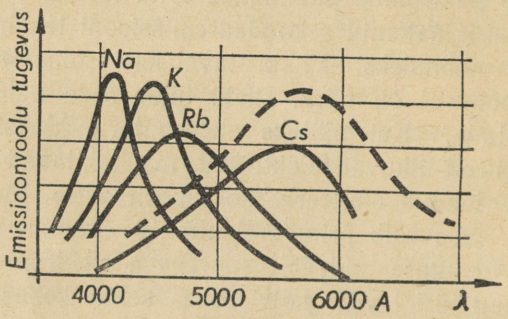
Elektrit mitte juhtivate ainete (isolaatorite) pinda elektronidega pommitamisel tekib samuti sekundaaremissioon. Poolvabade elektronide puudumise tõttu isolaatorites muutuvad isoleeraine aatomid sekundaaremissiooni tekkimise kohas positiivseiks ioonideks. Ehkki tavaliselt isolaatorite sekundaaremissioonvool on nõrk, siiski tuleb seda nähtust mõnikord arvestada. Kui näiteks elektrontoru klaasist kolvile langevad kiirelt-liikuvad elektronid, mis tekitavad sekundaaremissiooni, laadub emiteeriv koht positiivsete ioonide tõttu positiivselt. See võib primaarelektronide voogu veelgi suurendada. Niisuguse pidevalt suureneva elektronidega pommitamise tagajärjel võib kolvi klaas selles kohas ülemäära kuumeneda ja seetõttu pragunedagi.

§ 18. Elektronide emissioon valguse mõjul ja fotoefekt. Kiirgusenergia (näiteks valguse) voo langemisel metalli pinnale saavad metalli poolvabad elektronid kiirgusenergiat neelates täiendavat energiat (kiirust) ja kui nende energia-*sisaldus* (kiirus) seejuures muutub metalli pinnast väljumiseks küllaldaseks, siis nad väljuvadki. Metalli pinnast väljuvate elektronide arv on sel puhul, püsiva temperatuuri juures, võrdeline valguse intensiivsusega.

Nüüdisaegse vaate järgi koosneb kiirgusenergia nn. energia kvantidest, millede väärtus on võrdne kiirgusenergia sageduse ν ja Planck'i konstandi $h = 6{,}62 \cdot 10^{-27}$ erg·sek korrutisega $h\nu$ [1].

[1] V. A. Mihelson. Füüsika II köide. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. Neljas jagu, XVIII peatükk, § 4: Valguse elektromagnetiline teooria. XXVII peatükk: Kvantide optika.

Väidet, et kiirgusenergia kvandi väärtus võrdub kiirguse sageduse ja Planck'i konstandi korrutisega, tõendab asjaolu, et metalli pinnast väljunud elektronide kiirus sõltub ainult metalli pinna kiiritamiseks kasutatud kiirguse sagedusest, mitte aga kiirguse intensiivsusest. Katsed tõendavad, et mida suurem on kiiritava kiirguse sagedus, seda suurem on ka metalli pinnast väljunud elektroni kiirus, kuna temasse on neeldunud seda rohkem energiakvante. Et aga



Joon. 18. 1. Mõningate leelismetallide emissioonvoolu sõltuvus kiirguse lainepikkusest. Kriipsjoonega on märgitud silma tundlikkuse lävi sõltuvalt lainepikkusest. Na — naatrium, K — kaalium, Rb — rubiidium, Cs — tseesium, λ — valguse lainepikkus ongströmides ($1\ \text{Å} = 10^{-8}$ cm).

elektron vajab metalli pinnast väljumiseks teatavat minimaalset energiat, siis kiirguse sageduse vähenedes peaks jõutama piirini, kus energiakvandi energiast ei jätku teda neelanud elektroni väljatoomiseks metalli pinnast. Seda on ka katsed tõendanudki.

Kiirguse niisugust sagedust või lainepikkust, mille energiakvandist enam ei jätku elektroni väljatoomiseks metalli pinnast, nimetatakse kriitiliseks sageduseks ν_0 või kriitiliseks lainepikkuseks λ_0. Kuna elektroni metalli pinnast väljumiseks vajaliku väljumistöö väär-

tus sõltub metalli omadustest, siis on ka kriitiline lainepikkus iga metalli jaoks erinev.

Ühesuguse kiirgusintensiivsuse puhul peaks kiirguse lainepikkuse vähenedes (s. o. energiakvantides sisalduva energia suurenedes) elektronide emissioon pidevalt suurenema, sest siis omab metalli sees mitmesuguse kiirusega liikuvaist elektronidest suurem hulk metalli pinnast väljumiseks vajalikku kiirust. Katsed aga tõendavad, et paljude metallide puhul lainepikkuse lühenedes emissioonvool tugevneb kiiresti ja saavutab mingisuguse lainepikkuse juures maksimaalväärtuse, kuid lainepikkuse edasisel lühenemisel ta jällegi nõrgeneb, nagu see on kujutatud joonisel 18. 1. Seda nähtust nimetatakse *fotoefekti selektiivsuseks*. Nagu nähtub jooniselt 18. 1, on kiirguse lainepikkus (ja sagedus), mille juures emissioonvool omab maksimaalset väärtust, erinevail metallidel erisugune.

Olgu veel nimetatud, et metalli pinna kiiritamisel ei neela metalli aatomite vahel liikuvad poolvabad elektronid mitte kõiki energiakvante, vaid märgatavalt suurem hulk neist kvantidest (nagu seda on näidanud katsed) kulub metalli temperatuuri tõstmiseks.

Teine osa.

ELEKTRONTORUDE ELEKTROODID.

IV peatükk.

Katoodide ehitus.

§ 19. Katoodide üldine liigitelu. Katoodi materjali iseloomustavad: katoodi viljakus (§ 31), iga, emissioonvoolu tugevuse sõltumatus ajast, materjali mehaaniline töödeldavus ja mehaaniline tugevus. Nende omaduste kõrge taseme saavutamisest lähtudes valitaksegi katoodide toormaterjal ja ehitusviis. Praegusaegsetes elektrilahendusega vaakumseadistes kasutatavaid katoode võib nende füüsikaliste ja elektriliste omaduste järgi liigitada kolme järgnevasse rühma.

1. Puhtaist metallidest või metalli sulameist valmistatud katoodid. Katoodimaterjalina kasutatavaiks metallideks on peamiselt volfram, väiksemal määral ka molübdeen, tantaal ja tantaalsulamid.

2. Metallist katoodid, mille pinnale on adsorbeeritud alusmetalli (südamiku) suhtes positiivset potentsiaali omava metalli ühe aatomi paksune kiht. Alusmetalliks ehk südamikuks kasutatakse peamiselt volframit, harvem ka molübdeeni, kattekihiks — ühe aatomi paksust tooriumikihti. Tooriumi asemel kasutatakse mõnikord ka nioobiumi. Samasse rühma kuuluvad ka karbiiditud välispinnaga katoodid.

3. Oksüüdikihiga kaetud katoodid. Et oksüüdikihile südamikuks olev metall emissioonvoolu tugevust palju ei mõjuta, siis kasutatakse alusmetallina mitmesuguseid (ka suurt väljumistööd omavaid) metalle. Emiteeriva kihina esineb baa-

riumi või strontsiumi oksüüd. Samasse rühma kuuluvad ka tseesiumiga kaetud katoodid.

§ 20. Vahetult köetav katood. Vahetult köetavaiks nimetatakse niisuguseid katoode, milledes küttevool läbib elektrone emiteerivat keha.

Vahetult köetava katoodi ehitusviis sõltub tema mõõdetest ja elektrovaakumseadise muude elektroodide kujust. Kasutatakse kas sirgeid (joon. 5. 5), V-kujulisi või W-kujulisi (joon. 5. 6) katoode. Katoodi otsad keevitatakse tugitraatide otste külge, millede ülesandeks peale katoodi hoidmise ehk toetamise on veel ka küttevoolu juhtimine. V- ja W-kujuliste katoodide ülemised paindekohad on toetatud vedrudele, mis hoiavad katoodi ühtlase mehaanilise pinge all, vaatamata tema pikkuse muutumisele temperatuuri mõjul.

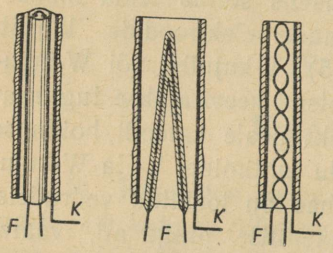
Peenest traadist vahetult köetavate katoodide kuumutamiseks kasutatakse ainult alalisvoolu, sest nende väikese soojusmahutavuse tõttu poleks kütmisel vahelduvvooluga nende temperatuur ja emissioonvoolu tugevus püsivad. Vahelduvvooluga võib kuumutada ainult suure soojusmahutavusega jämedaid katoode, millede temperatuuri kõikumine vahelduvvooluga kütmisel on väike.

Peale selle võib vahetult köetavate katoodide emissioonvoolu tugevust vahelduvvooluga kütmisel mõjutada katoodi ümbritsev vahelduv magnetväli ja katoodi otste vahelise potentsiaalide vahe perioodiline muutumine (vt. § 39).

§ 21. Kaudselt köetav katood. Kaudselt köetava katoodi emiteeriv osa (katood) ja seda kuumutav kütteniit on teineteisest elektriliselt isoleeritud. Kasutusel on väga mitmesuguse ehitusviisiga kaudselt köetavaid katoode. Joonisel 21. 1 on näidatud mõned elektrontorudes kasutatavad kaudselt köetavate katoodide ehitusviisid. Joonisel 21. 1 *a* toodud katood koosneb väikesest, umbes 1 mm läbimõõduga portselansilindrist, milles on kaks pikuti auku, kuhu on ase-

tatud alumiiniumiga kaetud volframtraadist kütteniit. Portselansilindrit ümbritseb nikkelplekist toru, millele on kantud emiteeriv kiht.

Volframtraadi alumiiniumkate on tarvilik volframi keemiliseks isoleerimiseks portselanist, kuna portselanis leiduvad ained mõjuvad volframile sööbivalt.



Joon. 21.1. Kaudselt köetavate katoodide ehitusviise. *F* — kütteniit, *K* — katood.

Niisuguse katoodi puuduseks on see, et kõrge temperatuuri juures väheneb portselani elektriline takistus, ja ka see, et ta muutub pehmeks.

Joonisel 21.1 *b* kujutatud katoodil on volframist kütteniit kaetud Al_2O_3 pulbrist valmistatud kestaga ja ta asetseb emiteerivale kihile alust moodustavas niklist silindris. Niisugune katoodi ehitusviis on kohane ka tugeva küttevooluga katoodide jaoks.

Sagedasti kasutatakse joonisel 21.1 *c* kujutatud ehitusviisiga katoode. Sellistel katoodidel on emiteeriva kihiga kaetud nikkelplekist silindri sees isoleerainega kaetud bifilaarselt kõiestatud volframtraat. Säärane katoodi ehitusviis on sobiv ka kõrgetel küttepingetel (6,3, 12, 25 V).

Katoodi mitte-emiteerivate pindade tõttu on kaudselt köetavate katoodide viljakus väiksem kui vahetult köetavatel katoodidel ja ei ületa tavaliselt 30 ... 35 mA/W.

Kuna kaudselt köetavatel katoodidel on suur soojusmahutavus (samuti kui jämedatel vahetult köetavatel katoodidelgi), siis vajavad nad pärast küttevoolu lülitamist teatavat aega, et nende temperatuur saaks tõusta nimiväärtuseni. Väikese võimsusega elektrontorude katoodidel on see aeg, sõltuvalt toru tüübist, 15 ... 60 sekundit (vahetult köetavatel katoodidel aga 3 ... 5 sekundit).

§ 22. Volframkatood. Volframi hinnatavaiks omadusteks, mis teevad ta üheks eelistatumaks katoodimaterjaliks, on ta kõrge sulamistemperatuur (üle 3600° K) ja sitkus, mis võimaldab temast valmistada vajaliku läbimõõduga traate. Elektrontorudes kasutatakse volframtraadist katoode, millede läbimõõdud on 0,01 ... 2 mm. Volframkatoodi talitlustemperatuur on 2400 ... 2600° K, sõltuvalt volframtraadi läbimõõdust ja nõutavast mehaanilisest vastupidavusest. Selles vahemikus olevaist temperatuuridest kõrgemad temperatuurid kehtivad jämedamast traadist katoodide kohta. Peenest traadist katoodide lubatav talitlustemperatuur on tavaliselt 2400° või 2450° K.

Volframtraadist katoodi eaks loetakse aega, mille vältel traadi läbimõõt on vähenenud 10% võrra. Tavaliselt ületab see 1000 tundi.

Sõltuvalt talitlustemperatuurist on volframtraadist katoodi viljakus 2 ... 10 mA/W.

Volframkatoodi üheks eeliseks on veel see, et volframiaur ühineb elektrontorus leiduva gaasiga ja sadeneb kesta seintele, suurendades sellega elektrontorus vaakumit. Volframtraadist katoode kasutatakse peaaegu eranditult kõigis suure võimsuse või kõrge pingega töötavais generaatortorudes. Emissioonvoolu tugevuse suure püsikindluse tõttu varustatakse volframkatoodiga ka mõõteriistades kasutatavad elektrontorud.

§ 23. Tantaalkatood. Tantaali väljumistöö on volframi omast väiksem (tantaalil $U_e = 4{,}07$ V), mistõttu tema emissioonvool talitlustemperatuuridel 2300 ... 2500° K on ligi 10 korda tugevam kui volframil.

Tantaali sulamistemperatuur on 3120° K.

Tantaaltraadist katoodi puuduseks on see, et tantaal kristalliseerub kõrge temperatuuri juures ja muutub seetõttu

hapraks. Kristalliseerumist saab vähendada, kui lisandada tantaalile mõningaid kõrvalaineid.

§ 24. Toreeritud katood. Toreeritud katood koosneb ühe aatomi paksuse tooriumikihiga kaetud volframtraadist. Tema viljakus on volframkatoodi omast tunduvalt suurem (§ 15). Toreeritud katoodi alustraat valmistatakse volframist, millele on lisandatud 0,5 ... 2% tooriumoksüüdi (ThO_2). Traadi pinna aktiveerimiseks kuumutatakse traati vaakumis 1 ... 2 minuti kestel temperatuuril 2800° K. Selle temperatuuri juures laguneb volframis sisalduv tooriumoksüüd metalliliseks tooriumiks ja hapnikuks. Volframi pinnal olev toorium aga aurub. Pärast seda kuumutatakse katoodi 2 ... 3 tunni vältel temperatuuril 2000 ... 2150° K. Selle aja kestel toimub difusiooni mõjul tooriumi aatomite liikumine volframi pinnale, kust osa neist aurub. Kuna aga tooriumi aurumine selle temperatuuri juures on väiksem kui pinnale difundeerumine, siis kattub volframi pind ühe aatomi paksuse tooriumikihiga.

Tooriumiga aktiveeritud pinda omava katoodi talitlustemperatuur valitakse 1800 ... 1900° K piirides. Niisuguse temperatuuri juures on ühe aatomi paksuse tooriumikihiga kaetud volframkatoodi emissioonvool sama tugev kui puhtal volframkatoodil 2500° K temperatuuri juures. Madalama temperatuuri säilitamine nõuab ka väiksemat küttevõimsust, mistõttu katoodi viljakus on suurem. Kui katoodi temperatuur on 1800° K, siis on toreeritud katoodi viljakus 30 mA/W.

Toreeritud katoodi ea määrab mitte tema traadi läbipõlemine või läbimõõdu vähenemine, nagu volframkatoodil, vaid tooriumikihi hävinemine katoodi pinnal. Katoodi talitlustemperatuuri juures on volframi aatomite vahelt katoodi pinnale difundeeruvate tooriumi aatomite arv küllaldane selleks, et hoida pinda kaetuna ühe aatomi paksuse tooriumikihiga. Paksemat kihti (mis viiks emissioonvoolu nõrgenemisele) ei saa tekkida, sest volframi ja tooriumi aatomite

vaheline tõmbejõud, mis pidurdab tooriumi aurumist, on suurem kui katoodi talitlustemperatuuril kahe tooriumi aatomi vahel esinev omavaheline tõmbejõud, mis ei suuda takistada tooriumi aurumist. Katoodi pikemaaegsel töötamisel ilmnev emissioonvoolu nõrgenemine on tingitud sellest, et kõrge temperatuuri juures volfram aja jooksul kristalliseerub ega lase tooriumi aatomeil läbi kristallide volframi pinnale tungida. Kristallide vahelt difundeeruvad tooriumi aatomid ei saa enam katta kogu volframi pinda, ehkki neid katoodis[9] veel leidub, mistõttu emissioonvool nõrgenebki.

Toreeritud katood võib emissioonvoolu kaotada ka katoodi juhuslikul ülekuumutamisel. Kui katoodi on pikemat aega kuumutatud tema kohta lubatud nimitemperatuurist kõrgema temperatuurini, siis aurub kogu katoodis leiduv toorium ja emissioonvool nõrgeneb peaaegu nullini. Kui aga ülekuumutus kestis ainult lühikest aega, siis on tõenäoline, et aurus ainult katoodi pinna lähedal olnud toorium, kuna aga sügavamal võib seda veelgi leiduda. Niisugusel juhul võib emiteerimisvõimet taastada, kui tooriumi difundeerumist volframi pinnale kiirendada katoodi lühemaaegse kuumutamisega normaalsest talitlustemperatuurist kõrgema temperatuurini, anoodpinget rakendamata.

Toreeritud katoodi puuduseks on emissioonvoolu tugevuse sõltuvus elektrontorus sisalduvast gaasist. Kõrge anoodpinge mõjul tekkivad ja suure kiirusega katoodile paiskuvad gaasi positiivsed ioonid purustavad ühe aatomi paksust tooriumi kihti, lüües tooriumi aatomid volframi aatomite vahele tagasi või astudes nendega keemilisse ühendusse. Seepärast kasutatakse toreeritud katoodiga elektronseadistes võimalikult suuremat vaakumit (10^{-8} ... 10^{-9} torri).

Sageli kasutatakse toreeritud volframi asemel katoodimaterjalina ka toreeritud molübdeeni. Nagu katsed on näidanud, omab aga toreeritud molübdeen temperatuuril üle 1700° K suuremat tooriumi difundeerimise ja aurumise kii-

rust, mistõttu nende katoodide iga on väiksem kui volframist alustraadiga katoodidel.

Volframi aktiveerimiseks kasutatakse mõnikord tooriumi asemel ka nioobiumi.

§ 25. Karbiidkatood. Toreeritud katoodi viljakuse suurendamiseks temperatuuri tõstmise teel, töötamise ajal esineda võivate emissioonvoolu kõikumiste vähendamiseks ja katoodi aktiveeritud kihi gaasi positiivsete ioonide mõjule vastupidavamaks muutmiseks kaetakse tooriumilisandiga volframkatood sageli volframkarbiidi (W_2C) kihiga.

Selleks kuumutatakse katoodi enne ta aktiveerimist süsivesinikkude (näiteks naftaliini $C_{10}H_8$) aurudes temperatuuril ligikaudu 1600° K. Süsivesiniku molekulid, puutudes kokku katoodi kuuma pinnaga, lagunevad süsiniku ja vesiniku aatomiteks, milledest süsiniku aatomid difundeeruvad volframi pinnale, moodustades koos volframi aatomitega volframkarbiidi, mis ümbritseb volframit õhukese kestana.

Pärast seda aktiveeritakse katoodi pind samuti kui § 24 kirjeldatud toreeritud volframkatoodidelgi.

Tooriumi aurumissoojus on karbiidi pinnal tunduvalt suurem kui puhta volframi pinnal, mistõttu võidakse kasutada kõrgemat katoodi talitlustemperatuuri. Karbiidkatoodi talitlustemperatuur on 1950 . . . 2000° K ja viljakus 50 . . . 70 mA/W.

Karbiidkatoodi puuduseks on haprus, sest karbiidikiht on jäik (paindumatu), teiseks puuduseks on volframkarbiidi ja volframi paisumistegurite erinevus, mistõttu karbiidikiht katoodi korduval kuumenemisel ja jahtumisel lõheneb.

Karbiidiga kaetakse ka toreeritud molübdeenist katoode.

§ 26. Tseesiumiga kaetud katood. Tseesiumiga kaetava katoodi südamikuks kasutatakse volframtraati, mida kuumutatakse hapnikus temperatuurini 1550° K. Selle tagajärjel tekib volframi pinnale õhuke volframoksüüdi kiht. Pärast seda aurustatakse elektrovaakumseadises tseesiumi, mis

sadeneb katoodile, kattes selle aktiivse kihiga. Niisuguse, tseesiumiga kaetud katoodi talitlustemperatuur on 600 ... 700° K ja viljakus 250 ... 300 mA/W.

Samuti valmistatakse ka tseesiumiga kaetud molübdeenkatoodid.

Tseesiumiga kaetud katoode kasutatakse elektrontorudes harva, sest tseesium aurub kergesti.

Hõbedast katoode, mis on kaetud hõbeoksüüdi ja tseesiumiga, kasutatakse peamiselt fotorakkudes, kus katood emiteerib valguse mõjul.

§ 27. Baariumiga kaetud katood. Nende katoodide valmistamiseks kaetakse volframtraat elektrolüüsi teel vasega ja kuumutatakse teda hapnikus temperatuurini kuni 900° K. Selle tagajärjel tekib vase pinnale vaskoksüüdi kiht.

Nõnda ettevalmistatud katood monteeritakse elektrontorusse, kuhu on asetatud baariumiühendeid või baariumtermiiti. Pärast gaasi väljapumpamist elektrontorust kuumutatakse katoodi elektrivoolu abil ja aurustatakse pöörisvoolude abil baariumiühendid või süüdatakse baariumtermiit. Osa baariumiaurudest langeb katoodile, moodustades seal ühe aatomi paksuse emiteeriva kihi.

Baariumiga kaetud katoodi talitlustemperatuur valitakse piirides 750 ... 900° K. Katoodi viljakus on 70 ... 150 mA/W.

Kuna baariumiga kaetud katoodi emissioonvoolu tugevus on püsivam kui toreeritud katoodil, siis kasutatakse võimendustorudes peamiselt neid.

Baariumiga kaetud katoodiga elektrontorude valmistamist raskendab see, et katoodi katmiseks elektrontorus aurustatud baarium ei sadene üksnes katoodile, vaid kõikidele elektrontoru siseosadele, mistõttu isolaatoritena toimivate elektrontoru siseosade pinnad võivad muutuda elektrit juhtivaiks. Ka võib baariumi sade tunduvalt suurendada elektrontoru elektroodidevahelist mahtuvust. Baariumiga kaetud katoodide kol-

mandaks puuduseks on emiteeriva kihi väike vastupidavus temale langevate gaasi positiivsete ioonide mõjule.

§ 28. Oksüüdkatood. Oksüüdkatoodidel on katoodi südamiku (aluse) toime emissioonvoolu tugevusele väike. Südamiku materjali valikul arvestatakse peamiselt materjali mehaanilisi ja keemilisi omadusi ning tema pinna elektrilist takistust.

Oksüüdkatoodide südamikuna (alustraadina) kasutatakse tavaliselt kas niklit, nikli ja raua sulamit, koobaltit, titaani või nende sulameid või peenest traadist katoodide puhul ka plaatina ja iriidiumi sulamit.

Katoodi südamikule kantakse peeneksjahvatatud baariumi ja strontsiumi karbonaadi ($BaCO_3$, $SrCO_3$) pulbrist ja mingist mitteaktiivsest ainest (näiteks parafiinõlist) valmistatud pasta kiht. Nõnda ettevalmistatud katood monteeritakse elektrovaakumseadisesse. Pärast õhu väljapumpamist kuumutatakse katoodi 1600° K juures, mille tagajärjel baariumi ja strontsiumi karbonaadid lagunevad oksüüdideks (BaO, SrO) ja süsihappegaasiks. Viimane pumbatakse elektrovaakumseadisest välja. Metallide oksüüdid jäävad katoodile valge pulbrina. Et muuta need oksüüdid emiteerimisvõimeliseks, on vaja katoodi aktiveerida eri menetlusega. Selleks kuumutatakse katoodi 1600° K juures ja antakse anoodile katoodi suhtes positiivne pinge (100 ... 200 V). Nüüd toimub teatava aja kestel katoodi pinnal protsess, mille tagajärjel katoodi pind aja jooksul kattub ühe aatomi paksuse emiteerimisvõimelise baariumi kihiga ja katoodi emiteerimisvõime suureneb.

Oksüüdkatoodi talitlustemperatuur valitakse 1000 ... ... 1150° K. Tema viljakus on 70 ... 100 mA/W. Katood kaotab emiteerimisvõime, kui teda kuumutada üle 1600° K.

Oksüüdkatoodi pind pole sile. Seepärast sõltub Schottky efekti tõttu emissioonvoolu tugevus suurel määral anood-

pingest, mis ei võimalda katoodi küllastusvoolu tugevuse määramist.

Oksüüdkatoodide puuduseks on see, et emissioonvool, läbides katoodi pinnal olevat suure elektrilise takistusega oksüüdikihti, võib selle üksikutes punktides tekitada niivõrd palju lisasoojust, et neis kohtades olev emiteeriv kiht aurub. See nähtus esineb tavaliselt siis, kui katoodi kuumutatakse nimiväärtusest madalama temperatuuriga. Sama nähtuse tõttu võivad katoodi üksikud punktid pärast küttevoolu katkestamist jääda edasi emiteerima. Sellest nähtusest tingituna pole võimalik oksüüdkatoode kasutada kõrget anoodipinget nõudvates elektrovaakumseadistes.

Teiseks oksüüdkatoodi puuduseks on see, et tema emissioonvoolu tugevus pole ajaliselt püsiv.

§ 29. Katoodide võrdlusandmed. Tabelis 29. 1 on toodud enamkasutatavate katoodide kohta kehtivad tehnilised andmed.

Tabel 29. 1.

Katoodide tehnilised andmed.

Katoodi tüüp	Talitlustemperatuur T ^0K	Emissioonvoolu pindtihedus j_{eT} $\frac{mA}{cm^2}$	Küttevõimsuse pindtihedus P_F' $\frac{W}{cm^2}$	Viljakus V $\frac{mA}{W}$	Iga t_K h
Volframkatood	2400...2600	0,3 ...0,7	70 ...84	2...10	800... ...1000
Toreeritud katood	1800...1900	0,3 ...0,8	11 ...18	30...50	800... ...1000
Karbiidkatood	1950...2000	0,7 ...1,5	14 ...22	50...70	500... ...600
Oksüüdkatood	1000...1150	0,15...0,5	2,8... 5	55...100	1500... ...2000
Baariumiga kaetud katood	750... 900	0,3 ...0,9	4 ... 6	70...150	1400... ...1500

V peatükk.

Katoodide omadused.

§ 30. Katoodi kuumutamine. Üldiselt on ükskõik, kuidas teostada katoodi (kütteniidi) kuumutamist. Tegelikult aga on seda kõige lihtsam teha elektrivoolu abil, kusjuures kuumutamiseks ehk kütmiseks vajalik küttevõimsus

$$P_F = U_F I_F = I_F^2 R_F \text{ W} \qquad (30.1)$$

annab igas sekundis katoodile soojushulga

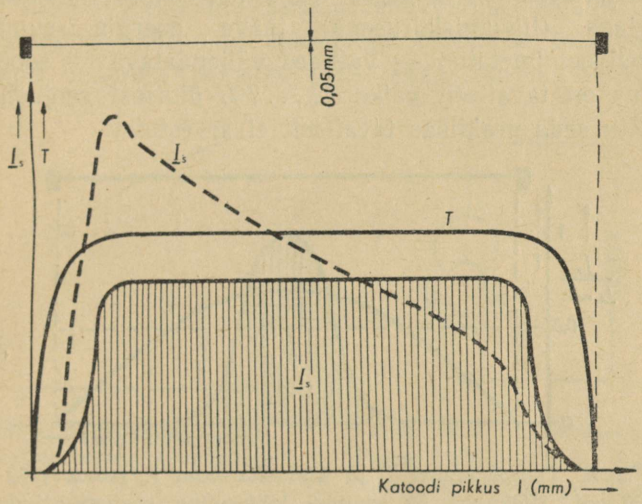
$$Q_F = 0{,}24\, U_F I_F \text{ cal.} \qquad (30.2)$$

Selle soojuse mõjul tõuseb katoodi temperatuur seni, kuni igas ajaühikus katoodile antud soojushulk tasakaalustub sealt kiirguse ja katoodi kandetraatide soojusjuhtivuse kaudu sama aja vältel lahkuva soojushulgaga, sest viimane suureneb katoodi temperatuuri tõusuga.

Kiirguse teel katoodilt lahkuv soojushulk on võrdeline katoodi pinna suurusega ja suureneb ligikaudu absoluutse temperatuuri viienda astmega. Pikkusega võrreldes suhteliselt peene ja kõrgel temperatuuril töötava volframtraadist katoodi puhul on ülekaalus soojuse lahkumine kiirguse teel. Joonisel 30. 1 on toodud temperatuuri ja emissioonvoolu jaotus pikiniisugust katoodi temperatuuri $T = 2300^0$ K juures. Kiirguse teel lahkuva soojuse jagunemine ühtlaselt kogu traadi pikkusele põhjustab kogu traadi pikkusel ka ühtlast temperatuuri ja emissiooni. Ainult traadi otstel on temperatuur madalam ja küllastusvool nõrgem — soojuse lahkumise tõttu soojusjuhtivuse teel.

Puhtast volframtraadist katoode kasutatakse peamiselt saatetorudes. Väikese võimsusega elektrontorudes kasutatakse enamasti tooriumi või baariumiga kaetud volframtraadist katoode, millede talitlustemperatuur on madalam. Niisugustel

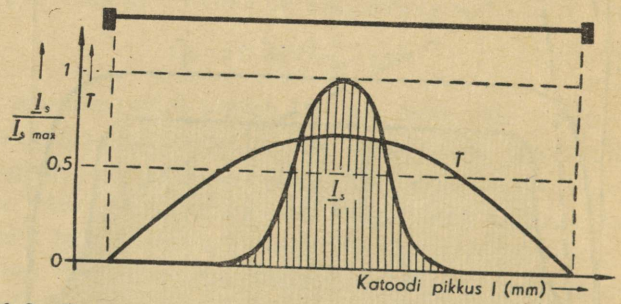
katoodidel on ülekaalus soojuse lahkumine soojusjuhtivuse teel. Sama nähtus esineb vahelduvvooluga köetavail katoodidel, milledena kasutatakse suure soojusmahutavuse saavutamiseks lühikesi ja jämedaid katoode või suhteliselt suure soojusmahutavusega kaudselt köetavaid katoode (vt. § 21).



Joon. 30. 1. Temperatuuri T ja küllastusvoolu I_s jaotus piki peenikest volframtraadist katoodi. Ülekaalus on soojuse lahkumine kiirguse teel. Kriipsjoonega on märgitud olukord, kui $\frac{I_e}{I_F} = 0{,}1$.

Soojusjuhtivuse teel katoodilt lahkuva soojuse hulk sõltub katoodi kandetraatide läbimõõdust, katoodi enda läbimõõdust, kandetraatide ja katoodi soojusjuhtivusest ja katoodi keskkoha maksimaalsest temperatuurist. Joonisel 30. 2 on toodud temperatuuri ja emissioonvoolu jaotus piki lühikest jämedat katoodi. Nagu jooniselt näha, on mõõduandev ainult katoodi keskmise osa emissioonvool, kuna katoodi kummalgi otsal — umbes ühel neljandikul kogu katoodi pikkusest — on emissioonvoolu tugevus tähtsusetult väike.

Katoodi jahtumist põhjustab peale soojuse lahkumise kiirguse ja soojusjuhtivuse teel veel soojuse lahkumine emissioonvoolu tõttu. Elektronide väljumine katoodi pinnast jahutab katoodi, sest iga katoodist väljuv elektron viib sealt kaasa energiat, mille hulk võrdub katoodi pinnast väljumiseks kulutatud töö ja pärast väljumist elektronile kineetilise energiana (liikumiskiirusena) jääva energia summaga. Katoodi eelnimetatud — vattides väljendatava — soojuskao väärtus on tavaliselt väike (2...7% üldisest soojuskaost), mistõttu seda praktikas tavaliselt ei arvestata.



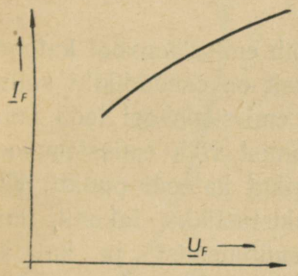
Joon. 30. 2. Temperatuuri T ja küllastusvoolu I_s jaotus piki jämedat katoodi. Ülekaalus on soojuse lahkumine soojusjuhtivuse teel.

Katoodi temperatuuriks loetakse tavaliselt tema kõige kuumema koha temperatuuri. Elektrontoru töötamisel pole tema katoodi temperatuuri mõõtmine võimalik. Et aga katoodi temperatuur sõltub küttevoolu I_F ja küttepinge U_F väärtusest, siis kasutatakse tema talitlusseisundi määranguks või jälgimiseks kas küttevoolu I_F või küttepinge U_F mõõtmist.

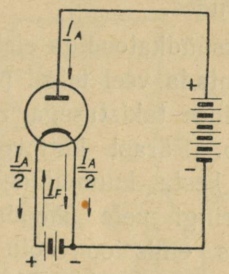
Nagu nähtub jooniselt 15. 1, põhjustab katoodi tavalise talitlustemperatuuri juures juba õige väike temperatuuri muutus suurt emissioonvoolu tugevuse muutust. Praktikas kasutatavail elektrontorudel tugevneb küttevoolu tugevuse suurenedes 1% võrra emissioonvool 10...25%. Emissioonvoolu tugevuse suurendamiseks kahekordseks piisab tavali-

selt 3...7% küttevoolu tugevuse suurendamisest. Seetõttu pole praktikas võimalik emissioonvoolu tugevust hoida konstantsena küttevoolu mõõteriista osuti hälvet jälgides, sest mõõteriistaga vaevalt kindlakstehtav voolutugevuse muutus võib põhjustada tunduvat emissioonvoolu tugevuse muutust.

Et katoodi elektriline takistus temperatuuri tõustes tunduvalt suureneb, siis saab küttepinge mõõtmise teel talitlusseisundit määrata peaaegu kaks korda suurema täpsusega.



Joon. 30. 3. Elektrontoru küttevoolu-tunnusjoon $I_F = f(U_F)$.



Joon. 30. 4. Anoodvoolu liitumine küttevooluga vahetult köetava katoodiga elektrontoru kütte-vooluringis. I_A — anoodvool, I_F — küttevool.

Küttepinge ja küttevoolu tugevuse vahelist seost $I_F = f(U_F)$ iseloomustavat kõverat nimetatakse küttevoolu-tunnusjooneks (joon. 30. 3).

Vahetult köetavate (vt. § 20) elektrontorude katoodis liitub küttevooluga veel emissioonvool, nagu see on näidatud joonisel 30. 4, mistõttu katoodi ühes (küttevooluallika negatiivse klemmiga ühendatud) otsas on katoodvoolu tugevus suurem ja seetõttu ka katoodi otsa temperatuur kõrgem ning emissioonvool tugevam kui teises otsas. Emissioonvoolu ja küttevoolu liitumisest põhjustatud emissioonvoolu jaotuse muutus on näidatud joonisel 30. 1 kriipsjoonega. Emissioon-

voolu mõju on seda suurem, mida tugevam ta on võrreldes küttevooluga.

Elektrontorudes, millede anood töötades kuumeneb (vahel isegi kuni hõõgumiseni), kuumutab see anood soojuse kiirguse teel omakorda ka katoodi, tõstes selle temperatuuri. Temperatuuri tõusu tõttu tugevnenud emissioonvool kuumutab omakorda anoodi jne. Sel teel tekkiv katoodi temperatuuri pidev tõus võib põhjustada katoodi läbipõlemist. Peamiselt esineb see võimalus madala katooditemperatuuriga töötavais elektrontorudes.

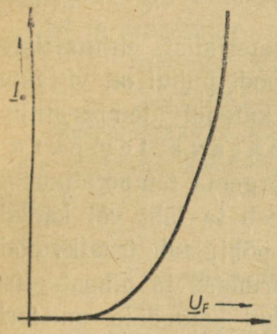
Oksüüdkatoodiga elektrontorus võib emissioonvool katoodi kuumutada veel teisel põhjusel. Nimelt on oksüüdikiht suure elektrilise takistusega, mida läbides emissioonvool teda kuumutab. Pärast küttevoolu katkestamist võib emissioonvool edasi kesta, kuumutades mõnda üksikut katoodi punkti. Kui vooluringi pole ühendatud suuretakistuslikku takistit, mis piiraks emissioonvoolu tugevuse suurenemist, ja kui ka ruumlaengu mõju seda ei piira, siis muutub katoodi seisukord labiilseks (mittestabiilseks) ning emissioonvool võib tugevneda isegi kuni leegi tekkimiseni elektrontorus.

§ 31. Katoodi emissioonvool. Katoodi talitlustingimustest annab ülevaate elektrontoru emissioonvoolu tugevuse sõltuvus küttevoolu tugevusest $I_e = f(I_F)$ või küttepingest $I_e = f(U_F)$, missuguseid kõveraid nimetatakse katoodi emissioonvoolu-tunnusjoonteks (joon. 31. 1). Nende ülesvõtmiseks kasutatav lülitus on kujutatud joonisel 31. 2.

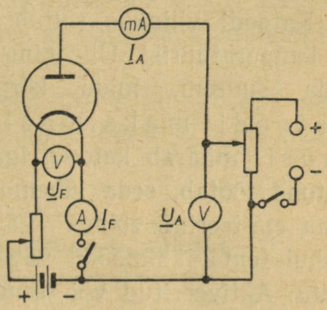
Lülituse traadistamisel ühendatakse vahetult köetavate katoodide puhul kokkuleppe kohaselt anoodvooluallika miinusklemm küttevooluallika miinusklemmiga ja küttevoolu I_F mõõtmiseks kasutatav ampermeeter katoodvooluringi miinusjuhtmesse. Tunnusjoone ülesvõtmise ajal hoitakse anoodpinge U_A konstantsena. Seejuures peab kasutatav anoodpinge

olema niivõrd kõrge, et ruumlaengu mõju (vt. § 37) emissioonvoolu tugevust ei vähendaks. Anoodpinge õige väärtus sõltub elektroodide vahekaugusest ja on tavaliselt antud vastava toru tüübi kohta kehtivas tehnilises andmestikus.

Paragrahvis 15 toodud Richardsoni ja Dushmani valemite abil (15. 1 ja 15. 2) saab arvutada emissioonvoolu tugevust sõltuvalt katoodi temperatuurist ainult sel juhul, kui katoodi kõik punktid on võrdse temperatuuriga. Niisuguseid



Joon. 31. 1. Elektrontoru katoodi emissioonvoolu-tunnusjoon $I_e = f(U_F)$.



Joon. 31. 2. Lülitus katoodi emissioonvoolu-tunnusjoone $I_e = f(U_F)$ või $I_e = f(I_F)$ ülesvõtmiseks.

katoode võiks nimetada i d e a a l s e t e k s k a t o o d i d e k s. Tegelikult aga pole katoodi temperatuur kogu tema pikkusel ühtlane, nagu see nähtub joonistelt 30. 1 ja 30. 2. Seepärast kasutatakse r e a a l s e t e k a t o o d i d e arvutamise puhul katoodi tegelikkudele talitlustingimustele kohaldatud valemeid. Katoodide juures tegelikult kasutatavate temperatuuride piirides võib emissioonvoolu sõltuvust küttevoolust analüütiliselt väljendada järgneva empiirilise valemiga:

$$I_e = cI_F^m \qquad (31.1)$$

kus c ja m on katoodi iseloomustavad tegurid. Nagu valemist on näha, põhjustab juba väike küttevoolu tugevuse muutus

tunduvat emissioonvoolu tugevuse muutust (sest astendajaks olev tegur m omab suhteliselt suurt väärtust, näit. volframi puhul on $m = 17{,}4$).

Lähtudes katoodi küttevõimsuse tarvituse seisukohast, määrab katoodi viljakuse (ehk efektiivsuse) emissioonvoolu I_e ja küttevõimsuse P_F suhe

$$V = \frac{I_e}{P_F} \frac{\text{mA}}{\text{W}}. \qquad (31.2)$$

Katoodi viljakus sõltub katoodi materjalist, ehitusviisist ja temperatuurist. Ühe ning sama katoodi puhul on viljakus seda suurem, mida kõrgem on katoodi temperatuur. Katoodi maksimaalselt lubatava temperatuuri määrab katoodi iga. Mida kõrgema temperatuuriga katood töötab, seda lühema ajaga põleb ta läbi või kaotab oma emiteerimisvõime. Läbipõlemist põhjustab traatkatoodi puhul tema läbimõõdu vähenemine aurumise ja pihustumise tõttu. Aktiveeritud või oksüüdiga kaetud katoodide emiteerimisvõime vähenemist põhjustab katoodi pinnal oleva emiteeriva kihi hävinemine aurumise või pihustumise tagajärjel.

§ 32. Katoodi iga. Katoodi iga omab kogu elektrovaakumseadise suhtes suurt tähtsust, kuna katoodi kõlbmatuks muutumisega muutub kasutamiskõlbmatuks kogu elektron- või ioonseadis (välja arvatud ainult lahtivõetava kestaga elektron- või ioonseadised, milledes on võimalik katoodi uuendamine).

Kõrge temperatuuri tõttu tekib katoodi metalli aurumine, mille tagajärjel katoodi läbimõõt pidevalt väheneb. Intensiivseim aurumine toimub katoodi keskkohas, kus temperatuur on kõige kõrgem. Aurumise tõttu peenemaks muutunud katood kuumeneb küttevoolu mõjul veelgi rohkem, suurendades omakorda aurumise intensiivsust kuni katoodi (kütteniidi) katkemiseni või sulamiseni.

Ühtsest materjalist (näiteks volframtraadist) katoodide puhul loetakse katoodi eaks aega, mille vältel ta läbimõõt on vähenenud 10% võrra. Katoodi läbimõõdu d_K vähenemisega on endastmõistetavalt seoses ka emiteerimisvõime vähenemine. Volframtraadist katoodi iga tundides arvutatakse järgmise valemiga:

$$t_K = 2{,}64 \cdot 10^{-4} \frac{d_K}{M}, \qquad (32.1)$$

kus t_K on iga tundides [h],

M — aurumine, s. o. volframi hulk, mis lahkub aurumise teel ühe ajaühiku vältel katoodi ühelt pinnaühikult [g/cm²s].

Volframtraadist katoodi aurumise M ja viljakuse V väärtuse sõltuvus katoodi absoluut-temperatuurist T_K on toodud tabelis 32.1.

Tabel 32.1.

Volframtraadist katoodi aurumine ja viljakus.

Katoodi absoluut-temperatuur T_K °K	Aurumine M $\frac{g}{cm^2 s}$	Viljakus V $\frac{mA}{W}$
2100	$1.57 \cdot 10^{-12}$	0,14
2200	$1{,}25 \cdot 10^{-11}$	0,35
2300	$0{,}78 \cdot 10^{-10}$	0,87
2400	$0{,}44 \cdot 10^{-9}$	2,0
2500	$2{,}03 \cdot 10^{-9}$	3,9
2600	$0{,}84 \cdot 10^{-8}$	6,8
2700	$3{,}16 \cdot 10^{-8}$	13,0
2800	$1{,}12 \cdot 10^{-7}$	25,0

Aktiveeritud katoodide emiteerimisvõime sõltub aktiivkihi välispinna iseloomust. Talitlustemperatuuril lahkub sellelt välispinnalt aurumise tõttu pidevalt aktiivse metalli aatomeid, kuid metalli seest katoodi välispinnale difundeeruvad

aktiivaine aatomid taastavad seda pinda pidevalt. Muidugi saab see taastamine toimuda ainult niikaua, kuni katoodi metallis või ta välimistes kihtides leidub küllaldasel määral aktiivmetalli aatomeid. Aktiivkihi vähenedes väheneb ka katoodi emiteerimisvõime. Aktiveeritud katoodi iga sõltub suurel määral katoodi talitlustemperatuurist. Katsed on näidanud, et aktiveeritud katoodi puhul vähendab lühemat aega kestev nimi-talitlustemperatuuri ületav temperatuur tunduvalt katoodi aktiivkihti, mille tagajärjel tunduvalt väheneb ka katoodi emiteerimisvõime.

Aktiveeritud katoodi iga on suurel määral sõltuv ka katoodi valmistamise menetlusest. Seetõttu pole võimalik nende katoodide iga määrata arvutuse teel, vaid see tehakse kindlaks katseliselt saadavate andmete alusel.

OCT-40028 järgi loetakse vahetult kõetavate väikese võimsusega elektrontorude eaks aega, mille vältel nende emissioonvoolu tugevus on vähenenud 80%-le teatava toru tüübi kohta kehtivais eeskirjades määratud emissioonvoolu tugevusest.

§ 33. Katoodide kasutamine. Katoodi või kütteniidi takistus on külmalt palju väiksem kui nimitemperatuuri juures (volframtraadil näiteks 12 ... 14 korda). Seega on küttevool lülitusmomendil palju tugevam kui töötamise ajal. Suure küttevoolu tugevusega, V-kujuliste kütteniitide puhul võib kütteniidi külgede ümber tekkiv magnetväli avaldada kütteniiti painutavat (külgi teineteisest eemale tõukavat) mehaanilist jõudu. Seepärast kasutatakse küttevoolu lülitamismomendil tekkiva voolutõuke piiramiseks kas küttevooluringi ühendatud muudetava takistusega takisteid või astmeliselt küttevooluringi lülitatavaid takisteid.

Katoodi töötamise ajal esineda võivaid, küttevoolu allika pinge muutustest tingitud küttevoolu tugevuse muutusi väldi takse tavaliselt küttevooluringi ühendatud käsitsi-reguleeri-

tava takisti abil. Küttevoolu automaatseks reguleerimiseks kasutatakse raudvesiniktakisteid (vt. § 107).

Katoodi nimitemperatuuri säilitamine omab olulist tähtsust. Madalama temperatuuri puhul poleks katood ökonoomselt ära kasutatud ja oksüüdkatood võiks isegi rikneda. Kõrgema temperatuuri puhul lüheneks aga katoodi iga.

Katoodi normaalsete talitlustingimuste säilimise jälgimiseks võib kasutada kas ampermeetrit või voltmeetrit.

Töötamisel kütteniidi läbimõõt aurumise tõttu väheneb ja seega tema takistus suureneb, mispärast konstantse temperatuuri säilitamiseks tuleks pidevalt nõrgendada küttevoolu või tõsta küttepinget. Lugedes kütteniidi eaks aega, mille jooksul ta läbimõõt väheneb 10% võrra, tuleks konstantse temperatuuri säilitamiseks nõrgendada katoodi ea lõpuks küttevoolu 15% võrra või tõsta küttepinget 5% võrra, võrreldes esialgsete väärtustega. Kui aga küttevoolu ei nõrgendata või küttepinget ei tõsteta, vaid ühte või teist püsivalt nimiväärtuse juures hoitakse, siis oleks kütteniit küttevoolu konstantsena hoidmisel katoodi ea lõpul 17% võrra ülekuumutatud või pinge konstantsena hoidmisel 5% võrra allaköetud. Eeltoodust selgub, et kütteniidi iga on konstantse pinge säilitamisel (umbes 2...3 korda) pikem kui küttevoolu hoidmisel konstantsena. Lisaks sellele on pinge abil võimalik katoodi temperatuuri reguleerida märksa täpsemalt kui voolu abil. Seepärast kasutataksegi kütteniidi talitlusolukorra jälgimiseks peaaegu alati voltmeetrit.

Vahetult köetavail katoodidel saab alalisvoolkütte puhul katoodi negatiivne ots rohkem ja positiivne ots vähem kuumutatud kui katoodi keskkoht (§ 30). Kui näiteks $I_e = 0{,}1 I_F$, siis tekib katoodi negatiivses otsas 26% võrra rohkem soojust kui positiivses otsas. Selle halbuse vältimiseks ühendatakse sageli küttereostaat katoodi ja kütte- ning anoodvooluallikate miinusklemmide ühenduskoha vahele.

Tugeva anoodvooluga töötavate ja alalisvooluga köetavate katoodide puhul on soovitav elektrovaakumseadise katoodi otsad iga mõnepäevase töötamise järel ümber ühendada, et katoodi mõlemad otsad vananeksid võrdselt.

Vahelduvvoolkütte puhul ühendatakse anoodvooluallika miinusklemm küttetrafo keskpunktiga või küttejuhtmete vahele ühendatud takisti keskpunktiga. Vahelduvvoolkütte puhul kuumenevad mõlemad vahetult köetava katoodi otsad võrdselt.

VI peatükk.

Muud elektroodid.

§ 34. Anoodi ja võrede ehitus. Õhkjahutusega elektrontorude anood valmistatakse tavaliselt metallplekist kas silindri (joon. 34. 1) või lapiku karbi (joon. 5. 6) kujulisena. Soojuse lahkumine anoodilt toimub kiirguse teel.

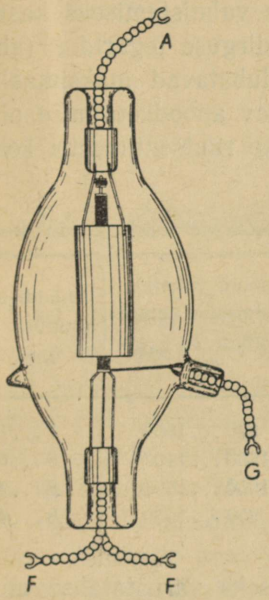
Vesijahutusega elektrontorude anood valmistatakse silindrikujulisena (joon. 34. 2).

Elektrontorude võred valmistatakse spiraalikujuliselt kokkukeeratud metalltraadist (joon. 5. 1 ja 5. 5) või traatvõrgust. Võred asetsevad katoodi ja anoodi vahel ning nende väliskuju sarnaneb anoodi väliskujuga.

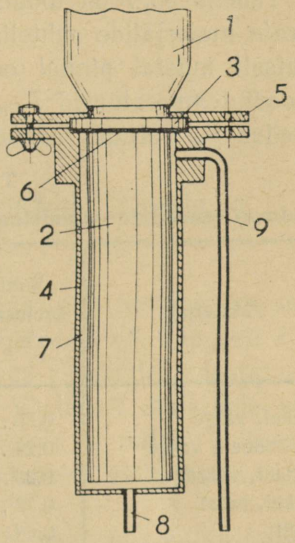
§ 35. Anoodi ja võrede materjal. Anoodi ja võrede materjal peab suutma taluda kõrget temperatuuri, ei tohi sisaldada kõrge temperatuuri juures auruvaid aineid ja gaas peab olema temast kergesti eritatav.

Väikese võimsusega elektrontorude anood ja võred valmistatakse niklist, suure võimsusega elektrontorudel aga molübdeenist. Anoodi ja võrede valmistamiseks sobivaima materjali — tantaali — kõrge hinna tõttu valmistatakse temast peamiselt ainult suure anoodkaoga lühi- ja ultralühilainetega raadiosaatjate generaatortorude anoode.

Aktiveeritud ja eriti oksüüdkatoodiga elektrontorude anoodi maksimaalne temperatuur pole piiriteldud anoodimaterjali vastupidavusega, vaid sellega, et anood ei tohi soo-



Joon. 34. 1. Õhkjahutusega suure võimsusega elektrontoru. *A* — anoodi, *G* — võre ja *F* — kütteniidi ühendusjuhtmed.



Joon. 34. 2. Vesijahutusega elektrontoru veesärk. *1* — elektrontoru klaasist osa, *2* — elektrontoru vasest osa (ühtlasi anood), *3* — elektrontoru kinnituskrae, *4* — veesärk, *5* — surveplaat elektrontoru hoidmiseks veesärgis, *6* — kummist tihendusrõngas elektrontoru krae serva all, *7* — anoodi jahutava läbivoolava vee ruum, *8* — jahutusvee sissevoolu toru, *9* — jahutusvee väljavoolu toru.

juse kiirgumise tõttu kuumutada madalal temperatuuril töötavat katoodi üle lubatava määra. Selleks peab anoodi temperatuur olema tunduvalt madalam katoodi temperatuurist. Nende torude anoodid valmistatakse mustatud välispinnaga niklist või vahel ka grafiidist. Anoodi välis-

pind mustatakse selleks, et saavutada suuremat soojuse lahkumist, kuna musta pinna soojuskiirgus on umbes 2 . . . 3 korda suurem kui heledal pinnal.

Tabelis 35. I on toodud anoodide valmistamiseks kasutatavate materjalide suhtelised soojuskiirguse tegurid ξ (absoluutselt mustal pinnal on $\xi = 1$), lubatavad maksimaalsed anoodi temperatuurid $T_{A\,max}$ ja lubatav anoodkoormuse pindtihedus P_A vattides anoodi pinna ühe ruutsentimeetri kohta.

Tabel 35. 1.

Andmed anoodide valmistamiseks kasutatavate materjalide kohta.

Materjal	Suhteline soojuskiirguse tegur ξ	Anoodi lubatav maksimaalne temperatuur $T_{A\,max}$ °K	Anoodi erikoormus P_A W/cm²
Nikkel, valge	0,20 . . . 0,22	970 . . . 1050	1 . . . 1,5
Molübdeen, valge	0,24 . . . 0,29	1350 . . . 1400	5 . . . 6
Tantaal, valge	0,20 . . . 0,28	1550 . . . 1600	8 . . . 9
Nikkel, must	0,52 . . . 0,60	950 . . . 1050	2,8 . . . 4,2
Grafiit	0,68 . . . 0,80		

Anoodi jahutuspinna suurendamiseks varustatakse anoodid sagedasti ribidega (näit. elektrontorus 5Ц4) või valmistatakse nad traatvõrgust. Niisuguse võrkanoodi jahutuspind on 2 . . . 2,5 korda suurem kui samasuurte üldmõõdetega plekkanoodi jahutuspind. Võrkanood võimaldab ka võre paremat jahtumist.

Voolava veega jahutatavate vesijahutusega anoodide materjaliks kasutatakse vaske. Soojuse siirdumine neilt anoodidelt on 25 . . . 35 W/cm².

Et vabastada anoodimaterjali temas peituvast gaasist, mis elektrovaakumseadise töötades võiks temast erituda ja seadise vaakumit vähendada, selleks kuumutatakse anoodi elektrovaakumseadisest gaasi väljapumpamise kestel kõrgemal temperatuuril, kui ta omab töötades.

KAHE ELEKTROODIGA ELEKTRONTORU.

VII peatükk.

Kahe elektroodiga elektrontoru koostis ja omadused.

§ 36. Koostis. Kahe elektroodiga elektrontoru koosneb vaakumisse paigutatud anoodist ja vahetult või kaudselt köetavast katoodist. Nende märkimiseks skeemidel kasutatakse joonisel 2. 2 kujutatud leppemärki. Vastavalt otstarbele valmistatakse neid mitmesuguses suuruses ja mitme ehitusviisiga. Kest valmistatakse tavaliselt klaasist, väiksemate võimsuste puhul ka metallist.

Oma ülesande poolest jagunevad kahe elektroodiga elektrontorud kahte rühma: suursagedusliku vahelduvvoolu suunajad ja tehnilise (tugevvoolutehnikas kasutatava väikesagedusliku) vahelduvvoolu suunajad.

Suursagedusliku vahelduvvoolu suunajaid, mida nimetatakse ka d i o o d i d e k s, valmistatakse kuni mõnekümne milliampri ja kuni saja voldi jaoks. Tavaliselt paigutatakse ühisesse kesta kaks dioodi süsteemi: kaks anoodi ühise katoodiga. Niisugust elektrontoru nimetatakse ka kaksikdioodiks (duodioodiks). Oma mõõdetelt on dioodid suhteliselt väikesed. Sageli paigutatakse üks või kaks dioodi süsteemi võimendustoru süsteemiga ühisesse kesta (näit. CO-185).

Peamiselt raadiovastuvõtjais ja võimendajais tehnilise vahelduvvoolu suunamiseks kasutatavaid kahe elektroodiga elektrontorusid valmistatakse kuni mõnesaja milliampri ja

kuni tuhande voldi jaoks. Niisuguseid süsteeme paigutatakse tavaliselt kaks tükki ühisesse kesta (näit. 5Ц4, BO-188 jt.).

Suurema võimsusega kahe elektroodiga elektrontorusid (nn. kenotrone) kasutatakse peamiselt raadiosaatejaamades ja suure võimsusega võimendajates. Nende väliskuju on sarnane joonisel 34. 1 näidatud toruga.

§ 37. Ruumlaeng. Katoodi emissioonvoolu tunnusjoone ülesvõtmisel (§ 20) oli vaja anoodile anda küllaldaselt kõrge pinge, et kõik katoodi pinnast väljunud elektronid liiguksid läbi vaakumi anoodile. Madala anoodpinge puhul peab elektroodide vahel leiduvaist vabadest elektronidest koosnev nn. ruumlaeng kinni osa katoodist väljunud elektrone ja need langevad katoodile tagasi. Seetõttu on madala anoodpinge puhul anoodvool I_A nõrgem, kui võiks olla katoodi temperatuurist sõltuv emissioonvool I_{eT}. Katoodi mingisuguse kindla temperatuuri puhul esinevat ja katoodi temperatuurist sõltuvat maksimaalselt esineda võivat anoodvoolu nimetatakse küllastusvooluks I_s ja seda minimaalset anoodpinget U_A, mille juures ruumlaeng ei mõjuta anoodvoolu tugevust, nimetatakse küllastuspingeks U_s. Järelikult on kahe elektroodiga elektrontoru küllastusvool I_s võrdne emissioonvooluga I_{eT} katoodi antud temperatuuri juures küllastuspingest U_s kõrgema anoodpinge puhul.

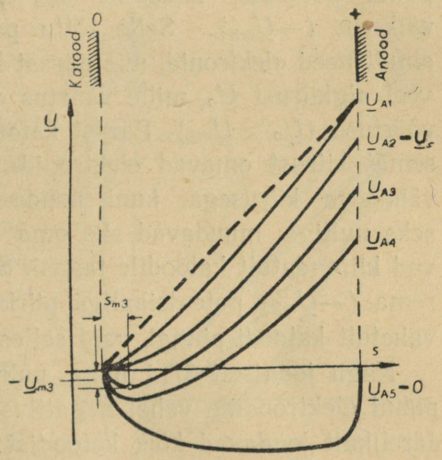
Mida kõrgem on katoodi temperatuur, seda tugevam on katoodi emissioonvool ja seega ka küllastusvool ning seda kõrgem peab olema küllastusvoolu esilekutsuv minimaalne anoodpinge.

Küllastuspingest madalama anoodpinge puhul langeb osa emiteerunud elektronidest ruumlaengu mõjul katoodile tagasi, mistõttu anoodvool on emissioonvoolust nõrgem.

Ruumlaengust ja tema mõjust parema ettekujutuse saamiseks vaatleme ruumlaengu jaotust elektroodidevahelises ruumis.

Joonisel 37. 1 on toodud potentsiaalide jaotus suurepinnaliste katoodi ja anoodi vahel. Elektroodid on võetud suurepinnalised selleks, et hoiduda servade mõjust. Joonisel 37. 1 on kujutatud potentsiaalide jaotus viie erineva positiivse anoodpinge juures, lugedes katoodi potentsiaali võrdseks nulliga.

Juhul, kui katood ei emiteeri (on külm), sarnaneb elekroodidevaheline potentsiaalide jaotus kondensaatori plaatidevahelisele potentsiaalide jaotusele ja on teljestikus kujutatav sirgjoonega (joonisel 37. 1 on potentsiaali jaotus selle juhu jaoks märgitud kriipsjoonega).



Joon. 37. 1. Potentsiaalide jaotus anoodi ja katoodi vahelises ruumis suurepinnaliste elektroodide puhul. U_{A1} kuni U_{A5} on anoodi ja katoodi vahelised pinged, milledest U_{A2} on võrdne küllastuspingega U_s ja $U_{A5}=0$.

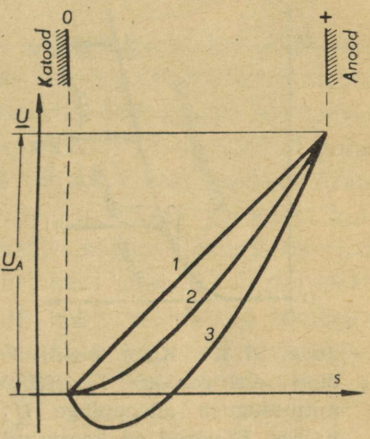
Kuumast katoodist väljuvad elektronid moodustavad elektroodidevahelises ruumis negatiivse potentsiaaliga elektrilaengu. Katoodi pinnast väljunud elektronid omavad Maxwelli teooria kohaselt (§ 13) mitmesuguseid kiirusi, kuid nende keskmine kiirus on suhteliselt väike — vastab ainult mõnele elektronvoldile (§ 15). Positiivse anoodi poole liikumisel suurenevad elektronide kiirused vastavalt läbitud potentsiaalide vahele (§ 9). Seetõttu on nende tihedus seda väiksem, mida lähemal anoodile on vaadeldav ruumipunkt.

Kuuma katoodi puhul moodustavad elektroodidevahelise potentsiaalide jaotuse positiivse laenguga anood ja elektroodidevahelises ruumis olevad negatiivsed elektronid ühiselt. Nende kahe teguri poolt moodustatud potentsiaalide jaotus on nelja erineva anoodpinge jaoks kujutatud joonisel 37. I pidevate joontega. Nagu jooniselt nähtub, on anoodpinge U_{A3} puhul katoodist kaugusel s_{m3} potentsiaali väärtus kõige väiksem ($-U_{m3}$). Selle tõttu pääsevad katoodilt anoodile ainult need elektronid, mis pärast katoodist väljumist omavad veel algkiirust U_o, mille väärtus elektronvoltides ületab U_{m3} väärtuse ($U_o > U_{m3}$). Pärast katoodi pinnast väljumist väiksemat kiirust omavad elektronid lendavad katoodist eemale väheneva kiirusega, kuni nende kiirused muutuvad võrdseks nulliga, muudavad siis oma liikumise suunda ja lendavad kiirendatult katoodile tagasi. Seepärast ei asu kõige väiksema ($-U_{m3}$) potentsiaaliga piirkond anoodpinge U_{A3} puhul vahetult katoodi pinnal, vaid sellest kaugusel s_{m3}.

Nagu jooniselt 37. 1 näha, pole anoodpingete U_{A1} ja U_{A2} puhul elektroodide vahel negatiivse potentsiaaliga piirkonda. Järelikult lendavad kõik katoodist väljunud elektronid anoodile ning anoodpinge U_{A2} on küllastuspingeks U_s. Madalama anoodpinge (näit. U_{A3}) puhul tekib juba negatiivse potentsiaaliga piirkond, mistõttu pärast katoodist väljumist väikest kiirust omavad elektronid pöörduvad selle negatiivse potentsiaali poolt avaldatava eemaletõukava jõu mõjul katoodile tagasi. Anoodpinge U_{A4} puhul (mis on madalam kui U_{A3}) on negatiivse potentsiaali piirkond veelgi suurem ja selle maksimum asetseb anoodile lähemal. Kui anoodpinge on null (anood on vahetult ühendatud katoodiga), siis on negatiivse potentsiaaliga piirkonnaks kogu katoodi ja anoodi vaheline ruum ja selle maksimum asetseb anoodi vahetus läheduses. Järelikult lendavad sel juhul anoodile ainult need vähesed elektronid, millede algkiirused elektronvoltides seda väärtust

ületavad. Kõik väiksema algkiirusega elektronid pöörduvad katoodile tagasi.

Peale anoodpinge sõltub elektroodidevaheline potentsiaalide jaotus ka katoodi temperatuurist. Joonisel 37. 2 on kujutatud joonega *1* elektroodidevaheline potentsiaalide jaotus, kui katood ei emiteeri (küttevool on null). Joonega *2* on näidatud potentsiaalide jaotus katoodi niisuguse temperatuuri (küttevoolu tugevuse) puhul, mille juures $U_A = U_s$, ja joonega *3* — katoodi niisuguse temperatuuri puhul, kus $U_A < U_s$. See nähtus seletub sellega, et katoodist väljub kõrgema temperatuuri juures ajaühikus rohkem elektrone, ja kuna nende anoodile lendamise kiirused jäävad ühe ning sama anoodpinge puhul ühesuguseks, siis on ruumlaengut moodustavate elektronide tihedus ja nende poolt tekitatav negatiivne potentsiaal kõrgemad kui katoodi madalama temperatuuri puhul.

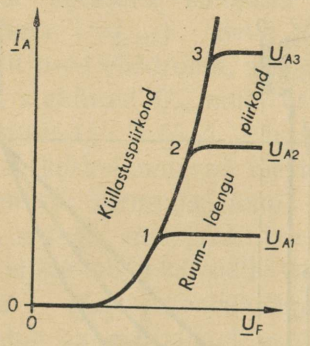


Joon. 37. 2. Potentsiaalide jaotus katoodi ja anoodi vahelises ruumis konstantse anoodpinge ja katoodi erineva kolme temperatuuri juures.

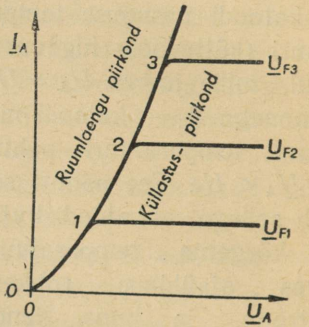
Katoodi kuitahes suure emissioonvoolu tugevuse (temperatuuri) puhul on katoodist väljuvate ning anoodile ja katoodile langevate elektronide hulgad ajaühikus võrdsed. Katoodi emissioonvoolu tugevnemisel (temperatuuri tõustes) suureneb ka ruumlaeng, mille mõjul ajaühikus langeb katoodile tagasi rohkem elektrone ja tekib uuesti tasakaal, kusjuures anoodvool jääb ligikaudu endiseks.

Ruumlaengu mõju paremaks selgitamiseks on joonistel

37. 3 ja 37. 4 toodud kahe elektroodiga elektrontoru tunnusjooned $I_A = f(U_F)$ ja $I_A = f(U_A)$, millede joonestamisel on arvesse võetud ainult temperatuuri mõjul esinevat elektronide emissiooni (§ 15) ja ruumlaengu mõju. Nagu § 39 näeme, erinevad tegelikud tunnusjooned neist mitmesuguste lisamõjude tõttu.



Joon. 37. 3. Kahe elektroodiga elektrontoru $I_A = f(U_F)$ mitmesuguse anoodpinge U_A juures. Kõverad on koostatud valemite 15. 2 ja 38. 1 abil.



Joon. 37. 4. Kahe elektroodiga elektrontoru anoodvoolu sõltuvus anoodpingest $I_A = f(U_A)$ katoodi mitmesuguse temperatuuri juures. Kõverad on koostatud valemite 15. 2 ja 38. 1 abil.

Joonisel 37. 3 toodud ülessuunatud kõvera kuju on arvutatav valemiga 15. 2 (vt. ka joon. 15. 1 ja 31. 1) ja kujutab anoodvoolu tugevuse sõltuvust küttepingest. Joonisel horisontaalsetena kulgevate U_A-kõverate lõikepunktid *1*, *2* ja *3* näitavad nendele punktidele vastavate küttepingete juures esinevaid küllastusvoolu tugevusi. Nende punktide kohta on vastavad anoodpinged küllastuspingeteks.

Joonisel 37. 4 toodud ülessuunatud kõvera kuju (tõus) on sõltuv ruumlaengu mõjust, mis omakorda sõltub elektroodide

kujust ja nende omavahelisest asetusest. Selle kõvera kuju (tõus) on määratav § 38 toodud alustel.

Joonistel 37. 1 ja 37. 2 on toodud potentsiaalide jaotused suurepinnaliste rööbiti asetsevate elektroodide kohta. Muukujuliste elektroodide puhul on potentsiaalide jaotuse kõveratel teistsugune kuju, nende juures esinevad nähtused on aga samasugused kui suurepinnalistel rööbiti asetsevail elektroodidel.

Katoodilt anoodile lendavate elektronide elektroodidevahelises ruumis viibimise aja kohta teatava ettekujutuse andmiseks olgu nimetatud, et elektrontorul 6X6 kestab see anoodpinge $U_A = 1$ V ja katoodi temperatuuri $T_K = 1130^0$ K puhul $1{,}65 \cdot 10^{-9}$ sekundit, nagu seda näitab vastav matemaatiline arvutus. Sellest ajast kulutab elektron 26,7% katoodist kuni ruumlaengu maksimaalse tihedusega kohani jõudmiseks (joonisel 37. 1 punkti s_m). Sealt edasi kuni anoodini liigub elektron anoodi positiivse potentsiaali poolt avaldatava tõmbejõu ja ruumlaengu negatiivse potentsiaali poolt avaldatava tõukejõu mõjul kiirendatult. Elektrontorul 6X6 on katoodi ja anoodi vahe 0,4 mm.

§ 38. Anoodvoolu sõltuvus anoodpingest. Voolu tugevus kahe elektroodiga elektrontoru anoodvooluringis sõltub anoodpinge ja ruumlaengu koosmõjust, milledest viimane omakorda sõltub teataval määral ka anoodpingest. Ruumlaengu olemasolu puhul ja siis, kui anoodvool on nõrgem küllastusvoolust, s. o. kui $U_s > U_A > 0$, annab matemaatiline analüüs anoodvoolu I_A ja anoodpinge U_A jaoks järgmise seose:

$$I_A = K U_A^{\frac{3}{2}} = K U_A \sqrt{U_A}. \qquad (38.1)$$

Selles valemis sõltub ruumlaengu-teguri K väärtus elektrontoru elektroodide geomeetrilistest mõõdetest. Ta on seda suurem, mida rohkem anoodpinge mõjutab ruumlaengut, s. o.

mida väiksem on katoodi ja anoodi vahekaugus ja mida vähem kontsentreeritult elektronid katoodist väljuvad.

Rööbiti asetsevate suurepinnaliste elektroodide puhul on

$$K = 2{,}33 \cdot 10^{-6} \frac{Q_A}{s_{KA}^2}, \qquad (38.2)$$

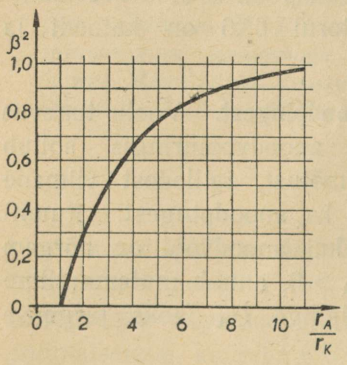
kus Q_A on elektroodi (katoodi või anoodi) pind [cm²] ja
s_{KA} — elektroodide vahekaugus [cm].

Silindrilise katoodi ja anoodi puhul on

$$K = 14{,}65 \cdot 10^{-6} \frac{l_K}{s_{KA}\beta^2}, \qquad (38.3)$$

kus l_K on katoodi emiteeriv pikkus [cm],
s_{KA} — katoodi ja anoodi vahekaugus [cm] ja
β — tegur, mille väärtus sõltub anoodi ja katoodi raadiuste suhtest. β^2 väärtus on antud joonisel 38.1.

Nagu jooniselt nähtub, on $\beta^2 \approx 1$, kui $\frac{r_A}{r_K} \geqslant 10$.



Joon. 38.1. Teguri β^2 sõltuvus anoodi ja katoodi raadiuste suhtest.

Valemi 38.1 abil arvutataksegi joonisel 37.4 ülespoole suunatud kõvera kuju. Seda valemit nimetatakse tema koostaja nime järgi Langmuir'i valemiks, sageli aga ka kolmkahendik-astme juhiseks.

Selle valemi järgi peaks anoodpinge tõstmisel anoodvool tugevnema mistahes väärtuseni, sest valemis on eeldatud ülitugeva emissioonvooluga katoodi. Tegelikult vastab aga katoodi igale temperatuurile kindla tugevusega küllastusvool, millest tugevamaks anoodvool ei saa muutuda. Joonisel 37.4

määravad numbritega *1*, *2* ja *3* märgitud kõverate lõikepunktid erinevatele küttepingetele vastavaid küllastusvoolude tugevusi. Küllastusvooludest nõrgemad voolud katavad üksteist mistahes anoodpinge väärtuse puhul.

§ 39. Tegelikkude tunnusjoonte erinevus teoreetilistest. Elektrontoru elektriliste mõõtmiste abil ülesvõetud $I_A = f(U_A)$ tunnusjoone kuju (joon. 39. 1) erineb tunduvalt joonisel 37. 4 toodud tunnusjoontest, mis olid koostatud valemite 38. 1 ja 15. 2 järgi. Eriti suured on lahkuminekud ruumlaengu-kõvera liitumise kohal küllastusvoolu-kõveraga (ruumlaengu-kõvera ülemises osas) ja anoodpinge nullväärtuse lähedal (ruumlaengu-kõvera alumises osas). Ka ruumlaengu-kõvera keskmises osas ei lange mõõtmisel saadud andmed täpselt kokku arvutamisel saadavate andmetega. Peale selle ei lange omavahel kokku erinevate küttepingete juures ülesvõetud tunnusjoonte ruumlaengu mõjupiirkonnas olevad osad.

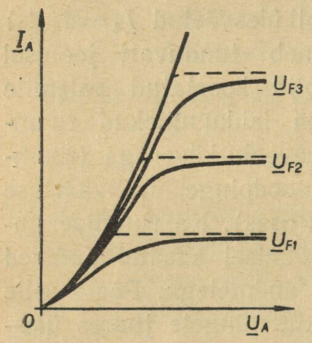
Võrreldes ülaltähendatud valemite abil arvutatud tunnusjooni praktilistel mõõtmistel saadud tunnusjoontega, leiame järgmised lahkuminekud: 1) mõõtmise teel mitmesuguse küttepinge juures ülesvõetud tunnusjooned väljuvad koordinaatide nullpunkti lähedalt kiirte vihuna, kuna arvutatud tunnusjooned väljuvad nullpunktist, langedes kokku üheks kõveraks; 2) mõõtmistel saadud tunnusjoonte tõus on väiksem valemi 38. 1 järgi arvutatud tunnusjoone tõusust; 3) mõõtmistel saadud tunnusjoone ruumlaengu-osa läheb üle tunnusjoone küllastusvoolu-osaks mitte murtud joonena, vaid sujuva kõverana; 4) mõõtmistel saadud tunnusjoone küllastusvoolule vastavas osas pole küllastusvool konstantne, vaid tugevneb pidevalt anoodpinge tõustes.

Nende kõrvalekaldumiste olulisemad põhjused on järgmised:

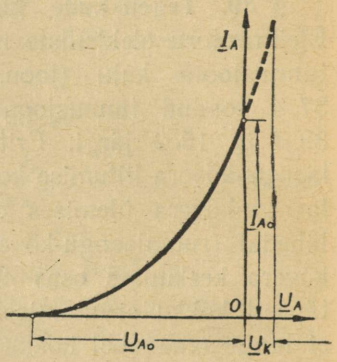
1. Katoodi pinnast väljunud elektronid omavad algkiirust.

2. Küttevoolu poolt tekitatud magnetväli mõjutab elektronide liikumist elektroodidevahelises ruumis.

3. Katoodi temperatuur kogu katoodi pikkusel pole ühtlane, mistõttu katoodi pinna kõigis punktides emissioonvoolu



Joon. 39. 1. Kahe elektroodiga elektrontoru mõõtmisel saadud $I_A = f(U_A)$ tunnusjooned. Kriipsjoontega on kujutatud joonisel 37. 4 toodud kõverad.



Joon. 39. 2. Elektrontoru anoodvoolu sõltuvus anoodpingest $I_A = f(U_A)$ negatiivse anoodpinge puhul. I_{A0} — anoodvool, kui anoodpinge on null. Anoodi ja katoodi vaheline kontaktpotentsiaal U_k vähendab anoodvoolu tugevust, sest kontaktpotentsiaali tõttu on anood katoodi suhtes U_k võrra negatiivne. U_{A0} — kontaktpotentsiaalile lisanduv negatiivne anoodpinge, mille puhul anoodvool I_A on null.

tugevused pole võrdsed. Seetõttu pole katoodi emiteeriv pind erinevate küttepingete puhul ühesuurune.

4. Küttevoolu poolt põhjustatud pingelangu tõttu pole anoodi ja katoodi kõigi punktide vaheline pinge võrdne. Ka mõjutab elektronide liikumist üksikute punktide potentsiaalide vahe tõttu elektroodidevahelises ruumis ilmnev elektriväli.

5. Anoodpinge kõrgus mõjutab katoodi emissioonvoolu tugevust.

Järgnevalt on neid põhjusi käsiteldud üksikasjalisemalt.

1. Katoodi pinnast väljuvate elektronide algkiiruse mõju. Jooniselt 37.1 oli näha, et $U_A = 0$ puhul langevad anoodile ainult need katoodi pinnast emiteerunud elektronid, millede algkiirused on küllaldased ruumlaengu poolt tekitatava vastumõju ületamiseks — moodustades anoodvoolu I_{A0} (joon. 39.2). See anoodvool (I_{A0}) on seda tugevam, mida suuremad on elektroodide pinnad ja mida lähemal nad teineteisele asetsevad. Peale selle sõltub nimetatud anoodvoolu tugevus veel katoodi temperatuurist, sest katoodi kõrgema temperatuuri puhul on katoodist väljunud elektronide algkiirused suuremad. Selle voolu nõrgendamiseks tuleb anoodile anda katoodi suhtes negatiivne pinge.

Joonisel 39.2 on toodud anoodvoolu I_A sõltuvus negatiivse anoodpinge kõrgusest. Selle kõvera kuju on võimalik määrata — lähtudes sellest, et katoodist väljunud elektronide kiiruste jaotus vastab Maxwelli lausele — järgmise valemiga:

$$I_A = I_{A0} e^{-\frac{U_A}{U_T}}, \qquad (39.1)$$

kus e on loomulikkude logaritmide alus = 2,718,

U_T — temperatuuripinge, mille väärtus on $8{,}6 \cdot 10^{-5}\ T_K$,

T_K — katoodi absoluutne temperatuur [°K].

Elektronide algkiirused on pärast katoodi pinnast väljumist väikesed, mistõttu anoodvoolu nõrgendamiseks nullini vajalik negatiivne anoodpinge ei ületa tavaliselt 1,5 ... 2 volti.

Tegelikult algab joonisel 39.2 toodud kõver paremal pool I_A-telge, kuna tavaliselt valmistatakse elektrontoru katood ja anood eri metallidest, mistõttu nende vahel esineb kontaktpotentsiaal [1]. Elektrontoru katoodi ja anoodi valmistami-

[1] V. A. Mihelson. Füüsika II. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. VI peatükk, § 6: Kontakt-potentsiaalid.

seks tavaliselt kasutatavate materjalide vahelise kontaktpotentsiaali mõjul tekkiva elektromotoorse jõu miinuseks on anood ja plussiks katood. Järelikult on juba kontaktpotentsiaali tõttu anoodi ja katoodi vahel väike elektriväli, mis pidurdab elektronide liikumist katoodilt anoodile, vähendades seega anoodvoolu nullväärtusele nõrgendamiseks vajaliku negatiivse anoodpinge U_{A0} väärtust. Kontaktpotentsiaali väärtus on väike. Näiteks oksüüdkatoodiga elektrontorudel on see umbes 0,45 V.

2. Küttevoolu poolt tekitatava magnetvälja mõju. Küttevoolu tõttu tekib kütteniidi ümber magnetväli, mis vahetult köetava katoodi kasutamisel võib tugeva küttevoolu ja madala anoodpinge puhul tunduvalt mõjutada elektronide liikumist katoodilt anoodile.

Katoodist risti eemalduva elektroni liikumistee kaldub katoodi ümbritseva magnetvälja mõjul katoodi positiivse otsa poole (§ 10). Küllalt suure magnetväljatiheduse (milleks küttevoolu tugevus peaks olema mõnikümmend amprit või rohkem) ja madala anoodpinge puhul kallutab magnetväli elektronid nende teelt niivõrd kõrvale, et nad üldse ei satu anoodile. Seepärast on niisuguste elektrontorude anoodvool madala anoodpinge U_A puhul null ja tekib alles teatava kriitilise anoodpinge väärtuse puhul. Silindriliste elektroodide puhul on selleks kriitiliseks anoodpingeks Kellog'i järgi:

$$U_{Akr} = 0{,}0188\, I_F^2 \left(\lg \frac{r_A}{r_K}\right)^2, \qquad (39.2)$$

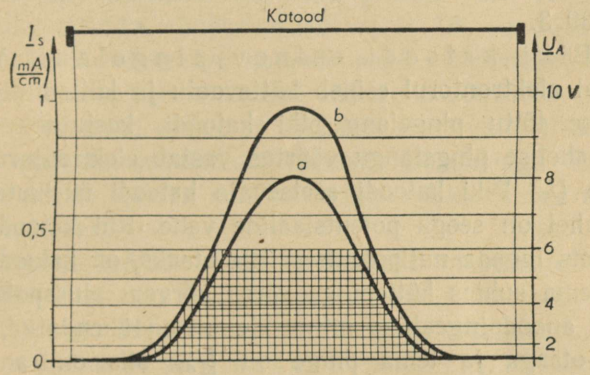
kus I_F on küttevoolu tugevus (A),

r_A — anoodi raadius ja

r_K — katoodi raadius.

Nõrga küttevooluga töötavais ja kaudselt köetavate katoodidega elektrontorudes pole magnetvälja mõju suur ja kompenseeritakse osaliselt katoodist väljuvate elektronide algkiiruse poolt.

3. Katoodi temperatuuri ebaühtlus. Katoodi otstel on tugitraatide soojusjuhtivuse tõttu temperatuur madalam kui keskel (joon. 30. 1 ja 30. 2). Küttepinge kõrgendamisel kuumenevad ka need katoodi osad, millede temperatuur madalama küttepinge puhul polnud emissioonvoolu tekitamiseks küllaldane. Sel teel suureneb katoodi emiteeriv pind, millega ongi seletatav nähtus, et ruumlaengu



Joon. 39. 3. Küllastusvoolu jaotus piki katoodi: *a* — katoodi pikkusühiku küllastusvoolu-kõver katoodi madalama temperatuuri puhul, *b* — seesama katoodi kõrgema temperatuuri puhul. Rõhtjoontega viirutatud pind näitab küllastusvoolu tugevust 6 V anoodpinge juures katoodi madalama temperatuuri, kogu viirutatud pind aga sedasama kõrgema temperatuuri puhul.

mõjupiirkonnas ei ühti ühe ning sama anoodpinge, kuid mitmesuguse küttepinge puhul mõõdetud anoodvoolu tugevused. Selle nähtuse tõttu moodustavadki mitmesuguste küttepinge väärtuste juures ülesvõetud elektrontoru tunnusjooned $I_A = f(U_A)$ koordinaatide teljestiku nullpunkti lähedalt algava kiirtevihu.

Katoodi ebaühtlane temperatuur on ka üheks põhjuseks, et elektrontoru tunnusjoone ruumlaengu mõjupiirkonnas

olev osa läheb üle küllastusvoolu mõjupiirkonnas olevale osale suhteliselt suure raadiusega.

Katoodi ebaühtlase temperatuuri tõttu on ka katoodi üksikute punktide küllastusvoolu tugevused erinevad. Katoodi jahedamais punktides saavutatakse küllastusvool madalama anoodpinge puhul, kuna neid ümbritseb väiksem ruumlaeng kui katoodi kõrgema temperatuuriga punkte.

Katoodi ebaühtlase temperatuuri mõju on nähtav ka jooniselt 39. 3.

4. Piki katoodi esinev pingelang. Vahetult köetaval elektrontorul esineb küttevoolu ja kütteniidi-katoodi takistuse tõttu pingelang piki katoodi, kusjuures katoodi otste vahelise pingelangu väärtus vastab elektrontoru küttepingele $\underline{U}_F$. Piki katoodi asetsevate katoodi üksikute punktide vahel on seega potentsiaalide vahe. Kui katoodi negatiivne ots lugeda nullpotentsiaaliga otsaks, on katoodi pluss-otsal tema suhtes küttepinge võrra kõrgem plusspotentsiaal.

Kui anoodpingeallika miinusklemm on ühendatud katoodi miinus-otsaga ja tema pinge on $\underline{U}_A$, siis on anoodi ja katoodi miinus-otsa vaheline pinge $\underline{U}_A$, katoodi pluss-otsa ja anoodi vaheline pinge on aga sellest küttepinge võrra madalam, nimelt $\underline{U}_A - \underline{U}_F$.

See asjaolu mõjutab eriti tunduvalt elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone alumise osa kuju, sest anoodpinge kõrgendamisel nullist alates ei võta anoodvoolu moodustamisest osa kogu katoodi pikkuselt väljunud elektronid, kuna anoodi potentsiaal on katoodi pluss-otsa suhtes negatiivne. Alles siis, kui $\underline{U}_A > \underline{U}_F$, võtavad anoodvoolu moodustamisest osa kogu katoodi pikkuselt väljuvad elektronid.

Samal põhjusel ei toimu ka elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone üleminek küllastusvoolu piirkonda kogu katoodi pikkuse ulatusel korraga. Kui katoodi negatiivse otsa ja anoodi vaheline pinge on tõusnud juba küllastuspingeni, on katoodi positiivse otsa ja anoodi vaheline pinge küllastus-

pingest veel tunduvalt madalam (nimelt $\underline{U}_s - \underline{U}_F$ võrra). Seega muudab kirjeldatud asjaolu tunnusjoone ülemineku ruumlaengu piirkonnast küllastusvoolu piirkonda lamedamaks.

5. Anoodpinge kõrguse mõju katoodi emissioonvoolu tugevusele ehk Schottky efekt. Mõõtmistel saadava elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone küllastusvoolu piirkonnas olev osa pole horisontaalne, vaid anoodpinge tõstmisel tugevneb pidevalt ka anoodvool. See Schottky efektiks nimetatud nähtus (§ 16) on seda tunduvam, mida koredam on katoodi pind. Oksüüdkatoodiga torudes on anoodpinge tõstmisel ilmnev anoodvoolu tugevnemine niivõrd suur, et see ei võimalda isegi katoodi küllastusvoolu tugevuse kindlaksmääramist. Baariumiga kaetud katoodidel on see nähtus väiksem, kõige väiksem aga on ta volframkatoodidel.

Ülalloetletud mõjude tõttu erinevadki mõõtmistel saadavad elektrontorude $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjooned tunduvalt valemiga 38. 1 arvutatud kõverast. Mõõtmistel saadavate tunnusjoonte alumine — alumiseks põlvikuks nimetatav — osa vastab rohkem valemile:

$$\underline{I}_A = K\underline{U}_A^2, \tag{39.3}$$

kus K on toru tüübi kohta kehtiv tegur.

