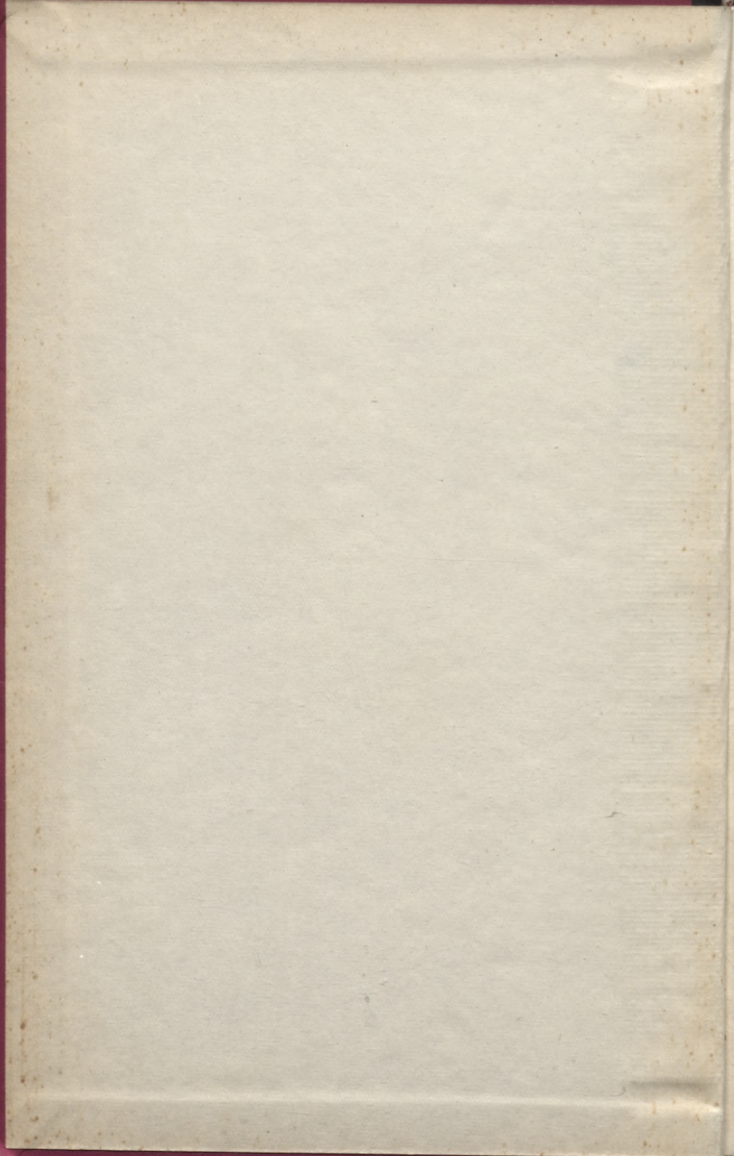
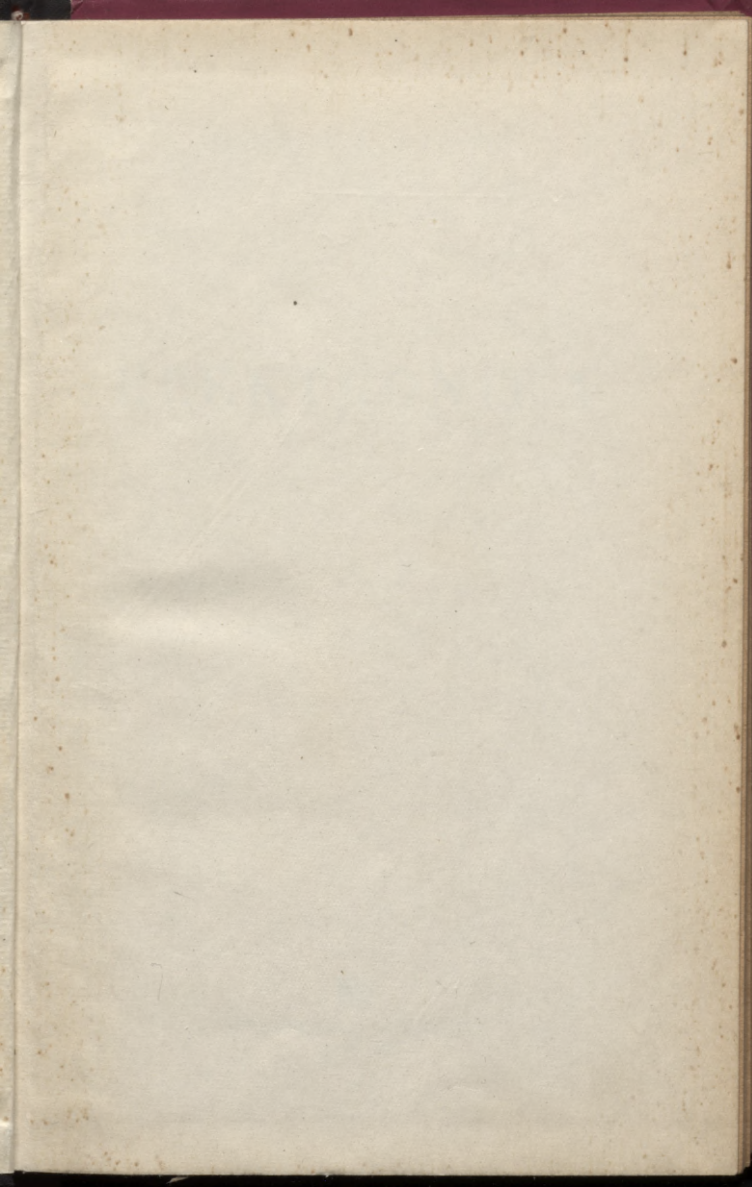


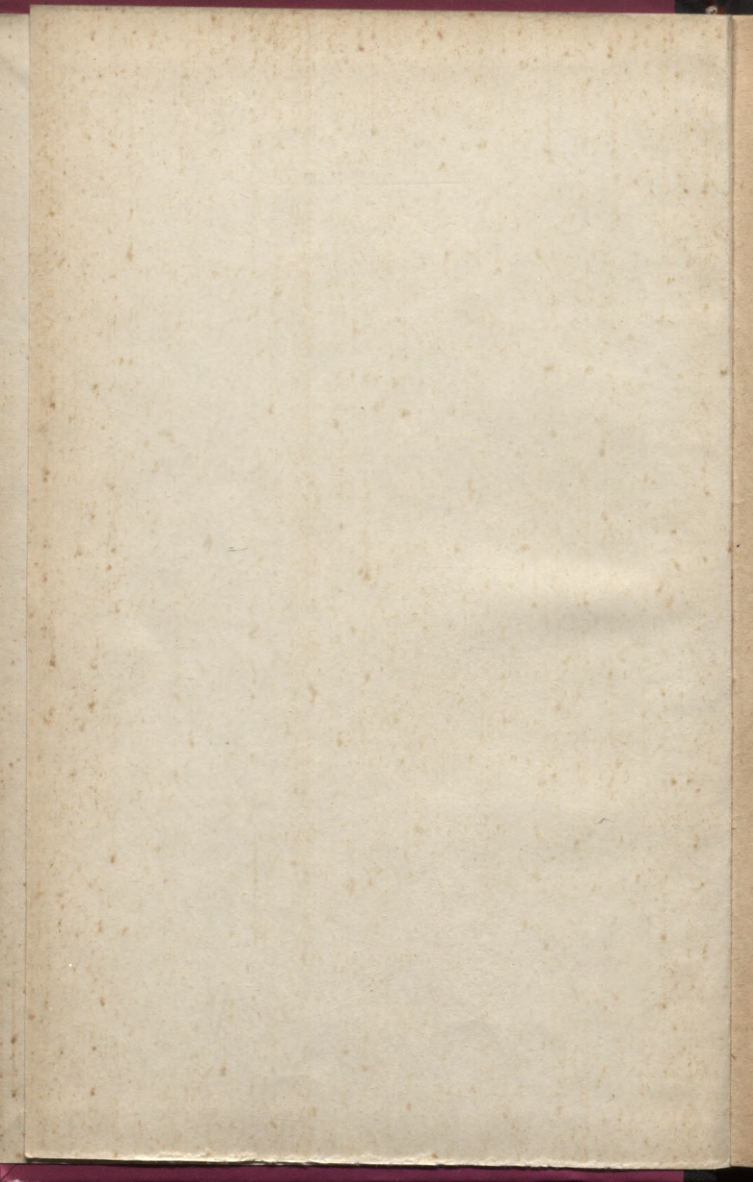
L 70-3  
342

# ELEKTRONIKA









L 70-3  
342

Dub  
L  
621

A. GRUNDULIS, H. STANKE

# ELEKTRONIKA



IZDEVNIECIBA «ZVAIGZNE»  
RIGĀ 1970

L4  
T-1  
MK

680.3  
Gr.886

Vija Lāča Latv. PSR  
Valsts bibliotēka

~~71-~~ 6.330

030 8105796

В книге освещены вопросы электроники в соответствии с учебными программами курса «Основы промышленной электроники», читаемого на инженерно-технических факультетах Латвийской сельскохозяйственной академии и факультетах неэлектротехнических специальностей Рижского политехнического института, а также важнейшие вопросы импульсной техники и теории электро-связи, необходимые для общего образования современного инженера.

Иллюстраций 250, таблиц 3, библиография — 22 названия.

## PRIEKŠVārDS

Mācību grāmata «Elektronika» sarakstīta atbilstoši rūpniecības elektronikas pamatu programmām, pēc kurām šo kursu māca Latvijas Lauksaimniecības akadēmijas inženiertehniskajās fakultātēs un Rīgas Politehniskā institūta neelektriķu specialitāšu fakultātēs. Tā kā šīs programmas ir nedaudz atšķirīgas, grāmatā ievietoto jautājumu loks pārsniedz katru no minētajām programmām, bet ir mazāks nekā elektriķu specialitāšu programmās. Šo specialitāšu studenti grāmatu var lietot par palīg līdzekli.

Ievērojot mūsdienu elektronikas straujo attīstību — īpaši pusvadītāju tehnikā —, autori lielu vērību veltījuši tieši tranzistoru shēmām. Bez tam grāmatā apskatītas jaunas pusvadītāju ierīces — dinistori, tiristori, kanālu tranzistori u. c., bez kuriem šodien nav iedomājamas modernās automātikas iekārtas.

Autori centušies metodiski veidot grāmatu tā, lai studentiem rastos pareizs priekšstats par elektrovakuuma, jonu un pusvadītāju ierīcēm. Kur šādu ierīču izmantošanā ir liela līdzība, tās apskatītas kopīgi, piemēram, 1. nodaļā pusvadītāju un vakuuma diodu izmantošana, 10. nodaļā Zenera diodu un jonu stabilitronu pielietošana.

Turpretī, kur pielietošanā ir principiālas atšķirības, uz tām ir norādīts un dotas attiecīgo mezglu shēmas kā ar pusvadītājiem, tā ar vakuuma iekārtām (piemēram, 7. nodaļā, 9. nodaļā u. c.).

## IEVADS

PSKP kongresu lēmumos vairākkārt atzīmēts, ka mūs-laiku tehnikas progresa raksturīga pazīme ir pāreja uz rūpniecības procesu kompleksu mehanizāciju un automātisku vadīšanu ar elektronu tehnikas palīdzību.

Elektronika ir samērā jauna, strauji augoša zinātnes nozare, kas praktiski radās tikai pirms dažiem gadu desmitiem. Sai īsajā laika posmā tā tomēr ir uzkrājusi tik daudz faktu, ka tos visus nevar atspoguļot vienā grāmatā. Elektronika apskata dažādu elektronu iekārtu un to sastāvā ietilpstošo elementu kvalitatīvos un kvantitatīvos darbības principus, uzbūvi un pielietojumu. Elektronu iekārtas būvē no elektrotehniskiem elementiem (rezistoriem, kondensatoriem, induktivitātes spolēm, transformatoriem u. c.) un elektronu ierīcēm (vakuuma, jonu, pusvadītāju, fotoelektriskām u. c. ierīcēm).

Elektronu iekārtām salīdzinājumā ar mehāniskajām ir virkne priekšrocību — universālums, ātrdarbīgums, liela jutība u. c. —, kas ļauj tās sekmīgi pielietot ne tikai tehnisko zinātņu nozarēs, bet arī lauksaimniecībā un pat tādās humanitārās zinātnēs kā filoloģija, vēsture, ekonomika un citas.

Pēdējos gados ļoti plašu pielietojumu tautas saimniecības un rūpniecības procesu vadīšanā, kā arī dažādu zinātnisku problēmu risināšanā ieguvusi sakaru tehnika, kuras pamatā arī ir elektronika. Tā, piemēram, skaitļošanas tehnikas plašais pielietojums tautas saimniecībā liek organizēt informācijas pārraidi starp dažādiem rūpniecības uzņēmumiem un skaitļošanas centriem.

## 1. nodaļa

### DIODES

#### 1-1. Vakuuma diodes

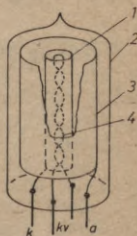
Vakuuma diode ir divelektrodu lampa, kas sastāv no stikla balonā ievietotiem anoda un katoda (1-1. zīm.).

Katoda uzdevums ir emitēt elektronus. Parasti katods izveidots no niķeļa vai volframa caurulītes, kurā ievietots volframa kvēldiegs. Kvēldiegs karsē katodu, tādēļ kvēldiegu neuzskata par atsevišķu elektrodu, bet par katoda sastāvdaļu. Konstruktīvi kvēldiegs parasti satīts pīnītē, bet, lai nebūtu isslēguma, tas pārklāts ar temperatūras izturīgu izolācijas materiālu — alumīnija oksīdu.

Katoda emitēto elektronu daudzums atkarīgs galvenokārt no katoda materiāla, virsmas laukuma un temperatūras. Diezgan bieži, lai palielinātu aktīvo katoda virsmas laukumu, to oksidē un pēc tam reducējot izveido porainu. Parasti niķeļa katodu temperatūra ir 1000—1100 °K, bet volframa 2400—2600 °K.

Kvēldiega karsēšanai izmanto kā līdzstrāvu, tā maiņstrāvu. Parasti kvēles spriegums elektronu lampām ir 6,3 V, bet var būt arī citas kvēles spriegumu nominālās vērtības.

Atsevišķos gadījumos diodes katoda funkcijas izpilda pats kvēldiegs, kas vairākkārt izvērts no augšas uz leju plakanas formas anoda vidū, tādējādi palielinot katoda aktīvo virsmu. Šāda tipa katodus sauc par tiešās kvēles katodiem, turpretī iepriekš apskatītos par netiešās kvēles katodiem jeb sildkatodiem.



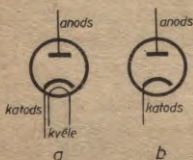
1-1. zīm. Vakuuma diodes uzbūve:

1 — katods, 2 — stikla balons, 3 — anods, 4 — kvēldiegs.

Viss par diodu katodiem teiktāis attiecināms arī uz triodēm un daudzelektrodu lampām.

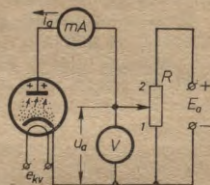
Anoda uzdevums ir savākt katoda emitētos elektronus. Konstruktīvi anods parasti veidots kā eliptisks cilindrs no niķeļa (retāk volframa un citiem metāliem) vai arī no sakausējuma.

Stikla balonā ar speciālas vizlas armatūras palīdzību iestiprina anodu, katodu un kvēldiegu. Balona apakšējā daļā iekausētas kontaktu spaiļes (lampas kājiņas) vai arī pielīmēta speciāla pamatne ar kontaktu spailēm. Stikla balonā ir samērā augsts vakuums (apmēram  $10^{-6}$ — $10^{-7}$  mm Hg), kas nepieciešams, lai elektroniem lampā būtu pietiekami liels brīvās noskriešanas ceļš, lai elektrodi neoksidētos un lai nerastos jonu vadītspēja. Vakuuma diodu shematiskie apzīmējumi parādīti 1-2. zīm.



1-2. zīm. Vakuuma diodu shematiskie apzīmējumi:

a — ar netiešās kvēles katodu;  
b — ar tiešās kvēles katodu.



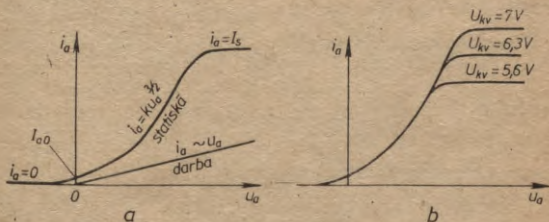
1-3. zīm. Slēgums vakuuma diodes voltampēru raksturlieknes uzņemšanai.

**Vakuuma diodes voltampēru raksturlieknes.** Diodes voltampēru raksturliekne ir anodstrāvas atkarības no diodei pieslēgtā sprieguma (potenciālu starpības starp anodu un katodu) grafiskais attēls. Tātad voltampēru raksturliekne ir sakarība  $i_a = \varphi(u_a)$ . Lai uzņemtu voltampēru raksturliekni, jāpaslēdz shēma, kurā var plūstoši mainīt diodei pieslēgto spriegumu un kontrolēt strāvu caur diodi (1-3. zīm.). Lai attēlotu voltampēru raksturliekni Dekarta koordinātu sistēmā, uz abscisu ass jāatliek anodsprieguma vērtības — voltmetra rādījumi, bet uz ordinātu ass anodstrāvas vērtības — miliampērmētra rādījumi (1-4. zīm.).

Raksturlieknes uzņemšanu parasti sāk no anodsprie-

guma vērtības  $u_a=0$ , kas atbilst potenciometra  $R$  slidkontakta apakšējam galējam stāvoklim (stāvoklis  $I$ ). Ieslēdzot kvēles bateriju, katods tiek karsēts un emitē elektronus. Telpā starp katodu un anodu izveidojas elektronu mākonis jeb telpas lādiņš ar maksimālo blīvumu pie katoda. Emitēto elektronu sākuma ātruma dēļ neliela to daļa aizlido līdz anodam un tālāk pa ārējo ķēdi plūst uz katodu. Miliampērmetrs uzrāda nelielu anodstrāvu.\* Šo anodstrāvu (ja  $u_a=0$ ) sauc par anoda nullstrāvu  $I_{a0}$ . Parasti  $I_{a0} \leq 0,5$  mA.

Ja potenciometra slidkontakta pārbīda uz augšu (anoda pozitīvais potenciāls pieaug), miliampērmetrs uzrāda augošu anodstrāvu. Tas notiek tādēļ, ka anoda pozitīvais



1-4. zīm. Vakuuma diodes voltampēru raksturlieknes:

a — statiskā un darba raksturliekne; b — statiskā raksturliekne pie dažādiem  $U_{kv}$ .

potenciāls pievelk elektronus, jo tiem ir negatīvs lādiņš. Jo lielāks pozitīvais potenciāls piemīt anodam, jo vairāk elektronu tas pievelk. Tomēr pie noteikta anodsprieguma anodstrāva pārstāj palielināties, jo visi katoda emitētie elektroni tiek pievilkti pie anoda (anods «uzsūc» visu telpas lādiņu). Iestājas tā saucamā sātstrāva  $i_a = I_s \approx \text{const}$ . Lai palielinātu emitēto elektronu daudzumu, jāpalielina katoda temperatūra (kvēles spriegums) vai jālieto katods ar lielāku virsmu.

Ja lampas anodam piešķir negatīvu potenciālu, anodstrāva neplūst, jo negatīvs anoda potenciāls elektronus atgrūž. Tātad  $i_a=0$  (ja  $-u_a$  ir pietiekami liels).

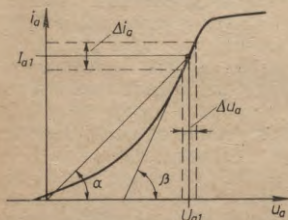
\* Anodstrāvas virziens pieņemts pretējs elektronu kustības virzienam. Tā kā elektroni virzās no katoda uz anodu, tad anodstrāva lampā plūst no anoda uz katodu.

Savienojot iegūtos punktus koordinātu sistēmā, iegūst voltampēru raksturliķni (1-4. zīm.). Šo raksturliķni sauc par diodes statisko raksturliķni. Statiskajai raksturliķnei izšķir trīs posmus:  $i_a = 0$ ;  $i_a = k u_a^{3/2}$ , kur  $k$  — proporcionalitātes koeficients;  $i_a = I_s \approx$

$\approx \text{const}$ .

Redzams, ka vakuuma diodes voltampēru raksturliķne ir nelineāra. Tas nozīmē, ka diodes iekšējā pretestība nav konstants lielums.

Jebkuram raksturliķnes punktam atbilst divējādas diodes pretestības: līdzstrāvas pretestība



1-5. zīm.  $R_1$  un  $R_0$  aprēķināšana no raksturliķnes.

$$R_0 = \frac{U_{a1}}{I_{a1}} = \text{ctg } \alpha \quad (1-1)$$

un maiņstrāvas pretestība

$$R_1 = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a} = \text{ctg } \beta. \quad (1-2)$$

1-5. zīm. redzams, ka leņķi  $\alpha$  un  $\beta$  nav vienādi, tātad arī  $R_0 \neq R_1$ . Bez tam  $R_1$  un  $R_0$  vērtības ir atšķirīgas dažādos raksturliķnes punktos. Nevadīšanas virzienā (ja anodspriegums ir  $-u_a$ ) vakuuma diodes iekšējās pretestības  $R_0 = R_1 = \infty$ . Vadīšanas virzienā iekšējās pretestības ir nelielas un svārstās robežās no dažiem desmitiem līdz 200  $\Omega$ . Piemēram, vakuuma diodei 6X2II vidēji (raksturliķnes posmā  $i_a = k u_a^{3/2}$ )  $R_1 = 160 \Omega$ .

Ja virknē ar vakuuma diodi ieslēdz rezistoru ar pretestību  $R$ , līdzstrāvu diodē nosaka iekšējās pretestības un rezistora pretestības summa  $R_0 + R$ . Ja  $R \gg R_0$ , diodes strāva kļūst proporcionāla anodspriegumam ( $i_a \sim u_a$ ) un voltampēru raksturliķne ir praktiski lineāra, līdz iestājas sātstrāva. Šādu raksturliķni (diodes un rezistora virknes slēgumam) sauc par diodes darba raksturliķni (1-4. zīm. a).

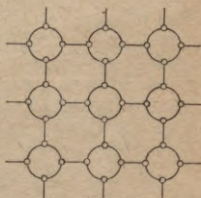
Vakuuma diodēm ir nopietni trūkumi. Tām ir samērā lieli izmēri, un tās ir mehāniski neizturīgas. Bez tam vakuuma diodes noveco — nolietojas katods un samazinās

tā emisijas spēja. Sakarā ar to, ka katods jākarsē un kvēldiegs patērē enerģiju, vakuuma diodēm ir zems lietderības koeficients.

## 1-2. Pusvadītāju diodes

Pusvadītāju diodes veidotas no pusvadītāju materiāla — parasti germānija vai silīcija.

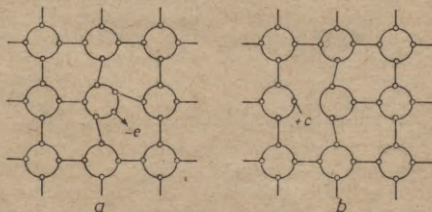
Tīra germānija vai silīcija atomi veido kristālisko režģi ar stabilām valentām saitēm, kur katrs atoms saistīts ar četriem kaimiņatomiem, jo kā Ge, tā arī Si atomu ārējā čaulā ir četri elektroni (1-6. zīm.).



1-6. zīm. Tīra pusvadītāja kristāliskais režģis.

Tīrs Ge vai Si nav sevišķi labi elektrisko lādiņu vadītāji, jo elektroniem ir spēcīgas saites un tie «nemil» atrauties. Palielinot temperatūru, elektronus atraut kļūst vieglāk un pusvadītāju vadītspēja pieaug (metāliem ir pretējs efekts). Toties piemaisījumi pat niecīgā daudzumā var spēji mainīt pusvadītāju materiālu elektriskās īpašības, jo atomi piemaisījumi izjauc regulāro kristālisko režģa struktūru.

Ja tīram germānijam vai silīcijam pievieno elementu, kura atoma ārējā čaulā ir pieci elektroni (piemēram, arsēnu vai antimonu), tad tā četri ārējās čaulas elektroni saistās ar četriem Ge (vai Si) atomiem, bet piektais elektrons paliek brīvs. Līdz ar to kristāliskajā režģī rodas



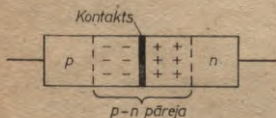
1-7. zīm. Pusvadītāja ar piemaisījumiem kristāliskie režģi:

*a* — režģis ar lieku elektronu; *b* — režģis bez elektrona (ar caurumu).

brīvie elektroni (1-7. zīm. *a*). Tā kā elektroniem ir negatīvs lādiņš, šādu pusvadītāja materiālu ar piemaisījumu apzīmē ar burtu *n* (no vārda «negatīvs»), bet piemaisījuma elementu sauc par donoru (devēju), jo tas atdevis elektronus.

Turpreti, ja tīram Ge vai Si pievieno elementu, kura atoma ārējā čaulā ir tikai trīs elektroni (piemēram, galliju, indiju vai alumīniju), tad tādi atomi katrs saistās ar trim pusvadītāja atomiem, bet ceturtajam pusvadītāja atomam nav vienas saites, jo piemaisījumu atoma ārējā čaulā pietrūkst viena elektrona. Izveidojas t. s. caurums, kura lādiņš ir pozitīvs (1-7. zīm. *b*). Kristāliskajam režģim trūkst elektronu — negatīvo lādiņu. Šādu pusvadītāja materiālu apzīmē ar burtu *p* (no vārda «pozitīvs»), bet attiecīgos piemaisījumus sauc par akceptoriem (uztvērējiem). Elektroniem nokļūstot caurumu vietās, tās tiek aizņemtas, bet citur savukārt izveidojas caurumi. Rodas pozitīvo lādiņu (caurumu) pārvietošanās efekts.

Lai izveidotu pusvadītāju diodi, ņem gabaliņu *n* tipa un gabaliņu *p* tipa pusvadītāja kristālu (abi Ge vai Si),



1-8. zīm. Pusvadītāju diodes uzbūve.

savieno tos kopā un piesliprina attiecīgus izvadus (1-8. zīm.). Tad kontakta vietā izveidojas *p-n* pāreja. Brīvie elektroni no *n* tipa pusvadītāja, difundējot caur kontakta vietu, nokļūst *p* tipa pusvadītājā, tāpēc *n* tipa pusvadītājs uzlādējas pozitīvi, bet *p* tipa pusvadītājs iegūst

negatīvu lādiņu. Tādā veidā rodas apmēram  $10^{-5}$  cm biezs sprosts slānis, kurā ir mazāk brīvo lādiņnesēju un kur ir lielāka pretestība nekā pusvadītāju pārējā daļā.

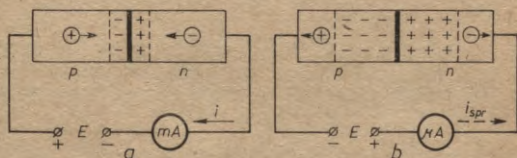
Pieslēdzot abiem pusvadītājiem elektroenerģijas avotu, mainās sprosts slāņa (*p-n* pārejas) biezums un pretestība. Savienojot *p* tipa pusvadītāju ar avota pozitīvo polu un *n* tipa pusvadītāju ar avota negatīvo polu, ārējā elektriskā lauka iedarbībā *p-n* pārejā palielinās brīvo lādiņnesēju koncentrācija, bet sprosts slāņa biezums un pretestība samazinās. 1-9. zīm. *a* brīvos elektronus no *n* daļas pievelk *p* daļas pozitīvais ārējais elektriskais lauks, bet aizgājušo elektronu vietu aizņem no barošanas avota pienākošie elektroni. *p* daļā nonākušie elektroni pārvietojoties aizņem tur

esošos caurumus, bet to vietā rodas citi caurumi. Līdz ar to rodas caurumu pārvietošanās pretēji elektronu pārvietošanās virzienam.

Ārējā ķēdē ieslēgtais miliampērmetrs uzrāda caur pusvadītāju plūstošu strāvu. (Strāvas virziens caur pusvadītāju ir pretējs elektronu pārvietošanās virzienam — tāpat no  $p$  daļas uz  $n$  daļu.) Šo strāvu sauc par tiešo strāvu jeb vadīšanas virziena strāvu un mēra miliampēros (vai ampēros).

Mainot avota polaritāti (1-9. zīm.  $b$ ),  $p-n$  pārejā samazinās brīvo lādiņnesēju koncentrācija, sprosslāņa biežums palielinās un tā pretestība arī palielinās. Šajā gadījumā  $p$  daļas ārējais negatīvais elektriskais lauks nepievilks no  $n$  daļas brīvos elektronus, bet  $n$  daļai pieslēgtajam pozitīvajam laukam nav elektronu, ko pievilkt, jo  $p$  daļā taču ir elektronu iztrūkums (caurumi).