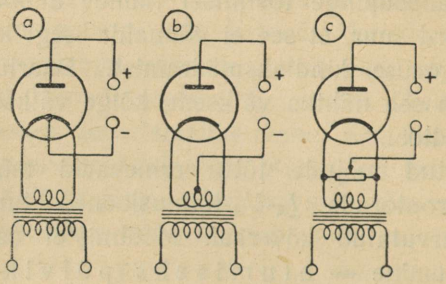
Tunnusjoone keskmist, kõige olulisemat osa loetakse sirgeks, nii et anoodvoolu tugevuse muutuse $\Delta\underline{I}_A$ jagatis vastava anoodpinge väärtuse muutusega $\Delta\underline{U}_A$ jääb konstantseks. Seda jagatist nimetatakse tunnusjoone tõusuks ja märgitakse tähega S. Seega

$$S = \frac{\Delta\underline{I}_A}{\Delta\underline{U}_A}. \tag{39.4}$$

Arvutamise lihtsustamiseks vaadeldakse mõnikord kogu tunnusjoont sirgena, mille kohta kehtib valem:

$$\underline{I}_A = S\underline{U}_A. \tag{39.5}$$

§ 40. Katoodi kuumutamine vahelduvvooluga. Katoodi kuumutamisel vahelduvvooluga muutub katoodi temperatuur vastavalt vahelduvvoolu tugevuse muutusele, olles minimaalne küttevoolu nullväärtuste hetkedel. Järelikult kõigub katoodi temperatuur küttevoolu sagedusest kaks korda suurema sagedusega mingi keskmise kõrguse ümber. See temperatuuri kõikumine on 0,05 ... 0,1 mm läbimõõduga katoodidel 50 Hz-lise vahelduvvooluga kütmisel 1 ... 1,5%. Üldiselt on temperatuuri kõikumine seda väiksem, mida suurema läbimõõduga ja mida suurema soojusmahutavusega on katood.



Joon. 40. 1. Anoodvooluallika ühendamine katoodi keskpunktiga (*a*) või elektrilise keskpunktiga (*b* ja *c*).

Katoodi temperatuuri kõikumise tõttu kõigub ka katoodi emissioonvoolu tugevus, mis omakorda põhjustab anoodvoolu tugevuse kõikumist. Olgu tähendatud, et temperatuuri kõikumise tõttu ilmnev anoodvoolu kõikumine pole elektrontoru tunnusjoone ruumlaengu piirkonnas kuigi suur.

Vahetult kõetavate katoodide puhul tekib suurem anoodvoolu kõikumine siis, kui anoodvooluallika miinusklemm ühendatakse katoodi ühe otsaga. Anoodvoolu kõikumist põhjustab katoodis esineva muutliku väärtusega pingelangu tõttu katoodi ja anoodi vahel tekkiv muutlik anoodpinge. Kui ühendada anoodvooluallikas näiteks katoodi ühe otsa ja anoodi vahele, kõigub katoodi teise otsa ja anoodi vaheline

pinge küttevoolu sagedusega piirides $\underline{U}_A - U_F$ kuni $\underline{U}_A + U_F$, kus U_F on kütteks kasutatava vahelduvpinge tippväärtus (amplituud).

Anoodvoolu tugevuse kõikumine on märksa väiksem, kui anoodvooluallika miinusklemm ühendatakse mitte katoodi ühe otsaga, vaid katoodi keskpunktiga (joon. 40. 1 *a*), kui aga viimane pole kättesaadav, siis katoodi elektrilise keskpunktiga (joon. 40. 1 *b* ja 40. 1 *c*). Niisugusel juhul on sel hetkel, mil katoodi ühe otsa ja anoodi vaheline pinge omab maksimaalväärtust, teise otsa ja anoodi vaheline pinge minimaalne. Seega jääb anoodvool peaaegu konstantseks.

Vahelduvvooluga kütmine ei põhjusta aga anoodvoolu kõikumist kaudselt kõetavaid katoode sisaldavais elektrontorudes, kuna niisuguste katoodide soojusmahutavus on küllaldaselt suur. Et nende kütteniit tavaliselt valmistatakse bifilaarselt mähituna, siis ei teki kütteniidi ümber ka magnetvälja.

§ 41. Elektrilised omadused. Kahe elektroodiga elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone abil saab määrata selle t õ u s u S, toru s i s e t a k i s t u s e R_i ja k ü l l a s t u s v o o l u $\underline{I}_s$.

Tunnusjoone k e s k m i n e t õ u s kuni küllastusvoolu piirini (joon. 41. 1) leitakse valemiga:

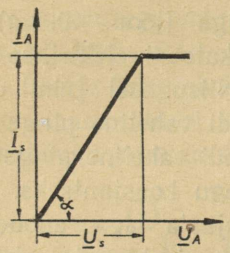
$$S_k = \frac{\underline{I}_s}{\underline{U}_s} = \operatorname{tg} \alpha'. \qquad (41.1)$$

Tõus tunnusjoone keskosa $\overline{AB}$ kohta on määratav nii, nagu see on näidatud joonisel 41. 2, kust

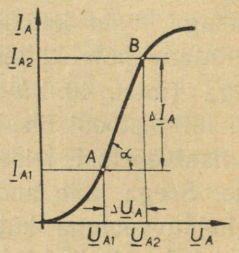
$$S = \frac{\underline{I}_{A2} - \underline{I}_{A1}}{\underline{U}_{A2} - \underline{U}_{A1}} = \frac{\Delta \underline{I}_A}{\Delta \underline{U}_A} = \operatorname{tg} \alpha. \qquad (41.2)$$

Tavaliselt antakse elektrontoru tõus tunnusjoone keskmise sirgjoonelise osa kohta milliamprites voldile. Nagu valemeist nähtub, vastab tunnusjoone tõus elektrontoru

elektrilisele juhtivusele ja seda peaks väljendatama siimensites [S]. Mõnikord väljendatakse tõusu ka mikrosiimensites, kusjuures 1 mA/V = 1 millisiimens [mS] = 1000 mikrosiimensit [μS].



Joon. 41. 1. I_A-U_A-tunnusjoone keskmise tõusu S_k määramine.



Joon. 41. 2. I_A-U_A-tunnusjoone keskosa AB tõusu S määramine.

Kui elektrontoru anoodvool muutub ΔI_A võrra, anoodpinge muutudes ΔU_A võrra, siis leiame elektrontoru *sisetakistuse* väärtuse järgmiselt:

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} = \frac{1}{S} = \operatorname{ctg} \alpha, \qquad (41.3)$$

kus ΔU_A on anoodpinge muutus voltides ja
ΔI_A — anoodvoolu muutus amprites.

Leitud sisetakistus kehtib muidugi ainult tunnusjoone selle osa kohta, mille kohta kehtivad vastavad voolu ja pinge muutused. Tavaliselt antakse see tunnusjoone sirgosa kohta. Tunnusjoone alguses, kus tõus on väiksem, on sisetakistus muidugi suurem.

Eeldades, et tunnusjoone kuju vastab valemile 38. 1, ja tähistades tema kõige suurema tõusuga punkti kohta kehtivat sisetakistust tähisega R_i ning tunnusjoone keskmisele

tõusule vastavat sisetakistust tähisega R_{ik}, saab matemaatiliselt tõestada, et

$$R_i = \frac{3}{2} R_{ik}. \tag{41.4}$$

Samuti võib tõestada, et

$$S = \frac{3}{2} S_k. \tag{41.5}$$

Näide 41.1. Määrata elektrontoru BO-188 tõus ja sisetakistus joonisel 41.3 antud I_A-U_A-tunnujoone abil.

Lahendus. Tõus keskmise osa kohta

$$S = \frac{I_{A2} - I_{A1}}{U_{A2} - U_{A1}} = \frac{550 - 300}{60 - 40} = 12{,}5 \frac{\text{mA}}{\text{V}}$$

ja sisetakistus

$$R_i = \frac{1}{S} = \frac{1}{12{,}5 \cdot 10^{-3}} = 80\ \Omega.$$

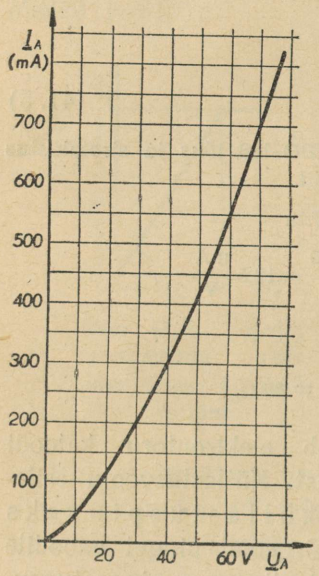
Küllastusvoolu I_s tugevus sõltub elektrontoru katoodi materjalist, temperatuurist ja pinnast. Küllastusvoolu esilekutsuvat anoodpinget nimetatakse küllastuspingeks U_s (joon. 41.1). Küllastuspingest kõrgemat pinget anoodile praktikas tavaliselt ei rakendata, sest niisugune pinge tugevdaks anoodvoolu vähe (tõus on sel puhul väike), elektrontoru kasutegur toru töötades oleks aga väiksem.

Elektrontoru anoodi ja katoodi vahelise pinge U_A ja toru läbiva voolu I_A korrutis annab selle võimsuse, mis muundub elektrontorus soojuseks ja mida nimetatakse anoodkao võimsuseks ehk lihtsalt anoodkaoks P_A. Järelikult

$$P_A = I_A U_A. \tag{41.6}$$

Kuigi elektrontorus esinev anoodkadu on samuti pinge ja voolu korrutis kui juhtmeski soojuseks muunduv võimsus, mis on juhtme otste vahelise pinge ja juhtmes kulgeva voolu korrutis, on elektrontorus esineva elektrilise võimsuse soojuseks muundumise viis teistsugune. Nimelt muundub

elektrontorus anoodkao võimsus soojuseks ainult toru anoodil, mitte aga kogu anoodvooluringis, vastupidi juhtmele, kus soojus tekib kogu juhtme pikkusel.



Joon. 41. 3. Elektrontoru BO-188 I_A-U_A-tunnusjoon. Toru tehnilised andmed on: $U_{efF} = 4$ V, $I_{efF} = 2{,}2$ A, anoodil lubatav maksimaalne vahelduvpinge $U_A = 500$ V, alaldatud voolu maksimaalne tugevus $I_A = 150$ mA.

See olgu selgitatud alljärgnevas. Katoodist väljunud elektronid, lennates anoodpinge poolt tekitatava elektrivälja mõjul kiirendatult anoodi poole, omandavad seetõttu kineetilist liikumis-energiat. See elektronide kineetiline energia muundub soojus-energiaks siis, kui elektronid põrkavad vastu anoodi pinda. Suure kiirusega anoodi pinnale langevad elektronid annavad oma kineetilise energia anoodimaterjali molekulidele üle, mistõttu viimaste liikumiskiirus suureneb. See avaldubki anoodimaterjali temperatuuri tõusus. Tekkinud soojus peab anoodilt lahkuma soojuskiirguse teel. Läbipaistva klaaskestaga elektrontorudest lahkub see soojus anoodi soojuskiirguse teel toru ümbritsevasse ruumi. Metallist või muu läbipaistmatu kestaga elektrontorudes kulgeb see soojus kiirguse teel esmalt kesta seintele, kust ta siis siirdub elektrontoru ümbritsevasse ruumi osalt kiirguse, osalt soojuse konvektsiooni teel.

Kahe elektroodiga elektrontoru anoodi ja katoodi vahelist pinget, mille puhul anood on katoodi suhtes negatiivne, nimetatakse v a s t u p i n g e k s. Sellise pingesuuna puhul elektrontoru voolu läbi ei lase, vaid esineb lõpmata suurt

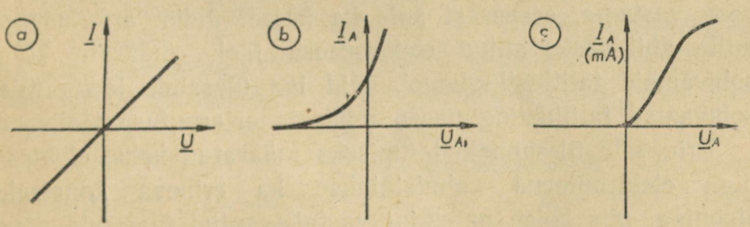
takistust omava takistina. Vastupinge maksimaalselt lubatava väärtuse ehk nn. maksimaalse vastupinge määrab elektrontoru elektroodidevahelise isolatsiooni headus ja ka vaakumi suurus elektrontorus.

Elektrontoru kohta antakse tema tehnilises andmestikus tüübi kohta kehtiv nimi-küttepinge U_F või nimi-küttevool I_F (vahelduvvoolkütte puhul U_{efF} või I_{efF}) ja vastavalt ühest või teisest lubatava kõrvalekaldumise piirväärtus. Töötades nimiväärtusest kõrgema pingega või tugevama vooluga, lüheneks elektrontoru iga, väiksemate väärtuste puhul aga ei saaks toru maksimaalselt ära kasutatud ja tema kasutegur halveneks. Teatavate katoodi tüüpide puhul (§ 28) võib viimane olukord lühendada ka toru iga.

VIII peatükk.

Kahe elektroodiga elektrontoru kasutamine.

§ 42. Üldpõhimõtted. Kahe elektroodiga elektrontoru on ebalineaarne voolujuht: ta juhib voolu ainult ühes suunas ja selleski suunas pole vool lineaarses sõltuvuses pingest. Ebalineaarsusest annab piltliku kujutuse joonis 42. 1.



Joon. 42. 1, ebalineaarsuse selgitamiseks: *a* — takistustraadi I-U-tunnusjoon, *b* — kahe elektroodiga elektrontoru I_A-U_A-tunnusjoone alumine osa, *c* — sama elektrontoru I_A-U_A-tunnusjoon kuni küllastusvoolu ilmnemiseni (I_A-telje mastaap on 1000 korda ja U_A-telje mastaap 10 korda suurem kui kõveral *b*).

Joonisel 42. 1 *a* on toodud takistustraadi $\underline{I}$-$\underline{U}$-tunnusjoon, joonisel 42. 1 *b* — kahe elektroodiga elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone alumine osa ja joonisel 42. 1 *c* — sama elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoon kuni küllastusvoolu ilmnemiseni (teises mõõtvahekorras: $\underline{I}_A$-telje mastaap on 1000 korda ja $\underline{U}_A$-telje mastaap 10 korda suurem).

Kahe elektroodiga elektrontoru omadust — juhtida voolu ebalineaarselt — kasutatakse praktikas väga mitmesuguste elektriseadmete ehitamisel. Olgu näiteks loeteldud mõningad ülesanded, mille täitmiseks kasutatakse kahe elektroodiga elektrontorusid.

1. Vahelduvvooluvõrgust saadava vahelduvvoolu muundamine alalisvooluks ehk vahelduvvoolu alaldamine.

2. Amplituudis moduleeritud suursagedusvoolust tema moduleerimiseks kasutatud vahelduvvoolu eraldamine ehk demoduleerimine.

3. Suursagedusliku või helisagedusliku vahelduvvoolu muundamine alalisvooluks, et saadud alalisvoolu väärtuste mõõtmise kaudu määrata alaldatava pinge või voolu väärtust.

4. Suursagedusvoolu muundamine alalisvooluks, et kasutada seda alalisvoolu reguleerimise otstarbel.

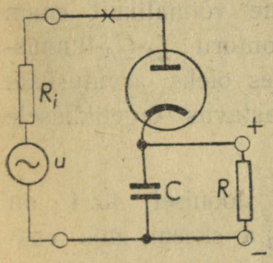
Iga ülesanne esitab eri nõudeid, milledele elektrontoru peab vastama, seepärast pole ka ühtset üldist arvutusviisi, mille abil saaks antud elektrontoru jaoks määrata kõige sobivamaid talitlustingimusi, vaid iga ülesande jaoks tuleb sobivamad talitlustingimused määrata eriarvutuse teel.

Erinevate ülesannete täitmiseks määratud kahe elektroodiga elektrontorud valmistatakse ka erineva konstruktsiooniga, mis kõige paremini vastaks antud ülesande nõuetele. Konstruktsiooni poolest jagunevad kahe elektroodiga elektrontorud järgmiselt:

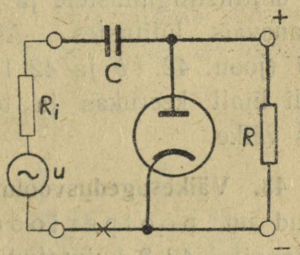
1. Väikesageduslikku (tehnilist) vahelduvvoolu alalisvooluks muundavad suundus-elektrontorud.

2. Moduleerimata või amplituudis moduleeritud suursagedusvoolu ühesuunaliseks vooluks muundavad suundus-elektrontorud.

3. Mõõdetavat vahelduvvoolu alalisvooluks muundavad suundus-elektrontorud.



Joon. 42. 2. Elektrontoru ja kooremtakisti järjestiklülituses. Kondensaatori *C* ja kooremtakisti *R* võib ühendada ka ristiga märgitud kohta. Joonisel tähendavad: *u* — alaldatava vahelduvvoolu allika (näit. transformaatori sekundaarmähise) klemmipinge, R_i — sama vooluallika sisetakistus, *C* — alaldaja väljeklemmidega rööbiti ühendatud kondensaator, *R* — kooremtakisti.



Joon. 42. 3. Elektrontoru ja kooremtakisti rööbiklülituses. Kondensaatori võib ühendada ka ristiga märgitud kohta (võrdle joon. 42. 2-ga).

On võimalik üheks otstarbeks valmistatud elektrontorusid kasutada ka teiseks otstarbeks, kuid arusaadavalt väiksema kasuteguriga või halvemate tagajärgedega. Tavaliselt kahe viimasena nimetatud elektrontoru tüübi vahel vahet ei tehta.

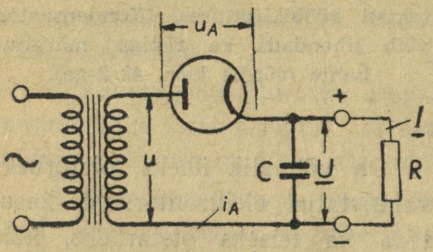
Kahe elektroodiga elektrontoru ühendamiseks vahelduvvooluringi on olemas kaks põhilist lülitust:

1. Elektrontoru ja kooremtakisti on ühendatud järjestikku (joon. 42. 2).

2. Elektrontoru ja kooremtakisti on ühendatud rööbiti (joon 42. 3).

Elektrontorude talitlustingimuste määramiseks teostatavate arvutuste juures osutuvad vajalikuks mitmesugused torude juures teostatud mõõtmiste teel saadavad kõverad. Arvutuste lihtsustamiseks ja tegelikkusele rohkem vastavate tulemuste saamiseks teostatakse need mõõtmised tegelikkudele talitlustingimustele ja -olukordadele võimalikult enam sarnanevais lülitustes. Ainult elektrontoru I_A-U_A-tunnusjooni (joon. 42. 1 *b* ja 42. 1 *c*) kasutades oleks arvutuskäik sageli liialt keerukas ja tulemuste vastavus tegelikkusele oleks väike.

§ 43. Väikesagedusvoolu alaldajad. Joonisel 43. 1 on toodud nn. p o o l p e r i o o d - a l a l d a j a skeem, mis vastab joonisel 42. 2 kujutatud lülitusele.



Joon. 43. 1. Poolperiood-alaldaja skeem: u — trafo sekundaarmähise otste vahelise vahelduvpinge hetkväärtus, u_A — elektrontoru elektroodide vahelise pinge hetkväärtus, U — alaldaja väljeklemmide vaheline alalispinge, I — alalisvool kooremtakistis R, i_A — elektrontoru läbiva voolu hetkväärtus.

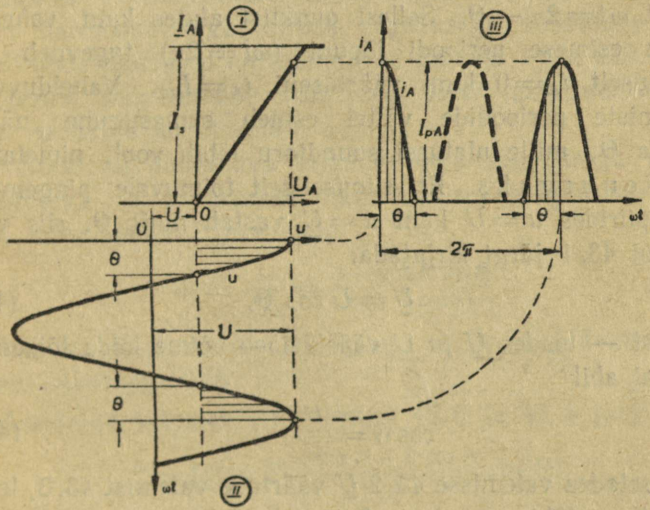
Poolperiood-aladaja töötamisviisi selgitamiseks seatakse kolm teljestikku nii, nagu see on näidatud joonisel 43. 2.

Esimesse teljestikku on kantud murtud sirgena elektrontoru staatiline I_A - U_A-tunnusjoon (joon. 41. 1). Teise teljestiku ühele teljele on kantud transformaatori sekundaarmähise klemmidevahelise vahelduvpinge hetkväärtused u (eelmise teljestiku pinge-teljega ühesuguses mõõtvahekorras) ja teisele teljele sama vahelduvvoolu ringsageduse ja aja korrutis ωt. Selle teljestiku nullpunkt on esimese teljestiku nullpunkti suhtes nihutatud alaldaja väljeklemmide-vahelise

alalispinge $\underline{U}$ võrra esimese teljestiku $-\underline{U}_A$-telje suunas. Kolmas teljestik, mille telgedele on kantud $\underline{I}_A$ ja ωt samas mõõtvahekorras kui eelmistelegi, on asetatud esimese teljestiku kõrvale.

Teise teljestikku kantud transformaatori sekundaarmähise klemmidevahelise vahelduvpinge lähtehetkeks on võetud hetk, millal $u = U$. Eeldatakse, et see pinge on siinuseline. Seega tema hetkväärtus

$$u = U \cos \omega t. \tag{43.1}$$



Joon. 43.2. Joonisel 43.1 kujutatud alaldajas toimuvate nähtuste selgitamine. I_s — elektrontoru küllastusvool, $\underline{U}$ — alaldaja väljeklemmide vaheline alalispinge, u — transformaatori sekundaarmähise otste vaheline vahelduvpinge, i_A — elektrontoru läbiv ühesuunaline vool.

Kui võtta arvesse vooluringis järjestikku olevat transformaatori sekundaarmähise klemmidevahelist pinget u ja alaldaja väljeklemmide-vahelist alalispinget $\underline{U}$ ning suundtoru tõusu S, on suundtoru läbiva voolu hetkväärtused

$$i_A = S(U \cos \omega t - \underline{U}). \tag{43.2}$$

Sellest nähtub, et suundtoru vooluringis ilmneb vool ainult siis, kui

$$U \cos \omega t > \underline{U}.$$

Jälgides joonisel 43. 2 i_A muutumist sõltuvalt pingest u, võib näha, et vool nõrgeneb väärtuselt I_{pA} nullväärtusele, kui pinge muutub väärtuselt $u = U$ väärtuseni $u = \underline{U}$, millistele väärtustele vastavad ωt-teljel punktid $\omega t = 0$ ja $\omega t = \Theta$. Edasine pingemuutus voolu esile ei kutsu, seni kui pinge teistkordselt jõuab väärtuseni $u = \underline{U}$, millele ωt-teljel vastab punkt $\omega t = 2\pi - \Theta$. Sellest punktist alates kuni vahelduvvoolu esimese perioodi lõpuni ($\omega t = 2\pi$) tugevneb vool väärtuselt $i_A = 0$ kuni väärtuseni $i_A = I_{pA}$. Vahelduvvoolu järgmiste perioodide vältel esineb samasugune nähtus. Nurka Θ, mille ulatusel suundtoru läbib vool, nimetatakse lõikenurgaks. Et siinuseliselt toimuvale pingemuutusele piirides $u = U$ kuni $u = \underline{U}$ vastab nurk Θ, siis võime valemi 43. 1 järgi kirjutada:

$$\underline{U} = U \cos \Theta, \qquad (43.3)$$

millest — teades $\underline{U}$ ja U väärtusi — võime leida lõikenurga valemi abil

$$\cos \Theta = \frac{\underline{U}}{U}. \qquad (43.4)$$

Asetades valemisse 43. 2 $\underline{U}$ väärtuse valemist 43. 3, leiame suundtoru läbiva voolu maksimaalväärtuse

$$I_{pA} = SU(1 - \cos \Theta). \qquad (43.5)$$

Nagu näha jooniselt 43. 2, läbib suundtoru ühe perioodi vältel vool, mis on kahe (joonisel viirutatud) pinna summa ja mille jagades perioodi vältusele saame toru läbiva ühesuunalise pulseerivvoolu keskväärtuse ehk alaldatud voolu tugevuse.

$$I_{pk} = \underline{I} = SU \cdot \frac{\sin \Theta - \Theta \cos \Theta}{\pi}. \qquad (43.6)$$

Ühesuunalise pulseerivvoolu keskväärtuse ehk alaldatud voolu tugevuse suhe voolu pulsi maksimaalväärtusega, mida märgitakse tähega a_0, on valemite 43.6 ja 43.5 järgi:

$$a_0 = \frac{I}{I_{pA}} = \frac{\sin\Theta - \Theta\cos\Theta}{\pi(1-\cos\Theta)}. \qquad (43.7)$$

Joonisel 43.2 kolmandas teljestikus toodud sinusoidi lõikude kujulist voolu võidakse vaadelda koosnevana alalisvoolu komponendist ja sinusoidi-kujulistest vahelduvvooludest, millede sagedused on 1-, 2-, 3- jne. kordsed, võrreldes alaldatava vahelduvvoolu sagedusega. Nende, alaldatava voolu harmoonilistega võrdse sagedusega vahelduvvoolude amplituudi väärtused on tuletatavad Fourier'[1] rea abil. Jagades nende amplituudide väärtused pulsi maksimaalväärtusega, saadakse koefitsiendid a_1, a_2, a_3 ...

Näiteks on alaldatava vahelduvvoolu sagedusega võrdse sagedusega (s. o. esimese harmoonilise) amplituudi I_1 ja pulsi maksimaalväärtuse suhe

$$a_1 = \frac{I_1}{I_{pA}} = \frac{\Theta - \cos\Theta\sin\Theta}{\pi(1-\cos\Theta)}. \qquad (43.8)$$

Joonisel 43.3 on toodud a_0, a_1, a_2 ja a_3 väärtused sõltuvalt lõikenurgast Θ.

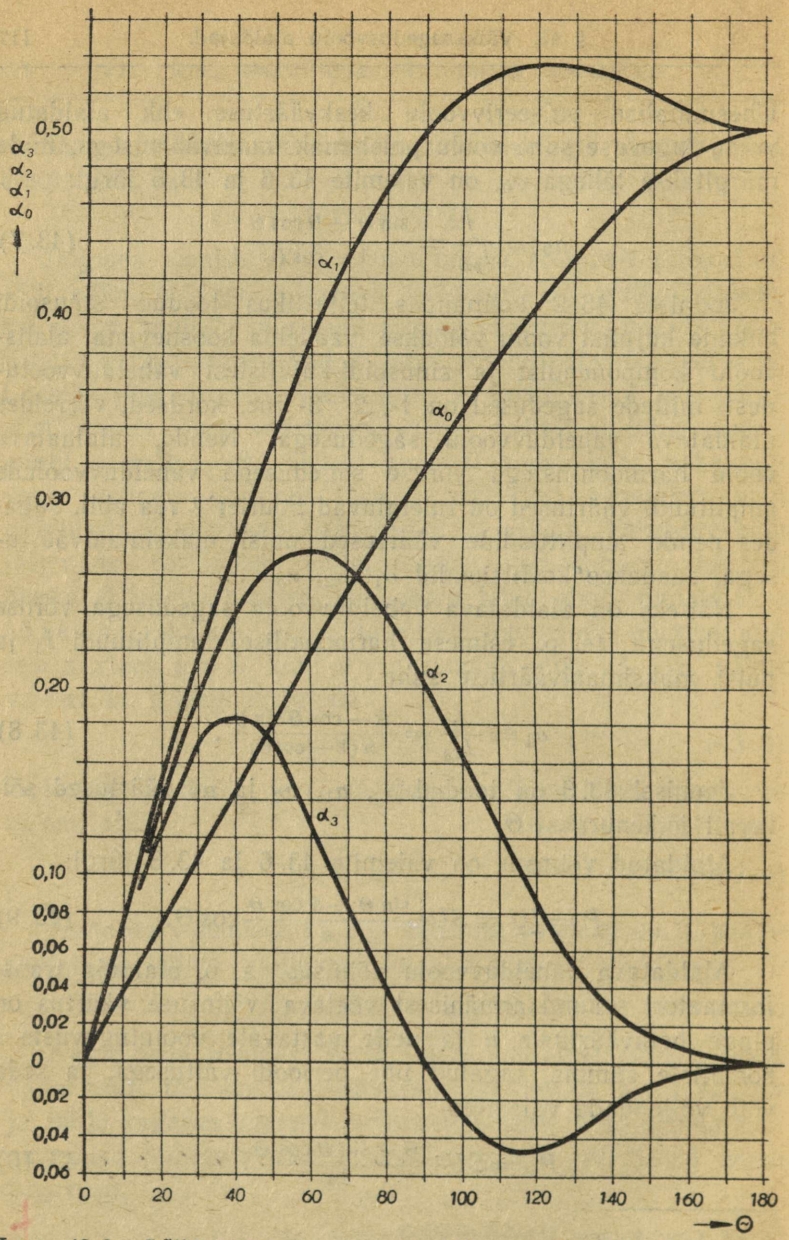
Alaldatud võimsus on valemite 43.6 ja 43.3 järgi:

$$P = IU = SU^2\frac{\sin\Theta - \Theta\cos\Theta}{\pi}\cos\Theta. \qquad (43.9)$$

Alaldatava vahelduvvoolu võimsus, s. o. alaldaja transformaatori sekundaarmähisest võetava võimsuse väärtus on pinge hetkväärtuste u ja neile vastavate voolutugevuste i korrutiste summa, jagatud ühe perioodi vältusega, ja seda võib väljendada valemiga

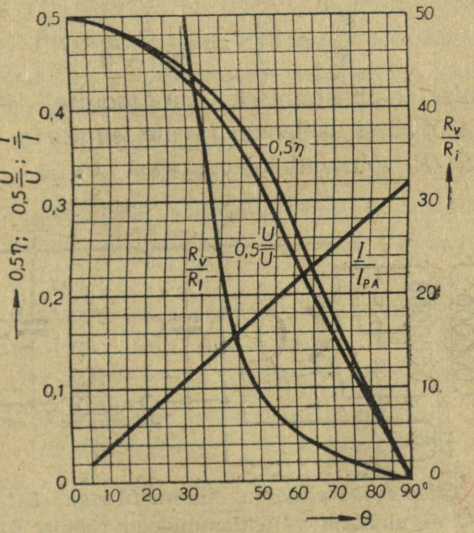
$$P_{ef} = SU^2\frac{\Theta - \sin\Theta\cos\Theta}{2\pi}. \qquad (43.10)$$

[1] Loe: furjee.



Joon. 43. 3. Lõikenurga Θ suurusest sõltuvad elektrilised suurused ühesuunalise juhtivusega seadises.

a) sinusoidi lõikude kujulistest pulssidest koosneva voolu suhtelist koostist näitavad kõverad: α_0 — ühesuunalise pulseerivvoolu keskväärtuse suhe voolu pulsi maksimaalväärtusega (I/I_{pA}), α_1 — esimese harmoonilise amplituudide suhe pulsi maksimaalväärtusega (I_1/I_{pA}), α_2 — teise harmoonilise amplituudide suhe ja α_3 — kolmanda harmoonilise amplituudide suhe pulsi maksimaalväärtusega (I_2/I_{pA} ja I_3/I_{pA});



b) suundtoru töötamist iseloomustavate suuruste suhted I/I_{pA} (α_0), U/U, η ja R_v/R_i sõltuvalt lõikenurgast Θ.

Siit on kasutegur

$$\eta = \frac{P}{\underline{P}} = 2\,\frac{\sin\Theta - \Theta\cos\Theta}{\Theta - \sin\Theta\cos\Theta}\cos\Theta. \qquad (43.11)$$

Teades kasuteguri väärtust on võimalik määrata suundtoru anoodkadu valemi abil:

$$\underline{P}_A = P - \underline{P}\left(\frac{1}{\eta} - 1\right) = \underline{P}\left(\frac{1-\eta}{\eta}\right). \qquad (43.12)$$

Nagu ülaltoodust näha, on võimalik kõik suundtoru töötamist iseloomustavad suurused väljendada lõikenurga Θ kaudu.

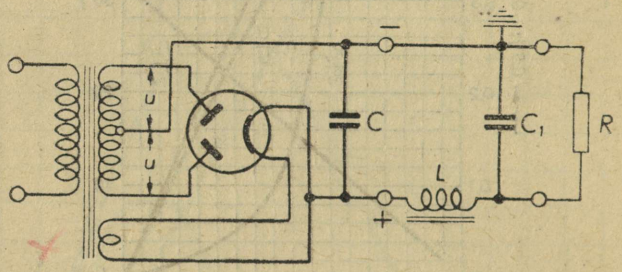
Lõikenurga asemel võib suundtoru töötamist iseloomustavad suurused leida R_v/R_i suhte kaudu (kus R_v on välisvooluringi takistus), sest

$$R_v = \frac{U}{I} \qquad (43.13)$$

ja valemite 43. 3 ning 43. 6 järgi:

$$\frac{R_v}{R_i} = \frac{SU}{I} = \frac{\pi}{\operatorname{tg}\Theta - \Theta}. \qquad (43.14)$$

Arvutamise hõlbustamiseks on joonisel 43. 3 *b* toodud suundtoru töötamist iseloomustavate suuruste suhted I/I_{pA}, U/U, η ja R_v/R_i sõltuvalt lõikenurgast Θ.



Joon. 43. 4. Täisperiood-alaldaja silumisfiltriga LC_1 ja koorem-takistiga *R*. *C* — alaldaja väljeklemmidega rööbiti ühendatud kondensaator, *u* — transformaatori sekundaarmähise otste vaheline vahelduvpinge.

Täisperiood-alaldaja lülituses sisalduvat kahe anoodiga suundtoru (joon. 43. 4) läbib ühe perioodi vältel kaks korda tugevam vool (joonisel 43. 2 ka kriipsjoontega piiratud pind). Järelikult on täsiperiood-aladaja puhul vool I kaks korda tugevam. Samuti on kaks korda suurem ka alaldatud võimsus P ja transformaatori sekundaarmähisest võetav võimsus P_{ef}. Muud suurused jäävad endisteks.

Kui on antud alaldajast saada soovitav alaldatud pinge U ja alaldatud vool I, siis tuleb suundtoru valikul kasutada

järgmisi andmeid: toru tunnusjoone tõus S (või sisetakistus R_i), küllastusvool I_s, maksimaalne anoodkadu P_A ja maksimaalne vastupinge $U_{v\,max}$. Suundtoru talitlustingimuste valikul jälgitakse, et arvutatav vahelduvvoolu maksimaalväärtus I oleks väiksem küllastusvoolu I_s väärtusest. Kui suundtoru küllastuspinge U_s on madalam kui U, siis pinge tõus piirides U_s kuni U ei suurenda enam tunduvalt toru läbiva voolu tugevust, vaid toru elektroodidevaheline pinge tõuseks järsku ning põhjustaks anoodkao suurenemist ja seega ka kasuteguri vähenemist.

Joonisel 43. 3 toodud kõveraid jälgides võib näha, et lõikenurga Θ suurenedes suureneb ka suhe I/I_{pA}, mistõttu näib, et võiks valida väiksema küllastusvooluga suundtoru. Lõikenurga suurenedes väheneb aga kasutegur ja suureneb anoodkadu P_A.

Suundtoru anoodi ja katoodi vaheline pinge võib alaldaja jõudeseisundis (koormata olles) tõusta kuni kahekordse U väärtuseni, mis peab olema väiksem suundtoru kohta lubatavast maksimaalse vastupinge väärtusest.

Alaldaja transformaatori sekundaarpinge määramiseks tuleb arvesse võtta ka vooluringis esinevaid pingelangusid.

Pingelang tekib ka transformaatori mähistes, viimaste oomilise takistuse tõttu. Seda pingelangu põhjustavad transformaatori sekundaarmähise takistus R_2 ja primaarmähise takistus R_1.

Transformaatori ülekandesuhe on ligikaudu

$$\ddot{u} = \frac{w_1}{w_2} = \sqrt{\frac{L_1}{L_2}}, \qquad (43.\,15)$$

kus L_1 ja L_2 on primaar- ja sekundaarmähise induktiivsus, w_1 ja w_2 — vastavate mähiste keerdude arvud.

Seega on sekundaarpoolele taandatud transformaatori kogutakistus

$$R_T' = R_2 + \frac{R_1}{\ddot{u}^2} \qquad (43.\,16)$$

ja selle poolt põhjustatav pingelang voolu tippväärtuse puhul

$$\Delta U_T = IR_T'. \qquad (43.17)$$

Selle pingelangu võrra on tipp-pinge transformaatori sekundaarmähises alaldaja koormamisel madalam kui jõudeseisundis, kui jätta tähele panemata transformaatori puisteinduktiivsus, mis pingelangu veelgi pisut suurendab.

Teiseks pingelangu tekitajaks, mida alaldaja vooluringis tuleb arvestada, on alaldaja väljeklemmidega rööbiti ühendatud kondensaatori mahtuvuslik takistus. Kondensaatorit läbib teatav osa alaldaja vooluringis kulgevast vahelduvvoolust. Nõutav on, et kondensaator laseks vahelduvvoolu läbi võimalikult täies väärtuses. Kondensaatori takistus on $1/\omega C$ ja temas tekkiv pingelang $U_C = I/\omega C$.

Näiteks on 8 μF mahtuvusega kondensaatori takistus 50 Hz sageduse puhul

$$\frac{1}{\omega C} = \frac{1}{2\pi f C} = \frac{1}{2\pi\, 50 \cdot 8 \cdot 10^{-6}} = 400\ \Omega,$$

mis näit. 430 mA voolupulsi puhul põhjustaks kondensaatori klemmidel pinge $U_C = 0{,}43 \cdot 400 = 172$ V. Ühe-mikrofaradilise mahtuvusega kondensaatori takistus oleks

$$\frac{1}{\omega C} = 3200\ \Omega,$$

mis juba 30-milliamprilise voolu puhul põhjustaks kondensaatori klemmidel pinget

$$U_C = I\frac{1}{\omega C} = 0{,}03 \cdot 3200 = 96\ \text{V}.$$

Kondensaatori klemmidel tekkiv pinge põhjustab ka kooremtakisti klemmidel pinge lainesust.

Pinge U_C mõjub transformaatori sekundaarpingele vastusuunaliselt, mitte aga täies väärtuses, sest ta pole vooluga faasis. Ka ei läbi kondensaatorit kogu vool, vaid osa sellest kulgeb läbi kondensaatoriga rööbiti oleva koorma.

Puistega transformaatori puhul vähendab mahtuvuslik pingelang U_C transformaatori mähise induktiivsuse tõttu tekkivat pingelangu, kuna transformaatori sekundaarmähis ja kondensaator moodustavad vooluringi, milles induktiivne ja mahtuvuslik takistus mõjuvad teineteisele vastu. Seejuures on väikese puistega transformaatori ja suure mahtuvusega kondensaatori puhul vooluringi üldine takistus induktiivse iseloomuga, suure puistega transformaatori ja väikese mahtuvusega kondensaatori puhul aga mahtuvusliku iseloomuga.

Kondensaatori puudumisel on vool takistis R_v pulseeriv ja voolu pulsid peaaegu siinuselised (joon. 43.2). Vool läbib takistit ainult nurga 2Θ ulatusel, muul ajal aga puudub alaldaja väljeklemmide vahel pinge. Aga ka kondensaatori puhul pole alaldaja väljeklemmide-vaheline pinge püsiv, vaid omab teatavat lainesust.

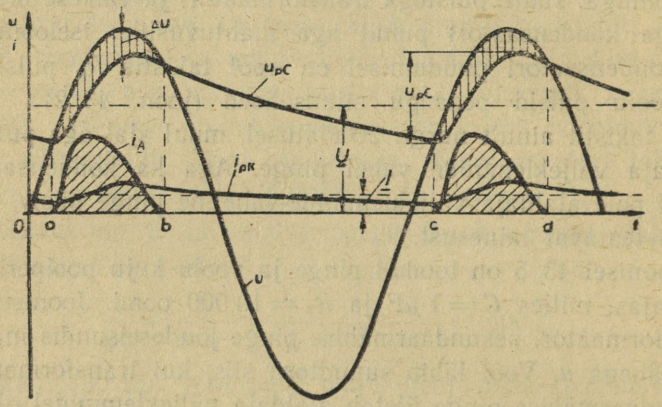
Joonisel 43.5 on toodud pinge ja voolu kuju poolperiood-alaldajas, milles $C = 1\ \mu F$ ja $R_v = 19\,000$ oomi. Joonisel on transformaatori sekundaarmähise pinge jõudeseisundis märgitud tähega u. Vool läbib suundtoru siis, kui transformaatori sekundaarmähise pinge ületab alaldaja väljeklemmidel olevat pinget U_C, s. o. ajavahemikel $a - b$ ja $c - d$. Samal ajal tekib voolu mõjul transformaatori mähises ja suundtorus pingelang, mille hetkväärtused on tähistatud Δu. Alaldaja väljeklemmidega rööpselt ühendatud kondensaatori klemmide-vahelise pinge hetkväärtus on märgitud tähisega u_{pC} ja kooremtakistit läbiv vool tähisega I_{pR}. Alaldaja väljeklemmide-vahelise pinge lainesuspinge hetkväärtust tähistab u_{lC}.

Nagu nähtub jooniselt 43.5, pole pinge- ja vooluköver siinuselised, mistõttu eeltoodud arvutusviis on ligikaudne.

Täisperiood-alaldajal on, võrreldes poolperiood-alaldajaga, ühesugustel talitlustingimustel ja kondensaatori C ühesuguste mahtuvuste puhul pinge lainesus üle kahe korra väiksem, sest kondensaatori laadimine toimub siin ka teise poolperioodi ajal.

Samal põhjusel väheneb täisperiood-alaldajal väljepinge $\underline{U}$ (ka kaks korda tugevama koormusvoolu $\underline{I}$ puhul) väiksemal määral kui poolperiood-alaldajal.

Lainesuse vähendamiseks (s. o. alalisvoolu silumiseks) kasutatakse kondensaatoreist ja paispoolidest või kondensaatoreist ja takistitest koosnevaid filtreid. Joonisel 43. 4 toodud alaldajal moodustavad niisuguse s i l u m i s f i l t r i konden-

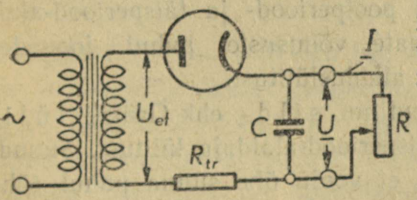


Joon. 43. 5. Pinge ja voolu kõverad poolperiood-alaldajas. u — trafo sekundaarmähise otste vaheline pinge, u_{pC} — kondensaatori klemmide ehk alaldaja väljeklemmide vahelise pulseeriva pinge hetkväärtused, $\underline{U}$ — väljeklemmide vaheline keskmine pinge, Δu — pingelang trafo mähiste ja suundtoru sisetakistuse tõttu, i_A — suundtoru läbiva voolu hetkväärtus, i_{pR} — pulseerivvool kooremtakistis filtri puududes, $\underline{I}$ — keskmine vool kooremtakistis.

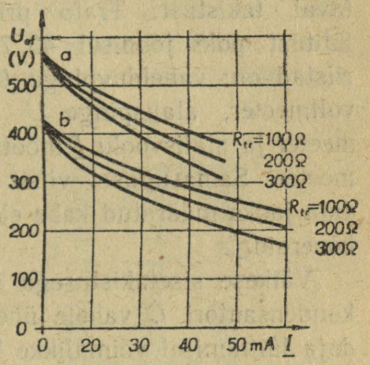
saator C_1 ja paispool L. Nagu eeltoodust näha, on elektrontoru staatilise $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$ tunnusjoone järgi läbiviidav arvutus küllalt keerukas ja teostatav ainult paljude lihtsustustega, mistõttu tulemused ei saa olla kuigi täpsed. Seepärast kasutatakse alaldajate talitlustingimuste määramisel sageli elektrontoru tegeliku talitlusolukorraga võimalikult sarnase lülituse juures teostatud mõõtmisel saadud kõveraid. Ühtedeks

niisugusteks suundtoru omadusi iseloomustavaiks kõveraiks on joonisel 43. 6 toodud koormuskõverad. Nende koostamiseks on kasutatud joonisel 43. 7 kujutatud lülitust.

Koormuskõverate ülesvõtmiseks teostatavate mõõtmiste ajal hoitakse transformaatori sekundaarmähiste otste vaheline pinge U_{ef} sama transformaatori primaarmähiste otste vahelise pinge reguleerimisega konstantne. Seetõttu ei mõjuta mõõtmisel kasutatava transformaatori elektrilised omadused mõõtmiste tagajärgi. Mõõtmislülituses valitakse kondensaator C niisuguse mahtuvusega, nagu seda alaldajates tavaliselt kasutatakse. Takisti R_{tr} takistus valitakse võrdsena tegelikult kasutatava transformaatori



Joon. 43. 7. Koormuskõverate ülesvõtmiseks kasutatava lülituse põhimõtteskeem. U_{ef} tuleb hoida mõõtmise ajal trafo primaarpoolel teostatava reguleerimisega konstantne. R_{tr} — valitav takisti, C — valitav kondensaator, R — reguleeritav kooremtakisti.



Joon. 43. 6. Suundtoru koormuskõverad transformaatori sekundaarmähisele rakendatud pinge U_{ef} kahesuguse väärtuse puhul (a-ga märgitud kõverate puhul 500 V ja b-ga märgitud kõverate puhul 400 V) ja takisti R_{tr} kolmesuguse takistuse puhul (100, 200 ja 300 Ω). Kondensaator $C = 8$ μF.

sekundaarmähise ja sekundaarpoolele taandatud primaarmähise tegevtakistuste summaga, vastavalt valemile 43. 16. Arvutuse lihtsustamiseks transformaatoris esinevaid rauaskadu-

sid[1] ei arvestata. Kuna tegelikke transformaatorimähiste takistusi pole ette teada, siis tuleb mõõtmist teostada mitmesuguste R_{tr} väärtuste puhul. Samuti võib mõõtmist teostada mitmesuguste C väärtuste puhul. Kooremtakisti R omab muudetavat takistust. Trafo primaarmähise pinge-reguleerimise lülitust pole joonisel 43. 7 näidatud. Kasutatavad mõõteriistad on: vahelduvpinge U_{ef} mõõtmiseks — vahelduvpinge voltmeeter, alalispinge U mõõtmiseks — alalispinge voltmeeter ja alalisvoolu I mõõtmiseks — alalisvoolu milliampermeeter. Samasugusel viisil võib mõõta ka täisperiood-alaldaja jaoks määratud kahe elektroodiga suundtorude koormuskõveraid.

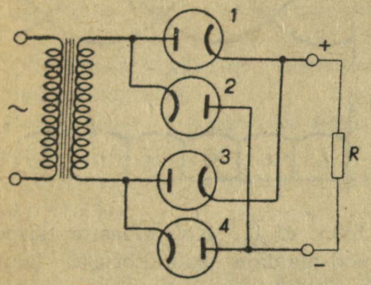
Väikese sisetakistusega suundtorude puhul tuleb toru ja kondensaatori C vahele ühendada paispool, et vältida alaldaja lülitamisel võimalikke hetkelisi liiga suuri voolutõukeid. Vastasel korral oleks niisugusest suundtorust, trafo sekundaarmähisest ja kondensaatorist C koosneva vooluringi takistus nii väike (niikaua kui kondensaatoris puudub elektrilaeng), et alaldaja lülitamisel tugevneks vool hetkeliselt (kuni kondensaator saab laetud) niivõrd, et selle tagajärjel võiks suundtoru rikneda.

Peale eespoolkirjeldatud poolperiood- ja täisperiood-alaldajate kasutatakse suuremate võimsuste puhul joonistel 43. 8, 43. 9 ja 43. 10 toodud alalduslülitusi.

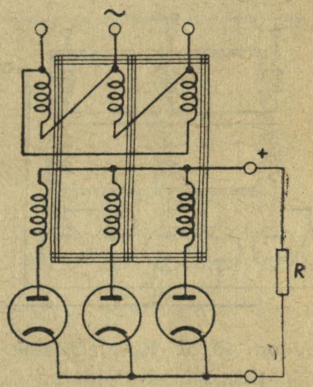
Joonisel 43. 8 on kujutatud nn. s i l d - ehk Grätz'i l ü l i t u s, mis kujutab endast täisperiood-alaldaja lülitust. Suundtorud on ühendatud nõnda, et voolu ühe suuna puhul (ühe poolperioodi vältel) läbib see torusid *4* ja *1*, teise suuna puhul aga torusid *2* ja *3*. Mõlema poolperioodi ajal töötab transformaatori kogu sekundaarmähis, mistõttu selle transformaatori sekundaarmähise keerdude arv on võrdse pinge

[1] H. R. Võrk. Elektrimasinad I. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1947. P. 12. Rauaskao määramine.

puhul väiksem kui joonisel 43. 4 toodud täisperiood-alaldajal. Samuti on väiksem ka transformaatori nõutav nimivõimsus. Nagu arvutus näitab, on poolperiood-alaldaja (joon. 43. 1) transformaatoril vajalik nimivõimsus $P_{nT} = 3{,}09\,\underline{P}$, täisperiood-alaldajal (joon. 43. 4) $P_{nT} = 1{,}48\,\underline{P}$ ja sildlülituses alaldajal (joon. 43. 8) $P_{nT} = 1{,}23\,\underline{P}$. Teiseks sildlülituse paremuseks on see, et sildlülituses olevate suundtorude lubatava



Joon. 43. 8. Täisperiood-alaldaja sildlülituses. *R* — kooremtakisti.

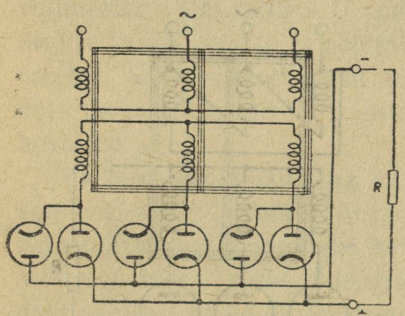


Joon. 43. 9. Kolmefaasine poolperiood-alaldaja.

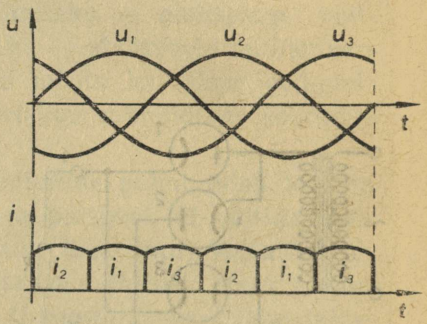
vastupinge väärtus võib olla ligi kaks korda väiksem, võrreldes eespoolkirjeldatud poolperiood- ja täisperiood-alaldajatega. Kolmefaasise poolperiood-alaldaja lülitus on kujutatud joonisel 43. 9. Eespool käsiteldud alaldajatega võrreldes on kolmefaasisest poolperiood-alaldajast saadava voolu lainesus palju väiksem, mistõttu alaldatud voolu silumiseks kasutatavad filtrid võivad olla tunduvalt väiksemad. Veelgi väiksema lainesusega ühesuunalist voolu annab joonisel 43. 10 toodud kolmefaasine täisperiood-alaldaja. Selle suundtorusid läbivad voolupulsid on kujutatud joonisel 43. 11. Viimase lülituse paremu-

seks on ka see, et ta vajab väiksema nimivõimsusega transformaatorit.

Võrreldes omavahel siinkirjeldatud alaldajatest saadava alalisvoolu (ühesuunalise voolu) kuju, võib näha, et selle pingega liidetud lainesuspinge amplituud U_C on seda väiksem ja selle sagedus seda suurem, mida suurem on kindla sagedusega vahelduvvoolu alaldatud pool-



Joon. 43. 10. Kolmefaasine täisperiood-alaldaja.



Joon. 43. 11. Kolmefaasise täisperiood-alaldaja suundtorusid läbivad voolupulsid. u_1, u_2 ja u_3 — transformaatori mähiste otste vahelised vahelduvpinged, i_1, i_2 ja i_3 — nende pingete poolt tekitatud voolupulsid kooremtakistis R. Nagu jooniselt nähtub, on iga pulsi kestus ainult üks kuuendik vahelduvpinge perioodist.

perioodide arv. Näiteks on poolperiood-alaldajal lainesuspinge sagedus 50 Hz, täisperiood-alaldajal — 100 Hz, kolmefaasisel poolperiood-alaldajal — 150 Hz ja kolmefaasisel täisperiood-alaldajal — 300 Hz. On arusaadav, et mida väiksem on lainesuspinge amplituud ja mida suurem selle pinge sagedus, seda väiksema mahtuvusega kondensaatoreist ja seda väiksema induktiivsusega paispoolidest koosnevaid filtreid vajatakse lainesuse nõutaval määral silumiseks.

Tabelis 43. 1 on toodud lihtsaimate (kondensaatorita ja filtrita) alaldajate kohta ideaalse juhu jaoks (kui trafos ja suundtorus pingelangu ei esine) pingete ja voolude väärtuste suhted.

Tabel 43. 1.

Lihtsaimate alaldajate pingete ja voolude väärtuste suhted.

Alaldaja tüübi nimetus	$\frac{U_{ef}}{\underline{U}}$	$\frac{U_v}{\underline{U}}$	$\frac{I_{pA}}{\underline{I}}$	$\frac{\underline{U}}{\underline{U}}$	$\frac{U_v}{U_{ef}}$
Ühefaasine poolperiood-alaldaja (joon. 43.1, kondensaatorita C)	2,22	3,14	3,14	0,32	1,41
Ühefaasine täisperiood-alaldaja (joon. 43. 4, kondensaatorita C ja filtrita CL_1)	1,11	3,14	1,57	0,64	2,82
Sildlülituses ühefaasine täisperiood-alaldaja (joon. 43. 8)	1,11	1,57	1,57	0,64	1,41
Kolmefaasine poolperiood-alaldaja (joon. 43. 9)	0,86	2,09	1,21	0,83	2,44
Kolmefaasine täisperiood-alaldaja (joon. 43. 10)	0,74	1,05	1,05	0,95	1,41

Tabelis tähendavad:

$\underline{U}$ — ühesuunalise voolu keskmine pinge väärtus kooremtakistil;

$\underline{I}$ — kooremtakistit läbiva ühesuunalise voolu keskmine väärtus;

U_{ef} — trafo sekundaarmähise (või mähiste) otste vahelise vahelduvpinge efektiivväärtus;

U — trafo sekundaarmähise (või mähiste) otste vahelise vahelduvpinge amplituud;

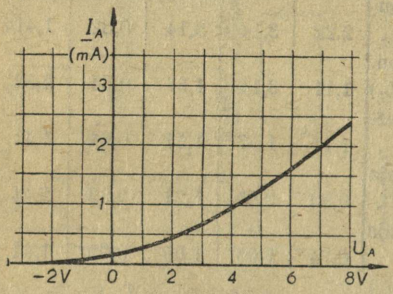
U_v — pinge suundtoru anoodi ja katoodi vahel poolperioodil, mil vool suundtoru ei läbi;

I_{pA} — suundtoru läbiva voolu pulsi maksimaalväärtus.

§ 44. Suursagedusvoolu alaldaja ja demodulaator. Suursagedusliku vahelduvvoolu suunamiseks kasutatavad kahe elektroodiga elektrontorud valmistatakse tavaliselt madala (mõne-voldilise) pinge ja nõrkade (mõne-milliampriliste) voo-

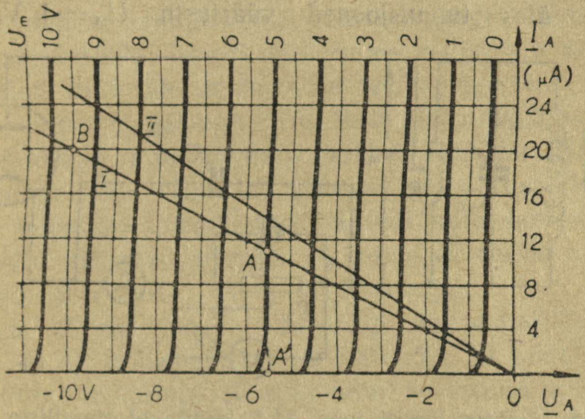
lude jaoks. Neil täita tulevate ülesannete jaoks soodsaimate talitlustingimuste määramisel võib kasutada joonisel 31. 2 kujutatud lülituse abil ülesvõetud I_A-U_A-tunnusjoont (joon. 42. 1 *b* ja 42. 1 *c*). Joonisel 44. 1 on näitena toodud elektrontorus CO-185 sisalduva dioodsüsteemi I_A-U_A-tunnusjoon.

Talitlustingimuste määramise staatilise I_A-U_A-tunnusjoone järgi teeb keerukaks see asjaolu, et dioodi vooluringis esineb peale alaldatava vahelduvpinge veel alaldamisel saadud (ühesuunaline) alalispinge, mille väärtus pole konstantne, vaid sõltub alaldatava vahelduvpinge ja vooluringis esineva takistuse väärtustest. Selle tõttu on dioodi anoodi ja katoodi vahel üheaegselt kaks pinget: alaldatav vahelduvpinge ja alaldamisel saadud (ühesuunalise voolu poolt vooluringis oleva takistuse tõttu esinevast pingelangust põhjustatud) pinge. Nende mõlema pinge väärtused on muutuvad. Esiteks muutuvad ajaliselt vahelduvpinge hetkväärtused, teiseks muutuvad tavaliselt ka selle vahelduvpinge tippväärtused (näiteks amplituudis moduleeritud pinge puhul) ja kolmandaks muutub ka alaldamisel saadava ühesuunalise voolu tugevus, mis samuti tekitab muutuva väärtusega pinget, kuna vooluringi takistus on püsiv. Neist kahest pingest on alaldatud voolu poolt esilekutsutud pinge väärtus sõltuv vahelduvpinge amplituudidest ehk tippväärtustest. Nende kolme pinge hetkväärtusi ei saa graafiliselt kanda staatilise I_A-U_A-tunnusjoone (joon. 44. 1) U_A-teljele nii, et need väärtused annaksid dioodi talitlustingimuste määramiseks tarviliku pildi. Paragrahvis 43 kirjeldatud väikesagedusvoolu alaldaja töötamise



Joon. 44. 1. Elektrontorus CO-185 sisalduva dioodsüsteemi staatiline I_A-U_A-tunnusjoon.

põhimõtte selgitamisel (joon. 43. 2) käsiteldava vahelduvpinge amplituudid olid konstantsed, samuti eeldati, et alaldamisel saadud voolu poolt vooluringis tekitatud pinge $\underline{U}$ on konstantne, mis aga polnud päris täpne, nagu see nähtub jooniselt 43. 5, kus pinge u_{DC} väärtus on teatavais piirides muutuv. Dioodi töötades omavad eriti olulist tähtsust just saadava alaldatud pinge muutused, mistõttu § 43 kirjeldatud töötamistingimuste selgitamise moodus pole siin hästi kasutatav.



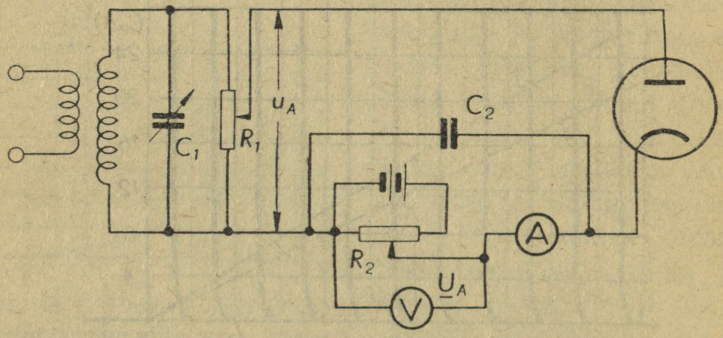
Joon. 44. 2. Dioodi anoodvoolu $\underline{I}_A$ sõltuvus anoodi alalispingest $\underline{U}_A$ mitmesuguste vahelduvpinge amplituudide U_m juures. Sirge I vastab kooremtakistile $R_1 = 0{,}5$ MΩ, sirge II kooremtakistile $R_2 = 0{,}4$ MΩ. Suursagedusvoolu konstantse amplituudi $U_m = 5$ V ja kooremtakisti $R_1 = 0{,}5$ MΩ puhul on kooremtakisti klemmide vaheline pinge $\underline{U}_A = 5{,}6$ V ja dioodi läbiv vool $\underline{I}_A = 11$ μA.

Dioodide töötamistingimuste määramisel kasutatakse sageli joonisel 44. 2 toodud staatiliste tunnusjoonte sarja ehk staatilist tunnussarja, mille ülesvõtmisel on kasutatud joonisel 44. 3 toodud lülitust (vt. ka joon. 109. 2).

Joonisel 44. 3 on dioodi vooluringi ühendatud kaks pingeallikat järjestikku, mis annavad pingeid $\underline{U}_A$ ja u_A. Nendest alalispinge $\underline{U}_A$ allika takistus vahelduvvoolule peaks olema niivõrd väike, et selle võiks jätta arvesse võtmata. Alalis-

pingeallika vahelduvvoolu-takistust saab vähendada, kui valida väikese takistusega potentsiomeeter R_2 või ühendada vooluringi suure mahtuvusega kondensaator C_2. Vahelduvpinge u_A allikas peab aga omama väikest takistust alalisvoolule. Selleks tuleks potentsiomeeter R_1 ja vahelduvpinge allikas valida väikese takistusega.

Teostades mõõtmisi vahelduvpinge väärtuse $U_m = 0$ puhul, saadakse dioodi tavaline staatiline I_A-U_A-tunnusjoon. Edasi võetakse üles tunnusjooned väärtuste $U_m = 1$ V, $U_m =$



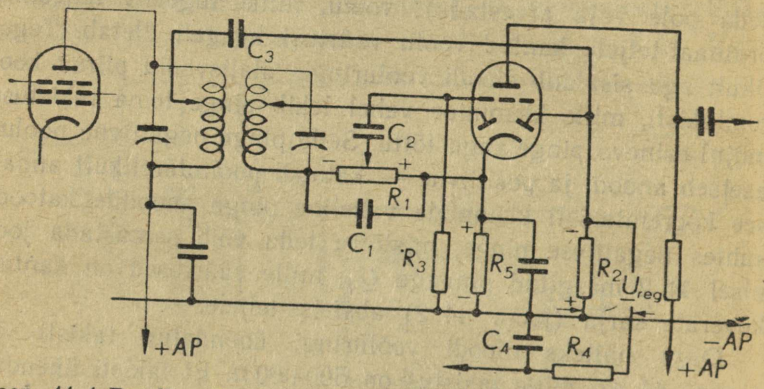
Joon. 44. 3. Lülitus dioodi joon. 44. 2 kujutatud staatiliste tunnusjoonte ülesvõtmiseks. R_1 ja R_2 — potentsiomeetrid pingete u_A ja U_A reguleerimiseks.

$= 2$ V jne. puhul. Nagu on näha joonisel 44. 2, nihkuvad viimased seda rohkem vasakule, mida kõrgem on vahelduvpinge u_A (U_m tähistab vahelduvpinge tippväärtust). Kui puudub mõõteriist tippväärtuste mõõtmiseks (näit. joon. 44. 6), võib tippväärtused leida arvutuse teel, korrutades mõõteriistalt loetud efektiivväärtused teguriga $\sqrt{2}$. Mõõtmiste tulemused ja kõverate kuju ei sõltu sellest, missuguse sagedusega vahelduvvoolu kasutatakse. Seepärast võib kõverate ülesvõtmisel kasutada suursagedusvoolu asemel kas helisagedusvoolu või ka väikesageduslikku (50 Hz) vahelduvvoolu.

Eespoolkirjeldatud menetlusel ülesvõetud ja joonisel 44. 2 kujutatud kõverate sari võimaldab dioodi töötamisest saada ülevaatlikku pilti. Näiteks, kui alaldatava suursageduspinge tippväärtused on 5 V ($U_m = 5$ V), siis tekitab see dioodi vooluringis, millel peale dioodi enda sisetakistuse ei ole muud tegevtakistust (eeldusel, et dioodi välisvooluringi tegevtakistus ehk takistus alalisvoolule on niivõrd väike, et seda pole vaja arvestada), voolu, mille tugevus teljestiku ordinaat-teljele kantud voolu väärtusi kaugelt ületab. Tegelikult aga sisaldub dioodi vooluringis alalisvoolu piirav kooremtakisti, mille klemmide vahel tekib pinge tema takistuse mõjul esineva pingelangu tõttu. Selle pinge negatiivne poolus asetseb anoodi ja positiivne — katoodi pool. Järelikult annab see kooremtakisti klemmide vaheline pinge anoodile katoodi suhtes negatiivse pinge, mistõttu teda võib samastada joonisel 44. 2 märgitud pingega $\underline{U}_A$, mille väärtused on kantud kõverate sarja (joon. 44. 2) abstsiss-teljele.

Olgu näiteks dioodi vooluringi ühendatud takisti R_1 (joon. 44. 4), mille takistus on 500 000 Ω. Et takisti ühendamise tõttu vooluringi ei suureneks vooluringi näivtakistus (takistus vahelduvvoolule), tuleb ühendada temaga rööbiti kondensaator C_1. Selle kondensaatori mahtuvus peab olema küllalt suur, et moodustada alaldatavale suursagedusvoolule niivõrd väikest takistust, mille võiks jätta tähele panemata. Selleks peaks olema rahuldatud tingimus $\omega R_1 C_1 \gg 1$, kus ω on kasutatava vahelduvvoolu ringsagedus, R_1 — kooremtakisti takistus oomides ja C_1 — sildamiskondensaatori mahtuvus faradites. Siis läbiks alaldatud vool takistit R_1 ja suursagedusvool kondensaatorit C_1. Et tekitada kooremtakistis $R_1 = 500\,000$ Ω voolu $\underline{I}_A$, mille tugevus on näiteks 20 μA, peaks olema kooremtakisti klemmide vahel pinge $\underline{U} = \underline{I}_A R_1 = 20 \cdot 10^{-6} \cdot 0{,}5 \cdot 10^6 = 10$ V. Kui vool $\underline{I}_A = 0$, siis ka $\underline{U} = 0$. Järelikult võib kooremtakisti $R_1 = 500\,000$ Ω jaoks tõmmata sirge, mis läbib punkte B ja O. Selle sirge ja vastava

U_m-kõvera lõikepunkti koordinaadid annavad kooremtakisti klemmide vahelise pinge vastavalt U_m väärtusele. Suursagedusvoolu konstantse amplituudi $U_m = 5$ V puhul näiteks moodustab punkt A talitluspunkti ja kooremtakisti klemmidevaheline pinge on 5,6 V. Kui kooremtakisti omab väiksemat takistust, siis on vool tugevam ja klemmidevaheline pinge on pisut madalam. Alaldatava suursagedusvoolu ampli-



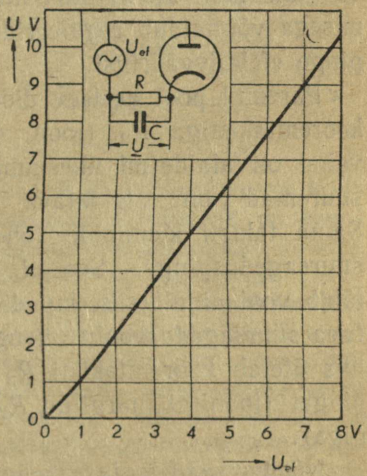
Joon. 44. 4 Raadiovastuvõtjas demoduleerimiseks ja võimenduse automaatseks reguleerimiseks kasutatavate dioodide ühendamise näide. Vasakpoolne dioodsüsteem töötab demodulaatorina, parempoolne võimendusastmete võimenduse automaatseks reguleerimiseks vajaliku pinge allikana.

tuudi väärtuse muutumisel (näiteks, kui ta on moduleeritud helisagedusvooluga) toimuks kooremtakisti klemmidevahelise pinge muutumine piki abstsiss-telge punkti A' ümber.

Dioodi talitlustingimuste määramiseks kasutatakse sageli dioodi dünaamilisi tunnusjooni, mis näitavad kooremtakisti klemmidevahelise ühesuunalise pinge sõltuvust alaldatava suursageduspinge efektiivväärtusest. Dioodi selline tunnusjoon on toodud joonisel 44. 5, mille ülemises nurgas on näidatud kõvera ülesvõtmiseks teostatud mõõtmistel kasutatud lülitus. Sellel on kondensaatori C mahtuvus valitud

niivõrd suur, et mõõtmiseks kasutatud vahelduvvoolu sageduse puhul $\omega RC \gg 1$. Niisugusel juhul võib lugeda, et kooremtakistit R läbib ainult alaldatud vool, sest vahelduvvoolule avaldab kondensaator nii väikest takistust, mida võib jätta tähele panemata.

Nagu jooniselt nähtub, on $\underline{U}$ sõltuvus pingest $U_{ef} = U/\sqrt{2}$ peaaegu lineaarne. Ainult alaldatava vahelduvpinge õige väikeste amplituudide puhul omab ta suuremat kõverust. Seetõttu nimetatakse kõrgemate vahelduvpingete (umbes ühest voldist alates: $U_{ef} > 1$ V) alaldamist lineaarseks alalduseks.. Madalamate vahelduvpingete puhul on meil aga tegemist ruutja alaldusega, sest alaldamine toimub dioodi staatilise tunnusjoone kõveral osal (joon. 42. 1 *b*). Lineaar-alalduse puhul on lõikenurga väärtus alla 180° (joon. 43. 2).



Joon. 44. 5. Dioodi kooremtakisti R otste vahelise ühesuunalise (alaldatud) pinge $\underline{U}$ sõltuvus alaldatava suursageduspinge efektiivväärtusest U_{ef}. Kooremtakistit R sildava kondensaatori C mahtuvus on võetud sedavõrd suur, et oleks täidetud nõue $\omega RC \gg 1$ (alaldatava vahelduvvoolu sageduse puhul).

Joonisel 44. 4 on toodud muundsagedus-raadiovastuvõtja lülitusest see osa, kus toimub suursagedusvoolu (nn. muundsagedusvoolu) demoduleerimine kahe dioodsüsteemi abil. Kahest dioodsüsteemist ja ühest trioodsüsteemist koosneva elektrontoru vasakpoolne dioodsüsteem on ühendatud kooremtakistiga järjestikku (joon. 42. 2). Tema ülesandeks ongi amplituudis moduleeritud suursagedusvoolu demoduleerimine.

Kooremtakisti klemmidevaheline pinge kõigub siis vastavalt demoduleeritava suursagedusvoolu amplituudi muutusele, s. o. vastavalt suursagedusvoolu moduleerimiseks kasutatud helisagedusvoolu kõikumisele. Need helisageduspinge kõikumised juhitakse edasiseks võimendamiseks trioodsüsteemi võrele üle kondensaatori C_2, mille mahtuvus peaks olema küllalt suur, et ta ei moodustaks helisagedusvoolule tunduvat takistust. Kooremtakistil R_1 oleva liugkontakti nihutamisega võimaldub reguleerida trioodile antava helisageduspinge efektiivväärtust.

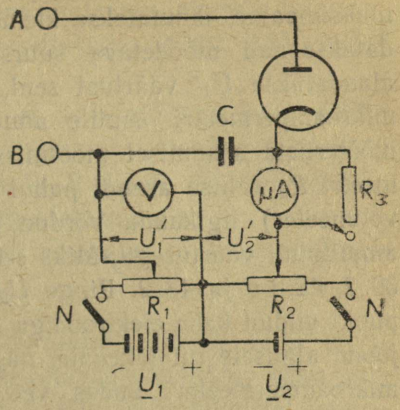
Paremal pool asetsev dioodsüsteem on ühendatud rööbiti kooremtakistiga R_2 (joon. 42. 3). Kooremtakisti klemmide vahel on alaldatud ühesuunaline pinge seda kõrgem, mida suuremad on alaldatava suursageduspinge amplituudid. Sama takisti klemmide vahel on samaaegselt ka alaldatav suursageduspinge. See ei muuda aga üldpilti, sest dioodi läbib vool ainult siis, kui dioodi anood on positiivne alaldatava suursagedusvoolu niisuguse positiivse amplituudi puhul, mis ületab kooremtakisti R_2 klemmidevahelist ühesuunalist pinget (joonisel märgitud R_2 klemmide vahel + ja — märgiga).

Nõnda saadav ja raadiovastuvõtja astmete võimenduse reguleerimiseks kasutatav reguleerimispinge U_{reg} on skeemi juhtme $-AP$ suhtes negatiivne, sest kooremtakisti R_2 positiivse pingega klemm on ühendatud selle juhtmega. Reguleerimispinget võimendusastmete juurde kandvas juhtmes sisalduv takisti R_4 ja kondensaator C_4 on vajalikud reguleerimispinge kõikumiste silumiseks. Takisti R_5 klemmide vahel elektrontoru töötamisel tekkiva pinge miinus on takisti R_2 kaudu ühendatud dioodi anoodiga, mistõttu dioodis saab tekkida vool alles siis, kui suursageduspinge amplituudide väärtused ületavad takisti R_5 klemmide vahelise pinge väärtust. See pinge ei lase suursageduspinge väikeste amplituudide puhul reguleerimispinget tekkida ja sellega

saavutatakse reguleerimispinge tekkimise viivitamine. Ühtlasi on see pinge ise samal ajal reguleerimispingeks.

Kahe elektroodiga elektrontorusid kasutatakse mitmesugustes lülitustes ka suursageduspingete ja helisageduspingete mõõtmiseks kasutatavais mõõteriistades. Näitena on joonisel 44. 6 toodud lihtsa suursageduspinge tippväärtuse mõõtmiseks määratud mõõteriista skeem.

Mõõteriist vajab peale küttevooluallika (mis on joonisel näitamata) veel kaht pingeallikat, mis on ühendatud potentsiomeetritega R_1 ja R_2. Mõõteriista seadmiseks mõõtmisvalmis seisundisse lülitatakse küttevooluallikas ja lüliti N. Potentsiomeetri R_1 liugkontakt seatakse nii, et $\underline{U}_1' = 0$; lühistatakse mõõteriista klemmid A ja B ning reguleeritakse potentsiomeetri R_2 abil anoodvool nii nõrgaks, et see oleks veel mõõdetav tundliku mõõteriistaga (mikroampermeetriga). Siis



Joon. 44. 6. Dioodvoltmeeter. Kondensaator $C = 500$ pF on suursagedusvoolu juhtimiseks. Potentsiomeetri R_1 klemmidega ühendatud patarei $\underline{U}_1$ maksimaalne pinge on määratud dioodi lubatava maksimaalse vastupinge väärtusega. Selle patarei pinge omakorda määrab mõõteriista mõõdupiirkonna. Patarei pinge puhul $\underline{U}_1 = 10$ V võiks olla $R_1 = 2000$ Ω (traattakisti). $R_2 = 1000$ Ω (samuti traattakisti), millega on ühendatud patarei $\underline{U}_2$, pingega 3,5 V. I_A mõõtmiseks on vajalik võimalikult väikese voolutarvitusega mikroampermeeter või galvanomeeter. R_3 — reostaat, mis omab tühikontakti — mikroampermeetri kaitsmiseks valesti käsitsemise puhul. Selle reostaadi takistus tuleb valida mõõteriistaga maksimaalselt mõõdetava voolu ja tema sisetakistuse järgi (umbes 10 Ω).

seatakse potentsiomeetri R_1 liugleja nii, et U_1' oleks maksimaalne, lahutatakse klemmid A ja B lühisest ja ühendatakse nad mõõdetava suursageduspinge allikaga. Nüüd alandatakse U_1' väärtust seni, kuni tekib anoodvool, mis mikroampermeetri osutile annab samasuure hälbe, kui oli mõõteriista seadmisel mõõtmisvalmis seisundisse. Potentsiomeetri R_1 sellise asendi puhul on U_1' väärtus (mida näitab voltmeeter) ligikaudu võrdne mõõdetava suursageduspinge amplituudi väärtusega. Miks see nii on, see selgub joonistelt 39. 2, 42. 1 *b* ja 43. 2. Pinge U_2' reguleerimisega on talitluspunkt viidud kahe elektroodiga elektrontoru staatilise tunnusjoone algusele nii lähedale, nagu seda võimaldab kasutatav mikroampermeeter, andes veel loetavat hälvet (joon. 39. 2, 42. 1 *b*). Sellest staatilise tunnusjoone alguse lähedal asuvast punktist on talitluspunkt pinge U_1' abil veelgi rohkem vasakule viidud ja nimelt nii kaugele, kust lähtudes mõõdetava suursageduspinge amplituudid küüniksid endise talitluspunktini, tekitades anoodvoolu. Et selle anoodvoolu pulsid annaksid vooluga I_A võrdse keskväärtuse, peavad suursageduspinge amplituudid pisut ületama U_1' väärtust ja ulatuma teataval määral U_2' piirkonda. Seetõttu tekib kirjeldatava mõõteriista mõõtmisviga. Mõõdetava suursageduspingega võrreldes pole selle, nn. relatiivse ehk suhtelise vea väärtus mõõduandev kõrgemate pingete mõõtmisel, kui dioodi voolutugevuse määramiseks kasutatakse väikese voolutarvitusega riista. Kui näiteks kasutada 50-mikroamprilist riista, mis omab 0,25 μA loetavat hälvet, siis on relatiivse vea väärtus 1-voldilise amplituudiga suursageduspinge mõõtmisel 14%, 2 V puhul aga ainult 9% ja 4 V pinge puhul on mõõteriista osuti täpse asukoha silma järgi määramisel tehtav viga juba suurem kui ülalkirjeldatud põhjusel tekkinud viga. Kui mõõtmisel dioodi vool on tugevam kui 0,25 μA, siis on vea väärtus muidugi suurem.

Nagu selgub selle mõõteriista töötamise põhimõttest, suureneb tema sisendtakistus mõõdetavate pingete kõrgenedes. Näiteks 2 V puhul on sisendtakistus 4 MΩ, 10 V puhul aga juba 20 MΩ jne.

Skeemi jälgimisest selgub, et selle riistaga saab mõõta ainult niisuguste suursageduspinge allikate pinget, millede puhul mõõteriista klemmide *A* ja *B* kaudu läbi pingeallika sisevooluringi tekib kinnine ring alalisvoolule.

Dioode kasutatakse väga mitmesuguses lülituses veel paljudes muudeski mõõteriistades.

§ 45. Kahe elektroodiga elektrontoru tüübid. Kahe elektroodiga elektrontorude suhtes esitatavad nõuded on väga mitmesugused, sõltuvalt nende poolt täitmisele tulevate ülesannete mitmekesisusest. Üheks üldiseks nõudeks on see, et kahe elektroodiga elektrontoru peab omama võimalikult suurt tõusu. Mida suurem on tõus, seda väiksema anoodi- ja katoodivahelise pingega saavutatakse vajalik anoodvool ja seda vähem võimsust muutub toru anoodil soojuseks.

Kaudselt köetavate väikese võimsusega kahe elektroodiga elektrontorude juures on suur tõus saavutatav suurepinnalise katoodi ning väikese katoodi- ja anoodivahelise kauguse kasutamisel (näit. 6X6 ja 5Ц4). Kõrge pingega töötavail kenotronidel tehakse anoodi ja katoodi vahe suur, et vältida kenotronis vastusuunalise voolu (ülelöögi) tekkimist alaldatava vahelduvvoolu selle poolperioodi vältel, mil suunditoru ei läbi vool ja vahelduvpinge liitub alaldamisel saadud ühesuunalise pingega.

Täisperiood-alaldajais kasutatavad väikese võimsusega kenotronid valmistatakse tavaliselt kahe anoodiga ja kahe katoodiga ühises kestas. Katoodid on tavaliselt kolvi sees kokku ühendatud (näit. 5Ц4С). Samuti paigutatakse ühisesse kesta kaks suursagedusvoolu suunamiseks kasutatavat kahe elektroodiga elektrontoru (dioodi) süsteemi (näit. kaksik-

Tabel 45.1.

Väikese võimsusega suundtorude tehnilised andmed.

Tüübitähised	Anoodide arv	Küttepinge U_{ef}	Küttevool I_{ef}	Maksimaalselt lubatavad väärtused				
				Vahelduvpinge efektiivväärtus anoodil U_{ef}	Vastupinge U_v	Alaldatud pinge $U_=$	Alaldatud vool $I_=$	Katoodi ja kütteniidi vaheline pinge
		V	A	V	V	V	mA	V
BO-116 2B-400	Kahe anoodiga	4	2,0	400	1200	350	115	—
BO-125	Kahe anoodiga	4	0,7	250	600	225	30	—
BO-188	Kahe anoodiga	4	2,2	500	1300	450	150	—
BO-202 2B-150	Kahe anoodiga	4	0,7	300	750	250	50	—
ВД8 2X2 879	Ühe anoodiga	2,5	1,75	3000	12500	4500	7,5	—
5BX1 5Ц4-C	Kahe anoodiga	5	2,0	350	1400	420	125	—
5BX2 5У4-C	Kahe anoodiga	5	3,0	450	1550	445	225	—
5BX3 5У3-C	Kahe anoodiga	5	2,0	350	1400	335	125	—
6BX1 6X5 6X5-C	Kahe anoodiga	6,3	0,6	325	1250	370	70	450
6X6Б 6X6 6H6	Kahe anoodiga ja kahe katoodiga	6,3	0,3	150	420	150	8	330
30BX1 30Ц6-C	Kahe anoodiga ja kahe katoodiga	30	0,3	250	500	225	90	300
30ВД1 30Ц1М	Ühe anoodiga	30	0,3	250	500	225	90	100

diood ehk duodiood 6X6), millede kaudselt köetavad katoodid on elektriliselt isoleeritud kütteniidist ja ka omavahel ning ühendused nende küljest on toodud elektrontorust välja vastavate eri kontaktjalgade külge.

Kenotroni sobivust teatava ülesande täitmiseks näitavad tema kohta kehtivad tehnilised andmed. Neiks kenotroni iseloomustavaiks suurusteks on:

1) maksimaalne vastupinge, mida kenotron suudab taluda,

2) suurim anoodvoolu pulss $I_{pA\,max}$, mida kenotron suudab anda,

3) nimi-pingelang ΔU_n kenotronis, mille juures anoodvool tugevneb vähemalt $I_{pA\,max}$ väärtusele,

4) maksimaalselt lubatav anoodkadu kenotroni kestval töötamisel,

5) kenotroni iga,

6) kenotroni nimi-küttevoolutugevus.

Tabelis 45. 1 ja 45. 2 on toodud mõningate Nõukogude Liidus valmistatavate suundtorude tehnilised andmed.

Tabel 45. 2.

Kahe elektroodiga keskmise võimsusega elektrontorude tehnilised andmed.

Tüübitähis	Küttepinge $U_{e/F}$ V	Küttevool $I_{e/F}$ A	Maksimaalselt lubatavad väärtused: Anoodvoolu pulsi amplituud I_{pA} A	Vastupinge amplituud U_v V	Anoodkao võimsus P_A W	Iga t_K h
B-200 B-16	12	6,5±0,5	0,2	150	1200	500
B-4-200 B-17	11	3,5±0,3	0,2	500	4000	200
B-4-201 B-128	11	6,3±0,5	0,2	500	4000	1000
B-8-800 B-27	17	8,4±0,7	0,8	800	8000	800

KOLME ELEKTROODIGA ELEKTRONTORU.

IX peatükk.

Kolme elektroodiga elektrontoru koostis ja omadused.

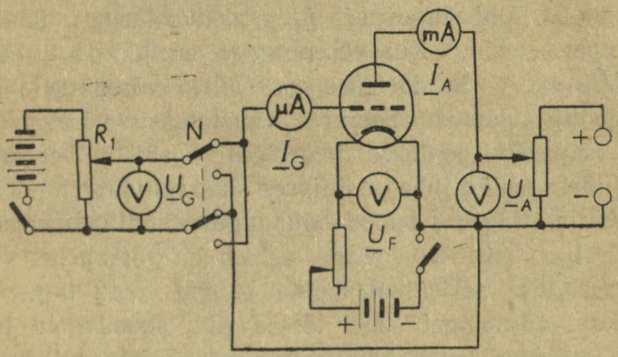
§ 46. **Koostis.** Kolme elektroodiga elektrontorus (trioodis) on peale katoodi ja anoodi veel kolmas, võrgu- või sõelakujuline elektrood — võre, mis asetseb katoodi ja anoodi vahel. Niisugust elektrontoru läbiva voolu tugevust mõjutavad temas sisalduva kõigi kolme elektroodi omadused, mõõted, vastastikune asetus ja nende potentsiaalide erinevused. Elektrontoru töötamisel on ta küttevoolu tugevus ja seega ka katoodi omadused ning ruumlaengu väärtus tavaliselt püsivad. Samuti on püsivad ka elektroodide mõõted ja nende vastastikune asetus. Muutuda saavad ainult võre, anoodi ja katoodi omavahelised potentsiaalide vahed, milledest sõltubki elektrontoru läbiva voolu tugevus. Paljudes lülitustes on elektrontoru läbiva voolu tugevuse reguleerijaks just võre (temale teiste elektroodide suhtes antava potentsiaali abil) ja niisugusel puhul nimetatakse võret ka tüürvõreks. Võre võib aga täita ka teistsuguseid ülesandeid — eriti edaspidi käsiteldud mitme võrega elektrontorus, mis peale tüürvõre sisaldavad veel teisi võresid muiks otstarveteks.

Trioodi töö jälgimist raskendab tunduvalt see asjaolu, et töötava trioodi võre potentsiaali muutmine põhjustab väljaspool elektrontoru asetsevate lülitus-elementide toimel samaaegselt ka anoodi potentsiaali muutumist. Järelikult muutub anoodvool kahe üheaegselt muutuva ja teineteisest sõltuva

potentsiaali vahe mõjul, nimelt: võre ja katoodi vahelise potentsiaalide vahe ehk võrepinge $\underline{U}_G$ ning anoodi ja katoodi vahelise potentsiaalide vahe ehk anoodpinge $\underline{U}_A$ mõjul.

Et lihtsustada nende kolme muutuva omavahelise seose $\underline{I}_A = f(\underline{U}_G, \underline{U}_A)$ jälgimist, vaatleme esmalt anoodvoolu $\underline{I}_A$ sõltuvust võrepingest $\underline{U}_G$, eeldades, et anoodpinge $\underline{U}_A$ on konstantne ($\underline{I}_A = f(\underline{U}_G)$, kui $\underline{U}_A = \text{konst.}$), ja alles siis käsitleme anoodvoolu $\underline{I}_A$ sõltuvust anoodpingest $\underline{U}_A$, eeldusel, et võrepinge $\underline{U}_G$ on konstantne ($\underline{I}_A = f(\underline{U}_A)$, kui $\underline{U}_G = \text{konst.}$). Neid seoseid kujutavaid kõveraid nimetatakse trioodi staatilisteks tunnusjoonteks ehk staatilisteks karakteristikuteks.