Tomēr ārējā ķēdē ieslēgtais mikroampērmetrs uzrāda nelielu strāvu. Šo strāvu sauc par sproststrāvu un mēra



1-9. zīm. Sprosslāņa maiņa atkarībā no pieslēgtā potenciāla.

mikroampēros. Sproststrāva rodas galvenokārt tādēļ, ka nav iespējams izgatavot ideāli tīru  $p$  un  $n$  tipa pusvadītāju. Vienmēr  $p$  tipa pusvadītājam būs nēcīgas  $n$  tipa pusvadītāja īpašības un  $n$  tipa materiālam —  $p$  tipa īpašības. Sproststrāva galvenokārt ir atkarīga no temperatūras.

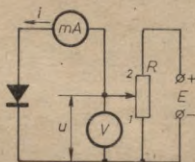
Pieslēdzot abiem pusvadītājiem maiņspriegumu, sprosslāņa pretestība periodiski mainās un diode darbojas kā elektrisks vārtis, kas ļoti vada strāvu no  $p$  tipa pusvadītāja uz  $n$  tipa pusvadītāju un ļoti slikti — pretējā virzienā.

1-10. zīm. attēlots pusvadītāju vārtiņa (diodes) shematiskais apzīmējums, kas simboliski norāda, ka strāva vienā virzienā plūst (bultiņa), bet otrā ne.

**Pusvadītāju diodes voltampēru raksturlikne.** Lai uzņemtu pusvadītāju diodes voltampēru raksturlikni, jāsa-slēdz shēma (1-11. zīm.), kas analoga lampu diodes rak-sturliknes uzņemšanas shēmai. Nobīdot potenciometra slīdkontaktu apakšējā galējā stāvoklī, abi mērinstrumenti uzrāda nulli, jo, nepieslēdzot spriegumu pusvadītāju diodei, tajā strāva neplūst. Šeit nekādas nullstrāvas nevar būt.



1-10. zīm. Pusvadītāju diodes shematiskais apzi-mējums.



1-11. zīm. Slēgums pusvadītāju diodes voltampēru raksturliknes uzņemšanai.

Ja potenciometra slīdkontaktu pārbīda uz augšu, plūstoši palielinot vadišanas virzienā pieslēgto spriegumu, miliam-pērmētrs uzrāda attiecīgi pieaugošu strāvu. Strāvai plūs-tot caur diodi, tā silst, jo jauda

$$P = i^2 R_0, \quad (1-3)$$

kur  $R_0$  — diodes līdzstrāvas pretestība vadišanas virzienā (tiešā pretestība),

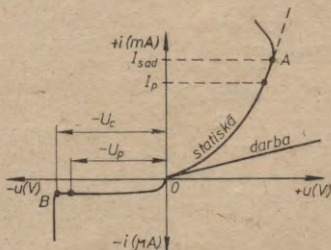
$i$  — strāva caur diodi, pārvēršas siltumā.

Piemēram, ja  $R_0 = 10 \Omega$  un  $i = 0,1 \text{ A}$ , jauda, kas izdalās siltuma veidā, ir  $0,1 \text{ W}$ , bet  $1 \text{ A}$  stiprai strāvai  $P = 10 \text{ W}$ .

Tātad, palielinot strāvu, strauji palielinās diodes tem-peratūra. Diode sadeg, caur to plūst īsslēguma strāva (punkts  $A$  uz raksturliknes, 1-12. zīm.). Lai tas nenotiktu, katra tipa diodēm norādīta pieļaujamā strāva  $I_p$ . Jāievēro, ka, diodi dzesējot, iespējams ievērojami palielināt pieļau-jamo strāvu — diode sadeg pie daudz lielākas strāvas. Diodei pieļaujamo strāvu norāda vienai vai vairākām ārējās vides temperatūrām, jo, temperatūrai palielinoties, pasliktinās siltuma novadišanas apstākļi. Ja diodi ir pa-redzēts dzesēt, stiprinot uz metāla radiatora, uzrāda pie-

ļaujamo strāvu, kā arī pielietojamā radiatora virsmas laukumu.

Lai uzņemtu voltampēru raksturlienes negatīvo daļu, jāmaina baterijas polaritāte un miliampērmetra vietā jāieslēdz mikroampērmetrs, jo sproststrāva ir tūkstošiem reižu mazāka par tiešo strāvu. Praktiski sproststrāva ir maz atkarīga no pieslēgtā sprieguma (gandrīz konstanta),



1-12. zīm. Pusvadītāju diodes voltampēru raksturliene.

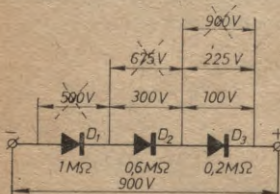
taču pie noteiktas negatīvā sprieguma vērtības notiek diodes  $p-n$  pārejas caursīte, kā rezultātā sproststrāva lavīnveidā aug un diode sabojājas (punkts  $B$  uz raksturlienes). Šo spriegumu sauc par caursītes spriegumu  $-U_c$ . Tādēļ diodēm uzrāda arī pieļaujamo sprostspriegumu  $-U_p$ , kas ir mazāks par caursītes spriegumu. Piemēram, diodei Д7А pieļaujamais sprostspriegums  $-U_p = -50$  V, bet Д7Е attiecīgi  $-350$  V.

Lai uzņemtu pusvadītāju diodes darba raksturlietni, virknē ar to jāieslēdz slodzes rezistors. Šī raksturliete (1-12. zīm.) līdzīga vakuuma diodes darba raksturlietei.

**Pusvadītāju diodu virknes un paralēlslēgums.** Ne vienmēr izdodas izvēlēties vai arī iegādāties pusvadītāju diodes tieši ar tādiem parametriem ( $-U_p, I_p$ ), kādi nepieciešami shēmas darbībai. Lai palielinātu pieļaujamo sprostspriegumu, pusvadītāju diodes var slēgt virknē, bet, lai palielinātu pieļaujamo strāvu, tās var slēgt paralēli.

Tomēr vienkārti virknes un paralēlslēgumi nav pieļaujami, jo pat viena un tā paša tipa pusvadītāju diodēm ir atšķirīgi parametri — tiešās pretestības  $R_1$  un  $R_0$  un sprostpretestība  $r_s$ .

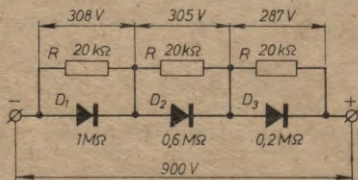
Virknes slēguma gadījumā sprostspriegums sadalās proporcionāli sprostopretestībām, bet nevis vienlīdzīgās daļās. Paralelslēguma gadījumā strāvas sadalās apgriezti proporcionāli tiešajām pretestībām. Piemēram, shēmā nepieciešama diode, kas izturētu 900 V lielu sprostspriegumu.



1-13. zīm. Vienkāršs pusvadītāju diodu virknes slēgums.

Tādas diodes nav, bet ir pieejamas diodes Д7Е ar pieļaujamo sprostspriegumu — 350 V. Saslēdzot virknē trīs Д7Е diodes, to kopējais pieļaujamais sprostspriegums ir — 1050 V. Tomēr vienkāršs virknes slēgums (1-13. zīm.) nav derīgs, jo visas diodes tiek caursistas. Lai to labāk izprastu, jāpieņem diodu sprostopretestību konkrētas vērtības un jāizseko sprostspriegumu sadalījums uz diodēm, piemēram,  $r_{s1} = 1 \text{ M}\Omega$ ,  $r_{s2} = 600 \text{ k}\Omega$ ,  $r_{s3} = 200 \text{ k}\Omega$ . Sprostspriegumam sadaloties proporcionāli sprostopretestībām, uz pirmās diodes ir — 500 V, uz otrās — 300 V, bet uz trešās — 100 V. Tā kā spriegums uz pirmās diodes ievērojami pārsniedz pieļaujamo, tā tiek caursista — rodas īsslēgums. Tagad viss sprostspriegums (— 900 V) sadalās uz atlikušajām divām diodēm proporcionāli to sprostopretestībām. Uz otrās diodes ir — 675 V, bet uz trešās — 225 V. Tagad tiek caursista otrā diode, bet pēc tam arī trešā, jo uz tās rodas — 900 V liels sprostspriegums.

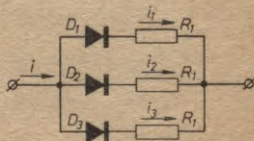
Lai sprostspriegumi uz virknē slēgtām diodēm sadalītos vienmērīgi, tās šuntē ar rezistoriem, kuru pretestība ir ievērojami mazāka par mazāko sprostopretestības vērtību



1-14. zīm. Virknē slēgto pusvadītāju diodu šuntēšana ar rezistoriem.

(1-14. zīm.). Parasti  $R=20\div 50\text{ k}\Omega$ . Rezistoru pretestībām jābūt vienādām, tad arī sprostsprigumi uz diodēm būs gandrīz vienādi, jo sadalīsies proporcionāli  $r_s$  un  $R$  paralēlslēguma vērtībām, bet  $R \ll r_{s\text{ min.}}$

Diodu paralēlslēguma gadījumā virknē ar katru diodi ieslēdz rezistoru ar nelielu pretestību, lai izlīdzinātu strāvas caur diodēm (1-15. zīm.). Rezistoru  $R_1$  pretestībām jābūt vienādām un 3—5 reizes lielākām par maksimālo diodes vadišanas virziena pretestību.



1-15. zīm. Pusvadītāju diodu paralēlslēgums.

Salīdzinot pusvadītāju diodes un vakuuma diodes pēc to voltampēru raksturliņņēm (1-4. zīm. un 1-12. zīm.), redzams, ka statiskās raksturliņnes ir visai atšķirīgas. Vakuuma diodēm raksturīgs ir nullstrāvas punkts un horizontālā (sātstrāvas) daļa. Turpretī pusvadītāju diodēm raksturliņne iet caur koordinātu sākumu, jo tām nav nullstrāvas. Pusvadītāju diodēm nav arī sātstrāvas, tās raksturojas ar īsslēguma strāvu, kas rodas diodes sadegšanas gadījumā. Atšķirīgas ir arī raksturliņņu negatīvās daļas. Vakuuma diodē pie negatīvā anodsprieguma strāva neplūst, bet pusvadītāju diodē plūst neliela sprotsstrāva un diodes caursites gadījumā (pie  $-U_c$ ) — negatīva īsslēguma strāva.

Lai gan statiskajām raksturliņņēm ir liela atšķirība, darba posmā šīs raksturliņnes ir stipri līdzīgas (vakuuma diodei darba posmu uz raksturliņnes ierobežo sātstrāva, pusvadītāja diodei — pieļaujamā strāva  $I_p$  un pieļaujama sprotsprigums  $-U_p$ ), bet abu diodu darba raksturliņnes praktiski sakrīt.

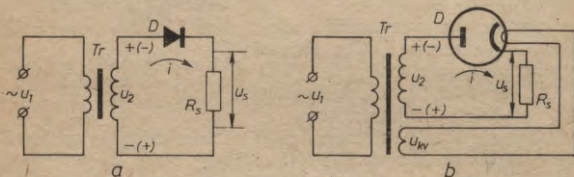
Redzams, ka pusvadītāju diodes var pilnīgi aizstāt vakuuma diodes. Ievērojot, ka pusvadītāju diodēm ir mazi izmēri, ka tās ir mehāniski izturīgas un praktiski nenoveco, kā arī to, ka pusvadītāju diodēm ir augsts lietderības koeficients (jo nav kvēles), kļūst skaidrs, ka pusvadītāju diodes «izspiež» vakuuma diodes.

Galvenais pusvadītāju diodu trūkums ir samērā zema pieļaujamā temperatūra (Ge  $+70^\circ\text{C}$ , Si  $+130^\circ\text{C}$ ).

### 1-3. Diodu lietošana taisngriežos

Ar taisngriežiem no maiņstrāvas iegūst līdzstrāvu. Taisngriežu pamatelements ir elektrisks ventilis — ierīce, kas strāvu vienā virzienā vada, bet otrā ne. No iepriekš apskatītā redzams, ka vakuuma un pusvadītāju diodēm ir ventiļa īpašības. Līdz ar to diodes ļoti plaši lieto taisngriežos.

**Vientakta taisngrieži.** Vienkāršākais vientakta taisngriezis sastāv no transformatora, diodes un slodzes rezistora. 1-16. zīm. *a* attēlota shēma ar pusvadītāju diodi, bet



1-16. zīm. Vientakta taisngrieža shēma:  
*a* — ar pusvadītāju diodi; *b* — ar vakuuma diodi.

1-16. zīm. *b* — ar vakuuma diodi, kur transformatoram ir papildu tinums kvēles spriegumam.

Sekundārā tinuma spriegums  $u_2 = U_m \sin \omega t$  ir sinusoidāls maiņspriegums. Līdz ar to starp sekundārā tinuma izvadiem mainās sprieguma polaritāte. Pozitīvā pusperioda laikā polaritāte ir  $\pm$ , bet negatīvā pusperioda laikā  $\mp$ . Tātad pozitīvā pusperioda laikā kā caur pusvadītāju diodi (tā ieslēgta vadišanas virzienā), tā arī caur vakuuma diodi (pozitīvi uzlādēts anods pievelk elektronus) plūst strāva. Strāvas stiprums atkarīgs no spriegumā lieluma. Tā kā sprieguma forma sinusoidāla, arī strāvas pusperioda forma ir sinusoidāla. Negatīvā pusperioda laikā caur pusvadītāju diodi plūst niecīga sproststrāva, bet caur vakuuma diodi strāva neplūst. Tā kā šajās shēmās slodzes ir rezistori (pretestība aktīva), slodzes spriegumu formas pilnīgi atbilst diodu strāvu formām. 1-17. zīm. *a* parādītas sekundāro tinumu spriegumu un slodzes spriegumu oscilogrammas, 1-17. zīm. *b* attēlota vientakta taisngrieža darbības grafika.

Diodes strāva, kas vienlaikus ir slodzes strāva, aprēķināma pēc formulas

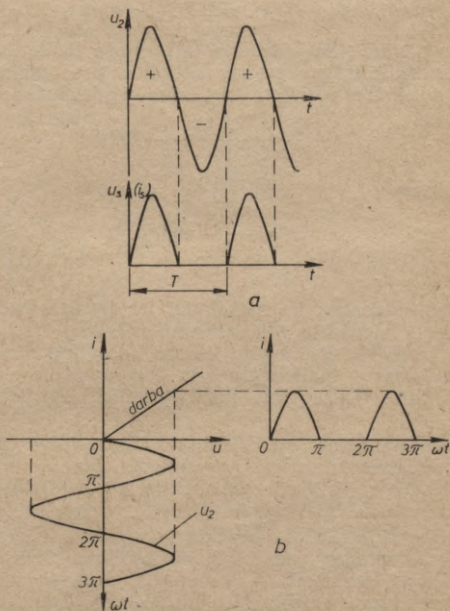
$$i = \frac{U_m}{R_{1v} + R_s} \sin \omega t \text{ pie } 0 \leq \omega t \leq \pi \quad (1-4)$$

vai

$$i = 0 \text{ pie } \pi \leq \omega t \leq 2\pi,$$

kur  $R_{1v}$  — diodes maiņstrāvas iekšējās pretestības vidējā vērtība,

$R_s$  — slodzes rezistora pretestība.



1-17. zīm. Vientakta taisngrieža darbības grafisks attēls.

Diodes strāva ir pulsejoša strāva, kuras līdzstrāvas sastāvdaļu (kā arī pārējās komponentes) var atrast ar Furjē rindu palīdzību.

Aprēķinām līdzstrāvas sastāvdaļu:

$$I_{-} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} i(\omega t) d(\omega t) = \frac{1}{2\pi} \left[ \int_0^{\pi} \frac{U_m}{R_{1v} + R_s} \sin \omega t d(\omega t) + \int_{\pi}^{2\pi} 0 d(\omega t) \right] = \frac{U_m}{\pi(R_{1v} + R_s)} = \frac{I_m}{\pi}. \quad (1-5)$$

Līdzsprieguma sastāvdaļa uz slodzes ir

$$U_{-} = I_{-} R_s. \quad (1-6)$$

Var pierādīt, ka vientakta taisngrieža lietderības koeficientu (līdzstrāvas jaudas attiecību pret maiņstrāvas jaudu uz slodzes rezistora) aprēķina pēc formulas

$$\eta_I = \frac{P_{-}}{P_{\sim}} = \frac{4R_s}{\pi^2(R_{1v} + R_s)} 100\%, \quad (1-7)$$

no kurienes

$$\eta_I = \frac{1}{1 + \frac{R_{1v}}{R_s}} 40,6\%. \quad (1-8)$$

No (1-8) redzams, ka maksimāli iespējamais lietderības koeficients vientakta taisngriežim ar aktīvu slodzi (bez filtra) ir 40,6%. Lai iegūtu lielāku līdzsprieguma sastāvdaļu uz slodzes (palielinātu  $\eta_I$ ), starp diodi un slodzi jāieslēdz filtrs. Taisngriežu filtri apskatīti nākamajā paragrāfā.

**Divtaktu taisngrieži.** Vientakta taisngriežos tiek zaudēti sprieguma negatīvie pusperiodi, līdz ar to vidējā līdzsprieguma vērtība ir zema, zems arī lietderības koeficients. Šis trūkums novērsts divtaktu taisngriežu shēmās.

1-18. zīm. *a* attēlota divtaktu taisngrieža shēma ar vakuuma dubultdiodi (vienā balonā ievietotas divas diodes, kuru katodi savienoti) — kenotronu. Šajā shēmā kvēles spriegums nav parādīts (tas pieslēdzams tāpat kā 1-16. zīm. *b*).

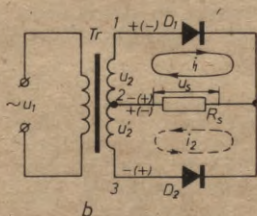
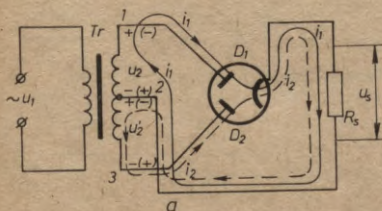
1-18. zīm. *b* parādīta tā pati divtaktu taisngrieža

shēma, tikai dubultdiode aizvietota ar divām pusvadītāju diodēm.

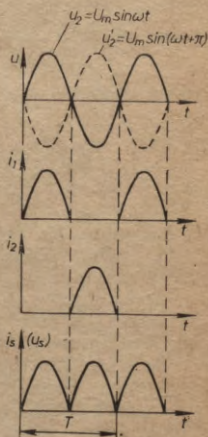
Pozitīvā pusperioda laikā transformatora sekundārā tinuma spaiļe 1 ir pozitīva, bet spaiļe 3 negatīva attiecībā pret tinuma viduspunktu 2. Līdz ar to pirmā diode ( $D_1$ ) strāvu vada, bet otrā ( $D_2$ ) ir slēgta. Strāvas  $i_1$  ceļš ir šāds: transformatora spaiļe 1, diode  $D_1$ , slodzes rezistors  $R_s$ , transformatora spaiļe 2, transformatora spaiļe 1.

Negatīvā pusperioda laikā sprieguma zīmes pie transformatora sekundārā tinuma spaiļēm ir pretējas — spaiļe 3 ir pozitīva, bet spaiļe 1 negatīva attiecībā pret viduspunktu 2. Tātad šoreiz strāva plūst caur diodi  $D_2$ , bet diode  $D_1$  ir slēgta. Strāvas  $i_2$  ceļš: transformatora spaiļe 3, diode  $D_2$ , slodzes rezistors  $R_s$ , sekundārā tinuma viduspunkts 2, transformatora spaiļe 3.

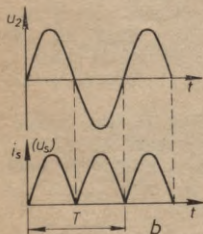
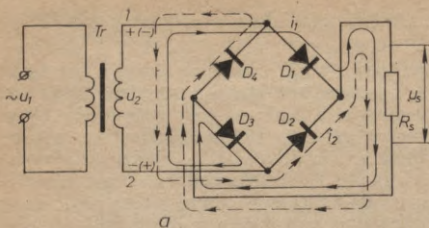
Redzams, ka pozitīvā pusperioda laikā darbojas sekundārā tinuma daļa 1-2, bet negatīvā pusperioda laikā — daļa 2-3. Abu pusperiodu laikā strāvas  $i_1$  un  $i_2$  plūst caur slodzes rezistoru vienā virzienā. 1-19. zīm. parādītas



1-18. zīm. Divtaktu taisngrieža shēma:  
a — ar kenotronu; b — ar pusvadītāju diodēm.



1-19. zīm. Divtaktu taisngrieža oscilogrammas.



1-20. zīm. Tilta taisngriezis:  
a — slēgums; b — oscilogrammas.

sekundārā sprieguma, diodu strāvu un slodzes strāvas oscilogrammas.

Divtaktu taisngrieža slodzes strāva faktiski ir divu vientakta taisngriežu strāvu summa (divtaktu taisngrieži var uzskatīt par diviem vientakta taisngriežiem ar kopēju slodzi). Tādā gadījumā, ievērojot sakarību (1-5), var pierādīt, ka

$$I_{-} = \frac{2}{\pi} \cdot \frac{U_m}{R_{1v} + R_s} \quad (1-9)$$

Tātad līdzsprieguma sastāvdaļa ir divreiz lielāka. Lietderības koeficients savukārt aprēķināms pēc formulas

$$\eta_{II} = \frac{8R_s}{\pi^2(R_{1v} + R_s)} 100\% = \frac{1}{1 + \frac{R_{1v}}{R_s}} 81,2\% \quad (1-10)$$

Redzams, ka divtaktu taisngriežim ar aktīvu slodzi iespējams divreiz lielāks lietderības koeficients nekā vientakta taisngriežim ( $\eta_{II \max} = 81,2\%$ ).

Apskatīto shēmu galvenais trūkums ir nepilnīga transformatora izmantošana, jo vienmēr strādā tikai puse sekundārā tinuma, bet tai pašā laikā slēgtajai diodei pie slēgtais sprostsprīgums vienāds ar visa sekundārā tinuma spriegumu. Salīdzinot ar analogu transformatoru vientakta taisngrieži, sekundārajam tinumam ir dubults vijumu skaits. Šis trūkums novērsts taisngriežī ar tilta shēmu.

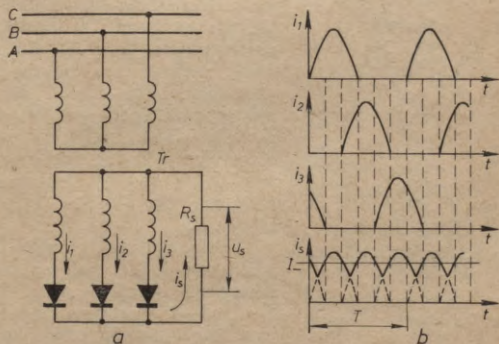
**Tilta shēma.** 1-20. zīm. a attēlota tilta taisngrieža shēma. Sajā shēmā izmantots transformators ar vienkāršu

sekundāro tinumu, četras pusvadītāju diodes tilta slēgumā un slodzes rezistors. Pozitīvā pusperioda laikā transformatora spaiļi 1 ir pozitīva attiecībā pret spaiļi 2 un strāva  $i_1$  plūst šādi: spaiļi 1, diode  $D_1$ , slodzes rezistors  $R_s$ , diode  $D_3$ , spaiļi 2, transformatora sekundārais tinums. Turpretī negatīvā pusperioda laikā, kad sprieguma zīmes sekundārā tinuma spaiļiem ir pretējas, strāvas  $i_2$  ceļš ir šāds: spaiļi 2, diode  $D_2$ , rezistors  $R_s$ , diode  $D_4$ , spaiļi 1, transformatora sekundārais tinums.

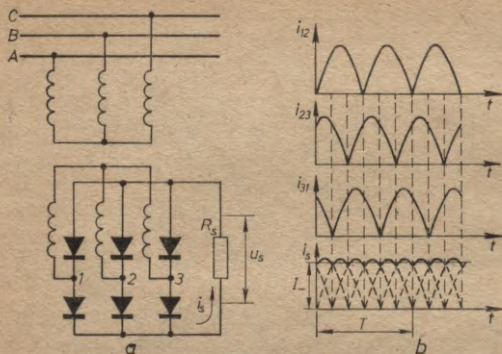
Kā redzams, strāva slodzē visu laiku plūst vienā virzienā, bet transformatora sekundārajā tinumā pēc katra pusperioda maina virzienu. 1-20. zīm. *b* attēlotas sekundārā sprieguma un slodzes strāvas (sprieguma) oscilogrammas.

Salīdzinot tilta shēmu ar iepriekš aplūkoto divtaktu taisngrieža shēmu (1-18. zīm. *b*), redzams, ka pie vienādiem izejas (slodzes) spriegumiem transformatoru sekundārie tinumi atšķiras un pusvadītāju diodu skaits ir dažāds. Ekonomiski izdevīgāk ir lietot divreiz vairāk pusvadītāju diodu nekā lielāku transformatoru ar dubultotu sekundāro tinumu. Arī katras diodes sprostsprīgums tilta shēmā ir divreiz mazāks. Tādēļ tagad dominējošā ir tilta taisngrieža shēma.

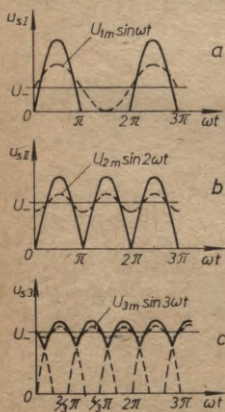
**Trīsfāzu taisngrieži.** Lielas jaudas līdzsprieguma iegūšanai parasti lieto trīsfāzu taisngriežus. Trīsfāzu taisn-



1-21. zīm. Trīsfāzu vienkāršais taisngriežis:  
*a* — slēgums; *b* — oscilogrammas.



1-22. zīm. Trisfāzu divtaktu taisngriezis:  
a — slēgums; b — oscilogrammas.



1-23. zīm. Taisngriežu iz-  
ejas spriegumu oscilo-  
grammas:

a — vienfāzes vienkārša; b —  
vienfāzes divtaktu; c — tris-  
fāzu vienkārša.

griežus veido pēc vienkārša, div-  
taktu vai sarežģīta slēguma  
shēmām.

1-21. zīm. a attēlota tris-  
fāzu vienkārša taisngrieža shē-  
ma ar transformatora sekundāro  
tinumu slēgumu zvaigznē un  
aktīvu slodzi, bet 1-21. zīm. b —  
diodu strāvu un slodzes strā-  
vas oscilogrammas. Diodēs  
plūst savstarpēji par trešdaļu  
perioda fāzē nobīdītas vien-  
fāzes vienkārša taisngriežu strā-  
vas  $i_1$ ,  $i_2$  un  $i_3$ , bet slodzes  
rezistorā  $R_s$  — to virsotņu  
strāva  $i_s$ .

Trisfāzu divtaktu taisngrieža  
gadījumā (1-22. zīm. a) maiņ-  
spriegumi starp spailēm 1—2,  
2—3, 3—1 darbojas tāpat kā  
vienfāzes tilta slēgumā, tikai tie  
ir savstarpēji nobīdīti fāzē par  
trešdaļu perioda. 1-22. zīm. b

attēlotas atsevišķu tiltu strāvu un slodzes summārās strāvas oscilogrammas.

No abu shēmu slodzes strāvu  $i_s$  oscilogrammām redzams, ka trīsfāzu taisngriežu slodzē ir liela līdzstrāvas sastāvdaļa un mazas pulsācijas (īpaši divtaktu shēmā). Abās shēmās diodēm pieslēgtais maksimālais sprotspriegums vienāds ar sekundārā tinuma līnijas sprieguma amplitūdu.