§ 47. Trioodi staatilised tunnusjooned ja nende ülesvõtmine. Trioodi staatilisi tunnusjooni $\underline{I}_A = f(\underline{U}_G)$, kusjuures



Joon. 47. 1. Trioodi tunnusjoonte ülesvõtmise lülituse skeem.

$\underline{U}_A = \text{konst.}$ ja $\underline{I}_A = f(\underline{U}_A)$, kui $\underline{U}_G = \text{konst.}$, saab üles võtta joonisel 47. 1 kujutatud lülituse abil. Selles lülituses on kütte- ja anoodvooluring samasugused kui dioodi staatilise tunnusjoone ülesvõtmise lülituseski (joon. 31. 2). Võrevooluringi on ühendatud pingeallikas koos potentsio-

meetriga R_1, voltmeeter, milli- või mikroampermeeter ja kaksjuhe-ümberlüliti N.

Potentsiomeeter R_1 on määratud võrele katoodi suhtes antava pinge U_G reguleerimiseks, voltmeeter — selle pinge mõõtmiseks, milli- või mikroampermeeter — võrevoolu tugevuse mõõtmiseks ja ümberlüliti — võrele katoodi suhtes kas negatiivse või positiivse pinge andmiseks. Võrevooluringi ja katoodi sidestav juhe ühendatakse kokkuleppe kohaselt alati anoodvooluallika miinusjuhtmega ja vahetult köetaval katoodil küttevooluallika miinusjuhtmega.

Mõõtmist alustades reguleeritakse kõige enne küttepinge nimiväärtusele ja antakse anoodile mingisugune soovikohane pinge. Mõõtmiste vältel tuleb mõlemad nimetatud pinged hoida konstantsed. Siis antakse võrele niivõrd kõrge negatiivne pinge ($-U_G$), et anoodvool $I_A = 0$. Edasi alandatakse võrepinget astmeliselt, lugedes võrepinge igale väärtusele vastava anoodvoolu tugevuse I_A anoodvooluringi ühendatud milliampermeetrilt. Kui võrepingega on jõutud nullväärtuseni ($U_G = 0$), siis loetakse ka sellele võrepingele vastav anoodvoolu tugevus. Seejärel vahetatakse võrevooluringis sisalduva patarei poolused ümberlüliti N abil ümber ja tõstetakse jällegi (nüüd juba positiivses suunas) võrepinget astmeliselt, ühtlasi lugedes anoodvoolu tugevusi milliampermeetrilt. Kui võrel on positiivne pinge, esineb ka võreahelas vool ja seepärast tuleb sel puhul mõõta ka võrevoolu tugevusi I_G. Positiivset võrepinget edasi tõstes võib anoodvoolu tugevusega jõuda kuni katoodi küllastusvoolu väärtuseni, kui mõõdetava elektrontoru tüübi kohta pole ette kirjutatud väiksemaid maksimaalselt lubatavaid anood- või võrevoolu tugevusi.

Kandes nõnda teostatud mõõtmistel mitmesuguse anoodpinge puhul selgitatud andmed teljestikku, leitakse trioodi staatiliste I_A-U_G-tunnusjoonte sari ehk trioodi I_A-U_G-t u n n u s s a r i, mis on toodud joonisel 47. 2. Samasse

koordinaatide teljestikku võib kanda ka võrevoolu sõltuvuse võrepingest $I_G = f(U_G)$ mitmesuguste anoodpingete puhul. Trioodi tavalistele talitlustingimustele vastavate anoodi- ja võrepingete puhul on võrevoolu tugevus maksimaalselt kuni 10% anoodvoolu väärtusest.

Tunnusjoonte ülesvõtmisel võetakse üks tunnusjoon üles nimi-anoodpinge puhul, teised aga sellest madalamate ja sellest kõrgemate anoodpingetega.

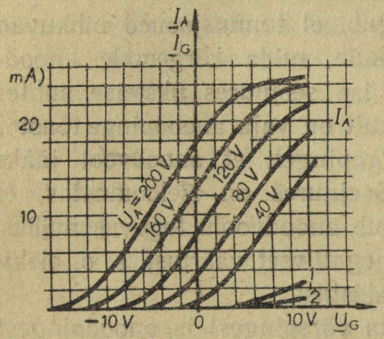
Tunnussarja vaadeldes selgub, et tunnusjooned nihkuvad teljestikus seda rohkem vasakule, mida kõrgemale anoodpingele nad vastavad, jäädes ise seejuures üksteise suhtes enam-vähem rööbikuiks. Järelikult on vaja anoodpinge tõustes kõrgendada ka negatiivset võrepinget, et anoodvool jääks endiseks, ja ümberpöördult. Seejuures on iseloomustav, et valitud anoodpinge puhul muutub anoodvoolu tugevus nulliks, kui võrepinge ületab teatavat negatiivset väärtust, s. o. elektrontoru omab lõpmata suurt takistust.

Samal joonisel on toodud ka võrepingest ja anoodpingest sõltuva võrevoolu I_G-U_G-tunnusjooned. Nagu neist nähtub, tugevneb võrevool positiivse võrepinge $+U_G$ tõustes, nõrgeneb aga anoodpinge tõstmisel.

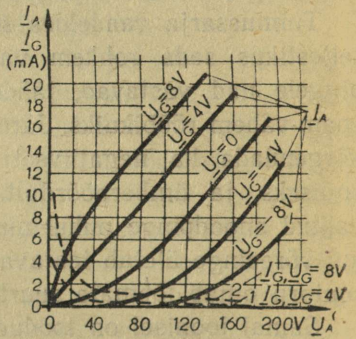
Anoodvoolu sõltuvust anoodpingest $I_A = f(U_A)$ väljendavaid trioodi staatilisi I_A-U_A-tunnusjooni saab üles võtta samuti joonisel 47. 1 kujutatud lülituse abil. Selleks hoitakse mõõtmise vältel küttepinge ja valitud võrepinge väärtused konstantsetena ja tõstetakse astmeliselt anoodpinget, alates nullist kuni suurima lubatava väärtuseni. Seda toimingut tuleb korrata mitmesuguste valitud võrepinge väärtuste juures. Mõõteriistadelt loetud andmete järgi saab koostada joonisel 47. 3 toodud I_A-U_A-tunnussarja. Samasse teljestikku on kantud kriipsjoontega ka trioodi võrevoolu I_G-U_A-tunnusjooned.

Sellel joonisel sarnaneb $U_G = 0$ väärtusele vastav kõver kahe elektroodiga elektrontoru anoodvoolu tunnusjoonega.

Jooniselt 47. 3 näib, nagu algaksid väärtustele $U_G = 0$, $U_G = -4$ V ja $U_G = -8$ V vastavad kõverad koordinaatide algusest. See aga ainult näib nii, sest ordinaatteljele kantud anoodvoolu I_A mastaap on valitud suur. Tegelikult aga esineb niihästi väärtuse puhul $U_G = 0$, nagu ka väärtuste puhul $U_G = -4$ V ja $U_G = -8$ V, nõrk anoodvool niisama kui kahe elektroodiga elektrontorudeski (§ 39), tema tugevus aga on



Joon. 47. 2. Trioodi staatilised tunnusjooned $I_A = f(U_G)$ ja $I_G = f(U_G)$ mitmesuguste anoodpinge väärtuste puhul.



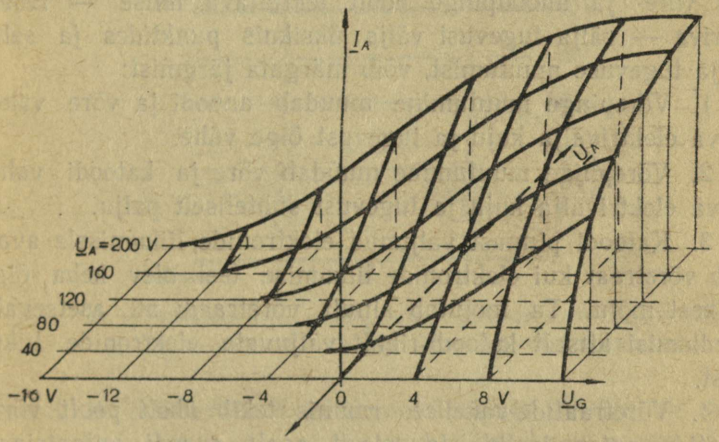
Joon. 47. 3. Trioodi staatilised tunnusjooned $I_A = f(U_A)$ ja $I_G = f(U_A)$ (kriipsjoontega) mitmesuguste anoodpinge väärtuste puhul.

tavaliselt mõõdetav mikroamprites. Et anoodvoolu tugevus võrduks ka sääraste võrepinge väärtuste puhul nulliga, selleks tuleb anoodile anda teatava kõrgusega negatiivset anoodpinget.

Võrepinge väärtuse puhul $U_G < 0$ ilmneb anoodvool alles teatud anoodpinge väärtuse puhul, mis on tunduvalt suurem võre negatiivse pinge väärtusest. See tuleb sellest, et anoodvoolu kulgemine saab võimalikuks alles siis, kui positiivne anoodpinge on küllalt kõrge selleks, et tekitada elektrontorus elektrivälja, mis osaliseltki kompenseeriks võre negatiivse pinge tõttu tekkinud elektrivälja ja võimaldaks

seega elektronidel pääseda läbi negatiivse potentsiaaliga võre avaustest.

Nagu selgus joonistelt 47. 2 ja 47. 3, on võimalik anoodvoolu tugevuse sõltuvust võrepingest $I_A = f(U_G)$ ja anoodvoolu tugevuse sõltuvust anoodpingest $I_A = f(U_A)$ kujutada graafiliselt tasapindadel asetsevate kõveratega. Anoodvoolu üheaegne sõltuvus võre- ja anoodpingest $I_A = f(U_G, U_A)$ annab aga graafilisel kujutamisel ruumilise pinna. Joonistel 47. 2 ja 47. 3 toodud kõverate järgi ongi koostatud joonisel 47. 4



Joon. 47. 4. Funktsiooni $I_A = f(U_A, U_G)$ kujutav ruumiline pind, anoodvoolu anood- ja võrepingest sõltuvuse graafilise kujutisena.

ruumilises teljestikus kujutatud ruumiline pind. Sellele pinnale on jämedate joontega märgitud needsamad kõverad mis eelmistelgi joonistel 47. 2 ja 47. 3.

§ 48. Võre toime trioodis. Elektronide liikumine trioodi elektroodidevahelises ruumis toimub võre, anoodi ja katoodi omavaheliste pingete ja ruumlaengu poolt tekitatava elektrivälja mõjul. Kahe tasapinnalise elektroodiga elektrontorus

anoodi ja võre vahel oleva elektrivälja pilt (potentsiaalide jaotus) oli toodud joonisel 37. 1. Trioodi elektroodide vahel on elektrivälja pilt keerukam, kuna see väli on tekkinud kahe muutuva pinge — võrepinge ja anoodpinge — mõjul, kujutades resulteerivat välja. Pealegi koosneb võre üksikuist traatidest ega kujuta endast ühtlast tasapinda, mistõttu võrepinge poolt tekitatav elektriväli koosneb neid traate ümbritsevaist elektriväljadest. Ka muutub selle resulteeriva välja pilt niihästi võre- kui ka anoodpinge muutudes. Jälgides võre- ja anoodpinge poolt tekitatava ühise — resulteeriva — välja tugevusi välja üksikuis punktides ja selle välja tugevuse muutumist, võib märgata järgmist:

1. Võrepinge muutumine muudab anoodi ja võre vahel oleva elektrivälja kuju ja tugevust õige vähe.

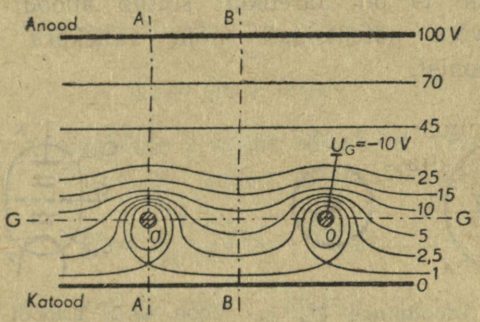
2. Võrepinge muutumine muudab võre ja katoodi vahel oleva elektrivälja kuju ja tugevust suhteliselt palju.

3. Katoodi pinnast väljunud elektronide liikumisele avaldab võretraat kui elektronide liikumise teel olev keha õige väikest mõju. Ta mõjutab ainult võretraadi all asetsevalt, võrdlemisi kitsalt katoodi-ribalt väljuvate elektronide liikumist.

4. Võretraatide-vahelises ruumis tekib ühelt poolt võretraatide potentsiaalide ja teiselt poolt anoodi potentsiaali mõjul resultant-elektriväli, mis määrab katoodilt anoodile suunduvate elektronide hulga ja seega ka katoodilt anoodile kulgeva voolu tugevuse.

Elektroodidevahelise välja pildist parema ettekujutuse saamiseks on joonisel 48.1 kujutatud elektroodidevahelise elektrivälja nivoopinnad, tingimusel, et anoodi ja katoodi vaheline pinge $U_A = 100$ V ning võre ja katoodi vaheline pinge $U_G = -10$ V. Nagu jooniselt nähtub, ei saa joone $A - A$ ja katoodi pinna lõikepunktist väljunud elektronid liikuda ei anoodile ega ka võrele, sest alates sellest punktist kasvab küll väljatugevus võre suunas piki joont $A - A$ kuni potent-

siaali +1 V tähistava nivoopinnani, edasi aga kahaneb ta kuni nullpotentsiaali tähistava nivoopinnani ja veel edasi kuni —10 voldini võre traadi pinnal. Järelikult saaksid elektronid liikuda kuni +1 V potentsiaali omava nivoopinnani, edasi nad aga ei pääseks. Sama nähtus ilmneb ka katoodi pinna nimetatud punkti lähimast ümbrusest väljuvate elektronide suhtes. Joone $B-B$ ja katoodi pinna lõikepunktist ning selle lähemast ümbrusest väljuvad elektronid aga pääsevad anoodile, sest väljatugevus selles piirkonnas pidevalt kasvab (näit. 1,



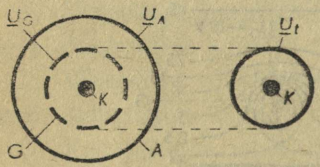
Joon. 48.1. Elektrivälja nivoopinnad trioodis, kui $U_A = 100$ V ja $U_G = -10$ V. $G-G$ võretraatide tasapind.

2,5, 5, 10 jne. volti). Negatiivse võrepinge tõustes see elektronide liikumist soodustav piirkond väheneks ja seega nõrgeneks ka anoodvool I_A. Võrepinge teatava negatiivse väärtuse puhul poleks võre traatide vahel üldse enam niisugust teekonda, mida mööda liikudes väljatugevus oleks pidevalt kasvav, ja seetõttu ei saaks anoodvoolu tekkidagi ($I_A = 0$). Kui aga tõsta anoodpinget, muutuks resulteeriv väljatugevus selliselt, et anoodvool ilmneks uuesti, ta katkeks aga jällegi, kui veelgi tõsta võre negatiivset pinget.

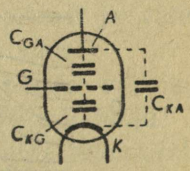
§ 49. Läbitavus. Nagu selgus eelmisest paragrahvist, mõjutavad anoodvoolu I_A tugevust niihästi anoodpinge U_A kui ka võrepinge U_G väärtused. Neist on anoodpinge mõju

märksa väiksem ja nimelt kahel põhjusel. Esiteks asetseb anood katoodist ja seega ka ruumlaengut moodustavaist elektronidest kaugemal kui võre, mistõttu anoodi potentsiaali muutused võre ja katoodi vahel oleva elektrivälja tugevust ja kuju vähe mõjutavad. Teiseks varjestab võre katoodi ümbritsevat ruumi anoodi potentsiaali mõju eest, nagu see on nähtav jooniselt 48. 1.

Neist põhjustest selgub, et anoodi toime anoodvoolule I_A on seda väiksem, mida lähemal katoodile asetseb võre või mida tihedam ta on. Järelikult sõltub anoodi potentsiaali mõju ja võre potentsiaali mõju vahekord elektrontoru konstruktsioonist.



Joon. 49. 1. Anoodpinge U_A ja võrepinge U_G kujutamine ühise, võre tasapinnas mõjuva, ekvivalentse pingena — nn. tüürpingena U_t.



Joon. 49. 2. Trioodi elektroodidevahelised mahtuvused: C_{KG} — katoodi K ja võre vaheline mahtuvus, C_{GA} — võre ja anoodi A vaheline mahtuvus, C_{KA} — katoodi K ja anoodi A vaheline mahtuvus.

Arvutuste teostamiseks on sageli otstarbekohane väljendada anoodvoolu tugevust mõjutavaid võre- ja anoodpinget ühe, ekvivalentse pingena, nn. t ü ü r p i n g e n a U_t. Selleks pingeks loetakse võre traatide tasapinnas mõjuva pinge niisugust väärtust, mis avaldab samasuurt mõju, kui avaldaksid võrepinge U_G ja anoodpinge U_A ühiselt (joon. 49. 1). Tüürpinge leidmiseks tuleb võrepingega liita anoodpinge, korrutatult teguriga, mis väljendab seda, mitmendik osa anoodpingest (kui viimane oleks rakendatud võre tasapinnas)

avaldaks sama mõju kui kogu anoodpinge $\underline{U}_A$ rakendatuna anoodi tasapinnas. Selle teguri ligikaudne väärtus on võrdne elektrontoru katoodi ja anoodi vahelise mahtuvuse C_{KA} ning katoodi ja võre vahelise mahtuvuse C_{KG} jagatisega (joon. 49. 2). Seda tegurit nimetatakse läbitavuseks ja tähistatakse tähega D. Järelikult

$$D = \frac{C_{KA}}{C_{KG}}. \qquad (49.1)$$

Läbitavus on alati väiksem kui üks.

Seega on tüürpinge ligikaudne väärtus

$$\underline{U}_t = \underline{U}_G + D\underline{U}_A. \qquad (49.2)$$

Täpsem matemaatiline analüüs näitab, et suuremate läbitavuste puhul ($D > 0{,}02$) annab õigemaid tulemusi valem

$$\underline{U}_t = \frac{1}{1+D}(\underline{U}_G + D\underline{U}_A). \qquad (49.3)$$

Kui arvestada veel ka võre ja anoodi vahelise mahtuvuse mõju ja väljendada seda tähisega D', kusjuures

$$D' = \frac{C_{KA}}{C_{GA}}, \qquad (49.4)$$

siis

$$\underline{U}_t = \frac{1}{1+D+D'}(\underline{U}_G + D\underline{U}_A). \qquad (49.5)$$

Trioodide talitlustingimuste määramiseks tehtavate arvutuste puhul kasutatakse tavaliselt valemit 49. 2, täpsemate arvutuste puhul aga valemit 49. 3. Valemit 49. 5 kasutatakse peamiselt mitme võrega elektrontorude puhul.

Läbitavuse D abil on võimalik võrrelda anoodpinge ja võrepinge mõju anoodvoolule. Tema väärtust on võimalik määrata ka trioodi staatiliste tunnusjoonte järgi, sest konstantse anoodvoolu I_A puhul on läbitavus D võrdne võrepinge

muutuse ΔU_G ja anoodpinge muutuse ΔU_A suhtega (vt. joon. 55. 1 ja 55. 2):

$$D = \left| \frac{\Delta U_G}{\Delta U_A} \right|_{I_A = \text{konst.}} \tag{49. 6}$$

Selle valemi alusel näitab läbitavus, kui suurt võrepinge muutust on selleks vaja, et tekitada samasuurt anoodvoolu tugevuse muutust, kui tekitaks anoodpinge muutmine ühe voldi võrra.

Läbitavuse D väärtust avaldatakse sageli ka protsentides, s. o. valemiga 49. 1 leitava suhtearvu ja saja korrutisena.

§ 50. Võimendustegur. Nagu selgus paragrahvidest 48 ja 49, on võrepinge mõju anoodvoolule anoodpinge mõjust märksa suurem. Arvu, mis näitab, mitu korda on võrepinge mõju anoodvoolule suurem kui anoodpinge mõju, nimetatakse võimendusteguriks ja tähistatakse kreeka tähega μ. Kui võrepinge muutus ΔU_G võrra muudab anoodvoolu tugevust samapalju kui anoodpinge muutus ΔU_A võrra, siis

$$\mu = \left| \frac{\Delta U_A}{\Delta U_G} \right|_{I_A = \text{konst.}} \tag{50. 1}$$

Nagu valemist nähtub, on võimendustegur nimeta arv, mis näitab, mitme voldi võrra tuleb anoodpinget muuta võrepinge muutumisel ühe voldi võrra, et anoodvoolu tugevus jääks endiseks.

Võrreldes valemit 50. 1 valemiga 49. 6 nähtub, et trioodi võimendustegur võrdub tema läbitavuse pöördväärtusega. Järelikult

$$\mu = \frac{1}{D} \tag{50. 2}$$

ja

$$D = \frac{1}{\mu}. \tag{50. 3}$$

Kolme elektroodiga väikese võimsusega elektrontorude võimendustegur on tavaliselt piirides 4 ... 100, mis vastab läbitavusele 0,25 ... 0,01 ehk 25 ... 1%.

§ 51. Anoodvoolu sõltuvus anood- ja võrepingest. Trioodi võib vaadelda dioodina, millel võre- ja anoodpinged on asendatud võre tasapinda rakendatud tüürpingega $\underline{U}_t$ (joon 49. 1), nagu see selgub paragrahvist 49. Seega kehtib ka trioodi kohta paragrahvis 38 toodud pinge ja voolu vaheline seos. Anoodvool tuleb aga asendada katoodvooluga $\underline{I}_K$, mis trioodi puhul koosneb anood- ja võrevoolu summast. Järelikult

$$\underline{I}_K = \underline{I}_A + \underline{I}_G = K\underline{U}_t^{\frac{3}{2}}. \qquad (51.1)$$

Trioodi puhul tuleb teguri K määramiseks (vt. valemid 38. 2 ja 38. 3) katoodi ja anoodi vaheline kaugus s_{KA} asendada võre tasapinna kaugusega katoodist s_{KG} ja anoodi pind Q_A asendada võre tasapinnale taandatud anoodi pinna väärtusega Q_A'. Silindrilise võre puhul sõltub teguri β väärtus võre ja katoodi raadiuste suhtest (r_G/r_K).

Asetades valemis 51. 1 $\underline{U}_t$ asemele tema väärtuse valemi 49. 2 kohaselt, saame:

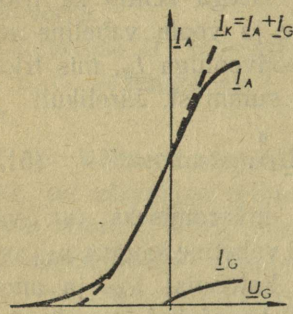
$$\underline{I}_K = \underline{I}_A + \underline{I}_G = 2{,}33 \cdot 10^{-6} \cdot \frac{Q_A'}{s_{KG}^2 \beta^2} (\underline{U}_G + D\underline{U}_A)^{\frac{3}{2}}. \qquad (51.2)$$

Anoodvoolu tugevuse $\underline{I}_A$ leidmiseks tuleb katoodvoolust $\underline{I}_K$ lahutada võrevool $\underline{I}_G$, mis on tavaliselt nõrk ja negatiivse võrepinge puhul puudub hoopis.

Joonistel 47. 2 ja 47. 3 toodud trioodi staatilised tunnusjooned $\underline{I}_A = f(\underline{U}_G)$ ja $\underline{I}_A = f(\underline{U}_A)$ võib joonestada valemi 51. 2 järgi teostatud arvutusel leitavate andmete najal, kui on teada trioodi elektroodide mõõted ja nende vahekaugused. Selleks tuleb lugeda $\underline{U}_A$ (või $\underline{U}_G$) konstantseks ja leida valemi 51. 2 abil anoodvoolu tugevused mitmesuguste vabalt valitud $\underline{U}_G$ (või $\underline{U}_A$) väärtuste kohta.

Valemi 51. 2 järgi saab anoodvoolu tugevuse leida ainult siis, kui võre on negatiivne ($U_G < 0$), sest ainult siis on $I_A = I_K$. Kui $U_G > 0$, siis ilmneb ka võrevool I_G, mille tugevus on teadmata.

Mõõtmise teel saadavad trioodi tunnusjooned erinevad arvutuse teel saadavaist samadel põhjustel kui dioodigi tunnusjooned (§ 39). Neile põhjustele lisanduvad trioodi juures veel järgmised: a) valemis 51. 2 esineva U_t väärtus on võetud arvutuse lihtsustamiseks valemist 49. 2, mitte aga täpsemaid tulemusi andvaist valemitest 49. 3 või 49. 5; b) asetades trioodi võre ja anoodi asemele ekvivalentse elektroodi, eeldatakse, et selle tasapinna kõigi punktide ja katoodi vahel on ühesugune pinge U_t, mida aga tegelikult pole, seetõttu pole ühtlane ka katoodi ja nimetatud tasapinna vaheline elektriväli, nagu see nähtub jooniselt 48. 1. Kui võrel on kõrge negatiivne potentsiaal, kujunevad võretraatide all laiad katoodipiirkonnad, mis ei võta emissioonvoolu tekitamisest osa, ja anoodvool moodustub ainult võretraatide vahekohas asetsevaist piirkondadest emiteerunud elektronidest. Mida kõrgem on võretraatide negatiivne potentsiaal, seda väiksemaks need (sageli *emiteerivaiks saarekesteks* nimetatavad) piirkonnad jäävad (§ 48). Matemaatiline analüüs näitab, et saarekeste



Joon. 51. 1. Trioodi arvutatud ja tegelik I_A-U_G-tunnusjoon. Pideva joonega on näidatud trioodi mõõtmistel saadud tunnusjoon, kriipsjoonega — arvutuse teel saadud kõver. Trioodi mõõtmistel saadava tunnusjoone algus ulatub katoodil emiteerivate saarekeste kujunemise tõttu palju kaugemale võre negatiivse pinge piirkonda kui arvutuse teel saadava kõvera algus.

kujunemise tõttu ei vasta I_A-U_G-tunnusjoone alumise osa kõverus $^3/_2$-astme kõverale, vaid rohkem $^5/_2$-astme kõverale.

Joonisel 51. 1 on kriipsjoontega kujutatud arvutuse teel saadav kõver ja pideva joonega — trioodi mõõtmistel saadav kõver. Võre kõrgemate negatiivsete pingete piirkonnas on tegeliku kõvera lahkuminek arvutuse teel saadavast kõverast (ulatumine kaugemale vasakule) seda suurem, mida hõredam on trioodi võre ja mida suurem on seetõttu tema läbitavus.

§ 52. Sisetakistus. Trioodi võrepinge konstantsuse puhul põhjustab anoodpinge muutmine anoodvoolu tugevuse muutumist. Nende muutuste ulatuste suhet nimetatakse trioodi s i s e t a k i s t u s e k s ja märgitakse tähisega R_i. Järelikult

$$R_i = \left| \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \right|_{U_G = \text{konst.}} . \qquad (52.1)$$

Sisetakistuse väärtus väljendatakse oomides, seepärast tuleb valemisse anoodpinge muutused võtta voltides ja anoodvoolu muutused amprites.

Kolme elektroodiga elektrontoru sisetakistuse väärtus sõltub niihästi tema ehitusviisist kui ka talitlustingimustest. Elektrontorude tehnilises andmestikus antakse tavaliselt sisetakistuste väärtus elektrontoru tunnusjoone sirgosa kohta.

Graafiliselt väljendab sisetakistuse R_i väärtus I_A-U_A-tunnusjoone ja abstsiss-telje vahelise nurga (tunnusjoone tõusunurga) kootangensit.

Sõltuvalt trioodide tüübist on nende sisetakistuse väärtused 800 ... 110 000 oomi piirides.

§ 53. Tõus. Anoodvoolu sõltuvust võrepingest (konstantse anoodpinge puhul) iseloomustab elektrontoru t õ u s, mida tähistatakse tähega S, kusjuures

$$S = \left| \frac{\Delta I_A}{\Delta U_G} \right|_{U_A = \text{konst.}} . \qquad (53.1)$$

Tõusu väärtust väljendatakse milliamprites voldi kohta [mA/V].

Graafiliselt väljendab tõus I_A-U_G-tunnusjoone tõusu koordinaadistiku abstsiss-telje suhtes ja võrdub arvuliselt selle tõusunurga tangensiga.

Et trioodi I_A-U_G-tunnusjoon on kõver, siis on ta tõus igas punktis isesugune. Elektrontorude tehnilises andmestikus antakse tavaliselt tõus tunnusjoone sirgosa kohta.

Väikese võimsusega võimendustorude tõus sõltuvalt trioodi tüübist on piirides 0,4 ... 11 mA/V.

§ 54. Trioodi omadusi väljendavate tunnussuuruste omavaheline seos. Trioodi omadusi iseloomustavad tunnussuurused — läbitavus D, tõus S ja sisetakistus R_i — väljendavad trioodis mõjuva kolme elektrilise suuruse I_A, U_A ja U_G omavahelist seost. Barkhausen näitas esimesena, et trioodi nende kolme tunnussuuruse korrutis

$$DSR_i = 1, \tag{54.1}$$

kus S on tõus amprites voldi kohta [A/V],

D — läbitavus nimeta arvuna (mitte protsentides) ja

R_i — sisetakistus oomides [Ω].

Teades kahte neist kolmest trioodi tunnussuurusest, võime kolmanda leida arvutuse teel. Näiteks

$$D = \frac{1}{SR_i}. \tag{54.2}$$

Asendades läbitavuse D võimendusteguriga μ ja teades, et $\mu = 1/D$, saadakse

$$\mu = SR_i. \tag{54.3}$$

Seda valemit kasutatakse trioodi talitlustingimuste määramisel teostatavais arvutustes õige sageli.

Mõnikord kasutatakse arvutustes ka nn. elektrontoru

hindetegurit ehk headusarvu, mida tähistatakse tähega G. Trioodi hindetegur

$$G = \mu S \text{ mW/V}^2. \qquad (54.4)$$

Trioodi hindetegur väljendab elektrontoru poolt antavat kasulikku võimsust millivattides, sõltuvalt võrepinge ruudust.

Trioodi võrevoolu ja võrepinge seose väljendamiseks kasutatakse sageli võrevoolu-tõusuks nimetatavat tunnussuurust, mille väärtus

$$S_G = \left| \frac{\Delta I_G}{\Delta U_G} \right|_{U_A = \text{konst.}} \qquad (54.5)$$

Mõnikord kasutatakse võrevoolu-tõusu asemel ka ta pöördsuurust — võre-sisetakistust

$$R_{iG} = \frac{1}{S_G} = \left| \frac{\Delta U_G}{\Delta I_G} \right|_{U_A = \text{konst.}} \qquad (54.6)$$

Võrel negatiivse pinge puhul on $R_{iG} = \infty$. Tegelikult on ta, tingituna elektroodidevahelisest isolatsioonist, 50 ... 200 MΩ piirides. Positiivse võrepinge puhul on (sõltuvalt trioodi tüübist) $R_{iG} = 10\,000 \ldots 100\,000$ Ω.

Elektrontoru omadusi iseloomustavaid suurusi D, S, R_i ja μ nimetatakse sageli elektrontoru parameetriteks ja nad iseloomustavad elektrontoru tunnusjoone lõikude asendit funktsioonide $I_A = f(U_G)$ või $I_A = f(U_A)$ graafilises kujutises.

§ 55. Trioodi parameetrite leidmine staatilistest tunnusjoontest. Trioodi parameetrite leidmise viis tema staatilisest I_A-U_A-tunnussarjast antud talitluspunkti kohta on toodud joonisel 55. 1. Talitluspunkti A asukoht graafikus on määratud anoodpingega $U_A = 160$ V ja võrepingega $U_G = -1$ V. Läbi talitluspunkti tõmmatakse sirge $\overline{BAE}$, millel $I_A = \text{konst.}$, ja sirge $\overline{CAF}$, millel $U_A = \text{konst.}$ Sirge $\overline{BAE}$ ja tunnusjoonte $U_G = 0$ ja $U_G = -2$ V lõikepunktidele vastavad

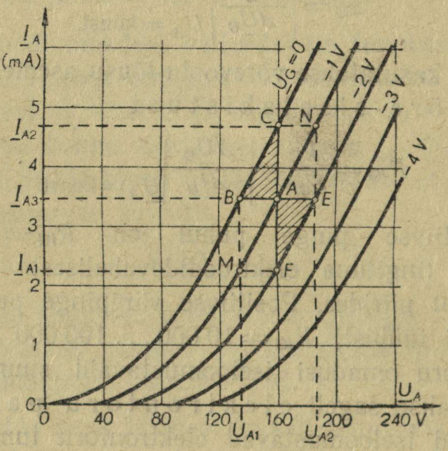
anoodpinged $\underline{U}_{A1} = 135$ V ja $\underline{U}_{A2} = 186$ V, seega $\Delta\underline{U}_A = \underline{U}_{A2} - \underline{U}_{A1} = 186 - 135 = 51$ V.

Järelikult on võimendustegur

$$\mu = \frac{\Delta\underline{U}_A}{\Delta\underline{U}_G} = \frac{51}{2} = 25{,}5$$

ja läbitavus

$$D = \frac{\Delta\underline{U}_G}{\Delta\underline{U}_A} = \frac{2}{51} = 0{,}0392.$$



Joon. 55. 1. Trioodi staatiline $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnussari trioodi parameetrite määramiseks talitluspunkti A kohta, kus $\underline{U}_A = 160$ V ja $\underline{U}_G = -1$ V.

Sirge $\overline{CAF}$ ja tunnusjoonte $\underline{U}_G = 0$ ning $\underline{U}_G = -2$ V lõikepunktidele vastavad anoodvoolu tugevused $\underline{I}_{A1} = 2{,}25$ mA ja $\underline{I}_{A2} = 4{,}69$ mA, seega $\Delta\underline{I}_A = \underline{I}_{A2} - \underline{I}_{A1} = 4{,}69 - 2{,}25 = 2{,}44$ mA. Järelikult tõus

$$S = \frac{\Delta\underline{I}_A}{\Delta\underline{U}_G} = \frac{2{,}44}{2} = 1{,}22 \text{ mA/V}$$

ja sisetakistus talitluspunkti läbiva tunnusjoone lõigu $\overline{MN}$ kohta

$$R_i = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \approx 20\,900\ \Omega$$

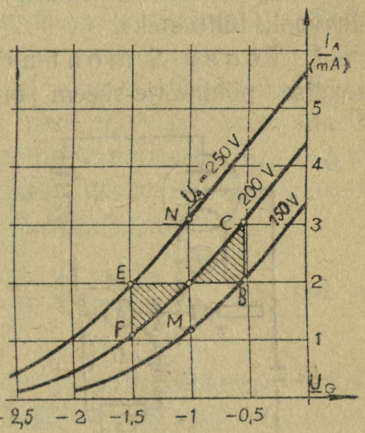
ning elektrontoru hindetegur

$$G = \mu S = 25{,}5 \cdot 1{,}22 = 31{,}1\ \text{mW/V}^2.$$

Analogiliselt on võimalik leida trioodi parameetrid ka I_A-U_G-tunnussarjast (joon. 55. 2).

Saadavad parameetrid on keskmised tunnusjoone teatava pikkusega osa kohta, sest tunnusjooned pole sirged.

Parameetreid on võimalik leida ka siis, kui tunnussari koosneb ainult kahest tunnusjoonest.



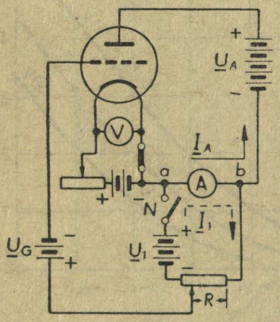
Joon. 55. 2. Trioodi staatiline I_A-U_G-tunnussari trioodi parameetrite määramiseks talitluspunkti A kohta, kus $U_A = 200$ V ja $U_G = -1$ V.

§ 56. Trioodi parameetrite leidmine mõõtmise teel. Joonisel 47. 1 kujutatud lülituse abil on võimalik üles võtta trioodi staatilist tunnussarja, millest saab leida trioodi parameetrid. Staatilise tunnussarja ülesvõtmine on aga aegaviitev toiming. Nagu selgus eelmisest paragrahvist, on võimalik trioodi parameetrid leida ka tunnussarjas leiduva kolme punkti A, B ja C (joon. 55. 1 või 55. 2) abil, mille leidmiseks on vaja teostada ainult kolm mõõtmislugemist. Need mõõtmised teostatakse niisuguses järjekorras, nagu see iga lülituse puhul osutub lihtsaimaks (näit. järjekorras B, C ja A), ja saadud andmete najal arvutataksegi trioodi parameetrid.

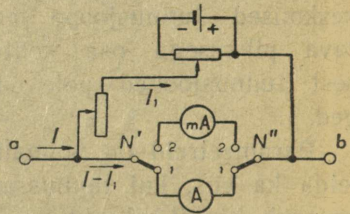
Tunnusjoone antud punkti kohta trioodi parameetrite täpsemaks mõõtmiseks kasutatakse kompensatsioonlülitust, mille puhul parameetrite määramiseks vajalikud pinge ja voolu muutused on väikesed. See lülitus osutub otstarbekaks ka siis, kui mõnesugusel põhjusel pole võimalik mõõtmise teostamiseks muuta anoodpinget (näit. saatejaamades kõrge anoodpingega töötavail elektrontorudel).

Kompensatsioonlülitused liigituvad alalisvoolu- ja vahelduvvoolu-lülitusteks.

1. Tõusu S mõõtmine alalisvooluga. Mõõteseadise põhimõtte-skeem on toodud joonisel 56. 1. Joo-



Joon. 56. 1. Tõusu S mõõtmine kompensatsioonmeetodil. Kui $\Delta I_A = I_1$, siis $S = \frac{1}{R}$. Punktide a ja b vahel võib ampermeetri A asemel kasutada kä joonisel 56. 2 toodud kompensatsioonlülitust.



Joon. 56. 2. Skeem lülitusest väikese mõõtepiirkonnaga mõõteriista kasutamiseks suure voolutugevuse puhul esinevate väikeste voolutugevuse muutuste ΔI_A mõõtmiseks. Kui lülitid N' ja N'' on asendis *1*, reguleeritakse voolud I ja I_1 ligikaudu võrdseiks, kui lülitid on asendis *2*, teostatakse voolu I tugevuse muutuste ΔI mõõtmist.

nisel näidatud anood- ja võrepinge allikate pingeväärtused määravad talitluspunkti asukoha tunnusjoonel, mille kohta soovitakse määrata tõusu S väärtust. Anoodvoolu-ampermeetrile A on ühendatud rööbiti pingeallikast U_1, potentsiomeetrist R ja lülitist N koosnev vooluring. Potentsiomeetri

liugkontakt on ühendatud võrepinge allika U_G kaudu võrega. Kui lüliti N on lahti, siis saab triood talitluspunktile vastava võre- ja anoodpinge. Neile vastavalt kulgeb ahelas ka teatav anoodvool I_A, mille tugevust näitab anoodvoolu-ampermeeter A. Lüliti N lülitamisega tekib abivooluringis vool I_1, mis läbib anoodvoolu-ampermeetrit samas suunas kui anoodvoolgi, suurendades järelikult selle hälvet. Nüüd nihutatakse potentsiomeetri liugkontakti vasakule, mille tagajärjel võre negatiivne pinge tõuseb ja anoodvool I_A nõrgeneb, kuni mõõteriista osut saavutab endise hälbe. Potentsiomeetri niisuguse asendi puhul ei muutu mõõteriista hälve lülitit N lülitades ega lahutades, sest $\Delta I_A = I_1$. Seda anoodvoolu muutust esilekutsunud võrepinge muutus on $\Delta U_G = I_1 R$. Teades, et $\Delta I_A = S \Delta U_G$, ja teostades vastavad asendamised, leitakse, et $\Delta I_A = S \Delta U_G = S I_1 R = S \Delta I_A R$, millest

$$S = \frac{\Delta I_A}{\Delta I_A R} = \frac{1}{R} \frac{\text{A}}{\text{V}} = \frac{10^3}{R} \frac{\text{mA}}{\text{V}}. \qquad (56.1)$$

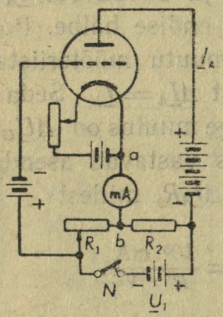
Abivooluringi toiteallika pinge ja potentsiomeetri takistuse väärtused valitakse sõltuvalt sellest, kui suure ΔI_A puhul soovitakse teostada mõõtmist.

Kui lülituses sisalduv anoodvoolu-ampermeeter ei reageeri küllaldaselt väikestele anoodvoolu muutustele ΔI_A, siis võib tema asemele (et teostada täpsemat ΔI_A mõõtmist) ühendada joonisel 56. 2 toodud lülituse. Selle nn. kompenseeriva vooluringiga varustatud mõõteriista töötamise põhimõte selgub jooniselt 56. 2.

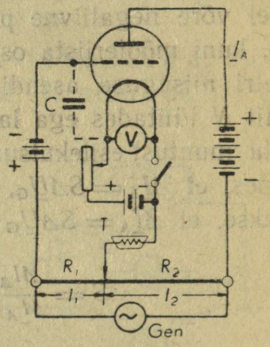
2. Võimendusteguri μ mõõtmine alalisvooluga. Selleks kasutatava seadme (vt. skeem joonisel 56. 3) abivooluringis sisalduva lüliti N lülitamisel tekivad anoodvooluringi ühendatud takistis R_2 ja võrevooluringi ühendatud takistis R_1 pingelangud. Takisti R_1 takistuse muutmisega reguleeritakse temas tekkiv pingelang ΔU_G

nii suureks, et sellest pingest tingitud anoodvoolu nõrgenemine tasakaalustaks takistis R_2 tekkiva ja anoodpingele lisanduva pingelangu $\Delta \underline{U}_A$. Niisugusel juhul jääks anoodvool $\underline{I}_A$ konstantseks ja võimendustegur leitakse anoodpinge juurdekasvu võrepinge juurdekasvuga jagades:

$$\mu = \frac{\Delta \underline{U}_A}{\Delta \underline{U}_G} = \frac{\underline{I}_1 R_2}{\underline{I}_1 R_1} = \frac{R_2}{R_1}. \qquad (56.2)$$



Joon. 56.3. Võimendusteguri μ mõõtmiseks alalisvooluga kasutatava lülituse skeem. Kui lüliti N lülitamine või lahutamine ei muuda anoodvoolu tugevust ($\underline{I}_A$ = = konst.), siis on pingelang takistis R_1 võrdne abivooluringis kulgeva voolu poolt tekitatud pingelanguga takistis R_2, jagatud võimendusteguriga. Seega $\mu = \frac{R_2}{R_1}$.



Joon. 56.4. Võimendusteguri μ mõõtmiseks vahelduvvooluga kasutatava lülituse skeem: T — väikese takistusega kuuldetoru; *Gen* — väikese sisetakistusega helisagedusgeneraator. Kaliibritud traadi osade pikkused on märgitud tähistega l_1 ja l_2 ning nende osade takistused tähistega R_1 ja R_2.

Abivooluringi pingeallika pinge ja takistite R_2 ning R_1 takistused valitakse niisugused, et pingete juurdekasvud $\Delta \underline{U}_A$ ja $\Delta \underline{U}_G$ oleksid küllaldaselt väikesed. Anoodvoolu konstantsuse täpsemaks säilitamiseks võidakse punktide a ja b vahele ühendada ka joonisel 56.2 toodud kompenseerivat vooluringi omav mõõteriist.

3. Võimendusteguri μ mõõtmine vahelduvvooluga. Joonisel 56. 4 on kujutatud lülitus võimendusteguri mõõtmiseks vahelduvvooluga. Selles lülituses on osutmõõteriista asemel kasutatud kuuldetoru T, mis peab suutma taluda teda läbivat anoodvoolu I_A ja mille takistus peab olema väike. Joonisel 56. 3 kujutatud lülituses kasutatavate takistite R_2 ja R_1 asemel on siin kasutatud liugkontaktiga varustatud kaliibritud traati. Helisagedusgeneraator *Gen* peab omama väikest väljetakistust, kuna tema kooremtakistiks on väikese takistusega kaliibritud traat. Sobiva kuuldetoru või helisagedusgeneraatori puududes võib neid vooluringi ühendada ka läbi suure ülekandesuhtega transformaatori.

Kui traadil libisev kontakt asetseb niisuguses punktis, et kuuldetoruga tekitatava heli valjus on null, siis

$$\mu = \frac{R_2}{R_1} = \frac{l_2}{l_1}. \qquad (56.3)$$

Suure võimendusteguriga elektrontorude mõõtmisel tuleb traadi R asemel kasutada kaht takistit, milledest üks on reguleeritav.

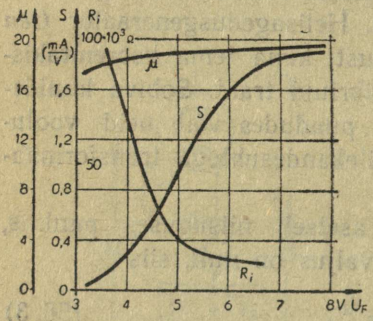
Mõõtmise tagajärgi mõjutavad elektrontoru elektroodidevahelised mahtuvused C_{KG} ja C_{KA}. Nende mõju kõrvaldamiseks tuleks need tasakaalustada võre ja katoodi vahele ühendatava kondensaatoriga C, mille mahtuvus oleks leitav valemist:

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{C_{KG} + C}{C_{KA}}. \qquad (56.4)$$

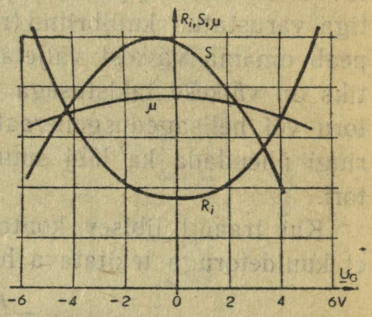
§ 57. Trioodi parameetrite sõltuvus talitlustingimustest. Elektrontoru parimaks ärakasutamiseks tuleb talle valida niisugused talitlustingimused, milledes ta parameetrid omaksid soodsamaid väärtusi. Talitlustingimusi määravaiks suurusteks on trioodi küttepinge, anoodpinge ja võrepinge, mis määravad ka talitluspunkti asukoha tema tunnusjoonel.

Joonisel 57. 1 on toodud trioodi 6C5 parameetrite S, μ ja R_i mõõtmise teel määratud sõltuvus küttepingest U_F, kui U_A ja U_G on kostantsed.

Tõusu S muutumine on tingitud peamiselt katoodi tugitraatide jahutavast toimest, mille tõttu katoodi tegevpikkus madala küttepinge puhul on väike (§ 19).



Joon. 57. 1. Trioodi 6C5 parameetrite μ, S ja R_i sõltuvus küttepingest U_F. Küttepinge nimiväärtus on 6,3 V. Küttepinge tõustes üle nimiväärtuse muutuvad parameetrid õige vähe.



Joon. 57. 2. Trioodi УБ-152 parameetrite μ, S ja R_i sõltuvus võrepingest U_G. Toru УБ-152 nimi-talitlustingimused on: $U_F = 2$ V, $I_F = 0{,}11$ A, $U_A = 120$ V, $U_G = -4$ V, $I_A = 6$ mA, $P_A = 2$ W, millede juures parameetrid: $\mu = 12$, $S = 2$ mA/V, $R_i = 6000$ Ω. Elektroodidevahelised mahtuvused: $C_{GA} = 3{,}8$ pF; $C_{KG} = 2{,}9$ pF ja $C_{KA} = 3{,}3$ pF.

Brakhauseni valemi (54.1) järgi sisetakistus $R_i = \mu/S$, seetõttu tema väärtus muutub vastupidiselt tõusu S väärtuse muutumisele.

Nagu nähtub jooniselt, ei muutu trioodi 6C5 parameetrid märgatavalt küttepinge tõustes üle nimiväärtuse, milleks on 6,3 V. Teatavasti väheneb aga katoodi iga küttepinge tõstmisega tunduvalt.

Joonisel 57. 2 on toodud trioodi УБ-152 mõõtmise teel leitud parameetrid sõltuvalt võrepingest U_G, kui U_A ja U_F

on konstantsed, ja joonisel 57.3 on toodud trioodi parameetrid sõltuvalt anoodpingest $\underline{U}_A$, kui $\underline{U}_G$ ja U_F on konstantsed.

Nagu selgub jooniseilt, sõltub võimendusteguri μ väärtus trioodi talitlustingimustest vähe, võrreldes teiste parameetritega.

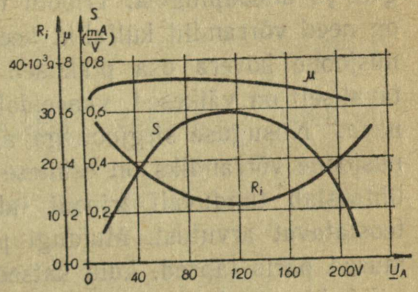
Suurema võimsuse saamiseks ühendatakse mitu trioodi rööbiti. Niisuguse rööbiti ühendatud trioodide rühma parameetrid võib leida järgmiselt:

$$S = nS_1, \qquad (57.1)$$

$$R_i = \frac{R_{i1}}{n}, \qquad (57.2)$$

$$\mu = \mu_1, \qquad (57.3)$$

kus n on rööbiti ühendatud trioodide arv ja indeksiga *1* on tähistatud üksiku trioodi parameetrid.



Joon. 57.3. Trioodi parameetrite μ, S ja R_i sõltuvus anoodpingest $\underline{U}_A$. Toru nimi-talitlustingimused on: $\underline{U}_F = 1{,}2$ V, $\underline{I}_F = 0{,}08$ A, $\underline{U}_A = 60$ V, $\underline{U}_G = 0$ V, $\underline{I}_A = 2{,}6$ mA, $\underline{P}_A = 0{,}2$ W. Elektroodidevahelised mahtuvused: $C_{GA} = 2$ pF, $C_{KG} = 2{,}5$ pF, $C_{KA} = 3$ pF.

Kui aga rööbiti ühendatavate trioodide parameetrid pole võrdsed, siis leitakse kahest trioodist koosneva rühma parameetrid järgnevate valemite abil:

$$S = S_1 + S_2, \qquad (57.4)$$

$$R_i = \frac{R_{i_1} R_{i_2}}{R_{i_1} + R_{i_2}}, \qquad (57.5)$$

$$\mu = \frac{\mu_1 R_{i_2} + \mu_2 R_{i_1}}{R_{i_1} + R_{i_2}}, \qquad (57.6)$$

kus indeksiga *1* on tähistatud ühe ja indeksiga *2* teise trioodi parameetrid.

§ 58. Võrrandid ideaalsete tunnusjoonte kohta. Analüütiliste arvutuste teostamiseks on vaja teada trioodi tunnusjoone võrrandit, mis määraks anoodvoolu sõltuvuse võrepingest ja anoodpingest. Trioodi tunnusjoone kõvera osa kohta on need võrrandid küllaltki keerukad. Võttes arvesse, et tunnusjoone kõvera osa pikkused sirgosa pikkusega võrreldes tavaliselt on väikesed, vaadeldakse kogu tunnusjoont sirgjoonena. Niisuguse sirgjoonega asendatud, nn. „ideaalse" tunnusjoone võrrandiks on esimese astme võrrand. See asjaolu lihtsustab tunduvalt trioodi talitlustingimuste määramiseks teostatavat arvutust. Muidugi pole saadavad arvutuse tulemused päris täpsed, kuid katsed on tõestanud, et need kõrvalekaldumised on suhteliselt väikesed.

Joonisel 58. 1 on kujutatud pideva joonega anoodpingele $\underline{U}_A$ vastav trioodi staatiline $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoon. Nagu nähtub jooniselt, on anoodvool $\underline{I}_A \approx 0$ punktis A. Pikendades tunnusjoone sirgosa kuni $\underline{U}_G$-teljeni, saadaksegi ideaalne tunnusjoon, mis lõikab $\underline{U}_G$-telge punktis B.

Sirge $\overline{BCD}$ kohta kehtib võrrand:

$$\underline{I}_A = S\underline{U}_G + \underline{I}_{A0}, \qquad (58.1)$$

kus $\underline{I}_{A0}$ on anoodvoolu tugevus, kui $\underline{U}_G = 0$, tõus S (samuti kui teisedki trioodi parameetrid) kehtib tegeliku tunnusjoone sirgosa kohta ja on ideaalse tunnusjoone puhul konstantne kogu tunnusjoone ulatuses.

Anoodvool

$$\underline{I}_{A0} = \overline{OC} = \overline{OB}\,\mathrm{tg}\,\alpha = (D\underline{U}_A - \underline{U}_{G0})S, \qquad (58.2)$$

kus $\underline{U}_{G0}$ on joonlõigule $\overline{AB}$ vastav pinge.

Järelikult oleks ideaalse tunnusjoone abil arvutatav anoodvool:

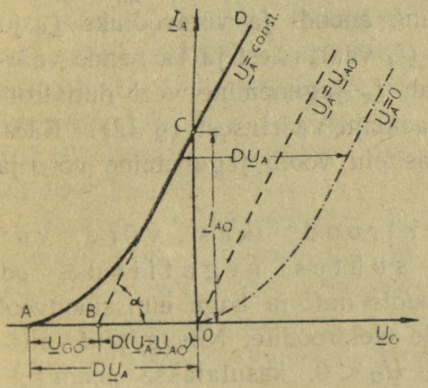
$$\underline{I}_A = S\underline{U}_G + S(D\underline{U}_A - \underline{U}_{G0}) = \\ = S(\underline{U}_G - \underline{U}_{G0} + D\underline{U}_A). \qquad (58.3)$$

Asetades sellesse võrrandisse $\underline{I}_A = 0$ ja $\underline{U}_G = 0$, selgub, et teljestiku nullpunktist algav ideaalne tunnusjoon (mis joonisel 58. 1 on kujutatud kriipsjoonega) vastab anoodpingele:

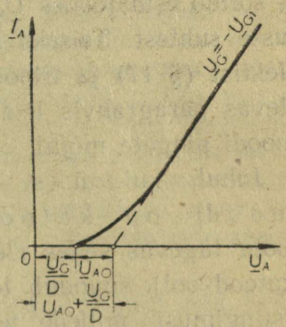
$$\underline{U}_A = \frac{\underline{U}_{G0}}{D}, \tag{58. 4}$$

missugust anoodpinget tähistatakse tähega $\underline{U}_{A0}$. Järelikult:

$$\frac{\underline{U}_{G0}}{D} = \underline{U}_{A0} \text{ ja } \underline{U}_{G0} = D\underline{U}_{A0}. \tag{58. 5}$$



Joon. 58. 1. $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoonе järgi ideaalse tunnusjoone leidmine.



Joon. 58. 2. $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone järgi ideaalse tunnusjoone leidmine. Tunnusjoon on üles võetud võrepinge $\underline{U}_G < 0$ juures.

Samale joonisele on märgitud kriips-punktjoonega ka trioodi teoreetiline tunnusjoon, kui $\underline{U}_A = 0$.

Joonisel 58. 2 on märgitud pideva joonega trioodi staatiline $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoon, kui võrepinge $\underline{U}_G < 0$, ja kriipsjoonega — ideaalne tunnusjoon samal tingimusel.

Asetades võrrandisse 58. 3 $\underline{U}_{G0}$ asemele $D\underline{U}_{A0}$, saadakse ideaalse $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoone võrrand:

$$\underline{I}_A = S(\underline{U}_G - D\underline{U}_{A0} + D\underline{U}_A) = S[\underline{U}_G + D(\underline{U}_A - \underline{U}_{A0})] =$$

$$= \frac{1}{R_i}\left(\underline{U}_A - \underline{U}_{A0} + \frac{\underline{U}_G}{D}\right). \qquad (58.6)$$

Kas pinge $\underline{U}_{G0}$ või $\underline{U}_{A0}$ väärtus leitakse trioodi mõõtmisel saadud tunnusjoonte abil ja teades ühte, on võimalik arvutada teist valemi 58. 5 abil.

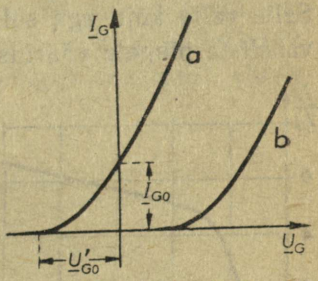
§ 59. Voolujaotus trioodis. Tuleb pidada silmas, et pingete $\underline{U}_G$ ja $\underline{U}_A$ väärtustest sõltub ka katoodvoolu $\underline{I}_K$ tugevus, kuna katoodvoolu jagunemine anood- ja võrevooluks $\underline{I}_A$ ja $\underline{I}_G$ sõltub esmajoones $\underline{U}_G$ ja $\underline{U}_A$ väärtustest ja ka nende väärtuste suhtest. Teiseks sõltub $\underline{I}_K$ jagunemine veel dünatronefektist (§ 17) ja trioodi vaakumi väärtusest (§ 12). Käesolevas paragrahvis leiab käsitelu voolu jagunemine võre ja anoodi pingete mõjul.

Juhul, kui üks elektrood (kas võre või anood) on katoodi suhtes negatiivne, on voolu tugevus selles elektroodis null ja kogu emissioonvool (katoodvool) suundub teisele elektroodile. Niisuguseid talitlustingimusi, millede puhul $\underline{U}_G < 0$, kasutatakse peamiselt helisagedusvõimendajates.

Et hoida võrevoolu $\underline{I}_G$ tugevust nullil, tuleb võrele anda katoodi suhtes väike (2...3 V) negatiivne pinge. Võrepinge $\underline{U}_G = 0$ puhul ilmnevat võrevoolu põhjustavad katoodist väljuvate elektronide algkiirused. Seda võrevoolu märgitakse tähisega $\underline{I}_{G0}$ ja negatiivset võrepinget, mille puhul $\underline{I}_G = 0$ — võre sulgepinget — tähisega $\underline{U}_{G0}'$ (joon. 59. 1).

Pingevaba võre puhul ilmneva võrevoolu $\underline{I}_{G0}$ tugevus sõltub peamiselt trioodi ehitusest. Mida tihedam on trioodi

võre ja mida lähemal asetseb ta katoodile, seda tugevam on I_{G0}. Ka sõltub viimane katoodi- ja võrematerjali kontaktpotentsiaalist [1]. Tavaliselt kasutatavate materjalide puhul on kontaktpotentsiaali mõju suunatud võrevoolule vastu, mistõttu kõrge kontaktpotentsiaaliga elektroodide puhul on U_{G0}' madal. Aktiveeritud katoodide puhul pole katoodi ja võre vahelise kontaktpotentsiaali väärtus püsiv ja seetõttu võivad trioodi töötamisel koos katoodi omadustega muutuda ka U_{G0}' ja I_{G0} väärtused. Mõnede katoodimaterjalide puhul (näit. baariumiga kaetud katoodidel) on kontaktpotentsiaal niivõrd kõrge, et võrevool saab tekkida alles siis, kui võrele anda väljastpoolt positiivset pinget.



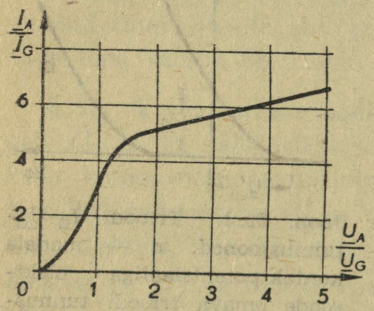
Joon. 59. 1. Trioodi I_G-U_G-tunnusjooned: *a* — madala kontaktpotentsiaaliga elektroode omava trioodi tunnusjoon; *b* — kõrge kontaktpotentsiaaliga elektroode omava ehk nn. „parempoolset" võrevoolu-tunnusjoont omava trioodi võrevoolu-tunnusjoon.

Katoodi temperatuurist ja anoodpingest sõltuvad I_{G0} ja U_{G0}' väärtused vähe. Katoodi temperatuuri tõstmisel I_{G0} ja U_{G0}' väärtused suurenevad, anoodpinge tõstmisel aga vähenevad.

Vahetult kõetava katoodi puhul, millel trioodi võre on ühendatud küttevooluallika miinusklemmiga, omab võre negatiivset potentsiaali katoodi kõigi punktide suhtes, välja arvatud katoodi see ots, mis on ühendatud küttevooluallika miinusklemmiga. Selle tõttu on vahetult kõetavail trioodidel I_{G0} ja U_{G0}' väärtused tunduvalt väiksemad kui kaudselt kõetavail trioodidel.

[1] V. A. Mihelson. Füüsika II. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. VI peatükk § 6: Kontakt-potentsiaalid. Kaksikkihid.

Katoodist ja anoodist isoleeritud võrel on temale langevate elektronide tõttu katoodi suhtes negatiivne potentsiaal. Juhul, kui võrepinge on positiivne, anoodpingest aga siiski madalam ($U_A > U_G > 0$), sõltub voolujaotus trioodi elektroodidevahelise välja kujust. Selle välja kuju aga sõltub trioodi ehitusest ja elektroodidevaheliste pingete väärtustest. Kui tõsta teatava trioodi elektroodidevahelisi pingeid ühe ning sama arvu kordselt, siis ei muutu temas elektroodidevahelise välja kuju ja seega ei muutu ka voolujaotus elektroodide vahel. Järelikult ei sõltu voolujaotus trioodis elektroodidevaheliste pingete absoluutsest kõrgusest, vaid nende pingete väärtuste suhetest.



Joon. 59. 2. Katoodvoolu I_K jagunemine anoodvooluks I_A ja võrevooluks I_G sõltuvalt anoodpinge ja võrepinge suhte U_A/U_G väärtusest.

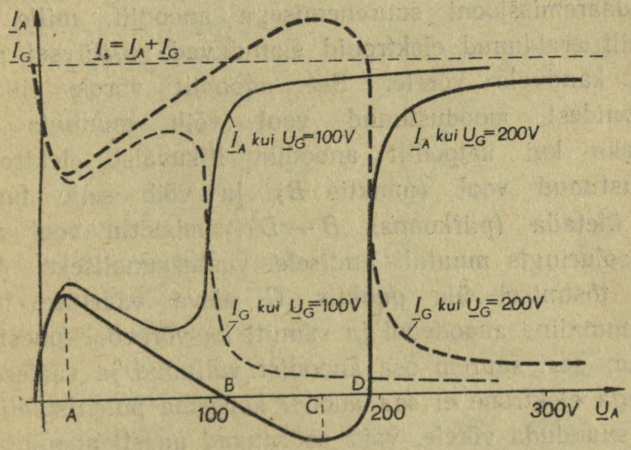
Joonisel 59. 2 on toodud suhte I_A/I_G sõltuvus U_A ja U_G väärtuste suhtest teatud tüüpi trioodis. Nagu nähtub jooniselt, suureneb suhe I_A/I_G jõudsasti kuni $U_A = U_G$ ja sellest pisut veel edasigi. Suhte U_A/U_G edasi suurenedes suureneb aga suhe I_A/I_G aeglaselt.

Talitlustingimusi, mil $U_A > U_G > 0$, kasutatakse suursagedusvõimendajates ja -generaatorites.

Voolujaotust trioodis mõjutavad veel sekundaaremissiooni nähtus ja elektrontorus leiduv gaas, milliste põhjuste juures lähemalt peatutakse järgnevais paragrahvides.

§ 60. Sekundaaremissiooni toime trioodis. Tavalistes talitlustingimustes ületab trioodis anoodi ja katoodi vaheline pinge sekundaaremissiooni ilmnemiseks vajalikku pinget

(§ 17), s. o. pinget, mille mõjul tekib anoodilt sekundaaremissioon. Anoodist sekundaaremissiooni tõttu väljunud elektronidel on väike algkiirus (§ 17) ja seetõttu pöörduvad nad anoodi kõrge positiivse pinge puhul anoodile tagasi ilma trioodi välisvooluringides voolutugevuse muutusi esile kutsumata, kui võre kannab kas negatiivset või väikest positiivset potentsiaali. Kannab aga võre katoodi suhtes küllaldaselt kõrget positiivset potentsiaali, siis kulgeb osa neist võrele



Joon. 60. 1. Sekundaaremissiooni toime trioodis suhteliselt kõrgete positiivsete võrepingete puhul. Jämeda pideva joonega on kujutatud I_A-U_A-tunnusjoon võrepinge väärtuse puhul $U_G = 200$ V ja jämeda kriipsjoonega — I_G-U_A-tunnusjoon võrepinge samasuure väärtuse puhul. Peente joontega on kujutatud samad tunnusjooned võrepinge väärtuse puhul $U_G = 100$ V.

ja ilmneb sekundaaremissioon ka võre traatidelt. Võrelt ja anoodilt tekkiv sekundaaremissioon võib tunduvalt muuta voolutugevusi trioodi välisvooluringides.

Joonisel 60. 1 on toodud trioodi I_A-U_A- ja I_G-U_A-tunnusjooned suhteliselt kõrgete positiivsete võrepingete ($U_G = 100$ V ja $U_G = 200$ V) puhul. Jooniselt selgub, et

kui $U_A \approx 0$, siis $I_G = I_s$. Anoodpinge U_A tõstmisel kuni punktini A (ca 20 V) tugevneb I_A ja nõrgeneb I_G, sest et kõik katoodist väljunud elektronid ei suundu enam võrele, vaid osa neist liigub madalamat positiivset potentsiaali kandvale anoodile. Kui anoodpinget veelgi tõsta, nõrgeneb anoodvool jällegi, jõudes nullini 100 V anoodpinge lähedal (punktis B), ühtlasi aga tugevneb sama väärtuse võrra võrevool. See kummalisena näiv anoodvoolu nõrgenemine on seletatav sekundaaremissiooni suurenemisega anoodilt, mille toimel anoodilt eraldunud elektronid suunduvad positiivset potentsiaali kandvale võrele. See anoodilt võrele liikuvaist elektronidest moodustunud vool võib muutuda sama tugevaks kui katoodilt anoodile liikuvaist elektronidest moodustunud vool (punktis B) ja võib selle tugevust isegi ületada (piirkonnas $B - D$), mistõttu vool anoodi välisvooluringis muutub endisele vastusuunaliseks. Anoodpinge tõstmisel üle punktis C oleva väärtuse hakkab vastusuunaline anoodvool ja samuti ka võrevool uuesti nõrgenema, sest suurem osa anoodist väljunud ja väikese algkiirusega elektrone ei saa anoodi kõrgema potentsiaali tõttu enam suunduda võrele, vaid pöörduvad uuesti anoodile.

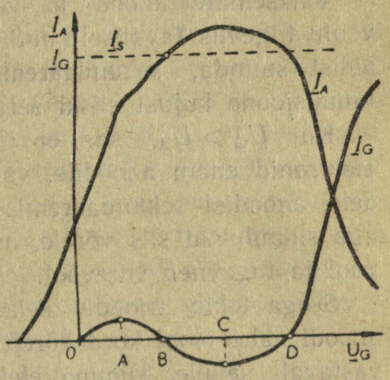
Anoodpinge edasisel tõstmisel muutub anoodvoolu suund (punktis D) ning hakkab avalduma sekundaaremissioon võretraatidelt. Seni kui võre potentsiaal oli anoodi potentsiaalist kõrgem, langesid sekundaaremissiooni tõttu võretraatidest väljunud elektronid võretraatidele jälle tagasi, kui aga vastupidi — anoodi potentsiaal on võrepotentsiaalist kõrgem, siis suundub neist osa anoodile, tugevdades anoodvoolu ja samavõrra nõrgendades võrevoolu.

Nagu nähtub jooniselt 60. 1, omab trioodi anoodvooluring anoodpingete vahemikus $U_A = A \ldots C$ ja võrepinge väärtuse $U_G = 200$ V puhul negatiivset takistust: voolu tugevda-

miseks on vaja alandada samale vooluringile rakendatud pinget.

Sama trioodi juures võrepinge väärtuse puhul $U_G = 100$ V teostatud mõõtmisel saadud kõverad on kujutatud selsamal joonisel peente joontega. Nagu nähtub, on ka sel puhul trioodis esinevad toimused üldjoontes samasugused, ainult ei esine negatiivse suunaga anoodvoolu.

Joonisel 60. 2 on toodud trioodi I_A-U_G- ja I_G-U_G-tunnusjooned konstantse positiivse anoodpinge ja positiivse võrepinge puhul. Nagu jooniselt näha, tugevnevad võrepinge tõstmisel anoodvool ja võrevool kuni küllastuspiirini ($I_A + I_G = I_s$). Võrepinge veelgi tõstmisel hakkab võrevool nõrgenema ja anoodvool samavõrra tugevnema. Punktis B on juba võrevoolu tugevus null ja punktis C on ta omandanud vastassuunalise maksimaalse väärtuse. Selle nähtuse põhjuseks on võretraatide sekundaaremissiooni ilmnemine. Võretraatidest väljunud elektronid suunduvad anoodile, kuna selle positiivne potentsiaal on võre potentsiaalist kõrgem ($U_A > U_G$), mistõttu nõrgenebki välisvooluringis võrevool ja tugevneb anoodvool. Nüüd tekib vool trioodi neljandas alalisvooluringis: võre, anood, anoodvoolu mõõteriist, anoodvoolu allikas, võrepinge allikas, võrevoolu mõõteriist ja võre.



Joon. 60. 2. Trioodi I_A-U_G- ja I_G-U_G-tunnusjooned suhteliselt kõrgete positiivsete võrepingete puhul. Piirkonnas $A-C$ on I_G-U_G-tunnusjoon langev, moodustades seega negatiivse takistuse.

Võrepinge tõstmisel kasvab katoodilt võrele suunduvate elektronide liikumise kiirus, mistõttu suureneb nende poolt

võretraadist väljalöödavate elektronide arv (§ 17). Võrepinge väärtuse juures $U_G = B$ V on katoodilt võrele suunduvate elektronide arv võrdne sealt anoodile suunduvate elektronide arvuga, võrevoolu tugevus välisvooluringis on seetõttu null. Võrepinge edasisel tõstmisel ületab võrelt väljuvate ja anoodile suunduvate elektronide arv võrele langevate elektronide arvu ja seetõttu on võrevooluringis voolu suund endisele vastupidine. Seega lööb iga võrele langev elektron võretraadi pinnast välja keskmiselt rohkem kui ühe elektroni.

Väiksemate anood- ja võrepinge väärtuste puhul võrevoolu tugevus tavaliselt nullini ei lange ega omanda vastupidist suunda, sekundaaremissiooni toime on aga trioodi tunnusjoone kujust siiski selgesti märgatav.

Kui $U_G > U_A$, siis ei jõua võretraatidest emiteerunud elektronid enam anoodile, vaid pöörduvad tagasi võretraatidele, anoodist sekundaaremissiooni tõttu väljunud elektronid aga suunduvad siis võrele, mille tagajärjel nõrgeneb anoodvool ja tugevneb võrevool.

Seega tekib trioodis sekundaaremissiooni tõttu võre ja anoodi vahel vool kord võrelt anoodile, kord anoodilt võrele, vastavalt sellele, kumma elektroodi potentsiaal on kõrgem. See vool liitub katoodist väljuvaist ja elektroodidevahelise elektrivälja toimel võre ja anoodi vahel jagunevaist elektronidest moodustatud vooluga, mille tagajärjel trioodi välisvooluringides kord üks neist jagunevaist vooludest tugevneb ja teine samavõrra nõrgeneb, kord vastupidi — üks nõrgeneb ja teine tugevneb.

Dioodis ei esine sekundaaremissiooni, kuna seal pöörduvad anoodist väljunud elektronid uuesti anoodile tagasi.

Sekundaaremissiooni tõttu ongi trioodi I_G-U_G-tunnusjoon osas $\overline{AC}$ langev, mistõttu triood vastavate talitlustingimuste puhul esineb negatiivse takistusena: pinge tõustes väheneb voolu tugevus. Negatiivse takistusega seadis on füüsikalisest seisukohast lähtudes niisugune takistus, mis

energiat ei tarvita, vaid annab seda vooluringi, vähendades sellega vooluringi üldtakistust.

Sekundaaremissiooni puhul on üheks tähelepanuväärseks nähtuseks veel see, et elektroodide (anoodi ja võre) kuumenemine sõltub katoodist väljuvate ning anoodile ja võrele suunduvate elektronide toimest. Sekundaaremissiooni tõttu ilmnev vool ei kuumuta elektroode tunduvalt, kuna teda moodustavate elektronide liikumise kiirused on suhteliselt väikesed. Et aga anoodi ja võre vooluringidesse ühendatavad mõõteriistad näitavad ainult primaar- ja sekundaaremissioonvoolude summat või vahet, siis ei saa mõõteriista poolt näidatava voolu tugevuse järgi otsustada anoodi või võre kuumenemise astme üle. Võib esineda juhtumeid, mil võre temperatuur jääb madalaks, vaatamata sellele, et võrevooluringis olev ampermeeter näitab suurt voolutugevust, või jälle anood kuumeneb helendumiseni või isegi sulamistemperatuurini, samal ajal kui anoodvooluringis sisalduv ampermeeter näitab nõrka või hoopis vastassuunalist anoodvoolu.

Ülalkirjeldatud sekundaaremissioonist tingitud nähtused esinevad tavaliselt generaatortorudes ja suure võimsusega võimendustorudes. Teatavais tingimustes võib võre- või anoodvooluringis esinev negatiivne takistus põhjustada neis vooluringides nugivõnkumiste (ehk parasiitvõnkumiste) tekkimist, kui seal esineb võnkeringe moodustada võivaid mahtuvusi ja induktiivsusi.

Võrevooluringi katkemise või liiga suure takistuse puhul võib võre positiivne potentsiaal kõrgeneda punktile *D* vastava väärtuseni (joon. 60. 2) ja seega võiks elektrontoru tugeva anoodvoolu tõttu rikneda.

§ 61. Vaakumi toime trioodis. Gaasi sisaldumine trioodi kolvis mõjutab tunduvalt tema tunnusjoonte kuju ja parameetreid. Kui katoodilt anoodile või võrele liikuv elektron saavutab elektroodidevahelise elektrivälja mõjul suurema kii-

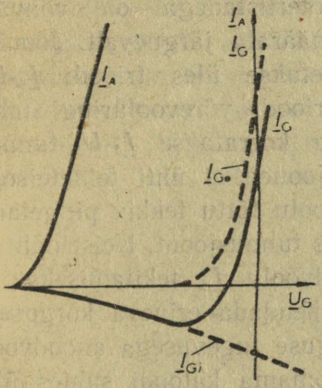
ruse, kui on vajalik tõukeionisatsiooni (§ 12) tekitamiseks, ja põrkab kokku tema teele sattunud gaasi molekuliga, siis muutub viimane positiivseks iooniks. Selle tulemusena tekkinud positiivsed ioonid suunduvad kas katoodile või, kui võre kannab negatiivset potentsiaali, siis ka võrele. Need elektronide liikumise kiirusega võrreldes aeglaselt liikuvad positiivsed ioonid negatiivset potentsiaali kandvat ruumlaengu piirkonda läbides (§ 37) vähendavad negatiivse ruumlaengu mõju, mistõttu anoodvool tugevneb tunduvalt. Seega võib üksainus aeglaselt liikuv positiivne ioon võimaldada hulgale kiirelt liikuvaile elektronidele pääsu läbi ruumlaengu anoodile, mis ongi anoodvoolu tugevnemise peamiseks põhjuseks. Alates tõukeionisatsioonipingest (ligikaudu 20 V) kõrgemate pingete poole on väikest vaakumi sisaldava trioodi I_A-U_A- ja I_A-U_G-tunnusjoonte tõus S tunduvalt suurem kui samasuguse, kuid suurt vaakumi sisaldava trioodi tõus.

Aeglaselt liikuvate ioonide tõttu muutub väikese vaakumiga trioodidel anoodvool elektroodidevahelise pinge muutumisel teatava viivitusega, mis on nende trioodide suureks puuduseks — eriti suursageduslülitustes.

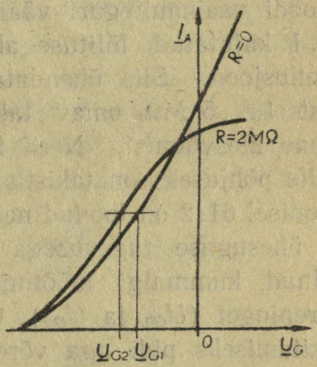
Trioodis sisalduva gaasi ioniseerumise tõttu muutub ka trioodi I_G-U_G-tunnusjoone kuju. Negatiivse võrepinge puhul langevad võre lähedal olevad positiivsed ioonid võrele, moodustades sel teel võrevoolule vastassuunalise voolu, mille kulg algab negatiivse võrepinge puhul siis, kui trioodis tekib tõukeionisatsioon, ja mis tugevneb võrel negatiivse potentsiaali alanemisel (joon. 61. 1 I_{Gi}). Viimane nähtus on tingitud sellest, et võrel negatiivse potentsiaali alanemisel tugevneb anoodvool ja koos sellega suureneb ka trioodis tekkivate ja võrele suunduvate positiivsete ioonide arv.

Joonisel 61. 1 toodud I_G-U_G-teljestikku on kantud võrele langevate ioonide poolt tekitatud voolu I_{Gi}, võrele langevate elektronide poolt tekitatud voolu I_{Ge} ja läbi trioodi võrevooluringi välisosa kulgeva eelmise kahe voolu summa

$I_G = I_{Ge} + I_{Gi}$ sõltuvused võrepingest. Tuleb aga nimetada, et ioonide poolt tekitatavale vastassuunalisele võrevoolule liitub veel võre ja katoodi juhtmete vahelist isoleermaterjali läbiv vool ja võretraatide termoemissioonvool (§ 15). Tavaliselt on need voolud aga nõrgad.



Joon. 61.1. Trioodi võrele langevate elektronide poolt tekitatud vool I_{Ge}, ioonide poolt tekitatud vool I_{Gi} ja vool võre välisvooluringis $I_G = I_{Ge} + I_{Gi}$ sõltuvalt võrepingest.



Joon. 61.2. Trioodi I_A-U_G-tunnusjooned ioonide poolt tekitatava võrevoolu tugevuse I_{Gi} määramiseks.

Endastmõistetavalt on võrevoolu I_{Gi} tugevus käsiteldavas elektrontorus võrdeline katoodi ja anoodi vahel leiduva gaasi hulgaga (molekulide arvuga) ja tõukeionisatsiooni põhjustava voolu I_A tugevusega, s. o. ühe sekundi vältel katoodilt anoodile kulgevate elektronide arvuga. Nende voolutugevuste suhet nimetatakse v a a k u m i t e g u r i k s.

$$K_v = \frac{I_{Gi}}{I_A}.$$

Vaakumitegur näitab, mitmes elektron keskmiselt põrkab oma teekonnal kokku gaasi molekuliga. Vaakumiteguri väärtus sõltub elektrontoru katoodi ja anoodi mõõdetest ja nende

vahekaugusest. Vaakumiteguri väärtus sõltub teataval määral ka tema mõõtmisel kasutatud anood- ja võrepinge väärtustest. Seepärast võib vaakumitegurit kasutada ühte ning sama tüüpi elektrontorude vaakumi suuruse võrdlemiseks, kui seejuures määramiseks kasutada võrdseid pingeid.

Tavaliselt kasutatavate mõõteriistadega on võimalik trioodi vaakumiteguri väärtust määrata järgnevalt. Joonisel 47. 1 kujutatud lülituse abil võetakse üles trioodi I_A-U_G-tunnusjoon. Siis ühendatakse trioodi võrevooluringi takistust 1 . . . 5 MΩ omav takisti ja korratakse I_A-U_G-tunnusjoone ülesvõtmist. Need tunnusjooned ei ühti teineteisega. Selle põhjuseks on takistis võrevoolu tõttu tekkiv pingelang. Joonisel 61. 2 on toodud need kaks tunnusjoont. Neist nähtub, et ühesuguse tugevusega anoodvoolu I_A tekitamiseks on tulnud kummalgi mõõtmisel rakendada erineva kõrgusega võrepinget (U_{G1} ja U_{G2}). Ühesuguse tugevusega anoodvoolu tekitamiseks pidi aga võre ise omama katoodi suhtes ühesugust pinget ja nimelt U_{G1}. Pinge U_{G2} on sellest absoluutväärtuse poolest kõrgem seetõttu, et osa temast tasakaalustas võreringi ühendatud takisti klemmide vahel ioonidevoolu tõttu tekkinud pingelangu. Selle pingelangu väärtus on $U_{G2} - U_{G1}$ ja teda esilekutsunud voolu tugevus

$$I_{Gi} = \frac{U_{G2} - U_{G1}}{R},$$

kus R on võreringi ühendatud takisti takistus.

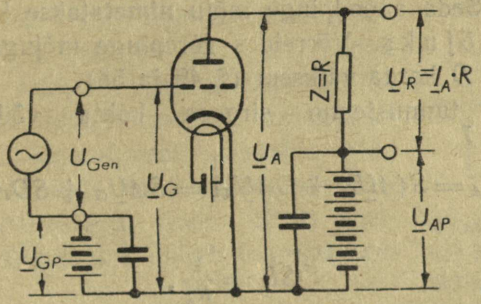
Ioonidevoolu tugevuse mõõtmise põhimõttel valmistatakse manomeetreid suurte vaakumite (kuni 10^{-8} torri) mõõtmiseks.

X peatükk.

Kolme elektroodiga elektrontoru kasutamine.

§ 62. Triood nimi-talitlustingimuste puhul ja Wallaur'i valem. Trioode kasutatakse peamiselt helisagedusvõimenda-

jais, saateseadmete suursagedusvõimendajais, generaatorlülitusis vahelduvvoolu tekitamiseks ja demodulaatorlülitusis. Töötava trioodi omadustest ülevaate saamiseks on teda käesolevas paragrahvis käsiteldud võimendusastmes töötavana. Mistahes võimendaja ühe astme lülitust võib kujutada joonisel 62. 1 toodud skeemina. Joonisel toodud trioodi anoodvooluringis sisalduv näivtakistuslik koorem Z on trioodi koorma asetakistiks. Tarbijaks on võimendusastmeis kas tegevtakistuslikku või enamasti aga mahtuvuslikku või induktiivset iseloomu koorem. Alljärgnevas on vaadeldud juhtu, kus koormaks on tegevtakistuslik takisti ($Z = R$).



Joon. 62. 1. Põhimõtte-skeem trioodi kasutamisest võimendajas.

Kui trioodi anoodvooluringis on kooremtakisti R, ei muutu anoodvool võrepinge muutudes enam vastavalt trioodi staatilisele tunnusjoonele [$I_A = f(U_G)$, kui $U_A = \text{konst.}$], sest võrepinge muutudes muutub ka anoodpinge. Nagu nähtub jooniselt 62. 1, on trioodi anoodpinge U_A anoodpingeallika pingest U_{AP} madalam anoodvoolu tõttu kooremtakisti R klemmide vahel tekkiva pingelangu võrra. Järelikult

$$U_A = U_{AP} - I_A R. \qquad (62.1)$$

Kui näiteks võrepinge muutmisel tugevneb anoodvool, siis suureneb ka pingelang takistis R ja alaneb anoodpinge U_A.

Aga ka anoodpinge muutused muudavad anoodvoolu tugevust. Näiteks nõrgeneb anoodpinge alanemisel anoodvool ja koos sellega väheneb ka pingelang kooremtakistis. Järelikult kaasub võrepinge muutmisega alati anoodpinge muutumine, mis mõjutab anoodvoolu tugevust vastupidi võrepinge muutusele. Kui näiteks tõsta võre negatiivset pinget, siis nõrgeneb anoodvool, ühtlasi väheneb aga ka pingelang kooremtakistis R, mistõttu tõuseb anoodpinge $\underline{U}_A$ — pidurdades võre mõjul toimuvat anoodvoolu nõrgenemist. Seega sõltub anoodvoolu muutus $\Delta\underline{I}_A$ kahest üheaegselt mõjuvast tegurist: võrepinge muutusest $\Delta\underline{U}_G$ ja anoodpinge muutusest $\Delta\underline{U}_A$. Seda anoodpinge mõju nimetatakse ka anoodi tagasimõjuks. Võrreldes võrepinge mõjuga on anoodi tagasimõju D korda väiksem (§ 49 ja 58).

Trioodi tunnusjoone sirgosa kohta võib kirjutada võrrandi:

$$\Delta\underline{I}_A = S(\Delta\underline{U}_G + D\Delta\underline{U}_A) = S\Delta\underline{U}_G + SD\Delta\underline{U}_A.$$

Et

$$SD = \frac{1}{R_i},$$

siis

$$\Delta\underline{I}_A = S\Delta\underline{U}_G + \frac{1}{R_i}\Delta\underline{U}_A. \qquad (62.2)$$

Siinuselise vahelduvpinge ja vahelduvvoolu hetkväärtuste muutumiste puhul

$$\Delta i_A = S\Delta u_G + \frac{1}{R_i}\Delta u_A. \qquad (62.3)$$

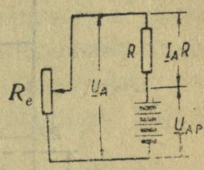
See Wallaur'i nime kandev valem on põhiliseks alusvalemiks trioodi talitlustingimuste määramisel.

§ 63. Trioodi dünaamilised tunnusjooned. Trioodi dünaamiline tunnusjoon iseloomustab trioodi omadusi, anoodvooluringis sisalduva koorma väärtust, selle koorma iseloomu ja

vooluringis oleva vooluallika pinge kõrgust. Kui neist tegureist mõnda muudetakse, siis väljendub see kas dünaamilise tunnusjoone kujus või asetuses. Samuti kui trioodi staatilisi tunnusjooni, nii kujutatakse ka dünaamilisi tunnusjooni kas I_A-U_A- või I_A-U_G-teljestikus.

Kuna trioodi dünaamilised tunnusjooned väljendavad teatava lülituse omadusi, kuhu kuulub ka triood ise, siis võib esmalt koostada trioodita lülituse (trioodivälise vooluringi) tunnusjooned ja hiljem nendega liita ehk superponeerida trioodi enda tunnusjooned, saades nõnda kogu lülituse kohta kehtiva, trioodi dünaamilise tunnusjoone.

Joonisel 62. 1 kujutatud lülituses sisalduv triood on joonisel 63. 1 asendatud muudetavat takistust omava takistiga R_e. Muutes selle takisti takistust astmeliselt nullist kuni lõpmatuseni, saadakse rida I_A ja U_A väärtusi; need väärtused kantuna I_A-U_A-teljestikku (joon. 63. 2) asetsevad ühel sirgel, mis lõikab telgesid kaugustel



Joon. 63. 1. Joonisel 62. 1 kujutatud lülituse anoodvooluringi aseskeem, kus triood on asendatud reguleeritava takistiga R_e.

$$U_{AP} \text{ ja } I_A = \frac{U_{AP}}{R}. \qquad (63.1)$$

Avaldisest

$$\operatorname{tg}\alpha = \frac{I_A}{U_{AP}} = \frac{U_{AP}}{RU_{AP}} = \frac{1}{R} \qquad (63.2)$$

leitakse nurk:

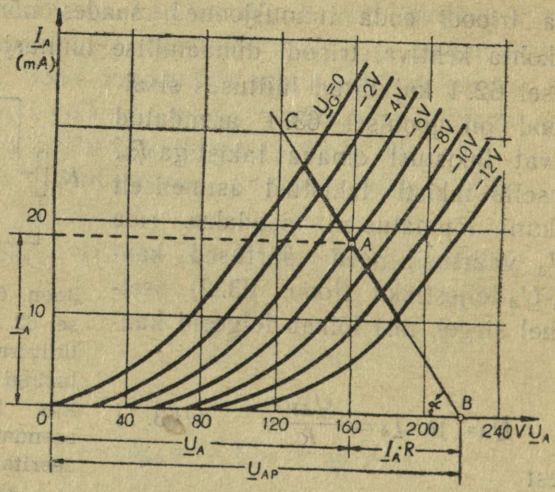
$$\alpha = \operatorname{arctg}\frac{1}{R}. \qquad (63.3)$$

Nõnda saadud joon on koorma R tegevtakistuse ja pinge U_{AP} seost väljendav tunnusjoon. Nagu eeltoodust näha, asetseb ta seda püstimal, mida väiksem on koorma R takistus.