**Taisngriežu izejas spriegumu salīdzinājums.** 1-23. zīm. parādīti vienfāzes vientakta (a) un divtaktu (b), kā arī trīsfāzu vientakta (c) taisngriežu izejas spriegumi uz aktīvas slodzes. Šo pulsējošo spriegumu analītiskās izteiksmes ir šādas:

$$u_{sI} = \frac{2U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{\pi}{4} \cos \omega t + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t - \dots \right), \quad (1-11)$$

$$u_{sII} = \frac{4U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{1.3} \cos 2\omega t - \frac{1}{3.5} \cos 4\omega t + \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t - \dots \right), \quad (1-12)$$

$$u_{s3} = \frac{3\sqrt{2}U_m}{\pi} \left( \frac{1}{2} + \frac{1}{2.4} \cos 3\omega t - \frac{1}{5.7} \cos 6\omega t + \frac{1}{8.10} \cos 9\omega t - \dots \right). \quad (1-13)$$

No trigonometriskajām rindām (1-11), (1-12), (1-13), kā arī no grafiskā attēla (1-23. zīm.) redzams, ka vienfāzes vientakta taisngrieža izejā pulsāciju pamatfrekvence ir pirmā harmoniskā, tātad 50 Hz. Turpretī vienfāzes divtaktu taisngrieža izejā pulsāciju pamatfrekvence ir otrā harmoniskā jeb 100 Hz, bet trīsfāzu vientakta taisngrieža izejā — trešā harmoniskā jeb 150 Hz. 1-1. tabulā sako- potas līdzspriegumu un harmonisko (līdz sestajai) ampli- tūdu vērtības. No tabulas redzams, ka pamatharmonisko amplitūdas (tabulā pasvītrotas) attiecas kā 0,5 : 0,42 : 0,17, bet to frekvences — kā 50 : 100 : 150. Vienfāzes vientakta taisngrieža izejā ievērojami liela ir arī otrās harmoniskās amplitūda. Turpretī augstāko harmonisko amplitūdas strauji samazinās un to iespaids ir niecīgs.

Harmo- niskās ampli- tūdas	Taisngrieža shēma		
	Vienfāzes vientakta	Vienfāzes divtaktu	Trīsfāzu vientakta
$U_-$	$\frac{1}{\pi} U_m = 0,32 U_m$	$\frac{2}{\pi} U_m = 0,64 U_m$	$\frac{3\sqrt{2}}{2\pi} U_m = 0,68 U_m$
$U_{1m}$	$0,5 U_m$	0	0
$U_{2m}$	$\frac{2}{3\pi} U_m = 0,21 U_m$	$\frac{4}{3\pi} U_m = 0,42 U_m$	0
$U_{3m}$	0	0	$\frac{3\sqrt{2}}{8\pi} U_m = 0,17 U_m$
$U_{4m}$	$\frac{2}{15\pi} U_m = 0,04 U_m$	$\frac{4}{15\pi} U_m = 0,08 U_m$	0
$U_{5m}$	0	0	0
$U_{6m}$	$\frac{2}{35\pi} U_m = 0,02 U_m$	$\frac{4}{35\pi} U_m = 0,04 U_m$	$\frac{3\sqrt{2}}{35\pi} U_m = 0,039 U_m$

#### 1-4. Taisngriežu filtri

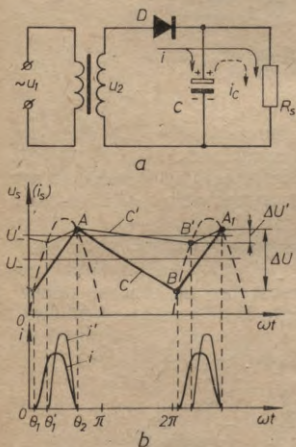
Līdzstrāvas patērētājos lietderīga ir tikai taisngrieža izejas līdzsprieguma sastāvdaļa  $U_-$ , turpretī mainsprieguma sastāvdaļa  $U_{\sim}$  (pulsācijas) rada nelietderīgu jaudas patēriņu un traucējumus. Lai palielinātu līdzsprieguma sastāvdaļu un samazinātu pulsācijas, starp taisngriežu izejas spailēm un slodzi ieslēdz filtrus.

**C-filters.** Vienkāršākais taisngrieža filtrs ir slodzes rezistoram paralēli pieslēgts kondensators (1-24. zīm. a). Sekundārā sprieguma pozitīvā pusperioda laikā caur diodi plūstošā strāva  $i$  sadalās kondensatora uzlādes un slodzes strāvās. Tātad pozitīvā pusperioda laikā kondensators uzlādējas. Turpretī negatīvā pusperioda laikā, kad diode slēgta, kondensators izlādējas caur slodzi, uzturot tajā strāvu  $i_c$ . 1-24. zīm. b attēlotas slodzes sprieguma un diodes strāvas oscilogrammas pie divām dažādām kondensatora kapacitātes vērtībām, pie tam  $C' > C$ . Ar svītrliniju parādīta vientakta taisngrieža slodzes sprieguma (diodes strāvas) oscilogramma aktīvas slodzes gadījumā. Pieslēdzot kondensatoru, kam piemīt reaktīva pretestība, slodze kļūst kompleksa un diodes strāvas forma ir sarežģīta. Tā kā pie diodes caur transformatora sekundāro

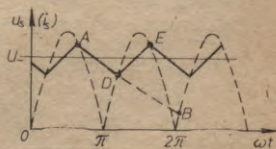
tinumu pieslēgts uzlādējies kondensators (ar «+» pie diodes katoda), caur diodi strāva plūst tikai laikā, kad transformatora sekundārais spriegums  $u_2 \geq U_c$ . Pārējā laikā diode slēgta un maksimālais diodes sprostsprriegums ir  $U_m + U_c$ . No diodes strāvas oscilogrammas redzams, ka diode vada strāvu nevis laikā, kas atbilst fāzei  $0 \leq \omega t \leq \pi$ , kā tas ir pie aktīvas slodzes, bet gan atbilstoši  $\theta_1 \leq \omega t \leq \theta_2$ , pie tam diodes strāvas nogriezuma leņķi ir atkarīgi no kondensatora kapacitātes.

Palielinot kondensatora kapacitāti no  $C$  uz  $C'$ , tas uzkrāj vairāk elektroenerģijas un līdz ar to palielinās tā izlādes laiks (samazinās izlādes ātrums), jo pieaug izlādes laika konstante  $\tau = R_s C$ . No slodzes sprieguma oscilogrammas redzams, ka šajā gadījumā līdzsprieguma sastāvdaļa taisngrieža izejā palielinās, bet pulsācijas  $\Delta U$  samazinās (kondensatora  $C'$  izlādes likne ir  $AB'$ , kondensatoram  $C$  atbilst likne  $AB$ ). Arī slodzes sprieguma minimālā vērtība ir lielāka. Sajā gadījumā diode atvērta īsāku laika sprīdi (atbilstoši fāzei  $\theta'_1 \leq \omega t \leq \theta_2$ ), bet tās strāva ir ievērojami lielāka. Tas ir ļoti svarīgs apstākļis vakuuma diodu, bet īpaši gazotronu vai tiratronu (sk. 5. nodaļu) ekspluatācijā, kad īslaicīgas, toties lielas anodstrāvas var saārdīt katodu aktīvo virsmu. Tādēļ sevišķi palielināt kondensatora kapacitāti ir būtami un vienkāršākos  $C$ -filtrus pielieto tikai mazjaudas taisngriežos.

1-25. zīm. parādīta oscilogramma tā paša  $C$ -filtra



1-24. zīm. Vientakta taisngriezis ar kondensatora filtru ( $C$ -filtru):  
a — slēgums; b — oscilogrammas.

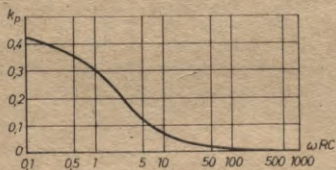


1-25. zīm. Slodzes spriegums vientakta un divtaktu taisngriežos ar  $C$ -filtru.

darbībai divtaktu taisngriezī. Redzams, ka kondensators nepaspēj izlādēties līdz tik zēmam spriegumam kā iepriekšējā gadījumā (punkts *B*), bet gan tikai līdz spriegumam, kas atbilst punktam *D*, jo pienāk nākamais strāvas pusperiods, kura nebija vientakta taisngriezī. Līdz ar to arī slodzes sprieguma pulsācijas ir mazākas, bet līdzsprieguma sastāvdaļa lielāka. Pulsāciju koeficients ir

$$k_p = \frac{U_{\sim}}{U_-}, \quad (1-14)$$

kur  $U_{\sim}$  — summārais maiņspriegums taisngrieža izejā,  
 $U_-$  — līdzspriegums taisngrieža izejā.



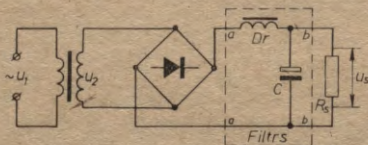
1-26. zīm. Sakarība  $k_p = \varphi(\omega RC)$  filtra kondensatora izvēlei.

1-26. zīm. attēlota nomogramma  $k_p = \varphi(\omega RC)$  divtaktu taisngrieža filtra kondensatora aprēķinam.

Piemēram, dots divtaktu taisngriezis ar  $R_s = 200 \Omega$  un pieļaujamo  $k_p = 0,3$ . No nomogrammas atrod  $\omega RC = 1$ , tad

$$C = \frac{1}{\omega R} = \frac{1}{2\pi f R_s} = \frac{1}{2\pi \cdot 100 \cdot 200} = 8 \cdot 10^{-6} = 8 \mu\text{F}.$$

**$\Gamma$ -veida filtrs.**  $\Gamma$ -veida filtrs sastāv no slodzei virknē slēgtas droseles un paralēli slēgta kondensatora. 1-27. zīm.



1-27. zīm. Tilta taisngriezis ar  $\Gamma$ -veida filtru.

attēlota tilta taisngrieža shēma ar  $\Gamma$ -veida filtru. Droselei piemīt liela pretestība maiņstrāvai, bet maza — līdzstrāvai. Droseles līdzstrāvas (aktīvā) pretestība ir tinuma vada omiskā pretestība

$$r_0 = \omega l_v r' \cdot 10^{-4} \ (\Omega), \quad (1-15)$$

kur  $\omega$  — vijumu skaits,

$l_v$  — vijumu vidējais garums (cm),

$r'$  — 100 m gara vada pretestība ( $\Omega$ ).

Drozeles aktīvā pretestība ir relatīvi maza — desmiti vai daži simti omu tai laikā, kad reaktīvā pretestība

$$X_L = 2\pi f L \quad (1-16)$$

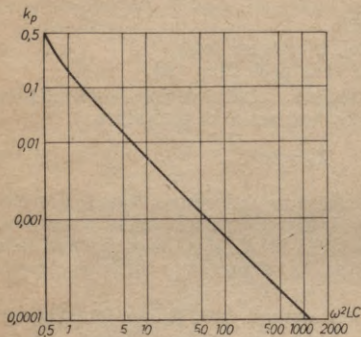
ir daudz lielāka un mērāma kiloomos. Tātad droseles maiņstrāvas pretestība ir kompleksa un sastāv no aktīvās un reaktīvās pretestības. Tā kā  $X_L \gg r_0$ , ar pietiekami lielu precīzītāti var uzskatīt, ka maiņstrāvu drosele nosaka inductīvā pretestība.

Drozeles uzdevums ir aizturēt maiņstrāvu (pulsācijas), tāpēc vēlams, lai  $X_L$  būtu pēc iespējas lielāka. Tā kā  $X_L \sim L$ , droselei nepieciešama liela inductivitāte, tāpēc pielieto serdi (parasti no transformatoru skārda). Filtra droseļu inductivitāte parasti ir 2—20 H. Bez tam  $X_L \sim f$ , tas nozīmē, ka  $n$ -tai harmoniskajai droseles pretestība ir  $n$  reizes lielāka. Piemēram, viena un tā pati drosele divtaktu taisngrieža izejā maiņstrāvu aiztur divreiz labāk nekā vientakta taisngrieža izejā, jo tās reaktīvā pretestība pulsāciju pamatharmoniskajai ir divreiz lielāka, bet augstākās harmoniskās tiek vēl vairāk aizturētas. Tā kā droseles pretestība maiņstrāvai ir liela, uz droseles rodas maiņsprieguma kritums  $u_{\sim}$  (1-28. zīm.), jo  $X_L \gg R_s$ . Savukārt līdzsprieguma kritums  $U_-$  rodas galvenokārt uz slodzes rezistora, jo spēkā ir arī nevienādība  $r_0 \ll R_s$ . Lai uz slodzes rezistora nerastos arī maiņsprieguma kritums, rezistoram paralēli ieslēgto kondensatoru  $C$  izvēlas tā, lai

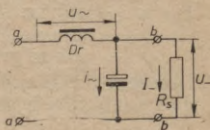
$$X_C = \frac{1}{2\pi f C} \ll R_s. \quad (1-17)$$

Tad slodzes rezistorā praktiski maiņstrāvas sastāvdaļa neplūst, jo tā noslēdzas caur kondensatoru.

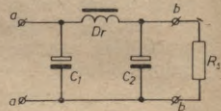
1-29. zīm. attēlota nomogramma  $k_p = \varphi(\omega^2 LC)$ , no kuras atbilstoši dotajam  $k_p$  var ērti izvēlēties droseles un kondensatora parametrus. Raksturīgi, ka  $\Gamma$ -veida filtra izējā pulsācijas nav atkarīgas no slodzes rezistora, bet tikai no parametriem  $\omega$ ,  $L$  un  $C$ .



1-29. zīm. Sakarība  $k_p = \varphi(\omega^2 LC)$   $\Gamma$ -veida filtra aprēķinam.



1-28. zīm.  $\Gamma$ -veida filtra darbība.



1-30. zīm.  $\Pi$ -veida filtrs.

**$\Pi$ -veida filtrs.** Lai iegūtu vēl mazāku pulsāciju koeficientu, lieto  $\Pi$ -veida filtru, kas ir abu iepriekšējo variantu apvienojums (1-30. zīm.). Šeit kondensators  $C_1$  darbojas analogi  $C$ -filtra kondensatoram, bet drosele un kondensators  $C_2$  — tāpat kā  $\Gamma$ -veida filtrā. Tā kā  $\Pi$ -veida filtra aprēķini ir samērā sarežģīti, šai grāmatā tie netiek apskatīti.

### 1-5. Speciālas pusvadītāju diodes un to lietošana

**Zenera diodes jeb pusvadītāju stabilitroni.** Zenera diodes ir Si diodes ar spilgti izteiktu sprostsprriegumu jeb tā saucamo Zenera sprriegumu  $U_Z$ , kas var būt robežās no dažiem voltiem līdz dažiem simtiem voltu (atkarībā no diodes tipa). 1-31. zīm. *b* attēlota Zenera diodes volt-ampēru raksturlikne. Zenera diodes strādā caursītes re-

žīmā, bet tas nav bīstami, ja strāva caur diodi ierobežota un nepārsniedz  $I_{Z \max}$ . Zenera diodes, tāpat kā gāzpildītos stabilitronus (sk. 5. nodaļu), lieto sprieguma stabilizēšanai, etalonsprieguma radīšanai, impulsu ierobežošanai u. c.

Zenera diodu galvenie parametri ir

Zenera spriegums  $U_Z$ , kas vienāds ar sprieguma kritumu diodē pie caursites;

caursites režīma dinamiskā pretestība

$$R_Z = \frac{\Delta U_Z}{\Delta I_Z} (\Omega); \quad (1-18)$$

maksimālā ( $I_{Z \max}$ ) un minimālā ( $I_{Z \min}$ ) caursites strāva.  $I_{Z \max}$  atrod no diodes konstrukcijai pieļaujamās izkliedes jaudas  $P_{Z \max}$ :

$$I_{Z \max} = \frac{P_{Z \max}}{U_Z}, \quad (1-19)$$

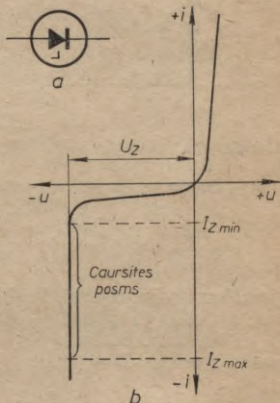
$I_{Z \min}$  nosaka pāreja no normālās sproststrāvas uz caursites strāvu.

Visplašāk Zenera diodes lieto sprieguma stabilizācijas shēmās (1-32. zīm. a). Pieslēgtais līdzspriegums  $u_1$

svārstās robežās  $\pm \frac{\Delta u_1}{2}$ , bet izejas spriegums  $u_s$  — robežās

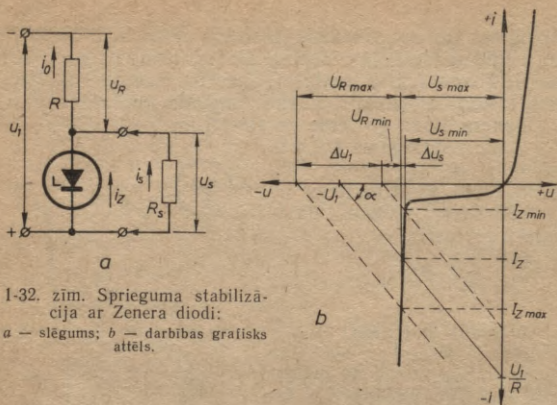
$\pm \frac{\Delta u_s}{2}$  (1-32. zīm. b). Ar Zenera diodi virknē slēgtais rezistors  $R$  ierobežo diodes strāvu un uzņem līdzsprieguma svārstības. Šāda līdzsprieguma stabilizācija notiek tikai gadījumā, kad  $i_s \ll i_z$ ; praktiski  $i_s \leq (0,1 \div 0,2) i_z$ . Lielu slodzes strāvu gadījumā starp Zenera diodi un slodzi jāieslēdz līdzstrāvas pastiprinātājs ar sprieguma pastiprinājuma koeficientu  $K_U = 1$  (sk. 10. nodaļu).

**Varikapi.** Pusvadītāju diodēm (īpaši Si)  $p-n$  pārejas kapacitāte atkarīga no sprostvirzienā pieslēgtā līdzsprieguma. Izmantojot šo  $p-n$  pārejas īpašību, ir izveidotas speciālas pusvadītāju diodes — varikapi —, ko lieto maiņkondensatoru vietā parasti augstfrekvences rezonanses



1-31. zīm. Zenera diode:

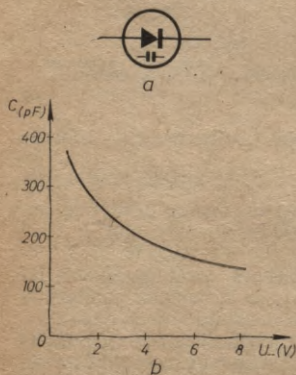
a — shematiskais apzīmējums,  
b — voltampēru raksturliktne.



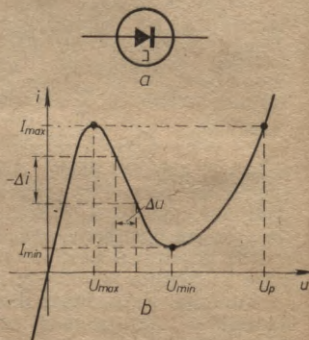
1-32. zīm. Sprieguma stabilizācija ar Zenera diodi:  
 a — slēgums; b — darbības grafisks attēls.

kontūru noskaņošanai. Praktiski par varikapiem var izmantot arī citas Si diodes — īpaši Zenera diodes.

1-33. zīm. attēlots varikapa shematiskais apzīmējums un sakarība  $C = \varphi(U_-)$ . Varikapus raksturo maksimālā



1-33. zīm. Varikaps:  
 a — shematiskais apzīmējums;  
 b — raksturliktne  $C = \varphi(U_-)$ .



1-34. zīm. Tune diode:  
 a — shematiskais apzīmējums;  
 b — voltampēru raksturliktne.

kapacitāte  $C_{\max}$ , kas atbilst  $U_- = 0$ , un minimālā kapacitāte  $C_{\min}$ , kas atbilst maksimāli pieļaujamam spriegumam, kā arī šīs kapacitātes labums  $Q$  noteiktai frekvencei un kapacitātes temperatūras koeficients.

**Tunel|diodes.** Tūnel|diodes ir speciālas pusvadītāju diodes, kas veidotas no  $p$  un  $n$  tipa materiāliem ar augstu piemaisījumu koncentrāciju (sintiem līdz tūkstošiem reižu lielāku nekā parastajās diodēs). Tādēļ  $p-n$  pāreja ir ļoti plāna. Tādā plānā  $p-n$  pārejā jau pie ļoti maziem spriegumiem izveidojas lielas intensitātes elektriskais lauks (līdz  $10^5$  V/cm) un rodas tūnel|efekts, t. i., caur  $p-n$  pāreju it kā caur tuneli iziet elektroni, kuriem pievadītā enerģija (ārējais potenciāls) ir par mazu, lai pārvarētu pāreju parastā ceļā.

Tūnel|efektā radītā maksimālā strāva  $I_{\max}$  (1-34. zīm. *b*) ir viens no tūnel|diodes raksturīgākajiem parametriem. Vēl tūnel|diodi raksturo ar šādiem galvenajiem parametriem: spriegumu  $U_{\max}$ , kas atbilst maksimālajai strāvai; minimālo strāvu  $I_{\min}$ ; tai atbilstošo spriegumu  $U_{\min}$ ;

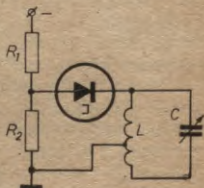
maksimālās un minimālās strāvas attiecību  $\gamma = \frac{I_{\max}}{I_{\min}}$ ;

pārkrituma spriegumu  $U_p$ , pie kura uz raksturliknes augošās daļas strāva ir vienāda ar  $I_{\max}$ .

Tūnel|diodes raksturliknes īpašība ir tā, ka tai ir kritošā daļa. Šajā rajonā tūnel|diodes iekšējā pretestība ir negatīva, jo, pieaugot spriegumam, strāva samazinās:

$$R_1 = \frac{\Delta u}{-\Delta i} = -R_1. \quad (1-20)$$

Ar to arī galvenokārt izskaidrojama lielā interese par šo pusvadītāju ierīci, jo elementus ar kritošu voltampēru raksturlikni (negatīvu iekšējo pretestību) var izmantot elektrisko svārstību ģeneratoros. Piemēram, lai ģenerētu sinusoidālas svārstības, var pielietot vienkāršāko shēmu ar svārstību kontūru, kura zudumu pretestība tiek kompensēta ar tūnel|diodes negatīvo iekšējo pretestību. 1-35. zīm. attēlota tāda sinusoidālu svārstību ģenerators shēma.

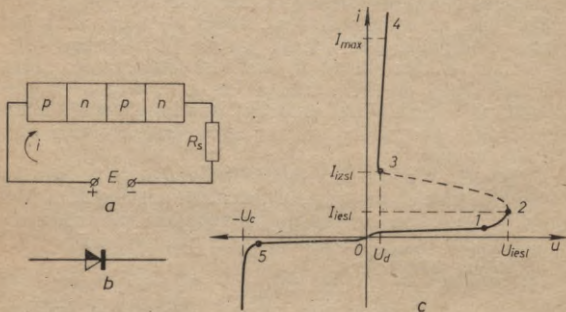


Tūnel|diodes atrod ļoti plašu pielietojumu dažādās impulsu ģeneratoru

1-35. zīm. Ģenerators shēma ar tūnel|diodi.

shēmās, pastiprinātājos, loģiskajos elementos, skaitļošanas mašīnu atmiņas ierīcēs, līdzspriegumu pārveidotājos un citur.

**Dinistori.** Dinistori ir pusvadītāju diodes, kas sastāv no četrām savstarpēji savienotām  $p$  un  $n$  daļām (1-36. zīm.  $a$ ). No attēla redzams, ka izveidojušās divas  $p-n$



1-36. zīm. Dinistor:

$a$  — uzbūve;  $b$  — shematiskais apzīmējums;  $c$  — voltampēru raksturliķne.

pārejas un viena  $n-p$  (pretējas vadītspējas) pāreja. 1-36. zīm.  $c$  attēlota dinistora voltampēru raksturliķne. Redzams, ka arī vadīšanas virzienā līdz ieslēgšanas spriegumam  $U_{iesl}$  dinistori ir slēgti. Raksturliķnes posms  $0-1$  atbilst zēmai vadītspējai (strāva nepārsniedz dažus  $\mu A$  un ir gandrīz nemainīga). Raksturliķnes posmā  $1-2$  notiek strauja dinistora diferenciālās (maiņstrāvas) pretēstības maiņa — no megomiem līdz nullei (kas atbilst ieslēgšanās spriegumam  $U_{iesl}$ ). Tālākajā posmā  $2-3$  dinistora diferenciālā pretēstība ir negatīva — līdzīgi kā tūnelīdiodē.

Raksturliķnes posms  $3-4$  atbilst augstai vadītspējai. Šeit dinistora diferenciālā pretēstība ir pozitīva un nepārsniedz dažus omus, caur dinistoru plūst liela strāva, bet sprieguma kritums uz dinistora ir  $U_d = 1,5 \div 2$  V. Posms  $0-5$  atbilst dinistora sproststrāvai, un līdz caursītei diferenciālā sprostpretēstība ir āpmēram tāda pati kā pretēstība raksturliķnes posmā  $0-1$ .

Parasti dinistoru caursītes spriegums ir lielāks par

ieslēgšanās spriegumu  $|U_c| > |U_{iesl}|$ . Tādiem dinistoriem, kam  $|U_c| < |U_{iesl}|$ , darba posms ir tikai pozitīvā raksturliknes daļa.

Principā darba punkts var neierobežoti ilgi atrasties raksturliknes posmos 0–2 vai 3–4, bet nav iespējams statisks stāvoklis, kad darba punkts atrastos raksturliknes negatīvās pretestības daļā (posms 2–3). Tādēļ šī raksturliknes daļa attēlota ar svītrliniju.

Dinistorus plaši lieto dažādu generatoru shēmās (šeit atkal tiek izmantota negatīvā pretestība), frekvenču dalītājos, skaitļošanas mašīnu, automātisko iekārtu shēmās un citur.

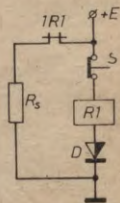
1-37. zīm. attēlota automātiskās aizsardzības shēma, kurā dinistors pārsprieguma gadījumā ( $E \geq U_{iesl}$ ) ieslēdz elektromagnētisko releju  $RI$ . Elektromagnētiskais relejs savukārt ar savu normāli slēgto kontaktu atslēdz slodzi. Lai atgrieztu shēmu izejas stāvoklī, jāatslēdz normāli slēgtais pogu slēdzis  $S$ , jo dinistora izslēgšanai jāsamazina tā strāva  $i < I_{izsl}$  (vai jāizslēdz tā).

Dinistoru galvenais trūkums ir samērā liels ieslēgšanās spriegums  $U_{iesl}$ , pie tam tas nav maināms. Šis trūkums ir novērsts vadāmajās pusvadītāju diodes — tiristoros.

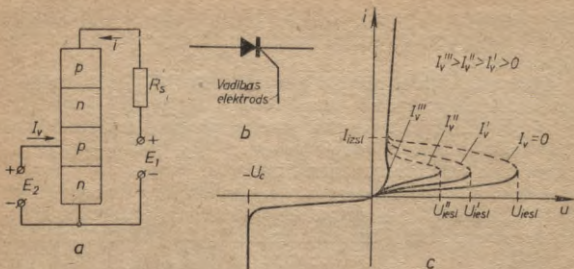
**Vadāmās pusvadītāju diodes jeb tiristori.** Tiristori ir vadāmas pusvadītāju diodes, kuru uzbūve ir ļoti līdzīga dinistoriem, tikai šeit vēl ir trešais — vadības elektrods

(1-38. zīm. *a*). Ja vadības elektroda ķēdē strāva neplūst ( $I_v = 0$ ), tiristor praktiski pārvēršas par dinistoru ar visām tā īpašībām. Turpretī, ja vadības strāva plūst ( $I_v > 0$ ), tad atkarībā no šīs strāvas lieluma mainās tiristora ieslēgšanās spriegums  $U_{iesl}$ . 1-38. zīm. *c* attēlota tiristora raksturlikņu saime pie dažādām vadības strāvām  $I_v$ . No raksturliknēm redzams, ka, palielinot  $I_v$ , samazinās ieslēgšanās spriegums un pie kādas pietiekami lielās vadības strāvas ieslēgšanās spriegums izzūd — tiristor pārvēršas par parastu pusvadītāju diodi.

Redzams, ka vadības elektrods tiristorā darbojas līdzīgi tīkliņam tiratronā (sk. 5. nodaļu). Kad tiristor ir ieslēdzies, vadības elektrods zaudē savas īpašības, jo tiristora



1-37. zīm. Dinistora lietošana automātiskās aizsardzības shēma.



1-38. zīm. Tiristors:

a — uzbūve un darbības princips; b — shematiskais apzīmējums; c — volt-ampēru raksturliķņu saime.

izslēgšanai tā strāva jāsamazina līdz  $i < I_{izsl}$  (analogi kā dinistorā). Patiesībā gan tiristoru var izslēgt arī tad, ja vadības ķēdē ieslēdz strāvu, kas ir vienāda ar ieslēgšanas strāvu, bet kam ir pretējs virziens.

Tiristora ieslēgšanai pilnīgi pietiek, ja vadības ķēdē ieslēgšanas strāva plūst tikai dažas mikrosekundes. Tātad tiristoru var ieslēgt ar īslaicīgu impulsu.