Et $\underline{U}_A = \underline{U}_{AP} - \underline{I}_A R$, siis on sellel joonel asetsevale mistahes punktile vastav vool $\underline{I}_A$ leitav järgmisest valemist:

$$\underline{I}_A = \frac{\underline{U}_{AP} - \underline{U}_A}{R} = \frac{\underline{U}_{AP}}{R} - \frac{1}{R}\underline{U}_A. \qquad (63.4)$$

Joonisel 63. 2 on kantud samale teljestikule samas mõõdusuhetes ka trioodi enda $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjooned. Läbi välisvooluringi tunnusjoone ja trioodi enda tunnusjoonte lõikepunktide tõmmatud joon ongi kogu lülituse dünaami-



Joon. 63. 2. Trioodi tunnusjoon BC kooremtakisti väärtuse puhul $R = 3000\ \Omega$ ja trioodi staatiline $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnussari võrepinge väärtuste puhul piirides $\underline{U}_G = 0 \ldots -12$ V. Talitluspunkt A on määratud võre negatiivse pingega $\underline{U}_G = -6$ V. Seejuures on trioodi anoodpinge $\underline{U}_A = 160$ V ja anoodvool $\underline{I}_A = 18$ mA. Anoodpingeallika pinge $\underline{U}_{AP} = 220$ V.

line $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-tunnusjoon. Kui anoodvooluring sisaldab ainult tegevtakistust R, nagu käsiteldud juhul, siis on dünaamiline tunnusjoon sirge ja ühesugune niihästi vahelduvvoolu kui ka alalisvoolu kulgemisel anoodvooluringis.

Trioodi talitlustingimuste määramisel kasutatakse peaaegu eranditult trioodi dünaamilisi I_A-U_A-tunnusjooni.

Trioodi dünaamilist tunnusjoont on võimalik kujutada ka I_A-U_G-teljestikus. Selleks leitakse valemi 62. 1 abil trioodi I_A-U_A-tunnussarja teljestiku ordinaatteljel valitavaile voolutugevuse I_A väärtustele vastavad anoodpingete väärtused $U_A = U_{AP} - I_A R$ konstantsete U_{AP} ja R väärtuste puhul. Leitud U_A väärtustele vastavatel trioodi staatilistel tunnusjoontel leitakse punktid, mida ühendades saadaksegi trioodi dünaamiline tunnusjoon. Dünaamilise tunnusjoone kuju leidmiseks vajalikud punktid võidakse leida sama võrrandi abil ka teisiti. Nimelt võib leida avaldisega $I_A = (U_{AP} - U_A)/R$ trioodi staatilises tunnussarjas oleva iga tunnusjoone anoodpingele U_A vastava anoodvoolu tugevuse I_A. Arvutatud I_A väärtuste järgi leitakse vastavatel I_A-U_G-tunnusjoontel punktid, millede ühendamisel kujundubki trioodi dünaamiline tunnusjoon.

On võimalik I_A-U_A-teljestikus leitud dünaamilist tunnusjoont üle kanda ka I_A-U_G-teljestikku või vastupidi, kasutades valemit 62. 1.

Olgu märgitud, et I_A-U_G-teljestikus kujutatavad trioodi dünaamilised tunnusjooned pole aga täiesti sirged ka siis, kui kooremtakisti R omab vaid tegevtakistust.

Trioodi dünaamilist tunnusjoont on võimalik kujutada I_A-U_G-teljestikus ka mõõtmisel saadavate andmete järgi. Selleks kasutatakse joonisel 47. 1 kujutatud lülitust, mille anoodvooluringi on ühendatud anoodpingeallikaga järjestikku kooremtakisti R.

§ 64. Trioodi dünaamilised parameetrid. Trioodi dünaamiline tõus S_d on trioodi staatilisest tõusust väiksem, sest konstantse U_{AP} ja R korral anoodvoolu tugevnedes näiteks ΔI_A võrra alaneb anoodpinge ΔU_A võrra — takisti R klemmidevahelise pinge tõusmise tõttu $\Delta I_A R$ võrra (62. 1).

Et takisti klemmidevaheline pinge on anoodpingele vastassuunaline, siis $\Delta U_A = -\Delta I_A R$. Asetades valemisse 62. 3 Δu_A asemele tema väärtuse $-\Delta i_A R$, saame:

$$\Delta i_A = S\Delta u_G - \frac{R}{R_i}\Delta i_A$$

ja siit

$$\Delta i_A + \frac{R}{R_i}\Delta i_A = S\Delta u_G$$

ja

$$\Delta i_A\left(1+\frac{R}{R_i}\right) = S\Delta u_G.$$

Jagades viimase võrrandi mõlemaid pooli Δu_G-ga, saadakse:

$$S_d = \frac{\Delta i_A}{\Delta u_G} = \frac{S}{1+\frac{R}{R_i}} = \frac{SR_i}{R+R_i} = \frac{\mu}{R+R_i}. \qquad (64.1)$$

Leitud võrrandist on näha, et $S_d < S$ ja mida suurem on koorma R takistus, seda väiksem on S_d. Dünaamilise tõusu S_d piirväärtusteks on: $S_d = S$, kui $R = 0$, ja $S_d = 0$, kui $R = \infty$.

Trioodi dünaamiline võimendustegur μ_d väljendab kooremtakisti R klemmidevahelise pinge $\Delta u_R = R\Delta i_A$ ja võrepinge Δu_G muutuste suhet:

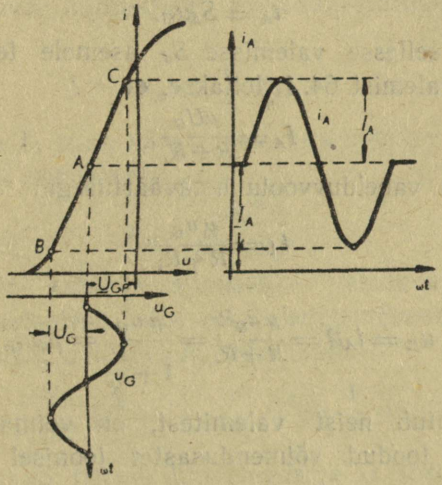
$$\mu_d = \frac{\Delta u_R}{\Delta u_G} = \frac{R\Delta i_A}{\Delta u_G} = RS_d \qquad (64.2)$$

ehk

$$\mu_d = \frac{RS}{1+\frac{R}{R_i}} = \frac{RSR_i}{R+R_i} = \frac{\mu R}{R+R_i} = \frac{\mu}{1+\frac{R_i}{R}}. \qquad (64.3)$$

Järelikult sõltub dünaamiline võimendustegur kooremtakisti takistusest ja asub piirides $\mu_d = \mu$, kui $R = \infty$, ja $\mu_d = 0$, kui $R = 0$.

Joonisel 64. 1 on talitluspunkt A trioodi dünaamilisel tunnusjoonel määratud võre eelpingega $\underline{U}_{GP}$. Eelpingele võrel lisandub vahelduvpinge $u_G = U_G \sin \omega t$. Seega muutub võre ja katoodi vaheline pinge piirväärtuste $\underline{U}_{GP} - U_G$ ja $\underline{U}_{GP} + U_G$ vahel. Neis piirides olevad pinged paigutuvad dünaamilise tunnusjoone osale $\overline{BC}$, mis käes-



Joon. 64. 1. Anoodvoolu tugevuse muutumine võre ja katoodi vahelise vahelduvpinge mõjul: A — talitluspunkt, $\overline{BC}$ — dünaamilise tunnusjoone sirgosa, $\underline{U}_{GP}$ — võre-eelpinge, u_G — võrele rakendatud vahelduvpinge hetkväärtus, U_G — võrepinge vahelduvkomponendi tippväärtus, i_A — anoodvoolu vahelduvkomponendi hetkväärtus, $\underline{I}_A$ — anoodvoolu alaliskomponent, I_A — anoodvoolu vahelduvkomponendi tippväärtus.

oleva näite puhul on eeldatud sirgena. Niikaua kui võre ja katoodi vaheline pinge on püsivalt U_{GP}, on anoodvool püsivalt $\underline{I}_A$. Kui aga võrele mõjub eelpinge ja sellele lisandunud vahelduvpinge $\underline{U}_{GP} + U_G \sin \omega t$, siis muutub anoodvool järgmiselt:

$$i_A = \underline{I}_A + I_A \sin \omega t. \qquad (64.4)$$

Anoodvoolu piirväärtusteks on $\underline{I}_A + I_A$ ja $\underline{I}_A - I_A$.

Selle muutuva tugevusega anoodvoolu võib jagada kaheks komponendiks: alalisvoolu komponendiks väärtusega I_A ja vahelduvvoolu komponendiks väärtusega $I_A \sin \omega t$. Neist viimane määrabki võimenduse väärtuse.

Kui dünaamilisel tunnusjoonel on osa $\overline{BC}$ sirgjooneline, siis

$$i_A = S_d u_G. \tag{64.5}$$

Asetades sellesse valemisse S_d asemele tema väärtuse $\mu/(R + R_i)$ valemist 64. 1, leitakse, et

$$I_A = \frac{\mu U_G}{R + R_i} \tag{64.6}$$

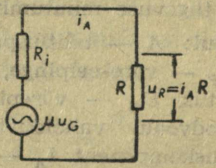
ehk arvutades vahelduvvoolu hetkväärtusega:

$$i_A = \frac{\mu u_G}{R + R_i} \tag{64.7}$$

ja

$$u_R = i_A R = \frac{\mu u_G R}{R + R_i} = \frac{\mu u_G}{1 + \frac{R_i}{R}} = \mu_d u_G. \tag{64.8}$$

Nagu nähtub neist valemitest, on võimalik kujutada joonisel 62. 1 toodud võimendusastet joonisel 64. 2 toodud



Joon. 64. 2. Joonisel 62. 1 toodud võimendusastme aseskeem: u_G — võre ja katoodi vahelise vahelduvpinge hetkväärtus, i_A — anoodvooluringis kulgeva voolu vahelduvkomponendi hetkväärtus, u_R — vahelduvpinge hetkväärtus kooremtakisti klemmide vahel, μ — võimendustegur, R_i — trioodi sisetakistus, R — kooremtakisti.

aseskeemina, kus trioodi asendab vahelduvvoolugeneraator pingega μu_G ja trioodi sisetakistust — takisti R_i. Kooremtakistiks on R, mille klemmidevaheline vahelduvpinge

$u_R = i_A R$. Valemit 64. 7 nimetatakse sageli aselülituse Ohm'i seaduseks. Võimenduse väärtus selles aselülituses on arvutatav valemiga 64. 3.

Võimsusvõimendusastmes töötava trioodi suhtes on vaja teada kooremtakistis tarbitavat vahelduvvõimsust. Siinuselise võrepinge puhul on oomilises kooremtakistis R soojuseks muunduva siinuselise vahelduvvõimsuse amplituudväärtus

$$P_R = \frac{1}{2} I_A^2 R. \qquad (64.9)$$

Asendades I_A tema väärtusega, mis leitakse analoogiliselt valemile 64. 6, saadakse:

$$P_R = \frac{\mu^2 U_G^2 R}{2(R+R_i)^2}. \qquad (64.10)$$

Kui võrele kantava siinuselise vahelduvpinge amplituudid on konstantsed, siis on vahelduvvõimsus P_R maksimaalne sel juhul, mil $R = R_i$. Järelikult

$$P_{R\,max} = \frac{\mu^2 R_i}{2 \cdot 4R_i^2} U_G^2 = \frac{1}{8} \cdot \frac{\mu^2}{R_i} U_G^2 = \frac{1}{8} \mu S U_G^2. \qquad (64.11)$$

Asendades μS trioodi hindeteguriga G (54. 4) millivattides voltruudule, saadakse:

$$P_{R\,max} = \frac{1}{8} G U_G^2 \text{ mW}. \qquad (64.12)$$

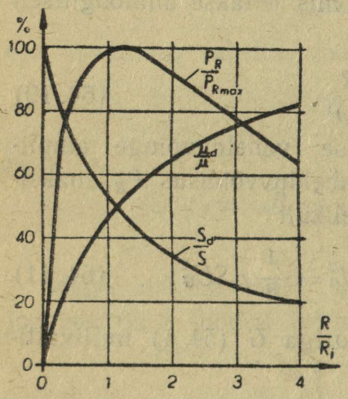
Joonisel 64. 3 toodud kõverad näitavad trioodi dünaamiliste parameetrite väärtusi protsentides staatiliste parameetrite väärtustest ja kooremtakistile antavat vahelduvvõimsust protsentides võimsusest, kui $R = R_i$, sõltuvalt koorma takistuse ja trioodi sisetakistuse suhtest R/R_i.

Nagu jooniselt 64. 3 näha, on valitud talitluspunkti ja võrele kantava vahelduvpinge konstantse väärtuse puhul väljuv vahelduvvõimsus P_R maksimaalne sel juhul, kui $R = R_i$, ning väheneb aeglaselt takistuse R suurendamisel. Kuid vaatamata võimsuse P_R vähenemisele suureneb takistuse R suurenda-

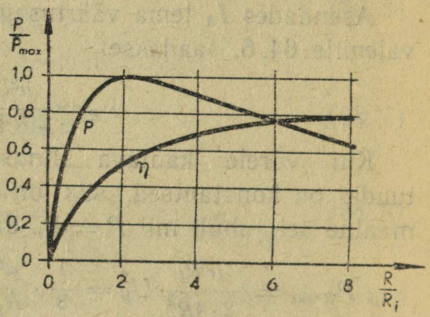
misel takisti R otstevaheline pinge, mida näitab μ_d/μ kõvera tõus.

Kui takistuse R muutmisega muudetakse samaaegselt talitluspunkti asukohta ja suurendatakse võrele kantava vahelduvpinge amplituude, siis on trioodi poolt antav vahelduvvõimsus maksimaalne sel juhul, mil $R = 2R_i$, nagu see on näha joonisel 64. 4. Võimsuse väärtus sel juhul

$$P_{R\,max} = \frac{1}{9}\mu S U_G^2 = \frac{1}{9} G U_G^2. \qquad (64.\,13)$$



Joon. 64. 3. Trioodi dünaamiliste parameetrite S_d ja μ_d väärtused protsentides staatiliste parameetrite väärtustest ja vahelduvvoolu võimsus kooremtakistis protsentides võimsusest, mil $R = R_i$, sõltuvalt koorma takistuse ja sisetakistuse suhtest R/R_i.



Joon. 64. 4. Trioodi poolt antava vahelduvvõimsuse P (P_R) suuruse ja kasuteguri η sõltuvus kooremtakisti suurusest.

dünaamiline tunnusjoon. Talitluspunktiks on valitud punkt A, milles $U_G = -20$ V ja $U_A = 160$ V. Võrele antava vahelduvpinge amplituudi väärtus $U_G = 20$ V.

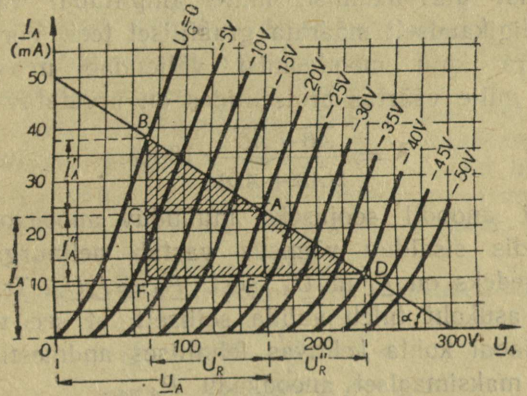
Anoodvoolu vahelduvkomponendi poolt kooremtakistile antava vahelduvvõimsuse väärtust on võimalik määrata ka graafiliselt trioodi I_A-U_A-tunnussarja abil. Joonisel 64. 5 on toodud trioodi staatiline tunnussari ja

Joonisel vastab joonlõik $\overline{BC}$ anoodvoolu vahelduvkomponendi tippväärtusele I_A' ja $\overline{AC} = \overline{BC}\,\mathrm{ctg}\,\alpha = I_A'R = U_R'$ anoodvoolu vahelduvkomponendi mõjul kooremtakistis tekkivale pingelangule.

Valemi 64. 9 kohaselt

$$P_R = \tfrac{1}{2} I_A U_R = \tfrac{1}{2} \cdot \overline{BC} \cdot \overline{AC},$$

mis väljendab sobiva mõõdusuhte puhul kolmnurga ABC pinda. Kui trioodi võrele kantud vahelduvpinge amplituud ei



Joon. 64. 5. Tunnusjooned trioodi võimsuse ja moonutuste graafiliseks määramiseks. A — talitluspunkt, $\underline{U}_A$ — anoodpinge ja $\underline{I}_A$ — anoodvoolu väärtused talitluspunktis.

ulatu trioodi staatilise $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone sirgosast üle, siis on kolmnurgad ABC ja ADE ühtivad ja kooremtakistile antava vahelduvvõimsuse väärtus on vastav kolmnurga BDF pinna ühele neljandikule.

Tegelikult pole aga staatilised $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjooned sirged, mis väljendub $\underline{I}_A$-$\underline{U}_A$-teljestikus selles, et võrdsete eelpinge erinevuste puhul ülesvõetud tunnusjooned ei asetu üksteisest võrdsetele kaugustele, nagu see nähtub ka jooniselt 64. 5. Kõrgemate negatiivsete eelpingete puhul on

tunnusjoonte vahed väiksemad. Selle tõttu pole omavahel võrdsed ka kolmnurkade ABC ja ADE vastavad küljed. Näiteks on nende kolmnurkade külgedest $\overline{BC} > \overline{AE}$. Tingituna sellest ka $I_A' > I_A''$ ja $U_R' > U_R''$. Järelikult erineb kooremtakistis kulgeva vahelduvvoolu kuju võrele kantud siinuselise vahelduvpinge kujust.

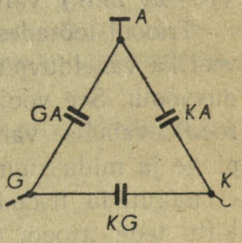
Teatavasti on võimalik iga mitte-siinuselist kõverat käsitleda koosnevana mitmest siinuselisest kõverast. Käesoleval juhul tekkinud mitte-siinuseline kõver sisaldab peamiselt teist harmoonilist ülavõnkumist, mille amplituudi väärtust on võimalik ligikaudselt määrata graafilisel teel. Võrele kantud pingekõvera kuju moondumist väljendab moonutustegur, mille väärtus protsentides on arvutatav valemiga:

$$K = \frac{\overline{AB} - \overline{AD}}{2(\overline{AB} + \overline{AD})} \cdot 100\%. \qquad (64.14)$$

Trioodi anoodil soojuseks muunduv anoodvoolu alaliskomponendis sisalduv võimsus vastab nelinurga pinnale, mille külgedeks on I_A ja U_A, sest $P_A = I_A U_A$. Trioodi talitluspunkti asukoht tuleb valida selliselt, et see võimsus ei ületaks trioodi kohta kehtivas tehnilises andmestikus antud lubatavat maksimaalset anoodkadu $P_{A\,max}$.

§ 65. Trioodi sisemahtuvused. Peale muu mõjutavad trioodi töötamist ka tema elektroodidevahelised ja elektroodide ning kontaktjalgade vahel olevate ühendusjuhtmete vahelised mahtuvused. Trioodil, mille elektroodid on ühendatud tema sokli küljes olevate kontaktjalgadega, on trioodi seesmiste juhtmete vahelised mahtuvused ligikaudu samasuured kui elektroodidevahelised mahtuvused. Et trioodi töötamisolukorras tema elektroodidevahelised ja ühendusjuhtmete-vahelised mahtuvused toimivad ühteviisi, siis nendes vahet ei tehta ja kõiki neid mahtuvusi nimetatakse trioodi sisemahtuvusteks. Nende mahtuvuste tähistusviis on näidatud joonisel 49.2.

Trioodi külma katoodi puhul teostatud mõõtmistel saadud mahtuvuse väärtusi nimetatakse trioodi staatilisteks sisemahtuvusteks. Mõõtmistel tuleb silmas pidada, et trioodi sees on need mahtuvused ühendatud omavahel kokku nii, nagu on näidatud joonisel 65. 1, seepärast ei saa nende väärtusi mõõta otseselt. Nende mahtuvuste määramise lihtsaim moodus koosneb järgnevast neljast toimingust: 1) ühendatakse võre katoodiga ja mõõdetakse anoodi ning kokkuühendatud elektroodide vaheline mahtuvus, mille väärtus $C_A = C_{GA} + C_{KA}$, 2) ühendatakse anood katoodiga ja mõõdetakse võre ning kokkuühendatud elektroodide vaheline mahtuvus, mille väärtus $C_G = C_{KG} + C_{GA}$, 3) ühendatakse anood võrega ja mõõdetakse mahtuvus $C_K = C_{KA} + C_{KG}$ ja 4) arvutatakse saadud andmete järgi trioodi sisemahtuvused valemitega:



Joon. 65. 1. Trioodi sisemahtuvused. Joonisel tähistavad: *A* — anoodi, *K* — katoodi, *G* — võret.

$$C_{GA} = \frac{C_A + C_G - C_K}{2}, \tag{65. 1}$$

$$C_{KG} = \frac{C_G + C_K - C_A}{2} \tag{65. 2}$$

ja

$$C_{KA} = \frac{C_A + C_K - C_G}{2}. \tag{65. 3}$$

Trioodi staatilisi sisemahtuvusi saab mõõta mahtuvuste mõõtmiseks kasutatava mõõtesillaga.

Väikese võimsusega trioodide sisemahtuvuste väärtused on tavaliselt mõne pikofaradi ja suure võimsusega trioodide sisemahtuvused mõnekümne pF piirides.

Kui trioodi katood on kuum, siis on trioodi nn. dünaamilised sisemahtuvused staatilistest sisemahtuvustest ruumlaengu toime tõttu kuni 50 protsendi võrra suu-

remad ja nimelt seda rohkemal määral, mida tugevamad on kütte- ja anoodvool. Vahetult kõetavail trioodidel tuleb mõõtmise ajaks kütteniidi kontaktjalad omavahel kokku ühendada. Pärast trioodi töösselülitamist suurenevad soojenemise tõttu ta sisemahtuvused vähesel määral pikema aja (10—20 min.) vältel.

Trioodi töötades on ta elektroodide vahel peale alalispinge veel ka vahelduvpinge, mis tekitab sisemahtuvuse kaudu vahelduvvoolu. See vool on seda tugevam, mida suurem on elektroodidevahelise vahelduvvoolu sagedus, mida kõrgem on selle pinge ja mida suurem on sisemahtuvus. Ta on küllalt tugev, et mõjutada trioodi sisaldava lülituse talitlusolukorda, mistõttu teda trioodi talitlustingimuste määramisel tuleb arvestada.

Võrele kantav vahelduvpinge u_G põhjustab kooremtakisti klemmide vahel (joon. 64. 2) ning seega ka trioodi anoodi ja katoodi vahel vahelduvpinge

$$u_A = -u_R = -RS_d u_G = -\mu_d u_G.$$

Need mõlemad vahelduvpinged tekitavad võrevooluringis voolud, millede tugevused on: mahtuvust C_{KG} läbival voolul

$$i_{KG} = u_G \omega C_{KG} \qquad (65.4)$$

ja mahtuvust C_{GA} läbival voolul

$$i_{GA} = (u_G - u_A)\,\omega C_{GA} = (u_G + \mu_d u_G)\,\omega C_{GA} = \\ = u_G(1 + \mu_d)\,\omega C_{GA}. \qquad (65.5)$$

Seega on koguvool võrevooluringis

$$i_G = i_{KG} + i_{GA} = u_G \omega\,[C_{KG} + (1 + \mu_d)\,C_{GA}]. \qquad (65.6)$$

Kui vaadelda seda voolu tekitatuna ainult võrepinge u_G poolt, siis peaks vastava asemahtuvuse väärtus olema

$$C_{Gd} = C_{KG} + (1 + RS_d)\,C_{GA} = C_{KG} + (1 + \mu_d)\,C_{GA}, \qquad (65.7)$$

mida nimetatakse trioodi *dünaamiliseks sisendmahtuvuseks* ja mis on tunduvalt suurem trioodi staatiliste sisemahtuvuste summast. Nagu nähtub, on mõlemast staatilisest mahtuvusest olulisem C_{GA}, mis omab kordajat $(1 + \mu_d)$ või $(1 + RS_d)$.

Näide 65. 1. Trioodi staatilised sisemahtuvused on: $C_{GA} = 3{,}3$ pF, $C_{KG} = 3{,}9$ pF ja $C_{KA} = 2{,}7$ pF. Trioodi võimendustegur $\mu = 25$ ja sisetakistus $R_i = 20\,000\ \Omega$. Määrata trioodi dünaamiline sisendmahtuvus, kui koorma takistus $R = 80\,000\ \Omega$.

Lahendus. Dünaamiline sisendmahtuvus on valemite 64. 3 ja 65. 7 järgi:

$$C_{Gd} = 3{,}9 + 3{,}3\left(1 + \frac{25 \cdot 8 \cdot 10^4}{(2+8) \cdot 10^4}\right) = 3{,}9 + 3{,}3 \cdot 21 = 73{,}2\ \text{pF}.$$

Nagu siit näha, on trioodi dünaamiline sisendmahtuvus niivõrd suur, et suursagedusvõimendajate ja isegi ka helisagedusvõimendajate arvutamisel tuleb teda arvestada samuti kui trioodi teisigi parameetreid. Ülaltoodud näites oli trioodi koormaks võetud tegevtakistuslik takisti R, kui aga koormaks on näivtakistuslik tarbija Z, mis võib omada kas mahtuvuslikku või induktiivset iseloomu, siis tuleb valemis 65. 7 asendada R väärtus vastava Z väärtusega. Olgu nimetatud ka seda, et mahtuvusliku iseloomuga Z puhul tugevneb vool võrevooluringis (65. 6) veelgi, induktiivse iseloomuga Z puhul võib aga C_{GA} kaudu kulgev vool muutuda C_{KG} kaudu kulgevale voolule vastassuunaliseks ja ületada isegi selle väärtust.

Sellisel juhul ei vaja trioodi võrevooluring võre ja katoodi vahelise vahelduvpinge tekitamiseks väljastpoolt antavat vahelduvvooluenergiat ja võimendusastmes tekivad *endavõnked*, s. o. *võimendusaste muutub* vahelduvvoolu tekitajaks ehk *generaatoriks*.

§ 66. Triood helisagedusvõimendajas. Helisagedusvõimendajais sisalduvaid võimendusastmeid võib liigitada kahte pea-

misse rühma: a) pingevõimendusastmed ja b) võimsusvõimendusastmed.

Pingevõimendusastme ülesandeks on — anda võrele kantava helisagedusliku vahelduvpinge puhul kooremtakisti klemmidel võimalikult kõrgemat helisageduslikku vahelduvpinget ilma pinge kuju moonutamata, s. o. nii, et kõik võimendatavas pinges sisalduvad ja erineva sagedusega pinged tõuseksid võimalikult ühesuguse arvu kordseiks.

Pingevõimendusastmete põhilised lülitused jagunevad koorma iseloomu järgi järgmisteks rühmadeks.

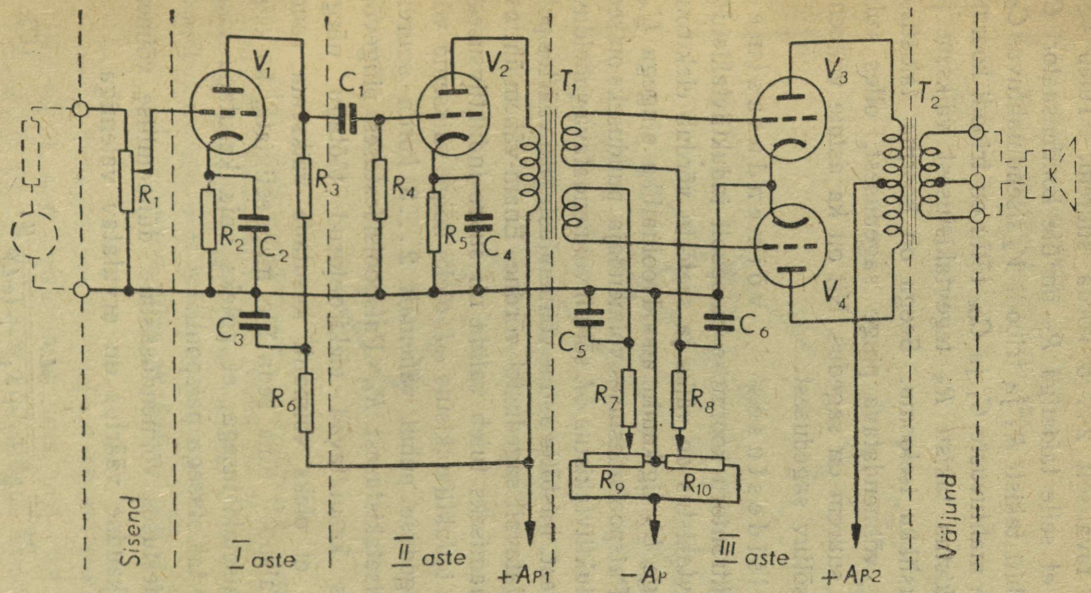
1. Takistisidestuses võimendusastmed. Neis on elektrontoru koormaks tegevtakistuslik takisti R_3 (joon. 66. 1, I aste).

2. Paispoolsidestuses võimendusastmed, mis erinevad eelmisist selle poolest, et kooremtakistit asendab paispool.

3. Transformaatorsidestuses võimendusastmed, milledes elektrontoru koormaks on transformaatori primaarmähis (joon. 66. 1, II aste).

Peale nimetatud lülituste kasutatakse veel takisti- ja transformaatorsidestusest kombineeritud lülitust.

Takistisidestuses võimendusastme võimendusteguri väärtus on arvutatav valemitega 64. 2 ja 64. 3. Trioodi anoodil oleva pinge väärtus leitakse valemiga 62. 1. Takistisidestuses astmeis kasutatakse suure võimendusteguriga μ ja nõrga anoodvooluga I_A trioode, et kooremtakistis R tekkiv pingelang $I_A R$ oleks väike. Suure pingelangu puhul peaks anoodvooluallika pinge olema väga kõrge, et saada trioodi anoodil tarviliku kõrgusega anoodpinget U_A. Madala anoodpinge puhul võiks võrele kanda ainult madalat vahelduvpinget, ilma et tekiks võrevoolu (joonised 63. 2 ja 64. 1). Nagu näha jooniselt 57. 3, väheneb anoodpinge alandamisel trioodi tõus S ja suureneb sisetakistus R_i. See omakorda vähendab võimendusastme võimendusteguri (64. 3) ja astme poolt antava vahelduvvõimsuse (64. 10) väärtust. Takistisidestuses pingevõimendaja kooremtakisti R_3



Joon. 66. 1. Triood helisagedusvõimendajas. Trioodi V_1 võre ja katoodi vahelise helisagedus-pinge väärtus on reguleeritav potentsiomeetri R_1 abil. Võimendaja I astmeks on takistisidestuses pingevõimendusaste. Trioodi V_1 kooremtakistiks on R_3. Võimendaja II astmeks on transformaatorsidestuses pingevõimendusaste ja III astmeks on kahe vastutaktlülituses oleva trioodiga võimsusvõimendusaste.

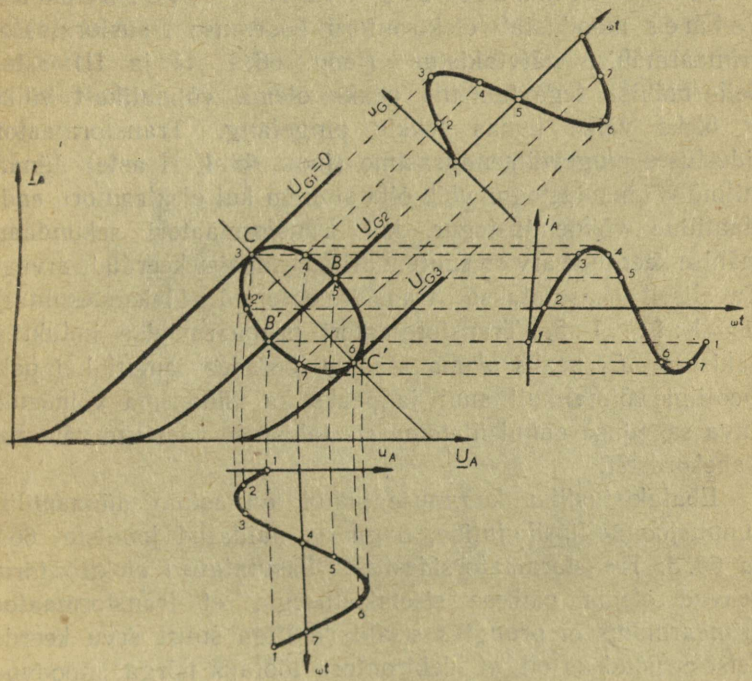
(joon. 66. 1) takistuse väärtus valitakse kasutatava trioodi sisetakistusest tavaliselt 2...5 korda suurem. Tuleb aga võtta arvesse, et selle takistiga R_3 on üle kondensaatori C_1 ühendatud rööbiti takisti R_4 ja trioodi V_2 sisendmahtuvus C_{Gd} (65. 7). Nende mahtuvuste C_1 ja C_{Gd} tõttu on trioodi koorma tegelik näivtakistus takisti R_3 tegevtakistusest väiksem ja omab mahtuvuslikku iseloomu. Seega on koorma takistuse väärtus sõltuv võimendatava pinge sagedusest, olles seda väiksem, mida suurem on sagedus. Nii on ka astme võimenduse väärtus sõltuv sagedusest.

Paispoolsidestuses võimendusastmes moodustab elektrontoru koormuse paispooli induktiivtakistus. Paispooli tegevtakistus on väike ja seetõttu võrdub elektrontoru anoodpinge $\underline{U}_A$ ligikaudu anoodvoolualliika pingega $\underline{U}_{AP}$ (joon. 63. 2). Paispoolsidestuses võimendaja puuduseks on see, et paispooli induktiivtakistus ωL sõltub võimendatava vahelduvpinge sagedusest, mistõttu astme võimendusteguri väärtus pole kõigil võimendatavail sagedustel võrdne. Enam-vähem ühtlase võimenduse saamiseks tuleb valida nii suure induktiivsusega paispool, et ta induktiivtakistus ωL oleks kõige väiksema võimendatava sageduse puhul vähemalt 2...3 korda suurem elektrontoru sisetakistusest R_i. Paispoolsidestuses pingevõimendusastmeis kasutatavad elektrontorud töötagu nõrga anoodvooluga, et oleks võimalik kasutada väiksema raudsüdamikuga paispooli ilma seda üle magneetimata, ka olgu nad väikese sisetakistusega, et poleks vaja kasutada väga suure induktiivtakistusega paispooli.

Paispoolsidestuses võimendusastme dünaamilise võimendusteguri ligikaudne väärtus on arvutatav valemiga

$$\mu_d = \frac{\omega L}{\sqrt{(R_L + R_i)^2 + (\omega L)^2}}\mu, \qquad (66.1)$$

kus ω on võimendatava vahelduvpinge ringsagedus,
L — paispooli induktiivsus,
R_L — paispooli tegevtakistus ja
R_i — elektrontoru sisetakistus.



Joon. 66. 2. Paispoolsidestuses pingevõimendusastme dünaamiline tunnusjoon, mis segakoormuse (tegev- ja ebatakistusliku koormuse) puhul on ellipsikujuline. Mida väiksem on ebakoormus võrreldes tegevkoormusega, seda lühem on ellipsi väike telg ja kui $Z = R$, siis muutuks ellips sirgjooneks ($\overline{BB'} = 0$).

Astme dünaamiline tunnusjoon on sel puhul ellipsitaoline (joon. 66. 2), sest anoodvooluringis pole vool ja pinge faasis ($1 > \cos\varphi > 0$). Induktiivse iseloomuga koormuse puhul lii-

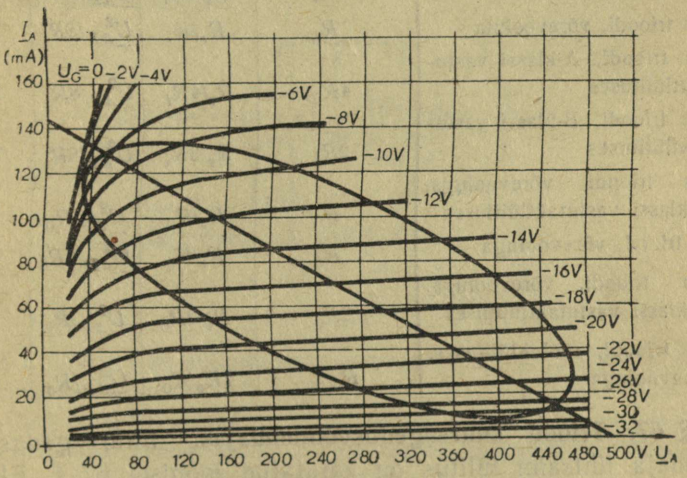
guks talitluspunkt seda ellipsit mööda kellaosuti liikumise suunas, mahtuvusliku iseloomuga koormuse puhul aga vastassuunas. Arvutuste lihtsustamiseks asendatakse see ellips tavaliselt sirgjoonega.

Transformaatorsidestuses võimendusastmes moodustab elektrontoru koormuse transformaatori primaarmähise näivtakistus (joon. 66. 1, II ja III aste). Selle mähise tegevtakistus peaks olema võimalikult väike, et oleks väike temas tekkiv pingelang. Transformaatorsidestuses pingevõimendusastme (joon. 66. 1, II aste) dünaamiline võimendustegur võib olla suurem kui elektrontoru enda staatiline võimendustegur, kui transformaatori sekundaarmähise keerdude arv on suurem primaarmähise keerdude arvust. Tavaliselt kasutatakse transformaatoreid ülekandesuhtega $\ddot{u} = 1 : 1 \ldots 1 : 5$. Transformaatori primaarmähise induktiivtakistus ωL_1 peaks olema seadme töötades samuti kui paispoolilgi võimalikult suur ja peaks ka väikseima võimendatava sageduse puhul ületama sisetakistuse väärtuse vähemalt kahekordselt.

Ebatakistusliku koormuse puhul on astme dünaamiline tunnusjoon ellipsikujuline, nagu on näidatud joonistel 66. 2 ja 66. 3. Transformaatorsidestuses kasutatavad elektrontorud peavad olema väikese sisetakistusega, et transformaatori primaarmähis ei pruugiks sisaldada liiga suurt arvu keerde. Teiseks nõudeks on, et elektrontoru töötaks nõrga anoodvooluga ja seetõttu trafo raudsüdamik ei tarvitseks olla suhteliselt kuigi suur. Elektrontoru tõus S peab aga olema võimalikult suur.

Võimsusvõimendusastmed ehitatakse tavaliselt trafosidestuses (joon. 66. 1, III aste) või vahel ka paispoolsidestuses. Nende ülesandeks on anda tarbijale võimalikult suurt vahelduvvõimsust. Nagu näitab täpsem analüüs, on lõppastme poolt antav vahelduvvõimsus siis kõige suurem, kui koorma takistus on elektrontoru sisetakistusest kaks korda

suurem (joon. 64. 4). Joonisel 66. 1 toodud näites koosneb võimsusvõimendusaste, s. o. III aste kahest vastutaktlülituses töötavast trioodist. Niisuguse lülituse puhul puuduvad võimendusastmes peaaegu täielikult elektrontoru I_A-U_A-tunnusjoone kõverusest tingitud paarisarvuliste harmooniliste ülavõngete poolt tekitatavad kujumoonutused. Väljetrafo primaarmähise mõlemat poolt läbiva alalisvoolu suunad on teineteisele vastupidised, selle tõttu puudub trafo eelmagneetimine.



Joon. 66. 3. Ebatakistusliku koormusega (kas trafo või paispool) võimsusvõimendusastme dünaamiline tunnusjoon I_A-U_A-teljestikus, mis moodustab ellipsi.

Võimsusvõimendusastmes kasutatavad trioodid peaksid olema suure tõusu ja väikese sisetakistusega.

Tabelis 66. 1 on toodud trioodidega võimsusvõimendusastmete iseloomulikumaid andmeid trioodide valiku hõlbustamiseks. Tabelis esinev anoodvooluallika pinge U_{AP} on loetud võrdseks anoodpingega U_A. Takistus $R_0 = 2U_{AP}/I_A$, kus I_A on anoodvoolu tugevus võrepinge väärtuse puhul $U_G = 0$.

Tabel 66.1.

Võimsusvõimendusastmete andmeid trioodide valikuks.

Lülitus	Väljetrafo primaarmähise klemmidevahelise koorma takistus R	Trafo ülekandesuhe $\ddot{u} = \left(\frac{w_2}{w_1}\right)^{2*}$	Maksimaalne väljevõimsus $P_{R\,max}$	Suurim kasutegur η %
Üks triood, võrevooluta	$2R_i$	$R_v/2R_i$	$U_{AP}^2/16R_i$	25
Kaks trioodi, võrevooluta	R_i	R_v/R_i	$U_{AP}^2/8R_i$	25
Kaks trioodi, A-klassi vastutaktlülituses	$4R_i$	$R_v/4R_i$	$U_{AP}^2/8R_i$	25
Kaks trioodi, B-klassi vastutaktlülituses	$2R_i$	$R_v/2R_i$	$U_{AP}^2/8R_i$	39
Kaks trioodi, võrevooluga, B-klassi vastutaktlülituses	R_0	R_v/R_0	U_{AP}^2/R_0	78
Üks triood, võrevooluga	R_0	R_v/R_0	$U_{AP}^2/2R_0$	50
Kaks trioodi, võrevooluga, A-klassi vastutaktlülituses	$2R_0$	$R_v/2R_0$	U_{AP}^2/R_0	50
Kaks trioodi, rööbiklülituses, võrevooluga	$R_0/2$	$2R_v/R_0$	U_{AP}^2/R_0	50

§ 67. Triood suursagedusvõimendajas. Suursagedusvõimendaja lihtsaim lülitus on kujutatud joonisel 67.1. Elektrontoru koorma moodustab poolist (induktiivsusega L_z) ja kondensaatorist (mahtuvusega C_z) koosnev ning tegevtakistust r_z omav võnkering. Elektrontoru võrele kantakse vahelduvpinge, mille sagedus võrdub võnkeringi omasagedusega. Selle väärtus

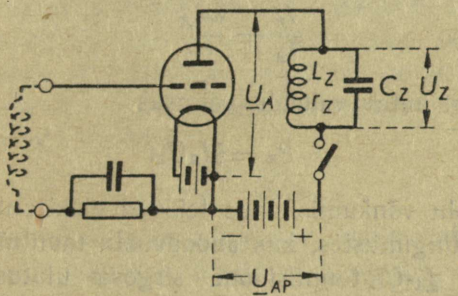
$$f_0 = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_z C_z}}. \qquad (67.1)$$

* Siin w_1 ja w_2 on trafo primaar- ja sekundaarmähise keerdude arvud, R_v — tarbija takistus.

Võrele kantud vahelduvpinge mõjul võngub elektrontoru läbiv vool sagedusega f_0. Võnkering avaldab elektrontoru läbivale alalisvoolu-komponendile väikest takistust, sest pooli tegevtakistus on väike. Vahelduvvoolu-komponendile aga avaldab võnkering resonantsi puhul takistust, mille väärtus

$$R_{ekv} = \frac{\omega_0^2 L_Z^2}{r_Z} = \frac{L_Z}{r_Z C_Z} \qquad (67.2)$$

ja mis on puht-oomiline.



Joon. 67.1. Triood suursagedusvõimendus-astmes. Aste võimendab ainult suursagedusvoolu seda sagedust, mis on resonantsis võnkeringi $L_Z C_Z r_Z$ omavõnkesagedusega, või sellele õige lähedasi sagedusi. Koormana töötav võnkering ei avalda teistele sagedustele nimetamisväärset takistust.

Võnkeringi klemmidevahelise pinge amplituud

$$U_Z = I_A R_{ekv}. \qquad (67.3)$$

Võnkeringi pooli ja kondensaatorit läbivate voolude amplituudid on

$$I_L = \frac{U_Z}{\omega L} \text{ ja } I_C = U_Z \omega C.$$

Pinge U_Z suhtes I_L hilineb umbes 90° võrra ja I_C tõttab ette umbes 90° võrra, sest neid juhtivate harude näivtakistustest on

üks induktiivse, teine mahtuvusliku iseloomuga ja nende harude tegevtakistuste väärtused on suhteliselt väikesed. Järelikult on need voolud teineteisest nihutatud ligikaudu 180° võrra ja seega vastassuunalised ning moodustavad võnkeringis võnkuva voolu, mille amplituudi väärtused I_Z on ligikaudu võrdsed pooli ja kondensaatorit läbivate voolude amplituudidega: $I_Z = I_L = I_C$ Vool võnkeringis on voolust anoodringis tunduvalt tugevam, kuna voolude suhe on pöördvõrdeline takistuste suhtega:

$$\frac{I_Z}{I_A} = \frac{\omega L_Z}{r_Z}.$$

Võnkeringi antav vahelduvvõimsus

$$P_Z = \tfrac{1}{2} I_A U_Z. \qquad (67.4)$$

Anoodvoolu võnkumisi, mis tekivad elektrontoru töötamisel sellistes tingimustes, kus anoodvoolu muutused toimuvad elektrontoru I_A-U_G-tunnusjoone sirgosa ulatuses, nimetatakse esimese liigi võnkumisteks.

Kui võrel vahelduvpinge puudub, on anoodvoolu tugevus võrdne alalisvoolu-komponendi väärtusega I_A ja anoodpinge U_A on võrdne anoodvooluallika pingega U_{AP}, sest alalisvoolu puhul on pingelang võnkeringis tähtsusetult väike. Kui kanda võrele vahelduvpinge, mille sagedus on võrdne võnkeringi omasagedusega, siis tekib selle klemmide vahel vahelduvpinge amplituudiga U_Z. See vahelduvpinge liitub alalispingega U_{AP}, mistõttu elektrontoru anoodi ja katoodi vaheline pulseeriv pinge U_{pA} võngub piirides $U_{AP} + U_Z$ ja $U_{AP} - U_Z$. Võrreldes anoodvooluga võngub anoodpinge nii, et hetkel, mil anoodvoolu tugevus on maksimaalne, on anoodi ja katoodi vaheline pinge minimaalne, ja ümberpöördult. Võrreldes anoodi ja katoodi vahelise pinge kõikumist võrepinge kõikumisega, selgub, et nende hetkväärtused asetsevad teineteise suhtes ajaliselt järgmiselt: kui võre kannab

katoodi suhtes maksimaalset positiivset potentsiaali, siis on anoodpinge katoodi suhtes minimaalne, ja kui võrepinge omab maksimaalset negatiivset väärtust, siis on anoodi ja katoodi vaheline pinge maksimaalne.

Teatud trioodi puhul saavad anoodvoolu vahelduvkomponendi amplituudid I_A olla maksimaalsed siis, kui talitluspunkt on valitud $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone sirgosa keskele, missugusel juhul $I_A = \frac{1}{2} I_s$. Anoodpinge vahelduvkomponendi amplituudide U_A maksimaalsed väärtused on piiriteldud nõudega, et katoodi ja anoodi vaheline pinge ei tohi ühelgi hetkel olla madalam kui võre maksimaalne positiivne pinge katoodi suhtes, sest kui võre positiivne pinge katoodi suhtes oleks kõrgem kui anoodi positiivne pinge, siis tekiks liialt tugev võrevool. Järelikult

$$U_A = \xi U_{AP}, \tag{67.5}$$

kus ξ on anoodpinge kasutustegur, mille väärtus trioodide puhul võib olla kuni 0,9. Seega võib suursagedusvõimendusastme poolt antava suursagedusvõimsuse väärtus ulatuda kuni

$$P_{Z\,max} = \tfrac{1}{4} \xi I_s U_{AP}. \tag{67.6}$$

Tema poolt anoodvooluallikast võetav maksimaalne alalisvõimsus

$$P_{AP} = I_A U_{AP} = \tfrac{1}{2} I_s U_{AP}. \tag{67.7}$$

Seega on suursagedusvõimendus-astme suurim kasutegur

$$\eta = \frac{P_{Z\,max}}{P_{AP}} = \tfrac{1}{2} \xi = 0{,}45 = 45\%. \tag{67.8}$$

Selleks, et saada suuremat kasutegurit, valitakse talitluspunkt kas $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone algusse (B-klass) või sellest negatiivsemasse võrepinge piirkonda (C-klass). Juhul, kui talitluspunkt asetseb $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone alguses, koosneb anoodvool üksikuist voolupulssidest, millede lõike-

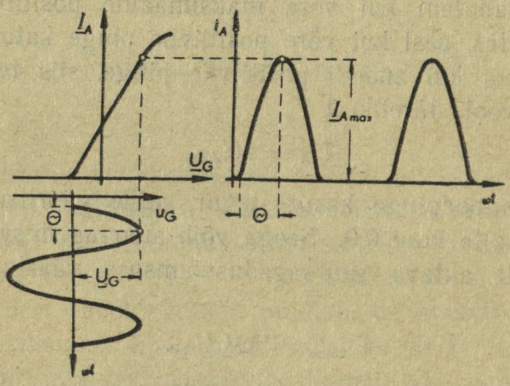
nurk $\Theta = 90^0$ ja mida nimetatakse *teise liigi* võnkumisteks (joon. 67. 2). Sel puhul saavad suurused omada järgmisi maksimaalseid väärtusi.

Anood-vahelduvvool

$$I_{A\,max} = \underline{I}_s.$$

Kui lõikenurk omab väärtust $\Theta = 90^0$ siis anood-alalisvool

$$\underline{I}_A = \frac{1}{\pi} I_{A\,max}. \qquad (67.9)$$



Joon. 67. 2. Trioodi anoodvoolu pulseerimine, kui lõikenurk $\Theta = 90^0$.

Esimese harmoonilise ülasageduse amplituud Fourier' (l.: furjee) rea kohaselt

$$I_{A1} = \tfrac{1}{2} I_{A\,max}. \qquad (67.10)$$

Suursagedusvõimsus (67. 6)

$$P_Z = \tfrac{1}{4} \xi \underline{I}_s \underline{U}_{AP}.$$

Alalisvõimsus

$$\underline{P}_{AP} = \frac{1}{\pi} \underline{I}_s \underline{U}_{AP}. \qquad (67.11)$$

Kasutegur

$$\eta = \frac{\pi}{4}\,\xi = \frac{\pi}{4}\,0{,}9 = 0{,}707 = 70{,}7\%. \qquad (67.12)$$

Talitluspunkti nihutamisel $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone algusest veel negatiivsema võrepinge piirkonda, muutub lõikenurga väärtus $\Theta < 90^0$ ja kasutegur suureneb veelgi. Elektrontorult praktiliselt saadav maksimaalne võimsus

$$P_{Z\,max} \approx 0{,}2\underline{I}_s\underline{U}_{AP}. \qquad (67.13)$$

Talitluspunkti nihutamiseks vajaliku võre-eelpingena kasutatakse sageli võrevooluringi ühendatud takisti klemmide vahel tekkivat pingelangu.

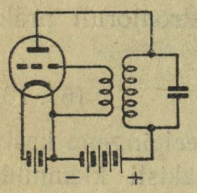
Trioodiga töötava suursagedusvõimendaja puuduseks on temas sisalduva trioodi anoodi ja võre vahel esinev suur mahtuvus. Selle mahtuvuse kaudu võrevooluringist anoodvooluringi kulgeva voolu tugevus võib olla õige suur ja seda eriti suuremate sageduste puhul. Ka võib selle mahtuvuse kaudu anoodvooluringist võrevooluringi kantav pinge tekitada võimendusastmes endavõnkeid, s. o. võimendaja võib muutuda generaatoriks (§ 68). Selle puuduse kõrvaldamiseks kasutatakse mitmesuguseid neutraliseerivaid lülitusi.

Sageli kasutatakse ka suursagedusvõimendajaid vastutaktlülituses (§ 66).

Suursagedusvõimendajaid kasutatakse saatejaamades suursagedusliku vahelduvpinge saamiseks või antennide toiteks vajaliku suursagedusvõimsuse tekitamiseks.

§ 68. Triood generaatoris. Elektrontorudega töötavaid generaatoreid kasutatakse helisagedusliku või suursagedusliku vahelduvvoolu tekitamiseks. Nad erinevad paragrahvis 67 käsiteldud võimendajast ainult selle poolest, et neis ammutatakse toru võrele kantav vahelduvpinge sama elektrontoru anoodvooluringist. Selleks kasutatavaid lülitusi on väga mitmesuguseid. Generaatori töötamise põhimõtte selgitamiseks on joonisel 68. 1 kujutatud üks lihtsamaid lülitusi.

Generaatori töötamiseks on vajalik, et võre ja katoodi vahelise vahelduvpinge kõrgus oleks küllaldane elektrontoru tüürimiseks ja et anood- ja võrevooluringi vahelise sidestuse kaudu võreringi kanduv pinge oleks anoodringis mõjuvast vahelduvpingest nihutatud faasis umbes 180^0 võrra. Vastasel juhul ei saaks generaatoris võnkeid üldse tekkida. Nende nõuete täitmiseks peab võre- ja anoodvooluringi vaheline sidestus omama küllaldast tugevust ja pinge tuleb juhtida võrele õiges faasis. Generaatoriga tekitatava vahelduvvoolu sagedus on võrdne anoodvooluringis sisalduva võnkeringi endasagedusega.

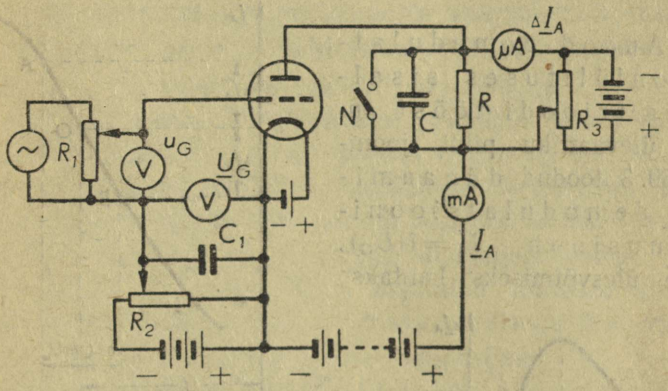


Joon. 68. 1. Võre-sidestusega suursagedusgeneraatori põhimõtteskeem.

Trioode sisaldavaid vahelduvvoolu generaatoreid kasutatakse muundraadiovastuvõtjais, raadiosaatjais suursagedusvoolu tekitamiseks ja mitmesuguseis mõõteriistades suursagedusliku või helisagedusliku vahelduvvoolu tekitamiseks.

§ 69. Triood demodulaatoris. Moduleeritud suursagedusvoolu demoduleerimine (detekteerimine ehk ka alaldamine, nagu seda vahel lihtsamalt, kuid ebatäpselt nimetatakse) on teostatav trioodi abil selle tunnusjoone ebalineaarsuse ja ebasümmeetrilisuse tõttu. Demoduleerimise niisugust viisi, mille juures võrele kantav moduleeritud suursageduspinge põhjustab anoodvoolu kõikumisi ja demoduleerimine toimub anoodvooluringis, nimetatakse a n o o d - d e m o d u l a t s i o o n i k s (anood-detektsiooniks). Teist viisi aga, mille juures demoduleerimine toimub juba võrevooluringis endas ja demoduleerimisel saadavad pingekõikumised põhjustavad anoodvoolu võnkeid, nimetatakse v õ r e - d e m o d u l a t s i o o n i k s (võre-detektsiooniks). Mõlemal juhul kaasub demoduleerimisega ka võimendus.

Anood-demodulatsiooni puhul kasutatakse demoduleerimiseks trioodi I_A-U_G-tunnusjoone alumist põlvikut. Talitluspunkti nihutamiseks alumisele põlvikule antakse võrele vastava kõrgusega negatiivne eelpinge. Talitluspunktile sobivaima asukoha leidmiseks ja trioodi tööst ülevaate saamiseks kasutatakse trioodi demodulatsiooni-

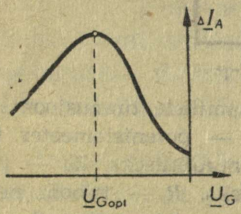


Joon. 69. 1. Anood-demodulatsiooni dünaamiliste tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutatava seadise skeem. R_1 — potentsiomeeter trioodi võrele juhitava vahelduvpinge väärtuse muutmiseks. R_2 — potentsiomeeter trioodile võre-eelpinge andmiseks. R — trioodi kooremtakisti. R_3 — potentsiomeeter mikroampermeetri osuti nullasendisse viimiseks.

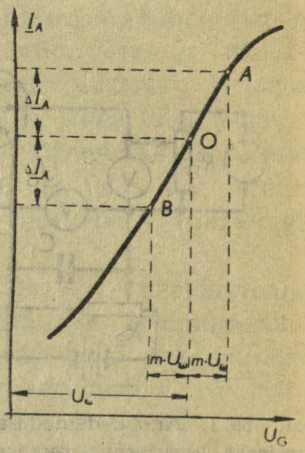
tunnusjooni, millede ülesvõtmiseks võib kasutada joonisel 69. 1 kujutatud lülitust. Joonisel 69. 2 on toodud eelpinge soodsaima kõrguse määramiseks ülesvõetud kõver. Selle ülesvõtmiseks ühendatakse trioodi anoodvooluringi kooremtakisti R koos rööbiti oleva sildamiskondensaatoriga C, mille takistus ei oma mõõtmisel kasutatava sageduse puhul niisugust väärtust, mida pruugiks arvestada (selleks peab olema rahuldatud nõue, et $\omega RC \gg 1$). Trioodi võrele antakse madal vahelduvpinge u_G ja muutes võrdsete astmete kaupa võre-eelpinge U_G kõrgust, loetakse samaaegselt kom-

pensatsioonlülituses sisalduvalt mikroampermeetrilt vastavad anoodvoolu tugevuse muutused. Saadud võrepinge ja anoodvoolu tugevuse muutuse väärtused paarikaupa ΔI_A-U_G-teljestikku kantuna annavadki joonisel 69. 2 toodud kõvera, millelt leitakse võrele kantavale vahelduvpingele vastav soodsaim eelpinge kõrgus U_{Gopt}.

Anood-demodulatsioonlülituses sisalduva trioodi tööst annab ülevaatliku pildi joonisel 69. 3 toodud dünaamiline demodulatsioonitunnusjoon $I_A = f(U_G)$. Selle ülesvõtmiseks kantakse



Joon. 69. 2. Kõver $\Delta I_A = f(U_G)$ anood-demodulaatori talitluspunkti soodsaima asukoha määramiseks.



Joon. 69. 3. Anood-demodulaatorina töötava trioodi dünaamiline demodulatsiooni-tunnusjoon $I_A = f(U_G)$, mis näitab anoodvoolu I_A tugevuse muutust sõltuvalt võrele kantava vahelduvpinge amplituudi kõrgusest.

trioodi võrele soodsaimale talitluspunktile vastav eelpinge U_{Gopt}, ja muutes võrele kantava vahelduvpinge kõrgust nullist kuni maksimaalse väärtuseni, mõõdetakse samaaegselt vastavat anoodvoolu tugevuse muutumist I_A. Saadavad andmed teljestikku kantuna annavadki joonisel 69. 3 toodud kõvera. Märkides sellele kõverale trioodi võrele kantava moduleerimata suursageduspinge amplituudi väärtuse U_ω, saadakse punkt O, millele vastab teatav anoodvool.

Kui suursageduspinge on moduleeritud sügavusega m, siis kõigub tema amplituudi väärtus vastavalt moduleerimiseks kasutatud helisageduse amplituudile ümber punkti O joonlõigul $\overline{AB}$. Seejuures vastavad moduleeritud suursageduspinge amplituudide maksimaalsed väärtused punktile A ja minimaalsed väärtused punktile B. Kooremtakistis tekkiva helisageduspinge amplituudide väärtused on siis $\Delta I_A R$. Et demoduleerimine toimuks lineaarselt, selleks peaks kõverjoone osa $\overline{AB}$ olema võimalikult sirgjooneline.

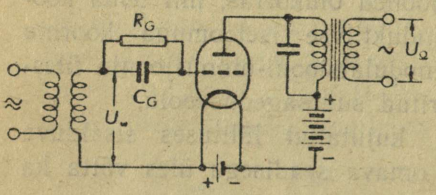
Selliselt teostatud mõõtmistel saadakse trioodi dünaamilised demodulatsiooni-tunnusjooned olukorras, mil tema koorem on tegevtakistuslik. Induktiivse iseloomuga koorma puhul tuleb dünaamiliste demodulatsiooni-tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutada moduleeritud suursagedusvoolu.

Sulgenud joonisel 69. 1 kujutatud lülituses sisalduva lüliti N, saab sama lülitust omava seadisega üles võtta ka trioodi staatilisi demodulatsiooni-tunnusjooni.

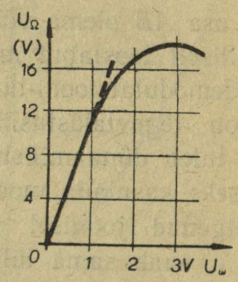
Katsed on näidanud, et kodumaistel trioodidel on staatiliste parameetrite ja demodulatsioonlülituses esinevate parameetrite seos ligikaudu järgmine: madalate võrepingete puhul ($U_G < 1$ V) $\mu_{dem} = 0{,}3\mu$ ja $R_{idem} = 2{,}5R_i$ ning kõrgete võrepingete puhul ($U_G > 3$ V) $\mu_{dem} = 0{,}6\mu$ ja $R_{idem} = 2R_i$. Kasutades neid parameetreid, on võimalik arvutada demodulatsiooni puhul koorma klemmide vahel tekkivaid pingeid samuti kui pingevõimendusastmeiski.

Võre-demodulatsiooni puhul on trioodi võreringi ühendatud kondensaator C_G koos rööbiti oleva takistiga R_G (joon. 69. 4). Nende ligikaudsed väärtused on: $C_G = 50 \ldots 100$ pF ja $R_G = 1 \ldots 2$ MΩ. Kui võre ja katoodi vahel vahelduvpinget ei ole, siis on anoodvoolu tugevus I_{Ao} ja võrevooluringis kulgeb nõrk vool I_{Go} (joon. 59. 1). Kui rakendada võrele vahelduvpinge, sarnaneb trioodi võrevooluring kahe elektroodiga elektrontorust koosneva poolperiood-

alaldaja vooluringiga (joon. 44. 4), milles R_G on kooremtakistiks ja kondensaator C_G sildamiskondensaatoriks. Ka töötamisviis on neil sarnane: mida kõrgem on võre ja katoodi vaheline vahelduvpinge, seda kõrgem on ka ühesuunalise voolu mõjul pingelangu tõttu tekkiv takisti R_G klemmidevaheline pinge, mille miinuspotentsiaal on ühendatud võrega ja plusspotentsiaal katoodiga. Kui võrele antav suursageduspinge on helisagedusega amplituudis moduleeritud, siis kõi-



Joon. 69. 4. Triood võre-demodulaatorlülituses. U_ω — helisagedusega moduleeritava suursageduspinge amplituudi väärtus moduleerimata olukorras, U_Ω — demoduleerimisel saadava helisageduspinge amplituud.



Joon. 69. 5. Võre-demodulaatori dünaamiline demodulatsioonitunnusjoon. U_ω — helisagedusega moduleeritava suursageduspinge amplituudi väärtus moduleerimata olukorras, U_Ω — demoduleerimisel saadav helisageduspinge amplituud.

gub takisti R_G klemmidevahelise ühesuunalise pinge väärtus vastavalt suursagedusvoolu amplituudi väärtuste kõikumisele. Et see pinge on rakendatud võre ja katoodi vahele, siis tüürib tema väärtus ka anoodvoolu tugevust anoodvooluringis. Vool anoodvooluringis on seda nõrgem, mida suuremad on võrele kantava suursageduspinge amplituudid, ja vastupidi.

Joonisel 69. 5 toodud kõver näitab helisageduspinge U_Ω sõltuvust moduleeritavast suursageduspingest U_ω. Nagu kõverast näha, tõuseb helisageduspinge suursageduspinge tõustes

algul sellega võrdeliselt, teatavast väärtusest alates aga ebavõrdeliselt, millega kaasuvad ka kujumoonutused. Kõvera paindumise põhjustaja on trioodi I_A-U_G-tunnusjoone alumine põlvik. Kui võrel on kõrge vahelduvpinge U_ω, on takisti R_G klemmidevaheline ühesuunaline pinge niivõrd kõrge, et talitluspunkt nihkub tunnusjoone alumisele põlvikule ja trioodis toimub ka anood-demodulatsioon, mis aga on võre-demodulatsioonile vastassuunaline.

Trioodi töötamisest võre-demodulaatorina annab ülevaate võrele rakendatud ja mitmesuguse väärtusega vahelduvpingete juures ülesvõetud I_A-U_A-tunnussari (joon. 69. 6). Nende kõverate ülesvõtmiseks kantakse võrele vahelduvpinge ja anoodpinget muutes mõõdetakse anoodvoolu tugevusi. Seda korratakse mitmesuguse kõrgusega vahelduvpingete puhul. Mõõtmist võib teostada ka helisagedusvooluga, kondensaatori mahtuvus peab aga olema siis vastavalt suurem:

$$\omega C_G = \omega' C_G',$$

kus ω on suursagedusvoolu ringsagedus,

C_G — suursageduse puhul kasutatava kondensaatori mahtuvus,

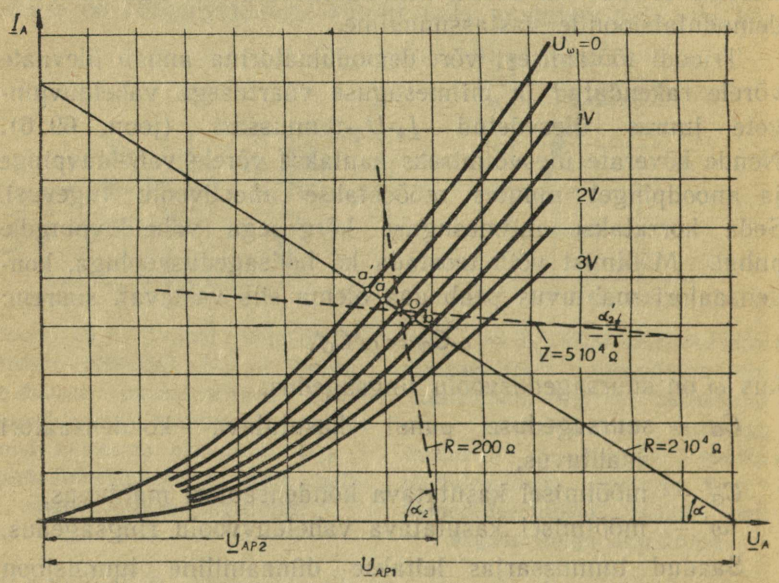
C_G' — mõõtmisel kasutatava kondensaatori mahtuvus,

ω' — mõõtmisel kasutatava vahelduvvoolu ringsagedus.

Saadud tunnussarjas leitakse dünaamiline tunnusjoon samuti kui võimendajate juures (joon. 63. 2).

Joonisel 69. 6 on kasutatava anoodpingeallika pinge väärtust tähistavast punktist U_{AP1} tõmmatud koorma takistuse väärtusele $R = 2 \cdot 10^4\ \Omega$ vastav sirge nurga α all, mis on määratud võrrandiga $\operatorname{ctg} \alpha = R$. Selle sirge ja võrepinge väärtusele $U_\omega = 0$ vastava tunnusjoone lõikepunkti a' asukoht määrab anoodvoolu I_A ja anoodpinge U_A väärtused, kui võrel vahelduvpinget ei ole. On aga võrel vahelduvpinge $U_\omega = 1$ V, siis määrab samu väärtusi punkt O. Kui aga seesama võrele rakendatud vahelduvpinge $U_\omega = 1$ V on modu-

leeritud 50-protsendiliselt, siis liigub talitluspunkt punkti O ümber punktide a ja b vahel. Lõigu $\overline{Oa}$ (samuti ka $\overline{Ob}$) projektsioon $\underline{U}_A$-teljele näitab demoduleerimisel kooremtakisti klemmide vahel saadava pinge amplituudi väärtust. Kui lõigud $\overline{Oa}$ ja $\overline{Ob}$ omavad võrdseid pikkusi, siis toimub demodulatsioon lineaarselt. Ebavõrdse pikkuse puhul tekkiva, tei-



Joon. 69. 6. Trioodi I_A-U_A-tunnussari, mis on üles võetud võrele rakendatud mitmesugust tippväärtust U_ω omavate vahelduvpingete puhul.

sest harmoonilisest ülasagedusest tingitud kujumoonutuse tegur on arvutatav valemiga 64. 14. Demodulaatorastme võimendustegur

$$V_d = \frac{U_\Omega}{U_\omega m}, \qquad (69.1)$$

kus U_Ω on helisageduspinge amplituud.

Joonisel 69. 6 on kriipsjoontega näidatud dünaamilise tunnusjoone määramine, kui koormaks on paispool või transformaator, mille mähise tegevtakistus $R = 200\ \Omega$ ja näivtakistus $Z = 5 \cdot 10^4\ \Omega$. Seejuures vajalik anoodvooluallika pinge on U_{AP2}. Ehkki talitluspunkt niisuguse koorma puhul ei liigu mööda koorma Z sirget, vaid mööda ellipsit (joon. 66. 2), loetakse teda lihtsustuse mõttes siiski mööda sirgjoonelist teekonda liikuvaks.

Võre-demodulatsiooni kasutatakse madalate moduleeritud pingete demoduleerimiseks, kuna kõrgemate pingete puhul kasutatakse anood-demodulatsiooni või diood-demodulatsiooni.

§ 70. Triood mõõteriistades. Elektrontoru-mõõteriistadest on üheks levinenumaks suursageduslike ja helisageduslike pingete mõõtmiseks kasutatav elektrontoru-voltmeeter. Elektrontoru-voltmeetri eeliseks on: 1) suur sisendtakistus, mille tõttu seadise voolutarvitus on väike, 2) väike sisendmahtuvus ja 3) mõõtetulemuste sõltumatus mõõdetava vahelduvpinge sagedusest. Paragrahvis 44 kirjeldatud tipppingemõõtjasse oli vaja võrdlemisi õrna ja kallist galvanomeetrit või mikroampermeetrit. Kasutades dioodi joonisel 42. 3 toodud skeemile vastavas lülituses, on võimalik kanda dioodi kooremtakisti klemmide vahel tekkiv pinge trioodi võrele ja kasutada trioodi anoodvooluringis milliampermeetrit kompensatsioonlülituses. Dioodi asemel võib kasutada ka trioodi, mille võre on ühendatud katoodiga või anoodiga.

Kasutatakse ka selliseid elektrontoru-voltmeetreid, milledes esimeseks elektrontoruks on triood võre-demodulaatorlülitustes.

§ 71. Trioodide tüübid. Trioode liigitatakse tavaliselt nende peamise kasutusotstarbe järgi. Nii kuuluvad raadiovastuvõtjates, väikese võimsusega võimendajates jm. kasutatavate väikese võimsusega elektrontorude rühma: pingevõi-

mendustorud, võimsusvõimendustorud, ostsillaator- ehk generaatortorud, demodulaatortorud jt. Saatejaamades ja muudes suure võimsusega seadmetes kasutatavate suure võimsusega elektrontorude rühma kuuluvad: modulaatortorud, õhkjahutatud ja vesijahutatud suure võimsusega torud, lühilaine- ja ülilühilaine-generaatortorud.

1. Pingevõimendustorudena kasutatakse trioode peamiselt helisagedusvõimendajais. Samu elektrontorusid kasutatakse ka demodulaatoreis.

Takistisidestuse jaoks valmistatavad trioodid omavad suurt võimendustegurit: $\mu = 20 \ldots 100$. Tavaliselt on nende tõus $S = 1 \ldots 2$ mA/V, mis annab sisetakistuse $R_i = 30\,000 \ldots 70\,000\ \Omega$. Kooremtakistis (mille takistuse väärtus on tavaliselt $3 \ldots 4\,R_i$) tekkiva suure pingelangu tõttu on nende anoodpinge $\underline{U}_A$ töötamisel tunduvalt madalam anoodvooluallika pingest $\underline{U}_{AP}$ ($\underline{U}_A = \underline{U}_{AP} - \underline{I}_A R$). Suure võimendusteguri μ tõttu on nende trioodide $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone vasakpoolne (teljestiku teises veerandis asetsev) osa lühike. Näiteks on $\underline{U}_A = 160$ V ja $\mu = 30$ puhul $\underline{U}_G = -\underline{U}_A/\mu = -160/30 = -5{,}3$ V. Et $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-tunnusjoone alumine osa on kõver, siis saab neid trioode kasutada võimendajais madala negatiivse võre-eelpingega, näit. $\underline{U}_G = -1 \ldots -1{,}5$ V.

Trafosidestuse jaoks valmistatud trioodidel on $\mu = 8 \ldots 14$ ja eelmistega ühesuguse tõusu puhul — sisetakistus $R_i = 8000 \ldots 12\,000\ \Omega$. $\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-teljestiku teises veerandis asetsev osa on väiksema μ tõttu tunduvalt pikem.

Nõukogude Liidu tööstuste poolt valmistatavad trioodid liigituvad toitepingete suhtes järgmiselt:

a) Kaudselt köetavad metalltorud: $U_{ef} = 6{,}3$ V, $\underline{U}_A = \ldots 250$ V.

b) Kaudselt köetavad klaastorud: $U_{ef} = 4$ V, $\underline{U}_A = 160 \ldots 240$ V.

c) Baariumkatoodiga vahetult köetavad torud: $U_F = 4$ V, $U_A = 120 \ldots 160$ V.

d) Ökonoomsed vahetult köetavad torud: $U_F = 2$ V, $U_A = 80 \ldots 120$ V.

e) Vahetult köetavad pisitorud: $U_F = 2$ V, $U_A = 80 \ldots 120$ V.

2. Võimsusvõimendustrioodidel, mis töötavad helisagedusvõimendajais, peab olema teises veerandis asetsev tunnusjoone osa pikk, et vältida moonutusi põhjustava võrevoolu tekkimist. Seetõttu valmistatakse nad väikese võimendusteguriga μ (tavaliselt 4 ... 8). Suure võimsuse saamiseks peab neil aga olema võrdlemisi suur tõus: $S = 3 \ldots 6$ mA/V. Seega on nende sisetakistus $R_i = 1000 \ldots 2000\ \Omega$. Trioodi poolt maksimaalselt antavat kasulikku võimsust võib määrata ligikaudu järgnevalt. Eeldades, et trioodi I_A-U_G-tunnusjoone teises veerandis (vasakul) asetsev osa kasutatakse ära täies ulatuses, peab olema võrele kantavate vahelduvpinge amplituudide väärtus

$$U_G = \frac{\xi U_{AP}}{\mu} \cdot \frac{1 + \alpha}{2 + \alpha}, \qquad (71.1)$$

kus U_G on võrele kantava vahelduvpinge tippväärtus,

ξ — anoodpinge kasutustegur, tavaliselt alla 0,9,

α — koorma takistuse väärtuse ja sisetakistuse suhe (R/R_i), tavaliselt üle kahe (vt. joon. 64.4),

U_{AP} — anoodpingeallika pinge, mida siin loetakse võrdseks trioodi anoodpingega (U_A), eeldades, et anoodvooluringis oleva koorma takistus alalisvoolule on null.

Trioodi poolt antav maksimaalne kasulik võimsus

$$P_{z\,max} = \frac{(\mu U_G)^2}{2R_i} \cdot \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} = \frac{\mu S U_G^2}{2} \cdot \frac{\alpha}{(1 + \alpha)^2} \qquad (71.2)$$

Trioodi ja tema talitlustingimuste valikul tuleb tähele panna ka seda, et anoodkadu P_A töötamisel ei ületaks maksi-

maalselt lubatavat määra $P_{A\,max}$. Trioodilt saadav kasulik võimsus on näiteks A-klassi võimendajas $P_Z = \frac{1}{2} I_A U_A$. Praktiliselt saavutatav kasutegur ei ületa tavaliselt 20 ... 30%. Tegelikult aga tuleb moonutustest hoidumiseks piirduda veelgi väiksema kasuteguriga (umbes 15%). Sellest lähtudes saab määrata ligikaudset anoodkao väärtust A-klassi lülituses olevas trioodis.

Alljärgnevas on toodud ligikaudse arvutuse näide helisagedusvõimendaja koostamisel sobivate trioodi tüüpide valimiseks.

Näide 71. 1. Määrata vajalik trioodide arv ja tüübid helisagedusvõimendaja jaoks, mille väljevõimsus $P_Z = 0{,}4$ W ja sisendpinge amplituud $U_G = 30$ mV. Trioodide katoodi kütteks on kasutada vahelduvvool. Kasutatava anoodvooluallika pinge on 160 V.

Lahendus. Raamatu lisas toodud tabelist I nähtub, et sobivaks trioodiks lõppastmes on УО-104.

Kui kooremtakisti $R = 2R_i$, siis valemi 64. 13 järgi

$$U_G = \sqrt{\frac{9P_Z}{\mu S}} = \sqrt{\frac{9 \cdot 0{,}4}{4 \cdot 3{,}2 \cdot 10^{-3}}} \approx 17\text{ V}.$$

Selleks, et $I_A = 0$, tuleb trioodi УО-104 võrele kanda negatiivne pinge $DU_A = \frac{1}{4} \cdot 160 = 40$ V (§ 58). Seega võib võre-eelpinge väärtus olla kuni -20 V, millega võib liita vahelduvpinge amplituudiga $U_G = 17$ V.

Eelmiste astmete kogu pingevõimendus peab olema

$$\frac{U_{väl}}{U_{sis}} = \frac{17}{0{,}03} \approx 567\text{-kordne}.$$

Säärast võimendust võib saavutada kahe astme abil, milledest kummagi võimendustegur

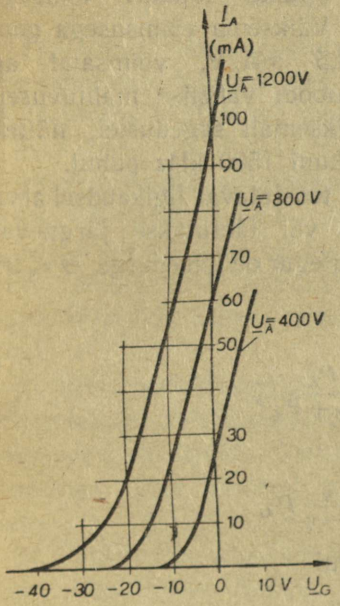
$$\mu_d = \sqrt{567} \approx 24.$$

Nii suure võimenduse võib anda kaudselt köetav triood СО-118 takistisidestuses. Kooremtakisti minimaalne takistus $\mu_d = 24$ saavutamiseks on valemi 64. 3 järgi

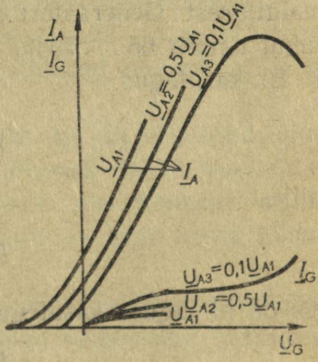
$$R_Z = \frac{\mu_d R_i}{\mu - \mu_d} = \frac{24 \cdot 21\,000}{36 - 24} = 42\,000\ \Omega.$$

Järelikult suudab see triood sobivais talitlustingimustes anda veelgi suuremat võimendust.

3. Modulaatortrioode ning suure võimsusega helisagedusvõimendus-trioode kasutatakse saateseadmeis moduleeriva helisagedusvoolu võimsusvõimendusastmetes ja suure väljevõimsusega helisagedusvõimendajates. Neid kasutatakse niihästi A-klassi kui ka vastutaktlülitustes AB- või B-klassi talitlustingimustes. Helisageduse võimendamiseks kasutatakse tavaliselt trioodi I_A-U_G-tunnusjoone vasakpoolset osa ja seepärast



Joon. 71.1. Modulaatortrioodi 2TM20 I_A-U_G-tunnussari.



Joon. 71.2. Generaatortrioodi I_A-U_G- ja I_G-U_G-tunnussari.

valmistatakse need trioodid — tunnusjoone suure vasakpoolse osa saavutamiseks (joon. 71.1) — väikese võimendusteguriga μ.

4. Õhk- või vesijahutusega suursagedusvõimendus-trioode ehk nn. generaatortrioode kasutatakse peamiselt saatejaamades antenni toi-

teks vajaliku suursagedusvoolu võimendamiseks, või ka generaatorlülitustes suursagedusvoolu tekitamiseks.

Generaatortrioodide I_A-U_G-tunnusjoone kasutatav osa asetseb peamiselt teljestiku esimeses veerandis (joon. 71. 2). Lubatava maksimaalse anoodvoolu tugevuse määrab P_{Amax}. Tunnusjoonte ülesvõtmiseks teostatavail mõõtmistel on volframkatoodiga generaatortorude puhul lubatav lühiaegne 1,5 ... 2-kordne P_{Amax} ületamine. Väiksema võimsusega generaatortrioodidel on $S = 1 \ldots 1{,}5$ mA/V, võimsatel aga 6 ... 8 mA/V. Suure võre ja anoodi vahelise mahtuvusega trioode saab kasutada ainult väiksemail sagedustel, näiteks tähtedega ГД märgitud trioode kuni 1500 kHz puhul.

Sobiva generaatortoru valikul teostataval ligikaudsel arvutusel kasutatakse valemit 67. 13 või lähtutakse järgnevast kaalutlusest. Generaatortoru kasutegur on lõikenurga $\Theta \leqslant 90^0$ puhul umbes 65 ... 70%.

Et kasutegur

$$\eta = \frac{P_Z}{P_Z + P_A},$$

millest

$$P_Z = \frac{\eta}{1 - \eta} P_A,$$

siis on niisuguse kasuteguri puhul

$$P_Z \approx 2P_A. \qquad (71.3)$$

Eriti suurt võimsust andvad trioodid varustatakse vesijahutusega. Vesijahutusega elektrontorus asetsevad võre ja katood silindrikujulise vasest anoodi sees, mis on ühtlasi ka elektrontoru selle osa kestaks (vt. joon. 34. 2). Teised elektroodid on kinnitatud kesta klaasist osa külge. Kesta klaasist osa ja vasest osa servad on kokku sulatatud. Vesijahutusega trioodides kantakse anoodkao P_A tõttu anoodil tekkiv soojus anoodilt ära vee abil. Selleks asetatakse elektrontoru meta!-

list osa sellekohasesse hermeetiliselt suletavasse veeanumasse, mida läbib voolav vesi. Mõõtes vee temperatuuri anumasse sissevoolamisel t_1 ja anumast väljavoolamisel t_2 ning vee läbivoolamise kiirust liitrites minutis n, võib anoodilt soojusena ärakantavat võimsust arvutada järgnevalt:

$$P_A = \frac{(t_2 - t_1)\, n\, 1000}{60 \cdot 0{,}24} = 69{,}4\,(t_2 - t_1)\, n\,. \qquad (71.4)$$

Täpsema tulemuse saamiseks tuleb veel arvesse võtta soojuse lahkumist kiirguse teel ja samuti küttevooluallika poolt elektrontorus tekitatavat soojust.

5. Lühi- ja ülilühilainete tekitamiseks vajaliku suursagedusvoolu saamiseks kasutatakse eriti väikese elektroodidevahelise mahtuvusega trioode. Sageli kasutatakse ka lülitusi, kus mõnede elektroodide vahelised mahtuvused toimivad võnkeringide mahtuvustena. Nende trioodide suhtes esitatavad põhilised nõuded on järgmised:

a) Elektroodidevaheline mahtuvus ja dielektrilised ning pöörisvoolukaod elektrontorus olgu väikesed. See on saavutatav peamiselt elektroodide ühendusjuhtmete elektrontorust väljatoomisega kõige lühemat teed kaudu — läbi kesta klaasseina.

b) Elektronide lendamise aeg läbi elektroodidevahelise ruumi olgu lühike. Selleks asetatakse elektroodid üksteisele võimalikult lähedale ja kasutatakse kõrgeid anoodpingeid.

c) Anoodi jahtumine peab teostuma kiiresti, milleks sageli kasutatakse anoodidel jahutusribisid.

Tabelis 71. 1 on näitena toodud mõnede trioodide tehnilised andmed. Tabelis 71. 2 on toodud traatside-tehnikas kasutatavate võimendustrioodide tehnilised andmed.

Tabel 71.1.

Mõnede trioodide tehnilised andmed.

Trioodi liik	Tüübi tähis	Küttepinge U_{eF} V	Küttevool I_{eF} A	Anoodpinge U_A V	Emissioonvool I_e mA	Võimendustegur μ	Tõus S mA/V	Maksimaalne anoodkadu $P_{A\,max}$ W	Võre ja anoodi vaheline mahtuvus C_{GA} pF	Võre ja katoodi vaheline mahtuvus C_{GK} pF	Katoodi ja anoodi vaheline mahtuvus C_{KA} pF	Lubatav anoodvool I_A mA
Pingevõimendustriood takistisidestusele	6Ф5	6,3	0,3	250	35	100	1,5	0,4	2	6,0	12	0,9
Pingevõimendustriood transformaatorsidestusele	6С5	6,3	0,3	250	60	20	2	2,6	2	3,0	11	8
Võimsusvõimendustriood	УБ-132	4	0,15	160	50	8,5	2	3	5,5	4,2	2,8	12
Modulaatortriood	М-50	11	6,3	1200	270	10	1,5	50	—	—	—	—
	МО-20	22	61	10000	10000	13	7	20000	—	—	—	—
Generaatortriood	Г-410	20/10	0,225/0,45	400	100	23	4	10	2,9	2,7	0,9	—
	ГД-1000	16	10,3	10000	1200	250	3,2	400	10,8	9,8	1,7	—
Vesijahutatud triood	ГДО-15	16,5	52	10000	11000	47	7	10000	—	—	—	—
	ГДО-30	23	72	10000	22000	44	10	20000	—	—	—	—

Tabel 71.2.

Traatside-tehnikas kasutatavad võimendustrioodid.