Tiristoriem salīdzinājumā ar dinistoriem ir lielas priekšrocības. Pirmkārt, iespējams ieslēgt tiristoru (ar vadības elektroda palīdzību) arī tad, ja barošanas spriegums ir mazāks par ieslēgšanās spriegumu. Otrkārt, ar mazjaudas vadības signālu ir iespējams komutēt lielas jaudas slodzes ķēdē. Tiristoru jaudas pastiprinājuma koeficients

$$K_P = \frac{P_s}{P_v} = 10^4 \div 10^5,$$

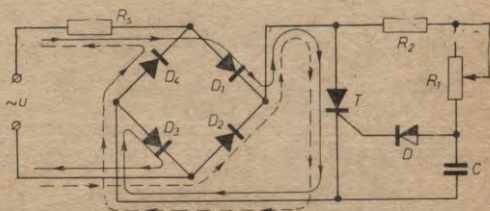
kur  $P_s$  — slodzes jauda,

$P_v$  — vadības ķēdes jauda.

Tiristorus arvien vairāk lieto dažādās automātikas shēmās, aizvietojot relejus, magnētiskos palaidējus, magnētiskos pastiprinātājus, kustošos drošinātājus, laika relejus, autotransformatorus u. c. Īpaša nozīme tiristoriem ir regulējamā līdzstrāvas un maiņstrāvas elektropiedziņā un taisngriežu tehnikā. Lieljaudas tiristori ļauj komutēt simtiem ampēru stipras strāvas. Tāpēc ar tiristoriem iespējams izveidot bezkontakta shēmas, piemēram, elektrodziņņu palaišanai, kā arī aizvietot dzivsudraba taisngriežus. Ievērojot, ka caurmērā 20% no visas elektroenerģijas tiek

patērēts līdzstrāvas veidā un dzīvsudraba vai elektromašīnu taisngriežu lietderības koeficients ir apmēram 70—80%, bet tiristoriem līdz 99%, kļūst saprotama strauji augošā interese par tiristoriem. Mazjaudas tiristorus plaši lieto impulstechnikā, jo to pārslēgšanās laiks ir ļoti īss un tāpēc var iegūt impulsus ar stāviem kāpumiem un kritumiem, kā arī ar ievērojamu jaudu.

1-39. zīm. attēlota shēma maiņstrāvas jaudas regulēšanai slodzē  $R_s$  (piemēram, lai izmainītu kvēlspuldžu spožumu, regulētu apgriezienus elektrodzinējiem u. c.).



1-39. zīm. Tiristora lietošana maiņstrāvas jaudas regulēšanā.

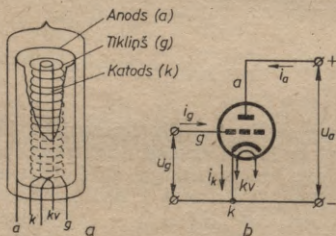
Regulators sastāv no tilta taisngrieža, kura diagonālē ieslēgts tiristors  $T$ , kas savukārt tiek vadīts ar diistoru  $D$ . Ar pilnu līniju un svītrlīniju attēloti strāvas ceļi abu pusperiodu laikā, ja tiristors ir ieslēgts (caur slodzi plūst maiņstrāva, bet caur tiristoru — pulsējoša vienvirziena strāva). Katra pusperioda sākumā spriegums uz kondensatora  $C$  vienāds ar nulli, bet, maiņspriegumam pieaugot līdz amplitūdas vērtībai, kondensators caur taisngriezi un regulējamu pretestību (rezistors  $R_2$  un potenciometrs  $R_1$ ) uzlādējas. Kad spriegums uz kondensatora sasniedz diistora ieslēgšanās spriegumu  $U_{iesl}$ , diistora ieslēdzas un savukārt ieslēdz tiristoru. Kondensators strauji izlādējas, bet tiristors paliek ieslēgts līdz pusperioda beigām (praktiski līdz  $i \leq I_{Izsl}$ ), tad tas izslēdzas, un process sākas no jauna. Jo mazāka ir pretestība  $R_1 + R_2$ , jo ātrāk uzlādējas kondensators un lielāku pusperioda daļu atvērts tiristors. Tātad arī slodzē ir lielāka jauda. Redzams, ka jaudu slodzē (piemēram, elektrodzinēja apgriezienus) regulē ar potenciometru  $R_1$ .

## 2. nodaļa

### TRIODES

#### 2-1. Triodu uzbūve un darbība

Triode ir trīselektrodu vakuuma lampa, kurā starp katodu un anodu (tuvāk katodam) novietots trešais elektrods — tīkliņš. Tīkliņa uzdevums ir vadīt (stūrēt) elektronu plūsmu lampā. 2-1. zīm. attēlota triodes uzbūve un



2-1. zīm. Triode:

a — uzbūve; b — shematiskais apzīmējums.

shematiskais apzīmējums ar attiecīgajiem spriegumiem un strāvām. Triodē, tāpat kā vakuuma diodē, ap sakarsēto katodu izveidojas elektronu mākonis ar negatīvu telpas lādiņu. Pozitīvi uzlādētais anods pievelk elektronus, bet tīkliņš tos aiztur, ja ir negatīvi uzlādēts, vai paātrina, ja ir pozitīvi uzlādēts. Tātad anodstrāvu  $i_a$  triodē nosaka divi spriegumi — anodspriegums  $u_a$  un tīkliņspriegums  $u_g$ . (Tīkliņus elektronu lampās pieņemts apzīmēt ar burtu *g* no angļu vārda *grid*.)

Parasti tīkliņspriegums ir negatīvs, tādēļ tīkliņstrāvas nav ( $i_g=0$ ), jo negatīvi uzlādēti tīkliņš elektronus atgrūž. Šai gadījumā  $i_a=i_k$ . Turpretī, ja tīkliņš ir pozitīvi uzlādēts, tas elektronus pievelk un  $i_g>0$ . Tādā gadījumā katodstrāva vairs nav vienāda ar anodstrāvu:  $i_k=i_a+i_g$ .

Tā kā šīs strāvas nosaka divi spriegumi, t. i.,

$$i_a=f(u_g, u_a), i_g=f_1(u_g, u_a) \text{ un } i_k=f_2(u_g, u_a), \quad (2-1a, b, c),$$

sakarības starp strāvām un spriegumiem vairs nevar grafiski attēlot Dekarta koordinātu sistēmā kā diodei, bet jāpielieto trīsdimensiju koordinātu sistēma, kas ir ļoti neērta. Tādēļ triodes darbības raksturošanai pielieto raksturliķņu saimes, kuras parāda strāvu atkarību no viena sprieguma pie otra sprieguma dažādām konstantām vērtībām:

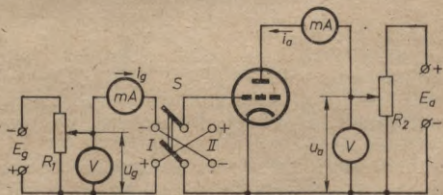
$$i_a=f(u_g), i_g=f_1(u_g) \text{ un } i_k=f_2(u_g), \text{ ja } U_a=\text{const}, \quad (2-2a, b, c)$$

un

$$i_a=\varphi(u_a), i_g=\varphi_1(u_a) \text{ un } i_k=\varphi_2(u_a), \text{ ja } U_g=\text{const}. \quad (2-3a, b, c).$$

## 2-2. Triodu statistiskās raksturliķnes

Praksē galvenokārt pielieto triodes anoda-tīkliņa raksturliķnes  $i_a=f(u_g)$  un anoda raksturliķnes  $i_a=\varphi(u_a)$ . Ja raksturliķnes uzņem ar līdzstrāvu un triode ir bez slodzes, tad iegūtās liķnes sauc par statistiskajām raksturliķnēm. 2-2. zīm. attēlots slēgums triodes statistisko raksturliķņu uzņemšanai.



2-2. zīm. Slēgums triodes statistisko raksturliķņu uzņemšanai.

uzņemšanai. Slēguma kreisajā daļā attēlota tīkliņsprieguma ķēde. Ar potenciometru  $R_1$  un polaritātes slēdzi  $S$  var plūstoši mainīt tīkliņspriegumu robežās  $-E_g < u_g < +E_g$ . Anodsprieguma regulēšanas shēma (slēguma labā puse) ir identiska ar diodes raksturliknes uzņemšanas slēgumu (sk. 1-3. zīm.).

**Anoda-tīkliņa raksturliknes.** Triodes anoda-tīkliņa raksturliknes raksturo anodstrāvas atkarību no tīkliņsprieguma pie konstantām anodsprieguma vērtībām. Lai uzņemtu šīs raksturliknes, plūstoši jāmaina tīkliņspriegums  $u_g$  un jāreģistrē anodstrāva  $i_a$ , uzturot anodspriegumu  $U_a = \text{const}$ . Anodspriegumu ieregulē (piemēram,  $U_a = 100 \text{ V}$ ) un uztur konstantu ar potenciometru  $R_2$ , bet tīkliņspriegumu plūstoši maina ar potenciometru  $R_1$ , pie tam, ja polaritātes slēdzis ir stāvoklī  $I$ , tīkliņspriegumu var mainīt robežās no 0 līdz  $-E_g$ , bet, ja stāvoklī  $II$ , — robežās no 0 līdz  $+E_g$ .

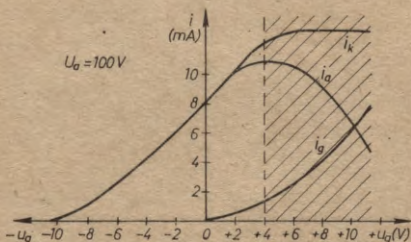
Katru anoda-tīkliņa raksturlikni (noteiktai  $U_a$  vērtībai) vispirms uzņem tīkliņspriegumu negatīvajā daļā (slēdzis  $S$  stāvoklī  $I$ ), ertības labad sākot no  $u_g = 0$ , kas atbilst potenciometra  $R_1$  slidkontakta apakšējam galējam stāvoklim. Šajā stāvoklī triodes tīkliņš saslēgts ar katodu un ir neitrāls. Triode darbojas kā diode, un elektronu plūsmu lampā (anodstrāvu) nosaka anodspriegums. Ja potenciometra  $R_1$  slidkontaktu pārbīda nedaudz uz augšu (piemēram,  $u_g = -2 \text{ V}$ ), anodstrāva lampā nedaudz samazinās. Tas notiek tādēļ, ka negatīvi lādēts tīkliņš aiztur elektronus, ierobežojot elektronu plūsmu uz anodu. Palielinot tīkliņa negatīvo spriegumu, anodstrāva arvien samazinās. Pie kāda noteikta tīkliņsprieguma elektronu plūsma lampā tiek pārtraukta — lampa noslēdzas ( $i_a = 0$ ).

Dodot triodes tīkliņam nelielu pozitīvu potenciālu (piemēram,  $u_g = +2 \text{ V}$ ), anodstrāva nedaudz pieaug un parādās arī tīkliņstrāva  $i_g$ , jo pozitīvi uzlādēts tīkliņš elektronus gan pievelk, taču to lielākā daļa paātrināta izlido cauri tīkliņam uz anodu. Palielinot triodes tīkliņa pozitīvo potenciālu, strauji pieaug tīkliņstrāva. Anodstrāva drīz sāk samazināties, jo iestājas katoda sātstrāva  $i_k = I_s$  (kā diodē), bet  $i_a = i_k - i_g$ .

Atliekot Dekarta koordinātu sistēmā uz abscisu ass  $u_g$  vērtības, bet uz ordinātu ass  $i_a$  ( $i_g$  un  $i_k$ ) vērtības, var konstruēt voltampēru raksturliknes (2-3. zīm.).

Redzams, ka pie negatīva tīkliņsprieguma ir tikai

viena raksturlikne (anoda-tikliņa), bet pie pozitīva tikliņsprieguma — jau visu strāvu raksturliknes. Tomēr praktiski uzņemt šīs raksturliknes pie  $u_g > +4 \text{ V}$  ir ļoti grūti, bet pie ievērojami lielākiem pozitīviem tikliņspriegumiem — pat neiespējami, jo plūst liela tikliņstrāva, jauda, kas izkļiedējas tikliņā, ievērojami pārsniedz pieļaujamo un tikliņš sadeg.



2-3. zīm. Raksturliknes  $i_a = f(u_g)$ ,  $i_g = f_1(u_g)$  un  $i_k = f_2(u_g)$  pie  $U_a = \text{const}$ .

Triodes stūrējošais tikliņš veidots no ļoti tievas volframa stieples, tikliņa forma — spirāle, kas tīta ap diviem armatūras stienīšiem. Līdz ar to pieļaujamo tikliņstrāvu nosaka šīs stieples diametrs. Mazjaudas triodēm pieļaujamā tikliņstrāva parasti ir daži mA. Tādēļ uzņemt triodes raksturliknes pie pozitīviem tikliņspriegumiem ir grūti. Mērījumi jāizdara ātri un pēc katra nolasījuma jāsamazina pozitīvais tikliņspriegums, lai tikliņš nepārkarstu.

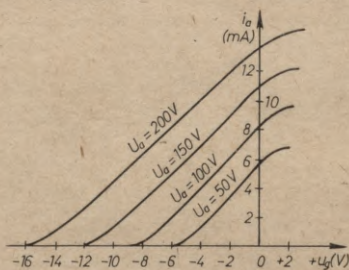
Polaritātes slēdzi no stāvokļa I uz stāvokli II drīkst pārslēgt tikai pie  $u_g = 0$ , jo pretējā gadījumā tikliņš saņem lielu pozitīvu potenciālu un var sadegt.

Parasti triodes darbojas ar negatīviem tikliņspriegumiem. Lielus pozitīvus potenciālus tikliņš drīkst saņemt tikai speciālās shēmās, kur tikliņstrāvas ierobežotas, vai arī impulsu režīmos. Tādēļ šī raksturlikņu daļa (2-3. zīm. iesvītrotā) turpmāk netiks apskatīta.

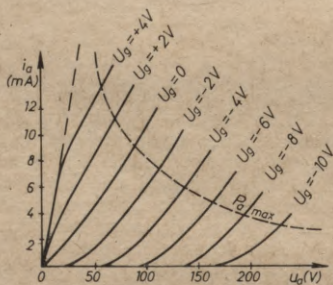
Lai uzņemtu citas anoda-tikliņa raksturliknes (pie citām  $U_a = \text{const}$  vērtībām), rikojas līdzīgi. Visas rakstur-

liknes attēlojot vienā koordinātu sistēmā, iegūst anoda-tīkliņa raksturlikņu saimi (2-4. zīm.).

**Triodes anoda raksturliknes.** Triodes anoda raksturliknes atspoguļo anodstrāvas atkarību no anodsprieguma pie konstantām tīkliņsprieguma vērtībām. Šīs raksturliknes



2-4. zīm. Anoda-tīkliņa raksturlikņu saime.



2-5. zīm. Anoda raksturlikņu saime.

uzņem līdzīgi diodes raksturliknei. Tīkliņsprieguma  $U_g$  vērtības ieregulē un uztur konstantas ar potenciometru  $R_1$ , bet ar potenciometru  $R_2$  plūstoši maina anodspriegumu  $u_a$ . Mērījumu rezultātus attēlo vienā koordinātu sistēmā, iegūstot anoda raksturlikņu saimi (2-5. zīm.).

No raksturlikņu saimes redzams, ka, palielinot nega-

tīvo tīkliņspriegumu, raksturliknes sākas vairāk pa labi (nepieciešams lielāks anoda pozitīvais potenciāls, lai elektronus «izrautu» caur negatīvi uzlādēto tīkliņu) un tās ir lēzenākas. Turpretī pie pozitīviem tīkliņspriegumiem raksturliknes atrodas pa kreisi no raksturliknes  $U_g=0$ . Šīs raksturliknes sākuma daļā pie maziem anodspriegumiem ir ļoti stāvas, tomēr stāvums ir ierobežots un nepārsniedz noteiktu robežu (svītrlinija). Tas notiek tāpēc, ka pie pozitīviem tīkliņspriegumiem un maza anodsprieguma elektroni paātrināti izlido cauri tīkliņam, bet liela to daļa atgriežas uz tīkliņa. Ja tīkliņa pozitīvo potenciālu palielina, pieaug elektronu daudzums, kuri iziet cauri tīkliņam, un arī to elektronu daudzums, kuri atgriežas uz tīkliņa. Strauji pieaug tīkliņstrāva, bet anodstrāva gandrīz nemainās.

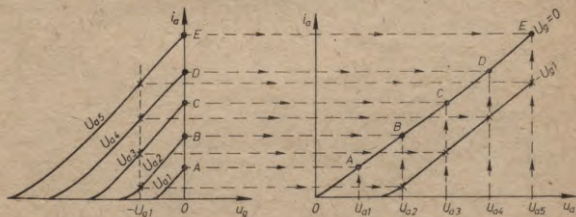
Anoda raksturlikņu saimē parasti attēlo arī pieļaujamās anoda izkliedes jaudas  $P_{a \max}$  hiperbolu, pie tam

$$i_a = \frac{P_{a \max}}{u_a} \quad (2-4)$$

Šī hiperbola nepieciešama lampas darba režīma izvēlei, jo, ja  $P_a > P_{a \max}$ , anods pārkarst un lampa sabojājas. Tātad anodstrāvu lampā ierobežo pieļaujamā izkliedes jauda. No raksturliknēm uzreiz redzams, cik liela anodstrāva ir pieļaujama pie attiecīgā anodsprieguma.

**Raksturlikņu saimju grafiška konstruēšana.** Ja ir dota, piemēram, anoda-tīkliņa raksturlikņu saime, nav grūti grafiški konstruēt anoda raksturlikņu saimi, un otrādi, jo abas raksturlikņu saimes nosaka vieni un tie paši parametri  $i_a$ ,  $u_a$  un  $u_g$ .

2-6. zīm. parādīta anoda raksturlikņu konstruēšana no

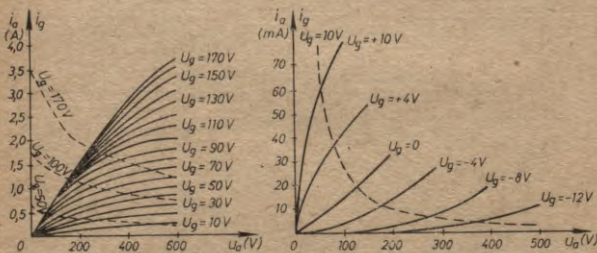


2-6. zīm. Raksturlikņu grafiška konstruēšana.

dotās anoda-tikliņa raksturliķņu saimes. Konstruēšanu izdara šādi. Blakus anoda-tikliņa raksturliķņu saimei uz zīmē anoda raksturliķņu koordinātes tā, lai abscisu ass būtu vienā līmenī. Uz anoda raksturliķņu abscisu ass attiek anodsprieguma vērtības, pie kādām uzņemtas anoda-tikliņa raksturliķnes. Pēc tam no anoda-tikliņa raksturliķnēm attiecīgajiem anodspriegumiem atbilstošos punktus (pie noteikta tikliņsprieguma) pārnes uz anoda raksturliķņu koordinātu sistēmu. Piemēram, ja  $U_g=0$ , attiecīgajiem anodspriegumiem atbilst anodstrāvas, kas apzīmētas ar burtiem *A, B, C, D, E*. Pārnesot šos punktus anoda raksturliķņu koordinātes, iegūst anoda raksturliķni, ja  $U_g=0$ . Līdzīgi rikojas, pārnesot punktus, kas atbilst citiem  $u_g$  līmeņiem (piemēram,  $-U_{g1}$ ). Ja dota anoda raksturliķņu saime, rikojas pretēji — anoda raksturliķņu krustpunktus ar attiecīgajiem anodsprieguma līmeņiem pārnes anoda-tikliņa raksturliķņu koordinātes.

**Triodes impulsu raksturliķnes.** Impulsu režīmā triodes var iegūt lielas anodstrāvas — simtiem reižu lielākas nekā nepārtrauktas darbības režīmā. Triodes impulsu režīmu panāk, dodot tās tikliņam ļoti īslaicīgus palielinātus pozitīvus spriegumus. Impulsu režīmam atbilst speciālas impulsu raksturliķnes, kas uzņemtas pie noteikta tikliņsprieguma impulsu ilguma  $t_1$  un to frekvences  $F$ . Jo mazāks ir impulsu ilgums un mazāka to frekvence, jo lielāku anodstrāvas impulsu var iegūt.

2-7. zīm. attēlotas triodes 6H1П nepārtrauktas darbības (pie tikliņspriegumiem no 10 V līdz  $-12$  V) un im-



2-7. zīm. Triodes 6H1П anoda raksturliķnes impulsu un nepārtrauktas darbības režīmā.

pulsu režīma raksturliknes, ja  $t_1=2 \mu\text{s}$  un  $F=1 \text{ kHz}$ . Kā redzams no raksturliknēm, nepārtrauktā režīmā triodes 6H1П anodstrāva nepārsniedz dažus desmitus mA, bet impulsu režīmā pie  $u_a=600 \text{ V}$  un  $u_g=+170 \text{ V}$  anodstrāva  $i_a=3,7 \text{ A}$ .

### 2-3. Triodu statistiskie parametri

Triodes statistiskie parametri raksturo triodi statistiskajā režīmā. Izšķir triodes galvenos jeb primāros parametrus — raksturliknes stāvumu, iekšējo pretestību, pastiprinājuma koeficientu —, kā arī sekundāros parametrus: starpelektrodu parazitiskās kapacitātes, izvadu induktivitātes, lampas paštrokšņus, elektronu noskreyas laiku lampā, kā arī ieejas un izejas impedances (pilnās pretestības). Tā kā triodes sekundārie parametri iespaido tās darbību galvenokārt pie augstām frekvencēm (darba režīmā), pie statistiskajiem parametriem tos neapskata. Triodes galvenos parametrus var aprēķināt no statistiskajām raksturliknēm.

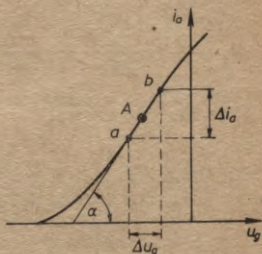
**Raksturliknes stāvums  $S$ .** Raksturliknes stāvums (jeb vienkārši stāvums) raksturo tīkliņsprieguma maiņas iespaidu uz anodstrāvu, citiem vārdiem sakot, tīkliņa «stūrēšanas» efektivitāti. Ja pie konstanta anodsprieguma tīkliņspriegumu izmaina par  $\Delta u_g$ , anodstrāva izmainās par  $\Delta i_a$ . Tad stāvums (mA/V) ir

$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_g}, \text{ ja } U_a = \text{const.} \quad (2-5)$$

Lampas raksturliknes stāvums  $S$  parāda, par cik miliampēriem mainās anodstrāva, mainot tīkliņspriegumu par 1 voltu.

Raksturliknes stāvumu var ērti aprēķināt no anodtīkliņa raksturliknes (2-8. zīm.), ņemot nelielu tīkliņsprieguma izmaiņu  $\Delta u_g$  un tai atbilstošo strāvas izmaiņu  $\Delta i_a$ . Tomēr stāvums

$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_g}$$



2-8. zīm. Triodes raksturliknes stāvuma aprēķināšana.

ir vidējs raksturliknes posmam  $a-b$ , jo šis posms var būt nelineārs. Lai iegūtu raksturliknes stāvumu darba punktā  $A$ , jāņem ļoti niecīgas tīkliņsprieguma un anodstrāvas izmaiņas. Tātad

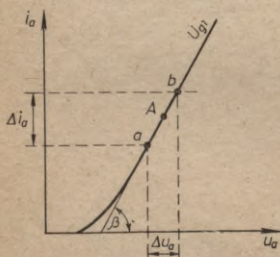
$$S = \frac{di_a}{du_g} = \operatorname{tg} \alpha, \text{ ja } U_a = \operatorname{const}. \quad (2-6)$$

Raksturliknes stāvums proporcionāls pieskares leņķa tangensam (darba punktā). Triodēm raksturliknes stāvums var svārstīties robežās  $S = 1 \div 50 \text{ mA/V}$ , visbiežāk  $S = 1 \div 10 \text{ mA/V}$ .

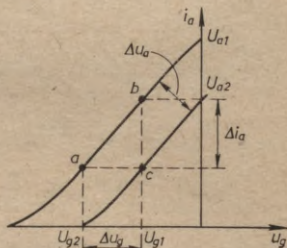
**Iekšējā pretestība  $R_1$ .** Lampas iekšējā pretestība raksturo anodsprieguma maiņas iespaidu uz anodstrāvu. Ja, izmainot anodspriegumu par  $\Delta u_a$  (V) pie konstanta tīkliņsprieguma, anodstrāva izmainās par  $\Delta i_a$  (mA), tad lampas iekšējā pretestība ( $k\Omega$ ) ir

$$R_1 = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a}, \text{ ja } U_g = \operatorname{const}. \quad (2-7)$$

Lampas iekšējo pretestību parasti aprēķina no anoda raksturliknes (2-9. zīm.). Anodsprieguma izmaiņai  $\Delta u_a$



2-9. zīm. Triodes iekšējās pretestības aprēķināšana.



2-10. zīm. Triodes pastiprinājuma koeficienta aprēķināšana.

atbilst iekšējās pretestības vidējā vērtība raksturliknes posmā  $a-b$ . Lai atrastu precīzu  $R_1$  vērtību darba punktā  $A$ , caur šo punktu jānovelk raksturliknei pieskares. Tad

$$R_1 = \frac{du_a}{di_a} = \operatorname{ctg} \beta, \text{ ja } U_g = \operatorname{const}. \quad (2-8)$$

Jo mazāks ir anodsprieguma maiņas iespaids uz anod-

strāvu, jo lielāka ir triodes iekšējā pretestība. Tomēr triodēm iekšējā pretestība ir relatīvi zema (0,5—100 kΩ), visbiežāk  $R_1=5\div 30$  kΩ.

**Pastiprinājuma koeficients  $\mu$ .** Tā kā anodstrāvu triodē nosaka divi spriegumi ( $u_a$  un  $u_g$ ), iespējams iegūt anodstrāvas izmaiņu  $\Delta i_a$ , uzturot konstantu tīkliņspriegumu un mainot anodspriegumu par  $\Delta u_a$  vai arī uzturot konstantu anodspriegumu, bet mainot tīkliņspriegumu par  $\Delta u_g$ . Tīkliņš atrodas tuvāk katodam, tāpēc tīkliņa potenciāla iespaids uz anodstrāvu ir lielāks jeb  $\Delta u_g < \Delta u_a$  pie  $\Delta i_a = \text{const}$ .

Lampas pastiprinājuma koeficients izsaka, cik reizu vairāk jāmaina anodspriegums nekā tīkliņspriegums, lai iegūtu vienu un to pašu anodstrāvas izmaiņu:

$$\mu = \frac{\Delta u_a}{\Delta u_g}, \text{ ja } \Delta i_a = \text{const}. \quad (2-9)$$

Lampas pastiprinājuma koeficientu var atrast grafiski no divām anoda-tīkliņa raksturliknēm (2-10. zīm.). Ja, piemēram,  $u_a = U_{a1}$  un  $u_g = U_{g1}$  (punkts *b* uz raksturliķnes), tad, uzturot konstantu  $U_{g1}$ , bet izmainot anodspriegumu par  $\Delta u_a = U_{a1} - U_{a2}$ , anodstrāva izmainās par  $\Delta i_a$  (punkts *c* uz otras raksturliķnes). Turpretī, ja uztur konstantu  $u_a = U_{a1}$ , bet izmaina tīkliņspriegumu par  $\Delta u_g = U_{g1} - U_{g2}$ , darba punkts uz raksturliķnes pārvietojas no *b* uz *a* un anodstrāva atkal izmainās par  $\Delta i_a$ . Tātad

$$\mu = \frac{U_{a1} - U_{a2}}{U_{g1} - U_{g2}} = \frac{\Delta u_a}{\Delta u_g}, \text{ ja } \Delta i_a = \text{const}. \quad (2-10)$$

No trīsstūra *abc* (2-10. zīm.) var aprēķināt arī citus primāros parametrus

$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_g} \text{ un } R_1 = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a}.$$

Nav grūti pārlicināties, ka

$$SR_1 = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_g} \cdot \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a} = \frac{\Delta u_a}{\Delta u_g} = \mu.$$

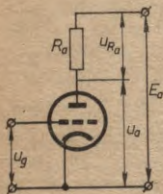
Vienādojumu

$$\mu = SR_1 \quad (2-11)$$

sauc par lampas iekšējo vienādojumu. Parasti lampu katalogos uzdod divus primāros parametrus (visbiežāk *S* un *R*<sub>1</sub>), bet trešo parametru atrod no vienādojuma (2-11).

## 2-4. Triodes darba režīmā

Par darba režīmu sauc režīmu, kad triodes anodķēdē ieslēgta slodzes pretestība (rezistors, svārstību kontūrs utt.). Pēc vecās terminoloģijas šādu režīmu sauca par dinamisko režīmu, bet pēc jaunās terminoloģijas par dinamisku sauc tādu režīmu, kad vismaz viena lampas elektroda spriegums mainās tik ātri, ka statiskā režīma likums vairs nevar pielietot.



2-11. zīm. Triode darba režīmā.

2-11. zīm. attēlota triode darba režīmā.

Anodstrāvai plūstot caur slodzes rezistoru, uz tā rodas sprieguma kritums  $u_{R_a}$ . Lampas anodspriegums vairs nav konstants, bet gan atkarīgs no anodstrāvas:

$$u_a = E_a - u_{R_a} = E_a - i_a R_a. \quad (2-12)$$

Palielinot tīkliņspriegumu negatīvā virzienā, anodstrāva samazinās, jo tīkliņš aiztur arvien vairāk elektronu. Līdz ar to samazinās  $u_{R_a}$ , bet palielinās  $u_a$ . Tātad lampas anods saņem lielāku pozitīvo potenciālu un anodstrāvai no šī viedokļa ir tendence pieaugt.

Savukārt, ja tīkliņa negatīvo potenciālu samazina, anodstrāva pieaug, pieaug arī sprieguma kritums slodzē ( $u_{R_a}$ ) un samazinās  $u_a$ . Līdz ar to lampas anoda potenciāls ir mazāk pozitīvs un anodstrāvai no šī viedokļa piemīt tendence samazināties. Redzams, ka darba režīmā lampas anods it kā darbojas pretēji tīkliņam. Šādu efektu sauc par anoda reakciju. Spriegums uz lampas anoda mainās pretfāzē ar tīkliņspriegumu.

Lai raksturotu triodi darba režīmā, nepieciešamas tās darba raksturlieknes. Jāpiebilst gan, ka lampu darba režīmā dažkārt raksturo ar statiskajām raksturlieknēm. Tas iespējams tad, ja slodzes pretestība ir ļoti maza ( $R_a \ll R_l$ ), piemēram, ja triodes anoda ķēdē ieslēgts miliampērmetrs, galvanometrs, zemomīgs relejs utt.

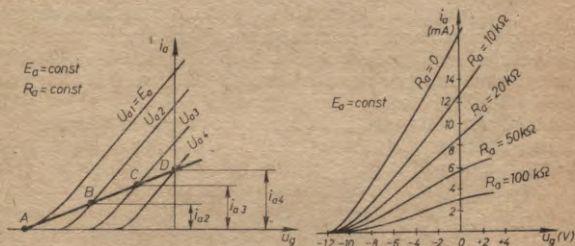
**Triodes darba raksturlieknes.** Darba režīmā triodi var raksturot ar vienu anoda-tīkliņa darba raksturliekni vai arī ar anoda darba raksturliekni, jo darba režīmu nosaka

anoda barošanas avota spriegums  $E_a$  un slodzes rezistora pretestība  $R_a$ .

Anoda-tikliņa darba raksturlikne ir grafiska sakarība starp anodstrāvu un tikliņspriegumu pie konstantas slodzes pretestības un konstanta barošanas avota sprieguma.

Anoda-tikliņa darba raksturlikni var uzņemt eksperimentāli, kā arī konstruēt grafiski, ja dotas statistiskās anoda-tikliņa raksturliknes, barošanas avota spriegums  $E_a$  un slodzes rezistora pretestība  $R_a$ .

2-12. zīm. parādīta anoda-tikliņa darba raksturliknes konstruēšana.



2-12. zīm. Anoda-tikliņa darba raksturliknes konstruēšana.

2-13. zīm. Triodes anoda-tikliņa darba raksturliknes atkarība no slodzes pretestības.

No (2-12) anodstrāva

$$i_a = \frac{E_a - u_a}{R_a} \quad (2-13)$$

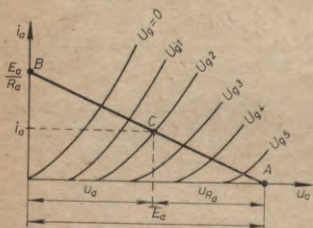
Ievietojot izteiksmē (2-13) anodspriegumu vērtības, pie kurām uzņemtas statistiskās raksturliknes ( $U_{a1}$ ,  $U_{a2}$ ,  $U_{a3}$  un  $U_{a4}$ ), iegūst anodstrāvas vērtības  $i_{a1}$ ,  $i_{a2}$ ,  $i_{a3}$  un  $i_{a4}$ , kas atbilst attiecīgajiem anodspriegumiem. Savienojot punktus  $A$ ,  $B$ ,  $C$  un  $D$ , iegūst anoda-tikliņa darba raksturlikni. Darba raksturliknes konstruēšanai nepieciešamas statistiskās raksturliknes, kas uzņemtas pie  $U_a \leq E_a$ . Ja dotas arī raksturliknes, kas uzņemtas pie  $U_a > E_a$ , tad tās neņem vērā, jo raksturliknes  $U_{a1} = E_a$  sākums atbilst darba raksturliknes sākumam (punkts  $A$ ), kur  $i_{a1} = 0$ .

Anoda-tikliņa darba raksturliknes slīpums atkarīgs no slodzes rezistora pretestības. Palielinot  $R_a$ , samazinās

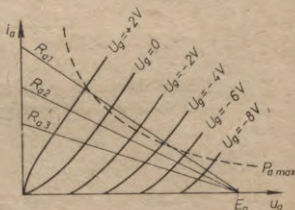
katram spriegumam atbilstošā strāva un raksturlikne ir lēzenāka. Ja  $R_a \rightarrow \infty$ , darba raksturlikne sakrīt ar abscisu asi, jo  $i_a = 0$ . Turpreti, ja  $R_a = 0$ , darba raksturlikne ir statiskā raksturlikne, kas uzņemta pie anodsprieguma  $U_a = E_a$ .

2-13. zīm. attēlotas anoda-tikliņa darba raksturliknes, ja  $E_a = \text{const}$  un slodzes rezistora pretestības ir dažādas. Šādas raksturliknes var uzņemt arī ar 2-2. zīm. attēloto slēgumu, tikai anodķēdē jāieslēdz attiecīgi slodzes rezistori.

Lai konstruētu anoda darba raksturlikni, kas attēlo sakarību starp anodstrāvu un anodspriegumu pie noteiktas anodslodzes, nepieciešamas anoda statiskās raksturliknes, jāzina barošanas spriegums  $E_a$  un slodzes rezistora pretestība  $R_a$ . Anoda darba raksturlikni jeb t. s. slodzes taisni konstruē pēc vienādojuma (2-12), kas  $i_a$ ,  $u_a$  koordinātēs atbilst taisnei. Tādēļ slodzes taisni konstruē pēc diviem punktiem, proti, slodzes taisnes un koordinātu asu krustpunktiem (2-14. zīm.). Pie  $i_a = 0$  anodspriegums  $u_a = E_a$  (punkts A uz abscisu ass), bet pie  $u_a = 0$  anodstrāva



2-14. zīm. Anoda darba raksturliknes (slodzes taisnes) konstruēšana.



2-15. zīm. Slodzes rezistora pretestības grafiska izvēle.

$i_a = \frac{E_a}{R_a}$  (punkts B uz ordinātu ass). Savienojot punktus A un B, iegūst triodes anoda darba raksturlikni jeb slodzes taisni. Punkts A ir reāls triodes darba režīma punkts (lampa slēgta un  $i_a = 0$ ), bet punkts B neatbilst reālam lampas režīmam, jo pie  $u_a = 0$  nevar pastāvēt maksimāla anodstrāva, lai cik pozitīvs arī nebūtu tiklīnspriegums. Arī punkta B tuvumā esošie slodzes taisnes punkti ir nereāli. Tie kļūst reāli tikai pa labi no svītrlinijas (2-5. zīm.).

Attēlotā slodzes taisne pilnīgi raksturo triodes darbību pie jebkura tīkliņsprieguma. Piemēram, ja  $u_g = U_{g2}$ , uz slodzes taisnes ir darba punkts  $C$ , kam atbilst noteikta anodstrāva  $i_a$ , anodspriegums  $u_a$  un sprieguma kritums uz slodzes rezistora ( $u_{R_a}$ ). Ja maina tīkliņspriegumu, mainās visi trīs šie lielumi, taču tos atkal var atrast no slodzes taisnes.

Ja maina slodzes rezistora pretestību, mainās slodzes taisnes slīpums. Pie mazām  $R_a$  vērtībām slodzes taisne ir stāvāka. Kā jau minēts, lai triode nesabojātos, jauda, kas izkļiedējas uz anoda, nedrīkst pārsniegt  $P_{a \max}$ . Tādēļ arī bieži risina uzdevumu tā, ka meklē pieļaujamo  $R_{a \min}$  pie dotā barošanas avota sprieguma  $E_a$ . Pareizi izraudzītai slodzes rezistora pretestībai atbilstošā slodzes taisne nešķērso  $P_{a \max}$  hiperbolu (2-15. zīm.). Redzams, ka pretestība  $R_a = R_{a1}$  nav pieļaujama, jo pie dažām tīkliņsprieguma vērtībām uz anoda izkļiedētā jauda  $P_a > P_{a \max}$  un lampa sabojājas.

**Triodes darba parametri.** Triodi darba režīmā raksturo darba raksturlienes stāvums  $S_d$  un darba pastiprinājuma koeficients  $\mu_d$  jeb  $K$ . Vecajā terminoloģijā šie parametri saucās par dinamiskajiem.

Darba raksturlienes stāvumu  $S_d$  var atrast grafiski no anoda-tīkliņa darba raksturlienes līdzīgi tam, kā nosaka  $S$  (2-8. zīm.), taču biežāk  $S_d$  aprēķina analitiski:

$$S_d = S \frac{R_1}{R_1 + R_a} \quad (2-14)$$

No izteiksmes (2-14) redzams, ka  $S_d < S$  (to var konstatēt arī no raksturliknēm 2-13. zīm.). Ja  $R_a = R_1$ ,  $S_d = 0,5 S$ . Ja  $R_a = 0$ ,  $S_d = S$ , bet pie  $R_a = \infty$  stāvums  $S_d = 0$ . Tātad  $S_d$  atkarībā no slodzes pretestības  $R_a$  var atrasties robežās

$$0 < S_d < S \quad (2-15)$$

Dažreiz lieto slodzes koeficientu

$$a = \frac{R_a}{R_1} \quad (2-16)$$

tad, izdalot izteiksmes (2-14) saucēju un skaitītāju ar  $R_1$ , iegūstam

$$S_d = \frac{S}{1+a} \quad (2-17)$$

Darba pastiprinājuma koeficients jeb pakāpes pastiprinājuma koeficients ir sprieguma izmaiņas uz slodzes rezistora attiecība pret tīkliņsprieguma izmaiņu:

$$\mu_d = K = \frac{\Delta u_{R_a}}{\Delta u_g} \quad (2-18)$$

Tātad  $\mu_d$  parāda, par cik voltiem mainās spriegums uz slodzes rezistora, mainot tīkliņspriegumu par vienu voltu.

Pakāpes pastiprinājuma koeficientu analītiski var noteikt no izteiksmes

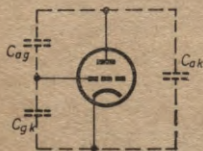
$$K = \mu_d = \mu \frac{R_a}{R_i + R_a} \quad (2-19)$$

Ievēdot slodzes koeficientu,

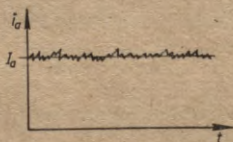
$$K = \mu_d = \mu \frac{a}{1+a} \quad (2-20)$$

Izteiksmēm (2-19) un (2-20) ir liela praktiska nozīme. Ar to palīdzību aprēķina pakāpes pastiprinājuma koeficientu dotajai  $R_a$  vai otrādi, zinot nepieciešamo pastiprinājuma koeficientu, atrod slodzes rezistora pretestības  $R_a$  vērtību.

**Triodes sekundārie parametri.** Kā jau minēts, triodes sekundārie parametri iespaido tās darbību tikai darba režīmā pie augstām frekvencēm. Svarīgākie sekundārie parametri ir starpelektrodu parazitiskās kapacitātes. Starp jebkuriem diviem vadītājiem, ja starp tiem ir izolators, izveidojas parazitiska kapacitāte. Arī ikvienā triodes elektrodu pāri (vakuums ir izolators) pastāv parazitiska kapacitāte (2-16. zīm.). Parazitiskās kapacitātes apzīmējot, lieto indeksus, kas norāda, starp kuriem elektrodiem tās mēra. Piemēram,  $C_{ag}$  ir parazitiskā kapacitāte starp lampas anodu un tīkliņu.



2-16. zīm. Triodes parazitiskās kapacitātes.



2-17. zīm. Anodstrāvas fluktuācijas.

Mazjaudas triodēm parazitiskās kapacitātes var būt relatīvi lielas — no dažiem pF līdz 10—20 pF. Šīs kapacitātes ir atkarīgas arī no lampas darba režīma, jo, mainoties elektronu plūsmai lampā un telpas lādiņam starp elektrodiem, mainās dielektriskā konstante — it kā mainās attālums starp elektrodiem. Parazitiskās kapacitātes ierobežo triodes darbību pie augstām frekvencēm un rada pastiprinātāju frekvenču kropļojumus (sk. 7. nodaļu).

**Triodes paštrokšņi.** Līdz šim pieņemām, ka, līdzstrāvai plūstot caur triodi, anodstrāva ir nemainīga (atkarīga tikai no triodes režīma) un vienāda ar miliampēmetra rādījumu. Patiesībā anodstrāva nepārtraukti mainās ap savu vidējo vērtību (2-17. zīm.). Šo izmaiņu amplitūdas ir ļoti mazas un to secība nenoteikta. Šīs anodstrāvas izmaiņas jeb fluktuācijas izraisa katoda nevienmērīgā emisija, elektronu kustība telpas lādiņā un elektronu sekundārā emisija no elektrodiem (triodē pie pietiekami liela anodsprieguma elektroni, triecoties pret anodu, izsit no tā sekundāros elektronus, kas anoda pozitīvā elektriskā lauka ietekmē atkal atgriežas anodā). Fluktuācijas rada anodstrāvas maiņstrāvas komponenti ar ļoti plašu frekvenču spektru. Pastiprinātāju izejā šī maiņstrāvas komponente rada trokšņu spriegumu. Ševišķi bīstami šie trokšņi ir ļoti jutīgās pastiprinātāju iekārtās, kur ieejas signāls ir niecīgs.

Pārējie sekundārie parametri triodes darbību ietekmē tikai pie ļoti augstām frekvencēm un tādēļ netiek apskatīti.

**Triodes galvenie trūkumi:** 1) samērā mazs pastiprinājuma koeficients  $\mu = SR_1$ . Tas izskaidrojams ar anoda reakciju — ievērojamu anodsprieguma iespaidu uz anodstrāvu (tātad ar relatīvi zemu iekšējo pretestību  $R_1$ ). Lai palielinātu  $R_1$  (samazinātu anoda reakciju), triodē jāievieto papildu tīkliņi, tātad jāizveido daudz elektrodu lampa (sk. 3. nodaļu); 2) triodei starp tīkliņu un anodu ir relatīvi liela kapacitāte  $C_{ag}$ , caur kuru saistās ieejas un izejas ķēdes. Tas ierobežo triodes darbību pie augstām frekvencēm. Arī šis trūkums novērsts daudz elektrodu lampās.

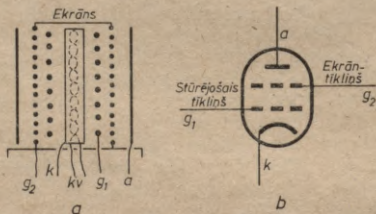
### 3. nodaļa

## DAUDZELEKTRODU LAMPAS

### 3-1. Tetrodes

Anoda reakciju elektronu lampā var samazināt, ja starp stūrējošo tīkliņu un anodu ievieto vēl vienu tīkliņu un tam piešķir konstantu pozitīvu (attiecībā pret katodu) potenciālu. Šo tīkliņu sauc par ekrāntīkliņu, jo tas «ekranē» anodu no pārējiem elektrodiem, turklāt ekrāntīkliņa pozitīvais potenciāls nosaka elektronu ātrumu lampā. Šādu četru elektrodu (jeb divu tīkliņu) vakuuma lampu sauc par tetrodi.

3-1. zīm. attēlots tetrodes elektrodu izvietojums un tās

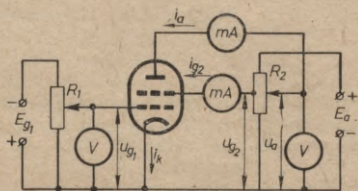


3-1. zīm. Tetrode:

*a* — elektrodu izvietojums; *b* — shematiskais apzīmējums.

shematiskais apzīmējums. Ekrāntīkliņam, kas parasti izveidots daudz blīvāks nekā stūrējošais tīkliņš, galos piestiprināti speciāli diskveida ekrāni, kuri samazina tetrodes caurejošo kapacitāti  $C_{a g_1}$ . Tīkliņa blīvums ievērojami palielina tā ekranējošās īpašības, bet diemžēl palielina arī ekrāntīkliņa strāvu  $i_{g_2}$ , kas ir nelietderīga (zudumi).

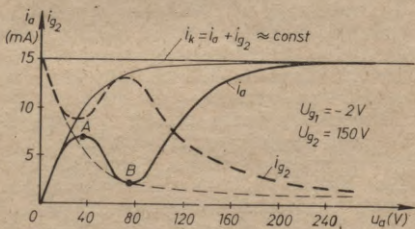
Tā kā ekrāntikliņa spriegums  $U_{g_2} = \text{const}$ , tetrodi, tāpat kā triodi, raksturo galvenokārt ar divām raksturliķņu saimēm: anoda-tikliņa un anoda raksturliķnēm. 3-2. zīm.



3-2. zīm. Slēgums tetrodes raksturliķņu uzņemšanai.

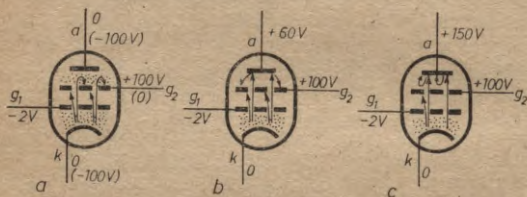
attēlotā shēmā tetrodes raksturliķņu uzņemšanai. Parasti tetrodei stūrejošā tikliņa spriegums ir negatīvs ( $u_{g_1} < 0$ ), līdz ar to  $i_{g_1} = 0$ , bet  $i_k = i_a + i_{g_2}$ . Attēlotajā shēmā ekrāntikliņa spriegums ir nemainīgs, tā lielumu nosaka potenciometra  $R_2$  atzarojums. Parasti  $u_{g_2} = (0,2 \div 0,5) u_a$ . Ja vēlams uzņemt raksturliķnes dažādām  $u_{g_2}$  vērtībām, jālieto speciāls potenciometrs ekrāntikliņa sprieguma regulēšanai.

**Tetrodes anoda raksturliķnes.** Tās ir  $i_a = \varphi(u_a)$ , ja  $U_{g_1} = \text{const}$ ,  $U_{g_2} = \text{const}$ . Tā kā anoda raksturliķnes raksturo anodsprieguma ietekmi uz anodstrāvu (lampas iekšējo pretestību), tās uzskatāmi parāda, vai ir sasniegts vēlamais rezultāts, izmantojot otro tikliņu. 3-3. zīm. ar tievu



3-3. zīm. Tetrodes anoda raksturliķnes.

liniju attēlota teorētiskā anoda raksturlikne, bet ar biezu liniju — reālā. Reālā raksturlikne stipri atšķiras no teorētiskās, jo ir izkropļota. Lai labāk izprastu šo kropļojumu rašanos, sikāk jāaplūko tetrodes darbība ar dažādiem anodspriegumiem. Ja  $u_a=0$ , bet  $U_{g_2}=\text{const}$  (piemēram,  $U_{g_2}=100\text{ V}$ ), ekrāntīkliņš ir pozitīvs attiecībā pret anodu jeb anods ir negatīvs attiecībā pret ekrāntīkliņu (ja nosacīti pieņem  $U_{g_2}=0$ , tad  $u_a=-100\text{ V}$ ). Tātad pozitīvi uzlādētais ekrāntīkliņš pievelk elektronus (elektronu plūsmas lielumu nosaka pirmā tīkliņa potenciāls  $u_{g_1}$ ). Tie pārtrināti dodas ekrāntīkliņa virzienā. Daļa nonāk uz tā, bet pārējie izlido cauri ekrāntīkliņa vijumiem un izveido starp ekrāntīkliņu un anodu otru elektronu mākonī (pirmais atrodas pie katoda). Šie elektroni uz anodu neplūst,



3-4. zīm. Tetrodes darbība pie dažādiem anodspriegumiem.

bet atgriežas pie ekrāntīkliņa, jo tas ir pozitīvs, bet  $u_a=0$  (3-4. zīm. a). Ja anodam piešķir augošu pozitīvu potenciālu, anodstrāva no sākuma strauji pieaug, jo anods «uzsūc» otro elektronu mākonī. Elektroni pret anodu atduras ar mazu enerģiju. Palielinot anoda pozitīvo potenciālu, pieaug arī enerģija, ar kādu elektroni triecas pret anodu. No tā tiek izsisti sekundārie elektroni, kas virzās uz ekrāntīkliņu (kamēr tas ir pozitīvāks par anodu). Lampā starp anodu un ekrāntīkliņu rodas pretēja virziena elektronu plūsma (3-4. zīm. b), līdz ar to samazinās anodstrāva, bet palielinās ekrāntīkliņa strāva. Šo parādību sauc par dinatronefektu. Kad anoda potenciāls ir lielāks par ekrāntīkliņa potenciālu un anods kļuvis pozitīvs attiecībā pret ekrāntīkliņu, sekundārie elektroni vairs neplūst uz ekrāntīkliņu, bet atgriežas uz anodu (3-4. zīm. c). Līdz ar to

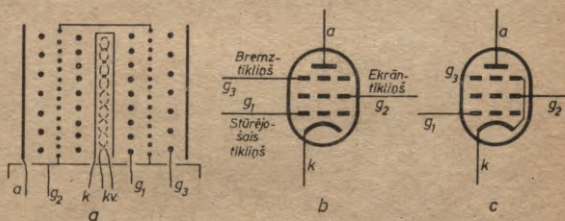
dinatronefekts izbeidzas un reālā tetrodes anoda raksturlikne kļūst tuva teorētiskajai.

Tetrodes anoda raksturlikne līdzīga tuneļdiodes volt-ampēru raksturliknei (sk. 1. nodaļu). Raksturliknes posmā  $A-B$  tetrodei ir negatīva iekšējā pretestība (anodsprieguma pieaugumam atbilst anodstrāvas samazināšanās). Izmantojot šo īpašību, tetrodes agrāk lietoja svārstību ģeneratoru shēmās — t. s. dinatrongeneratoros. Pastiprinātāju shēmās tetrodes lieto ļoti ierobežoti, jo, darbojoties ar slodzes rezistoru, anodspriegums tetrodei mainās un momentos, kad  $u_a < u_{g_3}$ , rodas lieli kropļojumi dinatronefeka dēļ.

### 3-2. Pentodes

Lai novērstu dinatronefektu, tetrodē starp ekrāntīkliņu un anodu ievieto vēl vienu tīkliņu  $g_3$ , tā izveidojot trīstīkliņu jeb piecelektrodu vakuuma lampu — pentodi.

3-5. zīm. attēlots pentodes elektrodu izvietojums un tās shematiskais apzīmējums. Trešo tīkliņu  $g_3$  sauc par brems-tīkliņu jeb aizsargtīkliņu un parasti to pievieno katodam.



3-5. zīm. Pentode:

a — elektrodu izvietojums; b un c — shematiskais apzīmējums.

Tātad  $u_{g_3} = 0$ . Daļai pentodu brems-tīkliņam ir atsevišķs izvads (3-5. zīm. b), bet daļai to jau balona iekšpusē savieno ar katodu (3-5. zīm. c).

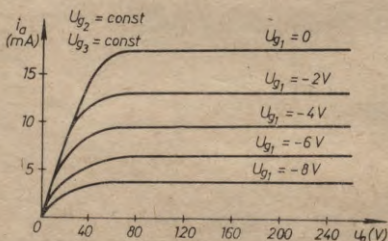
Pentodē brems-tīkliņš ar savu nulles potenciālu sadala elektrisko lauku starp anodu un ekrāntīkliņu divos attiecībā pret brems-tīkliņu pozitīvos elektriskajos laukos, pie

tam elektriskais lauks starp  $g_2$  un  $g_3$  ir konstants ( $U_{g_2} = \text{const}$ ) un iedarbojas bremsējoši uz primāro elektronu plūsmu, izveidojot starp ekrāntīkliņu un bremsīkliņu otro elektronu mākonī. Turpretī elektriskais lauks starp anodu un bremsīkliņu primāros elektronus paātrina («uzsū» otro elektronu mākonī), bet sekundāros bremsē un atgriež uz anodu neatkarīgi no tā, vai anodspriegums lielāks par ekrāntīkliņa spriegumu vai mazāks. Tātad dinatronefekts pentodē nav iespējams.

Atsevišķos gadījumos uz bremsīkliņu padod negatīvu spriegumu ( $u_{g_3} < 0$ ). Tomēr bremsīkliņa nozīme dinatronefekta novēršanā neizmainās, jo elektrisko lauku polaritāte un darbība ir tāda pati kā tad, ja  $u_{g_3} = 0$ .

### 3-3. Pentodu raksturliknes un parametri

Tā kā pentodes lielākoties darbojas apstākļos, kad  $U_{g_2} = \text{const}$  un  $U_{g_3} = \text{const}$  ( $U_{g_3} = 0$ ), arī tās parasti raksturo ar divām līkņu saimēm: anoda un anoda-tīkliņa raksturliknēm. Lai tās uzņemtu, pielieto 3-2. zīm. attēloto slēgumu. Ja bremsīkliņš izveidots kā atsevišķs elektrods, tas jāsavieno ar katodu. 3-6. zīm. attēlotas pentodes anoda



3-6. zīm. Pentodes anoda raksturlikņu saime.

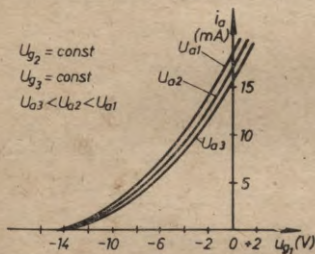
raksturliknes  $i_a = \varphi(u_a)$ , ja  $U_{g_1} = \text{const}$ ,  $U_{g_2} = \text{const}$ ,  $U_{g_3} = \text{const}$ . Redzams, ka tās pilnīgi atbilst teorētiskajām tetrodēs raksturliknēm (3-3. zīm.).

Pentodē anodspriegums gandrīz nemaz neiespāido

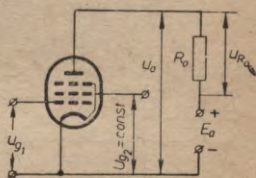
anodstrāvu. Tas tādēļ, ka starp anodu un katodu atrodas trīs tīkliņi un katrs no tiem (sevišķi ekrāntīkliņš) samazina anoda elektriskā lauka iespaidu uz pirmo elektronu mākonī, bet jau samērā neliela pozitīvā anoda potenciāla gadījumā viss otrais elektronu mākonis tiek «uzsūkts». Līdz ar to iestājas it kā sātstrāva (tikai tā nav katoda sātstrāva) un pentodes iekšējā pretestība kļūst ļoti liela.

Toties pentodes anodstrāva ir stipri atkarīga no stūrējošā tīkliņa sprieguma, it īpaši, ja tas ir tuvs nullei. Palielinot negatīvo stūrējošā tīkliņa potenciālu, anodstrāva vairs tik krasi nesamazinās — anoda raksturliknes atrodas cita citai tuvāk.

**Anoda-tīkliņa raksturliknes.** Tās ir  $i_a = f(u_{g1})$ , ja  $U_{g2} = \text{const}$ ,  $U_{g3} = \text{const}$ ,  $U_a = \text{const}$ . Necīgās anoda reakcijas dēļ pentodes anoda-tīkliņa raksturliknes, kas uzņemtas dažādiem anodspriegumiem, gandrīz sakrīt (3-7. zīm.). Tā-



3-7. zīm. Pentodes anoda-tīkliņa raksturliknes.



3-8. zīm. Pentode darba režīmā.

dēļ arī praktiski parasti aplūko tikai vienu — vidējo — raksturlikni. Kā redzams zīmējumā, pentodes raksturlikne ir nelineārāka kā triodei. Raksturliknes stāvums (to aprēķina tāpat kā triodei) ir mainīgs. Maksimāls tas ir pie stūrējošā tīkliņa spriegumiem, kas tuvi nullei. Šai gadījumā elektroni ar pietiekami lielu ātrumu lido uz ekrāntīkliņu. Lielākā daļa elektronu gan izlido starp  $g_2$  vijumiem un dodas uz anodu, bet tie, kas nonāk uz ekrāntīkliņa, izsīti no tā sekundāros elektronus, kas kopā ar primāro elektronu plūsmu dodas uz anodu. Līdz ar to anodstrāva nedaudz pieaug un pieaug arī raksturliknes stāvums  $S$ .