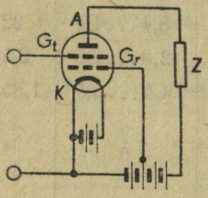
Suurus	Tähis	Ühik	Tüüp TO-141	Tüüp TO-142	Tüüp TO-143
Küttepinge	U_F	V	2,15 ... 2,65	2,15 ... 2,65	3,4 ... 4,1
Küttevool	I_F	A	1,0	1,0	1,0
Küttevõimsus	P_F	W	2,15 ... 2,65	2,15 ... 2,65	3,4 ... 4,1
Emissioonvool	I_e	mA	60	100	150
Anoodpinge	U_A	V	220	220	220
Võre-eelpinge	U_G	V	— 3	— 7,5	— 35
Anoodvool nullise eelpinge puhul	I_{A0}	mA	14	32	140
Anoodvool	I_A	mA	8	15	30
Võimendustegur	μ	—	21 ... 26	10 ... 12	3,7 ... 4,5
Läbitavus	D	%	3,9 ... 4,8	8,4 ... 10	22 ... 27
Tõus	S	mA/V	2,1 ... 2,6	2,0 ... 2,5	2,5 ... 3,0
Sisetakistus	R_i	kΩ	9 ... 11	4,4 ... 5,5	1,35 ... 1,65
Maksimaalne anoodkadu	$P_{A\,max}$	W	—	6	10
Moonutusvaba väljevõimsus	P_A	mW	50	150	800
Võre sulgepinge	U_{G0}	V	— 13	— 27	— 80
Isolatsioonitakistus	R_{is}	MΩ	100	100	100
Anoodi läbilöögipinge	U_{Al}	V	440	440	440
Võrevool nullise eelpinge puhul	I_{G0}	μA	0,5	0,5	3
Mahtuvus	C_{GA}	pF	7,5	8	8,5
Mahtuvus	C_{KG}	pF	5,5	5,5	6
Kõrgus	l	mm	150	150	155
Suurim läbimõõt	d	mm	50	52	62

MITMESUGUSED LIIT- JA ERIOTSTARBELISED ELEKTRONTORUD.

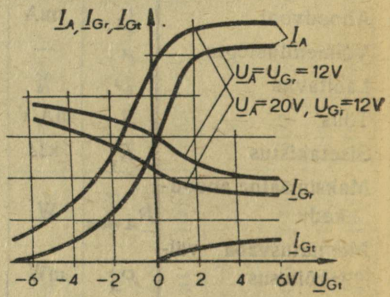
XI peatükk.

Kahevõrelised elektrontorud.

§ 72. Ruumlaenguvõrega kahevõreline elektrontoru. Elektrontoru, milles katoodi ja tüürvõre vahele on paigutatud veel teine võre, millele katoodi suhtes antakse püsiv positiivne



Joon. 72. 1. Ruumlaenguvõrega kahevõrelise elektrontoru lülitusskeem: K — katood, G_t — tüürvõre, G_r — ruumlaenguvõre, A — anood, Z — koormatakisti.



Joon. 72. 2. Ruumlaenguvõrega kahevõrelise elektrontoru tunnusjooned: I_{Gr} — ruumlaenguvõre-vool, I_{Gt} — tüürvõre-vool, I_A — anoodvool.

pinge, nimetatakse katoodvõre- ehk ruumlaenguvõre-elektrontoruks (joon. 72. 1). Ruumlaenguvõre positiivse potentsiaali mõjul liiguvad ruumlaengut (§ 37) läbinud elektronid võre poole kiirenevalt. Osa neist langeb võretraatidele, osa aga lendab võretraatidest mööda, sattudes sel teel tüürvõre ja ruumlaenguvõre vahelisse alasse. Ruumlaenguvõre positiivse

potentsiaali mõjul väheneb ka negatiivse ruumlaengu piirkond, mistõttu sellest läbi pääsevad ka katoodist väiksema algkiirusega väljunud elektronid (§ 15). Nii etendab ruumlaenguvõre anoodi ja tüürvõre suhtes katoodi osa, mis saadab anoodi ja tüürvõre vahelisse ruumalasse võrdlemisi suurt algkiirust omavaid elektrone. Selle tagajärjel vajavad niisugused elektrontorud madalat anoodpinget (5 ... 20 V) ja nende tõus on trioodidega võrreldes 1,5 ... 2 korda suurem.

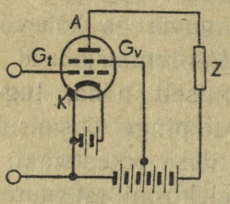
Joonisel 72. 2 on toodud ruumlaenguvõrega kahevõrelise elektrontoru I_A-U_{Gt}-, I_{Gt}-U_{Gt}- ja I_{Gr}-U_{Gt}-tunnusjooned konstantse U_A ja U_{Gr} puhul. Nagu jooniselt näha, tugevneb ruumlaenguvõre vool tüürvõre negatiivse pinge tõusmisel, mis on seletatav sellega, et tüürvõre negatiivse potentsiaali tõustes pöördub ruumlaenguvõret läbinud elektronidest suurem arv tagasi ja langeb positiivset potentsiaali kandvale ruumlaenguvõrele.

Et ruumlaenguvõrega kahevõreliste elektrontorude elektrilised omadused ei küüni muil põhimõtteil töötavate elektrontorude omadusteni, siis kasutatakse neid torusid vähe.

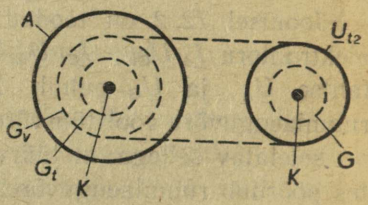
§ 73. Tetrood. Nelja elektroodiga elektrontorusid, milledes tüürvõre ja anoodi vahele on paigutatud veel teine — nn. anoodvõre ehk *varivõre*, millele antakse püsiv positiivne pinge, nimetatakse tetroodideks ehk varivõretorudeks (joon. 73. 1).

Trioodis toimub elektronide liikumine katoodilt anoodile anoodi ja katoodi vahelise elektrivälja mõjul ja nende elektronide poolt moodustatava voolu tugevuse muutused sõltuvad anoodpinge ja võrepinge muutusest. Tetroodis aga toimub elektronide liikumine katoodilt anoodi poole varivõrepinge mõjul ja selle voolu tugevuse muutused sõltuvad samuti tüürvõrepinge muutustest, kuna aga anoodpinge muutused selle voolu tugevust mõjutavad vähe. Järelikult on tetroodi võimendustegur trioodi omast tunduvalt suurem. Elektroodide-

vahelist elektrivälja võib tetroodis piltlikult kujutada järgmiselt. Selle elektrivälja katoodile ja tüürvõrele toetuvate jõujoonte teised otsad toetuvad enamikus lähemal asetsevale varivõrele, mitte aga anoodile, nagu see on trioodis. Ühtlasi on selle tõttu tüürvõre ja anoodi, samuti ka katoodi ja anoodi vahelised mahtuvused C_{GtA} ja C_{KA} märksa väiksemad kui trioodil.



Joon. 73. 1. Varivõrega kahevõrelise elektrontoru — tetroodi lülitusskeem: K — katood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, A — anood, Z — kooremtakisti.



Joon. 73. 2. Tetroodi elektroodide asetus kujutatuna skemaatiliselt: K — katood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, A — anood, U_{t2} — ekvivalentpinge.

Varivõre tõttu ilmneva võimendusteguri suurenemise ja sellele vastava läbitavuse vähenemise selgitamiseks võib määrata anoodvoolu põhjustava tüürpinge U_{t1} väärtuse, mis on mõlema võre ja anoodi toimete summa. Selleks eeldatakse, et kõik elektronid, mis lahkuvad katoodi ümbritsevast ruumlaengust, suunduvad anoodile. Niisuguse eelduse puhul ei jaotu katoodvool üksikute elektroodide vahel ja tema tugevus sõltub ainult anoodvoolu põhjustavast tüürpingest.

Varivõre ja katoodi vahel tüürvõre toimel esinevat läbitavust tähistatakse tähisega D_1 ja anoodi ning tüürvõre vahel varivõre toimel esinevat läbitavust tähisega D_2. Liites valemi 49. 2 kohaselt anood- ja varivõrepinged ühiseks, anoodvoolu samal määral mõjutavaks ekvivalentseks pingeks, nagu seda

mõjutaks varivõre tasapinnas asetsevana ettekujutatav anood (joon. 73. 2), saadakse

$$\underline{U}_{t2} = \underline{U}_{Gv} + D_2\underline{U}_A. \qquad (73.1)$$

Liites sellele ekvivalentsele pingele tüürvõrepinge ja rakendades ta ettekujutatavale anoodile tüürvõre tasapinnas, leitakse elektrontorus anoodvoolu põhjustav tüürpinge

$$\underline{U}_{t1} = \underline{U}_{Gt} + D_1\underline{U}_{t2} = \underline{U}_{Gt} + D_1\underline{U}_{Gv} + D_1D_2\underline{U}_A =$$
$$= \underline{U}_{Gt} + D_1\underline{U}_{Gv} + D\underline{U}_A. \qquad (73.2)$$

Sellest valemist nähtub, et tetroodi anoodpinge mõju iseloomustav üldine läbitavus $D = D_1D_2$ on seega korrutis mõlemast üksikult võetud läbitavusest (millede väärtused on alati väiksemad kui üks).

Elektrontoru läbiva anoodvoolu tugevus muutub nulliks siis, kui anoodvoolu põhjustav tüürpinge $\underline{U}_{t1}$ on null. Selleks et valemi 73. 2 parempoolne osa võrduks nulliga, tuleb tüürvõrele anda vastava kõrgusega negatiivne pinge. Tähistades seda tüürvõrele rakendatavat pinget tähisega $\underline{U}_G$, leitakse, et

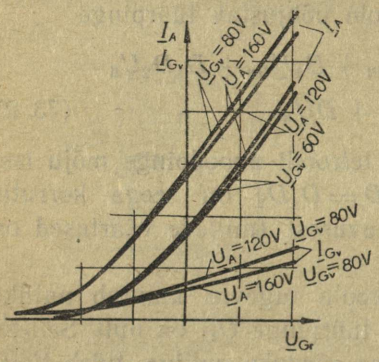
$$\underline{U}_{Gt} = \underline{U}_G = -(D_1\underline{U}_{Gv} + D\underline{U}_A). \qquad (73.3)$$

$\underline{I}_A$-$\underline{U}_G$-teljestikus näitab see pinge seda, kui kaugel vasakul asetsevad elektrontoru tunnusjooned teljestikus. Trioodidel oli selleks pingeks $\underline{U}_G = -D\underline{U}_A$ (§ 58).

Nagu selgub valemist 73. 3, paigutuvad tetroodi $\underline{I}_A$-$\underline{U}_{Gt}$-tunnusjooned seda rohkem vasakule, mida kõrgem on varivõrepinge. Trioodide puhul oli võimalik teljestikus rohkem vasakule nihutatud tunnusjooni saada ainult anoodpinge tõstmisega. Kui sellest ei piisanud, tuli valida suurema läbitavusega triood. Tunnusjoonte võimalikult suur vasakul (teises veerandis) asetsev osa on aga eriti tarvilik just võimendajais, kus ei tohi tekkida võrevoolu (§ 66).

Joonisel 73. 3 on toodud tetroodi $\underline{I}_A$-$\underline{U}_{Gt}$-tunnusjooned, mis on üles võetud kahesuguse anoodpinge (160 V ja 120 V)

ja kahesuguse varivõrepinge (80 V ja 60 V) puhul. Nagu kõveraist nähtub, sõltub anoodvool anoodpingest vähe. On aga iseloomulik, et tunnusjooned ei nihku anoodpinget muutes nii nagu trioodide puhul (jäädes üksteisele rööbikuiks, nagu näitab võrrand 73. 3), vaid väljuvad kiirtena ühest punktist. See erinevus on tingitud asjaolust, et mitte kõik ruumlaengu piirkonnast väljunud elektronid ei lange anoodile, nagu eeldati ülalnimetatud võrrandite koostamisel, vaid tähelepandav osa neist langeb positiivset potentsiaali kandvale varivõrele. Sõltuvalt tetroodi tüübist ja varivõre pingest (mis tavaliselt on $0{,}3 \ldots 0{,}5 \underline{U}_A$) moodustab varivõrevool umbes 15 ... 30% kogu katoodvoolust. Järelikult on ülaltoodud valemid kehtivad ainult katoodvoolu kohta. Tunnusjoonte kiirtekujulise asetuse põhjus on märgatav ka joonisel 73. 3, kust võib näha, et kõrgema anoodpinge puhul on varivõrevool $\underline{I}_{Gv}$ nõrgem. Teiseks tunnusjoonte kiirtekujuliselt paigutumise põhjuseks on sekundaaremissioon, mida aga üksikasjalisemalt käsitletakse allpool.



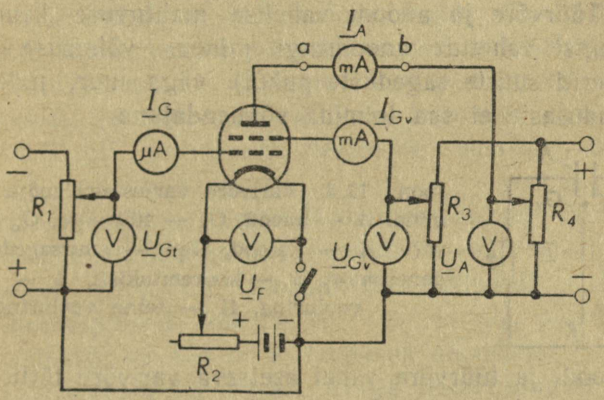
Joon. 73. 3. Tetroodi $\underline{I}_A$-$\underline{U}_{Gt}$- ja $\underline{I}_{Gv}$-$\underline{U}_{Gt}$-tunnusjooned.

Samalt jooniselt selgub veel anoodvoolu suur sõltuvus varivõrepingest, mida näitab ka võrrand 73. 3. Selles võrrandis on liige $D_1 \underline{U}_{Gv}$ suhteliselt suur, sest tüürvõre läbitavus D_1 on suur võrreldes anoodvõre läbitavusega D_2.

Tetroodide tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutatakse joonisel 73. 4 kujutatud lülitust.

Tunnusjoonte ülesvõtmisel võib raskust tekitada väikeste anoodvoolu tugevuste lugemine anoodvoolu-ampermeetrilt ja

võrepingete täpne reguleerimine. Seepärast mõõdetakse anoodvoolu tugevust iga valitud võrepinge puhul mitmesuguse anoodpinge väärtuse juures, mistõttu I_A-U_{Gt}-tunnusjoonte asetus üksteise suhtes jääb enam-vähem õigeks. Anoodvoolu muutuste täpsemaks lugemiseks võib joonisel 73. 4 kujutatud lülituses punktide *a* ja *b* vahele ühendada mõõteriista koos kompensatsioonlülitusega (joon. 56. 2).



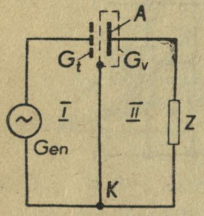
Joon. 73. 4. Tetroodide tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutatava lülituse skeem. Punktide *a* ja *b* vahele võib ühendada ka kompensatsioonlülituses mõõteriista (joon. 56. 2). R_1 — potentsiomeeter tüürvõrepinge U_{Gt} reguleerimiseks, R_2 — takisti küttepinge reguleerimiseks, R_3 — potentsiomeeter varivõrepinge U_{Gv} reguleerimiseks, R_4 — potentsiomeeter anoodpinge U_A reguleerimiseks.

Elektrontoru töötades mõjuvad tema elektroodidevahelised mahtuvused talitlusseisundit halvendavalt. Eriti halvasti mõjub anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus C_{GtA}. Tema poolt põhjustatavad olulisemad ebasoovitavad nähtused on järgnevad.

1. Anoodvooluringis sisalduva kooremtakisti klemmidevaheline vahelduvpinge pääseb anoodi ja võre vahelise mahtuvuse kaudu võrevooluringi tagasi. Kondensaatori C_{GtA} suure mahtuvuse puhul võib suure sageduse juures võreringi kulgev

vool olla küllaldaselt tugev tüürpinge tekitamiseks võrel, mille tagajärjel võimendusaste muutub vahelduvvoolu tekitajaks — generaatoriks. Selle nähtuse vältimiseks kasutatakse mitmesuguseid keerukaid neutraliseerimislülitusi, millede abil võrevooluringi juhitakse vastassuunalist (faasis 180° võrra nihutatud) vahelduvpinget — ebasoovitava nugipinge neutraliseerimiseks.

2. Tüürvõre ja anoodi vahelise mahtuvuse kaudu võib võreringist vahetult anoodringi mineva võimsuse väärtus olla (eriti suurte sageduste puhul) väga suur, mille tõttu võimendusaste ei saa toimida võimendajana.



Joon. 73. 5. Varivõre varjestava mõju selgitamine. *A* — anood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, *K* — katood, *Gen* — suursagedusvoolugeneraator, *Z* — kooremtakisti, I — esimene vooluring, II — teine vooluring.

Anoodi ja tüürvõre vahel asetseva varivõre tõttu on tetroodi sisemahtuvused C_{GtA} ja C_{KA} märksa väiksemad kui trioodis. Varivõre anoodi ja tüürvõre vahelist mahtuvust C_{GtA} vähendava toime selgitamiseks on antud joonis 73. 5. Joonisel on kujutatud tetroodi võre- ja anoodvooluringid, mida teineteisest elektriliselt eraldab varivõre G_v koos oma ühendusjuhtmega G_vK. Jooniselt selgub, et esimeses vooluringis sisalduv vahelduvpingeallikas ei saaks tekitada teises vooluringis voolu, kui võre G_v kujutaks endast avadeta plaati ja kui ühendusjuhtme G_vK poolt vahelduvvoolule avaldatava takistuse väärtus on null. Sellisel juhul oleks null ka nendevahelise mahtuvuse väärtus. Tetroodides tegelikult kasutatavail varivõredel on aga tiheda sõela või spiraali kuju ja seetõttu on teatav mahtuvus siiski olemas. Et aga ei saaks tekkida mahtuvust põhjustavat elektrivälja anoodi ja tüürvõre vahel ümber varivõre servade, selleks antakse vari-

võrele niisugune kuju, et ta varjestaks anoodi täielikult. Anoodi ja tüürvõre ühendusjuhtmete vahelisest mahtuvusest hoidumiseks tuuakse üks neist ühendusjuhtmeist välja elektrontoru alt, teine aga pealt. Et klaaskestaga elektrontorus ei saaks tekkida anoodi ja tüürvõre vahelist elektrivälja väljaspool elektrontoru, kaetakse elektrontoru klaasist kesta välispind elektrit juhtivast ainest kihiga, mis näib värvikihina, või asetatakse elektrontoru ümber tihedasti vastu klaaskesta liibuv kahest poolest koosnev metallplekist kate.

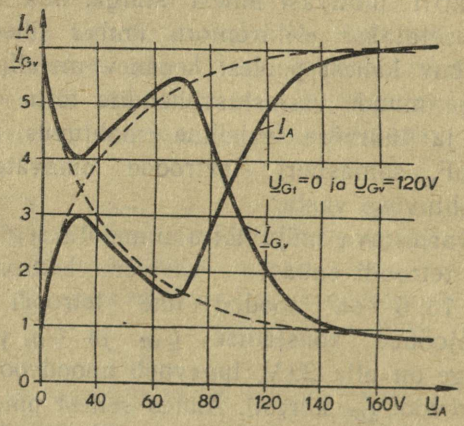
Varivõre ja muude varjestusvahendite tõttu on tetroodides anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus C_{GtA} umbes 0,02 ... 0,03 pF, samasuuri elektroode omavate trioodide 3 ... 4 pF mahtuvuse vastu.

Varivõre varjestava mõju tõttu nimetataksegi seda võret varivõreks ja tetroodi ennast — varivõre-elektrontoruks.

Joonisel 73. 6 on toodud ühe tetroodi I_A-U_A- ja I_{Gv}-U_A-tunnusjooned konstantse U_{Gt} ja U_{Gv} puhul. Seni kui anoodpinge on alla 20 V, tugevneb anoodvool I_A ja nõrgeneb varivõrevool I_{Gv} kiiresti. Alates sellest pingest on aga anoodis selgesti märgatav sekundaaremissiooni tekkimine. Anoodist sekundaaremissiooni tõttu väljunud elektronid lendavad kõrget positiivset potentsiaali kandvale varivõrele, mille tagajärjel anoodvool nõrgeneb ja varivõrevool tugevneb (vt. ka joon. 60. 1). Kui anoodpinge väärtus läheneb varivõrepinge väärtusele, siis hakkab anoodvool tugevnema, sest anoodist väljuvaist sekundaarelektronidest langeb üha suurem arv anoodile tagasi. Tõstes anoodpinget piirkonnas, kus $U_A > U_{Gv}$, pole anoodi sekundaaremissiooni mõju enam märgatav, vaid anoodvool tugevneb tõusva anoodpinge, varivõre ja anoodi vahelise voolu jaotumise (§ 59) ning ka varivõre sekundaaremissiooni mõjul.

Tetroodi töötamisel kantakse tema varivõrele pinge, mille väärtus on 0,3 ... 0,5 U_A. Seega ei tohiks ilmneda anoodi sekundaaremissiooni mõju. Et aga tetroodi töötades liitub

anoodile kantava alalispingega kooremtakisti klemmidevaheline vahelduvpinge (§ 62), siis on küllaldaselt suurte vahelduvpinge amplituudide puhul anoodpinge hetkeliselt varivõrepingest madalam ja selle tagajärjel tekivad varivõrevooluringis sekundaaremissiooni tõttu hetkelised voolu tugevnemised ja anoodvooluringis nõrgenemised, mis põhjustavad



Joon. 73.6. Tetroodi СБ-112 I_A-U_A- ja I_{G_v}-U_A-tunnusjooned $U_{Gt}=0$ ja $U_{Gv}=120$ V puhul.

voolu kujumoonutust. Tetroodide rakendamist raskendabki see asjaolu, et neis tekib sekundaaremissioon kord anoodilt varivõrele, kord vastupidiselt.

Tetroodi põhilisiks parameetriteks on samuti kui trioodilgi anoodvoolu, anoodpinge ja võrepinge muutuste seosed talitluspingele vastava varivõrepinge puhul. Neiks parameetriteks on:

$$\mu = \left| \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{Gt}} \right| \quad I_A,\ U_{Gv} = \text{konst.},$$

$$S = \left| \frac{\Delta I_A}{\Delta U_{Gt}} \right| \quad U_A,\ U_{Gv} = \text{konst.},$$

$$R_i = \left| \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A} \right|_{U_{G1},\ U_{G2} = \text{konst.}}$$

Nende parameetrite omavaheline seos pole aga samasugune kui trioodidel.

Tetroodide varivõre valmistatakse tihe, mistõttu selle võre läbitavus D_2 ja järelikult ka kogu tetroodi läbitavus D on väike ning võimendustegur μ suur. See on kehtiv siiski tetroodi tunnusjoone alumise osa kohta (joon. 73.3). Voolu jaotumise ja sekundaaremissiooni tõttu esinev tunnusjoonte kiirtekujuline asetus näitab, et võimendusteguri väärtus on sõltuv võrepingest U_{G1}. Kui näiteks tetroodi võimendustegur on kõrge negatiivse võre-eelpinge puhul 750...1000, siis 2...3 V eelpinge puhul on ta 150...200 ja positiivse eelpinge puhul ainult 30...40.

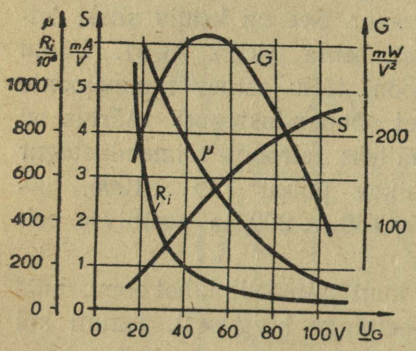
Tetroodide sisetakistus on kuni mitusada tuhat oomi, kuid ka tema väärtus sõltub võre-eelpinge kõrgusest, samuti kui võimendustegurigi väärtus.

Tõus on tetroodidel umbes samasuur ja sõltub samadest teguritest kui trioodidelgi.

Olgu nimetatud, et tetroodidel iseloomustab läbitavus D tetroodi elektrostaatilisi omadusi, kuna pole võetud arvesse voolu jaotumist üksikute elektroodide vahel. Võimendustegur $\mu = SR_i$ sõltub aga ka voolu jaotumisest anoodi ja varivõre vahel. Seepärast pole tetroodidel μ võrdne läbitavuse pöördväärtusega $1/D$, nagu see oli trioodidel.

Tetroodi parameetrid sõltuvad varivõrepinge U_{G2} väärtusest. Joonisel 73.7 on kujutatud need sõltuvused tetroodi СБ-112 kohta. Nagu kõveraist näha, suureneb tõus S varivõrepinge U_{G2} tõustes algul kiiresti, sest madala U_{G2} puhul on anoodvool nõrk ja seega ka S väike. Sisetakistus ja võimendustegur vähenevad U_{G2} tõustes. Elektrontoru hindetegur $G = \mu S$ algul suureneb kuni oma maksimaalse väärtuseni ja hakkab siis vähenema. Varivõre talitluspingeks võiks võtta

pinge, mille puhul G on kõige suurem. Tegelikult kantakse aga varivõrele sellest väärtusest kõrgem pinge, millega saavutatakse talitluspunkti kohas suurem tõus S. Suursagedusvõimendajais, milledes tetroodi anoodkoormaks on võimendatava sagedusega resonantsis olev võnkering, võimaldab suurem tõus tetroodi paremat kasutamist.



Joon. 73.7. Tetroodi СБ-112 parameetrite sõltuvus varivõrepingest U_{Gv}, kui U_{Gt} = konst.

Tetroodi sisendmahtuvuseks loetakse mahtuvust tüürvõre ja nende elektroodide vahel, mis ei kanna võimendatavat sagedust omavat vahelduvpingét, seega

$$C_{sis} = C_{KGt} + C_{GtGv}.$$

Tetroodi väljemahtuvus

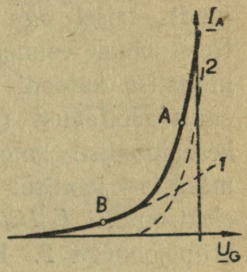
$$C_{väl} = C_{GvA} + C_{KA}$$

ja anoodvooluringi tagasimõju põhjustav mahtuvus on C_{GtA}.

Tetroode kasutatakse peamiselt madalate vahelduvpingete võimendamiseks. Suure sisetakistuse tõttu vajab tetrood suure takistusega kooremtakistit. Neid kasutatakse peamiselt raadiovastuvõtjais suursagedusvõimendus-astmeis, kusjuures koormaks on võimendatava sagedusega resonantsis olev võnkering. Raadiosaatjate suursagedusvõimendus-astmete jaoks ehitatavate tetroodide varivõre valmistatakse tihe, et suuremal määral vähendada anoodi ja tüürvõre vahelist mahtuvust. Varivõrepinge on 15...20% anoodvooluallika pingest.

§ 74. Muudetava tõusuga elektrontorud. Raadiovastuvõtja suursagedusvõimendus- või muundsagedusvõimendusastmeilt nõutakse, et nad annaksid demodulaatorastmele

sobiva sisendpinge (§ 69), vaatamata aparaadi sisendklemmide vahelise pinge väärtusele. See pinge on väga madal vastuvõtul kaugeilt saatjailt; vastuvõtul lähedal asetsevalt kohalikult saatjalt on ta aga kõrgem. Ülaltähendatud nõude rahuldamiseks on vaja reguleerida suurtes piirides üksikute astmete võimendust. See reguleerimine peaks aga toimuma lihtsalt ja tarbe korral olema teostatav automaatselt võimendatava pinge kaudu. Võimendusastmete võimenduse suuris piirides reguleerimise võimalus on vajalik ka mitmes muus elektrontorudega töötavas seadmes.



Joon. 74. 1. Muudetava tõusuga elektrontoru I_A-U_G-tunnusjoon. Tähtedega *A* ja *B* on tähistatud talitluspunkti kaks asukohta, milledest esimese juures on tõus suur, teise juures aga väike. Pideva joonega märgitud tunnusjoont võib vaadelda koosnevana kahest I_A-U_G-tunnusjoonest, milledest tunnusjoon *1* omab väikest, *2* aga suurt tõusu.

Võimendusastme võimenduse ulatus sõltub peamiselt elektrontoru tõusu *S* väärtusest (64. 2), mistõttu on võimalik võimendust reguleerida elektrontoru tõusu muutmisega. Niisugust reguleerimist võimaldavad muudetava tõusuga (muudetava μ-ga) elektrontorud, millede I_A-U_G-tunnusjoon on toodud joonisel 74. 1. Nagu nähtub jooniselt, on I_A-U_G-tunnusjoone kõrgemate negatiivsete pingete piirkonnas oleva osa tõus väike, võrreldes madala negatiivse pinge piirkonnas oleva tunnusjoone osa tõusuga. Järelikult on võrele väikeste vahelduvpinge amplituudide kandmise puhul võimendus seda väiksem, mida kõrgem on võrele rakendatud negatiivne eelpinge.

Joonisel 74. 1 pideva joonega märgitud I_A-U_G-tunnusjoon saadakse sel teel, et elektrontoru tihedasse sõelataolisse tüürvõresse tehakse üksikute võretraatide äralõikamise teel

mõned väikesed augukesed. Niisuguse võrega elektrontoru võib vaadelda kahest elektrontorust koosnevana: ühel elektrontorul on suurte aukudega võre ja väikesepinnaline katood (tema katoodi moodustab võre aukude all asetseva katoodi pind), teisel aga on tihe võre ja suurepinnaline katood. Neist omab esimene kujuteldav elektrontoru oma väikesepinnalise katoodi tõttu väikest tõusu ja hõreda võre tõttu suurt läbitavust (seega ka väikest võimendustegurit). Väikesepinnalise katoodiga elektrontoru I_A-U_G-tunnusjoon on märgitud joonisel 74. 1 kriipsjoonega *1*. Teise kujuteldava elektrontoru I_A-U_G-tunnusjoon on märgitud samal joonisel kriipsjoonega *2*. Kõrge negatiivse võrepinge puhul toimib see nagu väikese tõusuga elektrontoru, sest kõrge võrepinge puhul ei pääse elektronid tiheda võre aukudest läbi.

Näiteks on muudetava tõusuga tetroodi CO-148 $S = 2$ mA/V, kui $U_{Gt} = -2$ V, ja $S = 0{,}06$ mA/V, kui $U_{Gt} = -15$ V. Võrele kantava vahelduvpinge maksimaalne väärtus võib võrel olla viimati mainitud eelpinge (— 15 V) puhul kuni 8 volti.

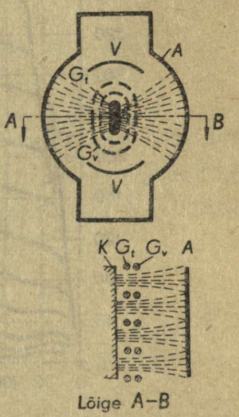
Tunnusjoone kõveruse tõttu tekivad niisuguses võimendustorus pinge kuju moonutused, mis aga nende väiksuse tõttu pole eriti märgatavad.

Ülalkirjeldatud muudetava tõusu saavutamise viisi kasutatakse mitte ainult tetroodides, vaid ka keerukamais suursagedusliku vahelduvvoolu võimendamiseks kasutatavais elektrontorudes.

§ 75. Jugatetrood. Tetroodi anoodi sekundaaremissioonvoolu ja samuti ka varivõrevoolu nõrgendamiseks on kujundatud joonisel 75. 1 skemaatiliselt näidatud asetusviisi ja kujuga elektroode sisaldav tetrood. Nagu nähtub joonisel kujutatud elektroodide pealtvaatest, asetseb varivõre G_v anoodist *A* võrdlemisi kaugel ning tüürvõrele ja katoodile lähedal. Kahele poole varivõret on asetatud metallplekist varjestusribad *V*, mis on ühendatud katoodiga ja omavad

seetõttu nullpotentsiaali. Elektroodide lõikest on näha, et tüürvõre G_t ja varivõre G_v traadid on asetatud teineteise taha nii, et varivõre traadid jäävad tüürvõre traatide varju. Joonisel on kriipsjoontega näidatud elektronide teed elektroodidevahelises ruumis. Varjestusribadele V nad ei suundu, sest sel on anoodi suhtes negatiivne pinge.

Elektroodide niisuguse kuju ja asetuse puhul liiguvad elektronid, kui tüürvõrel on negatiivne potentsiaal, katoodilt anoodile kitsaste jugadena, nagu see on nähtav ka jooniselt. Et varivõre traadid töötamisel asetsevad alati negatiivset potentsiaali omavate tüürvõre traatide taga, siis langeb neile ka varivõre kõrge potentsiaali puhul vähe elektrone. Seetõttu moodustab niisuguse, nn. jugatetroodi varivõrevool ka mõlema elektroodi võrdse pinge juures ainult ligikaudu 7% anoodvoolust.

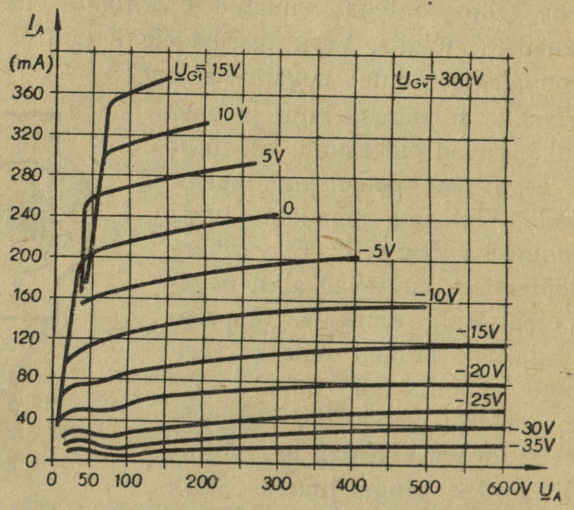


Joon. 75. 1. Jugatetroodi elektroodide asetus: K — katood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, A — anood, V — varjestusribad.

Elektroodide sellekohase asetuse tõttu on varivõre ja anoodi vaheline kaugus tunduvalt suurem kui varivõre ja katoodi vaheline kaugus. Anoodile suunduvate elektronide kitsas joas on elektronide tihedus suur ja seetõttu see juga sisaldab suurt negatiivset laengut, mis ei lase sekundaaremissiooni tõttu anoodilt väljunud elektrone liikuda varivõrele, vaid sunnib neid pöörduma tagasi anoodile. Elektroodide säärase ehitusviisi puhul pole märgata sekundaaremissiooni anoodilt ka siis, kui anoodpinge on varivõrepingest tunduvalt madalam.

Joonisel 75. 2 on toodud jugatetroodi 6П3 I_A-U_A-tunnussari. Nagu nähtub sellelt jooniselt, on anoodi sekundaar-

emissiooni mõju märgatav ainult kõrge negatiivse võre-eelpinge ja madala anoodpinge puhul (vrd. joon. 73. 6, I_A-U_A-tunnusjoon).



Joon. 75. 2. Jugatetroodi 6П3 I_A-U_A-tunnussari. Kõverad on üles võetud $U_{G2} = 300$ V puhul.

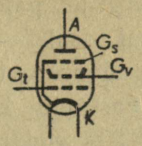
Jugatetroode kasutatakse peamiselt võimendusastmeis niihästi helisageduslikes kui ka suursageduslikes seadmeis.

XII peatükk.

Viie elektroodiga elektrontorud.

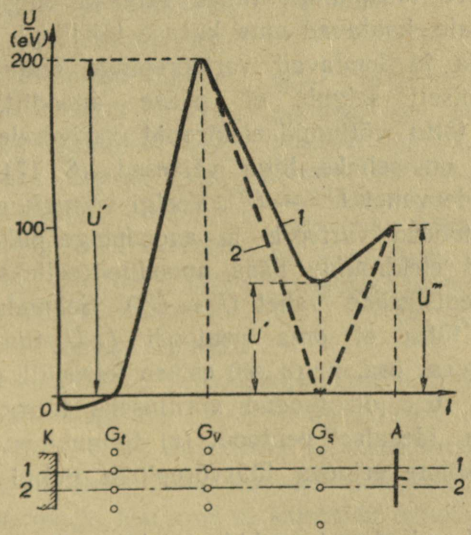
§ 76. Pentoodidest üldiselt. Viie elektroodiga elektrontoruks ehk pentoodiks nimetatakse niisugust elektrontoru, milles anoodi ja varivõre (anoodvõre) vahel on veel kolmas, anoodi sekundaaremissiooni vältimiseks määratud nn. sulgvõre (joon. 76. 1). Paljudel

pentoodi tüüpidel on sulgvõre katoodiga ühendatud elektrontoru sees, mõnedel tüüpidel aga on ta ühendatud elektrontoru ühe kontaktjalaga. Katoodiga elektrontoru sees ühenda-



Joon. 76.1. Pentoodi skeem: K — katood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, G_s — sulgvõre, A — anood.

tud või väljaspool elektrontoru ühendatav sulgvõre alandab anoodi ja varivõre vahel kujunduva elektrivälja potentsiaali. Joonisel 76.2 on toodud elektrivälja potentsiaali jaotus



Joon. 76.2. Elektrivälja potentsiaali jaotus pentoodis, kui $\underline{U}_{Gt} = 0$ V, $\underline{U}_{Gv} = 200$ V, $\underline{U}_{Gs} = 0$ V ja $\underline{U}_A = 100$ V. *1* — potentsiaali jaotus sulgvõre traatide vahekohas asuval tasapinnal, *2* — sama sulgvõre traate läbival tasapinnal.

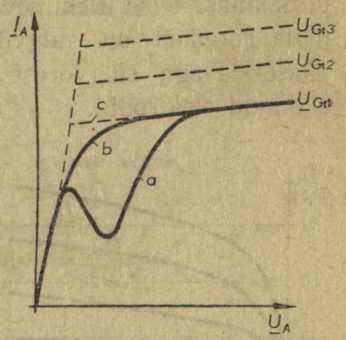
katoodi ja anoodi vahelist ruumi läbival tasapinnal. Lõikepind *1 — 1* läbib sulgvõre traatide vahekohta, pind *2 — 2* läbib aga kõigi võrede traate. Elektrivälja potentsiaali jaotus pinnal *1 — 1* on märgitud pideva joonega, pinnal *2 — 2* aga — eelmisest erineval osal — kriipsjoonega. Kõveraist nähtub, et elektron, mis tüürvõre tasapinnas omas ligikaudu nullile elektronvoldile vastavat kiirust, saavutas varivõre tasapinnani jõudes $U' \approx 200$ elektronvoldile vastava kiiruse. Möödunud varivõre traadist, lendab ta aeglustuvalt kuni sulgvõre tasapinnani. Sulgvõre tasapinnal kahe sulgvõre traadi vahekohas asetseva punkti läbimisel vastab ta kiirus siiski veel U'' elektronvoldile. Edasi kulgeb elektroni liikumine jällegi kiirenevalt, kuni ta anoodini jõudes omandab U''' elektronvoldile vastava kiiruse. Need elektronid aga, mis varivõre tasapinnalt tulles satuvad sulgvõre traadile liiga lähedale, kaotavad oma kiiruse täielikult. Nad muudavad suunda ja lendavad varivõrepinge mõjul varivõrele. Nagu jooniselt selgub, ei pääse anoodilt sekundaaremissiooni tõttu väljunud elektronid varivõrele, sest nende algkiirused on selleks liiga väikesed (§ 17), et ületada potentsiaalide vahet $U''' - U''$. Veelgi võimatum on käesolevas näites toodud varivõre- ja anoodpinge puhul varivõrelt emiteerunud elektronide pääs anoodile (selleks oleks vaja ületada potentsiaalide vahet $U' - U''$). Sekundaaremissiooni puudumise tõttu ei oma pentoodi I_A-U_A-tunnusjoon niisugust langevat osa, nagu see esines tetroodil (joon. 73. 6).

Joonisel 76. 3 on toodud võrdluseks tetroodi (*a*), pentoodi (*b*) ja „ideaalse" pentoodi (*c*) tunnusjooned. Viimased on antud kolme erineva tüürvõrepinge puhul ($U_{G_{t1}}$, $U_{G_{t2}}$ ja $U_{G_{t3}}$).

Ideaalsel pentoodil ei tohiks olla sulgvõre tasapinnal nullpotentsiaaliga traate, millede juurest elektronid pöörduksid tagasi ja lendaksid varivõrele. Sulgvõre tasapinnal peaks elektrivälja potentsiaal olema kõrgem kui null,

alati aga madalam anoodi potentsiaalist. Jugatetroodides, kus sekundaaremissiooni tõkestav elektrivälja potentsiaali langus tekkis anoodi poole lendavate elektronide endi negatiivsete laengute tõttu, oli sulgvõrena toimival tasapinnal väljatugevus ühtlasem, mistõttu jugatetroodide I_A-U_A-tunnusjooned lähenevad rohkem „ideaalsetele".

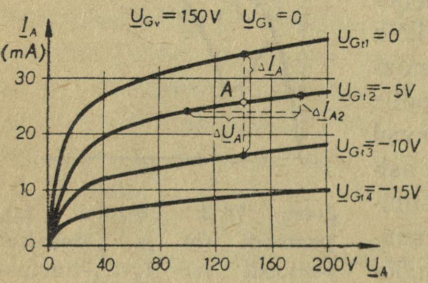
Ideaalse pentoodi I_A-U_A-tunnusjoon koosneb kahest osast: järsult tõusvast ja lamedalt tõusvast osast. Järsult tõusev osa kujundub järgnevalt. Anoodpinge olles null, pöörduvad kõik varivõre traatidest möödalennanud elektronid enne anoodile langemist tagasi ja lendavad varivõre traatidele. Väikeste astmete kaupa anoodpinge tõstmisel langeb ikka suurem ja suurem arv varivõre traatidest möödunud elektrone anoodi positiivse pinge mõjul anoodile. Lamedalt tõusva osa ulatuses tekib järgmine nähtus. Varivõre traatide vahelt läbilennanud elektronid langevad peaaegu kõik positiivsele anoodile. Anoodpinge edasine tõstmine ei saa anoodvoolu enam tugevdada elektroodidevahelise voolujaotuse arvel, vaid selleks tuleb tugevdada ka katoodvoolu. Et aga anood asetseb katoodist kaugemal kui tihedavõrguline varivõre, siis anoodpinge tõstmine ei suurenda anoodvoolu tugevust enam kuigi suurel määral.



Joon. 76. 3. Tetroodi (a), pentoodi (b) ja „ideaalse" pentoodi (c) I_A-U_A-tunnusjoonte võrdlus. „Ideaalse" pentoodi tunnusjooned on kujutatud kriipsjoontega ja on antud kolme erineva tüürvõrepinge kohta (U_{Gt1}, U_{Gt2} ja U_{Gt3}).

Et talitluspiirkonnana kasutatakse just viimati nimetatud tunnusjoone osa, siis peaks see olema võimalikult pikk. Sulgvõre tasapinnal põhjustab tema traatide poolt tekitatud

elektrivälja potentsiaalijaotuse ebaühtlus kaarekujulise ülemineku tunnusjoone ühest piirkonnast teise, sest elektronid, mis lähevad läbi sulgvõre traatide vahekohtade, pääsevad anoodile madalama anoodpinge puhul kui need elektronid, mis sulgvõrele lähenevad võretraatidele lähemal asetsevais piirkondades. Selle tõttu peaks I_A-U_A-tunnusjoone ühest piirkonnast teise ülemineva osa raadius olema seda väiksem, mida hõredam on sulgvõre. Liiga hõreda sulgvõre puhul pääseksid aga sulgvõrest läbi ka sekundaaremissiooni tõttu tekkinud elektronid.



Joon. 76. 4. Pentoodi CO-122 I_A-U_A-tunnussari $U_{Gv}=150$ V ja $U_{Gs}=0$ puhul. Parameetrid talitluspunkti A kohta:

$$S=\frac{\Delta I_A}{\Delta U_G}=\frac{\Delta I_{A1}}{U_{G3}-U_{G1}};$$

$$R_i=\frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}=\frac{\Delta U_A}{\Delta I_{A2}};\quad \mu=SR_i.$$

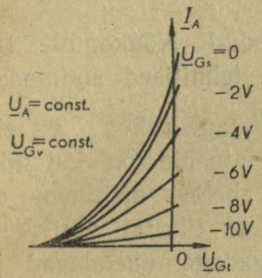
Mõnikord kasutatakse sulgvõret ka anoodvoolu tugevuse tüürimise otstarbel, samuti kui tüürvõretki (vt. § 79). Nõnda rakendatavad pentoodid varustatakse tiheda sulgvõrega. Et aga tiheda sulgvõre tõttu I_A-U_A-tunnusjoon ei muutuks liiga lamedaks, antakse sulgvõrele katoodi suhtes väike positiivne pinge.

Pentoodi elektroodide mõõdete, kuju ja asetuse sobiva valikuga määratakse nende elektrilised omadused, mis ühtedes või teistes talitlustingimustes annavad kõige soodsamaid tulemusi. Pentoode valmistatakse: 1) suursagedusvõimendajate jaoks, 2) helisagedusvõimendajate pingevõimendusastmete ning võimsusvõimendusastmete jaoks ja 3) raadiosaatjate suursagedusvõimendus-astmete jaoks.

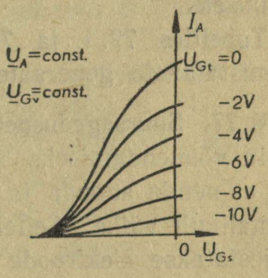
Pentoodi võrede sellekohase ümberühendamise teel on võimalik pentoodi muuta tetroodiks või trioodiks.

Pentoodide I_A-U_{Gt}-tunnusjooned sarnanevad tetroodide vastavate tunnusjoontega (joon. 73. 3). Ka on nende katoodvoolu jaotumine elektroodide vahel samasugune kui tetroodides. Pentoodi omaduste erinevus tetroodi omadustest seisab peamiselt ainult sekundaaremissioonvoolu puudumises anoodi ja varivõre (anoodvõre) vahel.

Pentoodide talitlustingimuste määramiseks teostatavail arvutustel kasutatakse peaaegu eranditult I_A-U_A-tunnusjooni.



Joon. 76. 5. Pentoodi I_A-U_{Gt}-tunnussari konstantse anoodpinge U_A ja konstantse varivõrepinge U_{Gv} puhul.



Joon. 76. 6. Pentoodi I_A-U_{Gs}-tunnussari konstantse anoodpinge ja varivõrepinge puhul.

Joonisel 76. 4 on toodud pentoodi CO-122 I_A-U_A-tunnussari, mis on üles võetud joonisel 73. 4 kujutatud lülituse abil konstantse varivõre- ja sulgvõrepinge puhul. Talitluspunkti kohta kehtivate pentoodi parameetrite määramise viis on näidatud joonisel 76. 4. Pentoodi anoodvoolu parameetreist sõltub tunduvalt sulgvõrepingest eriti just anoodtõusu S väärtus. Joonisel 76. 5 on toodud pentoodi I_A-U_{Gt}-tunnussari konstantse anoodpinge U_A ja konstantse varivõrepinge U_{Gv} puhul. Nagu nähtub jooniselt, on tõus S seda väiksem, mida kõrgem on sulgvõre negatiivne pinge U_{Gs}.

Kui pentoodi anoodpinge ja varivõrepinge on konstantsed, on võimalik muuta pentoodi anoodvoolu tugevust, muutes sulgvõrepinget U_{G3}, nagu seda võib näha joonisel 76. 6. Järelikult on võimalik pentoodi sulgvõret kasutada ka tüürvõrena. Seda pentoodi omadust kasutatakse saateseadmeis suursagedusvoolu moduleerimiseks helisagedusvooluga (vt. § 79) ja muundsagedus-raadiovastuvõtjate sagedusmuundusastmeis. Viimaseks otstarbeks kasutatakse sellekohaseid eriehitusega mitme võrega elektrontorusid (vt. § 80...83), millede parameetrid on eriti kohandatud selle ülesande täitmiseks.

Tabelites 79. 1 ja 79. 2 on toodud Nõukogude Liidus valmistatavate generaatorpentoodide tehnilised andmed.

§ 77. Suursageduspentood. Suursagedusliku vahelduvvoolu võimendamiseks määratud pentoodid on kujundatud nii, et nende anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus oleks võimalikult väike. Selleks kasutatakse tihedat varivõret ja varjestatakse elektroode kontaktjalgadega ühendavad juhtmed üksteisest. Anoodi ja tüürvõre ühendusjuhtmete vahelise mahtuvuse vähendamiseks ühendatakse mõnedel pentoodide tüüpidel anood elektrontoru kesta peal asetseva klemmiga. Mõnede tüüpide puhul ühendatakse pealmise klemmiga tüürvõre. Paljudel elektrontoru tüüpidel on aga niihästi anood kui ka tüürvõre ühendatud elektrontoru all asetsevate kontaktjalgadega, millisel juhul nad peavad olema üksteisest hästi varjestatud.

Sulgvõre on mõnedel suursageduspentoodi tüüpidel ühendatud katoodiga elektrontoru sees, mõnedel tüüpidel on ta aga ühendatud kontaktjalaga.

Suursageduspentoodil on anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus üldiselt väiksem kui tetroodil. Läbitavus D on pentoodil väga väike, mistõttu anoodpinge U_A peaaegu ei mõjuta katoodvoolu I_K. Sisetakistuse R_i väärtus oleneb peamiselt

voolujaotusest pentoodis ja on väga suur: 0,8 ... 1,5 MΩ, mõnedel pentoodi tüüpidel isegi 2 ... 2,5 MΩ. Selle tõttu on pentoodi staatilise I_A-U_A-tunnusjoone talitluspiirkonnas olev osa peaaegu rööbik U_A-teljega (joon. 76. 3). Võrreldes tetroodiga sõltub pentoodi sisetakistuse väärtus varivõrepingest vähe. Pentoodide staatiline võimendustegur μ on suur, mõnedel tüüpidel kuni 6000 ja üle selle.

Samuti kui tetroode, valmistatakse ka pentoode muudetava tõusuga.

Sekundaaremissiooni puudumise tõttu on pentoodidel ka nugivõnkumiste tekkimise võimalus väiksem kui tetroodidel. Väiksem on ka nende kahina-nivoo.

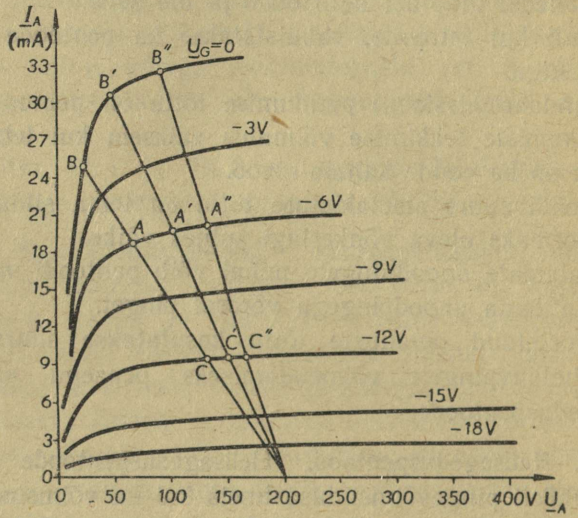
Pentoodi suure sisetakistuse tõttu on tema sildav toime anoodkoormaks oleva võnkeringi suhtes väike.

Madalamate anoodpingete puhul võib pentoodi varivõrele kanda ka tema anoodpingega võrdset pinget.

Ülalloeteldud omaduste tõttu kasutatakse suursageduslike vahelduvpingete võimendamiseks peaaegu eranditult suursageduspentoode.

§ 78. Helisageduspentood. Helisageduspentoode kasutatakse niihästi pingevõimendusastmeis kui ka võimsusvõimendusastmeis. Helisagedusliku vahelduvvoolu võimendamise puhul ei oma anoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus niivõrd suurt tähtsust kui suursagedusliku vahelduvvoolu puhul ja seetõttu ei tarvitse nende varjestus olla niivõrd viimisteldud. Mõlemad elektroodid ühendatakse tavaliselt elektrontoru all olevate kontaktjalgadega. Helisageduspentoodide varivõre on hõredam kui suursageduspentoodide oma, mistõttu nende võimendustegur μ ja sisetakistus R_i on väiksemad. Varivõrele antakse võrdlemisi kõrge pinge $U_{G_2} = 0{,}6 \ldots 1\, U_A$, millest tingituna I_A-U_{G_1}-tunnusjoone teises veerandis olev osa on pikk. Need tunnusjooned pole aga nii sirged kui trioodidel. See avaldub I_A-U_A-tunnusjoonte asetsemises üks-

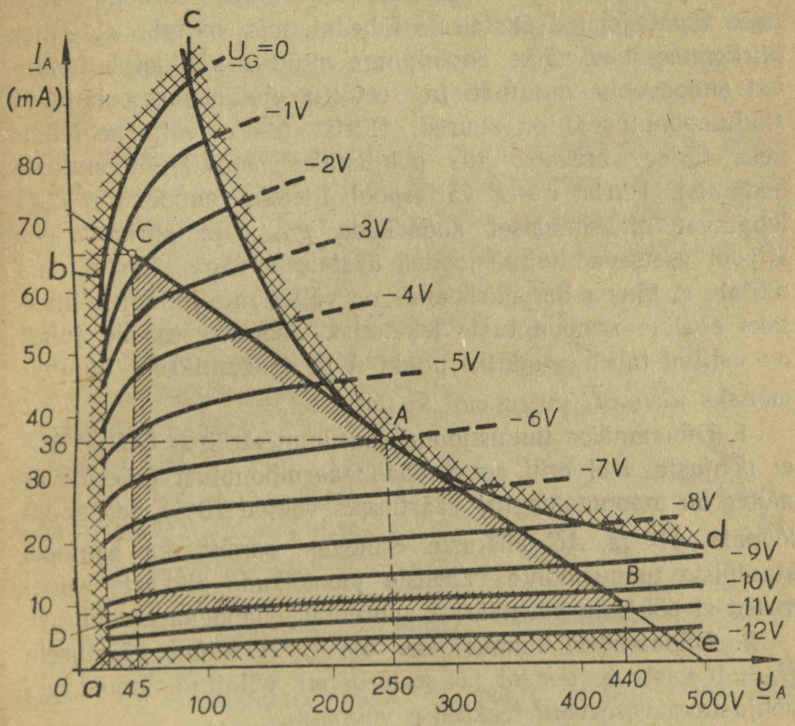
teisest ebaühtlases kauguses. Elektrontoru I_A-U_{Gt}-tunnusjoonte kõverus või I_A-U_A-tunnusjoonte ebaühtlane kaugus üksteisest põhjustab ebalineaarmoonutuste tekkimist. Et saavutada pentoodidega võimalikult vähe moonutatud ülekannet, tuleb valida sobiv koorma takistuse väärtus. Joonisel 78. 1 on toodud näitena pentoodiga töötava võimendus-



Joon. 78. 1. Pentoodi dünaamilised tunnusjooned koorma takistuse kolme erineva väärtuse puhul.

astme kolm, erinevate koorma takistuse väärtuste puhul saadud dünaamilist tunnusjoont. Nagu selgub nende võrdlemisel, on dünaamilise tunnusjoone $B'A'C'$ puhul ebalineaarmoonutused kõige väiksemad, sest joonlõigu $A'B'$ projektsioon U_A-teljele annab samasuure anoodpinge amplituudi muutuse kui joonlõigu $A'C'$ projektsioongi. Trioodide staatilised I_A-U_A-tunnusjooned paiknevad suuremas ulatuses rööbikuina, mistõttu trioodide puhul ei sõltu võimendusastme moonutusteguri väärtus nii tunduvalt koorma takistuse väärtusest.

Joonisel 78. 2 on näitena selgitatud helisageduspentoodi staatilise I_A-U_A-tunnussarja abil talitluspunkti A ja dünaamilise tunnusjoone sobivaima asukoha määramine. Staa-



Joon. 78. 2. Pentoodi dünaamilise tunnusjoone ja talitluspunkti määramine I_A-U_A-tunnussarja abil. Pentoodi tehnilised andmed: $U_A = 250$ V, $U_{Gv} = 250$ V, $P_{A\,max} = 9$ W, $R_i = 50\,000\Omega$, $S = 9{,}5$ mA/V. Koorma takistus 7000Ω. Talitluspunkti A valimisel lähtuti sellest, et $U_A = 250$ V ja $U_G = -6$ V puhul $I_A = 36$ mA, mis vastab väärtusele $P_{A\,max} = U_A \cdot I_A = 250 \cdot 0{,}036 = 9$ W. Dünaamilise tunnusjoone kallakus on määratud koorma takistuse väärtusega. Dünaamilise tunnusjoone kasutatavaks osaks on valitud BC, mispuhul võrele kantava vahelduvpinge amplituudi maksimaalne väärtus on 4,8 V ja anoodpinge ning anoodvoolu kõikumise piirid on näha jooniselt.

tilise tunnussarja see ala, kuhu võiks asetada dünaamilise tunnusjoone, on piiratud viirutatud äärestusega. Seda piiri ei tohiks dünaamiline tunnusjoon ületada järgnevail põhjustel. Piirist $a-b$ vasakul asetsevad pentoodi staatilised tunnusjooned üksteisele lähedal, mis näitab, et selles piirkonnas juba väike anoodpinge muutus põhjustab tunduvat anoodvoolu muutust ja seetõttu ebalineaarmoonutused (kujumoonutused) on suured. Piirist $b-c$ väljaspool ilmneks tugev võrevool, mis põhjustaks samuti moonutuste tekkimist. Piirist $c-d$ väljaspool ületaks anoodkadu $U_A I_A$ lubatavat maksimaalset anoodkadu P_{Amax} ja piirist $a-e$ allpool asetsevad tunnusjooned üksteisele väga lähedal, mis näitab, et tõus selles piirkonnas on väike, mis jällegi põhjustaks ebalineaarmoonutuste tekkimist. Joonisel toodud juhul on valitud talitluspunktiks punkt A ja dünaamiliseks tunnusjooneks joon $\overline{BC}$ järgnevail kaalutlustel.

1. Dünaamilise tunnusjoone ebasümmeetrilisus ($\overline{AB} \neq \overline{AC}$) ei põhjusta veel eriti suurt ebalineaarmoonutust (käesolevas näites on moonutusteguri väärtuseks võetud 10%), sest joonlõikude $\overline{AB}$ ja $\overline{AC}$ pikkuste erinevus, samuti ka pentoodi staatiliste tunnusjoonte vaheliste joonlõikude pikkuste erinevused ei põhjusta piirmäärast suuremaid ebalineaarmoonutusi.

2. Dünaamilise tunnusjoone ots C ei küüni väärtusele $U_G = 0$ vastava jooneni ja seetõttu on välditud moonutusi põhjustava võrevoolu tekkimise võimalus.

3. Talitluspunkt A ei asetse maksimaalselt lubatava anoodkao piirkonnas ja sellega on tagatud, et elektrontoru anood ei kuumene üle lubatava määra, kui võrel puudub vahelduvpinge.

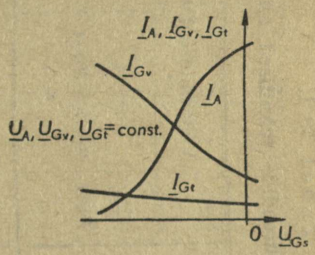
4. Kolmnurga BCD pind, mis iseloomustab elektrontoru poolt antava helisagedusliku võimsuse väärtust (vt. § 64), on maksimaalne.

5. Anoodvooluallika pinge 250 V vastab kasutatava elektrontoru U_{Amax} väärtusele.

6. Elektrontoru täielikuks läbitüürimiseks vajalik võrevahelduvpinge pole liiga kõrge ($U_G = 4{,}8$ V).

Võrreldes trioodiga vajab pentood enda läbitüürimiseks tunduvalt madalamat vahelduvpinget võrele. Teiseks pentoodide eeliseks on nende suurem kasutegur. Kui aga lubatakse võrdseid ebalineaarmoonutusi, siis on pentoodi ja trioodi kasutegurid ligikaudu võrdsed.

§ 79. Generaatorpentood. Generaatorpentoodideks nimetatakse raadiosaatjate suursagedusvõimendus-astmeis kasutatavaid pentoode. Nende varivõrele kantava pinge väärtus on 50 . . . 60% anoodpingest. Pentoodide anoodvooluallika pinge kasutegur on 0,93 . . . 0,95, seega märksa suurem kui tetroodidel ja veidi suurem kui trioodidel. Võrreldes saatja võimendusastmete väljevõimsuse ja sisendvõimsuse suhte võimalikke maksimaalväärtusi, selgub, et see on trioodide kasutamise puhul 10 . . . 20, tetroodide puhul 20 . . . 40 ja pentoodide puhul 70 . . . 100. Järelikult on pentoodide kasutamisel saatjas vaja kõige väiksemat arvu võimendusastmeid, et saada antenni toitmiseks vajalikku võimsust.



Joon. 79. 1. Pentoodi I_A-U_{Gs}-, I_{Gv}-U_{Gs} ja I_{Gt}-U_{Gs}-tunnusjooned konstantsete U_A, U_{Gv} ja U_{Gt} puhul.

Sagedasti valmistatakse pentoodide sulgvõre tihe, et teda oleks võimalik kasutada ka anoodvoolu tugevuse tüürimiseks. Et niisuguste pentoodide I_A-U_A-tunnusjoone kuju parendada (§ 76), selleks kantakse sulgvõrele madal positiivne pinge. Juhtides suursagedusvõimendus-astmes töötava pentoodi sulgvõrele helisageduspinget, toimub suursagedusvoolu amplituudis moduleerimine antud helisageduspinge rütmis. Joonisel 79. 1 toodud kõveraist on näha, et sümmeetrilise

Tabel 79.1.

Generaatorpentoodide tehnilised andmed.

Tüüp	Küttepinge $U_{e/F}$ V	Küttevool $I_{e/F}$ A	Maksimaalne anoodpinge U_A V	Tõus S mA/V	Võimendustegur				Elektroodidevaheline mahtuvus			Maksimaalne anoodkadu P_{Amax} W
					μ_{GtA}	μ_{GtGv}	μ_{GvA}	μ_{GsA}	C_{GtA} cm	C_{sis} cm	$C_{väl}$ cm	
Г-411	20	0,3	400	5,5	100	—	—	—	0,35	11	7	20
Г-412	20	0,22	750	3,8	500	11	55	—	0,1	6,5	6	20
Г-413	20	0,5	750	4,5	450	—	—	—	0,2	11	10,5	40
Г-414	20	1,4	750/1500	6	450	—	—	—	0,15	21	19	100
Г-418	5	0,9	400	4,4	360	10	—	—	0,12	12,5	10	20
Г-422	20	3,25	750/1500	3	—	5	—	—	0,08	15,5	15,5	100
Г-424	20	4,6	1500	5	450	10	—	—	0,15	27	33	200
Г-425	20	22	4000	4	300	7	45	9	0,1	21	18	750

Tabel 79.2.

Generaatorpentoodid telegraafi talitustingimustes.

Tüüp	Anoodpinge U_A V	Varivõrepinge $-U_{Gv}$ V	Sulgvõrepinge U_{Gs} V	Võre-eelpinge U_{Gt} V	Võre vahelduvpinge amplituudid U_G V	Anoodvool I_A mA	Varivõrevool I_{Gv} mA	Tüürvõrevool I_{Gt} mA	Sulgvõrevool I_{Gs} mA	Väljevõimsus P W	Optimaalne anoodkoorma takistus R_{ekv} Ω
Г-411	400	250	15	55	75	112	5	2,5	0,6	30	1900
Г-412	750	250	40	40	75	57	11	3,5	1,5	25	7500
Г-413	750	250	40	55	110	90	15	3,5	—	45	5000
Г-413	1000	250	40	50	75	65	10	1	—	50	9000
Г-414	750	350	40	60	135	190	45	20	10	100	2800
Г-414	1000	350	40	60	110	150	35	9	10	120	3750
Г-414	1500	350	40	60	100	120	30	7,5	8	150	7300
Г-418	400	225	35	50	105	85	20	3,5	1,5	20	2500
Г-422	750	300	40	70 ... 50	215	180	40	13	15	100	2700
Г-422	1500	300	60	70 ... 50	165	127	27	5	5,5	150	7300
Г-424	1500	400	40	140	300 ... 350	300	80	8	5	350	4000
Г-425	4000	1200	40	100	350	350	60 ... 80	4 ... 6	—	1000	—

amplituudmodulatsiooni saamiseks on vaja sulgvõrele anda teatud kõrgusega negatiivne eelpinge Selle negatiivse sulgvõrepinge mõjul on sulgvõrevoolu tugevus peaaegu null, mistõttu moduleerimiseks vajalik helisageduslik võimsus on väga väike. Nagu nähtub jooniselt 79. 1, on ka moduleerimiseks vajaliku helisageduspinge väärtus väike. Puuduseks siinjuures on vaid see, et pole võimalik saavutada moonutusvaba 100%-list moduleerimist.

Generaatorpentoodide tehnilised andmed on toodud tabelites 76. 1 ja 76. 2.

XIII peatükk.

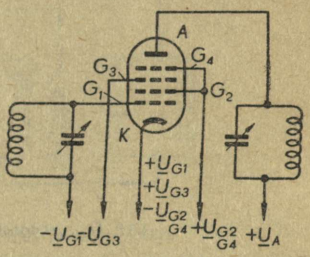
Mitme võrega elektrontorud.

§ 80. Heksood. Heksood sisaldab kuus elektroodi, milledest neli on võred. Nende võrede ülesanded sõltuvad kasutusotstarbest ja sellele vastavast lülitusest. Üheks heksoodide kasutuskohaks on, samuti kui muudetava tõusuga elektrontorudelgi (§ 74), reguleeritava võimendusega suursagedusvõimendajad. Heksoodi kasutamisel selleks otstarbeks on tema võrede ülesanded järgnevad — alates katoodi-poolsest võrest (joon. 80. 1): G_1 ehk G_{t1} — suursagedusvõimendaja tüürvõre, G_2 ehk G_{v1} — esimene varivõre, G_3 ehk G_{t2} — elektrontoru anoodparameetrite (S ja R_i) muutmiseks kasutatav võre, G_4 ehk G_{v2} — teine varivõre.

Sageli valmistatakse heksoodid võimenduse kahekordse reguleerimise võimalusega. Selleks on nende tüürvõre samasuguse ehitusviisiga nagu muudetava tõusuga elektrontorude tüürvõre. Heksoodi maksimaalne võimendus on umbes samasuur kui tetroodil või pentoodil. Võredele G_1 (G_{t1}) ja G_3 (G_{t2}) kantud mõnevoldilise negatiivse pinge mõjul väheneb heksoodi anoodtõusu väärtus mitu tuhat korda. Muudetava

tõusuga tetroodidest ja pentoodidest erineb heksood sellepoolest, et tema tõusu väärtuse muutmise ulatus on suurem ja selle muutmiseks vajaliku negatiivse eelpinge väärtus väiksem. Joonisel 80. 2 on toodud heksoodi I_A-U_{G1}-tunnusjooned mitmesuguse võrepinge U_{G3} väärtuse puhul. Neile võredele kantavate negatiivsete eelpingete väärtuste suhte valikuga on võimalik heksoodi tunnusjoontele anda soovitav kuju.

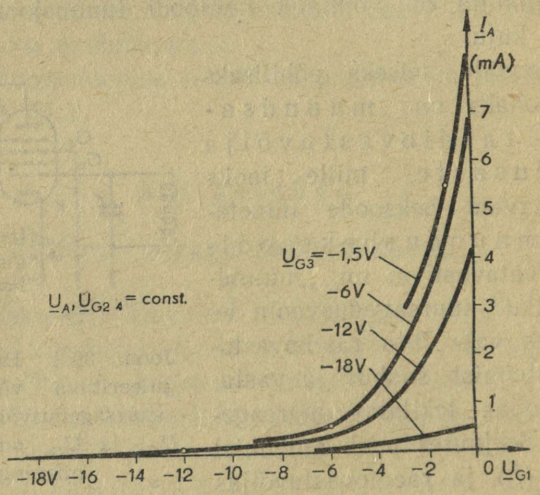
Heksoodide teiseks põhiliseks kasutuskohaks on **muundsagedus-raadiovastuvõtja muundusaste**, mille jaoks valmistatavaid heksoode nimetatakse **muundusheksoodideks**. Teatavasti on nn. „muundsagedusliku" suursagedusvoolu tekitamiseks vaja liita raadiovastuvõtja antennist saabuv ja vastuvõtjas endas tekitatav suursagedusvool. Seejuures peab antennist saabuva (f_s) ja raadiovastuvõtjas tekitatava suursagedusvoolu (f_{os}) sageduste erinevus võrduma muundsagedusliku suursagedusvoolu sagedusega ($f_{mn} = f_{os} - f_s$). Heksoodi ülesandeks niisuguses lülituses on: 1) tekitada suursageduslikku voolu f_{os}, 2) liita antennist saabuv signaalvool f_s ja toru enda poolt tekitatud vool f_{os} nii, et tekiks muundsageduslik vool f_{mn}, ja 3) võimendada muundsageduslikku voolu.



Joon. 80. 1. Heksood reguleeritava võimendusega suursagedusvõimendajas. U_{G3} ja U_{G1} on reguleerimispinged.

Joonisel 80. 3 on toodud skeem heksoodi sisaldavast muunduslülitusest. Selles lülituses võib heksoodi vaadelda koosnevana kahest järjestikku ühendatud elektrontorust. Võre G_1 ehk G_{t1} on tüürvõreks, võre G_2 ehk G_v — varivõreks, võre G_3 ehk G_{t2} — suursagedusostsillaatori ehk -generaatori tüürvõreks ja G_4 ehk G_{os} sama ostsillaatori

anoodiks (§ 68). Elektrontoru ostsillaatorosa toimib järgmiselt. Kolme esimest võret läbinud elektronid lendavad anoodi poole, kui aga võre G_4 (G_{o3}) kannab negatiivset potentsiaali, muudavad nad võrede G_3 (G_{t2}) ja G_4 (G_{o3}) vahelises ruumis liikumise suunda ja langevad võrele G_3; kui võre G_4 kannab positiivset potentsiaali, lendavad nad anoodile

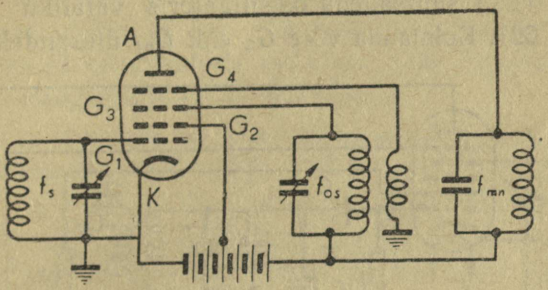


Joon. 80. 2. Heksoodi I_A-U_{G1}-tunnussari U_{G3} mitmesuguste väärtuste puhul ja U_A ning $U_{G2,4}$ konstantsete väärtuste puhul. Valgete punktidega on märgitud talitluspunktide asukohad tunnusjoontel, kui $U_{G1} = U_{G3}$.

(välja arvatud need, mis langevad võrele endale). Järelikult tüürib võre G_4 (G_{o3}) niihästi anoodvoolu tugevust I_A kui ka võre G_3 (G_{t2}) voolu tugevust I_{G3}, ühtlasi muudab ta aga ka elektrontoru parameetrite S ja R_i väärtusi (joonised 76. 5 ja 76. 6). Seega toimub elektrontorus võredele juhitavaist suursagedusvooludest (millede sagedused on f_s ja f_{o3}) ühe moduleerimine teisega. Moduleerimisel saadavale muundsagedusvoolule (sagedusega f_{mn}) moodustab koorma anood-

vooluringis sisalduv ja muundsagedusele häälestatud võnkering.

Muundusastmeis heksoodide kasutamise puuduseks on see, et selle astme võimendusteguri väärtust pole võimalik muuta võre-eelpinge muutmisega. Võre-eelpinge muutmine muudaks ka ostsillaatorina toimivat heksoodosa läbiva voolu



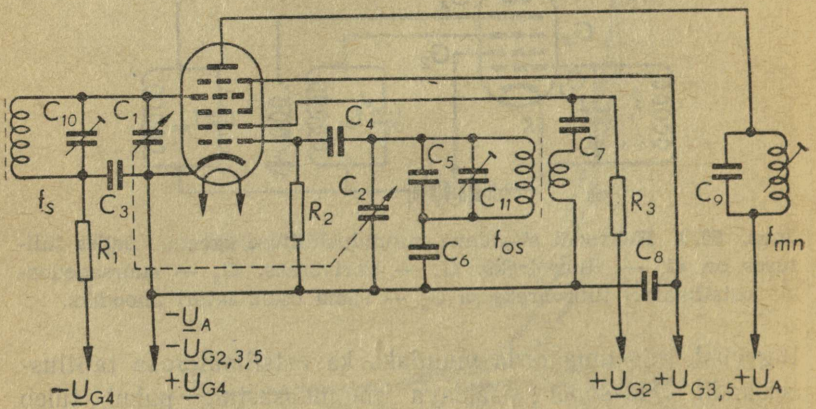
Joon. 80. 3. Heksoodi sisaldava muunduslülituse skeem. Selles lülituses on G_1 — tüürvõreks, G_2 — varivõreks, G_3 — suursagedusostsillaatori tüürvõreks ja G_4 — sama ostsillaatori anoodiks.

tugevust, mis omakorda muudaks ka ostsillaatorosa talitlusseisundit. Heksoodi sisaldava muundusastme puhul tuleb võimendust reguleerida raadiovastuvõtja teistes astmetes.

§ 81. Heptood. Heptoodideks nimetatakse seitsme elektroodiga, s. o. viie võrega elektrontorusid. Nende võrede ehitusviis on kohaldatud neile ülesandeile, millede jaoks heptood on valmistatud. Heptoode valmistatakse muundsagedus-raadiovastuvõtjate sagedusmuundusastme jaoks ja neile muundsagedus-vastuvõtjaile, kus ostsillaator on eraldi — segustusastme jaoks. Esimest liiki heptoode nimetatakse muundusheptoodideks, teist liiki — segustusheptoodideks.

Muundusheptoodi skeem on toodud joonisel 81. 1. Selles heptoodis täidavad võred järgmisi ülesandeid. Katoodipoolne võre G_1 ehk G_{t1} on suursagedusostsillaatori võreks.

Võre G_2 ehk G_{o3} moodustab nimetatud ostsillaatori anoodi. See võre pole sõelakujuline nagu võred tavaliselt, vaid koosneb kahest metallpleki ribast, mis on asetatud katoodiga rööbiti. Nendele ribadele langevate elektronide arv on küllaldane suursagedusostsillaatori anoodvoolu moodustamiseks. Järelikult moodustavad heptoodi katood ja võred G_1 (G_{t1}) ning G_2 (G_{o3}) suursagedusostsillaatoris vajaliku trioodsüsteemi (§ 68). Kolmanda võre G_3 ehk G_{v1} ülesandeks on var-



Joon. 81. 1. Muundusheptoodi 6A8 sisaldava sagedusmuundusastme skeem. Üksikosade andmed: $C_1 + C_2 = 2 \times 500$ pF, $C_3 = 0{,}05$ μF, $C_4 = 100$ pF, $C_5 = 12$ pF, $C_6 = 390$ pF, $C_7 = 470$ pF, $C_8 = 0{,}1$ μF, $C_9 = 200$ pF, C_{10} ja $C_{11} = 20$ pF, $R_1 = 200$ kΩ, $R_2 = 50$ kΩ, $R_3 = 20$ kΩ.

jestada tüürvõrena toimivat neljandat võret G_4 ehk G_{t2} ostsillaatori anoodina talitleva võre G_2 elektrostaatilise toime eest. Neljas võre, millele kantakse vastuvõetud suursagedus-pinge, on tüürvõreks. Viienda võre G_5 ehk G_{v2} ülesandeks on varjestada tüürvõret anoodile rakendatud vahelduvpinge elektrostaatilise mõju eest, järelikult on tema ülesanne seesama mis varivõrel tetroodis (§ 73). Seega moodustavad anood, teine varivõre G_5 ja tüürvõre G_4 tetroodsüsteemi, mille (ostsillaatori sagedusele vastavat kõikuvat emissioon-

voolu andva) katoodina võib vaadelda esimest varivõret G_3 läbinud elektronide voogu, kusjuures esimest varivõret ennast võiks vaadelda ruumlaenguvõrena (§ 72). Järelikult kõigub tetroodsüsteemi emissioonvool vastavalt trioodsüsteemis (suursagedusostsillaatoris) tekitatud sagedusele. Teine tüürvõre G_4 sisaldab mitmesuguse suurusega avasid, mistõttu teda saab kasutada tetroodsüsteemi võimendusteguri väärtuse reguleerimiseks (§ 74). Tetroodsüsteemi ülesandeks on signaalpinge ja ostsillaatoris tekitatud pinge liitmine ja tekkinud muundsageduspinge võimendamine.

Niisuguse heptoodi paremusteks heksoodiga võrreldes on: 1) suur võimendusteguri väärtus, 2) ostsillaatorosa anood on tüürvõrest varjestatud, 3) võimenduse väärtuse reguleeritavus suurtes piirides, 4) heptoodi triood- ja tetroodosa on sidestatud teineteisega elektriliselt ainult elektronide voo kaudu, sest katoodilt anoodile kulgev elektronide voog allub üheaegselt heptoodi triood- ja tetroodosa tüürvõrele rakendatud pingete mõjustustele. Seega toimub muundsageduse saamine moduleerimise teel (§ 76).

Muundvastuvõtjas segustustoru asemel muundusheptoodi kasutamise paremuseks on kahtlemata asjaolu, et sellega välditakse vajadus eri ostsillaatortoru järele.

Heptoodi trioodosa tunnusjooned võetakse üles samuti kui trioodidegi tunnusjooned (§ 47) ja kujutatakse kas I_{G2}-U_{G1}- või I_{G2}-U_{G2}-teljestikus. Selle osa parameetreist on väljendatud:

tõus avaldisega

$$S_{os} = \frac{\Delta I_{G2}}{\Delta U_{G1}}$$

ja võimendustegur

$$\mu_{os} = \frac{\Delta U_{G2}}{\Delta U_{G1}},$$

kusjuures teistele elektroodidele rakendatud pinged on konstantsed.

Heptoodi tetroodosa staatilised tunnusjooned kujutatakse I_A-U_{G4}- ja I_A-U_A-teljestikus. Need tunnusjooned võetakse üles mitmesuguse U_{G1} väärtuse juures, hoides teiste elektroodide pinged konstantsed. Tetroodosa parameetreist on väljendatud:

teatavale U_{G1} väärtusele vastav tõus avaldisega

$$S_{ü} = \frac{\Delta I_A}{\Delta U_{G1}},$$

võimendustegur avaldisega

$$\mu_{ü} = \frac{\Delta U_A}{\Delta U_{G4}}$$

ja sisetakistus avaldisega

$$R_{iü} = \frac{\Delta U_A}{\Delta I_A}.$$

Nagu pentoodide nii ka heptoodide tõus on seda väiksem, mida kõrgem on pinge U_{G1} (joon. 76. 6). Heptoodi kui muundaja viljakus sõltub sellest, kui palju mõjutab pinge U_{G1} tõusu $S_{ü}$ väärtust. Seda mõju väljendatakse muundustegurig a, mis näitab, kui palju muutub $S_{ü}$ väärtus, kui muuta U_{G1} väärtust 1 voldi võrra, ja tähistatakse tähisega k_{mn}. Järelikult

$$k_{mn} = \frac{\Delta S_{ü}}{\Delta U_{G1}}.$$

Anoodvoolu muundsageduslikù vahelduvvoolu amplituudi väärtus

$$I_{mnA} = \tfrac{1}{2} k_{mn} U_{G1} U_{G4},$$

kus U_{G1} on vahelduvpinge amplituud esimesel, ostsillaatori tüürvõrel ja

U_{G4} — vastuvõetud suursageduslikù vahelduvpinge (signaalpinge) amplituud neljandal võrel.

Muundustõusuks nimetatav elektrontoru muunduspara-meeter

$$S_{mn} = \frac{I_{mnA}}{U_{G1}} = \tfrac{1}{2} k_{mn} U_{G1}.$$

Graafiliseks S_{mn} leidmiseks on vaja mitmesuguste U_{G1} väär-tuste juures ülesvõetud staatilist I_A-U_{G4}-tunnussarja. Selle tunnussarja abil leitakse funktsiooni $S_ü = f(U_{G1})$ graafiline kujutis. Saadud kõverast määratakse muundustegur k_{mn}. Teades muundusteguri k_{mn} ja U_{G1} väärtusi, ongi võimalik leida S_{mn}. Nagu tõestab matemaatiline analüüs, saab selle maksimaalne väärtus olla 0,25 staatilise tõusu väärtusest.

Heptoodi ostsillaatorosa tüürvõrel G_1 peaksid kogu raa-diovastuvõtja poolt vastuvõetavate sageduste astmikus vahel-duvpinge amplituudid olema ligikaudu võrdsed. Selle nõude kontrollimiseks võib mõõta voolu tugevust võrel G_1 (joon. 81. 1, vool takistis R_2), mille väärtus on võrdeline vahelduvpinge kõrgusega võrel.

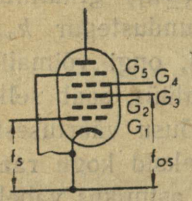
Kirjeldatud muundusastmel on järgmised puudused:

1. Heptoodi tetroodosa sisetakistus on suhteliselt väike. Ühendatuna rööbiti anoodvooluringis sisalduva võnkeringiga, halvendab ta selle talitlustingimusi (§ 73).

2. Neljanda võre potentsiaal mõjutab voolu tugevust tei-ses võres, mõjutades seega ka generaatori sagedust. See toimub järgmiselt: mida kõrgem on neljanda võre pinge, seda rohkem elektrone pöördub tema juurest tagasi ning lan-geb kolmandale ja ka teisele võrele, suurendades neis kul-geva voolu tugevust.

3. Neljanda võre vooluringis sisalduv võnkering ja gene-raatori võnkering on omavahel nõrgalt sidestatud. Seda sidestust põhjustab neljanda ja kolmanda võre vahel ilmnev ning generaatori sagedusega pulseeriv elektronidest moo-dustatud ruumlaeng.

Ülalloeteldud puudused halvendavad muundusheptoodi sisaldava segustusastme töötamisomadusi suurematel sagedustel ($f > 20$ MHz, s. o. $\lambda < 15$ m). Selle vältimiseks kasutatakse suuremate sageduste puhul segustusheptoode (joon. 81. 2). Temas sisalduvail võredel on järgmised ülesanded. Esimesele võrele G_1 ehk G_{t1} juhitakse vastuvõetav suursagedus. Teine ja neljas võre G_2 ehk G_{v1} ja G_4 ehk G_{v2}



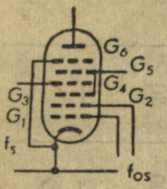
Joon. 81. 2. Segustusheptoodi skeem: G_1 — vastuvõetava suursagedusvoolu tüürvõre, $G_{2,4}$ — varivõred, G_3 — eraldi asetsevas ostsillaatoris tekitatud suursagedusvoolu tüürvõre, G_5 — sulgvõre.

on ühendatud kokku ning töötavad varivõredena. Kolmandale võrele G_3 ehk G_{t2} juhitakse eraldi asetsevas ostsillaatoris tekitatud muundsageduse saamiseks vajalik suursagedusvool. Viies võre G_5 ehk G_s ühendatakse katoodiga ja töötab sulgvõrena (§ 76).

Segustusheptoodi omaduste põhiliseks selgitajaks on I_A-U_{G1}-tunnusjoon, mis on üles võetud mitmesuguste U_{G3} väärtuste puhul. Tema parameetrid on sarnased muundusheptoodi parameetritega.

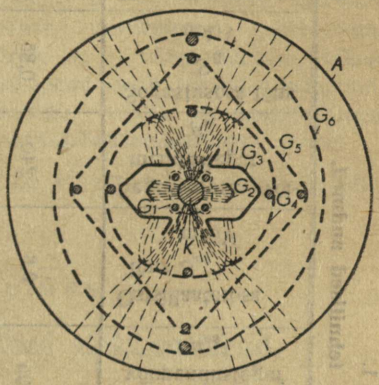
§ 82. Oktood. Oktood erineb muundusheptoodist sellepoolest, et tema anoodi ja varivõre vahel asetseb veel üks võre, nn. sulgvõre (joon. 82. 1). Kui muundusheptoodi võis vaadelda koosnevana järjestikku ühendatud trioodist ja tetroodist, siis oktood koosneb järjestikku ühendatud trioodist ja pentoodist. Anoodi ja varivõre vahelise sekundaaremissioonvoolu puudumise tõttu (§ 76) erinevad oktoodi omadused heptoodi omadustest niisama nagu pentoodi omadused tetroodi omadustest. Tähtsamad erinevused on alljärgnevad.

1. Oktoodil on suurem sisetakistus kui heptoodil.
2. Sekundaaremissiooni puudumise tõttu on oktoodi endakahinad heptoodi omadest väiksemad.
3. Oktoodi tüürvõrele võib kanda suuremaid suursageduspinge amplituude ilma ebalineaarmoonutusi tekitamata.
4. Oktoodi ostsillaatori anoodile ja varivõrele võib anda võrdse positiivse pinge, mistõttu lihtsustub lülitus.



Joon. 82. 1. Oktoodi skeem: G_1 — ostsillaatori tüürvõre, G_2 — ostsillaatori anood, G_3 — varje, G_4 — tüürvõre, G_5 — varivõre, G_6 — sulgvõre.

Joonisel 82. 2 on toodud oktoodi elektroodide lõige risti katoodile.



Joon. 82. 2. Oktoodi skeem: G_1 — ostsillaatori tüürvõre, G_2 — ostsillaatori anood, G_3 — varje, G_4 — tüürvõre, G_5 — varivõre, G_6 — sulgvõre, A — anood. Kriipsjoontega on näidatud elektronide tee, kui nad läbivad võre G_4 või kui nad pöörduvad tagasi võre G_4 ees.

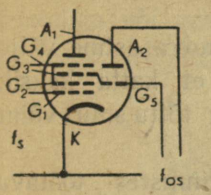
§ 83. Triood-heksoodmuundaja. Triood-heksoodmuundaja koosneb kahest ühisesse kesta paigutatud elektrontoru-süsteemist ja nimelt: trioodsüsteemist ja heksoodsüsteemist (joon. 83. 1). Trioodsüsteemi ülesandeks on sagedusmuundamiseks vajaliku suursagedusvoolu tekitamine sellekohases generaatorlülituses ja heksoodi ülesandeks — toimimine segustina. Triood-heksoodmuundajal on generaatorosa ja tüürvõre vaheline sidestus veelgi nõrgem kui eelkirjeldatud

Tabel 83.1.

Mitme võrega elektrontorude tehnilised andmed.