**Pentodes darba raksturliknes.** Sakarā ar niecīgo anoda reakciju (lielo lampas iekšējo pretestību  $R_1$ ) anodstrāvu gandrīz neiespaido sprieguma kritums uz slodzes rezistora ( $u_{Ra}$ ). Spriegums uz lampas anoda attiecībā pret katodu — lampas anodspriegums — ir  $u_a = E_a - u_{Ra}$  (3-8. zīm.). Tā kā  $u_{Ra}$  ir mazs, darba raksturlikne gandrīz sakrīt ar statisko raksturlikni (3-7. zīm.) un  $S_d \approx S$ . Tikai ievērojami lielai slodzes rezistora pretestībai darba raksturlikne ir nedaudz zemāka par statisko raksturlikni. Darba raksturlikni jeb slodzes taisni anoda raksturlikņu koordinātēs attēlo līdzīgi kā triodei (sk. 2-14. zīm.).

**Pentodes parametri.** Pentodei, tāpat kā triodei, izšķir trīs galvenos parametrus —  $S$ ,  $R_1$  un  $\mu$ , tomēr grafiski aprēķināt tos ir grūtāk. Lampas stāvums grafiski aprēķināms tāpat kā triodei (sk. 2-8. zīm.), tikai, ievērojot pentodes raksturliknes nelinearitāti, jācenšas ņemt pēc iespējas mazākus  $\Delta u_{g1}$  un atbilstošos  $\Delta i_a$ . Tad

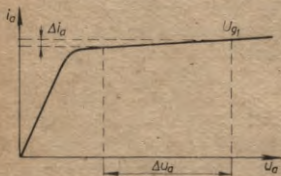
$$S = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_{g1}}, \text{ ja } U_{g2} = \text{const}, U_{g3} = \text{const}, U_a = \text{const}. \quad (3-1)$$

Praktiski pentodēm stāvums  $S = 5 \div 50$  mA/V, visbiežāk 5–20 mA/V, tātad apmēram divas reizes lielāks nekā triodēm.

Pentodes iekšējo pretestību aprēķina grafiski:

$$R_1 = \frac{\Delta u_a}{\Delta i_a}, \text{ ja } U_{g1} = \text{const}, U_{g2} = \text{const}, U_{g3} = \text{const}. \quad (3-2)$$

Tā kā pentodes anoda raksturlikņu darba daļas tuvas horizontālām (3-9. zīm.), jāņem liela  $\Delta u_a$  vērtība, lai iegūtu



3-9. zīm. Pentodes iekšējās pretestības noteikšana.

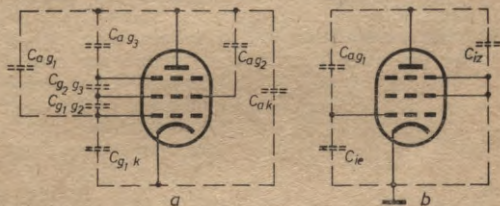
kaut cik ievērojamu  $\Delta i_a$ . Tomēr šādi aprēķinātā  $R_1$  vērtība ir neprecīza, jo neliela  $\Delta i_a$  noteikšanas neprecizitāte rada lielu kļūdu  $R_1$  aprēķināšanā. Pentodēm iekšējā pretestība ir ļoti liela un atrodas robežās no simtiem k $\Omega$  līdz dažiem M $\Omega$ .

Lampas pastiprinājuma

koeficientu grafiski aprēķināt praktiski nav iespējams, un to aprēķina no vienādojuma (2-11). Redzams, ka pentodēm pastiprinājuma koeficients  $\mu$  mērāms tūkstošos un desmittūkstošos, tātad  $\mu$  pentodei daudz lielāks nekā triodei.

No sekundārajiem parametriem svarīgākie ir paštrokšņi un starpelektrodu parazitiskās kapacitātes. Paštrokšņi daudzelektrodu lampā (tātad arī pentodē) ir ievērojami lielāki nekā triodē. Tas izskaidrojams ar strāvu papildu sadalījumiem lampā un papildu sekundārajām emisijām. Vispār daudzelektrodu lampās paštrokšņi pieaug proporcionāli pozitīvo elektrodu skaitam, jo tieši pozitīvie elektrodi rada elektronu plūsmas sadalīšanos un elektronu sekundāro emisiju.

Pentodes starpelektrodu kapacitātes attēlotas 3-10.



3-10. zīm. Pentodes starpelektrodu kapacitātes:  
a — shematiskais apzīmējums; b — ekvivalentā shēma.

zīm. a. Kā redzams, šo starpelektrodu kapacitāšu skaits ir ievērojami lielāks nekā triodei. Tomēr iespējams izveidot ievērojami vienkāršotu pentodes ekvivalento starpelektrodu kapacitāšu shēmu. Plaši izmanto slēgumu, kurā ekrāntīkliņš  $g_2$  un bremztīkliņš  $g_3$  savienoti ar katodu caur pietiekami lielu kapacitāti. Tas nozīmē, ka šo tīkliņu maiņstrāvu potenciāli vienādi ar nulli. Sajā gadījumā (3-10. zīm. a un b) ieejas kapacitātes vērtību galvenokārt nosaka kapacitāšu summa:

$$C_{ie} \approx C_{g_1k} + C_{g_1g_2}, \quad (3-3)$$

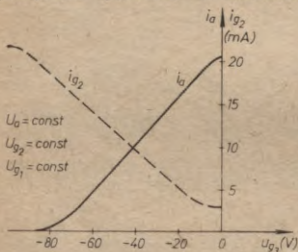
jo pārējo starpelektrodu kapacitāšu ietekme uz  $C_{ie}$  ir niecīga. Izejas kapacitātes vērtību galvenokārt nosaka

kapacitāte starp anodu un iezemētajiem bremsētajiem un ekrāntīkliņiem, kā arī kapacitāte starp anodu un katodu:

$$C_{iz} \approx C_{a g_2} + C_{a g_1} + C_{a k}. \quad (3-4)$$

Tomēr praktiski vislielāko interesi izraisa caurejošā kapacitāte — kapacitāte  $C_{a g_1}$  starp stūrējošo tīkliņu un anodu, kura saista lampas ieeju ar izeju. Caur šo kapacitāti augstfrekvences pastiprinātāja pakāpē izejas signāls nonāk atpakaļ ieejā, radot parazitisku atgriezenisko saiti. Pentodē šī kapacitāte ir niecīga — simtdaļas un pat tūkstošdaļas pF —, jo starp stūrējošo tīkliņu un anodu atrodas divi tīkliņi ar nulles potenciālu maiņstrāvai, bez tam ekrāntīkliņa galos izveidoti speciāli diskveida ekrāni (3-5. zīm. a). Tātad pentodē caurejošā kapacitāte, salīdzinot ar triodi, ir apmēram tūkstoš reižu mazāka, tādēļ pentodes parastajās pastiprināšanas shēmās darbojas pie daudz augstākām frekvencēm nekā triodes.

**Pentodes anoda-bremsējošā raksturliķne.** Atsevišķos gadījumos pentodes bremsējošā tīkliņu izmanto par otro stūrējošo tīkliņu, jo, dodot tam pietiekami lielu negatīvu potenciālu, anodstrāvu var ievērojami samazināt vai pilnīgi pārtraukt. Tas nozīmē, ka anods caur bremsējošā tīkliņa negatīvā potenciāla barjeru «neuzsūc» otro elektronu mākonī. Ekrāntīkliņa strāva šajā gadījumā pieaug. 3-11. zīm. attēlotas raksturliķnes  $i_a = \varphi(u_{g_2})$  un  $i_{g_2} = f(u_{g_2})$ . Protams, katodstrāva (primāro elektronu plūsma)

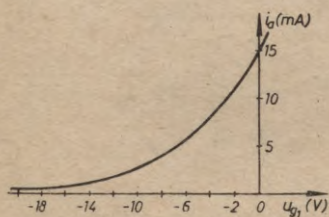


3-11. zīm. Pentodes anoda-bremsējošā tīkliņa raksturliķne.

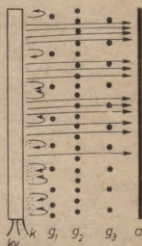
lampā nav atkarīga no bremsējošā tīkliņa potenciāla, kas ietekmē tikai strāvas sadalījumu starp anodu un ekrāntīkliņu. Bremsējošā tīkliņu izmanto par otro stūrējošo tīkliņu, ja ar pentodi izpilda amplitūdas modulāciju, regulē lampas pastiprinājumu ar negatīvu līdzspriegumu uz šī tīkliņa u. c.

**Pentodes ar mainīgu raksturliķnes stāvumu.** Ievērojama daļa pentodu ir ar tā saucamajām pagarinātajām raksturliķnēm jeb mainīgu raksturliķnes stāvumu  $S$ .

3-12. zīm. attēlota šādas pentodes anoda-tīkliņa raksturlikne. Kā redzams, lai šādu pentodi slēgtu, uz stūrējošo tīkliņu jāpadod ievērojams negatīvs spriegums. Raksturliknes posmā, kur lieli negatīvie stūrējošā tīkliņa spriegumi, raksturliknes stāvums ir niecīgs. Šādā režīmā arī lampas pastiprinājuma koeficients ir mazs. Pentodes ar



3-12. zīm. Pentodes ar mainīgu raksturliknes stāvumu anoda-tīkliņa raksturlikne.



3-13. zīm. Pentodes ar mainīgu raksturliknes stāvumu uzbūve un stūrējošā tīkliņa darbība.

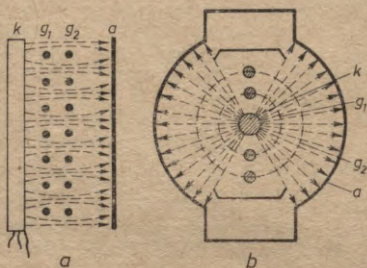
pagarinātajām raksturliknēm izmanto shēmās ar automātisku pastiprinājuma koeficienta regulēšanu, kur atkarībā no ieejas (pastiprināmā) signāla lieluma mainās lampas priekšspriegums, pie tam, ieejas signālam palielinoties, negatīvais stūrējošā tīkliņa spriegums palielinās, bet lampas pastiprinājuma koeficients samazinās — un otrādi.

Lai iegūtu pentodi ar pagarinātu raksturlikni, tās stūrējošo tīkliņu uztin ar mainīgu kāpi. Tad pie liela negatīva potenciāla  $u_{g1}$  elektronu plūsma caur tīkliņu tiek daļēji slēgta (kur tīkliņa vijumi blīvāki). 3-13. zīm. attēlota šādas pentodes konstrukcija un simboliski parādīta stūrējošā tīkliņa darbība.

### 3-4. Staru tetrodes

Staru tetrodēs dinatronefektu novērš speciāla šo lampu konstrukcija. 3-14. zīm. parādīts staru tetrodes elektrodu izvietojums un elektronu plūsma lampā. Raksturīgākā

staru tetrodes konstruktīvā īpatnība ir tā, ka ekrāntikliņš ir ar tādu pašu vijumu skaitu kā stūrējošais tikliņš, pie tam tā vijumi atrodas precīzi aiz stūrējošā tikliņa vijumiem. Var teikt, ka ekrāntikliņš novietots stūrējošā tikliņa ēnā. Līdz ar to elektronu plūsma vertikālā plaknē fokusējas staros (3-14. zīm. *a*) un ir blīva. Elektronu lielākā

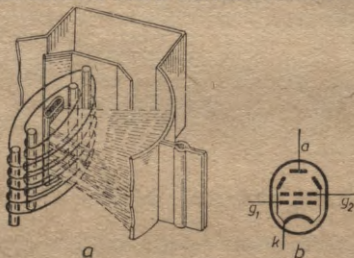


3-14. zīm. Staru tetrodes elektrodu izvietojums:

*a* — vertikālā plaknē; *b* — horizontālā plaknē.

daļa izlido caur tikliņu spraugām uz anodu, un tikai neliela daļa nonāk uz ekrāntikliņa ( $i_{g_2}$  ir maza). Lai tikliņu armatūras stieņi neizkļedētu blīvos elektronu starus, aiz šiem stieņiem novietoti speciāli ekrāni, kas savienoti ar katodu, tātad ar nulles potenciālu. Līdz ar to elektroni fokusējas arī horizontālā plaknē (3-14. zīm. *b*).

3-15. zīm. attēlota staru tetrodes konstrukcija un she-

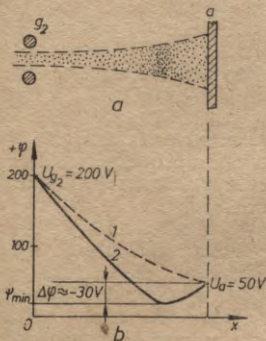


3-15. zīm. Staru tetròde:

*a* — uzbūve; *b* — shematiskais apzīmējums.

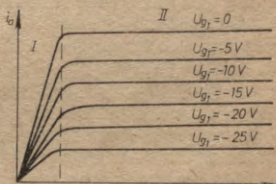
matiskais apzīmējums. Tomēr dažreiz staru tetrodes shēmas attēlo tāpat kā parastās tetrodes.

Lai izprastu, kādā veidā staru tetrodē novērsts dinatronefekts, jāizseko potenciāla sadalījumam starp ekrāntīkliņu un anodu, piemēram, ja  $U_{g_2} = 200$  V un  $U_a = 50$  V. Parastā tetrodē šādos apstākļos rodas spilgti izteikts dinatronefekts, jo spriegums starp anodu un ekrāntīkliņu sadalās gandrīz lineāri ar augošu vērtību ekrāntīkliņa virzienā (3-16. zīm. *b* likne 1), tāpēc sekundārie elektroni



3-16. zīm. a) Elektronu plūsma staru tetrodē starp  $g_2$  un  $a$ .  
b) Potenciāla sadalījums starp ekrāntīkliņu un anodu:

1 — parastajai tetrodei; 2 — staru tetrodei.



3-17. zīm. Staru tetrodes anoda raksturliktu saime.

lido uz ekrāntīkliņu. Staru tetrodē sprieguma sadalījums ir cits. Tā kā anoda potenciāls ir mazāks, elektroni starp ekrāntīkliņu un anodu tiek bremsēti. Tātad elektronu staros anoda tuvumā ir lielāks elektronu blīvums. Anoda sekundārās emisijas radītā pretējā elektronu plūsma samazinā šo blīvumu pie paša anoda, bet nelielā attālumā no anoda izveidojas maksimālais elektronu blīvums starā (3-16. zīm. *a*). Šāds nevienmērīgs elektronu blīvums starā iespaudo potenciāla sadalījumu starp anodu un ekrāntīkliņu. Atceroties, ka elektroniem ir negatīvs lādiņš, saprotams, ka potenciāls punktā, kas atbilst maksimālajam

elektronu blīvumam, ir mazāks nekā anodam (praktiski apmēram par 30 V). Tātad šajā punktā potenciāls attiecībā pret anodu ir  $-30$  V (3-16. zīm. *b* likne 2) un izveidojas potenciāla barjera, kas nelaiž cauri sekundāros elektronus. Līdz ar to elektronu sablīvējumi staros iedarbojas līdzīgi bremztikliņam pentodē. Ja  $u_a > u_{g_2}$ , šādu elektronu sablīvējumu nav, bet arī dinatronefekta nav, jo visus sekundāros elektronus anods pievelk atpakaļ.

3-17. zīm. parādītas staru tetrodes anoda raksturliknes. Tās ir līdzīgas pentodes anoda raksturliknēm, tikai šeit ātrāk iestājas darba zona, jo otrā elektronu mākoņa uzsūkšana (zona *I*) izbeidzas pie mazāka  $u_a$  (anodam nav jādarbības caur bremztikliņu). Bez tam arī stūrējošā tikliņa iedarbība ir mazāk efektīva, jo stūrējošais tikliņš staru tetrodēs ir retāks (tāds pats kā ekrāntikliņš). Tā kā dinatronefekts staru tetrodē tiek novērsts tikai tad, ja elektronu plūsma staros ir blīva, staru tetrodes izveido ar spēcīgiem katodiem. Staru tetrodes galvenokārt lieto jaudas pastiprinātājos.

Anoda-tikliņa raksturliknes staru tetrodei ir līdzīgas pentodes anoda-tikliņa raksturliknēm (3-7. zīm.), tikai anodsprieguma iespaids uz anodstrāvu ir lielāks un raksturliknes, kas uzņemtas dažādām  $u_a$  vērtībām, atrodas nedaudz tālāk cita no citas.

Staru tetrodu iekšējā pretestība parasti ir desmiti līdz simti  $k\Omega$ , bet pastiprinājuma koeficients — daži simti. Raksturliknes stāvums staru tetrodēm apmēram tāds pats kā pentodēm, bet caurejošā kapacitāte nedaudz lielāka.

**Tetrodu un pentodu ekrāntikliņu barošanas shēmas.** Lai nepieļautu ekrāntikliņa reakciju (līdzīgu anoda reakcijai triodē), nepieciešams, lai ekrāntikliņa potenciāls būtu konstants, t. i., nebūtu atkarīgs no ekrāntikliņa maiņstrāvas komponentes. To panāk, savienojot ekrāntikliņu ar katodu caur samērā lielu kapacitāti  $C_{g_2}$ . Kapacitāti izvēlas atkarībā no zemākās pastiprināmā signāla frekvences tā, lai kapacitātes reaktīvā pretestība šīs frekvences signālam būtu daudz mazāka par ekrāntikliņa ķēdē ieslēgtā rezistora pretestību. Parasti kapacitātes ir 0,25—1,0  $\mu F$ . 3-18. zīm. attēloti daži ekrāntikliņa barošanas shēmu varianti. 3-18. zīm. *a* parādīta ekrāntikliņa barošana no atsevišķa strāvas avota (taisngrieža). Šādu paņēmieni pielieto galvenokārt lieljaudas tetrodēm, it īpaši, ja shēmā ir vairākas tetrodes. Tad visi ekrāntikliņi tiek baroti no

ši avota. Ekrāntikliņa kapacitāte  $C_{g_2}$  minētajā shēmā var arī nebūt, jo parasti taisngriežu filtru izejā ieslēgts kondensators (sk. 1. nodaļu), kura kapacitāte ir lielāka, un ekrāntikliņu maiņstrāvas komponentes noslēdzas caur šo kondensatoru.

3-18. zīm. *b* attēlotajā slēgumā ekrāntikliņa potenciālu nosaka sprieguma kritums uz virknē ieslēgtā rezistora  $R_{g_2}$ :

$$U_{g_2} = E_a - I_{g_2} R_{g_2}, \quad (3-5)$$

kur  $I_{g_2}$  — ekrāntikliņa strāva attiecīgajā lampas režīmā (atbilst darba punktam uz raksturlīknes). Tātad

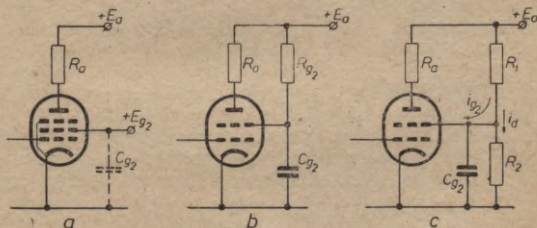
$$R_{g_2} = \frac{E_a - U_{g_2}}{I_{g_2}}. \quad (3-6)$$

Šajā gadījumā noteikti ekrāntikliņš jāsavieno ar katodu caur  $C_{g_2}$ , citādi uz rezistora  $R_{g_2}$  rodas arī maiņsprieguma kritums, kas izraisa ekrāntikliņa reakciju.

3-18. zīm. *c* parādītajā slēgumā ekrāntikliņa potenciālu nosaka sprieguma dalītāja rezistoru prettestības  $R_1$  un  $R_2$ . Šādu paņēmieni pielieto mazjaudas lampās (galvenokārt pentodēs), kurām ekrāntikliņa strāva ir samērā maza un bez lieliem enerģijas zudumiem iespējams izveidot sprieguma dalītāju, lai tā strāva

$$i_d = (3 \div 5) i_{g_2}. \quad (3-7)$$

Pretējā gadījumā sprieguma dalītājs darbosies neprecīzi. Arī šeit jābūt ekrāntikliņa kapacitātei  $C_{g_2}$ . Pielieto arī citas ekrāntikliņu barošanas shēmas.



3-18. zīm. Pentodes (tetrodes) ekrāntikliņa barošana:

*a* — no atsevišķa avota; *b* — cauri sadalošajam rezistoram; *c* — ar sprieguma dalītāju.

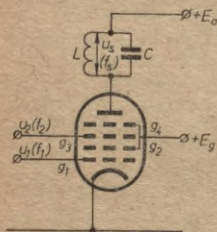
### 3-5. Speciālās daudzelektrodu lampas un kombinētās lampas

**Frekvenču pārveidošanas lampas.** Lai izpildītu frekvenču pārveidošanu, nepieciešamas lampas ar diviem stūrējošiem tīkliņiem. Tad, stūrējot anodstrāvu ar divu atšķirīgu frekvenču signāliem, anodstrāvā rodas sarežģītu svārstību signāls ar daudzām frekvencēm. Vispārīgā gadījumā šis frekvences nosaka izteiksme

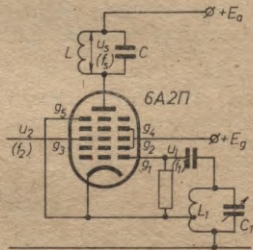
$$f = \pm (kf_1 \pm nf_2), \quad (3-8)$$

kur  $k$  un  $n$  ir veseli skaitļi. Parasti interesi izraisa tikai signāls ar frekvenci  $f_1 \pm f_2$  (sk. 12. nodaļu).

3-19. zīm. parādīts heksodes (sešelektrodu lampas ar diviem stūrējošajiem tīkliņiem) vienkāršots slēgums. Uz



3-19. zīm. Heksode vienkāršotā frekvenču pārveidošanas shēmā.



3-20. zīm. Heptode vienkāršotā frekvenču pārveidošanas shēmā ar heterodīnu.

pirmo stūrējošo tīkliņu ( $g_1$ ) padod signālu ar frekvenci  $f_1$ , bet uz otro ( $g_3$ ) — signālu ar frekvenci  $f_2$ . Tīkliņi  $g_2$  un  $g_4$  ir ekrāntīkliņi un jau lampā savienoti kopā. Anodkēdē ieslēgts filtrs (paralēls svārstību kontūrs), kas izdala signālu ar starpības frekvenci jeb t. s. starpfrekvenci  $f_s = f_1 - f_2 = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$ .

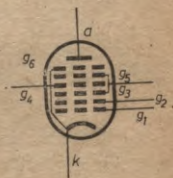
Frekvenču pārveidošanas lampas plaši lieto radiouztvērejos. Sajā gadījumā viens no signāliem ir uztveramās radiostacijas signāls, bet otrs — heterodīna signāls, ko

ģenerē heterodīns pašā uztvērējā. Lai izveidotu heterodīna shēmu, nepieciešama triode, kas var būt atsevišķa lampa vai arī daudzelektrodu lampas sastāvdaļa. 3-20. zīm. attēlota vienkāršota frekvenču pārveidošanas shēma ar septiņelektrodu lampu — heptodi. Sajā shēmā katods ar pirmo stūrējošo tīkliņu  $g_1$  un pirmo ekrāntīkliņu  $g_2$  darbojas kā triode ( $g_2$  ir it kā triodes anods) un kopā ar svārstību kontūru  $L_1C_1$  veido heterodīnu, kas ģenerē signālu  $u_1 = U_{1m} \sin \omega_1 t$ , kur  $\omega_1 = \frac{1}{\sqrt{L_1 C_1}}$ .

So heptodes daļu sauc par heterodīna daļu, bet pirmo stūrējošo tīkliņu — par heterodīna tīkliņu.

Signālu  $u_2 = U_{2m} \sin \omega_2 t$  padod uz otro stūrējošo tīkliņu  $g_3$  jeb t. s. signāltīkliņu. Otrais ekrāntīkliņš  $g_4$  un bremztīkliņš  $g_5$  darbojas kā pentodē. Līdz ar to heptode aizvieto divas elektronu lampas — triodi un pentodi.

Līdzīgi heptodei darbojas oktode (3-21. zīm.) — lampa ar sešiem tīkliņiem. Oktodes katods kopā ar pirmo un otro tīkliņu veido triodi (heterodīna daļu), pie tam triodes anoda funkcijas pilda otrais tīkliņš  $g_2$ . Tīkliņi  $g_3$  un  $g_5$  ir ekrāntīkliņi,  $g_4$  — otrais stūrējošais tīkliņš jeb signāltīkliņš un  $g_6$  — bremztīkliņš, kas jau lampas iekšpusē savienots ar katodu.



3-21. zīm. Oktode.

**Frekvenču pārveidošanas lampu raksturlieknes.** Kā jau noskaidrots, daudzelektrodu frekvenču pārveidošanas lampas sastāv no triodes daļas un pentodes jeb tetrodes daļas. Tātad šo daļu raksturlieknes atbilst triodes un pentodes (tetrodes) raksturlieknēm. Tomēr frekvenču pārveidošanas lampas kopumā raksturo ar speciālām papildu raksturlieknēm un parametriem.

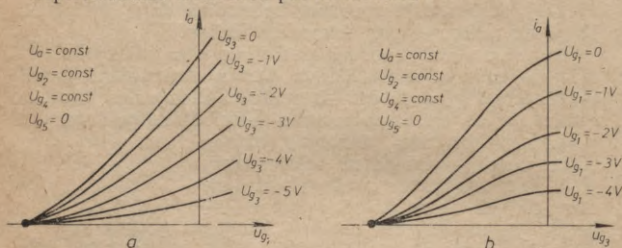
3-22. zīm. attēlotas heptodes anoda-stūrējošo tīkliņu raksturlieknes:  $i_a = \varphi(u_{g1})$ , ja  $U_{g2} = \text{const}$ , un  $i_a = f(u_{g3})$ , ja  $U_{g1} = \text{const}$ . Šīs raksturlieknes atbilst arī citām daudzelektrodu lampām ar diviem stūrējošajiem tīkliņiem. No raksturlieknēm redzams, ka anodstrāva samazinās, palielinot jebkura stūrējošā tīkliņa negatīvo potenciālu. Bez tam redzams, ka pirmā stūrējošā tīkliņa stāvums

$$S_1 = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_{g1}} \quad (3-9)$$

samazinās, palielinoties otrā stūrējošā tīkliņa negatīvajam potenciālam. Līdzīgi arī otrā stūrējošā tīkliņa stāvums

$$S_3 = \frac{\Delta i_a}{\Delta u_{g3}} \quad (3-10)$$

ir atkarīgs no  $u_{g1}$ . Līdz ar to divkāršas anodstrāvas vadīšanas vietā stājusies viena stūrējošā tīkliņa raksturliknes stāvuma maiņa ar otra stūrējošā tīkliņa sprieguma palīdzību, tātad lampai ir vadāmas nelineāras īpašības, kas nepieciešamas frekvenču pārveidošanai.



3-22. zīm. Heptodes anoda-stūrējošo tīkliņu raksturliknes:

a — raksturlikne  $i_a = \varphi(u_{g1})$ , ja  $U_{g3} = \text{const}$ ; b — raksturlikne  $i_a = f(u_{g3})$ , ja  $U_{g1} = \text{const}$ .

Frekvenču pārveidošanas lampas raksturo ar pārveidošanas stāvumu

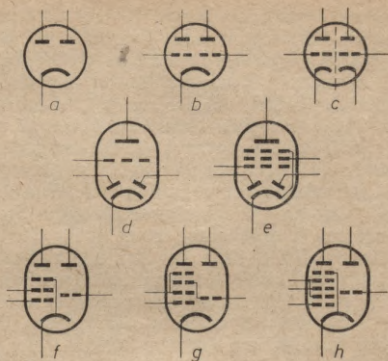
$$S_p = \frac{I_{s1m}}{U_{2m}}, \quad (3-11)$$

kur  $I_{s1m}$  — anodstrāvas starpfrekvences pirmās harmoniskās amplitūda,

$U_{2m}$  — signāla amplitūda.

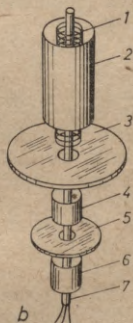
$S_p$  atkarīgs arī no heterodina sprieguma amplitūdas  $U_{1m}$ , pie tam  $S_p$  palielinās, palielinoties  $U_{1m}$ . Ja  $U_{1m} = 0$  (heterodina signāla  $u_1$  nav), arī  $I_{s1m} = 0$ , jo frekvenču pārveidošana nenotiek. Tad  $S_p = 0$  un lampa strādā kā vienkārša pastiprinātāja pakāpe signālam  $u_2$ .