Tüüp	Elektrontoru nimetus	Küttepinge U_{elF} V	Küttevool I_{elF} A	Anoodpinge U_A V	Varivõrepinge $U_{G3,5}$ V	Ostsillaatori anoodpinge U_{Gos} V	Ostsillaatorosa võimendustegur μ_{os}	Ostsillaatorosa tõus S_{os} mA/V	Segustusosa võimendustegur $\mu_{ü}$	Segustusosa tõus $S_{ü}$ mA/V	Muundustegur k_{mm}	Muundustõus S_{mm} mA/V
СБ-242 2А1	Muundushep-tood	2,0	0,16	120	70	120	35	0,6	240	0,85	0,08	0,45
СО-183	Muundushep-tood	4,0	1,0	240	100	160	12	1,6	250	2,6	0,25	1,2
6А8	Muundushep-tood	6,3	0,3	250	100	250	30	0,8	350	1,3	0,10	0,5
6Л7	Segustushep-tood	6,3	0,3	250	150	—	—	—	800	1,1	0,07	0,38
6К8	Triood-hek-soodmuun-daja	6,3	0,3	250	100	100	—	2,1 . . . 4,0	450	1,4	0,10	0,3

torudel, seetõttu saab teda kasutada ka ülisuursageduslike vahelduvvoolude puhul (kuni 100 MHz).



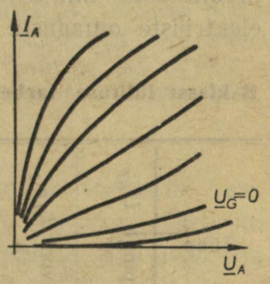
Joon. 83. 1. Triood-heksoodmuundaja skeem. K — katood, G_5 — ostsillaatori võre, A_2 — ostsillaatori anood, G_1 — heksoodi tüürvõre, millele juhitakse vastuvõetav suursagedus, $G_{2,4}$ — varivõred, G_3 — teine tüürvõre, millele pääseb trioodsüsteemi poolt tekitatav ja muundsageduse saamiseks vajalik suursageduspinge, A_1 — muundus-heksoodsüsteemi anood.

Tabelis 83. 1 on toodud mitme võrega elektrontorude tehnilised andmed.

XIV peatükk.

Liit- ja eriotstarbelised elektrontorud.

§ 84. Kaksiktriood B-klassi lülituse tarbeks. Helisagedusvõimendajate võimsusvõimendusastmete jaoks valmistatavad kaksiktrioodid koosnevad ühisesse kesta paigutatud kahest täpselt ühesuguste elektriliste omadustega trioodsüsteemist. Nende läbitavus on väike ja võimendustegur seega suur. Selle tõttu paiknevad nende I_A-U_G-tunnusjooned suuremas ulatuses teljestiku esimeses veerandis (§ 55) ja nende võredele rakendatav vahelduvpinge tekitab võrevoolu. Joonisel 84. 1 on toodud kaksiktrioodi ühe trioodsüsteemi I_A-U_A-tunnussari. Nagu nähtub jooniselt, on anoodvool võre-eelpinge nullväärtuse puhul õige nõrk.



Joon. 84. 1. Kaksiktrioodi I_A-U_A-tunnussari. Viis ülemist tunnusjoont on üles võetud võre kandes positiivset pinget.

Kasutatakse neid vastutaktlülitustes (§ 66) B-klassi töötamistingimustes, s. o. talitluspunkt nihutatakse

I_A-U_G-tunnusjoone alumisele põlvikule. Võrele kantava vahelduvpinge amplituudid küünivad kaugele positiivse võrepinge piirkonda (teljestiku esimesse veerandisse), mistõttu ilmneb ka võrevool.

Kaksiktrioodi võredele vahelduvpinget andva astme väljevõimsus peab olema küllaldane selleks, et katta kaksiktrioodi läbitüürimiseks vajalikku, võrevoolu tõttu suurt võimsuse tarvitust.

Kaksiktrioodi sisaldava, B-klassi tingimustes töötava, vastutaktlülitusega võimendaja paremuseks on: 1) konstruktsiooni lihtsus, sest vajatakse ainult ühte elektrontoru, ja 2) suur võimendustegur, mistõttu võimendajalt teatava väljevõimsuse saamiseks vajatakse väiksemat arvu võimendusastmeid. Selle lülituse puudused on järgmised: 1) ta vajab läbitüürimiseks suuremat võimsust kui kahte trioodi sisaldav B-klassi vastutaktlülitusega aste, 2) võrevooluringis sisalduv trafo peab töötama moonutusvabalt ka suhteliselt tugevate võrevoolude puhul, milleks ta peab olema eri konstruktsiooniga, 3) kaksiktrioodi mõlema trioodsüsteemi elektrilised omadused peavad olema võrdsed, et vältida suurte ebalineaarmoonutuste ilmnemist. Järelikult tuleb ühe trioodsüsteemi elektriliste omaduste muutudes asendada elektrontoru uuega.

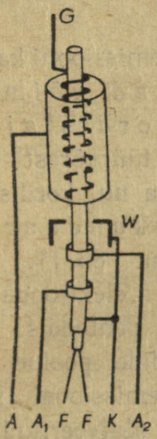
Tabel 84.1.

B-klassi lülituse tarbeks valmistatavate kaksiktrioodide tehnilised andmed.

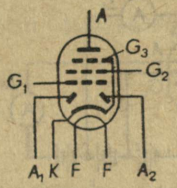
Tüüp	Küttepinge U_{elF} V	Küttevool I_{elF} A	Anoodpinge U_A V	Emissioonvool I_e mA	Võimendustegur μ	Tõus S mA/V	Väljevõimsus P_Z W	Koorma takistus R_Z Ω
CO-243 2H1	2,0	0,24	120	20	32	2,1	1,5	2000 × 2
6H7	6,3	0,8	300	125	35	3,1	10	4000 × 2

Tabelis 84. 1 on toodud B-klassi lülituses kasutatavate kaksiktrioodide tehnilised andmed.

§ 85. Dioodliitelised elektrontorud. Sageli paigutatakse trioodiga või pentoodiga ühisesse kesta üks või kaks dioodsüsteemi. Niisuguseid liit-elektrontorusid nimetatakse neis sisalduvate süsteemide nimetuste järgi. Näiteks nimetatakse üht dioodsüsteemi sisaldavat trioodi diood-trioodiks, kaht dioodi sisaldavat trioodi — duodiood-trioodiks ehk kahelisdiood-trioodiks jne. Ühte neist dioodsüsteemidest kasutatakse raadiovastuvõtjas suursagedusvoolu demoduleerimiseks. Demoduleerimisel saadav helisagedusvool juhitakse edasiseks võimendamiseks samas kestas sisalduva trioodi või pentoodi võrele. Teist dioodsüsteemi kasutatakse vastuvõetava suursagedusvoolu alaldamiseks. Alaldamisel saadav pinge on seda kõrgem, mida kõrgem on alaldatav suursageduspinge. Alaldatud pinge kantakse muudetava tõusuga suur-



Joon. 85. 1. Duodiood-trioodi koostis: A_1 — esimese dioodsüsteemi anood, A_2 — teise dioodsüsteemi anood, A — trioodsüsteemi anood, F — kütteniit, G — trioodsüsteemi tüürvõre, W — varje, K — katood.

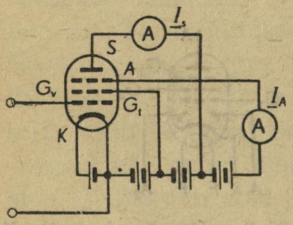


Joon. 85. 2. Duodiood-pentoodi skeem: A_1 — esimese dioodsüsteemi anood, A_2 — teise dioodsüsteemi anood, K — katood, F — kütteniit, A, G_1, G_2 ja G_3 — pentoodsüsteemi elektroodid.

sagedus-võimendustorude võredele lisaks sinna rakendatud võre-eelpingele. Nõnda saadakse võre-eelpinge, mille kõrgus muutub vastavalt antennist saabuvale suursageduspingele ja mille mõjul muutub nende võimendustorude võimendusteguri väärtus.

Joonisel 85. 1 on toodud duodiood-trioodi koostis ja joonisel 85. 2 duodiood-pentoodi skeem.

§ 86. Elektronkordistaja. Sekundaaremissiooni kasutamisel põhinevad sekundaaremiteerivad võimendus-elektrontorud ehk elektronkordistajad koosnevad: kuumutatavast katoodist K, tüürvõrest G_t, varivõrest G_v, võrgukujulisest anoodist A ja nn. kordistus-elektroodist ehk sekundaarkatoodist S (joon. 86. 1). Viimane ümbritseb teisi elektroode samuti nagu näiteks pentoodis anoodki. Teiste elektroodide poolne pind on aga sekundaaremissiooni suurendamiseks (§ 17) aktiveeritud vastava ainega (näit. tseesiumiga).



Joon. 86. 1. Elektronkordistaja ehk sekundaaremiteeriva võimendus-elektrontoru skeem: K — katood, G_t — tüürvõre, G_v — varivõre, A — anood, S — sekundaarkatood.

Anoodile A ja sekundaarkatoodile S antakse katoodi suhtes positiivne pinge (umbes 200 V), kusjuures anoodpinge $\underline{U}_A$ kõrgus ületab sekundaarkatoodpinget $\underline{U}_S$ mõnekümne voldi võrra. Sellega on sekundaarkatoodilt sekundaaremissiooni tõttu väljuvail elektronidel võimaldatud pääseda anoodile (§ 60).

Varivõret G_v läbivaist elektronidest moodustunud vool $\underline{I}_K$ jaguneb anoodvooluks $\underline{I}_A'$ ja sekundaarkatoodile kulgevaks vooluks $\underline{I}_S'$ ($\underline{I}_K = \underline{I}_A' + \underline{I}_S'$). Seda jagunemist iseloomustab voolujaotuse-tegur

$$a = \frac{\underline{I}_A'}{\underline{I}_S'} = c\sqrt{\frac{\underline{U}_A}{\underline{U}_S}}, \qquad (86.\ 1)$$

kus $\underline{U}_A$ on anoodpinge,

$\underline{U}_s$ — sekundaarkatoodpinge ja

c — elektrontoru omadusi iseloomustav tegur.

Sekundaarkatoodilt anoodile kulgeva sekundaaremissioonvoolu tugevus

$$\underline{I}_S = \sigma \underline{I}_S' = \frac{\sigma \underline{I}_A'}{a}, \qquad (86.2)$$

kus σ on sekundaaremissiooni-tegur (§ 17).

Üldanoodvool

$$\underline{I}_A = \underline{I}_A' + \frac{\sigma \underline{I}_A'}{a} = \underline{I}_A' \left(1 + \frac{\sigma}{a}\right) \qquad (86.3)$$

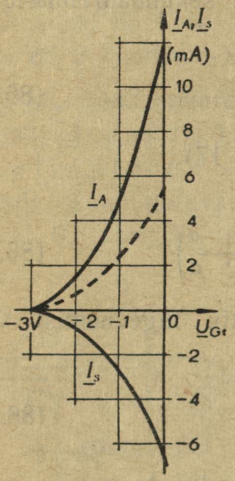
ja anoodvoolu sekundaaremissiooni tõttu tugevnemist väljendav kordistustegur

$$k_\sigma = \frac{\underline{I}_A}{\underline{I}_K} = \frac{a + \sigma}{a + 1}. \qquad (86.4)$$

Nagu sellest nähtub, peaks suure anoodvoolu tugevnemise ehk nn. voolukordistuse saavutamiseks σ olema võimalikult suur ja a — väike. Kui σ on suurem kui üks, siis suureneb sekundaaremissiooni tõttu ka elektrontoru $\underline{I}_A$-$\underline{U}_{Gt}$-tunnusjoone tõus. Joonisel 86. 2 on toodud elektronkordistaja tunnusjooned. Joonisel on kriipsjoonega märgitud tunnusjoon, kui anood ja sekundaarkatood on ühendatud kokku. Nagu nähtub $\underline{I}_A$-$\underline{U}_{Gt}$-tunnusjoonest, on selle tõus sekundaaremissiooni kasutamise tulemusena tunduvalt suurem kui kriipsjoonega märgitud tunnusjoonel (ilma sekundaaremissioonita).

Sekundaaremissiooni kasutamisel põhinevate köetavkatoodiga võimendustorude laiaulatuslikku kasutuselevõttu on takistanud rida neil esinevaid puudusi, milledest tähtsaimaks on sekundaaremissioonvoolu tugevuse ebapüsivus. Sekundaaremissiooni väärtus ja seega ka elektrontoru para-

meetrid muutuvad suurtes piirides temperatuuri muutudes — katoodi pihustumise tõttu sekundaarkatoodile langeva tolmu mõjul jne.



Joon. 86. 2. Sekundaaremiteeriva võimendus-elektrontoru tunnusjooned: $U_{ef\,F} = 6{,}3$ V, $U_A = 160$ V, $U_S = 120$ V, $U_{Gv} = 80$ V, I_S — vool sekundaarkatoodi vooluringis, I_A — vool anoodvooluringis. Kriipsjoonega on näidatud anoodvool, kui anood ja sekundaarkatood on kokku ühendatud.

§ 87. Ülisuursageduslikud võimendus-elektrontorud. Tavalise konstruktsiooniga elektrontorude kasutamist ülisuursageduslike (üle 30 MHz) vahelduvvoolude võimendamiseks takistavad järgmised elektrontoru omadused: 1) tüürvõre ja anoodi vaheline mahtuvus C_{GtA}, 2) elektrontoru sisendmahtuvus C_{sis} ja 3) tüürvõre-vooluringis sisalduv tegevtakistus.

Ehkki suursageduspentoodidel on anoodi ja tüürvõre vahelise mahtuvuse suurus vaid mõni tuhandik pikofaradit, siiski moodustab see ülisuursageduslikele vooludele liiga väikese takistuse, võimaldades ülemäära tugeva vahelduvvoolu kulgu anoodvooluringist võrevooluringi ja vastupidi.

Suure sisendmahtuvuse tõttu on suursagedusvoolu tugevus võreringis liiga suur. Võrevooluring ei sisalda aga ainult ebatakistust, vaid peale mahtuvusliku takistuse sisaldub seal ka tegevtakistus. Selle väärtuse määravad vooluringis esinevad kaod, mida põhjustavad: 1) võre ja katoodi vahelise klaasi ja soklimaterjali elektrijuhtivus, 2) katoodi ja tüürvõre vahel liikuvate elektronide või ioonide tõttu võre-

vooluringis kulgev vool, 3) anuma klaasis ja sokli isoleermaterjalis esinev dielektriline hüsterees, 4) anood- ja võrevooluringi vaheline nugisidestus, 5) elektronide inerts ja elektronide katoodilt anoodile lendamiseks kuluv aeg, 6) elektroodide ühendusjuhtmete induktiivsus.

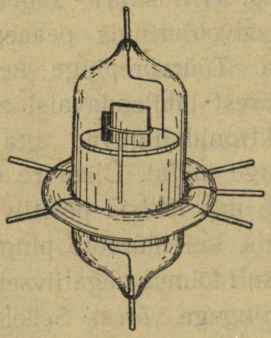
Nagu mõõtmised näitavad, on (kasutades häid isoleeraineid nagu vilgukivi, keraamilisi aineid jms.) punktides 1...4 nimetatud kaod väikesed, võrreldes punktides 5 ja 6 loeteldud põhjusil tekkivate kadudega.

Kui pole tegemist eriti suurte sagedustega, siis muutub voolu tugevus anoodvooluringis peaaegu üheaegselt võrepinge muutumisega. Tüürvõrepinge negatiivse potentsiaali tõustes nõrgeneb võrest läbilendavaist elektronidest moodustuv vool. Need elektronid liiguvad aga anoodile anoodi ja katoodi vahelise pinge mõjul. Ülisuure sageduse puhul liiguvad need elektronid, mis läbisid positiivse pingega tüürvõre, anoodi poole alles siis, kui tüürvõre pinge on juba muutunud negatiivseks. Järelikult toimub negatiivsete elektronide eemaldumine negatiivse pingega võrest. Sellele elektronide liikumisele aitab kiirendavalt kaasa võre negatiivne pinge. Seetõttu kandub osa võrevooluringis sisalduvast energiast anoodvooluringi üle elektronidele antud lisakiirenduse tekitamise näol. Osa võrevooluringis sisalduvast energiast kulub võrepinge positiivses suunas tõusmise puhul elektronide inertsi ületamiseks. Nii toimub elektronide inertsi tõttu anoodvooluringis kulgeva vahelduvvoolu faasis hilinemine võrepinge suhtes ja tekib võimsuskadu võrevooluringis.

Elektroode kontaktjalgadega ühendavaiks juhtmeteks on tavaliselt sirged traadid, millede induktiivsus on küll väike, kuid millest ülisuurte sageduste puhul põhjustatud takistus (ωL) ja viimase tõttu esinev pingelang ($i\omega L$) on siiski küllalt suured nimetamisväärsete kadude tekitamiseks. Elekt-

roodide ühendusjuhtmete induktiivsustest on olulisem katoodi juhtme induktiivsus ja selles esinev pingelang, sest see juhe on ühine võre- ja anoodvooluringile. Anoodvooluringis kulgeva vahelduvvoolu tõttu selles juhtmes pingelanguna tekkiv pinge on peaaegu faasis võrevooluringis kulgeva vahelduvvooluga, mille tõttu esinevadki nimetamisväärsed kaod.

Eeltoodust järeldub, et ülisuursageduslikel võimendustorudel peaks olema: 1) elektronide lendamise aeg elektroo-



Joon. 87. 1. Ülisuursagedusliku võimenduselektrontoru, nn. tõrukujulise elektrontoru väliskuju.

didevahelises ruumis lühike, mis on saavutatav elektroodidevahelise väikese vahekaugusega ja kõrge anood- või varivõrepingega, 2) lühikesed elektroodide ühendusjuhtmed ja 3) väike elektroodidevaheline mahtuvus.

Joonisel 87. 1 on näidatud ühte tüüpi ülisuursagedusliku võimendustoru, nn. tõrukujulise ehk tõru-elektrontoru väliskuju.

Ülisuursageduslike võimendustorude tehnilised andmed on toodud tabelis 87. 1.

Tabel 87.1.

Ülisuursageduslike võimendus-elektrontorude tehnilised andmed.

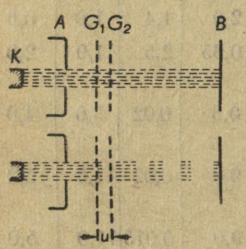
Tüüp	Nimetus	Küttepinge U_{eIF} V	Küttevool I_{eIF} A	Anoodpinge U_A V	Varivõrepinge U_{G_2} V	Võimendustegur μ	Tõus S mA/V	Sisemahtuvus C_{GIA} pF	Sisendmahtuvus C_{sis} pF	Väljemahtuvus $C_{väl}$ pF
954	Suursageduspentood	6,3	0,15	250	100	2000	1,4	0,007	3,0	3
955	Triood	6,3	0,15	180	—	25	2,0	1,4	1,0	0,6
957	Triood	1,25	0,05	135	—	16	0,65	2,5	1,0	2,0
959	Suursageduspentood	1,25	0,05	135	67	480	0,6	0,02	3,0	4,0
1851	Suursageduspentood	6,3	0,45	300	150	6750	9,0	0,02	11,5	5,2
1852	Suursageduspentood	6,3	0,45	300	150	6750	9,0	0,015	11,0	5,0
1853	Suursageduspentood	6,3	0,45	300	200	3500	5,0	0,015	8,0	5,0

§ 88. Ülisuursageduslikud generaator-elektrontorud. Ülisuursagedusliku vahelduvvoolu (üle 30 MHz) tekitamiseks kasutatakse elektrovaakumseadiseid, milledes elektronidest moodustatud voolu tüürimine toimub kas elektrivälja või magnetvälja abil (vt. § 90). Elektrivälja abil tüüritavad generaatortorud omakorda jagunevad töötamispõhimõtte ja ehituse poolest: võretüüritavaiks ja elektronkiire-tüüritavaiks generaatortorudeks (vt. § 89).

Võretüüritavate generaatortorudena kasutatakse peamiselt trioode (§ 46), millede ehitusviisi kujundamisel on võetud arvesse ülisuursageduslike voolude puhul esinevaist lisanähtustest põhjustatud erinõuded (§ 68 ja 87), nimelt: 1) on

kasutatud väikese dielektrilise kaoga isoleeraineid, 2) elektroodidevaheline mahtuvus on hoitud väike, 3) elektronide lendamise aeg läbi elektroodidevahelise ruumi on hoitud lühike, 4) elektroodide ühendusjuhtmete induktiivsus on vähendatud võimaliku miinimumini. Generaatortorudega, millede kujundamisel on arvestatud ülalloetletud nõudeid, on võimalik tekitada kuni 300 MHz sagedusega suursagedusvoolu.

§ 89. Kiirusetüüritavad elektrontorud. Klüstron. Esimesed elektronide joa kiirusega fokuseerimisel põhinevad elektronkiire abil tüüritavad elektrontorud ehk kiirusetüüritavad elektrontorud ehitati 1939. a. Nendega läks korda toota kuni 1 kW ülisuursageduslikku vahelduvvõimsust, sagedusega kuni 3000 MHz, kusjuures nende kasutegur oli võrdlemisi hea: 20...40%.



Joon. 89. 1. Elektronide joa kiirusega fokuseerimine elektronkiire abil tüüritavas elektrontorus. K — katood, A — anood, G_1 ja G_2 — võred, B — elektrood.

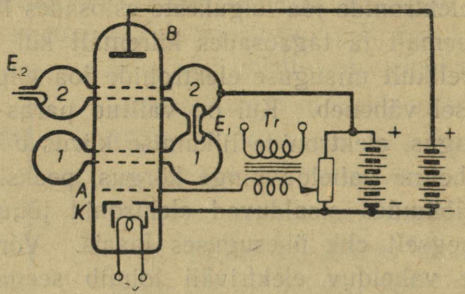
Kiirusega fokuseerimise põhimõte selgub jooniselt 89. 1. Katoodist K väljunud elektronid lendavad anoodi positiivse pinge poolt liikumises kiirendatuna pideva joana kuni anoodini A. Läbinud anoodis oleva ava, lendavad nad pideva joana ühtlase kiirusega v läbi võrede G_1 ja G_2 kuni elektroodini B (joon. 89. 1). Võrede G_1 ja G_2 vahele rakendatud vahelduvpinge tükeldab elektronide pideva joa lühikesteks lõigukesteks. See toimub järgmiselt. Võrede G_1 ja G_2 vaheline vahelduvpinge tekitab nendevahelises ruumis elektrivälja, mis vahelduvvoolu ühe poolperioodi vältel elektronide liikumist aeglustab, teise poolperioodi vältel aga kiirendab. Elektronid, mis võrede G_1 ja G_2 vahelist ruumi

läbivad siis, kui võredevaheline elektriväli mõjub nende liikumisele aeglustavalt, väljuvad võrest G_2 väiksema kiirusega kui v, mida nad omasid võredevahelisesse ruumi sattudes. Elektronid, mis läbivad võredevahelist ruumi ajal, mil võredevaheline pinge on null, liiguvad edasi endise kiirusega. Need elektronid aga, mis läbivad võredevahelist ruumi vahelduvvoolu järgneva poolperioodi vältel, saavad võredevahelises ruumis viibides liikumise kiirenduse, ja väljunud võrest G_2, lendavad edasi suurema kiirusega kui v. Niiviisi kujunenud elektronide joa lõigukeste esiosades liiguvad elektronid aeglasemalt ja tagaosades kiiremalt kui lõikude keskosades. Järelikult niisuguse elektronide joa lõigukese pikkus edasiliikumisel väheneb. Kui on valitud paras elektroodidevaheline kaugus, elektronide liikumise kiirus v ja võrede G_1 ning G_2 vaheline vahelduvpinge kõrgus, peaksid kõik elektronide joa lõikudes sisalduvad elektronid jõudma elektroodile B üheaegselt ehk ühesuguses faasis. Võrede G_1 ning G_2 vaheline vahelduv elektriväli toimib seega „kiiruse läätsena" ja kaugust võrest G_2 kuni kohani, kus elektronide pilv on muutunud kõige tihedamaks ja kuhu asetatakse elektrood B, võiks nimetada kiiruse fookusekauguseks.

Võrede G_1 ja G_2 vahel siinuselise vahelduvpinge mõjudes ei toimu elektronide täielikku faasilist fookusesse kogunemist, elektronide juga saab aga siiski tükeldatud ja joa lõigukesed teataval määral tihendatud. Selleks, et toimuks täielik elektronide faasiline fookusesse kogunemine, tuleks võredele G_1 ja G_2 kanda hambulist vahelduvpinget.

Joonisel 89. 2 on toodud eelkirjeldatud põhimõttel töötava ning klüstroniks nimetatava ülisuursagedusliku vahelduvvoolu generaatori koostis. Selle generaatori töötamiseks vajalikud võnkeringid on ehitatud generaatoriga kokku, sest generaatori poolt tekitatava sageduse jaoks vajalikud tavalise ehitusviisiga võnkeringid peaksid koosnema niivõrd väikes-

test mahtuvustest ja induktiivsustest, mida praktiliselt pole võimalik saavutada. Juba elektroodide ühendusjuhtmed ise omaksid suuremat induktiivsust, kui on vaja võnkeringi koostamiseks. Joonisel 89. 2 toodud generaator sisaldab kaht võnkeringi *1* ja *2*, mis oma konstruktsioonilt täielikult erinevad tavalistest võnkeringidest ja mida nimetatakse õõsresonaatoreiks (erijuhtudel ka rumbatronideks).



Joon. 89. 2. Klüstron-generaatori põhimõtte skeem. *K* — katood, *A* — anood, *1* — elektronide juga tükeldavate võredega õõsresonaator, E_1 — resonaatoritevaheline koaksiaaljuhe, E_2 — ülisuursageduslikku vahelduvvõimsust generaatorist väljajuhtiv koaksiaaljuhe, *B* — katoodiga ühenduses olev elektrood, *Tr* — modulatsioonitransformaator ülisuursageduslikku vahelduvvoolu amplituudis moduleerimiseks.

Generaator töötab järgmiselt. Katoodist *K* väljunud elektronid liiguvad võrgukujulise anoodi *A* positiivse pinge mõjul liikumises kiirendatult kuni anoodini. Läbinud selle avad, lendavad elektronid omandatud kiiruse mõjul läbi õõsresonaatori *1* võrede, mis vastavad joonisel 89. 1 toodud skeemil võredele G_1 ja G_2. Kui nende võrede vahel on vahelduvpinge, tükeldab see elektronide joa lõigukesteks, mis tihenevalt liiguvad õõsresonaatori *2* võrede poole. Õõsresonaatori *2* võred asuvad õõsresonaatori *1* võredest parajasti nii

kaugel, et elektronide joa lõigukesed läbivad selle võresid siis, kui nendes lõikudes elektronide tihedus on kõige suurem. Elektronide joa lõiguke, läbides õõsresonaatori *2* võresid, tekitab selles resonaatori endavõnkesagedusele vastava sagedusega ülisuursagedusliku vahelduvvoolu. Resonaator *2* on resonaatoriga *1* sidestatud koaksiaaljuhtme E_1 abil, mille kaudu ülisuursageduslik vahelduvpinge kandub tagasi ka resonaatorisse *1* ja nii hakkabki generaator töötama. Generaatoris tekkiv ülisuursageduslik vahelduvvool juhitakse tarbijasse koaksiaaljuhtme E_2 kaudu.

Elektronide juga moodustavaile elektronidele antakse tarvilik kiirus v vajaliku kõrgusega anoodpinge valimisega. Resonaatori *1* võred tükeldavad selle elektronide joa. Resonaatori *2* kaugus on valitud parajasti nii suur, et elektronide joa lõigukesed jõuavad resonaatorisse *2* alati siis, kui tema külgede (pealmise ja alumise võre) vahel oleva ülisuursagedusliku vahelduvpinge poolt tekitatava elektrivälja suund on vastupidine elektronide liikumise suunale, s. o. kui ta pidurdab nende liikumist. Selle tõttu läbivad elektronid resonaatorit *2* aeglustuvatena, andes osa oma kineetilisest energiast resonaatorisse *2*. Resonaatorite vahekauguse või elektronide kiiruse v reguleerimisega on võimalik saavutada niisugust olukorda, et elektronide lendamise aeg ei põhjusta pinge ja voolu vahelise faasinihke tekkimist, nagu see esines trioodide juures. Klüstronis on võimalik nihke ulatust reguleerida täisarvu perioodide kordseks, mispuhul nende tipp- ja nullväärtuste hetked langevad ühte.

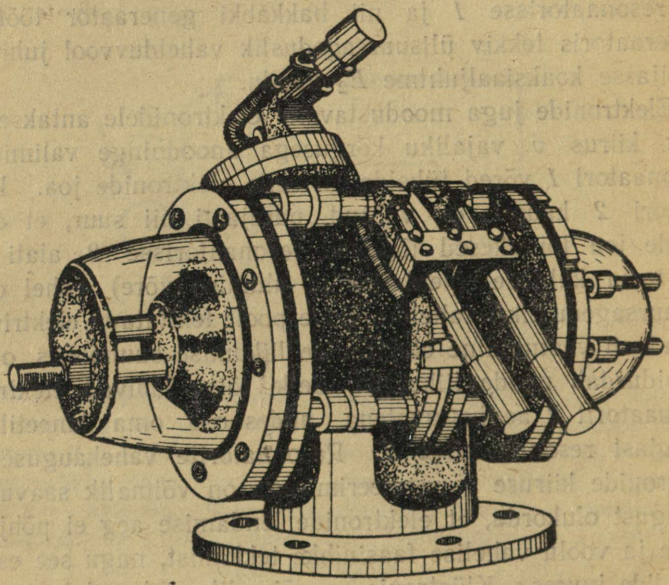
Elektronid, läbinud õõsresonaatori *2* võred, kus nad kaotasid suurema osa oma kineetilisest energiast, langevad elektroodile *B*, millest pääsevad katoodile tagasi.

Joonisel 89.3 on toodud suure võimsusega klüstroni väliskuju.

Klüstroneid kasutatakse mitte ainult ülisuursagedusliku vahelduvvoolu tekitamiseks, vaid ka võimendamiseks ja

demoduleerimiseks. Võimendajana kasutamise puhul juhitakse esimesesse õõsresonaatorisse võimendatav ülisuursageduslik vahelduvvool, teisest resonaatorist aga saadakse suuremat võimsust.

Nagu eeltoodust näha, rakendatakse klüstronites liikuvate elektronide kineetilist energiat ülisuursageduslikku vahelduv-



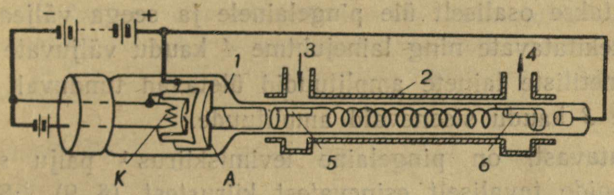
Joon. 89. 3. Suure võimsusega klüstroni väliskuju.

voolu võimendamiseks või tekitamiseks. Selle energia võimendamiseks kasutamisel põhineb ka alles viimasel ajal kujundatud nn. leviva laine võimendustoru.

Selles toimub liikuvate elektronide joa lõigukesteks tükeldamine ja nende kineetilise energia võimendamiseks kasutamine hoopis teisel põhimõttel kui klüstronis. Joonisel 89. 4 on toodud säärase võimendusseadme koostis. See võimen-

daja koosneb leviva laine võimendustorust ja ülisuursageduslіku elektrienergia juhtimise seadisest.

Jõudeseisundis läbivad võimendustoru katoodist *K* (joon. 89. 4) väljunud elektronid katoodi ümbritseva elektroodi ava ja liiguvad anoodi *A* positiivse pinge mõjul kiirenevalt pideva joana kuni anoodini. Nad läbivad selles oleva ava ja selle taga asetseva silindri ning liiguvad pideva joana püsiva kiirusega läbi traadist solenoidi ja selle otstes olevate ja varbadega *5* ja *6* ühendatud rõngaste ning langevad kogumiselektroodile *B*, andes sellele oma kineetilise energia jäägi — seda kuumutades.



Joon. 89. 4. Leviva laine võimendusseadme koostis. *1* — leviva laine võimendustoru: *K* — katood, *A* — anood, *B* — elektrood; *2* — ülisuursageduslіku elektrienergia juhtimiskanal, *3* ja *4* — ülisuursageduslіku elektromagnetilise energia sisse- ja väljajuhtimise lainejuhtmed, *5* — sisendantenn, *6* — väljeantenn.

Võimendatav ülisuursageduslik elektromagnetiline energia juhitakse võimendajasse lainejuhtme *3* kaudu, mille suudme ees asetseb vastuvõtuantennina tegutsev varb — sisendantenn *5*. Viimase üks ots on ühendatud rõnga külge, mille kaudu ta on mahtuvuslikult sidestatud lainejuhtme seintega. Sisendantenni teine ots on ühendatud solenoidiks keeratud traadiga. Lainejuhtme kaudu sisenevad ülisuursageduslikud elektromagnetilised lained tekitavad sisendantennis pingelaineid, mis levivad mööda solenoidi traati saateantennina tegutseva varvani — väljeantennini *6*. Selle ümber tekivad elektromagnetilised lained, mis võimendajast lahkuvad lainejuhtme *4* kaudu. Elektronide joa puududes on väljuvate

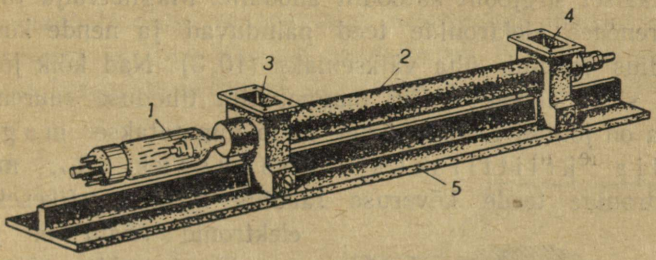
lainete amplituudid tunduvalt väiksemad sisenevate lainete amplituudidest — solenoidis ja antennides tekkivate kadude tõttu. Kui aga üheaegselt pingelainetega, mis levivad mööda solenoidi antennist *5* antennini *6*, läbib solenoidi liikuvate elektronide juga ja kui nende elektronide kiirused on pingelaine kiirusest suuremad, siis esineb elektronide joa ja pingelainete vastastikune toime. See toime väljendub esmalt elektronide joa lõigukesteks tükeldumises (osa elektronide liikumise aeglustamisega ja osa elektronide kiirendamisega) ja teiseks — elektronide joa lõigukeste keskmise kiiruse vähenemises. Viimase asjaolu tõttu elektronide kineetiline energia antakse osaliselt üle pingelainele ja seega väljeantenni poolt tekitatavate ning lainejuhtme *4* kaudu väljuvate elektromagnetiliste lainete amplituudid ületavad tunduvalt lainejuhtme *3* kaudu sisenevaid amplituude.

Teatavasti on pingelaine levimiskiirus [1] palju suurem elektronide tavaliselt esinevatest kiirustest (§ 9). Selleks, et vähendada leviva pingelaine liikumiskiirust võimendustorus elektronide joa sihis, keritakse antenne *5* ja *6* ühendav juhe solenoidiks. Nii peab pingelaine ühe antenni juurest teise juurde jõudmiseks läbima mitu korda pikema tee kui elektronid, mis liiguvad sirgjooneliselt piki solenoidi telge.

Klüstroniga võrreldes erinevad leviva laine võimendustorudes esinevad nähtused kõigepealt selle poolest, et klüstronis muundub elektronide kineetiline energia vahelduvvoolu energiaks võnkesüsteemis (joon. 89. 2 õõsresonaator *2* võrede vahel), leviva laine võimendustoru aga ei sisalda võnkesüsteeme, mistõttu ta on kasutatav ka teatud (kuni 800 MHz) sagedusriba võimendamiseks (piirkonnas $\lambda \approx 10$ cm). Nende torude võimendustegur on üle 80. Valmistatakse leviva laine

[1] Roman Hollmann. Elektrotehnika II. RK „Teaduslik Kirjandus", Tartu, 1948. Pt. 261 „Pinge ja voolu laineline jaotus liinil".

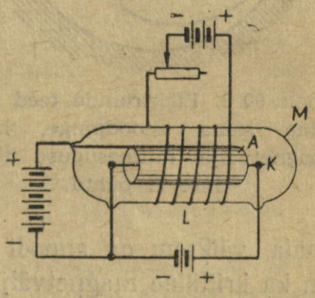
võimendustorusid anoodpingele 1600 V, mispuhul anoodvool on umbes 10 mA.



Joon. 89. 5. Leviva laine võimendusseadme väliskuju. *1* — leviva laine võimendustoru, *2* — ülisuursagedusliku elektrienergia juhtimiskanal, *3* ja *4* — ülisuursagedusliku elektromagnetilise energia võimendajasse ja sealt välja juhtimise lainejuhtmed, *5* — alus.

Joonisel 89. 5 on toodud leviva laine võimendusseadme väliskuju.

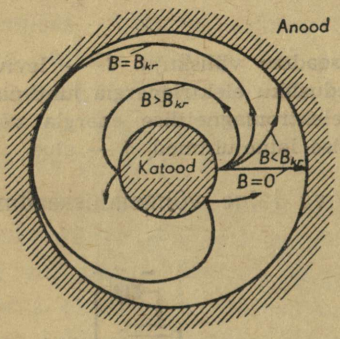
§ 90. Magnetron. Lihtsaima magnetroni koostis on toodud joonisel 90. 1. Kujutatud magnetron koosneb silindrilisest anoodist, mille telgjoonel asetseb katood. Kesta ümbritseb mähis, mille abil katoodi ja anoodi vahelises ruumis tekitatakse magnetväli nii, et selle jõujooned on katoodiga rööbiti. Katoodist väljunud elektronid, mis anoodpinge mõjul lendavad anoodi poole, läbivad magnetvälja ristisuunas ja kalduvad selle mõjul oma sirgjooneliselt teelt kõrvale (§ 10).



Joon. 90. 1. Lihtsaima magnetroni koostis: *K* — katood, *A* — anood, *L* — mähis, *M* — kest.

Joonisel 90. 2 on toodud ühest ning samast katoodi punktist väljuvate elektronide liikumise teed ühesuguse anood-

pinge, kuid magnetvälja mitmesuguse tiheduse puhul. Kui magnetväli puudub ($B = 0$), siis lendavad elektronid mööda radiaalset sirgjoont katoodilt anoodile. Magnetvälja tiheduse suurenedes elektronide teed painduvad ja nende kõveruse raadius muutub üha väiksemaks (10. 3). Nad kõik jõuavad aga siiski anoodile. Kui magnetvälja tiheduse suurendamisega on jõutud teatud piirini, mida nimetatakse magnetvälja kriitiliseks tiheduseks B_{kr}, muutub elektronide teede kõveruse raadius niivõrd väikeseks, et elektronid enam ei jõuagi anoodile, vaid pöörduvad uuesti katoodile tagasi ($B > B_{kr}$), mistõttu katkeb ka anoodvool. Joonisel 90. 3 on toodud magnetroni tunnusjooned $I_A = f(B)$ mitmesuguste anoodpinge U_A väärtuste puhul. Joonisel toodud näites on anoodpinge $U_A = 300$ V puhul kriitiliseks magnetvälja tiheduseks $B_{kr} = 50$ gaussi. Jooniseilt 90. 2 ja 90. 3 selgub ka, et mida kõrgem on anoodpinge või mida väiksem on anoodi ja katoodi vahemaa, seda suurem on ka kriitiline magnetvälja tihedus B_{kr}.



Joon. 90. 2. Elektronide teed ühe ning sama anoodpinge, kuid magnetvälja mitmesuguse tiheduse B puhul.

Nagu tõestab matemaatiline analüüs, on silindrilise anoodiga magnetroni kriitiliseks magnetvälja tiheduseks

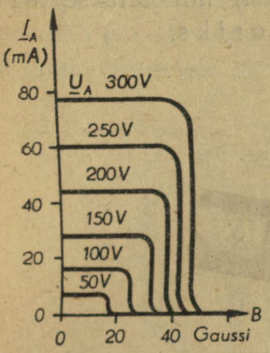
$$B_{kr} = \frac{6{,}74}{r_A} \sqrt{U_A}, \qquad (90.1)$$

kus r_A on anoodi raadius sentimeetrites.

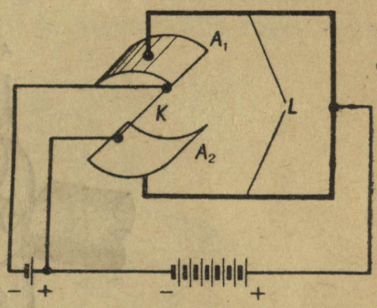
Et anoodvool kriitilise magnetvälja tiheduse puhul ei nõrgene järsku nullini, see on tingitud sellest, et kõik elekt-

ronid ei välju katoodist võrdse kiirusega. Selle põhjuseks võivad veel olla ka magnetroni ehituslikud ebatäpsused.

Ülisuursagedusliku vahelduvvoolu tekitamiseks kasutatavais magnetronides rakendatakse konstantset magnetvälja, mille tihedus kriitilist tihedust pisut ületab. Niisugusel puhul kaotavad katoodist väljunud elektronid oma radiaalse kiiruse



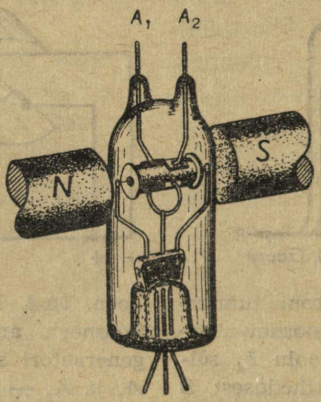
Joon. 90. 3. Magnetroni tunnusjoontest $I_A = f(B)$ koosnev tunnussari, s. o. anoodvoolu I_A sõltuvus magnetvälja tihedusest B mitmesuguste anoodpinge U_A väärtuste puhul.



Joon. 90. 4. Kahest poolsilindrist koosneva anoodiga magnetrongeneraatori skeem. K — katood, A_1 ja A_2 — anoodid, L — võnkeringi induktiivsust moodustav juhe; sama võnkeringi mahtuvuse moodustab anoodide A_1 ja A_2 vaheline mahtuvus.

ja liiguvad katoodi ümber ainult tangensiaalse kiirusega, moodustades silindrikujulise, suurt tihedust omava ja suure kiirusega tiirleva ruumlaengu, mida nimetatakse *näivkatoodiks*. Kriitilist tihedust pisut ületava magnetvälja puhul on selle näivkatoodi ja anoodi vahemaa väga väike, seetõttu ilmneb juba anoodpinge vähesel määral perioodiliselt tõusmisel perioodiliselt muutuv anoodvool. See vool võib ilmneda ka siis, kui anoodi pind pole tasapinnaline, vaid omab lõhesid.

Joonisel 90. 4 kujutatud püsiva magnetväljaga ja kahest poolsilindrist koosneva anoodiga magnetron-generaatori anoodi segmentide A_1 ja A_2 vahelises ühendusjuhtmes tekib muutuva tugevusega vool nende segmentide vahelise muutuva pinge tagajärjel. Selles generaatoris on võnkumiste tekkimisel olulise tähtsusega elektronide katoodilt anoodile lendamise aeg, mistõttu teda sagedasti nimetatakse elektron-magnetron-generaatoriks.

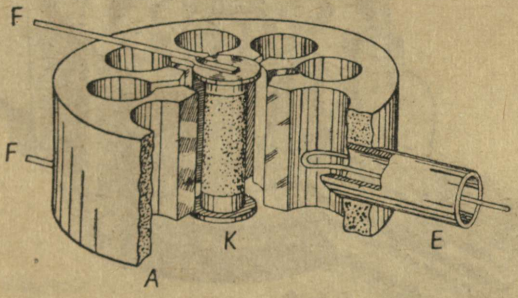


Joon. 90. 5. Kahest poolsilindrist koosneva anoodiga magnetron. Magnetroni kõrval on näha magnetvälja tekitava magneti poolusekingad.

Kahest poolsilindrist koosneva anoodiga magnetron-generaatorit, mille anoodi segmentidele antakse erineva kõrgusega pinged (näit. $A_1 = +150$ V ja $A_2 = +50$ V), nimetatakse negatiivse takistusega magnetron-generaatoriks. Niisuguses magnetronis — tema anoodi ja katoodi vahelise elektrivälja ning magnetvälja toimel — langeb sellele anoodi segmendile rohkem elektrone, mille pinge parajasti alaneb, tõstes sellega anoodi segmentide vahelist pinget veelgi. Nõnda tekib anoodi segmentide vahel

püsiv suursageduspinge ja nendega ühendatud juhtmetes suursagedusvool. Selliselt töötavaid magnetrone ehitatakse kuni mõnesajavatilise võimsusega. Nende kasutegur on ligikaudu 30% ja nad annavad suursagedusvoolu sagedusega kuni 1000 MHz ($\lambda \geqslant 30$ cm). Ühe niisuguse magnetroni väliskuju on toodud joonisel 90. 5.

Praegu kasutatakse rohkesti nn. õõsresonaatoritega magnetrone (vt. joon. 90. 7), milliseid valmistatakse anoodpingetele kuni 35 kV ja magnetvälja tugevusega



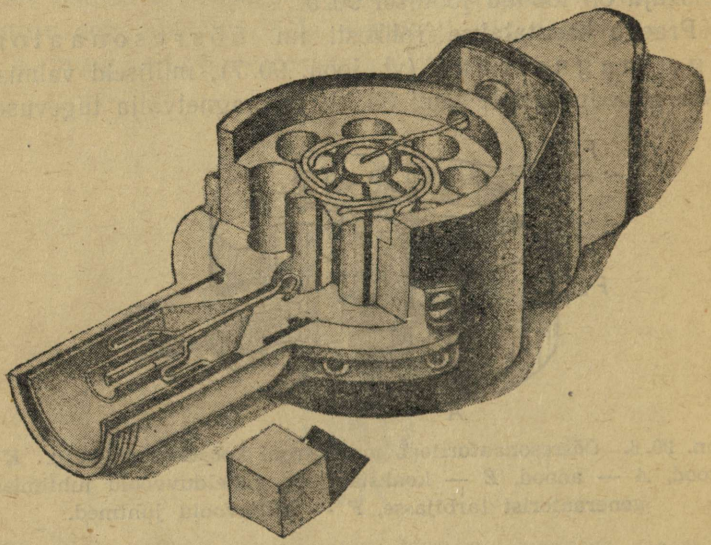
Joon. 90. 6. Õõsresonaatoritega magnetroni koostisosade kuju. *K* — katood, *A* — anood, *E* — koaksiaaljuhe vahelduvvoolu juhtimiseks generaatorist tarbijasse, *F* — küttevoolu juhtmed.

$H = 600 \ldots 15\,000$ Oe. Neid on võimalik ehitada sagedustele 600 ... 60 000 MHz ($\lambda = 50 \ldots 0{,}5$ cm), kasuteguriga 20 ... 60%, pulsi võimsusega 100 ... 3000 kW ning keskmise võimsusega 100 ... 1500 W.

Joonisel 90. 6 on näidatud ülisuursagedusliku vahelduvvoolu generaatorina kasutatava magnetroni silindrikujuline katood *K*, lõhede ja õõsresonaatoritega (§ 89) varustatud anood *A* ja koaksiaaljuhe *E*, ülisuursagedusliku vahelduvvoolu juhtimiseks generaatorist tarbijasse.

Niisuguses magnetronis on õõsresonaatoritega anoodi ja katoodi vahel püsiv alalispinge. Õõsresonaatorite katoodipoolsete külgede ja katoodi vahelises ruumis aga tiirleb

magnetvälja mõjul elektronidest moodustatud silindrikujuline ja ebatasase resonaatoritepoolse pinnaga elektronide pilv. See tekitab õõsresonaatorites ülisuursageduslikud võnkumised, millede sagedused on määratud õõsresonaatorite mõõdetega. Seejuures on kõrvuti asetsevate õõsresonaatorite

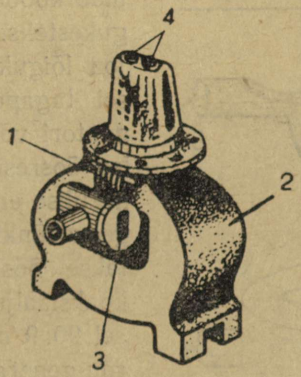


Joon. 90.7. Magnetroni 5J23 sisevaade lõikes.
Selle magnetroni andmed on järgmised: kaal $G = 7{,}43$ kg, sagedus $f = 1056 \ldots 1044$ MHz, anoodpinge $U_A = 24{,}5$ kV, anoodvool $I_A = 33$ A, magnetvälja tugevus $H = 1100$ Oe, generaatorist võetava voolu pulsi kestus $\tau = 1$ μsec, pulsside arv sekundis $= 1000$ pulssi, võimsus $P_0 = 475$ kW, kasutegur $\eta = 59\%$.

seintes voolavad vahelduvvoolud üksteise suhtes teataval määral faasis nihutatud. Joonisel 90.7 kujutatud niisugusel magnetronil on võnkumised üle ühe õõsresonaatori teineteisega võrreldes ühes ning samas faasis, mispärast resonaatorite otsad on vastavate lookade abil kokku ühendatud, nagu see nähtub jooniselt.

Magnetronide poolt tekitatava vahelduvvoolu sagedust on võimalik muuta kuni ±20% õõsresonaatorite induktiivsuse või nende mahtuvuse muutmisega.

Joonisel 90. 8 on toodud ühe magnetron-generaatori väliskuju.

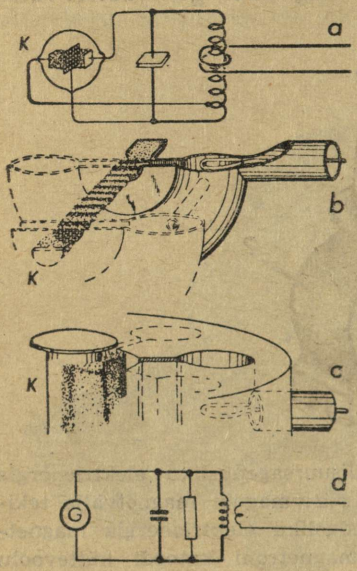


Joon. 90. 8. Magnetron-generaator ülisuursagedusliku elektrienergia tekitamiseks. *1* — magnetron, *2* — püsivmagnet magnetvälja tekitamiseks, *3* — lainejuhe ülisuursagedusliku elektrienergia magnetronist tarbijasse juhtimiseks, *4* — magnetroni katoodi küttevoolu klemmid.

Joonisel 90. 9 on toodud trioodi sisaldava generaatorlülituse, klüstroni ja magnetroni võrdluspildid. Joonise alumisel serval on magnetroni aseskeem.

Joonisel 90. 9 *a* on kolmpunktlülituses triood-generaator induktsioonpoolist ja kondensaatorist koosneva võnkeringiga. Generaatori poolt tekitatava suursagedusvõimsuse generaatorist väljajuhtimiseks on võnkeringi pooli peal mõne keeruga mähis. Katoodilt *K* anoodile lendavate elektronide joa tihedust tüürib katoodi ja anoodi vahel asuv võre. Joonisel 90. 9 *b* kujutatud klüstron-generaator koosneb kahest õõsresonaatorist, millede külgedes olevaid võresid läbib katoodist *K* väl-

juvate elektronide juga. Elektronide joa tihedust tüürivad joonisel eespool asuva õõsresonaatori külgedes olevad võred, muutes nende liikumise kiirusi ning põhjustades seega võresid läbivate ja suure kiirusega edasi liikuvate elektronide koondumist tihedaiks lõigukesteks. Need elektronide joa lõigukesed, läbides joonisel tagapool asuva õõsresonaatori võresid, tekitavad selles õõsresonaatoris oma kineetilise energia arvel suursagedusvõnkumise, mis juhitakse õõsresonaatorist välja koaksiaaljuhtme kaudu. Joonisel 90. 9 *c* kujutatud magnetron-generaatori õõsresonaatorites tekitab suursagedusvõnkumise anoodpinge mõjul teatud kiiruse omandanud ja magnetvälja mõjul katoodi *K* ümber tiirlevaist elektronidest koosnev pilv. Elektronide pilve tüürib samade õõsresonaatorite külgede vaheline suursageduspinge. Õõsresonaatorites tekkiva suursagedusvõimsuse generaatorist väljajuhtimine toimub ühe õõsresonaatoriga ühendatud koaksiaaljuhtme kaudu.



Joon. 90. 9. Triood-generaatori, klüstroni ja magnetroni võrdluspildid. Joonise alumisel serval on magnetroni aseskeem.

IOONSEADISED.

XV peatükk.

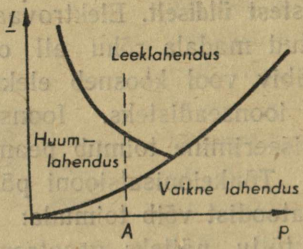
Ioonseadiste üldkäsitelu.

§ 91. Ioonseadistest üldiselt. Elektrovaakumseadiseid, millede kest on täidetud madala rõhu all oleva gaasiga või auruga ja mida läbiv vool koosneb elektronide ja ioonide voost, nimetatakse ioonseadisteks. Ioonseadistes sisalduva gaasi või auru ioniseerimine toimub peamiselt tõukeionisatsiooni teel (§ 12). Tõukeionisatsiooni põhjustavate elektronide vabanemine katoodist võib toimuda: 1) termoelektrilise emissiooni (§ 15) tõttu, näiteks gasotronides, 2) fotoefekti mõjul (§ 18), näiteks fotorakkudes, või 3) külmale katoodi pinnale langevate positiivsete ioonide löökide ehk ioonidega pommitamise mõjul (§ 17). Viimasel juhul peab gaasis leiduma kas või väikselgi arvul ioone, mis ka tegelikult gaasis alati leiduvadki.

Tõukeionisatsiooni ilmnemiseks on katoodi ja anoodi vahel vaja niivõrd kõrget pinget, et see suudaks elektronidele ja ioonidele anda elektroodide vahel leiduva gaasi molekulide ioniseerimiseks vajaliku kiiruse (§ 12).

Ioonide ja elektronide voo näol gaasis ilmnevat elektrivoolu liigitatakse *sõltuvaks* ja *sõltumatuks* vooluks. *Sõltuvaks vooluks* nimetatakse teda siis, kui elektroodidevahelise voolu tugevus ja seega ka seda voolu moodustavate ioonide ja elektronide arv sõltub välisest ionisaatorist. Niisugusel puhul lakkab välise ionisaatori toi-

mimise lõppedes ka elektrivool (näit. gaastäidisega fotoelektrontorus — gaas-fotorakus). Elektroodidevahelise pinge tõstmisel tekib aga sõltumatu elektrivool, sest elektroodidevahelise küllaldaselt kõrge pinge puhul põhjustavad elektroodide vahel liikuvad ioonid ja elektronid tõukeionisatsiooni tõttu uute ioonide ja elektronide tekkimist, need omakorda jälle uute tekkimist jne. Seetõttu kasvab nende ioonide ja elektronide arv laviinitaoliselt ja suureneb ka voolu tugevus. Sõltumatu vooluga ioonseadistes ei sõltu seega voolu tugevus väliseist ionisaatoreist. Sellesse liiki



Joon. 91.1. Elektrilahenduse iseloomu kujunemise sõltuvus gaasi rõhust p ja voolu tugevusest I.

kuuluvaid ioonseadiseid võib liigitada neis esinevate toimuste järgi, eristades järgnevaid toimuste liike:

1. Vaikne sõltumatu elektroodidevaheline elektrilahendus (elektrivool), mille puhul voolu tugevuse suurenemist piirab ioonseadise välisvooluringis sisalduv küllaldaselt suurt takistust omav takisti. Sellel nähtusel põhinevais ioonseadistes pole elektroodidevahelise elektrivälja kuju liikuvate ioonide ja elektronide poolt eriti märgatavalt moonutatud.

2. Huumlahendus, mille tunnuseks on temale langevate positiivsete ioonide toimel elektrone emiteeriv külm katood ja katoodi lähedal esinev suur pingelang, mida põhjustab katoodi lähedal tekkiv positiivne ruumlaeng.

3. Leeklahendus, mille tunnuseks on suur voolu tugevus ja katoodi lähedal esinev väike, kuid järsk (suure gradiendiga) pingelang.

Ühe- või teiselaadilise lahenduse tekkimine sõltub gaasi rõhust p ja voolu tugevusest I. Viimane omakorda oleneb kasutatavast pingest ja välisvooluringi takistusest.

Joonisel 91. 1 on näitena toodud lahenduse iseloomu kujunemise sõltuvus neist tegureist. Kui gaasi rõhk on A, siis läheb vaikne lahendus (välisvooluringis sisalduvat takistust vähendades) esmalt üle huumlahenduseks ja siis leeklahenduseks.

Huumlahenduse puhul tekib katoodi lähedal suur pingelang, nagu see on näha ka jooniselt 12. 1. Selle põhjuseks on asjaolu, et huumlahenduse puhul tekib katoodi ja anoodi vahelises ruumis tõukeionisatsiooni tõttu palju ioone ja elektrone, milledest elektronid liiguvad kiirelt anoodile, suure massiga ja aeglaselt katoodi poole liikuvad positiivsed ioonid aga moodustavad suure tihedusega positiivse ruumlaengu. Katoodi vahetus läheduses neutraliseerivad selle positiivse ruumlaengu katoodist väljuvad ja negatiivset ruumlaengut moodustavad elektronid (§ 37). Mida suurem on voolutihedus ioontorus, seda lähemale katoodile nihkub positiivne ruumlaeng ja seda suurem on joonisel 12. 1 toodud kõvera osa *1—2* tõus. Seda ioonseadise katoodi lähedal esinevat pingelangu nimetatakse ioonseadise katoodilähiseks pingelanguks. Ka huumtoru ülejäänud osas tekib pingelang, nagu see nähtub jooniselt 12. 1, kuid see on eelmisega võrreldes väike. Tema tekkimise põhjustajaks on anoodi poole liikuvate elektronide poolt tekitatavad negatiivsed ruumlaengud, millede potentsiaalid ületavad positiivse ruumlaengu potentsiaali kõrguse.

Kui ioontoru välisvooluringis sisaldub suur takisti (R joon. 12. 1), siis kattub huumlahenduse valgusega mitte kogu katoodi pind, vaid ainult osa sellest. Takisti R takistuse

vähendamisel või vooluallika pinge tõstmisel suureneb ioontoru läbiva voolu tugevus ja vastavalt ka katoodi huumlahendusest helendav pinnaosa, kuna voolu tihedus selles pinnaosas jääb muutmatuks. Järelikult jääb muutmatuks ka katoodilähise pingelangu väärtus. Seetõttu nimetatakse seda pingelangu ka katoodilähiseks normaal-pingelanguks. Selle pingelangu väärtus sõltub mõnekümnetorrilise rõhu puhul ainult katoodi materjalist ja gaasi liigist. Inertgaasi puhul on ta seda väiksem, mida väiksema väljumistööga (§ 14) metalli kasutatakse. Sageli kasutatakse katoode, mille pind on aktiveeritud kas tooriumi, baariumi või tseesiumiga.

Voolutihedus huumlahenduses sõltub aga gaasitihedusest ja katoodi pinna kujust. Mida suurem on gaasitihedus, seda suurem on ka voolutihedus. Õõnespinnalise katoodi puhul on voolutihedus mitukümmend korda suurem kui tasapinnalise katoodi kasutamisel.

Kui kogu katoodi pind on kaetud huumlahendusvalgusega, s. o. kui ta emiteerib elektrone temalè langevate positiivsete ioonide löökide mõjul, ja kui sel juhul veelgi vähendada välisvooluringi takistust, siis suureneb voolutihedus huumlahenduses, kuid ühtlasi suureneb ka katoodilähine pingelang, mida sel puhul nimetatakse katoodilähiseks ebanormaal-pingelanguks. Välisvooluringi takistuse edasisel vähenemisel või pingeallika pinge tõstmisel ilmneb juba leeklahendus.

Leeklahenduse puhul on voolutihedus katoodi pinnal niivõrd suur, et see temale langevate positiivsete ioonide mõjul kuumeneb ja ilmneb termoemissioon (§ 15). Tavaliselt ei kuumene katoodi pind täiesti ühtlaselt, vaid mõne tema täpi temperatuur tõuseb suuremal määral, hakates seetõttu emiteerima rohkem elektrone. Viimane asjaolu põhjustab sinna langevate positiivsete ioonide arvu suurenemist, mistõttu katoodi see täpp veelgi rohkem kuumeneb.

Termoemissiooni tekkides kaob katoodi mõnes täpis katoodilähine pingelang ja seetõttu lõpeb seal huumlahendus ning kogu ioontoru läbiv vool koondub sellesse täppi. Selle tagajärjel võib voolutihedus selles täpis tõusta väga suureks (kuni mitu tuhat amprit ruutsentimeetrile). Ühtlasi tõuseb katoodi selle täpi temperatuur mitme tuhande kraadini, mistõttu ta hakkab kiirgama suure pinnaheledusega. Leeklahenduse ilmudes alaneb ka ioontoru elektroodidevaheline pinge. Niisugust leeklahendust nimetatakse *soojuslikuks leeklahenduseks*.

Juhul, kui katood koosneb niisugusest ainest, mis aurab juba madala temperatuuri juures (näit. elavhõbe), siis toimub leeklahendus kõrge rõhu all olevas aurus. Katoodist väljuvate elektronide vaba lendamise tee kuni kokkupõrkamiseni auru aatomitega, s. o. tõukeionisatsiooni tekkimise kohani, on väga lühike (umbes 10^{-5} mm). Katoodilähise tõukeionisatsiooni piirkonnast alates algab ka positiivseist ioonidest moodustuv positiivne ruumlaeng. Järelikult on peaaegu kogu ioontoru katoodi ja anoodi vaheline pingelang koondunud sellele katoodilähisele väikesele vahemaale, kus selle tõttu on ka elektrivälja tugevus ehk elektrivälja potentsiaali gradient (potentsiaali muutus pikkusühiku kohta potentsiaali suurima muutuse sihis) väga suur ($10^5 \ldots 10^6$ V/cm). Niisuguse suure väljatugevuse puhul tekib emiteerimine juba välise elektrivälja mõjul (§ 16), kusjuures katoodi temperatuur on madal. Sellist leeklahendust nimetatakse *külmkatoodi-leeklahenduseks*. Nõnda töötavad näiteks elavhõbedaaur-suunajad, millede katoodi emiteeriva täpi temperatuur on ainult umbes 200° C. Valgust kiirgab elavhõbeda pinna lähedal olev elavhõbeda aur. Katoodilähine pingelang on leeklahenduse puhul väike (10 ... 15 V). Huumlahenduse puhul on ta aga heeliumis asuva kaaliumkatoodi korral 59 V ja õhus asuva raudkatoodi korral 269 V.

Ioontorus esinevat *kogu pingelangu* võib

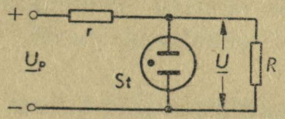
vaadelda koosnevana kolmest osast, s. o. katoodilähisest pingelangust, katoodi ja anoodi vahelises ruumis esinevast pingelangust ja anoodilähisest pingelangust. Esimesena mainitud pingelangu väärtust ja tekkimise põhjusi on eespool lähemalt vaadeldud. Katoodi ja anoodi vahelises ruumis esinev pingelang on suhteliselt väike, sest katoodilt anoodile lendavad elektronid ei saa ioontorus moodustada negatiivse potentsiaaliga ruumlaengut nagu vaakumtorudes (§ 37), kus ruumlaengu mõju ületamiseks on vaja katoodi ja anoodi vahele rakendada teatud kõrgusega pinget.

Ioontorudes tekib tõukeionisatsiooni tõttu elektroodidevahelises ruumis samapalju positiivseid ioone, kuipalju on seal anoodi poole liikuvaid negatiivseid elektrone. Et negatiivsete elektronide ja positiivsete ioonide arv selles ruumis on võrdsed, siis on see ruum elektriliselt neutraalne, vaatamata asjaolule, et seal elektroni-iooni paaride arv võib olla väga suur (kuni 10^{12} paari ühes kuupsentimeetris). Järelikult puudub selles ruumis ka elektriväli ja elektronid ning positiivsed ioonid liiguvad seal enam-vähem kaootiliselt, kusjuures elektronid langevad anoodile väikese kiirusega. Niisugust elektronide ja ioonidega väga tihedasti täidetud ruumi nimetatakse „gaaslahendus-plasmaks". Selles esinev suhteliselt väike pingelang on põhjustatud aatomite kiirgumisest (§ 12) ja positiivsete ioonide langemisest seadise kesta seintele.

Võrreldes katoodilähise pingelanguga sõltub suhteliselt väikese anoodilähise pingelangu väärtus voolutihedusest anoodi pinnal ja anoodi kujust. Väikese voolutiheduse puhul võib see pingelang olla isegi negatiivne, s. o. võib esineda pinge tõus.

§ 92. Pingestabilisaator. Lihtsaim pinge reguleerimiseks (stabiliseerimiseks) kasutatav ioontoru koosneb neooniga või argooniga täidetud kestast ja selles asuvast kahest elektroodist. Katoodi materjal ja kesta täidis valitakse niisugused,

millede katoodilähine pingelang vastab stabiliseeritavale pingele. Katoodi mõõted peavad olema sellised, et katoodilähise normaal-pingelangu puhul ioontoru läbiva voolu suurim tugevus ületaks normaalset kooremtakistis R esineva voolu tugevust (joon. 92. 1).



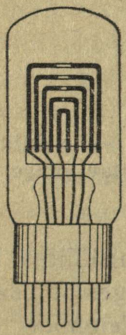
Joon. 92. 1. Pingestabiliseerimislülituse skeem: *St* — stabilisaator, R — kooremtakisti, r — takisti, U_P — stabiliseeritav pinge, U — püsiv pinge.

Joonisel 92. 1 kujutatud pingestabiliseerimislülitus koosneb pingestabilisaatorist *St* ja takistist r. Pingestabilisaatori nimipinge peab vastama kooremtakisti R klemmide vahel nõutavale ja muutmatuna hoida soovitavale pingele U. Takisti r takistuse väärtuse valikul tuleb arvestada ühte kahest olukorrast: kas soovitakse säilitada muutmatuna väljeklemmide vahelist pinget U (vaatamata koorma R takistuse väärtuse muutumisele) või koorma klemmide vahelist pinget U (vaatamata toitevooluallika pinge U_P kõrguse muutumisele). Esimesel juhul teostatakse r väärtuse valik alljärgnevalt. Katkestatakse koorma R vooluring ja valitakse r väärtus niisugune, et pinge olles U_P stabilisaatortoru läbiks katoodilähise normaal-pingelangu puhul võimalik tugevaim vool $I_{s\,max}$. Stabilisaatori klemmipinge on sel juhul U ja toitevooluallika pinge

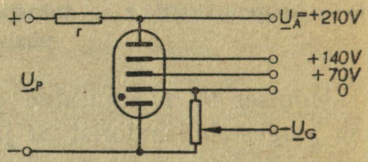
$$U_P = U + I_{s\,max}\, r. \qquad (92.1)$$

Pärast kooremtakisti R sisselülitamist tugevneb küll vool I_s, kuid õige vähe, sest takistis r esineva pingelangu $I_s r$ tõttu alaneb pinge U, mis omakorda põhjustab pingestabilisaatorit (stabilisaatortoru) läbiva voolu tunduvat nõrgenemist. Järelikult nõrgeneb takisti R lülitamisega stabilisaator-

toru läbiv vool peaaegu samapalju, kuipalju tugevneb takistit R läbiv vool (nullist I_R-ni). Sama toimub ka koorma R takistuse vähenedes, siiski aga ainult seni, kuni vool stabilisaatoris on nõrgenenud teatud minimaalsele väärtusele $I_{S\,min}$, mil huumlahendus pingestabilisaatoris lõpeb.



Joon. 92. 2. Pingestabilisaatori väliskuju (elektroodid on kujutatud läikes).



Joon. 92. 3. Skeem lülitusest mitme elektroodiga pingestabilisaatori kasutamiseks.

Määranud ülalkirjeldatud viisil takisti r väärtuse, saavutatakse pinge ja voolu väärtuste konstantsus takisti R takistuse muutumisel lõpmata suurest väärtusest kuni teatud R_{min} väärtuseni. Samal põhimõttel toimub takisti r väärtuse määramine ka siis, kui soovitakse, et koorma klemmide vaheline pinge jääks muutmatuks takistuse väärtuse muutudes väärtusest R_{max} kuni toru omadustega määratud väärtuseni R_{min}.

Kui aga on vaja hoida pinget U muutmatuna, hoolimata toitepinge U_P väärtuse muutmisest, siis tuleb valida takisti r väärtus nii, et toitepinge keskmise väärtuse puhul läbiks stabilisaatortoru vool $0{,}5(I_{S\,max} + I_{S\,min})$. Järelikult

$$U_P = U + r\left(I_R + \frac{I_{S\,max} + I_{S\,min}}{2}\right). \qquad (92.2)$$

Niisugusel korral toitepinge U_P väärtuse suurenedes või vähenedes suureneb või väheneb vastavalt ka voolu tugevus

stabilisaatortorus, kuna aga voolu I_R tugevus koormas jääb peaaegu muutmatuks.

Lülitusis, kus vajatakse mitmesuguse kõrgusega muutmatuid pingeid, kasutatakse pingestabilisaatoreid, mis toimivad ühtlasi ka *pingejagajatena*. Niisugused ioontorud valmistatakse silindrikujuliste, üksteise sees asuvate anoodidega (joon. 92. 2). Nende kasutamisviis on näidatud joonisel 92. 3.

Tabelis 92. 1 on toodud pingestabilisaatortorude tehnilised andmed.

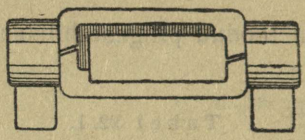
Tabel 92. 1.

Pingestabilisaatortorude tehnilised andmed.

Tüüp	75C5-30	105C5-30	150C5-30
Pingestabilisaatorit läbiva voolu piirväärtused	5...40 mA	5...40 mA	5...40 mA
Stabiliseeritava alalispinge minimaalväärtus	105 V	133 V	185 V
Süütepinge	100 V	115 V	160 V
Stabiliseeritud pinge nimiväärtus	75 V	105 V	150 V
Pinge stabiilsus, kui voolu tugevus muutub 5... ...30 mA	3 V	1 V	2 V
Pinge stabiilsus, kui voolu tugevus muutub 5... ...40 mA	5 V	2 V	4 V
Pingestabilisaatori poolt tarvitatav võimsus	0,4...3 W	0,5...4 W	0,8...6 W

§ 93. Gaaslahendi. Gaaslahendid koosnevad klaaskestast, milles on kaks alumiiniumist (joon. 93. 1) või baariumiga aktiveeritud metallist (§ 28) elektroodi. Elektroodide kaugus

teineteisest on tavaliselt 2 ... 3 mm. Kest on täidetud argoongaasiga, mille rõhk on 30 ... 60 torri. Valmistatakse neid süütepingetele 100 ... 500 V. Pärast süttimist väheneb pingelang alumiiniumelektroodidega lahendis 25 ... 30 voldile ja baariumiga aktiveeritud elektroodidega lahendis 8 ... 10 voldile. Alumiiniumelektroodidega lahendit võib läbida maksi-



Joon. 93. 1. Alumiiniumelektroodidega torukujuline gaaslahendi.

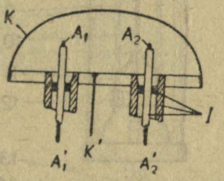
maalselt 2 sekundi vältel kuni 3-ampriline vool, ilma et lahendi rikneks. Suurema voolutugevuse jaoks ehitatavail baariumiga aktiveeritud elektroodidega lahenditel on vastavad väärtused: 10 sek. ja kuni 100 A.

Gaaslahendeid kasutatakse liigpingekaitsmeteks, ühendades need kas juhtmete ja maa vahele, juhtmete endi vahele või mingil muul viisil mitmesugustesse elektriseadmetesse. Nende töötamiskõlblikkuse proovimine toimub järgmiselt: tõstetakse elektroodidevahelist pinget aeglaselt kuni ülelöögi tekkimiseni, jälgides seejuures pidevalt pinge väärtust. Pinge, mille juures tekib ülelöök, ei tohi erineda nimiväärtusest rohkem kui ± 10% võrra. Pärast ülelöögi tekkimist lastakse ettekirjutatud aja (2 ... 10 sek.) vältel lahendist läbi nimitugevusega voolu. Seda toimingut korratakse pärast 3 ... 4-minutilist gaaslahendi jahtumist. Ka teistkordsel proovimisel ei tohi tegelik süütepinge erineda nimiväärtusest rohkem kui ± 10% võrra.

XVI peatükk.

Ioonsuunajad.

§ 94. Huumsuunaja. Huumlahendusega suund-ioontorude ehk huumsuunajate töö põhineb sellel nähtusel, et katoodilähise pingelangu väärtus sõltub elektroodide pindade mõõteist, nende kujust ja vähesel määral ka pindade omadustest. Selle nähtuse rakendamiseks valmistatakse üks elektrood suurepinnaline ja kausikujuline ning aktiveeritakse ta sisepind

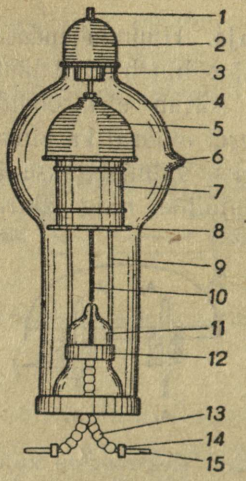


Joon. 94. 1. Huumsuunaja elektroodide kuju. K — katood, K' — katoodi ühendusjuhe, A_1 ja A_2 — anoodid, A_1' ja A_2' — anoodide ühendusjuhtmed, I — isoleerainest seib ja torud.

mingi metalliga, näiteks tooriumi, baariumi või tseesiumiga. Teine elektrood valmistatakse väikesepinnaline ja paigutatakse kausikujulise elektroodi õõnesse (joon. 94. 1). Ioontoru kest täidetakse inertgaasiga (heeliumi, argooni või neooniga).

Kui ioontoru on ühendatud vahelduvvooluringi, siis on poolperioodi vältel, mil suurepinnaline elektrood on katoodiks, niisuguses ioontorus esinev pingelang väike. Pingelangu väärtus vastab siis katoodilähise pingelangu väärtusele. Vahelduvvoolu teise poolperioodi vältel, mil katoodiks on väikesepinnaline elektrood, vastab ioontorus esinev pingelang katoodilähisele ebanormaal-pingelangule (§ 91), mis on eelmisest palju suurem ja mille tõttu ioontoru läbiva voolu tugevus on väike. Nii toimibki huumlahendusega ioontoru vahelduvvoolu suunajana. Valmistatakse neid niihästi pool-

periood-suunajatena kui ka täisperiood-suunajatena (ehk ühetee- või kahetee-suunajatena).

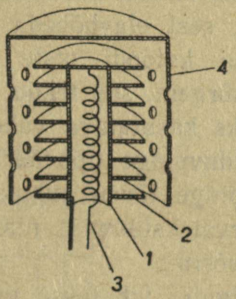


Joon. 95.1. Suure võimsusega gasotroni väliskuju. *1* — anoodi ühenduskontakt, *2* — klaasist kesta otsa kaitsev plekist müts, *3* — anoodi kandev silinder, *4* — klaasist kest, *5* — kausikujuline grafiidist anood, *6* — klaaskestas olnud ava, mille kaudu on toimetatud gaasi väljapumpamist kuni paraja vaakumi saavutamiseni ja mis siis on kinni sulatatud, *7* — katoodi ümbritsev plekist kest, *8* — plekist ekraan, mis varjab gasotroni alumist osa kiirgava soojuse eest, *9* — ekraani (*8*) ja plekist kesta (*7*) kandvad jalad, *10* — küttevoolu juhtmed, *11* — klaasist alus jalgade (*9*) kandmiseks, *12* — plekist rõngas jalgade (*9*) hoidmiseks, *13* — küttejuhtmete peal olevad keraamilisest ainest või klaasist rõngad, *14* ja *15* — kiudtraadist valmistatud painduvate küttejuhtmete otsas olevad kontaktpistikud.

§ 95. Gasotron. Gasotronideks nimetatakse kahe elektroodiga, kuumutatavat katoodi sisaldavaid ioontorusid. Need ioontorud on täidetud madala (10^{-2} ... 10^{-3}-torrilise) rõhu all oleva elavhõbedaauruga või inertgaasiga. Vool saab gasotrone läbida ainult ühes suunas, seepärast kasutatakse

neid suunajatena alaldajates, millede lülitused on toodud joonistel 43. 1, 43. 8, 43. 9 ja 43. 10. Suure võimsusega gasotroni väliskuju on toodud joonisel 95. 1.

Gasotronides esinev elektrilahendus on oma iseloomult leeklahendus (§ 91). Neis aga ei emiteeri elektrone katoodi üksik täpp, nagu sõltumatu leeklahenduse puhul, vaid kogu



Joon. 95. 2. Suure võimsusega gasotroni katoodi ehitus: *1* — nikkeltoru, *2* — nikkelkettad, *3* — kütteniit, *4* — kate.

kuumutatava katoodi pind. Kuumast katoodist väljunud elektronid ioniseerivad elavhõbedaauru molekule (§ 12) ja tekitavad katoodi ja anoodi vahelises ruumis gaaslahendusplasma (§ 91).

Väikese võimsusega gasotronide katood valmistatakse oksüüdikihiga kaetud nikkeltraadist või nikkelpleki ribast (§ 29). Suure võimsusega gasotronidel koosneb katood nikkeltorust ja selle külge keevitatud nikkelplekist ketastest, mis on üksteisest eraldatud väikeste vahedega. Toru sees asetseb volframtraadist kütteniit. Kettad ja toru on kaetud oksüüdikihiga. Niisuguse ehitusviisiga katoodil on väikestele välismõõdetele vaatamata suur pind, sest katoodi emiteeriva pinnana toimib ketaste ja toru kogupind. Suure võimsusega gasotronide katood paigutatakse temaga elektriliselt ühendatava silindrikujulise nikkelplekist katte sisse (joon. 95. 2). Viimase ülesandeks on: 1) takistada katoodi soojuskiirgust

ja säästa seega kütteenergiat, 2) vähendada ajaühikus katoodile langevate positiivsete ioonide arvu sel teel, et tema mõjul osa neist ioonidest langeb katoodiga ühesugust potentsiaali omava katte seintele. Oksüüdkatoodi iga oleks lühike, kui temale langeks palju suure kiirusega, võrdlemisi raskeid positiivseid ioone.

Gasotronide kütteks ei saa kasutada kõrgemat kui 5-voldilist vahelduvpinget, sest elavhõbeda ionisatsioonipinge on madal (10,4 V). Kui katoodi otste vaheline pinge oleks ionisatsioonipingest kõrgem, siis tekiks leek ka katoodi otste eneste vahel. Kütteks kasutatava vahelduvpinge olles 5 V jääb aga isegi vahelduvpinge tippväärtuste juures veel ligi 50% reserviks küttepinge tõusu puhuks. Gasotronidel lubatakse küttepinge kõrvalekaldumist nimiväärtusest tavaliselt + 10% kuni — 5% võrra.

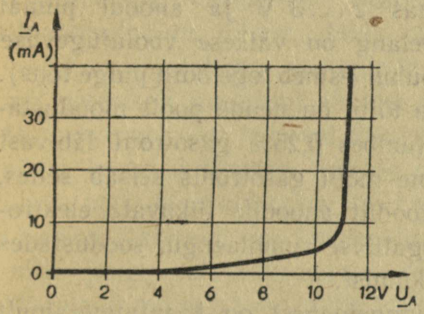
Nagu sellest selgub, lubatakse gasotronidel küttepinge kõrvalekaldumist nimiväärtusest langemissuunas vähem kui tõususuunas. Selle põhjuseks on asjaolu, et katoodi temperatuuri langedes nõrgeneks katoodi emissioonvool ja elavhõbedaauru rõhk, mille tagajärjel tõuseks katoodi ja anoodi vaheline pinge ning positiivsed ioonid langeksid katoodile endisest veelgi suurema kiirusega. Tõuseks aga oksüüdkatoodile langevate elavhõbedaauru positiivsete ioonide kiirus üle 23 ... 24 voldi, hävineks emiteeriv oksüüdikiht katoodil.

Gasotronide anood valmistatakse niklist või grafiidist. Tema temperatuur peaks olema maksimaalse koormuse puhul 500 ... 600° C. Sellest kõrgema temperatuuri puhul võiks tekkida sekundaaremissioonvool, mille tagajärjel gasotron hakkaks voolu läbi laskma ka vastupidises suunas. Madalama temperatuuri puhul võiks aga anoodidel tekkida elavhõbedaauru suur tihedus, mis samuti võiks põhjustada vastusuunalise voolu tekkimist.

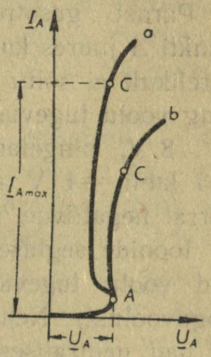
Transpordist saabunud või pikemat aega laos seisnud gasotroni tuleb enne tema anoodi pingestamist kuumutada

pikemat aega nimiküttevooluga, et aurustada elektroodidele tilkadena kogunenud elavhõbedat. Lühemat aega kestev gasotroni kuumutamine on aga tarvilik enne iga käivitamist.

Gasotroni tunnusjoone $I_A = f(U_A)$ alumine osa on kujutatud joonisel 95. 3. Nagu sellest nähtub, on gasotroni anood-



Joon. 95. 3. Gasotroni I_A-U_A-tunnusjoone osa kuni tõukeionisatsiooni ilmnemiseni.



Joon. 95. 4. Gasotroni I_A-U_A-tunnusjoon: *a* — küttepinge nimiväärtuse puhul, *b* — nimiväärtusest väiksema küttepinge puhul.

vool kuni 11 V anoodpinge puhul väga nõrk. See vool koosneb ainult katoodilt emiteerivate ja elavhõbedaauru molekulidega elastselt kokkupõrkavate ning nende vahelt anoodile liikuvate elektronide voost. Umbes 11-voldilise pinge juures tekib tõukeionisatsioon ja voolu tugevus suureneb järsult. Ühtlasi ilmneb ka valgusenähtus (§ 12). Selle tunnusjoone ülesvõtmisel mõõtmise teel peab vooluringil olema suur takistus (1000 ... 2000 Ω), et piirata voolu tugevuse liigset suurenemist.

Joonisel 95. 4 on toodud gasotroni I_A-U_A-tunnusjoon küttepinge nimiväärtuse (*a*) ja nimiväärtusest madalama küttepinge puhul (*b*). Ka nende tunnusjoonte ülesvõtmisel

peab vooluring sisaldama lisatakistit (8 ... 10 Ω). Gasotroni elektroodidevahelise pinge alanemine on põhjustatud: 1) elektroodidevahelises ruumis oleva elektrivälja kuju muutumisest suure arvu positiivsete ioonide tekkimise tõttu (§ 91) ja 2) astmeliselt toimuvast ioniseerumisest (§ 12).

Pärast gasotroni nn. „süttimislävе" ületamist punkti *A* juures kulgeb tunnusjoon peaaegu rööbiti I_A-teljega. Järelikult ei sõltu gasotronis esinev (9 ... 12-voldiline) pingelang voolu tugevusest. Gasotronis on katoodilähine pingelang 6 ... 8 V, pingelang plasmas 2 ... 3 V ja anoodi pinnal —3 kuni +4 V (see pingelang on väikese voolutugevuse korral negatiivne, s. o. sel puhul esineb tegelikult pinge tõus).

Ioonide aeglase liikumise tõttu on nende poolt moodustatud voolu tugevus väike (umbes 0,25% gasotroni läbivast koguvoolust). Nende peamine mõju gasotronis seisab selles, et nad neutraliseerivad katoodilt anoodile liikuvate elektronide poolt moodustatava negatiivse ruumlaengu, soodustades nõnda nende elektronide liikumist.

Joonisel 95. 4 toodud tunnusjoonest on kasutatav ainult osa nullist kuni punktini *C*. Sellest punktist alates ilmneb juba katoodi termoemissioonvoolu küllastus, mille tagajärjel pingelang gasotronis suureneb ja edasine emissioonvoolu tugevnemine toimuks vaid katoodi pommitamise tõttu positiivsete ioonidega (§ 17 ja 91), mistõttu häviks katoodi emiteeriv kiht (§ 29). Voolu punktis *C* nimetatakse lubatavaks maksimaalseks anoodvooluks $I_{A\,max}$. Nagu jooniselt näha, on allaköetud katoodi puhul $I_{A\,max}$ tunduvalt nõrgem.

Anoodvoolu kõrval on gasotroni teiseks parameetriks lubatav maksimaalne vastupinge, s. o. maksimaalne pinge, mida suudab taluda gasotron, ilma et ta laseks voolu läbi vastupidises suunas. Tema väärtus sõltub teataval määral ka vastupidise pinge tekkimise kiirusest. Pärast voolu ühes suunas lõppemist ei kao positiivsed ioonid gasotroni

elektroodidevahelisest ruumist hetkeliselt, vaid nende ühinemine seal leiduvate elektronidega ja nende muutumine selle tagajärjel elektriliselt neutraalseiks molekulideks nõuab teatavat aega. Vastupidise pinge kiire tõusmise puhul võivad nende ioonide kiirused tõusta niivõrd suureks, et nad oma löökidega anoodi pihta (mis nüüd on tegelikult katoodiks) panevad selle emiteerima. Tabelis 95. 1 antud vastupinge lubatavate väärtuste puhul on silmas peetud 50 Hz sagedusega vahelduvpinge muutumise kiirust.

Lubatava vastupinge väärtus sõltub gasotronis oleva elavhõbedaauru rõhust. Mida kõrgem on auru rõhk, seda madalam on lubatav vastupinge. Elavhõbedaauru rõhk sõltub peamiselt gasotroni alumise osa temperatuurist. Et hoida temperatuuri seal teataval kõrgusel ja seega elavhõbedaauru rõhku teataval tasemel, tehakse gasotroni alumine osa suhteliselt pikk ja eraldatakse ta katoodist sellekohase varjega. Gasotroni alumise osa temperatuur on tavaliselt 50 ... 60° C, mille juures elavhõbedaauru rõhk on 10^{-2} ... 10^{-3} torri. Madalaim temperatuur, mille juures gasotron võib veel hakata töötama, on 15° C. Gasotroni süttimisläve võib suurendada ka kesta seintel tekkiv elektrilaeng.

Gasotrone kasutatakse peamiselt raadiosaateseadmete ja traathäälinguseadmete toitevoolu-alaldajates.

Valmistatakse ka gasotrone, mis pole täidetud elavhõbedaauruga, vaid mingi inertgaasiga, näiteks argooniga. Niisuguste gasotronide katood on valmistatud molübdeenist ja teda kuumutatakse kõrgema temperatuurini kui vaakum-gasotronide katoode. Argoon-gasotronides on argoongaasi rõhk mõni torr, mis on suhteliselt kõrge rõhk ja võimaldab katoodi kuumutamist kõrgema temperatuurini, ilma et ta kiirelt auruks. Kõrge gaasirõhu tõttu on argoon-gasotronides lubatav vastupinge madal, missugune asjaolu teeb nad sobivaks akude laadimisel, telegraafi- ja telefoniseadmete toitevoolu-alaldajais jne. Argoon-gasotronide positiivseiks külgedeks on:

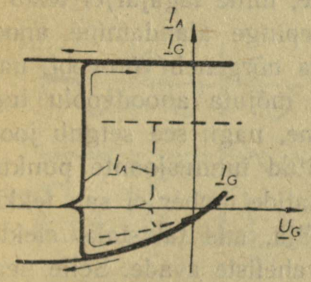
Tabel 95.1.