**Kombinētās lampas.** Kombinētās lampas ir vienā balonā ievietotas savstarpēji neatkarīgas vai arī saistītas (ar kopīgu katodu vai iekšēji savienotiem atsevišķiem elektrodēm) divas vai vairākas vakuuma lampas. 3-23. zīm.



3-23. zīm. Kombinētās lampas:

*a* — dubultdiode; *b* — dubulttriode ar kopīgu katodu;  
*c* — neatkarīga dubulttriode; *d* — dubultdiode-triode;  
*e* — dubultdiode-pentode; *f* — triode-pentode; *g* —  
 triode-heksode; *h* — triode-heptode.



3-24. zīm. *a*) Neatkarīgas dubulttrio-  
 des elektrodu izvietojums. *b*) Dubult-  
 diodes-triodes konstrukcija:

1 — tīkliņš, 2 — triodes anods, 3 — ekrāns,  
 4 — diodes anods, 5 — ekrāns, 6 — diodes  
 anods, 7 — katods.

attēlota virkne kombinēto lampu (to shematiskie apzīmējumi). Kombinētās lampas lieto ļoti plaši, jo tās ļauj samazināt elektronu aparātūras izmērus un vienkāršot montāžu. Ļoti izplatītas ir tādas kombinētās lampas kā dubulttriodes (6H1Π, 6H2Π, 6H3Π u. c.), triodes-pentodes (6Φ1Π un 6Φ3Π, ko plaši lieto televizoros u. c.), kā arī frekvenču pārveidošanas lampas (triode-heksode 1H2Π un triode-heptode 6H1Π), kurās var iegūt lielu heterodīna stabilitāti (jo heterodīna lomu izpilda atsevišķa triode), kā arī augstu frekvenču pārveidošanas stāvumu  $S_p$ .

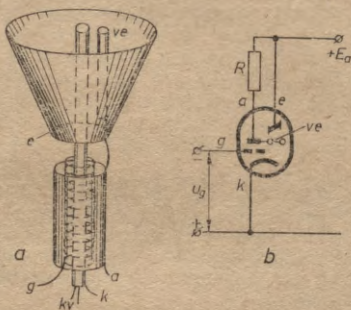
Kombinētajās lampās starp atsevišķām elektrodu grupām bieži ir ievietoti ekrāni, kas var būt izvadīti kā atsevišķi elektrodi un uzrādīti lampas shematiskajā apzīmējumā vai arī neizvadīti un arī neuzrādīti shematiskajā apzīmējumā. 3-24. zīm. *a* attēlots neatkarīgas dubulttriodes elektrodu izvietojums (atbilst 3-23. zīm. *c*), bet 3-24. zīm. *b* parādīta dubultdiodes-triodes konstrukcija (atbilst 3-23. zīm. *d*). Kā redzams, otrajā gadījumā lampā atrodas arī ekrāni starp atsevišķām elektrodu grupām, bet tie nav izvadīti kā atsevišķi elektrodi un shēmās netiek uzrādīti.

**Elektronu vizuālais indikators.** Elektronu vizuālais indikators ir kombinēta vakuuma lampa, ko izmanto radio-uztvērēju bezskaņas noskaņošanai. Bez tam to lieto arī par sprieguma indikatoru dažādās mēriekārtās, magnetonos utt.

Elektronu vizuālajam indikatoram ir divas elektrodu sistēmas. Vienā no tām ir luminiscējošs ekrāns ar vadības elektrodu, bet otra ir parasta triode (katods abām sistēmām kopīgs). 3-25. zīm. attēlota elektronu vizuālā indikatora konstrukcija un vienkāršots slēgums. Indikatora konusveida ekrāns no iekšpuses pārklāts ar luminiscējošu vielu — vilemītu ( $Zn_2SiO_4$ ). Starp šo ekrānu un katodu ievietots stienveida vadības elektrods, kas savienots ar triodes anodu. Ekrāns ir otrs anods, un tam pieslēgts pozitīvs potenciāls. Elektronu triecoties pret ekrānu, luminiscējošā viela spīd.

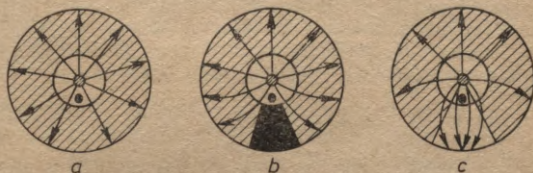
Ja vadības elektroda potenciāls ir vienāds ar potenciālu, kāds būtu elektriskajam laukam dotajā vietā, ja vadības elektroda nebūtu, tad vadības elektrods ir neitrāls. Elektriskais lauks starp katodu un ekrānu netiek kropļots, ekrānam ir vienmērīgs spīdums (3-26. zīm. *a*). Ja vadības elektroda spriegumu pazemina, elektriskais lauks tiek izkropļots, elektroni lido pa citām trajektorijām un nenonāk

uz ekrāna daļas, kas atrodas aiz vadības elektroda. Izveidojas tumšs sektors (3-26. zīm. *b*), kura laukums atkarīgs no vadības elektroda potenciāla. Ja turpreti vadības



3-25. zīm. Elektronu vizuālais indikators:

*a* — konstrukcija; *b* — vienkāršots slēgums.



3-26. zīm. Ekrāna spīdums un elektriskā lauka linijas;

*a* — ja neitrāls vadības elektrods; *b* — ja negatīvs vadības elektrods; *c* — ja pozitīvs vadības elektrods.

elektroda potenciālu palielina (virs neitrālā), elektriskais lauks (arī elektronu trajektorijas) tiek pretēji kroplots un sektorā aiz vadības elektroda katra laukuma vienība saņem lielāku elektronu daudzumu nekā laukuma vienības citās ekrāna daļās. Līdz ar to izveidojas gaišs sektors (3-26. zīm. *c*).

Ja elektronu vizuālā indikatora tīkliņam nepieslēdz

spriegumu (3-25. zīm. b), triodē plūst liela anodstrāva (jo  $u_g=0$ ) un uz slodzes rezistora  $R$  rodas ievērojams sprieguma kritums, jo parasti  $R=1\div 1,5\text{ M}\Omega$ . Tāpēc vadības elektrods, kas saistīts ar triodes anodu, ir negatīvi lādēts attiecībā pret ekrānu, kas tieši pievienots sprieguma avotam. Līdz ar to uz ekrāna rodas tumšs sektors. Ja tikliņam piešķir negatīvu potenciālu ( $u_g<0$ ), anodstrāva un sprieguma kritums uz slodzes rezistora samazinās, tātad palielinās vadības elektroda potenciāls un samazinās tumšais sektors uz ekrāna. Ja tikliņa negatīvais potenciāls ir pietiekami liels, tumšais sektors izzūd un pat pārvēršas gaišā sektorā.

Positīvu spriegumu indikācijai uz tikliņu padod negatīvu priekšspriegumu, kas atbilst minimālam tumšajam sektoram uz ekrāna. Tad, uz tikliņu padodot pozitīvu spriegumu, tumšais sektors palielinās. Tātad ar elektronu vizuālo indikatoru var konstatēt tikliņam pievadītā sprieguma maksimumu.

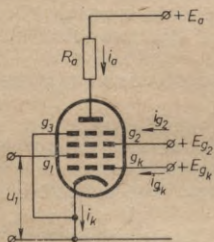
Ja elektronu vizuālo indikatoru lieto radiouztvērēju noskaņošanai, uz tā tikliņu padod detektora izejas spriegumu (sk. 12. nodaļu) negatīvā polaritātē.

**Speciālās elektronu lampas.** Lai gan vakuuma lampas arvien vairāk aizvieto pusvadītāji, daudzās elektronu iekārtās tās vēl ir neaizstājamas. Tādēļ konstruktori turpina uzlabot esošās elektronu lampas un radīt jaunas ar lielākām iespējām, labākiem parametriem (galvenokārt palielinātu stāvumu  $S$ ), paaugstinātu drošību un darba ilgumu.

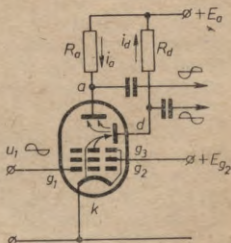
Ipašu interesi izraisa deviņu elektrodu (septiņu tikliņu) lampa ennode jeb nonnode, ko izmanto modulētas frekvences signāla ierobežošanai un detektēšanai.

Lai palielinātu lampas stāvumu, stūrējošo tikliņu var novietot tuvāk katodam. Speciālās lampās ar augstu raksturliknes stāvumu attālums starp katodu un stūrējošo tikliņu ir tikai daži desmiti mikronu. Tomēr šis paņēmieni sarežģī lampu izgatavošanas tehnoloģiju un ievērojami samazina to drošību un izturību (galvenokārt tādēļ, ka katoda virsma ir poraina, tātad nelīdzena). Otrs paņēmieni, kā palielināt lampas stāvumu, ir katoda tikliņa  $g_k$  pielietošana. 3-27. zīm. attēlots šādas lampas vienkāršots slēgums un attiecīgie spriegumi. Katoda tikliņu ievieto starp katodu un stūrējošo tikliņu un piešķir tam nelielu konstantu pozitīvu potenciālu ( $E_{g_k}=6\div 12\text{ V}$ ). Katoda tik-

liņš pievelk elektronus un paātrina tos. Daļa elektronu nonāk uz katoda tīkliņa, radot strāvu  $i_{gk}$ , kas faktiski ir nelietderīga (tas arī ir šo lampu galvenais trūkums), bet lielākā daļa elektronu izlido cauri katoda tīkliņam un stūrejošā tīkliņa tiešā tuvumā izveido otro elektronu mākonī.



3-27. zīm. Pentode ar katoda tīkliņu.



3-28. zīm. Pentode ar dinodu.

Stūrejošā tīkliņa iedarbība uz šo otro elektronu mākonī ir daudz efektīvāka nekā parastajās lampās uz pirmo elektronu mākonī. Patlaban tiek ražotas, piemēram, šādas lampas ar katoda tīkliņu: 6Ж20П, 6Ж21П un 6Ж22П. Lampai 6Ж22П, ja  $u_a = 150$  V un  $E_{gk} = 12$  V, raksturliknes stāvums  $S = 25$  mA/V, bet nelietderīgā katoda tīkliņa strāva  $i_{gk} = 65$  mA.

Cits lampas stāvuma palielināšanas paņēmieni ir sekundārās emisijas izmantošana. 3-28. zīm. attēlota pentode ar papildu elektrodu — sekundāro elektronu katodu jeb dinodu, kam pieslēgts pozitīvs potenciāls, pie tam  $u_d < u_a$ . Primārie elektroni, nonākot uz dinoda, izsit no tā sekundāros elektronus, kas tālāk dodas uz pozitīvāko elektrodu — anodu. Sekundāro elektronu katodu izgatavo no speciāla sakausējuma (piemēram, varš-berilijs vai varš-alumīnijs) — materiāla ar lielu sekundāro elektronu emisijas spēju. Līdz ar to sekundāro elektronu plūsma ir lielāka par primāro elektronu plūsmu un lampas stāvums ir liels. Piemēram, sekundārās emisijas lampai 6B1П raksturliknes stāvums  $S = 28$  mA/V.

Interesanta īpatnība šīm lampām ir tā, ka strāva  $i_d$  ir nedaudz mazāka par anodstrāvu  $i_a$  (šo strāvu starpība

vienāda ar primāro elektronu strāvu, kas ir ievērojami mazāka par  $i_a$ ) un plūst ārējā ķēdē pretējā virzienā. Līdz ar to sprieguma kritums uz dinoda rezistora  $R_d$  ir pretfāzē ar sprieguma kritumu uz anoda rezistora  $R_a$ . Arī anoda un stūrējošā tīkliņa spriegumi ir pretfāzē (anoda reakcija). Tātad signāls uz sekundāro elektronu katoda ir fāzē ar ieejas signālu  $u_1$ . Šo īpašību ļoti ērti izmantot līdzsaites izveidošanai ģenerators shēmā. Bez tam, attiecīgi izvēloties  $R_a$  un  $R_d$ , var iegūt divus izejas signālus — viēnādu, bet pretfāzē. Tātad lampa darbosies kā fāzgriezēja pakāpe.

Lai vēl vairāk palielinātu stāvumu, lampā ievieto vairākus sekundāro elektronu katodus, izveidojot sekundāro elektronu daudzkārsšotāju (līdzīgi fotoelektronu daudzkārsšotājiem — sk. 6. nodaļu). Piemēram, lampā 6B3C ir divi sekundāro elektronu katodi.

Ir izveidotas eksperimentālas lampas, kurās apvienoti abi stāvuma palielināšanas paņēmieni — ievietots katoda tīkliņš un lietots sekundāro elektronu katods. Šādās lampās stāvums sasniedz vairākus simtus mA/V.

Pēdējā laikā konstruētas t. s. stieņlampas, kurās tīkliņi aizvietoti ar stieņveida elektrodiem (3-29. zīm.). Abās pusēs tiešās kvēles katodam novietoti plakanas formas stieņi, kas izpilda stūrējošā tīkliņa  $g_1$  funkciju. So elektrodu negatīvā elektriskā lauka iespaidā katoda emitētie elektroni veido divus pretēji virzītus starus. Stieņa elektrodi  $g_2$  izpilda ekrāntīkliņa funkciju un ar savu pozitīvo elektrisko lauku paātrina elektronus. Stieņa elektrodi  $g_3$  izpilda bremztīkliņa funkciju. Tālāk novietoti anodi  $a$  (katrs savā pusē) un ekrānelektrodu  $e$  stieņi, kas ierobežo ārējo elektrisko lauku iedarbi. Šī stieņlampa ir pentode.



3-29. Stieņa pentodes elektrodu izvietojuums (šķērsgrīzumā).

Stieņlampu raksturliķnes ir līdzīgas parasto lampu raksturliķnēm, tikai to stāvums ir samēra zems. Toties stieņlampām ir mazi gabarīti un tās ir mehāniski izturīgas. Arī starpelektrodu kapacitātes stieņlampām ir mazākas, tāpat arī kvēldegļa patērētā jauda un jauda, ko patērē no anoda avota, ir ievērojami mazāka nekā parastajām lampām. Patlaban ražo, piemēram, 1Ж17Б, 1Ж24Б, 1П5Б, 1П24Б u. c. miniatūras stieņlampas.

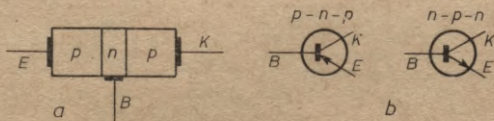
## 4. nodaļa

### TRANZISTORI

#### 4-1. Vispārīgas ziņas

Tranzistori ir pusvadītāju ierīces, kas lietojamas jaudas pastiprināšanai un kam ir trīs vai vairāk izvadu. Atkarībā no izvaģu skaita tranzistorus sauc par pusvadītāju triodēm, tetrodēm utt. Tomēr visizplatītākās ir pusvadītāju triodes (tranzistori ar divām pārejām:  $p-n$  un  $n-p$ ), tādēļ ar vārdu «tranzistors» šajā grāmatā apzīmētas pusvadītāju triodes.

Tranzistori, tāpat kā pusvadītāju diodes, veidoti no  $p$  un  $n$  tipa germānija vai silīcija (sk. 1. nodaļu).  $p$  tipa materiālam ir t. s. caurumu vadītspēja, bet  $n$  tipa materiālam — elektronu vadītspēja. 4-1. zīm. *a* attēlota  $p-$



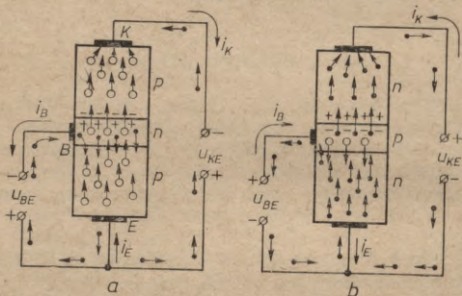
4-1. zīm. *a*) Tranzistora vienkāršota uzbūve. *b*) Tranzistoru shematiskais apzīmējums.

$-n-p$  tranzistora vienkāršota uzbūve. Vidējo tranzistora daļu sauc par bāzi, malējās — par emiteru un kolektoru. Pāreju starp emiteru un bāzi sauc par emitēra pāreju, bet pāreju starp bāzi un kolektoru — par kolektora pāreju. Ja bāzi veido no  $p$  tipa materiāla, tad emiteru un kolektoru savukārt no  $n$  tipa materiāla. Šādu tranzistoru sauc par  $n-p-n$  tranzistoru.  $p-n-p$  un  $n-p-n$  tranzistori savstarpēji atšķiras ar barošanas spriegumu polaritāti un

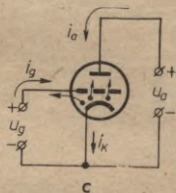
strāvu virzieniem elektrodu ķēdēs. Tādēļ arī tranzistoru shematiskie apzīmējumi ir dažādi — bultiņas, kas norāda strāvas virzienu emiteru ķēdēs, vērstas pretējos virzienos (4-1. zīm. b).

Elektrodu parametriem pieņemts pievienot attiecīgus indeksus, piemēram, bāzes strāva  $i_B$ , kolektora strāva  $i_K$ , emitera strāva  $i_E$ , bet starpelektrodu parametriem, piemēram, spriegumiem, — divus indeksus:  $u_{KE}$ ,  $u_{KB}$  un  $u_{BE}$ .

Lai labāk izprastu tranzistoru darbību, jāizseko elektronu un caurumu kustībai caur pārejām 4-2. zīm. attēlota



4-2. zīm. a)  $p-n-p$  tranzistora darbība. b)  $n-p-n$  tranzistora darbība. c) Vakuuma triodes darbība (ja  $u_g > 0$ ).



$p-n-p$  un  $n-p-n$  tranzistoru shematiska darbība, kā arī salīdzinājumam atgādināta vakuuma triodes darbība pozitīva tīkliņsprieguma režīmā, kas ir līdzīga  $n-p-n$  tranzistora darbībai.

Attēlotie tranzistori atrodas statiskajā režīmā, jo ieslēgti tikai līdzsprieguma avoti, pie tam to polaritāte ir tāda, ka emitera pārejai pieslēgts tiešais spriegums (vadīšanas virzienā), bet kolektora pārejai — sprostsprīgums. Tādēļ emitera pārejas pretēstība ir ļoti maza un

normālas strāvas iegūšanai pietiek, ja  $u_{BE}$  ir tikai dažas desmitdaļas volta. Turpretī kolektora pārejas pretestība ir liela, un spriegums  $u_{KE}$  parasti ir volti vai voltu desmiti. No zīmējuma redzams, ka starpelektrodu spriegumus saista vienkārša sakarība

$$u_{KE} = u_{KB} + u_{BE}. \quad (4-1)$$

Parasti  $u_{BE} \ll u_{KB}$ , tāpēc

$$u_{KE} \approx u_{KB}. \quad (4-2)$$

Pie šādām  $p-n$  pārejām pieslēgto spriegumu polaritātēm emitera pārejas voltampēru raksturlikne atgādina pusvadītāju diodes tiešās strāvas voltampēru raksturlikni (sk. 1-12. zīm. statisko raksturlikni), bet kolektora pārejas voltampēru raksturlikne — diodes sproststrāvas raksturlikni.

Tranzistora darbības principa pamatā ir tas, ka emitera pārejas spriegums  $u_{BE}$  ievērojami ietekmē kolektora strāvu: jo lielāks ir spriegums  $u_{BE}$ , jo lielāka emitera strāva un līdz ar to arī kolektora strāva. Lai to labāk izprastu, jāizseko fizikālajiem procesiem, kas noris, piemēram,  $n-p-n$  tranzistorā (4-2. zīm. b).

Palielinot tiešo spriegumu  $u_{BE}$ , samazinās sprostsliņņa ( $p-n$  pārejas) pretestība (sk. 1. nodaļu) un pieaug strāva caur to — emitera strāva  $i_E$ . Elektronu no emitera ieplūst bāzē, un lielākā to daļa difundē cauri bāzei kolektora pārejā. Tas iespējams tādēļ, ka bāze ir ļoti plāna — attālums starp emitera un kolektora pārejām ir tikai daži mikroni (pretējā gadījumā tranzistors nedarbotos).

Tā kā kolektora pārejai pieslēgts sprostsprriegums, rodas telpas lādiņš ar plusu kolektora daļā un minusu bāzes daļā. Ši lādiņa radītais elektriskais lauks veicina elektronu plūšanu caur kolektora pāreju. Līdz ar to rodas ievērojama kolektora strāva.

Daļa no emitera pienākošo elektronu bāzes materiālā rekombinējas ar caurumiem. Šīs rekombinēšanās rezultātā rodas bāzes strāva  $i_B$ . Nostabilizētā režīmā caurumu skaits bāzē ir konstants — cik caurumu rekombinējas laika vienībā, tik šajā laika vienībā rodas jaunu caurumu (tāds pats daudzums elektronu noplūst no bāzes uz  $u_{BE}$  avota pozitīvo spaili).

Sakarību starp strāvām tranzistorā var noteikt pēc pirmā Kirhhofa likuma:

$$i_E = i_K + i_B. \quad (4-3)$$

Bāzes strāva ir nelietderīga strāva, tāpēc vēlams, lai tā būtu pēc iespējas mazāka (līdzīgi tiklīnstrāvai vakuuma triodē — 4-2. zīm. c). Praktiski mūsdienu tranzistoros bāzes strāva ir tikai daži procenti no kolektora strāvas, tātad  $i_B \ll i_K$  un

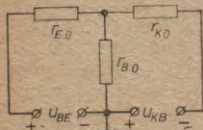
$$i_K \approx i_E. \quad (4-4)$$

To panāk, izveidojot bāzi ļoti plānu un bāzes materiālam samazinot piemaisījumu koncentrāciju, kas savukārt nosaka caurumu koncentrāciju (sk. 1. nodaļu).

$p-n-p$  tranzistora (4-2. zīm. a) darbības princips ir līdzīgs, tikai lomām mainās elektroni un caurumi, kā arī mainās spriegumu polaritātes un strāvu virzieni.

Vienam tranzistora elektrodam dotais nosaukums «emitters» norāda, ka tas emitē strāvas nesējus. Faktiski tranzistoros notiek nevis lādiņu vairākumnesēju emisija (tā pastāv tikai vakuuma lampās), bet gan to injekcija. Tā kā emitters un kolektors veidoti no vienāda materiāla, tad jebkurš no viņiem var būt emitters, t. i., injicēt lādiņu vairākumnesējus ( $n-p-n$  tranzistorā — elektronus,  $p-n-p$  tranzistorā — caurumus). Parasti gan tranzistori izveidoti ar lielu kolektora pārejas laukumu, jo kolektora pārejai jāizkliedē daudz lielāka jauda  $P_K = I_K U_{KB}$  nekā emitera pārejai, kur  $P_E = I_E U_{BE}$  (jo  $I_K \approx I_E$ , bet  $U_{BE} \ll U_{KB}$ ). Tādēļ izmantot emiteru kolektora vietā ir nelietderīgi. Tomēr ir arī tādi tranzistori (t. s. simetriskie tranzistori), kuros abas pārejas ir praktiski vienādas un jebkura no tām var būt gan emitera, gan kolektora pāreja.

Teiktais rāda, ka tranzistoru darbības principā nav nekā kopīga ar vakuuma triodēm, izņemot dažus slēgumus, kuru darbībā pastāv zināma līdzība (piemēram,  $n-p-n$  tranzistors un vakuuma triode režīmā, kad  $u_g > 0$ ) (4-2. zīm.). Tādēļ ir nepareiza dažu autoru ceļšanās tranzistoru darbību izskaidrot analogi vakuuma lampu darbībai. Nedrīkst arī aizmirst, ka vakuuma lampas parasti darbojas režīmā, kad  $u_g < 0$ , tātad  $i_g = 0$ , bet tranzistoru darbība, ja  $i_B = 0$ , principā nav iespējama. Ja tranzistora emitera pārejai pieslēdz sprotsprīgu (maina  $u_{BE}$  polaritāti), tranzistors tiek slēgts, jo slēgta ir



4-3. zīm. Tranzistora līdzstrāvas ekvivalentā shēma.

emitera pāreja un lādiņnesēju injekcija no emitera bāzē notiek.

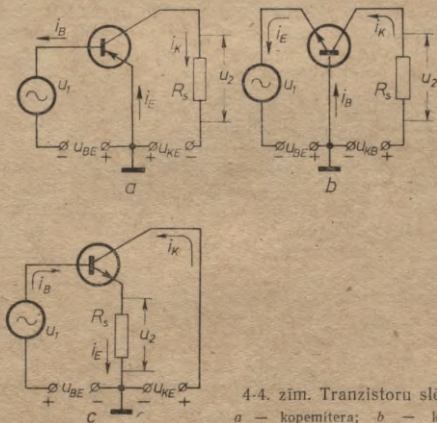
**Tranzistoru līdzstrāvas ekvivalentā shēma.** Statiskajā režīmā tranzistoru var attēlot ar ekvivalentu shēmu, kas sastāv no trim pretestībām  $r_{B0}$ ,  $r_{K0}$  un  $r_{E0}$  (4-3. zīm.).

Visvairāk tranzistora darbību ietekmē bāzes pretestība  $r_{B0}$  — pretestība bāzes strāvai  $I_B$ , kura plūst perpendikulāri virzienam emitters — kolektors. Tā kā bāze virzienā emitters — kolektors ir ļoti plāna (tātad arī pretestība kolektora strāvai ir niecīga), bāzes pretestību  $r_{B0}$  bāzes izvada virzienā var uzskatīt par ļoti tieva vada pretestību un tā jau ir ievērojami liela. Praktiski  $r_{B0}$  ir simti omu.

Pretestība  $r_{E0}$  ir emitera pretestība, kurā ietilpst emitera pārejas pretestība un tranzistora emitera daļas materiāla tilpuma pretestība. Mazjaudas tranzistoriem  $r_{E0}$  ir desmiti omu, bet lieljaudas tranzistoriem (kuros  $I_E$  ir ievērojami lielāka)  $r_{E0}$  samazinās. Aptuveni  $r_{E0}$  var noteikt no izteiksmes

$$r_{E0} \approx \frac{25}{I_E} (\Omega), \quad (4-5)$$

kur  $I_E$  mērita mA.



4-4. zīm. Tranzistoru slēgumi:  
 a — kopemitera; b — kopbāzes;  
 c — kopkolektora.

Kolektora pretestība  $r_{K0}$  sastāv no kolektora pārejas pretestības (desmiti un pat simti kiloomu, jo šī pāreja ir slēgta) un tranzistora kolektora daļas materiāla tilpuma pretestības, kas salīdzinājumā ar kolektora pārejas pretestību ir niecīga.

Mainstrāvas gadījumā minētās pretestības iegūst citas vērtības.

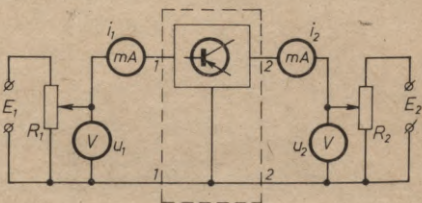
**Tranzistoru slēgumi.** Praktiskās shēmās tranzistorus lieto kopemitera, kopbāzes un kopkolektora slēgumos. Kā rāda slēguma nosaukums, katrā shēmā viens no tranzistora elektrodiem ir kopīgs ieejas un izejas ķēdēm. 4-4. zīm. attēloti minētie tranzistoru slēgumi, kuros ieejas ķēdē ieslēgts maiņsprieguma (pastiprināmā signāla)  $u_1$  avots, bet izejas ķēdē — slodzes rezistors  $R_s$ . Slēgumos parādīta arī līdzsprieguma avotu polaritāte un līdzstrāvu virzieni. Faktiski ir iespējamās sešas šādas shēmas — pa trim attiecīgi ar  $p-n-p$  un  $n-p-n$  tranzistoru, bet, kā jau minēts, mainoties tranzistoram, mainās tikai līdzstrāvas avotu polaritāte un attiecīgo strāvu virzieni.

#### 4-2. Tranzistoru raksturliķnes

Ar statistiskajām raksturliķnēm attēlo tranzistoru strāvu un spriegumu sakarības. Ja vakuuma triodi režīmā bez tīkliņstrāvas ( $u_g < 0$ ) varēja pilnīgi raksturot ar vienu raksturliķņu saimi (anoda-tīkliņa vai anoda, sk. 2-4. un 2-5. zīm.), kas saista trīs lielumus  $i_a$ ,  $u_a$  un  $u_g$ , tad tranzistora raksturošanai nepieciešamas divas raksturliķņu saimes, kas savstarpēji saista četrus ieejas ( $i_1, u_1$ ) un izejas ( $i_2, u_2$ ) lielumus. Visbiežāk pielieto ieejas raksturliķņu  $i_1 = f(u_1)$  un izejas raksturliķņu  $i_2 = f_1(u_2)$  saimes, lai gan pielieto arī t. s. pārejas un atgriezenisko raksturliķņu saimes  $i_2 = \varphi(u_1)$  un  $i_1 = \varphi_1(u_2)$ . Bez tam īpašas raksturliķņu saimes ir katram tranzistora slēgumam: kopemitera, kopbāzes un kopkolektora.