Gasotronide tehnilised andmed.

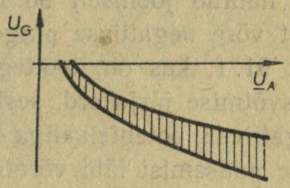
Tüüp		Küttepinge U_{efF} V	Küttevool I_{efF} A	Lubatav maksimaalne vastupinge $U_{v\,max}$ V	Maksimaalne anoodvool $I_{A\,max}$ A	Alaldatud vool I_A A	Eelküütmise aeg töötamisel min.	Eelküütmise aeg pärast pikemaajalist kasutamata seismist h	Pingelang gasotronis U V	Iga t h
	ВГ-126	5	35 ... 45	12 000	40	15	10	2	10	800
ВГ9	ВГ-129	2,5	8 ... 10	5 000	1,5	0,6	3	1,25	15	1 500
	ВГ-130	2,5	20 ... 25	7 000	4	1,3	3	3	10	600
	ВГ-131	5	27 ... 33	10 000	10	3,5	5	2	10	600
ВГ1	ВГ-161	2,5	6	2 500	1	0,35	3	1,25	14	1 500
ВГ3	ВГ-163	5	32	15 000	50	16	30	2	18	3 000
	ВГ-167	5	50	1 000	100	35	20	2	10	800
ВГ4	ВГ-176	2,5	11 ... 12	150	9	6	0,5	0,5	14	1 000
	ВГ-222	2,5	38	300	30	10	1	1	15	1 000
ВГ6	ВГ-236	2,5	20	7 000	4	1,3	5	1	16	2 000
ВГ7	ВГ-237	5	22	10 000	10	3,5	5	1,5	16	2 000
	ВГ-251	2,5	11	150	9	6	0,5	0,01	14	1 000
	ВГ-252	2,5	6	2 500	1	0,3	3	0,8	14	1 200

1) talitlustingimuste sõltumatus ümbruskonna temperatuurist ja 2) lühike eelsoojendamise aeg enne anoodpinge lülitamist, mis tuleb sellest, et gaasi rõhk ei sõltu ioontoru temperatuurist ja enne anoodpinge lülitamist on vaja teatud aega ainult katoodi kuumutamiseks talitlustemperatuurini.

§ 96. Tiratron. Tiratronideks nimetatakse ioontorusid, milledes peale anoodi ja kuumutatava katoodi on veel üks või



Joon. 96. 1. Tiratroni I_A-U_G- ja I_G-U_G-tunnusjooned. Kriipsjoontega kujutatud tunnusjooned on üles võetud madalama anoodpinge puhul.



Joon. 96. 2. Tiratroni süütepiirkond.

mitu võret. Katoodi ja anoodi materjal on neil sama mis gasotronidelgi. Kest täidetakse kas elavhõbedaauruga või mingi inertgaasiga. Tiratroni võre ümbritseb katoodi täielikult, sest väikese pingelangu tõttu ioontorus liiguvad elektronid seal katoodilt anoodile mitte ainult kõige lühemat teed kaudu nagu vaakumiga elektrontorudes, vaid kõikjalt, kust nad aga leiavad tõkestamata läbipääsu.

Joonisel 96. 1 on toodud tiratroni I_A-U_G- ja I_G-U_G-tunnusjooned. Tunnusjoonte ülesvõtmist on alustatud võrele rakendatud kõrge negatiivse eelpinge puhul, alandades seda pidevalt. Kõrge negatiivse võrepinge puhul läbib võret vähe elektrone ja nende kiirus on väike, mistõttu ei teki tõukeionisatsiooni ning I_A on nõrk — tugevnedes aeglaselt nega-

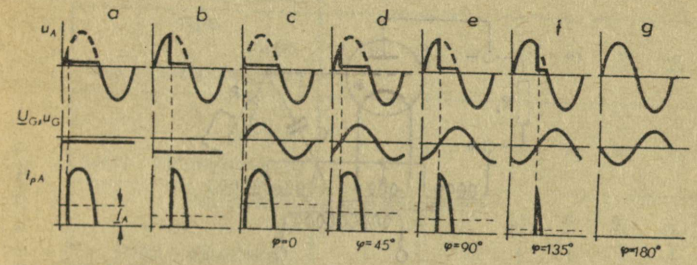
tiivse võrepinge alanedes. Teatava $-U_G$ väärtuse puhul ilmneb tõukeionisatsioon ja I_A tugevneb järsku kuni tugevuseni, mille väärtuse määrab anoodi välisvooluringis sisalduva takisti takistus (§ 95). Tõukeionisatsiooni ilmnedes väheneb tiratronis esinev pingelang leeklahendusele omase pingelangu väärtuseni, mis on 16 ... 20 volti. Pärast tõukeionisatsiooni ilmnemist (süttimist) tekkivaist positiivseist ioonidest langeb osa negatiivsele võrele, mille tagajärjel tekib ka võrevool. Edasine negatiivse võrepinge alandamine anoodvoolu tugevust ei mõjuta, küll aga nõrgeneb võrevool, nagu see nähtub jooniselt 96. 1. Ka ei mõjuta anoodvoolu tugevust võre negatiivse pinge tõstmine, nagu see selgub jooniselt 91. 1, kus on nooltega märgitud tunnusjoonte punktide ülesvõtmise järjekord, sest võretraatide ümber ei saa tekkida negatiivse potentsiaaliga elektrivälja, mis takistaks elektronide pääsemist läbi võretraatide vaheliste avade. Selle negatiivse elektrivälja neutraliseerib võretraatidele lähenevate positiivsete ioonide poolt põhjustatav positiivne elektriväli. Tiratroni läbiva voolu katkestamiseks on vaja, et anoodi ja katoodi vaheline pinge muutuks hetkeks nulliks. Selle hetke kestus peab aga olema küllaldane (mõnikümmend kuni mõnisada mikrosekundit), et tiratroni kestas sisalduvad ioonid ja elektronid jõuaksid taas ühineda elavhõbedaauru või gaasi elektriliselt neutraalseiks molekulideks.

Tiratroni võrepinge väärtus, mille juures tekib süttimine, sõltub anoodpingest ja gaasi rõhust, see aga omakorda sõltub gaasi temperatuurist. Et see temperatuur on teatavais piirides muutlik, siis antakse ka anoodpingetele vastavad süütepinged teatavais piirides, nimetades seda piirkonda *süütepiirkonnaks*. Joonisel 96. 2 on kujutatud anoodpingetele vastavad võrepinged, millede juures toimub süttimine. Nende kõverate ülesvõtmiseks on alandatud võre negatiivset pinget kuni süttimise tekkimiseni gaasi (tiratroni töötamisolukorras esineva) kahe äärmise temperatuuri puhul.

Mõõtmistel saadud kahe kõvera vaheline pind on viirutatud.

Tiratrone kasutatakse suunajatena alaldajates ja väikese inertsiga releedena mitmesugustes lülitustes.

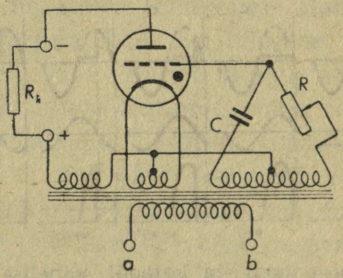
Nende kasutamine alaldajas võimaldab alaldajast saadava alalispinge muutmist suurtes piirides. Selleks tuleb muuta võrele kantava negatiivse pinge väärtust. Joonisel 96.3 *a* on



Joon. 96.3. Tiratroni anoodi ja katoodi vahelise pinge u_A muutus ja tiratroni läbiva ühesuunalise voolu pulsi i_{pA} kuju muutus vahelduvvoolu ühe perioodi vältel ning selle pulsi keskmine väärtus I_A mitmesuguse võrepinge väärtuse ja iseloomu puhul: *a* — $U_G \approx 0$, *b* — $U_G < 0$, *c* — anoodpinge u_A ja vahelduv võrepinge u_G on faasis ($\varphi = 0$), *d* ... *g* — võrepinge on anoodpinge suhtes nihutatud teatava nurga φ võrra.

toodüd tiratroni anoodi ja katoodi vahelise pinge muutus ja tiratroni läbiva ühesuunalise voolu pulsi kuju vahelduvvoolu ühe perioodi vältel, kui võre negatiivne pinge on madal. Joonisel 96.3 *b* on toodud samad suurused, kuid sel juhul on võrele rakendatud negatiivse väärtusega kõrgem alalispinge. Ühesuunalise alaldatud voolu keskväärtus on tähistatud joonisel tähisega I_A. Võrepinge muutmise teel on võimalik muuta alaldatud voolu tugevust (ja ka pinget), alates maksimaalsest väärtusest vähenemise suunas kuni poole väärtuseni. Võre alalispinge muutmisega pole võimalik saavutada suuremat reguleerimisulatust. Rakendades aga võrele konstantse amplituudiga vahelduvpinget ja muutes selle faasi

anoodi ja katoodi vahelise vahelduvpinge suhtes, on võimalik alaldamisel saadava voolu tugevust reguleerida täisväärtusest kuni nullini. Selleks tuleb võrele kantavat vahelduvpinget nihutada faasis nurga võrra $\varphi = 0$ kuni $\varphi = 180^0$. Vastavad u_A, u_G ja i_{pA} väärtuste muutused on näidatud joonisel 96.3 *c* ... *g*. Joonisel on lihtsustuse mõttes süttimishetkeks loetud hetk, mil võrepinge on null.



Joon. 96.4. Faasis muudetava vahelduva võrepingega tiratron-alaldaja skeem: *R* — reguleeritav takisti faasinihke reguleerimiseks, *C* — kondensaator, R_k — ühesuunalise voolu tarbija, *a* ja *b* — alaldatava vahelduvvoolu ühendusklemmid.

Joonisel 96.4 on toodud faasis muudetava vahelduva võrepingega tiratron-alaldaja skeem. Nagu jooniselt näha, toimub võrepinge faasis nihutamine tiratroni võreringi ühendatud *R*-*C*-silla õlaks oleva takisti *R* väärtuse muutmisega.

Ülemäära kõrge anoodpinge puhul võib tiratronis võre ja anoodi vahel tekkida leek.

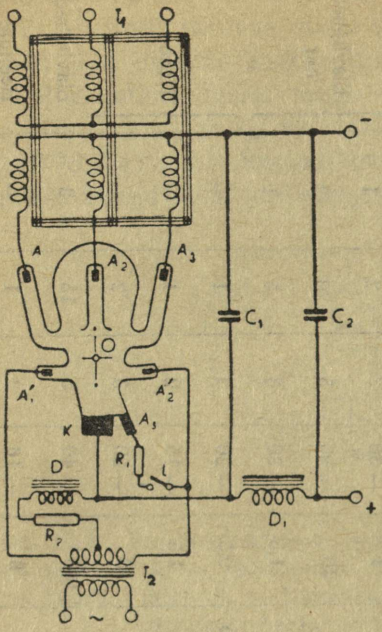
Valmistatakse ka varivõrega varustatud tiratrone. Need töötavad kõrgema anoodpingega. Varivõrepinge sobiva valikuga saab tiratroni süütepinget soovi kohaselt muuta.

Tabelis 96.1 on toodud tiratronide omadusi iseloomustavad tehnilised andmed. Elavhõbedaaur-täidisega tiratronides on pingelang mitte üle 18 V ja neoontäidisega tiratronides kuni 30 V.

Tabel 96.1.

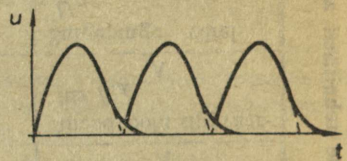
Tiratronide tehnilised andmed.

	Tüüp	Küttepinge $U_{e/F}$ V	Küttevool $I_{e/F}$ A	Anoodi ja katoodi vahelise pinge lubatav maksimaalne amplituud $U_{A\,max}$ V	Anoodvoolu keskväärtus I_A A	Anoodvoolu tippväärtus I_{pA} A	Sulgepinge võrel U_G V	Süütepiirkonna laius ΔU_G V	Eelkütmise aeg töötamisel min.	Eelkütmise aeg pärast pikemaajalist kasutamata seismist h	Täidis
	ТГ-160	2,5	5	1 000	0,35	1	— 30	2	2	1	Elavhõbeda aur
	ТГ-162	5,0	40	3 000	13	40	— 80	5	20	2	
	ТГ-205	2,5	9	1 000	0,5	1,5	— 30	3	5	1	
PT4	ТГ-212	3,0	2,3	300	0,125	0,5	— 20	2	1	—	Neoon
PT2	ТГ-213	2,5	10	500	0,5	1,5	— 15	2	1	—	
	ТГ-215	5,0	28	500	3,5	10	— 20	3	2	—	
	ТГ-229	5,0	42	3 000	30	100	— 40	5	15	2	Elavhõbeda aur
PT3	ТГ-235	5,0	12,5	700	1,5	6	— 16	2	1	—	Heelium



Joon. 97. 1. Kolmefaasine poolperiood-alaldaja elavhõbedaaur-suunajaga: K — katood, A_1, A_2 ja A_3 — talitlusanoodid, A_1' ja A_2' — abianoodid leegi säilitamiseks sõltumatult koormast, A_s — süüteanood, D — leegi kustumist vältiv paispool, R_1 ja R_2 — voolutugevust piiravad takistid, O — suunaja kolvi pöördumise telg, L — lüliti alaldaja käivitamiseks, D_1 — voolu silumisfiltri paispool, C_1 ja C_2 — silumisfiltri kondensaatorid.

§ 97. Elavhõbedaaur-suunaja. Elavhõbedaaur-suunajal on kas klaasist või metallist kest, milles asetsevad katoodi moodustav elavhõbe ja grafiidist või rauast anoodid. Kolmefaasise poolperiood-alaldaja jaoks ehitatud klaaskestaga elavhõbedaaur-suunaja koos alaldaja skeemiga on toodud joonisel 97. 1. Metallkestaga elavhõbedaaur-suunajad on varustatud



Joon. 97. 2. Paispooli toime leeki säilitavate elektroodide vooluringis.

vaakumpumpadega, millede abil alaldaja töötamisel hoitakse vaakum püsivana.

Elavhõbedaaur-suunaja toimib järgmiselt. Kui kallutada joonisel 97. 1 kujutatud kolbi paremale, pöörates teda ümber telje O, valgub katoodi K moodustav elavhõbe paremale ja ühineb s ü ü t e a n o o d i A_s moodustava elavhõbedasambaga. Lüliti L suletud, tekib vooluring: K, A_s, R_1, L, trafo

T_2 sekundaarmähise parem pool, R_2, D, K. Kolvi uuesti püstasendisse tõstmisel ilmneb elektroodide K ja A_s vahel leeklahendus, mille tagajärjel tekib elavhõbedaaur, mis täidab kolvi. Leeki alalhoidvate elektronide allikaks on helendav katoodtähn, millel on väga väike pind, milles aga voolutihedus ulatub kuni 1900 A/cm². Katoodtähni temperatuur on umbes 200° C, katoodi moodustava elavhõbeda muu massi temperatuur aga on piirides 60 ... 100° C, sõltuvalt jahtumistingimustest. Lüliti L lahutamisel ilmneb leeklahendus ühes suunas katoodi K ja abianoodi A_1' või katoodi K ja abianoodi A_2' vahel (§ 91). Nende anoodide ja katoodi vahelise leeklahenduse ülesandeks on aurustada pidevalt nii palju elavhõbedat, et elavhõbedaauru rõhk kolvis ei langeks jahedatel kolvipindadel püsivalt elavhõbedatilkadeks kondenseeruva auru tõttu. Selle leeklahenduse teiseks ülesandeks on säilitada katoodilähises ruumis gaaslahendusplasmat.

Katoodi K vooluringis sisalduva paispooli D ülesandeks on hoida omainduktsiooni elektromotoorse jõu mõjul katoodi ja anoodi vahelist leeki alal hetkedel, mil transformaatori T_2 sekundaarmähise pinge on null (joon. 97. 2). Takistid R_1 ja R_2 on voolu tugevuse piiramiseks. Alaldaja pingetransformaatoriks on T_1 ja talitlusanoodideks A_1, A_2 ja A_3. Ületab alaldajast võetava voolu tugevus teatavat minimaalset väärtust (umbes 3 A), siis võib pärast alaldaja käivitamist trafo T_2 lahutada, sest elavhõbeda aurustamiseks ja gaaslahendusplasma säilitamiseks jätkub katoodi ja anoodide A_1, A_2 ning A_3 vahelisest leegist.

Elavhõbedaauru rõhk suunaja kolvis on keskmiselt 10 torri. Pingelang elavhõbedaaur-suunajas on keskmiselt 25 V ega sõltu märgatavalt kolbi läbiva voolu tugevusest. Võrreldes teiste alaldajatega on elavhõbedaaur-alaldaja kasutegur hea, suure võimsusega alaldajate puhul kuni 99%. Vastusuunaline vool läbi kolvi on vaid mõni milliamper. Selle moodustavad negatiivset potentsiaali kandvale anoodile langevad

positiivsed ioonid. Anoodi kõrge negatiivse pinge puhul võib vastusuunaline vool põhjustada vastusuunalise süttimise ehk nn. *vastusüüte* tekkimist. Vastusüüdet soodustavad anoodidele valgunud elavhõbeda tilgad, mis võivad hakata emiteerima neile langevate positiivsete ioonide tõttu (§ 17). Vastusuunaline leek kandub kahe anoodi vahele, mistõttu lühistub transformaatori mähis. Vastusuunaliseks süttimiseks vajaliku pinge — *vastusüütepinge* — tõstmiseks asetatakse anoodid pikkade ja peenikeste *klaasist sarvede* sisse (joon. 97. 1), mistõttu nõrgeneb vastusuunaline vool ja kaob kiiremini ioone ning elektrone sisaldav plasma (positiivsed ioonid ühinevad negatiivsete elektronidega, moodustades elektriliselt neutraalsed molekulid).

Elavhõbedaaur-suunaja kolvi ülemist osa moodustava ööne ülesandeks on säilitada elavhõbedaauru rõhk enamvähem ühtlasena. Mida suuremaks tõuseb elavhõbedaauru tihedus, seda rohkem kondenseerub teda ajaühikus kolvi jahedale pinnale, kust ta langeb tilkadena katoodile tagasi.

Elavhõbedaaur-alaldajaid kasutatakse peamiselt tugevvoolutehnikas tehnilise vahelduvvoolu alaldamiseks, missuguse vooluga siis toidetakse elektritramme ja elektrironge, laaditakse akumulaatoreid jne.

Valmistatakse ka elavhõbedaaur-suunajaid, millede kest on täidetud *argoongaasi ja elavhõbedaauru seguga*. Nende katoodiks on elavhõbe, millele on *lisandatud leelismetalli*. Niisugustes suunajates on pingelang umbes 15 V ja minimaalne voolu tugevus, mille juures leeklahendus veel püsib — 0,2 ... 0,3 A. Nende vastusüütepinge on aga madal. Valmistatakse neid kuni 250 V vahelduvvoolu alaldamiseks.

Reguleeritava pinge saamiseks alaldajast valmistatakse ka *võrega varustatud elavhõbedaaur-suunajaid* (vrd. § 96).

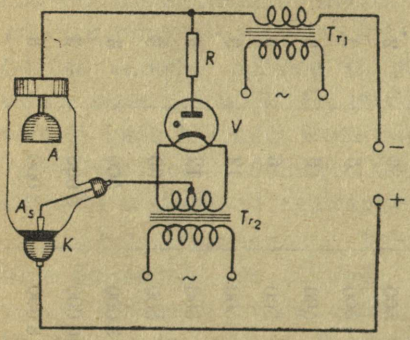
Tabel 97.1.

Elavhõbedaaur-suunajate tehnilised andmed.

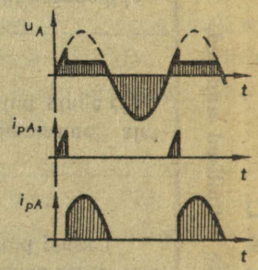
Tüüp	Katoodi maksimaalne koormusvool $I_{K\,max}$ A	Katoodi minimaalne koormusvool I_{min} A	Ablanoodide vool A	Maksimaalne alaldatud pinge $U_{A\,max}$ V	Minimaalne alaldatud pinge $U_{A\,min}$ V	Talitlusanoodide arv n_1 tk.	Ablanoodide arv n_2 tk.	Iga t h
2 B 6	6	3,5	—	250	4	2	—	1 000
2 B 12	12	4	—	500	6	2	—	1 000
2 BH 12	12	0,6	4...7	500	6	2	2	1 000
3 B 12	12	4	—	500	6	3	—	1 000
3 BH 12	12	0,6	4...7	500	6	3	2	1 000
3 BH 30	30	1,5	5...7	500	12	3	2	1 000
3 BH 100	100	5	7...8	500	12	3	2	800
3 BH 1-500	1	0,05	4...7	500	100	3	2	800
3 BH 4-3000	4	0,2	6...7	3 000	500	3	2	800
3 BH 6-15000	6	0,3	6...7	10 000	3 000	3	2	800
3 BH 15-8000	15	0,8	7...8	8 000	3 000	3	2	800

Tabelis 97. 1 on toodud mõningate elavhõbedaaur-suunajate tehnilised andmed. Tüübitähises esimesel kohal olev arv näitab talitlusanoodide arvu (mitte arvestades süüteanoodi ja leeki säilitavaid abianoode).

§ 98. Ignitron. Ignitron koosneb kestast, milles asetsevad katoodi moodustav elavhõbe K, grafiidist anood A ja



Joon. 98. 1. Alaldaja lülitus ignitron-suunajaga: A — ignitroni anood, K — katood, A_s — süütaja, T_{r1} — alaldaja pingetrafo, V — gasotron ignitroni süütaja vooluga varustamiseks, T_{r2} — gasotroni küttetrafo, R — süütevoolu tugevust piirav takisti.



Joon. 98. 2. Pinge- ja vooluköverate kuju ignitroni vooluringides: u_A — pinge ignitroni anoodi ja katoodi vahel alaldaja lühise puhul, i_{pA_s} — vool süütaja vooluringis, i_{pA} — ignitroni läbiv vool.

süüteelektrood — süüteanood ehk süütaja A_s (joon. 98. 1). Süütaja valmistatakse suurt elektrilist takistust omavast ja elavhõbedaga mittemärguvast materjalist. Tavaliselt kasutatakse selleks karborundumit. Kooniline süütaja asetseb katoodi moodustava elavhõbeda kohal nõnda, et tema ots ulatub 3 . . . 5 mm sügavuselt elavhõbedasse.

Karborundumist süütaja ei märgu elavhõbedaga ja seetõttu jääb nende pindade vahele väga kitsas pilu. Süütajale katoodi suhtes 60 . . . 80 V positiivse pinge andmisel tekib sel-

les pilus niivõrd suur elektrivälja tugevus ($10^5 \ldots 10^6$ V/cm), et see on küllaldane juba tavalise temperatuuri juures põhjustama elektronide emissiooni elavhõbeda pinnast (§ 16). Selle tõttu ilmnev elektronide liikumine läheb kuumuse ja elavhõbedaauru tekkides leeklahenduseks üle (§ 91). Et leeklahenduse puhul leegis esinev pingelang on väike, võrreldes karborundumist süütajas esineva pingelanguga, siis kandub leegi positiivne ots süütaja ülemisele otsale ja kui samal ajal ka anood kannab positiivset potentsiaali — siis ka anoodile. Pingelang ignitronis on väike (10 ... 15 V), selle tõttu on pärast anoodi ja katoodi vahelise leegi tekkimist vool süütaja vooluringis nõrk.

Et leek tekiks vaid siis, kui anood kannab positiivset potentsiaali, selleks ühendatakse anoodi ja süütaja vahele mingi suunaja, näiteks gasotron või tiratron (joon. 98. 1). Niisuguse lülituse puhul tekib leek ja vool ignitronis anoodile rakendatud pinge positiivse poolperioodi algul, kui süütaja vooluringis on vool tugevnenud leegi tekitamiseks küllaldase väärtuseni (2 ... 3 A), ja kestab selle poolperioodi lõpuni, mil anoodi ja katoodi vaheline pinge muutub nulliks (joon. 98. 2). Järgnevate positiivsete poolperioodide vältel kordub sama nähtus.

Kasutades süütaja vooluringis tiratroni, on võimalik muuta ignitroni sisaldava alaldaja poolt antavat pinget nullist kuni täisväärtuseni, nagu see oli näidatud joonisel 96. 3.

Ignitronis on vastusuunaline (positiivsete ioonide poolt tekitatav) vool nõrk, mis võimaldab anoodi asetada katoodi lähedale ja seega saavutada väiksemaid kolvi välismõõteid kui on elavhõbedaaur-suunajal. Anoodi ja katoodi väiksema vahekauguse tõttu on ka ignitronis esinev pingelang elavhõbedaaur-suunajas esinevast pingelangust väiksem.

Tugevamate (üle 100 A) voolude jaoks kasutatavad ignitronid valmistatakse metallkestaga ja vesijahutatava katoodiga.

Ignitronid taluvad lühiaegseid, nimiväärtust mitmekümnekordselt ületavaid voolutõukeid, seetõttu on nad eriti otstarbekad kasutamiseks keevitusseadmete toitealaldajates.

Tabelis 98. 1 on toodud mõnede ignitronide tehnilised andmed.

Tabel 98. 1.

Ignitronide tehnilised andmed.

Tüüp	Alaldamisel saadava pulsi amplituud I_{pA} A	Alaldamisel saadava voolu keskväärtus I_A A	Hetkeks esinev maksimaalselt lubatav vool $I_{pA\,max}$ A	Maksimaalne vastupinge $U_{v\,max}$ V	Süütevoolu		Süütepinge tippväärtus U_{As} V
					Hetkväärtus i_{pAs} A	Keskväärtus I_{kAs} A	
И-234	40	15	1 000	1 000	3	1,2	80
И-228	150	50	1 000	1 000	3	1,2	80
И-233	200	75	5 000	1 000	3	1,2	80
И-30-3000	80	30	—	3 000	3	1,2	80

Seitsmes osa.

FOTOELEKTRILISED JA ELEKTRON-OPTILISED SEADISED.

XVII peatükk.

Fotoelektrilised seadised.

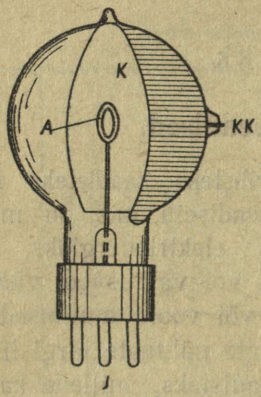
§ 99. Üldpõhimõtted. Fotoelektrilisteks seadisteks nimetatakse niisuguseid elektrovaakumseadiseid, mis on määratud valgusenergia muundamiseks elektrienergiaks, s. o. seadiseid, milledes valgustugevuse või valgusvoo väärtuse muutudes tekivad elektrilise pinge või voolu muutused.

Fotoelektrilistes seadistes esinevate nähtuste järgi liigitatakse neid: 1) välis-fotoefektiga seadisteks, millede katoodi pind emiteerib elektrone valguse mõjul (ruum-fotorakud ja fotokordistajad), 2) sise-fotoefektiga seadisteks, millede elektriline juhtivus muutub valguse mõjul (tahked fotorakud), 3) sise-fotoefektiga seadisteks, milledes valguse mõjul ilmneb elektromotoorne jõud (fotoelemendid).

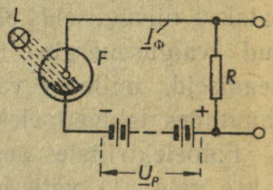
Fotoelektrilisi seadiseid kasutatakse paljudes tehnika ja teaduse harudes. Nii kasutatakse neid näiteks sidetehnikas fototelegraafi- ja kaugnägemisseadmetes, nähtamatu valgusega (infrapunasega) sidepidamisseadmetes, signalisatsioonitehnikas mitmesugusteks signalisatsiooni otstarveteks, helifilmiseadmetes, automaatikas ja telemehaanikas, valgustustehnilistes mõõteriistades jne.

§ 100. Ruum-fotorakk. Välis-fotoefektiga fotorakud ehk *ruum-fotorakud* koosnevad klaaskestast, milles asetsevad *fotokatood* ja anood. Fotokatood on valmistatud niisugusest materjalist, mille väline pind emiteerib elektrone

valguse mõjul (§ 18). Fotokatoodide valmistamiseks kasutatakse leelis- või leelismuldmetalle, millede väljumistöö (§ 14) on väike. Kõige enam kasutatakse selleks tseesiumi. Ruum-fotoraku anood valmistatakse kas üksiku varva, sõela või rõnga kujulisena ja paigutatakse suurepinnalise katoodi



Joon. 100. 1. Ruum-fotorakk: *A* — anood, *K* — katood, *I* — anoodi kontaktjalg, *KK* — katoodi kestaklemm.



Joon. 100. 2. Ruum-fotoraku vooluringi skeem: *F* — fotorakk, *L* — valgusallikas, *R* — kooremtakisti, U_p — vooluallika pinge, I_Φ — fotorakku läbiv vool.

ette. Valmistatakse õhutühje (vaakum-) ja gaastäidisega fotorakkusid. Vaakum-fotorakkudes liiguvad katoodist valguse mõjul emiteerunud elektronid läbi õhutühja ruumi anoodile. Gaastäidisega fotorakkudes ehk gaasfotorakkudes toimub elektronide liikumine läbi elektroodidevahelise ruumi sõltuva gaaslahendusena (§ 91), kusjuures läbi elektroodidevahelise ruumi kulgeva voolu tugevus sõltub valguse mõjul katoodist ajaühikus väljuvate elektronide arvust. Nendes fotorakkudes on gaasi rõhk tavaliselt 10^{-2} torri.

Joonisel 100. 1 on kujutatud ruum-fotorakk, mille kesta sisepind on kaetud tseesiumhapendit (-oksüüdi) ning sellel ühe molekuli paksust tseesiumikihti kandva hõbedaga. See aatomi-paksune tseesiumikiht emiteerib valguse mõjul elektrone ja moodustabki seadise fotokatoodi.

Sagedasti kasutatakse ka antimoni ja tseesiumi ühendist ($SbCs_3$) valmistatud katoode, millede pind on kaetud ühe molekuli paksuse tseesiumikihiga. See antimoni ja tseesiumi ühend omab suurt elektrilist takistust ja on punasele valgusele läbipaistev. Ta kantakse kas vahetult fotoraku klaaskesta sisepinnale või, katoodi elektrilise takistuse vähendamiseks, kesta sisepinda katvale hõbedakihile.

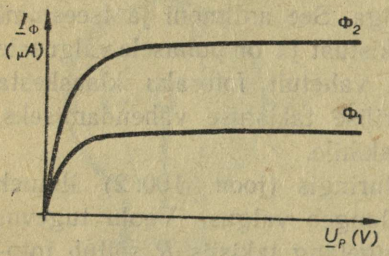
Fotorakku sisaldavas vooluringis (joon. 100. 2) ilmneb vool, kui fotoraku katoodile langeb valgus. Voolu tugevus vooluringis I_Φ ja seega ka pingelang takistis R sõltub fotokatoodile langeva valgusvoo Φ väärtusest (mis on mõõdetav luumenites [Lm]) ja vooluringis sisalduva vooluallika pingest U_P.

Fotoraku omaduste üheks põhiliseks iseloomustajaks on tema I_Φ-U_P-tunnusjoon, s. o. fotorakku läbiva voolu tugevuse sõltuvus vooluringis sisalduva vooluallika pingest konstantse valgusvoo puhul $I_\Phi = f(U_P)$, $\Phi = \text{konst}$. Joonisel 100. 3 on toodud vaakum-fotoraku I_Φ-U_P-tunnusjooned kahe erineva valgusvoo puhul, kusjuures $\Phi_2 > \Phi_1$. Nagu jooniselt näha, saavutab vool I_Φ oma maksimaalse ehk küllastusväärtuse ruumlaengu mõju tõttu (§ 37) alles teatud kõrgusega pinge U_P puhul. K ü l l a s t u s v o o l u t u g e v u s sõltub valgusvoost: mida suurem on valgusvoog, seda tugevam on küllastusvool.

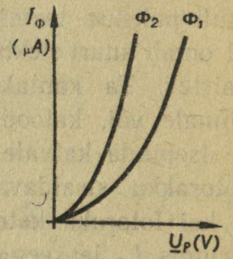
Gaastäidisega fotoraku I_Φ-U_P-tunnusjooned on toodud joonisel 100. 4. Nende tunnusjoonte juures küllastusvoolu mõju pole märgatav. Patarei pinge tõustes tugevneb sõltuv vool (§ 91) kuni tõukeionisatsiooni ilmnemiseni, millal algab juba sõltumatu vool. Viimane oleks isetugev-

nev ja võiks purustada fotoraku. Seepärast tuleb fotoraku tööpinge tõukeionisatsiooni esilekutsuvast pingest madalam hoida.

Teiseks ruum-fotoraku iseloomustavaks tunnusjooneks on ta I_Φ-Φ-tunnusjoon, mis kujutab fotorakku läbiva voolu tugevuse I_Φ sõltuvust tema katoodile langeva valgusvoo



Joon. 100. 3. Vaakum-fotoraku I_Φ-U_P-tunnusjooned kahesuguse valgusvoo Φ_1 ja Φ_2 puhul, kusjuures $\Phi_2 > \Phi_1$.



Joon. 100. 4. Gaastäidisega fotoraku I_Φ-U_P-tunnusjooned kahesuguse valgusvoo puhul, kusjuures $\Phi_2 > \Phi_1$.

väärtusest, kui ergutuspinge on küllastuspingest kõrgem ja konstantne: $I_\Phi = f(\Phi)$, $U_P =$ konst. Selle tunnusjoone kuju (joon. 100. 5) on ligikaudu sirgjooneline:

$$I_\Phi = k\Phi,$$

kus I_Φ on fotorakku läbiv vool [μA],

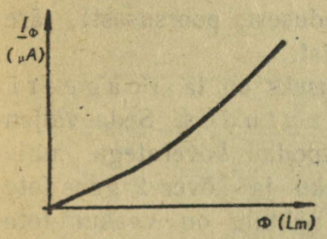
Φ — fotokatoodile langeva valgusvoo väärtus luumenites [Lm] ja

k — fotorakku iseloomustav tegur.

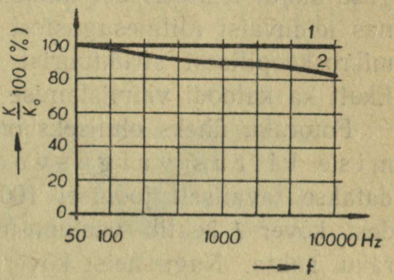
Tegurit k nimetatakse sageli fotoraku viljakuseks. See väljendab fotorakus ühe-luumenilise valgusvoo mõjul tekkiva voolu mikroamprites avaldatud tugevust:

$$k = \frac{I_\Phi}{\Phi} \quad \frac{\mu A}{Lm}.$$

Näiteks on hõbedast alusel tseesiumhapendi-kihil asuva tseesiumkatoodiga vaakum-fotoraku viljakus 20 . . . 60 μA/Lm ja sama katoodiga gaas-fotoraku viljakus 150 . . . 200 μA/Lm. Antimon-tseesiumkatoodiga vaakum-fotoraku viljakus on 80 . . . 170 μA/Lm.



Joon. 100. 5. Ruum-fotoraku I_Φ-Φ-tunnusjoon konstantse U_p puhul.



Joon. 100. 6. Fotoraku viljakuse k muutus protsentides viljakusest k_0 konstantse valgusvoo puhul, sõltuvalt valgusvoo perioodilise muutumise sagedusest f: *1* — vaakum-fotorakul, *2* — gaastäidisega fotorakul.

Fotoraku viljakus sõltub temale langeva valguse lainepikkusest λ. Joonisel 18. 1 olid toodud fotokatoodide valmistamiseks kasutatavate mitmesuguste ainete emissioonvoolu tugevused konstantse kiirgusintensiivsuse juures, sõltuvalt kiirguse lainepikkusest (sagedusest). Nagu nähtub jooniselt, asub mitmete ainete emissioonvoolu maksimum väljaspool silmale nähtavate kiirguste piirkonda. Eespool toodud fotorakkude viljakused on antud valguse kohta, mis sisaldab võrdselt kõiki sagedusi. Tehnikas kasutatavate valgusallikate valguse koostis on aga väga mitmekesine. Nii näiteks sisaldab madalal temperatuuril töötava hõõgniidiga hõõglambi valgus peamiselt pikki laineid, milledest suurem osa on silmale nähtamatud (infrapunased); elektri-leek-

lambi valgus sisaldab lühema lainepikkusega (sinise värvusega) kiirgust jne. Järelikult tuleb fotorakust suurima viljakuse saavutamiseks kohandada valgusallikas fotorakuga või ümberpöördult — fotorakk valgusallikaga.

Fotoraku I_Φ-λ-tunnusjoone kuju sõltub mitte ainult valguse mõjul emiteerivast katoodi ainest, vaid ka katoodi pinnas leiduvaist mitmesugustest kõrvalistest ainetest ja pinna mikroskoopilisest struktuurist (siledusest, poorsusest), järelikult ka katoodi valmistamise viisist.

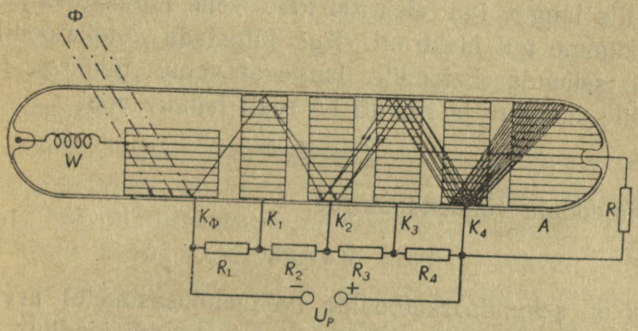
Fotoraku üheks oluliseks omaduseks on ta reageerimise kiirus valgusvoo muutudes. Seda väljendatakse tavaliselt joonisel 100.6 toodud kõveratega, milledest kõver *1* kehtib vaakum-fotoraku ja kõver *2* gaas-fotoraku kohta. Nagu neist kõveraist nähtub, on vaakum-fotoraku reageerimise kiirus tunduvalt suurem kui gaas-fotoraku oma. Gaas-fotoraku viljakuse vähenemine valgusvoo väärtuse muutuste korral on tingitud ioonide tekkimise viivitusest fotoraku elektroodidevahelises ruumis.

Eriti suure valgusvoo puhul võib märgata fotoraku viljakuse ajutist vähenemist. Kui aga fotorakku hoida teatud aeg pimedas, taastub ta endine viljakus. See väsimuseks nimetatav nähtus on põhjustatud sellest, et molekuli-paksuses tseesiumikihis sisalduvaist molekulidest kaotab suurem osa molekule emissiooni tõttu oma elektrone rohkem, kui jõuab difundeeruda juurde uusi molekule aine sisemusest pinnale. Katoodi olles valgustamata taastub ta endine koostis.

Töös aga väheneb aja jooksul fotokatoodi emiteerimisvõime jäävalt. See vähenemine määrab katoodi ea.

§ 101. Fotokordistaja. Fotokordistajad koosnevad ühisesse klaaskesta paigutatud välis-fotoefektiga vaakum-fotorakust ja sekundaaremissiooni nähtuse kasutamisel põhjenevast sekundaaremiteerivast võimendajast ehk elektron-

kordistajast. Et fotoraku vool on väga nõrk (mõned mikroamprid), siis kasutatakse tehniliseks rakendamiseks küllaldaste voolude saavutamiseks mitmeastmelisi elektronkordistajaid. Joonisel 101.1 on kujutatud Timofejevi poolt koostatud nelja-astmelist elektronkordistajat ja fotorakku sisaldav fotokordistaja.



Joon. 101.1. Timofejevi nelja-astmelise fotokordistaja ehitusviis: $K_Φ$ — fotokatood, K_1, K_2, K_3 ja K_4 — sekundaarkatoodid, A — anood, R — kooremtakisti, U_p — pingeallikas, R_1, R_2, R_3 ja R_4 — pingejagaja takistid, W — piki telge asetseva traadi pingutusvedru. Punkt-kriipsjoontega on märgitud valgusvoog ja täisjoontega — elektronide tee.

See koosneb õhutühjast klaastorust, mille sisepinnal on tseesiumiga aktiveeritud hõbedast rõngad. Neist elektroodidest toimib $K_Φ$ fotokatoodina, millele langeb valgusvoog $Φ$. Temast valguse mõjul väljunud elektronid liiguvad positiivset pinget kandvale sekundaarkatoodile K_1. Sellest sekundaaremissiooni mõjul eraldunud elektronid liiguvad katoodi suhtes kõrgema positiivse pingega sekundaarkatoodile K_2 jne., kuni katoodist sekundaaremissiooni tõttu väljunud elektronid satuvad anoodile A. Kõik katoodid ja anood on läbi klaasi väljuvate ühendusjuhtmete abil ühendatud pingeallikaga. Joonisel on kujutatud punktkriips-joontega valgusvoog ja täisjoontega

fotokatoodist väljunud ühe elektroni tee, samuti ka sekundaarelektronide teed, eeldades, et iga primaarelektron lööb sekundaarkatoodist välja kaks sekundaarelektroni. Niisuguseid elektronkordistajaid valmistatakse kuni 12-astmelisi. Tseesiumiga aktiveeritud katoodi puhul on sekundaaremissiooni tegur σ tavaliselt 6...10, mis tähendab seda, et katoodile langev iga elektron lööb selle pinnast välja kuus kuni kümme uut elektroni. Kui tähistada fotokatoodilt esimesele sekundaarkatoodile kulgevat voolu tähisega I_K, on anoodile suunduv ja samuti ka sealt lahkuv vool

$$I_A = I_K \sigma^n$$

ja võimendaja võimendustegur

$$V = \sigma^n,$$

kus n on sekundaarkatoodide (võimendusastmete) arv,

I_K — fotokatoodilt esimesele sekundaarkatoodile kulgev vool,

I_A — anoodile suunduv ja kooremtakistit R läbiv vool.

Teoreetiliselt peaks $n = 10...12$ ja $\sigma = 6...10$ puhul võimendustegur olema väga suur ($6^{10}...10^{12}$), praktiliselt on ta aga tunduvalt väiksem, sest mitte kõik fotokatoodist või sekundaarkatoodist väljunud elektronid ei lange naabruses asuvale sekundaarkatoodile. Osa neist liigub otse anoodile, osa aga langeb kaugemal asuvaile katoodidele, jättes mõned sekundaarkatoodid (võimendusastmed) vahele. Elektrivälja, mis sunnib elektrone liikuma täisjoontega märgitud teedele ligilähedasi teid pidi, tekitavad üksikute elektroodide vahelised pinged ja piki toru telge asetatud ning anoodiga elektriliselt ühendatud traadi ja teiste elektroodide vaheline pinge. Nii mõjub näiteks fotokatoodist väljunud elektronile kahe elektrivälja poolt tekitatud resulteeriv väli järgmiselt: naaberkatoodi poolt tekitatav elektriväli annab talle piki toru anoodi poole suunatud kiirenduse, aga

toru teljes oleva, positiivset pinget omava traadi ja fotokatoodi vaheline pinge annab talle toru telje suhtes risti suunatud kiirenduse. Nende kahe elektrivälja poolt tekitatud resulteeriv väli sunnibki elektrone liikuma joonisel 101. 1 täisjoontega märgitud teedele ligilähedasi teid pidi.

Võrreldes fotorakuga on fotokordistaja viljakus tunduvalt suurem. Näiteks on 10 ... 12-astmelist elektronkordistajat sisaldava fotokordistaja viljakus 6 ... 8 A/Lm ja anoodvool mõni milliamper (tavalisel fotorakul aga vaid mõnikümmend mikroamprit).

Fotokordistajaid kasutatakse peamiselt releeseadmetes. Nende puuduseks on ühelt poolt suur sisekahina-nivoo, mis on tingitud mitmekordsest sekundaaremissioonist, ja teiselt poolt kõrge anoodpinge vajadus. Kõrvuti asuvate elektroodide pinged on umbes 200 V, mistõttu näiteks 10-astmeline kordistaja vajab pingeallikat pingega ligikaudu 2000 V.

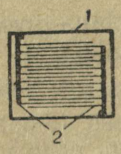
Peale ülalkirjeldatu kasutatakse veel Kubetski, Vekšini ja Zvorõkini tunduvalt erinevate konstruktsioonidega elektronkordistajaid.

Fotokordistajate tehnilised andmed on tavaliselt järgmised:

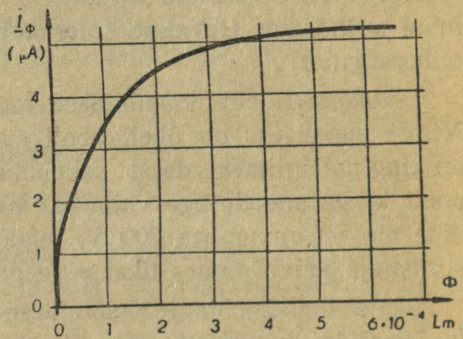
Ühe katoodi sekundaaremissiooni tegur $\sigma = 2 \ldots 5$.
Kordistaja võimendustegur $V = 10^6 \ldots 10^8$.
Fotokordistaja viljakus on 1 ... 10 A/Lm.
Anoodpinge $U_A = 600 \ldots 2000$ V.
Anoodvool $I_A = 10 \ldots 30$ mA.

§ 102. Tahke fotorakk. Mõningates pooljuhtides ja isolaatorites vabanevad valguse mõjul mõned elektronid molekulide mõjupiirkonnast, muutudes poolvabadeks elektronideks (§ 13). Nende molekulide vahelises ruumis vabalt liikuda võivate poolvabade elektronide tõttu suureneb pooljuhi või isolaatori elektriline juhtivus. Seda nähtust nimetatakse aine sise-fotoefektiks, sest siin jäävad vabanenud elektro-

nid aine sisse, vastandina välis-fotoefekti mõjul ainet ümbritsevasse ruumi suunduvaile vabanenud elektronidele ruum-fotorakkudes. Suurimat sise-fotoefekti omavaiks pooljuhtideks on seleen ja talliumsulfiid (Tl_2S), mistõttu neid aineid kasutatakse sise-fotoefektiga fotorakkude, nn. fototakistite ehk tahkete fotorakkude valmistamiseks.



Joon. 102. 1. Seleen- ja tallium-fotoraku alusplaat: *1* — klaasplaat, *2* — klaasile elektrolüütilisel teel kantud kuld- või plaatinaribad.



Joon. 102. 2. Tallium-fotoraku I_Φ-Φ-tunnusjoon konstantse vooluallikapinge puhul.

Seleenil ja talliumsulfiidil on suur elektriline takistus ja seepärast on vaja, et elektrijuhtide vahel asuva valgustatava seleeni või talliumsulfiidi kihi ristlõige oleks võimalikult suur. Seda on võimalik saavutada näiteks järgmiselt. Klaasplaat kaetakse vahakihiga. Vahakihi sisse lõigatakse kitsad süvendid, nii nagu on näidatud joonisel 102. 1. Nüüd kantakse klaasile elektrolüütilisel teel kulda või plaatinat. Pärast vaha kõrvaldamist jäävad klaasile joonisel kujutatud kullast või plaatinast ribad, millede vahed täidetakse seleeni või talliumsulfiidi õhukese kihiga. Säärane fotorakk asetatakse õhutühja klaaskesta, kaitseks atmosfääriliste mõjude eest.

Seleen-fotoraku takistus pimedas on 0,2 ... 0,4 MΩ. Valguse mõjul väheneb see 3 ... 5-kordselt. Tallium-fotoraku takistus pimedas on mitu megaoomi; tema I_Φ-Φ-tunnusjoon on toodud joonisel 102. 2. Nagu jooniselt näha, pole ta tunnusjoon sirge. Väikese valgusvoo puhul on tallium-fotoraku viljakus suur: $10^3 \ldots 10^4$ μA/Lm. Mida suurem on valgusvoog, seda väiksemaks jääb aga fotoraku viljakus.

Ligikaudu samasuguse kujuga on ka seleen-fotoraku I_Φ-Φ-tunnusjoon. Väikese valgusvoo puhul on ta viljakus 800 ... 1000 μA/Lm, suure valgusvoo puhul aga 150 ... 200 μA/Lm.

Tallium-fotoraku viljakus on suurim infrapunase valguse puhul, seetõttu kasutatakse teda peamiselt nähtamatu infrapunase valgusega töötavais seadmeis.

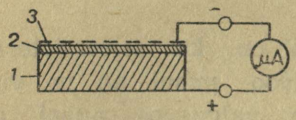
Ülalkirjeldatud fotorakkude puuduseks on inerts, s. o. nende takistuse vähenemine valgusvoo suurenedes ja vastupidi ei toimu viivituseta.

§ 103. Fotoelement. Fotoelemendid koosnevad elektrijuhist ja pooljuhist, millede kokkupuutepinna valgustamisel vabaneb pooljuhist elektrone. Need elektronid liiguvad elektrijuhile, tekitades seega nende vahel elektromotoorse jõu. Elektrijuhi ja pooljuhi ühendamisel välisvooluringi kaudu tekib selles vooluringis vool, mille tugevus sõltub nende kokkupuutepinnale langeva valgusvoo väärtusest.

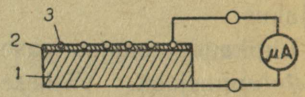
Fotoelementide koostamiseks kasutatakse tavaliselt järgmisi pooljuhte: vaskoksüduuli (Cu_2O), seleeni ja talliumsulfiiti (Tl_2S).

Elektrijuhi ja pooljuhi puutepinnale valguse suunamise viisi poolest eristatakse eestvalgustatavaid ja tagantvalgustatavaid fotoelemente. Joonisel 103. 1 on toodud eestvalgustatava fotoelemendi koostis. Sellel fotoelemendil on pooljuhi *2* peale sadestatud läbipaistvalt-õhuke metalli (näit. kulla) kiht *3*, mis toimib elektrijuhina. Pool-

juhi ja läbipaistvalt-õhukese metallikihi kokkupuutepinda valgustatakse metallikihti läbiva valgusega. Selle toimel pooljuhist vabanenud elektronid liiguvad metallile, laadides selle negatiivselt. Fotoelemendi aluse *1* materjaliks kasutatakse vaskoksüduul-fotoelemendi puhul vaske ja seleen-fotoelemendi puhul rauda.



Joon. 103. 1. Eestvalgustatav fotoelement: *1* — alus, *2* — pooljuht, *3* — läbipaistvalt õhuke metallikihit — elektrijuht.



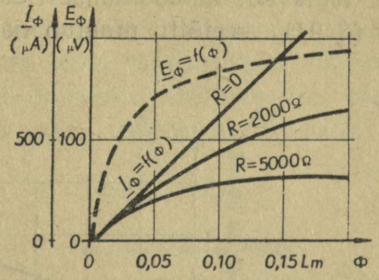
Joon. 103. 2. Tagantvalgustatav fotoelement: *1* — elektrijuht — alus, *2* — läbipaistvalt õhuke pooljuhi kiht, *3* — traatvõrk väljejuhtme ühendamiseks pooljuhiga.

Tagantvalgustatava vaskoksüduul-fotoelemendi koostis on näidatud joonisel 103. 2. Vasest alusele *1* on kantud läbipaistvalt-õhuke vaskoksüduuli kiht *2*. Nende kokkupuutepinna valgustamisel tekib nende vahel potentsiaalide vahe. Vaskoksüduuli külge väljejuhtme ühendamiseks on ta kihi pealispinnasse pressitud peenikestest traatidest võrk *3*.

Eestvalgustatavate fotoelementide viljakused on ligikaudu järgmised: vaskoksüduul-fotoelemendil 100 ... 200 μA/Lm, seleen-fotoelemendil 400 ... 500 μA/Lm ja talliumsulfiid-fotoelemendil umbes 100 μA/Lm. Tagantvalgustatava talliumsulfiid-fotoelemendi viljakus on 4000 ... 6000 μA/Lm.

Joonisel 103. 3 on toodud talliumsulfiid-fotoelemendi I_Φ-Φ-tunnusjooned lühise puhul ja välisvooluringi mitmesuguse takistuse juures. Samal joonisel on kujutatud ka fotoelemendi elektromotoorse jõu sõltuvus valgusvoo väärtusest $E_\Phi = f(\Phi)$.

Fotoelementide paremuseks, võrreldes fotorakkudega, on see, et nad ei vaja vooluallikat ja omavad suhteliselt suurt viljakust. Puuduseks aga on suur sisemahtuvus ja viljakuse sõltuvus fotoelemendi temperatuurist.



Joon. 103. 3. Talliumsulfiid-fotoelemendi tunnusjooned. Kriipsjoonega kujutatud E_Φ-Φ-tunnusjoon on üles võetud katkestatud välis-vooluringi puhul, täisjoontega kujutatud I_Φ-Φ-tunnusjooned kolmesuguse takistusega välis-vooluringi puhul.

XVIII peatükk.

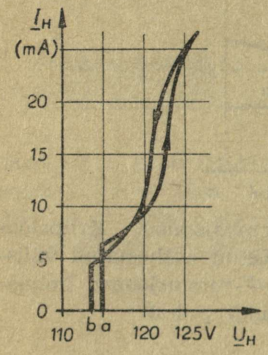
Elektron-optilised seadised.

§ 104. Huumlamp. Kahte elektroodi sisaldavaid ja hõreda inertgaasiga täidetud klaasanumaid või -torusid, mis voolu läbimisel annavad valgust, nimetatakse huumlampideks. Eri gaasid annavad eri värvusega valgust, näiteks: heelium — sinist, neoon — punast, argoon — lillat, elavhõbedaaur — rohekassinist jne. Tavaliselt kasutatakse kesta täidisgaasina neooni, sest selle värvusega valgus on silmale kõige paremini nähtav.

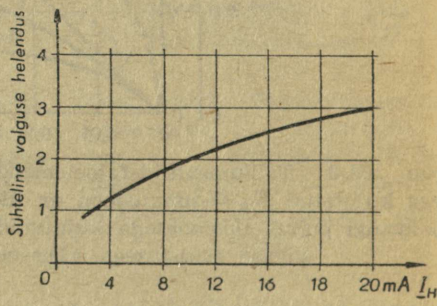
Huumlampe kasutatakse illuminatsioonseadmetes, signaalseadmetes, reklaamseadmetes, indikaatorina mõõteriistades, fototelegraafiseadmetes, kaugnägemisseadmetes jne. Vastavalt huumlambi kasutuse otstarbele antakse ta elekt-

roodidele ja kestale sellekohane sobiv kuju. Võrreldes teiste lampidega seisab huumlambi peamine erinevus selles, et ta helendub ja pimendub pinge tekkides ja kadudes peaaegu inertsita.

Huumlambid töötavad katoodilähise ebanormaal-pingelangu seisundis (§ 91), seetõttu muutub neid läbiva voolu



Joon. 104. 1. Huumlambi I_H-U_H-tunnusjoooned. *a* — süttimispinge, *b* — kustumispinge.



Joon. 104. 2. Valguse heleduse sõltuvus huumlampi läbiva voolu tugevusest.

tugevus ja ka nende poolt kiiratud valgusvoog lambi klemmide vahelise pinge muutudes. Huumlambi MTH-1 tunnusjoon $I_H = f(U_H)$ on toodud joonisel 104. 1. Nagu sellelt näha, helendub lamp pinge *a* juures, pimendub aga sellest tunduvalt madalama pinge *b* puhul (§ 12).

Et huumlambis huumlahendus ei läheks pärast helendumist üle leeklahenduseks, selleks varustatakse huumlamp elektroodidega järjestikku ühendatud eeltakistiga. Lambi helendamisel selles takistis tekkiva pingelangu mõjul alaneb elektroodidevaheline pinge 120 . . . 125 voldile. Muud tüüpi huumlampidel võivad need väärtused olla ka teistsugused, sõltuvalt huumlambi materjalist ja konstruktsioonist.

Huumlambi toitepinget tõstes ja seda alandades ülesvõetavad tunnusjooned teineteisele ei lange (joon. 104. 1). Seda nähtust nimetatakse huumlambi hüstereesiks.

Huumlambi poolt antav valgusvoog sõltub teda läbiva voolu tugevusest. Huumlambil MTH-1 iseloomustab seda seost joonisel 104. 2 toodud kõver. Kasutades lampi fototelegraafiseadmeis, seatakse tema talitluspunkti lähteasend alalispinge abil selle kõvera ligikaudu sirgjoonelise osa keskele. Selle huumlambi poolt antav valgusvoog on 0,02 ... 0,04 Lm.

Tabel 104. 1.

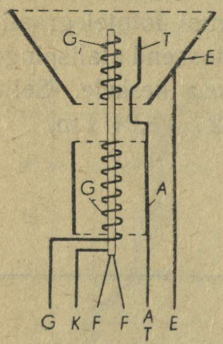
Huumlampide tüüpe.

Tüüp	Süütepinge V	Vool mA	Keskmine iga h	
HT-2	170 ... 180	18 ... 30	500	Kettaga kaugnägemisseadmeile
MH-3	48 ... 65	≤ 1	300	Signaallamp
BMH-1	≤ 160	≤ 2	—	Lainemõõtja indikaator
ПН-2	≤ 115	1	600	Signaallamp
CH-1	150	14,5	1 000	Signaallamp 220 V võrgupingele
CH-2	82	24,5	1 000	Signaallamp 120 V võrgupingele
ФН	≤ 140	≤ 1	100	Fototelegraafiseadmeile

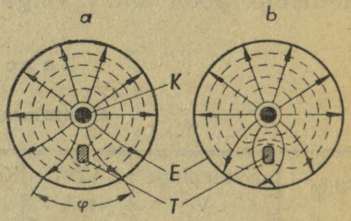
Tähtede tähendused on järgmised: B — lainemõõtjale, M — väikesemõõteline, H — neooniga, П — kilbile monteeritav, C — signaallamp, T — kaugnägemisseadmeile, Ф — faasilamp. Arv tähendab tüübi väljalaske järjekorranumbrit.

§ 105. Elektronindikaator. Elektronindikaator ehk maagiline silm koosneb: *E* — koonilisest ekraanist, mille sisepind on kaetud fluorestseeriva ainega, *K* — ekraani keskel asuvast katoodist, G_i — vii-

mast ümbritsevast ja sellega elektriliselt ühendatud indikaatori võrest, *T* — katoodi kõrval asuvast metallvarvast — nn. tüürelektroodist ja samas kestas sisalduvast ning indikaatorsüsteemi ja elektroodide



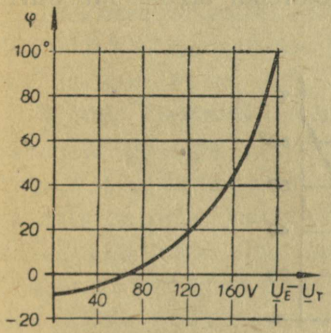
Joon. 105. 1. Elektronindikaatori koostis: *E* — ekraan, *K* — elektronindikaator-süsteemi ja trioodsüsteemi ühine katood, *A* ja *G* — trioodsüsteemi anood ja võre, *F* — küttenniit, G_i — elektronindikaatori võre, *T* — tüürelektrood.



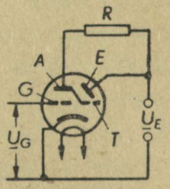
Joon. 105. 2. Elektronindikaatori katoodi ümbritseva elektrivälja nivoopinnad (kriipsjooned) ja elektronide teekonnad katoodilt *K* ekraanile *E* (nooltega varustatud pidevad jooned), kui tüürelektrood *T* kannab tema asukohas oleva elektrivälja potentsiaalist madalamat (*a*) või kõrgemat (*b*) potentsiaali. φ — elektrone mitte sisaldavat ala (tumedat, varjutatud sektorit) piirav nurk.

hoidja vahele paigutatud trioodsüsteemist *K*, *G*, *A*, mille anood on ühendatud tüürelektroodiga (joon. 105. 1). Katoodi potentsiaali kandva indikaatori võre ülesandeks on piirata katoodi emissioonvoolu tugevust. Kui ekraan on ühendatud toitepinge allika plussklemmiga, katood sama allika miinusklemmiga, langevad kuumast katoodist emiteerunud elektronid ekraanile, pannes selle fluorestseeriva ainega kaetud pinna rohekalt helendama. Kui tüürelektrood kannab tema asukohas oleva elektrivälja potentsiaaliga võrdset potentsiaali,

siis ei mõjuta tüürelektrood katoodilt radiaalselt anoodile lendavate elektronide liikumisteid. Kannab aga tüürelektrood tema asukohas oleva elektrivälja potentsiaalist madalamat või kõrgemat potentsiaali, siis muudab ta katoodi ja ekraani vahelise elektrivälja kuju ja seega ka elektronide lii-



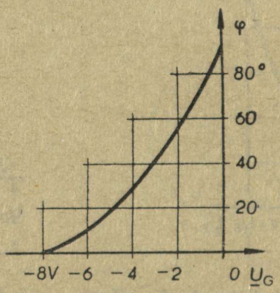
Joon. 105. 3. Elektronindikaatori 6E5 tunnusjoon $\varphi = f(U_E - U_T)$. Negatiivne nurk tähendab kahelt poolt tüürelektroodi saabuvate elektronidega täidetud sektori nurka (joon. 105. 2b). Horisontaalteljele on kantud ekraani ja tüürelektroodi vaheline pinge $U_E - U_T$.



Joon. 105. 4. Elektronindikaatori 6E5 skeem: U_G — võrele kantav kontrollitav pinge, mille väärtusest sõltub varjutatud sektorit piirava nurga φ väärtus, R — takisti, mille takistusest sõltub $U_E - U_T$ ja trioodsüsteemi anood-pinge, E — ekraan, T — tüürelektrood, A — trioodsüsteemi anood, G — trioodsüsteemi võre.

kumise teekondi. Joonisel 105. 2*a* on kujutatud kriipsjoontega elektrivälja nivoopinnad (ekvipotentsiaalpinnad), kui tüürelektrood kannab tema asukohas oleva elektrivälja potentsiaalist madalamat potentsiaali. Niisugusel juhul ei kujuta tüürelektroodi lähedalt möödalendavate elektronide teekonnad enam sirgjooni, vaid painduvad tüürelektroodist eemale (§ 11); selle tagajärjel tekib ekraanil tüürelektroodi taga piirkond, kuhu elektronid ei lange ja mis seetõttu jääb tumedaks. Seda elektrone mittesisaldavat ala piirav nurk on

joonisel tähistatud tähega φ. Kannab aga tüürelektrood tema asukohas oleva elektrivälja potentsiaalist kõrgemat potentsiaali, s. o. kui tema potentsiaali väärtus läheneb rohkemal määral ekraani potentsiaali väärtusele, siis painduvad elektronide teed vastupidises suunas (joon. 105. 2 *b*) ja selle tagajärjel helendub ekraanil tüürelektroodi tagune pind intensiivsemalt.



Joon. 105. 5. Elektronindikaatori talitlus-tunnusjoon, kui $U_E = 200$ V ja $R = 2$ MΩ. U_G — trioodsüsteemi võrele kantav kontrollitav pinge.

Elektronindikaatori tunnusjooneks on kõver, mis näitab tumedat varjutatud sektorit piirava nurga φ väärtuse sõltuvust ekraani ja tüürelektroodi potentsiaalide vahe väärtusest $U_E - U_T$. Joonisel 105. 3 on toodud elektronindikaatori 6E5 tunnusjoon $\varphi = f(U_E - U_T)$.

Joonisel 105. 4 on kujutatud elektronindikaatori lülitus ja joonisel 105. 5 on toodud tema talitlus-tunnusjoon. Nagu nähtub sellest tunnusjoonest, sõltub ekraanil tekkiva tumeda sektori laius võrepingest U_G. Et trioodi võrega ühendatakse kontrollitava pinge miinuspoolus, siis võrevool puudub. Elektronindikaator on kasutatav alalispinge indikaatorina. Nõnda rakendatuna kasutatakse neid raadiovastuvõtjais häälestusindikaatoreina ja mõõteriistades lugemiindikaatoreina.

Takisti R takistuse ja ekraani pinge U_E kõrguse valikuga on võimalik valida kontrollitava pinge U_G ulatust, s. o. missuguses astmikus esinevaid pinge muutusi elektronindikaator näitab.

Mõnikord paigutatakse elektronindikaatori ühisanumasse peale trioodsüsteemi veel dioodsüsteem.

Elektronindikaatori 6E5 tehnilised andmed on järgmised: $U_{ef} = 6{,}3$ V, $I_{ef} = 0{,}3$ A, $U_E = 250$ V, $I_E = 0{,}25$ mA, U_G väärtus, kui $\varphi = 0^0$, on — 8 V, $C_{GE} = 3{,}5$ pF.

§ 106. Elektronkiiretorud. Elektronkiiretoru õhutühja või hõredalt gaasiga täidetud klaaskesta ühes otsas asuvast katoodist väljunud elektronid koondatakse peenikeseks joaks ja antakse neile teatud liikumiskiirus, mille mõjul nad lendavad piki toru ning langevad selle teises otsas olevale fluorestseerivast ainest ekraanile, tekitades sellele helendava valgustähni. Oma teekonnal läbib see elektronide juga elektrivälja või magnetvälja, mille mõjul ta oma esialgsest liikumise suunast kõrvale kaldub (§ 9 ja 10); koos sellega muudab oma asendit ka helendav tähn ekraanil. Elektronide joa kõrvalekaldumise ulatus ehk hälve ja kõrvalekaldumise (hälbimise) ajaline muutus sõltuvad elektronide juga kallutavat elektrivälja tekitava pinge kõrgusest või magnetvälja tekitava voolu tugevusest ning nende ajalise muutuse iseloomust.

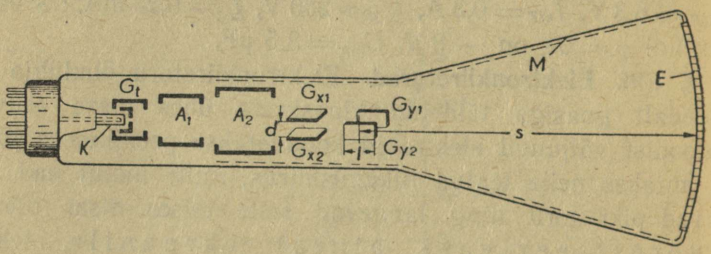
Seda elektronide joa kõrvalekallutamist rakendatakse väga mitmesugustes seadmetes elektriliste protsesside nähtavaks muutmiseks ja selleks kasutataksegi elektronkiiretorusid, mida vahel nimetatakse ka katoodkiiretorudeks.

Elektronkiiretorusid võib liigitada kas nende koostise ja töötamisviisi või nende kasutusotstarbe järgi.

Koostisest ja töötamisviisist lähtudes võiks liigituse aluseks olla: 1) elektronide joa kallutamise viis, 2) katoodist väljuvate elektronide väikese läbimõõduga joaks koondamise

ja selle joa fokuseerimise viis, 3) väikese läbimõõduga juga moodustavate ja katoodilt ekraanile lendavate elektronide joa tiheduse tüürimise viis, 4) ekraani toime.

Elektronide joa kallutamiseks elektrivälja abil paigutatakse elektronkiiretorusse kaks kallutusplaadipaari G_{x1}, G_{x2} ja G_{y1}, G_{y2} (joonisel 106. 1). Nende plaadi-

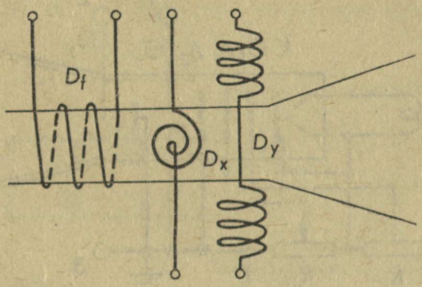


Joon. 106. 1. Elektronkiiretoru koostis: K — katood, G_t — tüürelektrood ehk sageli ka võreks nimetatav Wehnelt'i silinder, A_1 — esimene anood, A_2 — teine anood, G_{x1} ja G_{x2} — kallutusplaadi-paar elektronide joa kallutamiseks x-tasapinnas, G_{y1} ja G_{y2} — kallutusplaadi-paar elektronide joa kallutamiseks eelmisega risti olevas y-tasapinnas, M — grafiidi kiht, E — ekraan, d — kallutusplaatide vahekaugus, s — kallutusplaadi-paari kaugus ekraanist.

paaride vahele rakendataksegi jälgitavad pinged. Plaatidevahelise pinge muutudes muutub ka nendevahelise elektrivälja tihedus ja elektronide joa kaldenurk ehk hälve (§ 9). Kuna elektronide mass on väike, toimub hälbe muutumine peaaegu üheaegselt väljatiheduse muutumisega. Kallutusplaadi-paarid on paigutatud teineteise suhtes risti, mistõttu neist ühe paari vaheline elektriväli kallutab elektronide juga horisontaalses, teine — vertikaalses sihis. Ekraanilt nähtavat elektronide joa hälbe ulatust väljendatakse millimeetrites plaatidevahelise pinge ühe voldi kohta.

Elektronide joa kallutamiseks magnetvälja abil paigutatakse kallutavaid magnetvälju tekitavad kallutuspoo-

lid D_x ja D_y (joon. 106. 2) väljapoole elektronkiiretoru nii, et nende poolt tekitatavad magnetväljad asetuksid teineteise suhtes risti. Poole läbiva voolu tugevusest sõltub magnetvälja tihedus, mida peab läbima elektronide juga, ja seega sõltub sellest ka joa kaldenurga ehk hälbe väärtus.

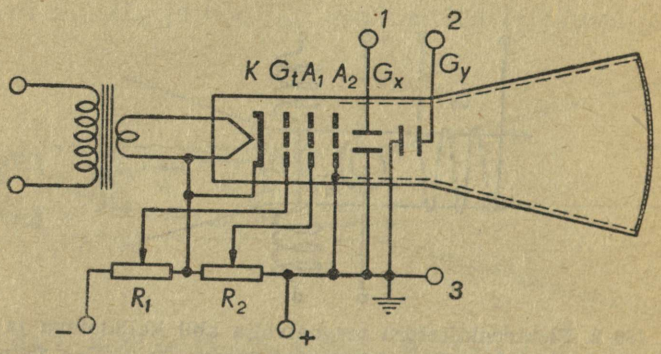


Joon. 106. 2. Elektronkiiretoru magnetvälja abil kallutatava ja magnetvälja abil fokuseeritava elektronide joaga: D_f — joa fokuseerimise mähis, D_x — mähis joa kallutamiseks x-tasapinnas, D_y — mähis joa kallutamiseks eelmisega risti olevas y-tasapinnas.

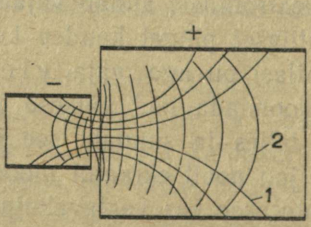
Katoodist K väljuvaile ja võret (Wehnelt'i[1] silindrit) G_t läbivaile elektronidele annab vajaliku kiiruse katoodi suhtes kõrget positiivset pinget kandev teine anood A_2 (joon. 106. 3). Ühtlasi on aga vaja elektrone fokuseerida, s. o. koondada nad väikese läbimõõduga elektronide joaks toru teljes ja suunata see juga ekraanile nii, et oleks muudetav joa poolt ekraanil moodustuva tähni läbimõõt. Selleks kasutatakse kas vastavakujulise elektrivälja või vastavakujulise magnetvälja toimet või gaastäidisega elektronkiiretorudes positiivsete ioonide toimet. Joonistel 106. 1 ja 106. 3 kujutatud elektronkiiretorudes on fokuseerimiseks kasutatud elektrivälja toimet. Seks otstarbeks vajalik elektriväli tekitatakse esimese ja teise anoodi

[1] Loe: veenelti.

vahel ning esimese anoodi ja Wehnelt'i silindri vahel, milleks esimesele anoodile A_1 antakse katoodi suhtes positiivne pinge, mis on teisele anoodile A_2 antavast positiivsest pingest madalam. Kahe erinevat pinget kandva



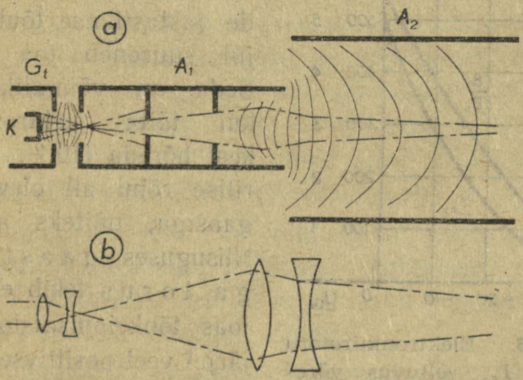
Joon. 106. 3. Elektronkiiretoru skeem: R_1 — potentsiomeeter valgustähni heleduse reguleerimiseks, R_2 — potentsiomeeter valgustähni läbimõõdu reguleerimiseks (fokuseerimiseks), *1*—*3* ja *2*—*3* — klemmid kallutusplaadi-paaride ühendamiseks välis-vooluringiga.



Joon. 106. 4. Erinevaid pingeid kandvate silindrite sees tekkiva elektrivälja jõujoonte (*1*) ja nivoopindade (*2*) kuju.

silindri sees tekkiva elektrivälja pilt on toodud joonisel 106. 4. Siin on kujutatud ainult see osa elektriväljast, mis koondab elektrone toru teljele ja suunab neid joana anoodi kaudu ekraanile. Joonisel 106. 5 *a* on kriipspunkt-joontega kujutatud

elektronide liikumisteed niisuguses elektriväljas. Joonisel 106. 5 *b* on kujutatud optikas kasutatav ja samasugusel kujul valguskiiri koondav klaasläätsede süsteem. Nagu jooniselt näha, ei koonda selline elektriväli elektrone kogu nende teekonna ulatusel peenikeseks joaks, võimaldab aga nende koondamist nii, et fookuses oleks joa läbimõõt küllal-

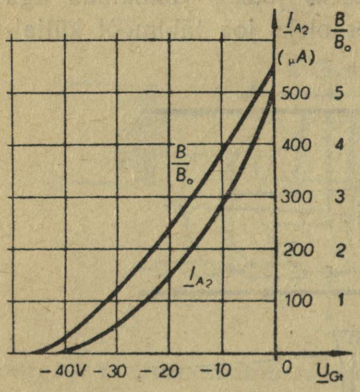


Joon. 106. 5. Elektronide juga koondav elektrostaatiliste läätsede süsteem (*a*) ja võrdluseks näidatud, valguskiirgusele samasugust toimet avaldavad optilised läätsed (*b*). Joonisel tähendavad: K — katood, G — võre, A_1 — esimene anood, A_2 — teine anood.

daselt väike ja et fookus asuks ekraanil. Fookuse kaugust on võimalik muuta esimesele anoodile rakendatud pinge kõrguse muutmisega (potentsiomeetriga R_2 joonisel 106. 3).

M a g n e t v ä l j a a b i l fokuseeritavais elektronkiiretorudes tekitatakse anoodis olevat väikest ava läbivate elektronide joa fokuseerimiseks ja joa läbimõõdu väikesena hoidmiseks vajalik magnetväli elektronkiiretorule asetatud pooli D_f abil (joon. 106. 2). Pooli magnetiline telg peab ühtima elektronide joa liikumise teljega ja tema ergutamiseks kasutatakse alalisvoolu. Nagu selgus § 10, ei avalda magnetväli mingit mõju tema jõujoontega rööbiti liikuvate elektronide

liikumisele. Kui aga elektronidel peale jõujoonte sihiga ühtiva liikumissihi on veel joa teljega risti olev liikumissiht, siis moodustavad nende liikumisteed väheneva raadiusega keermekujulised jooned ja on fookusesse koondatavad.



Joon. 106. 6. Elektronkiiretoru anoodvoolu I_{A2} sõltuvus võrepingest U_{G1} ja valgustähni suhteline heledus $\frac{B}{B_0}$ sõltuvalt samast pingest.

Väikese läbimõõduga juga moodustavad elektronid asuvad üksteise lähedal ja nende vastastikuse tõukejõu mõjul suureneb joa läbimõõt. Seda on võimalik vältida, kui täita elektronkiiretoru kest hõreda (10^{-2} ... 10^{-3}-torrilise rõhu all oleva) inertgaasiga, näiteks argooniga. Niisuguses gaastäidisega torus tekib elektronide joas tõukeionisatsiooni tagajärjel veel positiivsete ioonide juga, milles liikuvate elektronide tõukejõud tasakaalustatakse ioonide positiivsete laengute poolt ja joa läbimõõt ei suurene. Et gaastäidisega elektronkiiretorud omavad inertsi, siis suursageduslike vahelduvvoolude puhul neid ei kasutata.

Katoodidena kasutatakse elektronkiiretorudes peamiselt kaudselt kõetavaid katoode.

Katoodist väljuvaile elektronidele annab anoodi keskpunkti poole suunatud liikumise katoodi kontsentriliselt ümbritsev ja tema suhtes negatiivset potentsiaali kandev metalltoru, mida nimetatakse võreks ehk Wehnelt'i silindriks. Võre negatiivse pinge tõstmisel nõrgeneb anoodvool. Järelikult on võimalik ekraanile langeva elektronide joa tihedust muuta võrele kantava negatiivse pinge väärtuse muutmisega.

Joonisel 106. 6 on toodud elektronkiiretoru I_{A2}-U_{G1}-tunnusjoon. Peale temale otseselt langevate elektronide poolt tekitatud voolu koosneb teise anoodi vool veel ekraanile langevate elektronide poolt sekundaaremissiooni tõttu väljalöödud ja teisele anoodile tagasiliikuvaist elektronidest moodustatud voolust. See tunnusjoon iseloomustab seega ka ekraanile langevaist elektronidest moodustuva voolu tugevust. Et hõlbustada ekraanist sekundaaremissiooni tõttu väljuvate elektronide pääsemist teisele anoodile, on klaaskesta sisepind kaetud juhtivast ainest kihiga, mis on elektriliselt ühendatud teise anoodiga. Joonisel 106. 3 kujutatud elektronkiiretorul on ekraanile langevate elektronide joast moodustatud voolu tugevus käsitsi reguleeritav potentsiomeetri R_1 abil.

Elektronide joa tekitatud valgustähni poolt elektronkiiretoru ekraanil joonistatud kujutiste jälgimiseks silmaga või nende pildistamiseks kaetakse klaasist ekraani sisepind fluorestseeriva aine õhukese kihiga.

Fluorestseerivale ekraanile langenud elektronid tekitavad seal helendava tähni, mille värvus sõltub fluorestseeriva aine keemilisest koostisest. Silmale kõige paremini nähtavat kollakat või rohekat valgust annab tsinksulfiid. Et fotoplaadid on tundlikumad sinisele valgusele, siis kasutatakse pildistamiseks määratud elektronkiiretorude ekraani valmistamiseks sinakat valgust andvat kaltsiumvolframaati. Mitmesuguseid fluorestseerivaid aineid segades võib ekraanil saada soovitud värvusega valgust.

Valgustähni heledus ekraanil sõltub elektronide ekraanile langemise kiirusest (järelikult anoodpingest) ja ajaühikus ekraani täpile langevate elektronide arvust. Mitte kogu ekraanile langevate elektronide kineetiline energia ei muundu fluorestseerivas kihis valgusenergiaks ega kulu sekundaarelektronide ekraanipinnast väljalöömisel sooritatud tööks, vaid osa sellest muundub ka soojuseks. Et fluorestseeriva

kihi mõni täpp liigse soojenemise tõttu ei aurustuks, ei tohi lasta valgustähni kauemat aega ekraanil paigal püsida.

Mõõtmistehnikas kasutatakse elektronkiiretorusid kiiresti muutuvate elektriliste nähtuste jälgimiseks määratud seadmete ehitamisel. Nähtuste uurimine nende seadmete abil toimub ekraanil liikuva valgustähni silma abil jälgimise teel või tähni poolt ekraanile joonistatud kujutiste pildistamisega. Ühele kallutusplaadi-paarile rakendatud jälgitava vahelduvpinge mõjul joonistub toru ekraanile (näiteks vertikaalne) helendav sirgjoon, mille pikkus sõltub elektronide joa ehk elektronkiire hälbest, viimane aga kallutusplaadi-paarile rakendatud pinge väärtusest. Rakendades teisele kallutusplaadi-paarile konstantse amplituudiga perioodiliselt muutuva pinge — kallutus- ehk laotuspinge, antakse elektronkiirele hälve ka horisontaalsihis. Laotuspinge sünkroniseerimisel jälgitava pingega kujundub ekraanil elektronide joa otsa poolt joonistatud kõvera seisev kujutis, s. o. elektronkiirt vertikaalsihis kallutavate plaatide vahele rakendatud pinge kuju näitav kõver — laotuskõver. Kirjeldatud seadmeid nimetatakse *elektronkiire-ostsillograafideks*, lihtsamaid elektronkiiretoruga töötavaid mõõteseadmeid aga, milledes puudub laotuspinget tekitav ja seisvat kõverat loov seadis — *elektronkiire-ostsilloskoopideks*.

Väga lühiajaliste, mittekorduvate nähtuste pildistamine oleks kirjeldatud elektronkiiretorude ekraanilt võimatu, sest ekraanil tekkival helendaval kujutisel oleks väga väike valgusintensiivsus. Seepärast on niisuguste nähtuste pildistamiseks ehitatud kesta sees vaakumis asuva, valgustundlikku plaati või paberit sisaldava *lestikuga elektronkiiretorusid*. Need seadised on väga keeruka ehitusviisiga ja peavad olema varustatud pumpade-süsteemiga — vaakumi säilitamiseks.

Kaugnägemis-vastuvõtjais kasutamiseks valmistatakse erilisi elektronkiiretorusid, mida nimetatakse *kinoskoo-*

p i d e k s. Eespool käsiteldud elektronkiiretorudest erinevad nad peamiselt kaugnägemispildi vastuvõtuks kohaldatud ekraani mõõdete poolest. Neis kasutatakse elektronide joa kallutamiseks magnetvälja.

Fluorestseeriva ainega kaetud ekraanil joonistab silmaga nähtava kujutise väikese läbimõõduga valgustähn. Et see kujutis silmale püsivam näiks, selleks valmistatakse ekraani fluorestseeriv kiht säärastest ainetest, mis omavad teatavat valguse inertsi, s. o. ekraanile langevate elektronide joa lõppedes või ekraani pinnal uude asendisse nihkudes helendab ekraani eelmine täpp veel teatava aja kestel edasi.

Fluorestseeriva ainega kaetud ekraanidega elektronkiiretorude anoodpinge on tavaliselt 1000 ... 5000 V piirides. Elektrivälja abil kallutatava elektronide joaga elektronkiiretorude tundlikkus on tavaliselt 0,1 ... 1 millimeeter elektronide joa hälvet ekraanil kallutuspinge ühe voldi kohta, ja magnetväljaga kallutatavail elektronkiiretorudel ligikaudu 0,1 millimeetrit hälvet kallutusvoolu ühe amperkeeru kohta. Elektronide joa katkestamiseks vajalik pinge elektronkiiretoru võrel (Wehnelt'i silindril) on — 30 ... — 8 V.

Elektronkiiretorusid, milledes ekraani asemel on üksteisest isoleeritud metallplaadikesed, milledest igaüks on ühendatud eri vooluringi, nimetatakse e l e k t r o n k i i r e - k o m m u t a a t o r i t e k s. Elektrivälja või magnetvälja abil kallutatav elektronide juga, langedes vastavalt kallutuspingele või kallutusvoolule teatud järjekorras nendele plaadikestele, ühendab nende vooluringid kordamööda elektronide joaga ühisesse vooluringi.

Niisuguseid elektronkiire-kommutaatoreid valmistatakse vastavalt otstarbele väga mitmesuguse konstruktsiooniga ja neid kasutatakse paljudes elektriseadmetes. Näiteks nimetatakse sideseadmetes kasutatavaid elektronkiire-kommutaatoreid t s ü k l o f o n i d e k s, faasimodulatsiooniseadmetes kasutatavaid vastava konstruktsiooniga elektronkiire-kommutaa-

toreid nimetatakse tsüklodosideks ja sageduse-faasi-modulatsiooniseadmetes kasutatavaid ülaltähendatud põhimõttel töötavaid elektronkiire-kommutaatoreid fasitronideks.

Elektronkiiretorusid, millede ekraan on niisuguse konstruktsiooniga, et temale langeva valguse pildi mõjul tekivad ekraani punktides pildi punktide heledustele võrdeliste suurustega elektrilaengud, mida ekraanil liikuv elektronide juga ühendab kordamööda vooluringi, kasutatakse televisiooni saatejaamades ja nimetatakse ikonoskoopideks.

TÄIENDAVAID KÜSIMUSI.

XIX peatükk.

Mitmesugused seadised ja nähtused.

§ 107. Raudvesiniktakisti ehk raudtakisti (barreter) on elektrilahenduseta elektrovaakumseadis (§ 1), mida kasutatakse automaatseks voolu tugevuse reguleerimiseks selles vooluringis, kuhu ta on ühendatud. Raudtakisti koosneb vesinikgaasiga täidetud klaaskestast ja sellesse paigutatud raudtraadist. Traadi pikkus ja läbimõõt ning vesinikgaasi rõhk on valitud sellised, et traadi takistuse suurenemine soojenemise tõttu oleks võrdeline raudtakisti klemmidele rakendatava pinge väärtusega. Selleks on vaja, et raudtakisti klemmidel tekkida võiva pingetõusu ΔU_{RV} tagajärjel traadis tekitatud soojushulk tõstaks traadi temperatuuri sel määral, et takistuse suurenemine ΔR rahuldaks võrdust:

$$I_{RV}^2 \Delta R = \Delta U_{RV}, \qquad (107.1)$$

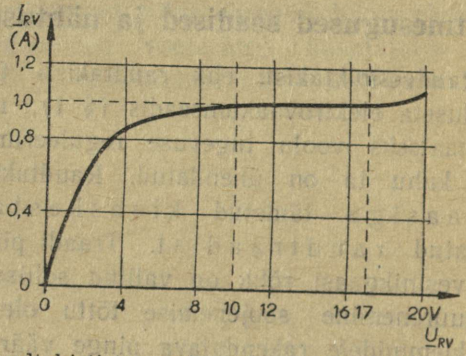
kus I_{RV} on traati läbiva voolu tugevus.

Et see nõue saaks täidetud, selleks valitakse vajaliku temperatuuriteguriga traadimaterjal, sobivad traadi mõõted ja jahtumistingimused. Traadi materjalina kasutatakse rauda sellepärast, et raua temperatuuritegur on suhteliselt suur ($\alpha = 0{,}0045 \ldots 0{,}0062$), mistõttu näiteks temperatuuri tõus 100° C võrra põhjustab traadi takistuse suurenemist 50 ... 60% võrra. Vesinikgaasi kasutatakse tema suure soojusjuhtivuse tõttu (võrreldes teiste gaasidega). Valides sobiva rõhu ja traadi kerimise viisi, on võimalik saavutada nõutavat

soojuse lahkumist traadist. Gaasirõhk raudtakistis on tavaliselt 50 ... 200 torri piirides.

Raudtakisti tunnusjoon $I_{RV} = f(U_{RV})$ on toodud joonisel 107. 1.

Raudtakisti reguleerimisalaks loetakse tavaliselt klemmidevahelist pingete piirkonda, mille ulatusel takistit läbiva voolu tugevus ei muutu üle $\pm 4\%$. Joonisel 107. 1 käsiteldud raud-



Joon. 107. 1. Raudtakisti tunnusjoon $I_{RV} = f(U_{RV})$. Vool $I_{RV} = 1$ A $\pm 4\%$ raudtakisti klemmidevahelise pinge U_{RV} muutudes 10 ja 17 voldi vahel.

takistil on selleks alaks 10 ja 17 voldi vaheline piirkond, mille ulatusel voolu tugevus on 1 A $\pm 4\%$.

Raudtakisteid kasutatakse voolu tugevuse automaatseks reguleerimiseks akude laadimisel, elektrontorude kütmisel muutliku pingega (kas alalis- või vahelduvvoolu) allikast jne. Raudtakisti talitluspunkti lähteasend tuleb valida I_{RV}-U_{RV}-tunnusjoonel nõnda, et raudtakisti klemmidevaheline pinge ei ulatuks välja reguleerimisalast. Talitluspunkti lähteasendi määrab toiteallika pinge.

Raudtakisti puuduseks on see, et ta reguleerib voolu tugevust teatud viivitusega, viies voolu tugevuse ligikaudu endisele väärtusele alles 2 ... 3 minuti vältel pärast pinge muutumist.

Näide 107.1. Elektrienergia tarbija vajab pinget $U_F = 4$ V ja voolu $I_F = 1$ A. Toiteallika pinge võib muutuda ühevõrra niihästi tõusu kui ka alanemise suunas. Leida vajalik toiteallika pinge ja selle muutumise lubatavad piirid, et joon. 107.1 kujutatud tunnusjoonega raudtakisti suudaks hoida voolu tugevust väärtusel 1 A ± 4%.

Lahendus. Kui valida talitluspunkt tunnusjoone keskele, peaks raudtakisti klemmidevaheline pinge olema 13,5 V. Seega peaks toiteallika pinge $U_P = U_F + U_{RV} = 4 + 13{,}5 = 17{,}5$ V. Et reguleerimisulatus on ± 3,5 V, siis võib toiteallika pinge muutuda piirides 14...21 V.

§ 108. Elektrontoru endakahin. Võimendajana töötava elektrontoru võre ja katoodi vahele kantava võimendatava pinge minimaalväärtus on piiratud elektrontorus endas ja ta vooluringides tekkiva voolu kõikumisega, nn. elektrontoru endakahinaga, sest elektrontoru anoodvooluringis muutub vool ka siis, kui võre ja katoodi vahel vahelduvpinget ei ole.

Endakahin tekib igas võimendusastmes, kuid praktilist tähtsust omab võimendaja esimeses astmes tekkiv kahin, mis saab võimendatud sellele järgnevate astmete poolt.

Endakahinat põhjustav voolu muutus sisaldab kõiki praktikas esinevaid sagedusi võrdse amplituudiga. Neist sagedustest on olulised ainult need, mis asuvad võimendaja poolt võimendatavas sagedusribas.

Võimendustorus tekkiva anoodvoolu muutumise põhjused on alljärgnevad.

1. Katoodi pinnast väljuvad ainult need elektronid, millede kiirused ületavad metalli pinnast väljumiseks vajalikku kiirust ja mis tabavad metalli pinda seestpoolt (§ 15). Igal hetkel väljuvate elektronide arv pole võrdne, vaid kõigub Dushman'i valemiga määratava keskmise väärtuse ümber. Järelikult on anoodvool, kui ta tugevus vastab küllastusvoolu tugevusele, kõikuv ning teda võib vaadelda koosnevana alalis- ja vahelduvvoolu komponentidest. Kui aga

anoodvool on küllastusvoolust nõrgem, tekib katoodi ümbritsevas ruumis katoodist väljunud vabadest elektronidest ruumlaeng. Ruumlaengu tõttu kaotavad katoodist väljunud elektronid oma esialgse kiiruse ning anoodvoolu moodustavad ruumlaengu ja anoodi vahel anoodpinge mõjul liikuvad elektronid. Seetõttu on ruumlaengu olemasolu puhul elektronide katoodi pinnast väljumise ebaühtlusest põhjustatud endakahin tunduvalt väiksem.

2. Anoodil või positiivse pingega võredel ilmnev sekundaaremissioon ja selle poolt tekitatav vool pole igal hetkel ühetugevune. Elektrontorus on sekundaaremissiooni poolt tekitatav endakahin seda suurem, mida rohkem on elektrontorus positiivse pingega elektroode ja mida tugevam on elektrontorus sekundaaremissioonvool.

3. Anoodvoolu tugevuse kõikumist põhjustab ka positiivsete ioonide tekkimine elektrontorus. Seetõttu on elektrontorus ilmnev endakahin seda suurem, mida väiksem on elektrontoru vaakum. Selle põhjuseks on katoodile langevate positiivsete ioonide poolt tekitatava voolu ebaühtlus. Ruumlaengu olemasolul on sel põhjusel tekkiv endakahin väiksem.

4. Võimendusastmes sisalduva elektrontoru võrevooluringi moodustavates juhtmetes ja takistites ilmneb vahelduvpinge elektronide soojusliku liikumise tõttu. Soojusliku liikumise tõttu pole vaadeldavasse juhtme või takisti lõiku igal hetkel saabuvate elektronide arv võrdne sealt lahkuvate elektronide arvuga. See nähtus põhjustab vahelduvpinge tekkimist elektrontoru võrel, mis omakorda põhjustab anoodvoolu muutumist.

Elektrontorus ja võrevooluringis tekkiva endakahina väärtuste määramiseks võrreldakse endakahina nivood elektrontoru võrele rakendatava, sama kõrget nivood omava ja sama tugevat mõju avaldava vahelduvpingega. Selle ekvivalentse vahelduvpinge väärtust pole võimalik arvutuse teel täpselt

määrata. Ligikaudu on elektrontorus esineva kahina (vt. p. 1 . . . 3) ekvivalentpinge elektrontoru kooremtakistil

$$u_e = \frac{Z\sqrt{I_A F}}{1780},$$

kus u_e on vahelduvpinge väärtus anoodvooluringis kooremtakisti klemmide vahel [μV],
Z — kooremtakisti takistus [Ω],
I_A — anoodvool [mA],
F — sagedusriba laius [kHz].

Selle pinge väärtuse võib asendada võrevooluringi rakendatava ekvivalentse pingega u_e', kui teda jagada võimendusastme võimendusteguriga V, s. o.

$$u_e' = \frac{u_e}{V}.$$

Võrevooluringis esineva ja soojuslikust liikumisest tingitud kahina ekvivalentpinge ligikaudse väärtuse võib leida valemiga

$$u_T = \sqrt{4k_b TRF},$$

kus u_T on pinge elektrontoru võrel [V],
k_b — Boltzmann'i konstant, mille väärtus on $1{,}38 \cdot 10^{-23}$ J/°K,
T — sisendvooluringi absoluutne temperatuur [°K],
R — võrevooluringi tegevtakistus [Ω],
F — sagedusriba laius [kHz].

Kuna temperatuur praktikas vähe muutub, võib selle muutused jätta tähele panemata. Niisugusel juhul on valemil lihtsam kuju:

$$u_T = \frac{\sqrt{RF}}{250},$$

kus u_T on pinge elektrontoru võrel [μV],
F — sagedusriba laius [kHz],
R — võrevooluringi takistus [Ω].

Elektrontorus ja võrevooluringis tekkivate kahinate ekvivalentpinged võib liita järgmiselt:

$$u_{Te} = \sqrt{u_T^2 + u_e'^2}.$$

XX peatükk.

Mõõtmiste teostamine elektrovaakumseadiste juures.

§ 109. Üldjuhised. Elektrovaakumseadiste omaduste selgitamiseks, neile soodsamate talitlustingimuste leidmiseks või nende talitluskõlblikkuse selgitamiseks on vaja nende juures teostada sellekohaseid mõõtmisi.

Missuguseid mõõtmisi on vaja sooritada iga üksiku seadise juures igal eri juhtumil ja kuidas neid teostada, see selgub seadiste kirjeldustest. Mõõtmistel kasutatava süsteemi selgitamiseks on alljärgnevas kirjeldatud dioodi vooluringis kulgeva ühesuunalise voolu tunnussarja ülesvõtmisel tavaliselt sooritatavate mõõtmiste käiku.

1. Tööülesanne. Võtta üles dioodi vooluringis kulgeva ühesuunalise voolu tunnussari piirkondades $I_A = 0 \ldots 2$ mA ja $I_A = 0 \ldots 60$ μA.

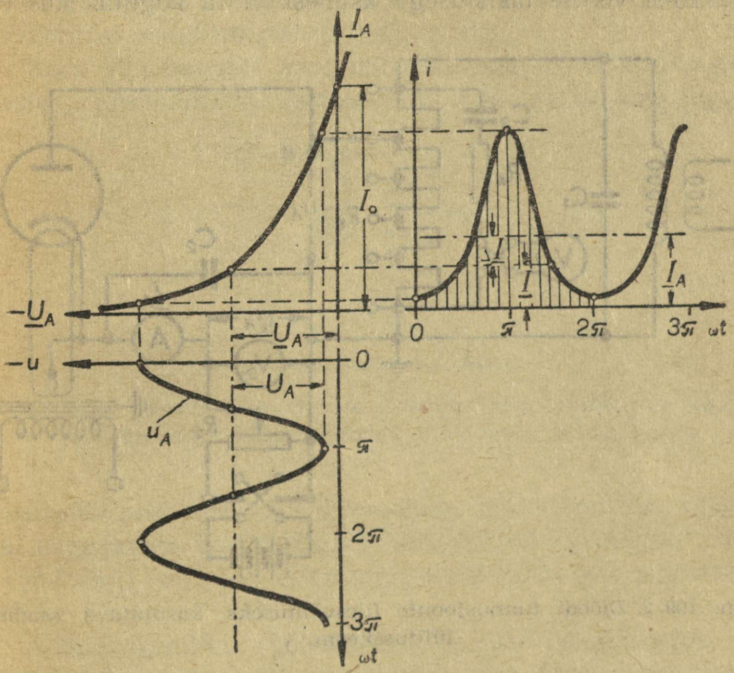
2. Ülesande analüüs. Dioodi vooluringis kulgev ühesuunaline vool I_A kujundub sellele vooluringile rakendatud alalispinge U_A ja vahelduvpinge u_A mõjul. Järelikult koosneb see vool, nagu see nähtub ka jooniselt 109. 1, kahest komponendist:

$$I_A = I + \Delta I.$$

Dioodi läbiva ühesuunalise voolu tunnusjoonte kuju määrab seos:

$$I_A = f(U_A).$$

Tunnusjooned tuleb võtta üles vahelduvpinge u_A mitmesuguste väärtuste juures. Nendest tunnusjoontest kujunebki tunnussari.



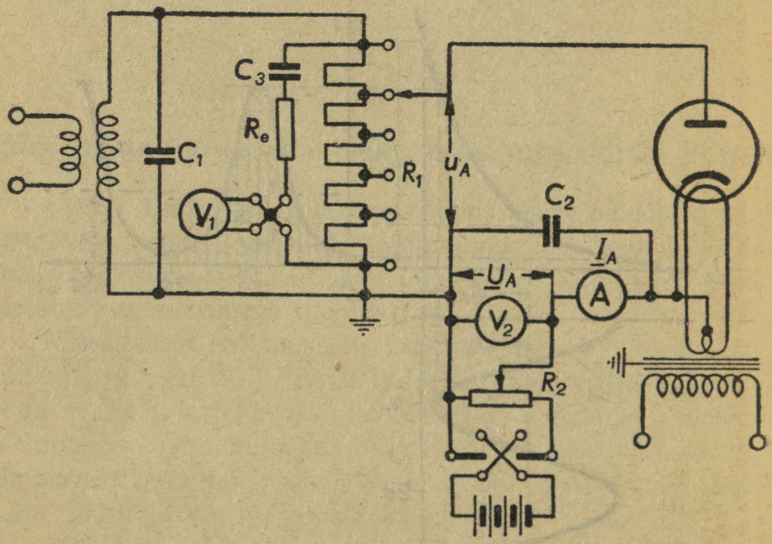
Joon. 109. 1. Dioodi läbiva ühesuunalise voolu kujundumine.

Dioodi vooluringi läbiva ühesuunalise voolu tunnussarja abil on võimalik lihtsalt ja ülevaatlikult lahendada kõik vahelduvvoolu alaldamisel esinevad küsimused.

3. T ö ö v a h e n d i d. Mõõtmistel kasutatava lülituse põhimõtteskeem on toodud joonisel 44. 3 ja lülitusskeem joonisel 109. 2.

Mõõtmisel kasutatakse siinuselist vahelduvvoolu, mille sagedus on piirides $f = 100 \ldots 1000$ Hz. Juhul, kui kasutatav

vahelduvvool pole täiesti vaba ülasagedustest, ühendatakse transformaatori sekundaarmähisega rööbiti kondensaator C_1, mille mahtuvus on 500 . . . 5000 pF. Pingejagaja R_1 koosneb 5 . . . 10-st võrdse takistusega astmest ja ta kogutakistus on

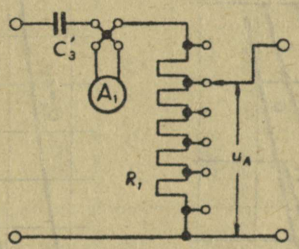


Joon. 109. 2. Dioodi tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutatava seadise lülitusskeem.

100 . . . 200 Ω. Pingejagaja ei tohi sisaldada märgatavat induktiivsust. Selleks peaks ta olema koostatud peenikesest (mõne sajandiku mm läbimõõduga), suure takistusega traadist, mis on alusele kinnitatud edasi-tagasi mähkimise teel. Tema klemmidevahelist pinget mõõdetakse termorist-voltmeetriga V_1, mille eeltakisti R_e peab olema mahtuvus- ja induktiivsusvaba. Termorist-voltmeetri ja pingejagaja normimist teostatakse alalisvooluga. Tugevama anoodvoolu puhul võib tekkida tunduv viga sellest, et termorist-voltmeeter näitab ühtlasi ka pingejagajas ühesuunalisest voolust tekkinud pingelangu. Sellest

veast hoidumiseks võib kasutada joonisel 109. 3 kujutatud pingejagajat. Joonisel 109. 2 toodud skeemi kasutamisel peab termorist-voltmeetriga järjestikku ühendatava kondensaatori C_3 takistus vahelduvvoolule olema tunduvalt väiksem mõõteriista eeltakistusest ($1/\omega C_3 \ll R_e$).

Seda pingejagajat koos mõõteriistaga on vaja vahelduvvooluga järelnormida. Joonisel 109. 3 kujutatud pingejagajat



Joon. 109. 3. Dioodi tunnusjoonte ülesvõtmiseks kasutatavas seadises vahelduvpinge ampermeetriga määramise lülitusskeem.

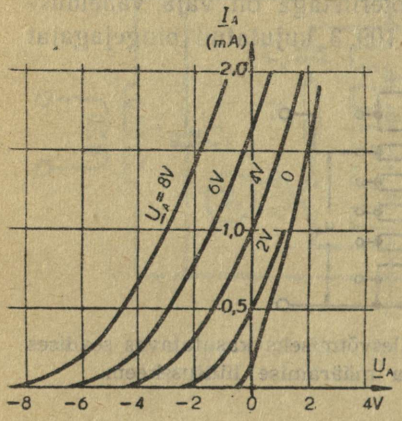
kasutades pole aga vahelduvvooluga järelnormimine vajalik, kui pingejagaja takistustraadi läbimõõt on küllaldaselt väike (< 0,1 mm), nii et ei esine märgatavat skin- ehk pinnaefekti mõju.

Alalispingeallika potentsiomeetri R_2 kogutakistus on umbes 100 Ω. Pinge U_A mõõtmiseks kasutatakse pöördpool-voltmeetrit V_2 täpsusklassist 0,2 või 0,5. Voltmeetri klemmid on ümberlülitatavad. Ühesuunalise voolu I_A mõõtmiseks kasutatakse pöördpool-milliampermeetrit (või -mikroampermeetrit) A täpsusklassist 0,2 või 0,5. Mõõteriistad on sillatud mõne tuhande pikofaradilise kondensaatoriga C_2. Dioodi küttepinge hoitakse konstantne võrgujuhtmeisse ühendatud reostaadi abil või kõetakse dioodi patareidest võetava vooluga.

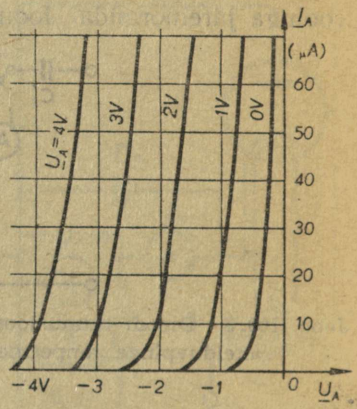
4. Töökäik. Vahelduvpinge jagaja R_1 klemmidevaheline pinge u_A reguleeritakse (näiteks kümneastmelise pingejagaja puhul) 10-le voldile. Muutes alalispinge jagajal R_2 astmeliselt

pinget U_A, loetakse mõõteriistalt vastavad I_A väärtused ja kantakse need tabelisse.

Ülesande kohaselt on vaja üles võtta kaks ühesuunalise voolu tunnussarja, milledes voolu tugevused erinevad üksteisest tunduvalt. Seepärast on vaja teostada kahed mõõtmised,



Joon. 109. 4. Dioodi tunnussari.



Joon. 109. 5. Dioodi tunnussari.

kasutades voolu mõõtmiseks kummalgi juhul eri mõõtepiirkonnaga mõõteriista.

Mõõtmistel saadud lugemid koondatakse lehekülgedel 353 ja 354 toodud tabelitesse.

Tabelite andmete järgi koostatakse joonistel 109. 4 ja 109. 5 kujutatud tunnussarjad.

Sama lülituse abil saab mõõtmiste teel leida ka mitmesuguste muude ebalineaarsete süsteemide, näit. kristalldetektorite, kuivsuunajate jne. tunnusjooni.

$U_A = 0$ V	$\underline{U}_A$	0	1	2						V
	$\underline{I}_{A0}$	0,13	0,75	1,55						mA
$U_A = 2$ V	$\underline{U}_A$	−2	−1	0	1					V
	$\underline{I}_A$	0,03	0,19	0,5	0,93					mA
$U_A = 4$ V	$\underline{U}_A$	−4	−3	−2	−1	0	1	2		V
	$\underline{I}_A$	0,03	0,14	0,31	0,66	1,0	1,5	2,1		mA
$U_A = 6$ V	$\underline{U}_A$	−6	−5	−4	−3	−2	−1	0		V
	$\underline{I}_A$	0,03	0,1	0,24	0,47	0,79	1,17	1,64		mA
$U_A = 8$ V	$\underline{U}_A$	−8	−7	−6	−5	−4	−3	−2	−1	V
	$\underline{I}_A$	0,03	0,1	0,2	0,4	0,66	1	1,43	1,88	mA

Tabel tunnussarja $\underline{I}_A = f(\underline{U}_A)$ koostamiseks mõõtepiirkondades: $\underline{U}_A = 0, 2, 4, 6$ ja 8 V; $\underline{I}_A = \underline{I}_{A0} = 0 \ldots 2$ mA; $\underline{U}_A = = -8 \ldots +3$ V.

$U_A = 0$ V	$\underline{U}_A$	−0,9	−0,55	−0,45	−0,36	−0,29	−0,24	−0,17	V
	$\underline{I}_{A0}$	0	5	10	20	30	40	60	μA
$U_A = 1$ V	$\underline{U}_A$	−1,6	−1,3	−1,15	−1,0	−0,94	−0,85	−0,72	V
	$\underline{I}_A$	0	5	10	20	30	40	60	μA
$U_A = 2$ V	$\underline{U}_A$	−2,6	−2,2	−2,07	−1,92	−1,82	−1,73	−1,55	V
	$\underline{I}_A$	0	5	10	20	30	40	60	μA
$U_A = 3$ V	$\underline{U}_A$	−3,36	−3,12	−3,0	−2,84	−2,70	−2,57	−2,40	V
	$\underline{I}_A$	0	5	10	20	30	40	60	μA
$U_A = 4$ V	$\underline{U}_A$	−4,3	−4,06	−3,91	−3,73	−3,58	−3,44	−3,25	V
	$\underline{I}_A$	0	5	10	20	30	40	60	μA

Tabel tunnussarja $\underline{I}_A = f(\underline{U}_A)$ koostamiseks mõõtepiirkondades: $U_A = 0$, 1, 2, 3 ja 4 V; $\underline{I}_A = \underline{I}_{A0} = 0 \ldots 60$ μA; $\underline{U}_A = -5 \ldots 0$ V.

Lisa I.

Väikese võimsusega elektrontorude (raadiolampide) tehnilised andmed.

Tüüp	Nimetus ja kasutusala	U_F V	I_F A	U_A V	U_{G1} V	U_{G2} V	I_A mA	I_{G2} mA	S mA/V	R_i kΩ	μ	P Välje W	$P_{A\,max}$ Anoodkadu	C_{GA} pF	C_{sis} pF	$C_{välje}$ pF	Katood / Kolb / Suurus	Sokli lülitus
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2A3 2C3	Triood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks; üks elektrontoru A-klassi talitlustingimustes	2,5	2,5	250	—45	—	60	—	5,25	0,8	4,2	3,5	15	16	7,5	5,5	V Kl	42
УБ-152	Triood, universaalne (võimendaja, detektor, generaator)	2,0	0,11	80 120	—1 —4	— —	6 6	— —	1,6 2,0	7,5 6,0	12 12	0,04	2	3,8	3,6	—	V Kl	36
СБ-154	Tetrood, suursageduse võimendamiseks	2,0	0,11	100 120 160	0 —1 —1	40 60 80	1,3 1,8 3,5	0,5 0,7 1,3	0,9 1,0 1,25	1300 1000 400	1200 1000 1500	—	1	0,005	9	9	V	37
УБ-240 2C3M 2C2	Triood, universaalne (väikesageduse võimendamiseks, detektor, generaator)	2,0	0,12	120 120	—1 —2,5	— —	3,5 1,5	— —	1,55 1,3	13 17	22 22	—	0,6	2,8	2,8	2,7	V Klv	19
СБ-241 2K1M	Pentood, suursageduse võimendamiseks	2,0	0,12	120 100	—1 —1	70 50	3,5 1,7	1,2 0,5	1,6 1,0	750 1700	1200 1700	—	—	0,01	—	—	V Klv	—

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
СБ-155	Pentood, väikesagedus-võimsuse võimendamiseks	2,0	0,22	100 120	—3 —6	80 120	6 10	1,2 2,0	1,75 2,5	115 80	200 160	0,2 0,3	4	0,25	—	—	V Klv	41
СБ-242 2А1М 2А1	Heptood, sageduse muundamiseks	2,0	0,16	120 80	$U_{G3,5}$ 70 25	120 70	4,3 —	4,5 —	S_{mn} 0,45 0,18	150 —	—	—	0,7	C_{AG4} 0,45	9,6	11,4	V Klv	25
СО-243 2Н1	Kaksiktriood	2,0	0,24	120	0	—	2,6	—	2	40	32	—	1,5	3,4	2,8	5,7	V Klv	20
СБ-244 2П1М 2П1	Pentood, väikesagedus-võimsuse võimendamiseks	2,0	0,18	120	—2,5	120	4,0	0,75	1,8	150	270	0,15	1,5	0,5	5,5	7,0	V Klv	24
СБ-245 2Э2	Tetrood, generaatoriks	1,8	0,32	160	—2	80	21	4	1,8	300	75	—	1,5	0,02	9,5	9,2	V Klv	15
СО-257 2Ж4	Pentood, suursageduse võimendamiseks ja genereerimiseks	2,0	0,275	200	—7	100	14	2,4	1,8	110	200	1,2	2,5	0,06	7,0	8,0	V Klv	23
СБ-258 2П2М 2П3	Pentood, väikesagedus-võimsuse võimendamiseks	1,8	0,32	160	—6	120	10	1,7	2,0	80	160	0,45	2	0,5	5,4	7,5	V Klv	24
2Ж2М 2Ж2	Pentood, lühikese tunnusjoonega, universaalne	2,0	0,06	120	—1	70	1,0	0,3	0,8	1500	1200	—	0,5	0,02	5,2	8,0	V Klv	22

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
2К2М 2К2	Pentood, muudetava tõusuga, suursagedusele	2,0	0,06	120 60	—0,5 —0,5	70 60	2,0 0,7	0,6 0,4	0,95 —	1000 —	950 —	0,04	0,5	0,02	5,2	8,0	V Klv	22
2П4М	Pentood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	2,0	0,12	120	—4	80	7,0	2,0	2,0	62	125	0,25	2,5	0,7	—	—	V Klv	—
2П9	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	2,0	1,0	250	—6	150	35	1,5	2,5	40	100	6,0	8,0	0,6	8,5	—	V Klv	1
2П9С	Pentood, suursageduse genereerimiseks	2,0	1,0	250	—1	150	25...45	1,5	2,5	—	—	6,0	8,0	1,0	8,5	8,5	V Klv	—
2Ф2М	Triood	2,0	0,06	120	—4	—	2	—	1,2	16	20	—	0,8	3,5	—	—	V Klv	—
ПТ2 ЭТ1	Triood, universaalne	3,6	0,06	40 80	—0 —0	— —	0,6 2,0	— —	0,15 0,45	80 24	11 11	—	—	2,0	—	—	V Kl	36
СО-44	Tetrood, suursagedusele	3,6	0,22	160	—1	65	5,5	2,0	1,6	100	160	—	—	0,01	—	—	V Kl	—
УО-104	Triood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	4,0	0,7	240	—35	—	40	—	3,2	1,25	4	1,5	12	10	—	—	V Kl	36
УБ-107	Triood, universaalne	4,0	0,08	60 120 160	0 —2 —4	— — —	2,0 5,5 8,0	— — —	0,5 1,3 1,5	24 9,2 8	12 12 12	—	2	3,0	—	—	V Kl	36

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
УБ-110	Triood, universaalne	4,0	0,08	160	—1	—	4,5	—	1,2	20	24	—	2	2,0	—	—	V Kl	36
СБ-112	Tetrood, suursagedusele	4,0	0,08	160 160	—1 —1	60 80	1,3 2,4	0,35 0,5	0,5 0,7	1000 430	500 300	—	1	0,01	—	—	V Kl	37
СО-118 4С5	Triood, universaalne	4,0	1,0	120 240	0 —3	— —	5 6	— —	1,7 1,75	21 20	36 36	—	2	2,6	—	—	K Kl	38
ПО-119	Triood, võimendamiseks	4,0	1,0	240	—10	—	12	—	1,8	7	12	—	5	2,0	—	—	K Kl	38
СО-122 4П1	Pentood, väikesagedus-võimsuse võimendamiseks	4,0	1,0	160 240	—12 —12	160 140	22 19	— 8	2,5 1,7	2,8 70	7 120	0,25 1,0	4	0,35	—	—	K Kl	40
СО-124 4Ж5С 4Ж5	Tetrood, suursageduse võimendamiseks ja detekteerimiseks	4,0	1,0	120 160 160	—1 —1 —1,5	40 60 80	2,8 7,0 10	1,7 3,2 3,0	1,3 1,8 1,9	770 300 185	1000 250 350	—	1	0,005	—	—	K Kl	39
УБ-132	Triood, väikesagedus-võimsuse võimendamiseks, A-klass	4,0	0,15	160	—8	—	12	—	2,0	4,25	8,5	0,25	3	5,5	—	—	V Kl	36
СБ-147	Tetrood, suursagedusele	4,0	0,15	160 160	—1 —1	60 80	2,8 5,5	1,0 1,8	1,0 1,6	650 220	650 350	—	2	0,05	10,5	8	V Kl	37
СО-148	Tetrood, suursagedusele, muudetava tõusuga	4,0	1,0	160	—1	60	7,5	1,5	3	200	250	—	4	0,005	6	—	K Kl	39

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
CO-182	Pentood, suursagedusele	4,0	1,0	100 160 240	—1,5 —1,5 —1,5	100 80 100	6,5 4,2 7,0	2,4 1,4 2,5	2,75 2,25 2,5	220 650 850	600 1500 2400	—	4	0,008	11	—	K Kl	40
CO-183	Pentagrid, sageduse muundamiseks	4,0	1,0	240	—3	100	6	10	2,6 S_{mn} 1,2	160	400	—	—	0,25	12	—	K Kl	27
CO-185	Duodiood-triood, detekteerimiseks ja võimendamiseks, A-klass	4,0	1,0	120 240	—1 —4	— —	3 5	— —	1,5 1,5	24 24	36 36	—	5	2,2	5,3	—	K Kl	45
УО-186	Triood, väikesagedusevõimsuse võimendamiseks, A-klass	4,0	1,0	240 400	—33 —85	— —	62 47	— —	3,1 —	1,2 —	3,7 —	1,5 4,0	15	—	—	—	V Kl	36
CO-187	Pentood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	4,0	2,0	250 250	—6 —8	250 (trioodina)	37 30	10 —	7,5 7,0	90 3	600 21	2,5 1,0	10 10	1,0	12	—		41
CO-193	Duodiood-pentood, detekteerimiseks ja väikesageduse võimendamiseks	4,0	1,0	120 240	—1,5 —6	20 120	1 6	0,1 2	0,8 1,6	1500 400	1200 650	0,8	5	0,2	—	—	K Kl	—
CO-259	Kaksiktriood	4,0	2,0	120	—	—	30	—	3	—	—	—	6	—	—	—	K Kl	—
УК-30	Triood (lõpptriood), võimendamiseks A-klassi talitlustingimustes	5,6	0,8	400	—20	—	20	—	1,4	7,1	10	1,0	—	8	—	—	V Kl	36

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6Л7 6L7 6А5Б	Segustus-heptood, suursageduse võimenduse reguleerimise võimalusega	6,3	0,3	250	−3	100	2,4	$I_{G2,4}$ 7,1	1,1 0,35	1000	—	—	1,7	0,0005	7,5	11,0	K M	11
6А8 6А8Б	Pentagrid, muudetava tõusuga, sageduse muundamiseks	6,3	0,3	100 250	U_{G4} −1,5 −3	100 250	1,1 3,0	2,0 4,0	0,36 0,5	600 360	— —	— —	1,0	C_{AG4} 0,006	12,5	12,0	K M	12
6SA7-GT 6А10	Pentagrid, sageduse muundamiseks	6,3	0,3	100 250	— —	100 100	3,3 3,5	$I_{G2,4}$ 8,5	0,45 0,45	500 1000	— —	— —	1,0	C_{AG3} 0,5	11,0	11,0	K Kl	10
6SA7 6А15Б	Pentagrid, muudetava tõusuga, sageduse muundamiseks	6,3	0,3	100 250	— —	100 100	3,3 3,5	8,5	0,45	500 1000	— —	— —	1,0	0,13	9,5	12,0	K M	10
6Б8 6В8	Duodiood-pentood, universaalne	6,3	0,3	250	−3	125	10	2,3	1,3	600	800	—	2,25	0,005	6	9	K Kl	9
6ПР-20 6ДП1	Pentood, televisiooni otstarbeks	6,3	1,8	44	+44	—	—	200	—	—	—	—	5	—	—	—	K	17
6Е5	Elektronindikaator	6,3	0,3	100 250	−3,3 −8	100 250	0,19 0,24	4,5 4,5	$R_A = 0{,}5$ MΩ $R_A = 1$ MΩ				—	—	—	—	K Kl	—
6АГ7 6AG7 6Ж45	Pentood, suure tõusuga — Pinge võimendamiseks	6,3	0,65	300	0	115	45	13	—	R_k 3,5	—	$U_{näite}$ 70 V	9	0,06	13	7,5	K M	8
	Võimsuse võimendamiseks, A-klass	6,3	0,65	300	−3	150	30	7	11	130	1430	3	9	0,06	13	7,5		

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
Г-411 КЖ1	Pentood, suursageduse genereerimiseks ja võimendamiseks	20 10	0,3 0,6	400	—50	250	95	8	5,5	1,3	7,5	20	20	0,3	9,5	7,5	K Kl	4
807 КЖ2	Jugatetrood, suursageduse genereerimiseks ja võimsuse võimendamiseks; andmed vastutaktlülituse kohta, AB-klass	6,3	0,9	600	—30	300	60... 200	5...10	6	—	—	80	—	0,2	11	7	K Kl	43
6AG5 6Ж5П	Pentood, lühikese tunnusjoonega, suursageduse (kuni 400 MHz) võimendamiseks	6,3	0,3	100 125 250	—5 —6 —8	100 125 150	5,5 7,2 7,0	1,6 2,1 2,0	4,8 5,1 6,0	300 500 800	1420 2500 4000	—	2,0	0,025	6,5	1,8	K Kl	26
6Ж7 6J7 6Ж7Б	Pentood, lühikese tunnusjoonega, suursageduse ja väikesageduse detekteerimiseks ja võimendamiseks	6,3	0,3	100 250	—3 —3	100 100	2,0 2,0	0,5 0,5	1,2 1,2	1200 1000	1440 1200	—	0,75	0,006	7,0	12	K M	3
Z62D 6Ж8	Pentood, lühikese tunnusjoonega, suursageduse laia riba võimendamiseks	6,3	0,5	250	—2,4	100	10	2,5	7,5	2000	15000	—	2,5	0,03	9,5	11	K Klv	3
6SH7 6Ж11Б	Pentood, lühikese tunnusjoonega, suursageduse võimendamiseks	6,3	0,3	100 250	—1 —1	100 150	5,3 10,8	2,1 4,1	4,0 4,9	350 900	1400 4400	—	3,0	0,003	6,5	7,0	K M	7

1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6SG7 6K12Б	Pentood, poolpika tunnusjoonega, suursageduse võimendamiseks	6,3	0,3	100 250	—1 —1	100 125	8,2 11,8	3,4 4,4	4,1 4,7	250 900	1000 4200	—	3,0	0,003	8,5	7,0	K M	7
6AC7 1852 6Ж14Б	Pentood, suursageduse laia riba võimendamiseks	6,3	0,45	300 300	— —	150 300	10 10	2,5 2,5	9,0 9,0	1000 1000	9000 9000	—	3,0	0,015	11,0	5,0	K M	6
6AB7 1853 6K15Б	Pentood, pikendatud tunnusjoonega, suursageduse laia riba võimendamiseks	6,3	0,45	300 300	—3 —3	200 300	12,5 12,5	3,2 3,2	5,0 5,0	700 700	3500 3500	—	3,0	0,015	8,0	5,0	K M	6
6SJ7 6Ж17Б	Pentood, suursagedusele	6,3	0,3	100 250	—3 —3	100 100	2,9 3,0	0,9 0,8	1,6 1,7	700 1500	1100 2500	—	2,5	0,005	6,0	7,0	K M	6
9003 6K19П	Pentood, väike, pikendatud tunnusjoonega, muudetava tõusuga, suursagedusele	6,3	0,15	250	—3	100	6,7	2,7	1,8	700	1400	—	1,7	0,01	3,4	3,0	Kl	26
6K7 6K7Б	Pentood, pikendatud tunnusjoonega, muudetava tõusuga, suursagedusele	6,3	0,3	100 250	—1 —3	100 100	9,5 7,0	2,7 1,7	1,65 1,45	150 800	250 1500	—	2,25	0,005	7,0	12,0	K M	3
6SK7-GT 6K9M 6K9	Pentood, pikendatud tunnusjoonega, suursagedusele	6,3	0,3	100 250	—1 —3	100 100	13,0 9,2	4,0 2,6	2,3 2,0	120 800	2700 1600	—	4,0	0,003	6,0	7,0	K Kl	3
6SK7 6K17Б	Pentood, pikendatud tunnusjoonega, muudetava tõusuga, suursagedusele	6,3	0,3	100 250	—1 —3	100 100	13 9,2	4,0 2,6	2,3 2,0	120 800	2700 1600	—	4,0	0,003	6,0	7,0	K M	6

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6J6 6H1П	Kaksiktriood, väike, genereerimiseks ja võimendamiseks		6,3	0,45	100 150	— —10	— —	8,5 30	— —	5,3 —	7,1 —	38 —	—	1,5	1,6	2,2	0,4	K Kl	48
6H7 6N7	Kaksiktriood, parempoolse tunnusjoonega, võimsuse või pinge võimendamiseks vastutaktlülituses	Pinge võimendamiseks A-klassis (ühe trioodi kohta)	6,3	0,8	250	—3	—	7	—	2,0	16	32	—	5,5	2,4	—	—	K M	33
		Võimsuse võimendamiseks AB-klassis (mõlema trioodi kohta)	6,3	0,8	250	0	—	35	—	—	—	—	10	11	2,4	—	—	K M	
6SN7-GT 6H8	Kaksiktriood, keskmise võimendusteguriga, väikesageduse võimendamiseks (ühe trioodi kohta)		6,3	0,6	90 250	0 —8	— —	10 9	— —	3,0 2,6	6,7 7,7	20 20	—	2,5	3,8	3	1,2	K Kl	34
6SL7-GT 6H9	Kaksiktriood, suure võimendusteguriga, väikesageduse võimendamiseks (ühe trioodi kohta)		6,3	0,3	250	—2	—	2,3	—	1,6	45	70	—	2,5	2,8	3	3,8	K Kl	34
6SC7 6H10	Kaksiktriood, suure võimendusteguriga (ühe trioodi kohta)		6,3	0,3	250	—2	—	2	—	1,4	50	70	—	—	2,4	3	3	K Kl	14
6K6 6П1	Pentood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks		6,3	0,4	100 250 315	—7 —8 —21	100 250 250	9,5 33 28	1,6 5,5 4,0	1,5 2,3 2,1	100 70 75	150 160 160	0,35 3,4 4,5	8,5	—	—	—	K Kl	2

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6V6 6V6-GT 6П2	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	Üks tetrood, A-klass	6,3	0,45	180 250 315	—8,5 —12,5 —13	180 250 225	29 45 34	3,0 4,5 2,2	3,7 4,1 3,8	58 52 77	215 210 290	2,0 4,5 5,5	12	0,7	9,5	7,5	K Kl või M	1
		Kaks tetroodi vastutaktlülituses, AB_1-klass	6,3	0,45	250 285	—15 —19	250 285	70 70	5 4	3,8 3,6	60 65	225 250	10 14	24	—	9,5	—		
6Ф6 6Ф6М 6F6 6П6 6П6Б	Pentood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	Üks pentood, A-klass	6,3	0,7	250	—14	250	34	7,0	2,5	78	195	3,1	10	0,6	7,5	11	K Kl või M	2
		Kaks pentoodi vastutaktlülituses, AB-klass	6,3	0,7	315	—23	285	73	18	—	—	—	10	20	—	—	—		
		Trioodina ükselektrontoru, A-klass	6,3	0,7	250	—20	—	32	—	2,6	2,6	7	0,8	10	—	—	—		
6Л6 6Л6С 6L6 6П3Б	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	Üks jugatetrood, A-klass	6,3	0,9	250 350	—12 —11	250 200	75 50	5,4 3,0	— —	R_A 2,5 4,5	— —	6,5 6,5	20 20	1	12	11	K Kl või M	
		Kaks jugatetroodi vastutaktlülituses, A_1-klass	6,3	0,9	250 270	—16 —17	250 270	120 134	10 11	5,5 —	25 —	135 —	14 18	40 40	—	—	—		

1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6Л6 6Л6С 6L6 6П3Б	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	Kaks jugatetroodi vastutaktlülitusega, AB_1-klass	6,3	0,9	360 360	—22 —22	270 270	88 88	5 5	— —	R_A 6,6 3,8	— —	26 18	40 40	— —	— —	— —		1
		Üks elektrontoru trioodina, A-klass	6,3	0,9	250	—20	—	40	—	4,7	1,7	8	1,4	10	—	—	—		
6Г7 6Q7 6P7Б	Duodiood-triood, suure võimendusteguriga, detekteerimiseks ja väikesageduspinge võimendamiseks		6,3	0,3	250	—3	—	1,1	—	1,2	58	70	—	2	1,4	5	3,8	K M	31
6SQ7 6P17Б	Duodiood-triood, suure võimendusteguriga		6,3	0,3	100 250	—1 —2	— —	0,4 0,9	— —	0,9 1,1	110 90	100 100	— —	2,5	1,6	3,2	3	K M	30
6SR7	Duodiood-triood, detekteerimiseks ja väikesageduse võimendamiseks		6,3	0,3	250	—3	—	9,5	—	9,5	8,5	16	0,3	2,5	2,4	3,6	2,8	K M	30
6J5 6C2Б	Triood, universaalne		6,3	0,3	90 250	0 —8	— —	10 9	— —	3,6 2,6	6,7 7,7	20 20	—	2,5	3,4	3,4	3,6	K M	28
6Ф5 6F5 6C4Б	Triood, väikesageduspinge võimendamiseks		6,3	0,3	250	—2	—	0,9	—	1,5	66	100	—	0,4	2	6	12	K M	29

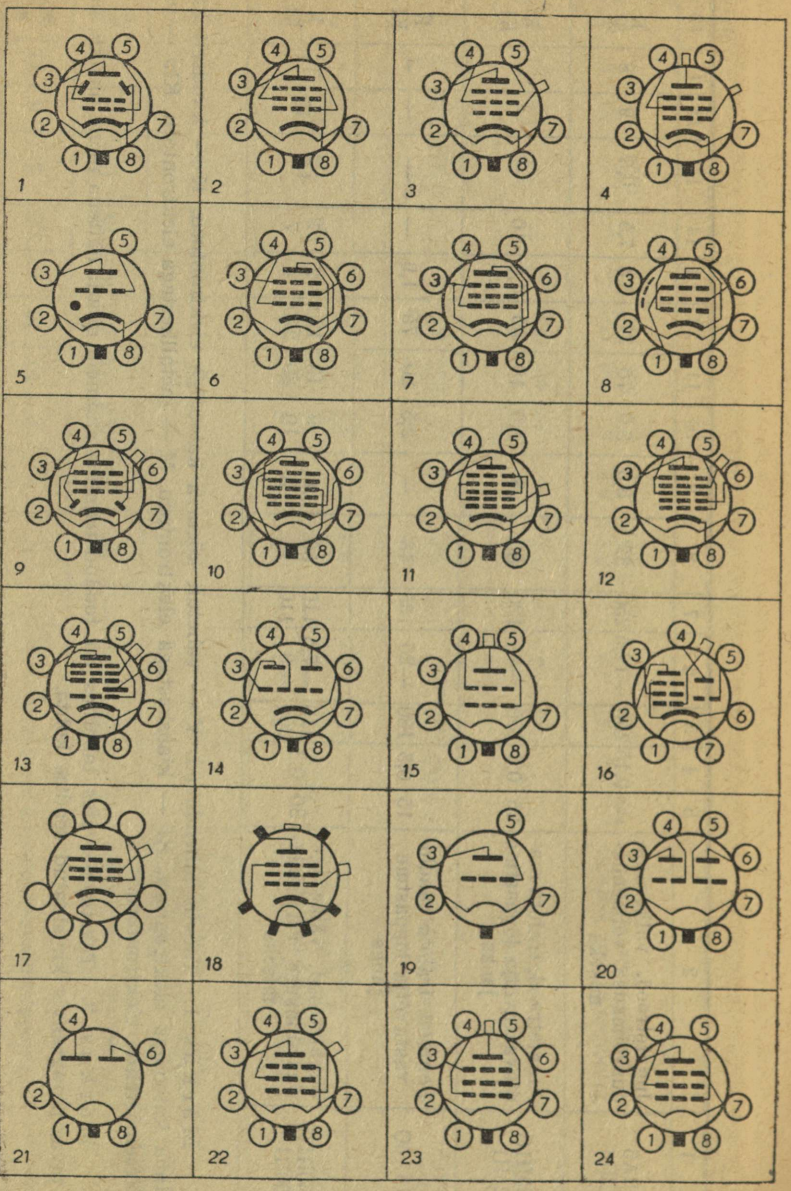
1	2		3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
6C5 6C5B	Triood, universaalne		6,3	0,3	250	—8	—	8	—	2	10	20	—	2,6	2	3	11	K M	28
6B4-G 6C6	Triood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	Üks triood, A-klass	6,3	1,0	250	—45	—	60	—	5,3	0,8	4,2	3,5	15	16	7,5	5,5	K Kl	19
		Kaks trioodi vastutaktlülituses, AB-klass	6,3	1,0	300	—62	—	80	—	—	R_A 3	—	15	30	16	7,5	5,5	K Kl	
9002 6C8II	Triood, väike, väga suurte sageduste detekteerimiseks ja genereerimiseks		6,3	0,15	90 135 180 250	—2,5 —3,8 —5,0 —7,0	— — — —	2,5 3,5 4,5 6,3	— — — —	1,7 1,9 2,0 2,2	14,7 13,2 12,5 11,4	25 25 25 25	—	1,6	1,4	1,2	1,1	K Kl	47
6F7 6KC7	Triood-pentood		6,3	0,3	100 250 250	—3 —3 —10	— 100 100	3,5 6,5 2,8	— 1,5 0,6	0,45 1,1 —	18 850 —	8 900 —			2,0 0,008 0,008	5 3,2 3,2	4 12 12	K M	16
6ST7	Duodiood-triood, universaalne		6,3	0,15	100 250	—1,5 —3	— —	0,3 1,2	— —	0,68 1,05	95 62	65 65	—	—	1,7	1,8	3,1	K	—
6K8	Triood-heksood, sageduse muundamiseks		6,3	0,3	100 250	—3 —3	— 100	2,3/3,8 2,5/3,8	6,2 6,0	S_{mn} 3 0,3	50 500	150 —	— —	— —	1,1 0,03	6 6	5 5	K Kl M	13
RV-12-P-2000 12Ж1Л	Pentood, suursagedusele		12,6		220	—	140	—	—	1,5	1500	2250	—	2	0,005	—	—	K Klv	18

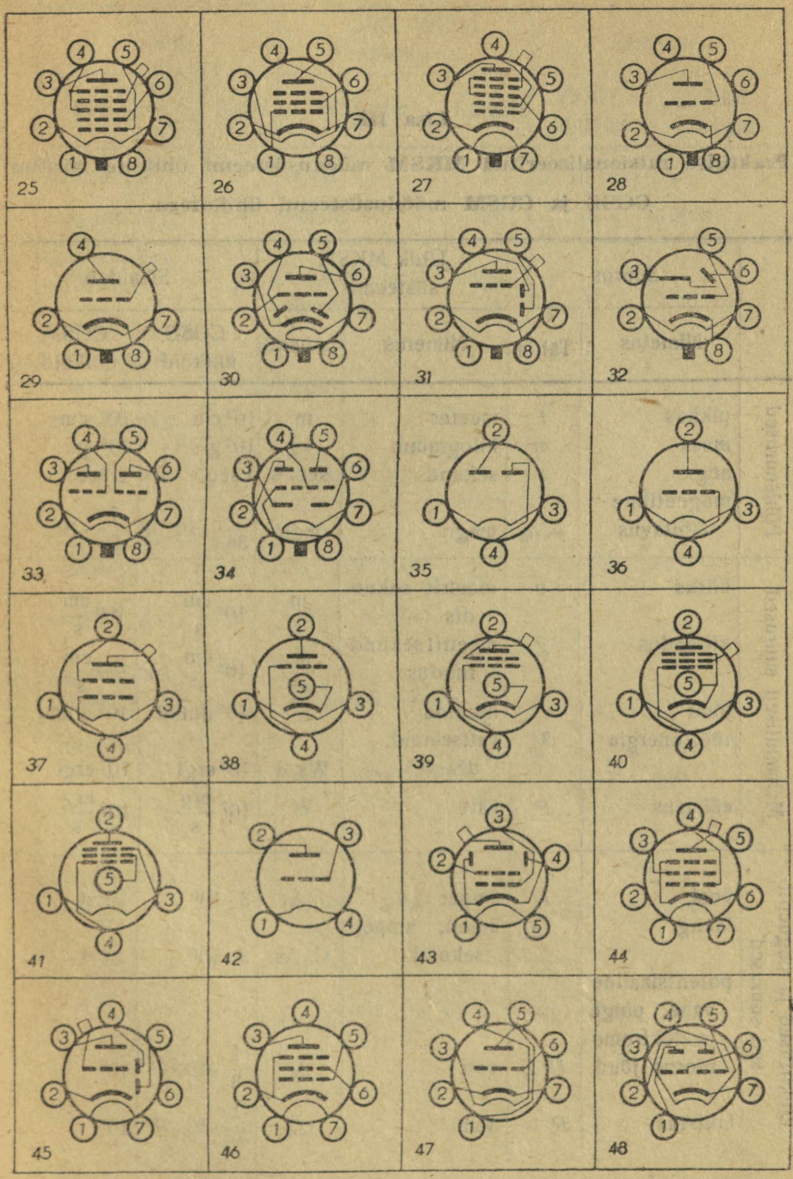
1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12	13	14	15	16	17	18	19
12A6 12П6	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	12,6	0,15	250	—12,5	250	32	3,5	3,0	70	210	3,4	7,5	0,3	9	8	K M	1
25П1С 25П1	Jugatetrood, trafota raadiovastuvõtja lõppastme jaoks	25	0,3	200	—	120	80	8	6,5	10	65	1,6	10	—	—	—	K Kl	1
15A6С	Pentood, trafota raadiovastuvõtja lõppastme jaoks	15	0,3	180	—20	135	48	—	2,5	30	75	1,9	—	—	—	—	K Kl	—
30П1М 30П1	Jugatetrood, väikesagedusvõimsuse võimendamiseks	30	0,3	110 200	—7,5 —8	110 110	50 48	6 3	9 10	13 30	130 270	2 4	7 7	1,5	19	11	K Kl	1

Märkus 1. Tabelis tähendavad: *V* — vahetult köetava katoodiga elektrontoru, *K* — kaudselt köetava katoodiga elektrontoru, *Kl* — klaaskestaga elektrontoru, *M* — metallkestaga elektrontoru, *Klv* — väikesemõõteline elektrontoru.

Märkus 2. Tekstis olevates tabelites on toodud tehnilisi andmeid ainult näitena mõne üksiku, vastavas paragrahvis kirjeldatud seadise kohta.

Lisa II. Elektrontorude soklilülitused.




25
26
27
28
29
30
31
32
33
34
35
36
37
38
39
40
41
42
43
44
45
46
47
48

Lisa III.

Praktilise ratsionaliseeritud MKSM mõõdusüsteemi ühikute võrdlus CGSE ja CGSM mõõdusüsteemi ühikutega.

	Suurus		Ühik MKSM süsteemis		Sisaldab	
	Nimetus	Tähis	Nimetus	Lühend	CGSE ühikuid	CGSM ühikuid
Põhisuurused	pikkus	l	meeter	m	10^2 cm	10^2 cm
	mass	m	kilogramm	kg	10^3 g	10^3 g
	aeg	t	sekund	sec, s	1 sec	1 sec
	magnetiline läbitavus	μ, μ_0	magn	mgn	$\frac{1}{36\pi} \cdot 10^{-13}$	$\frac{1}{4\pi} \cdot 10^7$
Mehaanilised suurused	kiirus	v	meetrit sekundis	$\frac{m}{s}$	$10^2 \frac{cm}{s}$	$10^2 \frac{cm}{s}$
	kiirendus	g	meetrit sekundruudus	$\frac{m}{s^2}$	$10^2 \frac{cm}{s^2}$	$10^2 \frac{cm}{s^2}$
	jõud	F	njuuton	n	10^5 düüni	10^5 düüni
	töö, energia	W	vattsekund, džaul	Ws, J	10^7 ergi	10^7 ergi
	võimsus	P	vatt	W	$10^7 \frac{erg}{s}$	$10^7 \frac{erg}{s}$
Elektrilised ja magnetilised suurused	vool	I	amper	A	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
	laeng	Q	kulon, ampersekund	C, As	$3 \cdot 10^9$	10^{-1}
	potentsiaalide vahe, pinge ja elektromotoorne jõud	U, E	volt	V	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-2}$	10^8
	takistus	R	oom	Ω	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$	10^9

	Suurus		Ühik MKSM süsteemis		Sisaldab	
	Nimetus	Tähis	Nimetus	Lühend	CGSE ühikuid	CGSM ühikuid
Elektrilised ja magnetilised suurused	mahtuvus	C	farad	F	$9 \cdot 10^{11}$ cm	10^{-9}
	magnetvoog	Φ	veeber	Wb	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-2}$	10^{8} Mx
	magnetvälja tihedus	B	veebrit ruutmeetrile	$\frac{\text{Wb}}{\text{m}^2}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-6}$	10^{4} Gs
	induktiivsus ja ühisinduktiivsus	L, M	henri	H	$\frac{1}{9} \cdot 10^{-11}$	10^{9} cm
	magneetimisergutus ehk läbivoogus	Θ	amperkeerd, amper	Aw, A	$12\pi \cdot 10^{9}$	$4\pi \cdot 10^{-1}$ Gb
	magnetvälja tugevus	H	amprit meetrile	$\frac{\text{A}}{\text{m}}$	$12\pi \cdot 10^{7}$	$4\pi \cdot 10^{-3}$ Oe
	voolutihedus	j	amprit ruutmeetrile	$\frac{\text{A}}{\text{m}^2}$	$3 \cdot 10^{5}$	10^{-5}
	dielektriline nihkekonstant	$\varepsilon, \varepsilon_0$	faradit meetrile	$\frac{\text{F}}{\text{m}}$	$36\pi \cdot 10^{9}$	$4\pi \cdot 10^{-11}$
	elektrivälja tugevus	E	volti meetrile	$\frac{\text{V}}{\text{m}}$	$\frac{1}{3} \cdot 10^{-4}$	10^{6}
	dielektriline nihe ehk elektrivälja tihedus	D	kulonit ruutmeetrile	$\frac{\text{C}}{\text{m}^2}$	$3 \cdot 10^{5}$	10^{-5}

Tabelid.

12. 1. Ergutus- ja ionisatsioonipotentsiaalid elektronvoltides.
15. 1. Katoodi materjali iseloomustavad tegurid.
15. 2. Tegurid aktiveeritud pinnaga katoodi emissioonvoolu arvutamiseks.
29. 1. Katoodide tehnilised andmed.
32. 1. Volframtraadist katoodi aurumine ja viljakus.
35. 1. Andmed anoodide valmistamiseks kasutatavate materjalide kohta.
43. 1. Lihtsaimate alaldajate pingete ja voolude väärtuste suhted.
45. 1. Väikese võimsusega suundtorude tehnilised andmed.
45. 2. Kahe elektroodiga keskmise võimsusega elektrontorude tehnilised andmed.
66. 1. Võimsusvõimendusastmete andmeid trioodide valikuks.
71. 1. Mõnede trioodide tehnilised andmed.
71. 2. Traatsidetehnikas kasutatavad võimendustrioodid.
79. 1. Generaatorpentoodide tehnilised andmed.
79. 2. Generaatorpentoodid telegraafi talitlustingimustes.
83. 1. Mitme võrega elektrontorude tehnilised andmed.
84. 1. B-klassi lülituse tarbeks valmistatavate kaksiktrioodide tehnilised andmed.
87. 1. Ülisuursageduslike võimendus-elektrontorude tehnilised andmed.
92. 1. Pingestabilisaatortorude tehnilised andmed.
95. 1. Gasotronide tehnilised andmed.
96. 1. Tiratronide tehnilised andmed.
97. 1. Elavhõbedaaur-suunajate tehnilised andmed.
98. 1. Ignitronide tehnilised andmed.
104. 1. Huumlampide tüüpe.

Märkus: Tabelite andmed on võetud teostest: Г. Г. Гинкин, 1948 г. Справочник по радиотехнике, ja В. Ф. Власов, 1943 г. Электровакуумные приборы.

Valemite tähised.

A_e — elektroni liikumise kiirendamiseks kulutatud töö.
B — magnetvälja tihedus.
B_{kr} — magnetvälja kriitiline tihedus.
C — mahtuvus.
C_G — võrevooluringis olev mahtuvus.
C_{GA} — võre ja anoodi vaheline mahtuvus.
C_{GtA} — tüürvõre ja anoodi vaheline mahtuvus.
C_{GtGv} — tüürvõre ja varivõre vaheline mahtuvus.
C_{GvA} — varivõre ja anoodi vaheline mahtuvus.
C_{KA} — katoodi ja anoodi vaheline mahtuvus.
C_{KG} — katoodi ja võre vaheline mahtuvus.
C_{KGt} — katoodi ja tüürvõre vaheline mahtuvus.
C_{sis} — sisendmahtuvus.
$C_{väl}$ — väljemahtuvus.
C_Z — kooremvõnkeringi kondensaatori mahtuvus.
d — kallutuselektroodide vahekaugus.
d_K — katoodi läbimõõt.
d_{K0} — katoodi algläbimõõt.
D — läbitavus.
e — elektroni elektrilaeng; loomulikkude logaritmide alus.
E — elektrivälja tugevus.
E_e — elektroni poolt tekitatud elektrivälja tugevus.
E_G — kallutuselektroodide vahelise elektrivälja tugevus.
E_K — elektrivälja tugevus katoodi pinnal.
f — sagedus.
f_{eB} — elektroni poolt magnetväljas tehtavate ringide arv sekundis.

f_{mn} — muundsagedus.
f_{os} — ostsillaatori sagedus.
f_s — antennist saabuva voolu (signaalvoolu) sagedus.
f_0 — võnkeringi omasagedus.
F — sagedusriba laius.
F_B — magnetväljas mõjuv jõud.
F_e — elektronile mõjuv mehaaniline jõud.
G — kaal; hindetegur.
h — Planck'i konstant.
H — magnetvälja tugevus.
i — voolu hetkväärtus.
i_A — anood-vahelduvvoolu hetkväärtus.
i_{KG} — katoodi ja võre vahelist mahtuvust läbiv vool.
i_{pR} — pulseerivvool kooremtakistis.
I — vool; vahelduvvoolu puhul selle tippväärtus.
I_A — anood-vahelduvvoolu amplituud.
$I_{A\,max}$ — suurim anoodvool.
I_C — kondensaatorit läbiva voolu amplituud.
$I_{ef\,F}$ — kütte-vahelduvvoolu efektiivväärtus.
I_L — pooli läbiva voolu amplituud.
I_{pA} — ühesuunalise anoodvoolu pulsi tippväärtus.
$I_{pA\,max}$ — maksimaalselt lubatav voolutugevus.
I_{pk} — ühesuunalise pulseerivvoolu keskväärtus.
I_{pR} — kooremtakistit läbiv ühesuunaline vool.
I_Z — võnkeringis võnkuva voolu amplituud.
$\underline{I}$ — alalisvool.
$\underline{I}_A$ — anood-alalisvool.
$\Delta\underline{I}_A$ — anoodvoolu tugevuse muutus.
$\underline{I}_{A0}$ — anoodvool, kui anoodpinge või võrepinge on null.
$\underline{I}_e$ — emissioonvool.
$\underline{I}_{eT}$ — temperatuurist sõltuv emissioonvool.
$\underline{I}_{eü}$ — üldine emissioonvool.
$\underline{I}_E$ — elektronindikaatori ekraanivool.
$\underline{I}_F$ — küttevool.

I_G — vool võrevooluringis.
I_{Ge} — elektronide poolt tekitatud võrevool.
I_{Gi} — ioonide poolt tekitatud võrevool.
I_{G_r} — ruumlaengu-võrevool.
I_{Gs} — sulgvõrevool.
I_{Gt} — tüürvõrevool.
I_{G0} — võrevool, kui võrepinge on null.
I_H — huumlampi läbiv vool.
I_K — katoodvool.
$I_{K\,max}$ — katoodi maksimaalne koormusvool.
I_R — takistit R läbiv alalisvool.
I_{RV} — raudtakistit läbiv vool.
I_s — küllastusvool.
$I_{S\,max}$ — stabilisaatortoru läbiva voolu maksimaalväärtus.
$I_{S\,mtn}$ — stabilisaatortoru läbiva voolu minimaalväärtus.
I_Φ — vool fotoraku vooluringis.
j_{eT} — emissioonvoolu pindtihedus.
$j_{eü}$ — üldise emissioonvoolu pindtihedus.
k — fotorakku iseloomustav tegur.
k_b — Boltzmann'i konstant.
k_{mn} — muundustegur.
k_σ — kordistustegur.
K — moonutustegur; ruumlaengu-tegur.
l — pikkus.
l_K — katoodi pikkus.
l_{KA} — katoodi ja anoodi vaheline kaugus.
l_p — elektronide keskmine vaba tee pikkus.
L — induktiivsus.
L_Z — võnkeringi pooli induktiivsus.
m_e — elektroni mass.
n — arv; elektronide arv; liitrite arv minutis.
n_e — elektronide üldarv.
p — gaasi rõhk.
P — vahelduvvõimsus.

P_F — kütte-vahelduvvõimsus.
P_{nT} — transformaatori nimivõimsus.
P_R — kooremtakistis soojuseks muunduv vahelduvvõimsus.
$P_{R\,max}$ — kooremtakistis soojuseks muunduva vahelduvvõimsuse maksimaalväärtus.
P_Z — väljevõimsus; võnkeringi antav vahelduvvõimsus.
$P_{Z\,max}$ — võnkeringi antava vahelduvvõimsuse maksimaalväärtus.
$\underline{P}$ — alalisvõimsus.
$\underline{P}_A$ — anoodkao võimsus; anoodi erikoormus.
$\underline{P}_{A\,max}$ — maksimaalselt lubatav anoodkadu.
$\underline{P}_{AP}$ — anoodvooluallikast võetav alalisvõimsus.
$\underline{P}_F$ — kütte-alalisvõimsus.
Q_A — anoodi pind; elektroodi pind.
Q_K — katoodi pind.
r — raadius.
r_A — anoodi raadius.
r_e — elektroni raadius.
r_{eB} — elektroni magnetväljas liikumise tee raadius.
r_K — katoodi raadius.
R_F — takisti küttevooluringis.
R_G — võre ja katoodi vaheline takistus.
R_i — sisetakistus.
$R_{i\,dem}$ — sisetakistus demoduleerimisel.
R_{iG} — võre-sisetakistus.
R_{ik} — keskmine sisetakistus.
R_L — paispooli tegevtakistus.
R_v — välisvooluringi takistus.
R_Z — kooremtakisti.
s — tee pikkus.
s_{KA} — katoodi ja anoodi vahekaugus.
s_{KG} — katoodi ja võre vahekaugus.
S — tõus.
S_d — dünaamiline tõus.

S_k — keskmine tõus.
S_{mn} — muundustõus.
S_{os} — ostsillaatorsüsteemi tõus.
$S_ü$ — heptoodi tetroodosa tõus.
t — aeg; temperatuur °C; iga.
t_{eB} — aeg, mis kulub elektronil magnetväljas ringikujulise teekonna läbimiseks.
t_K — katoodi iga.
T — perioodi kestus; absoluutne temperatuur °K.
$T_{A\,max}$ — lubatav maksimaalne anoodi temperatuur.
T_K — katoodi absoluutne temperatuur °K.
u — vahelduvpinge hetkväärtus.
Δu — pingelangu hetkväärtus.
u_e — kahina ekvivalentpinge väärtus.
u_G — vahelduvpinge hetkväärtus võrevooluringis.
u_R — vahelduvpinge hetkväärtus kooremtakistil.
u_T — soojuslikust liikumisest tingitud kahinapinge väärtus.
u_{Te} — kahina ekvivalentpinge koguväärtus.
U — vahelduvpinge tippväärtus.
$U_{A\,kr}$ — kriitiline anoodpinge.
U_C — pinge amplituud kondensaatori klemmidel.
U_{ef} — vahelduvpinge efektiivväärtus.
U_{efF} — küttepinge efektiivväärtus.
U_G — kallutuselektroodide vaheline pinge; vahelduvpinge amplituud võrevooluringis.
U_{pA} — elektrontoru anoodi ja katoodi vahelise pulseerivpinge tippväärtus.
U_{pC} — kondensaatori klemmide vahelise pulseerivpinge tippväärtus.
U_{sis} — sisendpinge amplituud.
ΔU_T — pingelang voolu tippväärtuse puhul transformaatoris.
$U_{väl}$ — väljepinge amplituud.
U_Z — võnkeringi klemmide vahelise pinge amplituud.

U_ω — suursagedusliku vahelduvpinge amplituud.
U_Ω — helisagedusliku vahelduvpinge amplituud.
U — alalispinge.
U_A — anoodi alalispinge; pinge anoodi ja katoodi vahel.
ΔU_A — anoodpinge väärtuse muutus.
U_{Aos} — ostsillaatori anoodpinge.
U_{AP} — anoodpingeallika pinge.
U_e — väljumistöö.
U_E — pinge elektronindikaatori ekraani ja katoodi vahel.
U_F — alalis-küttevool.
U_G — võre ja katoodi vaheline alalispinge.
ΔU_G — võrepinge muutus.
$U_{G\,opt}$ — eelpinge soodsaim väärtus.
U_{GP} — võre-eelpingeallika pinge.
U_{Gr} — ruumlaenguvõrepinge.
U_{Gs} — sulgvõrepinge.
U_{Gv} — varivõrepinge.
U_{G0} — võre sulgepinge.
U_H — huumlambi klemmide vaheline pinge.
U_m — elektrivälja potentsiaali väärtus.
ΔU_n — nimipingelang.
U_P — toiteallika pinge.
ΔU_R — kooremtakisti klemmide vaheline pinge.
U_{RV} — pinge raudtakisti klemmidel.
U_s — küllastuspinge.
U_t — tüürpinge.
U_T — temperatuuripinge.
U_v — vastupinge.
$U_{v\,max}$ — lubatav maksimaalne vastupinge.
U_0 — elektronide algkiirus pärast katoodist väljumist.
v_A — elektroni kiirus anoodi juures.
v_e — elektroni liikumise kiirus.
v_k — elektronide keskmine kiirus.
v_x — elektroni kiirus x-telje sihil.

v_y — elektroni kiirus y-telje sihil.
v_0 — elektroni algkiirus.
V — katoodi viljakus, võimendustegur.
V_d — demodulaatorastme võimendustegur.
w — transformaatori mähiste keerdude arv.
W_e — liikuva elektroni kineetiline energia.
Z — näivtakistuslik koorem.
$\ddot{u}$ — transformaatori ülekandesuhe.
α — nurk.
ε — ruumi dielektriku-konstant.
η — kasutegur.
Θ — lõikenurk.
λ — lainepikkus.
λ_0 — kriitiline lainepikkus.
μ — võimendustegur.
μ_d — dünaamiline võimendustegur.
μ_{dem} — võimendustegur demoduleerimisel.
μ_{GsA} — võimendustegur katood—sulgvõre—anood.
μ_{GtA} — võimendustegur katood—tüürvõre—anood.
μ_{GtGv} — võimendustegur katood—tüürvõre—varivõre.
μ_{GvA} — võimendustegur katood—varivõre—anood.
μ_{os} — ostsillaatorsüsteemi võimendustegur.
$\mu_{\ddot{u}}$ — heptoodi tetroodosa võimendustegur.
ν — kiirgusenergia sagedus.
ν_0 — kriitiline sagedus.
ξ — anoodpinge kasutustegur; suhteline soojuskiirguse tegur.
σ — sekundaaremissiooni tegur.
φ — elektriline potentsiaal; nurk.
Φ — valgusvoog.
ω_0 — võnkeringi omavõnke-nurksagedus.

Tähestikuline sisunäitaja.

aktiveeritud katood 60, 74, 84, 85, 89, 169
alaldaja 114, 129
anood 12, 22, 24, 42, 88
anood-demodulatsioon 206
anoodi erikoormus 90
anoodi tagasimõju 180
anoodkadu 109, 119, 141, 190, 221, 215, 245, 366
anoodpatarei 12
anoodpinge 82, 92, 97
anoodpinge kasutustegur 215, 247
anoodvool 97
anoodvooluring 12, 97
anoodvõre 223
argoon-gasotron 301
astmeliselt toimuv ioniseerimine 47

baariumiga kaetud katood 29, 51, 77, 75, 105, 169
Boltzmann'i konstant 54

demodulaator 129, 274
demodulaatorastme võimendustegur 212
demodulaatortoru 20, 214
demodulatsiooni tunnusjoon 207
diood 12, 27, 91, 130, 136, 263, 348
dioodliiteline elektrontoru 263
diood-pentood 14, 28, 263
diood-triood 14, 28, 263
dioodvoltmeeter 137
duodiood 27, 263
duodiood-pentood 263
duodiood-triood 263
Dushman'i valem 58, 83, 345
dünaamiline demodulatsiooni tunnusjoon 208
dünaamiline parameeter, trioodi 183
dünaamiline sisemahtuvus, trioodi 191
dünaamiline tunnusjoon, trioodi 180, 197
dünaamiline tõus, trioodi 183
dünaamiline võimendustegur, trioodi 184, 196
dünatronefekt 63

ebalineaarmoonutus 246, 259, 262
eestvalgustatav fotoelement 325
elavhõbedaaur-suunaja 11, 15, 19, 308
elektrilahendusega elektrovaakumseadis 10, 68
elektrilahenduseta elektrovaakumseadis 10, 343
elektroni kriitiline kiirus 46
elektronindikaator 22, 27, 28, 329
elektroni väljumistöö 56, 63, 66, 71
elektronkiire-kommutaator 341
elektronkiire-ostsillograaf 340
elektronkiire-ostsilloskoop 340
elektronkiiretoru 10, 22, 37, 333
elektronkiire-tüüritav generaatortoru 269

elektronkordistaja 246, 321
elektron-magnetron-generaator 280
elektrontoru endakahin 345
elektrontoru-generaator 14, 205
elektrontoru kest 22
elektrontoru kolb 22
elektrontoru kontaktjalg 22, 23, 24
elektrontoru parameeter 157, 163, 175
elektrontoru pesa 25
elektrontoru tüübitähis 27
elektrontoru-voltmeeter 213
elektronvolt 36, 47, 93
elektroodide tugitraadid 22, 69
emissioonvool 56
endavõnked 193
energia kvant 65
ergutuspotentsiaal 47

fasitron 342
fotoefekt 65, 315
fotoefekti selektiivsus 67
fotoelektriline elektrontoru 15, 315
fotoelektriline seadis 18, 21, 315
fotoelement 21, 315, 325
fotokatood 21, 315, 321
fotokordistaja 21, 320
fotorakk 15, 21, 285, 323
fotoraku viljakus 318, 325
fototakisti 324

gaas-fotorakk 21, 316
gaaslahendi 293
gaaslahendus-plasma 290, 297
gasotron 11, 15, 19, 27, 285, 296, 303
generaatorpentood 247
generaatortoru 16, 19, 71, 214
generaatortriood 88, 217
getter 52

heksood 14, 20, 250, 255, 259
helisageduspentood 28, 243
heptood 14, 20, 253
hindetegur 157, 187
huumlahendus 286
huumlahendusseadis 16, 286, 290, 295, 327
huumlambi hüsterees 329
huumlamp 21, 327
huumsuunaja 19, 295
huumvalgus 50, 287, 327

ideaalne tunnusjoon 166
ignitron 27, 312
ikonoskoop 342
ionisatsioonipotentsiaal 47
ioonseadis 10, 11, 16, 285, 295
jugatetrood 27, 234

kahelisdiood-triood 263
kahina-nivoo 243, 345
kaksikdiood 14, 91, 139
kaksikdiood-triood 14, 263
kaksik-jugatetrood 27
kaksikpentood 27
kaksiktriood 27, 261
kallutuselektrood 37, 334
kallutuspinge aparaat 50
karbiidkatood 29, 74, 77
katoodi elektriline keskpunkt 106
katoodi emissioonvoolu tunnusjoon 82
katoodi iga 84, 87, 320
katoodi maksimaalselt lubatav temperatuur 84
katoodi viljakus 70, 71, 77, 84, 85
katoodkiirétoru 333
katoodvõre-elektrontoru 222

kaudselt köetav katood 24, 69, 79, 102, 107, 169
Kellog'i valem 102
kenotron 13, 19, 92, 139, 141
keraamika-elektrontoru 22
kiirusetüüritav elektrontoru 270
klaas-elektrontoru 22, 367
klüstron 15, 21, 27, 270
koaksiaaljuhe 272, 281
kolme elektroodiga elektrontoru 13, 19, 142
kolmefaasine poolperiood-alaldaja 127
kolmefaasine täisperiood-alaldaja 127
kolme võrega elektrontoru 19, 236
kolmkahendik-astme juhis 98
kontaktpotentsiaal 60, 169
koormuskõverad 125
kordistustegur 64, 265
kustumispinge 49, 328
köetavkatoodiga leeklahendusseadis 17, 296
küllastuspinge 92, 104, 109
kütteniit 70, 87
küttepatarei 12
küttevõimsus 78, 84

lainejuhe 275, 283
lainesuspinge 122
Langmuir'i valem 98
leeklahendus 287
leeklahendusseadis 16, 287
leviva laine võimendustoru 274
liit-elektrontoru 14, 19, 20, 263
lubatav maksimaalne anoodi temperatuur 90, 298
lõikenurk 116
läbitavus 149, 156, 158

maandatud võrega triood 27
magnetron 15, 21, 27, 41, 277
maksimaalne vastupinge 111, 121, 140, 300
Maxwell'i tõenäosuse lause 53, 57, 64, 93, 101
metallkestaga elektrontoru 28, 367
modulaatortoru 214
modulaatortriood 217
moonutustegur 190
muudetava tõusuga elektrontoru 28, 232, 243, 250
muundusheksood 251
muundusheptood 28, 253, 260
muundustoru 20

negatiivse takistuse tüüpi magnetrongeneraator 280
neutraliseeriv lülitus 205
nimi-küttepinge 111
nimi-küttevool 111
nugivõnkumised 170, 243

oksüüdkatood 29, 51, 76, 77, 82, 87, 102, 105
oktaalsokkel 25
oktood 14, 20, 258

paispoolsidestusega võimendusaste 196
pentood 14, 19, 27, 236, 258, 263
pingestabilisaator 50, 290
pingevõimendusaste 194
pingevõimendustoru 19, 214
Planck'i konstant 65
poolperiood-alaldaja 114
poolvabad elektronid 53

raadiolamp 11, 19, 20, 22
raudtakisti 343

raudvesiniktakisti 10, 87, 343
Richardson'i valem 57, 83
ruum-fotorakk 21, 315
ruumlaeng 83, 92, 97, 99
ruumlaenguvõre 222
ruumlaenguvõre-elektrontoru 222

saatetoru 21, 78
Schottky efekt 61, 76, 105
segustusheptood 28, 253
sekundaaremissiooni-tegur 64, 265, 322
sekundaarkatood 21, 264, 321
seleen-fotoelement 326
seleen-fotorakk 325
sildlülitus 126
silumisfilter 124
sise-fotoefektiga seadis 21, 315, 323
sisemahtuvus 190, 228
sisendmahtuvus 193, 232
sisetakistus 107, 155, 156, 159, 164, 188, 231, 240
sokkel 22, 24
sokli naba 25
staatiline sisemahtuvus 191
suhteline soojuskiirguse tegur 90
sulgepinge 168
sulgvõre 236, 258
suundtoru 112
suundus-elektrontoru 19, 113
suursagedusliku vahelduvvoolu suunaja 91
suursageduspentood 28, 242
suursagedusvõimendaja 200
sõltuva gaaslahendusega seadis 17, 285

tagantvalgustatav fotoelement 325
tahke fotorakk 21, 34, 315, 323
takistisidestuses võimendusaste 194
tallium-fotorakk 324
talliumsulfiid-fotoelement 326
tantaalkatood 71
tehnilise vahelduvvoolu suunaja 91
temperatuuripinge 55, 101
termoemissioon 177, 288
tetrood 14, 19, 27, 223
tiratron 15, 27, 303, 313
toreeritud katood 29, 51, 72, 77
transformaatorsidestuses võimendusaste 198
triood 13, 19, 27, 142, 223, 259, 263
triood-heksoodmuundaja 28, 259
trioodi sisaldav elektronindikaator 28, 330
trioodi staatiline tunnusjoon 143
tseesiumiga kaetud katood 74, 322
tsüklodos 342
tsüklofon 341
tunnusjoone keskmine tõus 107
tunnusjoonte sari 131, 144
tunnussari 144
tõru-elektrontoru 268
tõrukujuline elektrontoru 28
tõukeionisatsioon 47, 176
tõus 105, 107, 115, 155, 156, 158, 160, 165, 232, 240
täisperiood-alaldaja 120, 139

vaakum-fotorakk 21, 316
vaakumitegur 177
vahetult köetav katood 69, 82, 87, 104, 106, 327
vaikne sõltumatu elektrilahendus 286
Wallaur'i valem 178
varivõre 223
varivõretoru 223

vaskoksüduul-fotoelement 326
vastutaktlülitus 195, 261
veega jahutatava anoodiga generaatortoru 15, 89, 217
vesijahutusega anood 89
vesijahutusega elektrontoru 88
vesijahutusega suursagedusvõimendus-triood 218
volframkatood 52, 71, 77, 105
võimsusvõimendusaste 198, 261
võimsusvõimendustoru 19, 214
võimsusvõimendus-triood 215
võre-demodulatsioon 206
võre-sisetakistus 157
võretüüritav generaatortoru 269
võrevool-tõus 157
väikesagedusvoolu alaldaja 114
väikese võimsusega elektrontoru 22, 27, 78, 88
välis-fotoefektiga fotoelektriline seadis 21, 315

õõsresonaator 272
õõsresonaatoriga magnetron 281

ülisuursageduslik generaator-elektrontoru 269
ülisuursageduslik võimendus-elektrontoru 266

Sisukord.

Lk.

Eessõna 3
Saateks 5

Esimene osa.

SISSEJUHATUS.

I peatükk.

Üldmõisted.

§ 1. Elektron- ja ioonseadiste määrang 10
§ 2. Elektron- ja ioonseadiste areng 11
§ 3. Elektrovaakumseadiste liigid 16
§ 4. Elektrovaakumseadiste kasutamise otstarve 18
§ 5. Väikese võimsusega elektrontorude (raadiolampide) ehitus 22
§ 6. Väikese võimsusega elektrontorude tüübitähised . . . 27

II peatükk.

Elektronid ja nende liikumine.

§ 7. Aatomi ehitus 30
§ 8. Elektroni omadused 32
§ 9. Elektron elektriväljas 34
§ 10. Elektron magnetväljas 39
§ 11. Elektronide liikumine ebaühtlases elektriväljas 41
§ 12. Elektronide liikumine gaasides 44
§ 13. Elektronid metallis 53

III peatükk.

Elektronide emissioon.

§ 14. Elektronide väljumine metalli pinnast 56
§ 15. Elektronide emiteerimine temperatuuri mõjul 56
§ 16. Elektronide emissioon välise elektrivälja mõjul ja Schottky efekt 61

Lk.

§ 17. Elektronide emissioon metalli pinnale langevate elektronide mõjul ja dünatronefekt 63
§ 18. Elektronide emissioon valguse mõjul ja fotoefekt . . . 65

Teine osa.

ELEKTRONTORUDE ELEKTROODID.

IV peatükk.

Katoodide ehitus.

§ 19. Katoodide üldine liigitelu 68
§ 20. Vahetult köetav katood 69
§ 21. Kaudselt köetav katood 69
§ 22. Volframkatood 71
§ 23. Tantaalkatood 71
§ 24. Toreeritud katood 72
§ 25. Karbiidkatood 74
§ 26. Tseesiumiga kaetud katood 74
§ 27. Baariumiga kaetud katood 75
§ 28. Oksüüdkatood 76
§ 29. Katoodide võrdlusandmed 77

V peatükk.

Katoodide omadused.

§ 30. Katoodi kuumutamine 78
§ 31. Katoodi emissioonvool 82
§ 32. Katoodi iga 84
§ 33. Katoodide kasutamine 86

VI peatükk.

Muud elektroodid.

§ 34. Anoodi ja võrede ehitus 88
§ 35. Anoodi ja võrede materjal 88

Kolmas osa.

KAHE ELEKTROODIGA ELEKTRONTORU.

VII peatükk.

Kahe elektroodiga elektrontoru koostis ja omadused.

§ 36. Koostis 91
§ 37. Ruumlaeng 92

Lk.

§ 38. Anoodvoolu sõltuvus anoodpingest 97
§ 39. Tegelikkude tunnusjoonte erinevus teoreetilistest . . . 99
§ 40. Katoodi kuumutamine vahelduvvooluga 106
§ 41. Elektrilised omadused 107

VIII peatükk.

Kahe elektroodiga elektrontoru kasutamine.

§ 42. Üldpõhimõtted 111
§ 43. Väikesagedusvoolu alaldajad 114
§ 44. Suursagedusvoolu alaldaja ja demodulaator 129
§ 45. Kahe elektroodiga elektrontoru tüübid 139

Neljas osa.

KOLME ELEKTROODIGA ELEKTRONTORU.

IX peatükk.

Kolme elektroodiga elektrontoru koostis ja omadused.

§ 46. Koostis 142
§ 47. Trioodi staatilised tunnusjooned ja nende ülesvõtmine 143
§ 48. Võre toime trioodis 147
§ 49. Läbitavus 149
§ 50. Võimendustegur 152
§ 51. Anoodvoolu sõltuvus anood- ja võrepingest 153
§ 52. Sisetakistus 155
§ 53. Tõus 155
§ 54. Trioodi omadusi väljendavate tunnussuuruste omavaheline seos 156
§ 55. Trioodi parameetrite leidmine staatilistest tunnusjoontest 157
§ 56. Trioodi parameetrite leidmine mõõtmise teel 159
§ 57. Trioodi parameetrite sõltuvus talitlustingimustest . . . 163
§ 58. Võrrandid ideaalsete tunnusjoonte kohta 166
§ 59. Voolujaotus trioodis 168
§ 60. Sekundaaremissiooni toime trioodis 170
§ 61. Vaakumi toime trioodis 175

X peatükk.

Kolme elektroodiga elektrontoru kasutamine.

§ 62. Triood nimi-talitlustingimuste puhul ja Wallaur'i valem 178
§ 63. Trioodi dünaamilised tunnusjooned 180

Lk.
§ 64. Trioodi dünaamilised parameetrid 183
§ 65. Trioodi sisemahtuvused 190
§ 66. Triood helisagedusvõimendajas 193
§ 67. Triood suursagedusvõimendajas 200
§ 68. Triood generaatoris 205
§ 69. Triood demodulaatoris 206
§ 70. Triood mõõteriistades 213
§ 71. Trioodide tüübid 213

Viies osa.

MITMESUGUSED LIIT- JA ERIOTSTARBELISED ELEKTRONTORUD.

XI peatükk.

Kahevõrelised elektrontorud.

§ 72. Ruumlaenguvõrega kahevõreline elektrontoru 222
§ 73. Tetrood 223
§ 74. Muudetava tõusuga elektrontorud 232
§ 75. Jugatetrood 234

XII peatükk.

Viie elektroodiga elektrontorud.

§ 76. Pentoodidest üldiselt 236
§ 77. Suursageduspentood 242
§ 78. Helisageduspentood 243
§ 79. Generaatorpentood 247

XIII peatükk.

Mitme võrega elektrontorud.

§ 80. Heksood 250
§ 81. Heptood 253
§ 82. Oktood 258
§ 83. Triood-heksoodmuundaja 259

XIV peatükk.

Liit- ja eriotstarbelised elektrontorud.

§ 84. Kaksiktriood B-klassi lülituse tarbeks 261
§ 85. Dioodliitelised elektrontorud 263

Lk.

§ 86. Elektronkordistaja 264
§ 87. Ülisuursageduslikud võimendus-elektrontorud 266
§ 88. Ülisuursageduslikud generaator-elektrontorud 269
§ 89. Kiirusetüüritavad elektrontorud. Klüstron 270
§ 90. Magnetron 277

Kuues osa.

IOONSEADISED.

XV peatükk.

Ioonseadiste üldkäsitelu.

§ 91. Ioonseadistest üldiselt 285
§ 92. Pingestabilisaator 290
§ 93. Gaaslahendi 293

XVI peatükk.

Ioonsuunajad.

§ 94. Huumsuunaja 295
§ 95. Gasotron 296
§ 96. Tiratron 303
§ 97. Elavhõbedaaur-suunaja 308
§ 98. Ignitron 312

Seitsmes osa.

FOTOELEKTRILISED JA ELEKTRON-OPTILISED SEADISED.

XVII peatükk.

Fotoelektrilised seadised.

§ 99. Üldpõhimõtted 315
§ 100. Ruum-fotorakk 315
§ 101. Fotokordistaja 320
§ 102. Tahke fotorakk 323
§ 103. Fotoelement 325

XVIII peatükk.

Elektron-optilised seadised.

§ 104. Huumlamp 327
§ 105. Elektronindikaator 329
§ 106. Elektronkiiretorud 333

Lk.

Kaheksas osa.

TÄIENDAVAID KÜSIMUSI.

XIX peatükk.

Mitmesugused seadised ja nähtused.

§ 107. Raudvesiniktakisti 343
§ 108. Elektrontoru endakahin 345

XX peatükk.

Mõõtmiste teostamine elektrovaakumseadiste juures.

§ 109. Üldjuhised 348

Lisad.

I. Väikese võimsusega elektrontorude (raadiolampide) tehnilised andmed 355
II. Elektrontorude soklilülitused 368
III. Praktilise ratsionaliseeritud MKSM mõõdusüsteemi ühikute võrdlus CGSE ja CGSM mõõdusüsteemi ühikutega 370
Tabelid 372
Valemite tähised 373
Tähestikuline sisunäitaja 380

Vastutav toimetaja H. Riikoja.
Keeleline toimetaja F. Arro.

Ladumisele antud 3. V. 1949. Trükkimisele antud 2. VIII 1949. Trükiarv 2000. Paber 56 × 79. Trükipoognaid 24,5. Trükitähti trükipoognas 35.360. Arvutuspoognaid 21,65. MB-04842. Trükikoda „Hans Heidemann", Tartu, Vallikraavi 4. Tellimise nr. 1197.

На эстонском языке.
А. Пыдрус. Электровакуумные приборы.

Rbl. 10.—

A-18165

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00190644 7

Rbl. 10.—

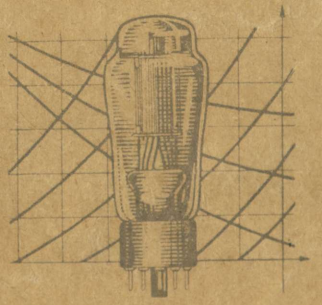
A-18165

TÜ RAAMATUKOGU
1 0300 00190644 7

A. PÕDRUS • ELEKTROVAAKUMSEADISED

A. PÕDRUS

ELEKTROVAAKUM-SEADISED



RK

„PEDAGOOGILINE KIRJANDUS“