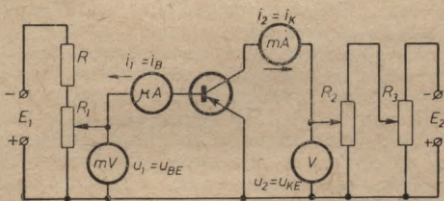
4-5. zīm. attēlots vispārīgs slēgums tranzistora raksturliķņu uzņemšanai. Šeit tranzistors (tripols) attēlots kā četrpols, tātad ar divām ieejas un divām izejas spailēm 1-1 un 2-2. Slēgumā nav norādīta  $E_1$  un  $E_2$  avotu polaritāte, jo tā atkarīga no tranzistora tipa ( $p-n-p$  vai  $n-p-n$ ) un konkrētā slēguma (kopemitera, kopbāzes vai kopkolektora). Bez tam atkarībā no mērāmās ķēdes un

tranzistora jaudas miliampēometri var tikt aizstāti ar mikroampēometriem (mazjaudas tranzistoru bāzes ķēdē) vai arī ar ampēometriem (lieljaudas tranzistoru kolektoru ķēdē). Parasti arī voltmētrs, kas mēra  $u_{BE}$ , tiek aizvietots ar milivoltmetru.



4-5. zīm. Vispārīgs slēgums tranzistora raksturliķņu uzņemšanai.

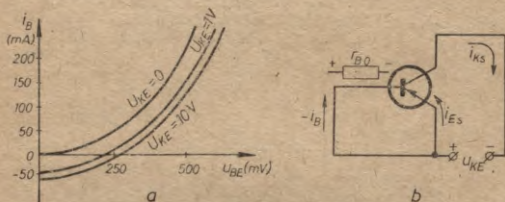
4-6. zīm. attēlota shēma mazjaudas  $p-n-p$  tranzistoru raksturliķņu uzņemšanai kopemitera slēgumā. Šeit kolektora ķēdē ir divi potenciometri  $R_2$  un  $R_3$  precīzai  $u_{KE}$  ieregulēšanai, bet bāzes ķēdē virknē ar potenciometru  $R_1$  ieslēgts rezistors  $R$ , kas ierobežo maksimālo  $u_{BE}$ .



4-6. zīm. Shēma  $p-n-p$  tranzistoru raksturliķņu uzņemšanai kopemitera slēgumā.

Aplūkosim kopemitera un kopbāzes slēguma raksturliķnes (kopkolektora slēgumu pielieto reti). Šīs raksturliķnes tiek dotas tranzistoru katalogos. Tā kā spriegumu un strāvu polaritātes ir dažādas, būtu pareizi raksturliķnes

attēlot attiecīgajos Dekarta koordinātu sistēmas kvadrantos. Tomēr tas rada zināmu neērtību, lietojot raksturlienes, jo zūd ierastā uzskatāmība. Tādēļ tranzistoru raksturlienes galvenokārt tiek parādītas pirmajā kvadrantā (kur attiecīgie lielumi ir pozitīvi), bet patiesā strāvu un spriegumu polaritāte nosakāma pēc tranzistora tipa un slēguma.



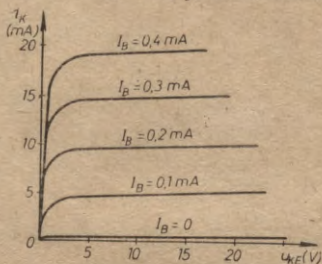
4-7. zīm. a) Tranzistora kopemitera slēguma ieejas raksturlienes. b) Kopemitera slēguma shēma, ja  $u_{BE}=0$ .

**Kopemitera slēguma raksturlienes.** Kā jau minēts, tranzistoru ieejas un izejas raksturlienes ir cieši saistītas ar pusvadītāju diodu raksturliknēm. 4-7. zīm. a dotas tranzistora kopemitera slēguma ieejas raksturlienes  $i_B = f(u_{BE})$ , ja  $U_{KE} = \text{const}$ . Raksturliene gadījumā, kad  $U_{KE} = 0$ , atbilst diodes tiešās strāvas raksturliķnei. Ja  $U_{KE} > 0$ , triodes raksturlienes novirzās vairāk pa labi, un, ja  $u_{BE}$  tuvs nullei, bāzes strāvai ir negatīva vērtība. Lai to vieglāk izprastu, jāizseko strāvām tranzistorā, kad  $u_{BE} = 0$  un  $U_{KE} > 0$  (4-7. zīm. b). Šeit spriegums  $U_{KE}$  rada emitera sākumstrāvu  $i_{Es}$ , kā arī negatīvu bāzes sproststrāvu  $-i_B$ , jo bāze un emitters ir pievienoti avota pozitīvajai spaiļei. Minētā bāzes sproststrāva rada sprieguma kritumu uz bāzes pretestības  $r_{B0}$ , pie tam pretējā polaritātē nekā normāls bāzes spriegums  $u_{BE}$ . Dodot nelielu spriegumu  $u_{BE}$  (nedaudz pabīdot potenciometra  $R_1$  slīdkontaktu uz augšu) (4-6. zīm.), abi bāzes ķēdē darbojošies spriegumi atrodas pretslēgumā un, kad  $u_{BE}$  kļūst vienāds ar sprieguma kritumu uz  $r_{B0}$ , bāzes strāva ir vienāda ar nulli. Tālāk palielinot  $u_{BE}$ , bāzes strāva ir pozitīva.

Kā redzams no raksturliknēm, kolektora sprieguma izmaiņa no 1 volta līdz 10 voltiem maz iespaido bāzes

strāvu. Tādēļ katalogos parasti dota tikai viena tranzistora ieejas raksturlikne, kas uzņemta kādai videjai  $U_{KE}$  vērtībai (bieži  $U_{KE}=5$  V).

4-8. zīm. parādītas kopemitera tranzistora izejas raksturliknes  $i_K = \varphi(u_{KE})$ , ja  $I_B = \text{const}$ . Dažreiz šīs raksturliknes uzņem režīmā, kad  $U_{BE} = \text{const}$ , bet parasti tomēr konstantu uztur bāzes strāvu, jo tranzistoram kopemitera



4-8. zīm. Tranzistora kopemitera slēguma izejas raksturliknes.

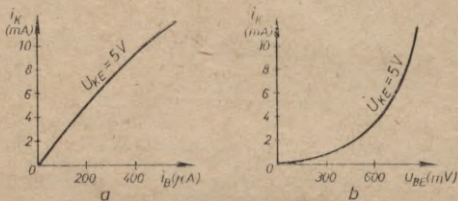
slēgumā ir maza ieejas pretestība un pastiprināmā signāla avoti uzskatāmi par strāvas avotiem. Pirmā raksturlikne ( $I_B=0$ ) atbilst pārtrauktai bāzes ķēdei un stipri atgādina pusvadītāju diodes sproststrāvas raksturlikni, kur tāpat strāva ir maz atkarīga no sprieguma. Tomēr šeit strāva ir ievērojami lielāka, jo spriegums  $u_{KE}$  sadalās uz abām pārejām. Lielākā sprieguma daļa ir uz kolektora pārejas, kur tas ir sprostsprigums, tomēr neliela sprieguma daļa nonāk arī uz emitera pārejas, pie tam kā tiešais spriegums, un veicina sākumstrāvu.

Ja  $I_B > 0$ , kolektora strāvas raksturliknes atrodas augstāk — palielinot  $I_B$ , palielinās arī  $i_K$ , jo faktiski bāzes strāvas palielināšana ir identiska emitera pārejai pieslēgtā sprieguma palielināšanai, tātad  $I_E$  palielināšanai (patī bāzes strāva ir tikai emitera strāvas niecīga daļa). Ja ievērojami palielina  $u_{KE}$ , tiek caursista kolektora pāreja un kolektora strāva lavīnveidā pieaug. Lielākām  $I_B$  caursite iestājas ātrāk.

Tranzistoru shēmu aprēķiniem praktiski pietiek ar ieejas un izejas raksturliknēm. Tomēr dažreiz lieto arī t. s.

pārejas raksturliknes  $i_K = f(i_B)$ , ja  $U_{KE} = \text{const}$ , vai  $i_K = f_1(u_{BE})$ , ja  $U_{KE} = \text{const}$ , un atgriezeniskās raksturliknes  $u_{BE} = \varphi(u_{KE})$ , ja  $I_B = \text{const}$ .

4-9. zīm. attēlotas mazjaudas tranzistora pārejas raksturliknes. Kā redzams, sakarība starp strāvām  $i_K$  un  $i_B$  ir gandrīz lineāra, turpretī sakarība  $i_K = f_1(u_{BE})$  — neli-



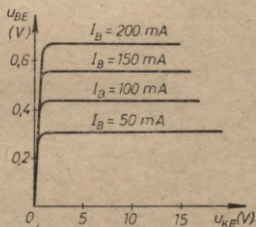
4-9. zīm. Tranzistora kopemitera slēguma pārejas raksturliknes:

a — raksturlikne  $i_K = f(i_B)$ ; b — raksturlikne  $i_K = f_1(u_{BE})$ .

neāra, jo arī tranzistora ieejas raksturlikne ir nelineāra. Pārejas raksturliknes, kas uzņemtas pie dažādām  $U_{KE}$  vērtībām, atrodas ļoti tuvu cita citai. Tādēļ katalogos parasti dod vienu pārejas raksturlikni, kas uzņemta pie kādas vidējas  $U_{KE}$  vērtības.

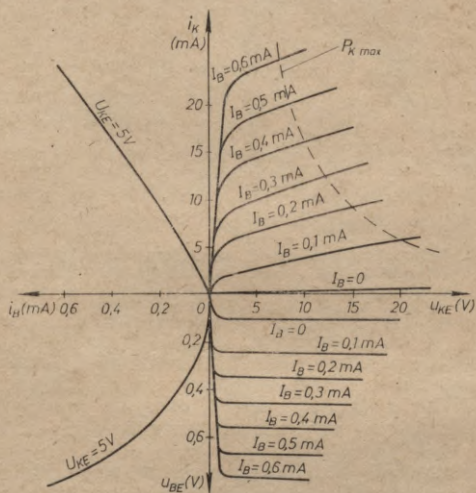
4-10. zīm. attēlotas tranzistora atgriezeniskās raksturliknes  $u_{BE} = \varphi(u_{KE})$ , ja  $I_B = \text{const}$ . Redzams, ka raksturliknes darba rajonā praktiski ir horizontālas, tikai pie ļoti mazām  $u_{KE}$  vērtībām bāzes-emitera spriegums strauji pieaug. Tā kā atgriezeniskās raksturliknes tranzistoru aprēķinos pielieto reti, sīkāk tās šajā grāmatā neapskata.

Bieži tranzistoru katalogos visu četru veidu raksturliknes attēlo vienas Dekarta koordinātu sistēmas četros kvadrantos (4-11. zīm.), izvietojot



4-10. zīm. Tranzistora kopemitera slēguma atgriezeniskās raksturliknes.

I kvadrantā izejas raksturliknes, II kvadrantā — pārejas raksturlikni, III kvadrantā — ieejas raksturlikni un IV kvadrantā — atgriezeniskās raksturliknes. Šajā gadījumā strāvu un spriegumu polaritāti neizvēlas atbilstoši shēmai (reālajai polaritātei), bet gan atbilstoši ērtai raksturliķņu attēlošanai. Spriegumu un strāvu polaritāti shēmā nosaka tranzistora tips (4-2. zīm.).



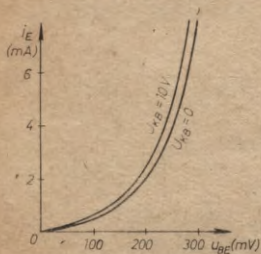
4-11. zīm. Visu tranzistora kopemitera slēguma raksturliķņu attēlojums vienās Dekarta koordinātēs.

**Kopbāzes slēguma raksturliķnes.** Kopbāzes slēgumam (4-4. zīm. b) ieejas spriegums  $u_1$  (atbilstoši vispārigam slēgumam 4-5. zīm.) ir spriegums starp bāzi un emiteru ( $u_{BE}$ ) un to mēra milivoltos, bet  $i_1 = i_E$ , ko mēra miliampēros vai ampēros. Izejā  $u_2 = u_{KB}$  un  $i_2 = i_K$ . Arī kopbāzes slēgumā parasti uzņem ieejas, izejas un pārejas raksturliķnes (atgriezeniskās raksturliķnes pielieto reti).

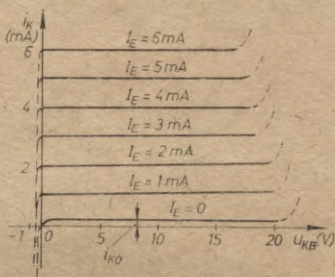
4-12. zīm. attēlotas mazjaudas tranzistora kopbāzes slēguma ieejas raksturliķnes  $i_E = f(u_{BE})$ , ja  $U_{KB} = \text{const}$ . Kā

redzams, emitera strāva ir ļoti maz atkarīga no sprieguma starp kolektoru un bāzi. Tādēļ arī katalogos parasti uzdod vienu ieejas raksturlielni pie kādas vidējas  $U_{KB}$  vērtības.

4-13. zīm. attēlotas šā paša slēguma izejas raksturlielnes  $i_K = \varphi(u_{KB})$ , ja  $I_E = \text{const}$ . Raksturlielnes uzņem, uz-



4-12. zīm. Tranzistora kopbāzes slēguma ieejas raksturlielnes.

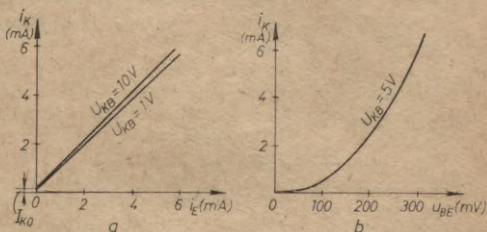


4-13. zīm. Tranzistora kopbāzes slēguma izejas raksturlielnes.

turot konstantu emitera (ieejas) strāvu un nevis konstantu ieejas spriegumu, jo šajā slēgumā tranzistora ieejas pretestība ir ļoti maza (daži desmiti omu) un gandrīz jebkurš pastiprināmā signāla avots uzskatāms par strāvas avotu.

Raksturlielne  $I_E = 0$  atbilst pārtrauktai ieejas ķēdei un parāda kolektora pārejas sproststrāvu. Sproststrāva jeb t. s. kolektora nullstrāva  $i_{K0}$  ir svarīgs tranzistora parametrs. Redzams, ka  $i_{K0}$  praktiski nav atkarīga no pārejai pieslēgtā sprieguma  $u_{KB}$ . Kolektora nullstrāva ir atkarīga galvenokārt no tranzistora  $p$  un  $n$  materiālu tīrības. Tātad  $i_{K0}$  raksturo tranzistora kvalitāti. Arī pārējās izejas raksturlielnes (citām  $I_E$  vērtībām) ir gandrīz horizontālas taisnes, tātad kolektora strāva ir ļoti maz atkarīga no sprieguma uz kolektora pārejas. Arī tad, ja  $u_{KB} = 0$ , kolektora strāvas vērtība praktiski ir tāda pati kā tad, ja  $u_{KB} > 0$  (kolektora strāvu nosaka emitera injicētie elektroni), tikai  $i_{K0} = 0$ , jo pārtrauktai emitera ķēdei un bez sprieguma uz kolektora pārejas nekāda strāva tranzistorā nav iespējama. Šī raksturlielne  $I_E = 0$  iet cauri koordinātu sā-

kuma punktam, turpreti pārejās raksturlienes strauji krīt un vērtību  $i_K=0$  sasniedz tad, ja uz kolektora pārejas ir neliels pretējas polaritātes spriegums ( $0 > u_{KB} > -1$  V). Tālāk strāva strauji pieaug pretējā virzienā, jo pretējas polaritātes  $u_{KB}$  ir kolektora pārejas tiešais spriegums.



4-14. zīm. Tranzistora korbāzes slēguma pārejas raksturlienes:

*a* — raksturliene  $i_K = \varphi(i_E)$ ; *b* — raksturliene  $i_K = \varphi_1(u_{BE})$ .

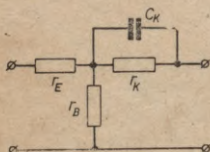
Pārejas raksturlienes  $i_K = \varphi(i_E)$ , ja  $U_{KB} = \text{const}$ , vai  $i_K = \varphi_1(u_{BE})$ , ja  $U_{KB} = \text{const}$ , attēlotas 4-14. zīm. Redzams, ka sakarība starp ieejas strāvu un izejas strāvu ir vēl lineārāka nekā kopemitera slēguma gadījumā. Tai pašā laikā pārejas raksturlienes praktiski nav atkarīgas no sprieguma uz kolektora pārejas ( $U_{KB}$ ), tādēļ katalogos tiek dota pārejas raksturliene kādai vidējai  $U_{KB}$  vērtībai. Kad  $i_E = 0$ , raksturlienei jāparāda  $I_{K0}$  vērtība, lai gan praktiski izraudzītā mērogā to parādīt neizdodas un tranzistoru katalogos šis raksturlienes bieži sākas no koordinātu sākuma punkta.

### 4-3. Tranzistoru parametri

Ievērojot par tranzistoru raksturliedēm un slēgumiem teikto, kļūst skaidrs, ka tranzistorus nevar kā vakuuma triodes raksturot ar trim galvenajiem parametriem. Tādēļ tranzistoriem izšķir parametrus, kas raksturo pašu tranzistoru, un tranzistora kā četrpola parametrus, kas pilnīgi raksturo tranzistoru attiecīgajā slēgumā.

**Tranzistora parametri.** Tie ir tranzistora ekvivalentās

lidzstrāvas pretestības  $r_{E0}$ ,  $r_{K0}$ ,  $r_{B0}$  un pilnīgi analogi — ekvivalentās maiņstrāvas pretestības  $r_E$ ,  $r_K$  un  $r_B$ . Augstām frekvencēm tranzistoru vēl raksturo pāreju kapacitātes  $C_E$  un  $C_K$ . Tomēr, ievērojot to, ka maza pretestība  $r_E$  (desmiti omu) šuntē  $C_E$ , šīs kapacitātes iespaids ir niecīgs. Tādēļ parasti tiek dota tikai kolektora pārejas kapacitāte  $C_K$  (4-15. zīm.).



4-15. zīm. Tranzistora maiņstrāvas ekvivalentā shēma.

Bez tam svarīgs tranzistora pamatparametrs ir statistiskais strāvas pastiprinājuma koeficients, ko apzīmē ar  $\alpha$  kopbāzes slēgumam un ar  $\beta$  kopemitera slēgumam. Tā kā statistiskais strāvas pastiprinājuma koeficients ir izejas strāvas izmaiņas attiecība pret iejas strāvas izmaiņu (pie  $R_s=0$ ),

tad

$$\alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E}, \text{ ja } U_{KB} = \text{const}, \quad (4-6)$$

un

$$\beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}, \text{ ja } U_{KE} = \text{const}. \quad (4-7)$$

Ievērojot, ka  $\Delta i_E = \Delta i_K + \Delta i_B$ , var atrast sakarību starp  $\alpha$  un  $\beta$ :

$$\alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E} = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_K + \Delta i_B} = \frac{\frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}}{\frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} + 1} = \frac{\beta}{1 + \beta}, \quad (4-8)$$

no kurienes

$$\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}. \quad (4-9)$$

Pastiprinājuma koeficients  $\alpha$  vienmēr ir mazāks par 1 ( $i_K < i_E$ ), bet, jo necīgāka ir šī atšķirība, jo labāks ir tranzistors. Tomēr uzskatāmāk pastiprinājumu attēlo  $\beta$ . Tā, piemēram, no (4-9),

ja  $\alpha = 0,90$ , tad  $\beta = 9$ ;

ja  $\alpha = 0,95$ , tad  $\beta = 19$ ;

ja  $\alpha = 0,99$ , tad  $\beta = 99$ .

Vēl pie tranzistora pamatparametriem pieskaita jau apskatīto kolektora nullstrāvu  $I_{K0}$ , kas galvenokārt atkarīga no  $p$  un  $n$  materiālu tirības, tātad no tranzistora kvalitātes. Bez tam  $I_{K0}$  atkarība no temperatūras raksturo tranzistora temperatūras stabilitāti.

**Tranzistora kā četrpola parametri.** 4-5. zīm. attēlotajā slēgumā tranzistors parādīts kā četrpols, kuram var mainīt ieejas un izejas lielumus ( $u_1$ ,  $i_1$ ,  $u_2$  un  $i_2$ ), tātad tā analīzei var lietot četrpolu teoriju.

Dotos lielumus pieņemot par argumentiem un apzīmējot tos ar  $x$ , bet meklējamos — par funkcijām un apzīmējot ar  $y$ , vispārīgā veidā

$$\left. \begin{aligned} y_1 &= \varphi(x_1, x_2), \\ y_2 &= f(x_1, x_2). \end{aligned} \right\} \quad (4-10a, b)$$

Ja pieņem, ka argumenti  $x_1$  un  $x_2$  iegūst nelielus pieaugumus  $\Delta x_1$  un  $\Delta x_2$ , tad funkciju pieaugumus  $\Delta y_1$  un  $\Delta y_2$  var aprēķināt ar Teilora rindām:

$$\begin{aligned} \Delta y_1 &= \frac{1}{1!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right) y_1 + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 y_1 + \\ &+ \dots + \frac{1}{n!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^n y_1 + R'_n; \end{aligned} \quad (4-11)$$

$$\begin{aligned} \Delta y_2 &= \frac{1}{1!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right) y_2 + \frac{1}{2!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^2 y_2 + \\ &+ \dots + \frac{1}{n!} \left( \frac{\partial}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial}{\partial x_2} \Delta x_2 \right)^n y_2 + R''_n. \end{aligned} \quad (4-12)$$

Atmetot otrās un augstāko pakāpju locekļus kā ļoti ma-  
z, iegūst vienādojumus, kas izsaka funkcijas  $\varphi$  un  $f$ :

$$\left. \begin{aligned} \Delta y_1 &\approx \frac{\partial y_1}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_1}{\partial x_2} \Delta x_2, \\ \Delta y_2 &\approx \frac{\partial y_2}{\partial x_1} \Delta x_1 + \frac{\partial y_2}{\partial x_2} \Delta x_2. \end{aligned} \right\} \quad (4-13 a, b)$$

Par neatkarīgajiem mainīgajiem lielumiem ( $x_1$  un  $x_2$ ) var pieņemt jebkurus no četriem četrpola parametriem. Līdz ar to izraudzītajai parametru grupai iespējami seši vienādojumu pāri:

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_1(i_1, i_2), \\ u_2 &= f_1(i_1, i_2); \end{aligned} \right\} \quad (4-14 a, b)$$

$$\left. \begin{aligned} i_1 &= \varphi_2(u_1, u_2), \\ i_2 &= f_2(u_1, u_2); \end{aligned} \right\} \quad (4-15 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_3(u_2, i_1), \\ i_2 &= f_3(u_2, i_1); \end{aligned} \right\} \quad (4-16 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \varphi_4(u_1, i_2), \\ i_1 &= f_4(u_1, i_2); \end{aligned} \right\} \quad (4-17 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} u_1 &= \varphi_5(u_2, i_2), \\ i_1 &= f_5(u_2, i_2); \end{aligned} \right\} \quad (4-18 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} u_2 &= \varphi_6(u_1, i_1), \\ i_2 &= f_6(u_1, i_1). \end{aligned} \right\} \quad (4-19 \text{ a, b})$$

Vienādojumos (4-14 līdz 4-19) izsakot funkcijas  $\varphi$  un  $f$  pēc (4-13), iegūst

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= \frac{\partial u_1}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial u_1}{\partial i_2} \Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= \frac{\partial u_2}{\partial i_1} \Delta i_1 + \frac{\partial u_2}{\partial i_2} \Delta i_2 \end{aligned} \right\}$$

utt.

Parciālie atvasinājumi ir lineāru sistēmu vienādojumu koeficienti un var būt impedances (pilnās pretestības)  $\frac{\partial u}{\partial i}$ , admitances (pilnās vadītspējas)  $\frac{\partial i}{\partial u}$  vai skaitliski koeficienti  $\frac{\partial u}{\partial u}$  un  $\frac{\partial i}{\partial i}$ . Izvēloties koeficientiem attiecīgus apzīmējumus, var uzrakstīt sešus četrpola vienādojumu pārus:

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= z_{11} \Delta i_1 + z_{12} \Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= z_{21} \Delta i_1 + z_{22} \Delta i_2; \end{aligned} \right\} \quad (4-20 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_1 &= y_{11} \Delta u_1 + y_{12} \Delta u_2, \\ \Delta i_2 &= y_{21} \Delta u_1 + y_{22} \Delta u_2; \end{aligned} \right\} \quad (4-21 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= h_{11} \Delta i_1 + h_{12} \Delta u_2, \\ \Delta i_2 &= h_{21} \Delta i_1 + h_{22} \Delta u_2; \end{aligned} \right\} \quad (4-22 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta i_1 &= g_{11} \Delta u_1 + g_{12} \Delta i_2, \\ \Delta u_2 &= g_{21} \Delta u_1 + g_{22} \Delta i_2; \end{aligned} \right\} \quad (4-23 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_1 &= a_{11}\Delta u_2 + a_{12}\Delta i_2, \\ \Delta i_1 &= a_{21}\Delta u_2 + a_{22}\Delta i_2; \end{aligned} \right\} \quad (4-24 \text{ a, b})$$

$$\left. \begin{aligned} \Delta u_2 &= b_{11}\Delta u_1 + b_{12}\Delta i_1, \\ \Delta i_2 &= b_{21}\Delta u_1 + b_{22}\Delta i_1. \end{aligned} \right\} \quad (4-25 \text{ a, b})$$

Koeficienti  $z$ ,  $y$ ,  $h$ ,  $g$ ,  $a$ ,  $b$  ir t. s. diferenciālie parametri, kuri raksturo četrpolu (tranzistoru) attiecīgajā darba punktā — nosaka attiecīgo raksturliķņu stāvumu. Apzīmējumu indeksi, kas sastāv no cipariem 1 un 2, norāda uz parametra būtību. Ar cipariem 1 apzīmē lielumus ieejā, bet ar 2 — izejā. Tā, piemēram, indekss 11 apzīmē ieejas parametru (pretestību vai vadītspēju), tātad sakarību starp strāvu un spriegumu ieejā. Izejas parametrus apzīmē ar indeksu 22. Tiešo pārvadi jeb ieejas ietekmi uz izeju apzīmē indekss 21, bet atgriezenisko pārvadi jeb izejas ietekmi uz ieeju — indekss 12.

Tranzistoru aprēķinos lieto pirmās trīs vienādojumu sistēmas — tātad parametrus  $z$ ,  $y$  un  $h$ . Vienādojumu (4-20) un (4-21) koeficientus (parametrus  $z$  un  $y$ ) atrod ar tukšgaitas vai isslēguma metodi, un to jēga ir šāda:

$$z_{11} = \frac{\Delta u_1^*}{\Delta i_1}, \text{ ja } \Delta i_2 = 0 \ (I_2 = \text{const}), \text{ — tukšgaitas ieejas impedance (izejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta),}$$

$$z_{12} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_2}, \text{ ja } \Delta i_1 = 0 \ (I_1 = \text{const}), \text{ — atgriezeniskās pārvades impedance, kas raksturo izejas strāvas ietekmi uz ieejas spriegumu (ieejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta),}$$

$$z_{21} = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_1}, \text{ ja } \Delta i_2 = 0 \ (I_2 = \text{const}), \text{ — tiešās pārvades impedance, kas raksturo ieejas strāvas ietekmi uz izejas spriegumu tukšgaitā (izejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta),}$$

$$z_{22} = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_2}, \text{ ja } \Delta i_1 = 0 \ (I_1 = \text{const}), \text{ — izejas impedance, kad ieejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta,}$$

\* Vienlaikus ar līdzspriegumiem tranzistoru ieejā un izejā var būt pieslēgti mazas amplitūdas sinusoidāli maiņspriegumi. Šaj gadījumā  $\Delta u_1 = U_{1m}$  (maiņsprieguma amplitūda),  $\Delta i_1 = I_{1m}$ ,  $\Delta u_2 = U_{2m}$  un  $\Delta i_2 = I_{2m}$ .

$y_{11} = \frac{\Delta i_1}{\Delta u_1}$ , ja  $\Delta u_2 = 0$  ( $U_2 = \text{const}$ ), — ieejas admitance, kad izejā ir īsslēgums ( $R_s = 0$ ),

$y_{12} = \frac{\Delta i_1}{\Delta u_2}$ , ja  $\Delta u_1 = 0$  ( $U_1 = \text{const}$ ), — atgriezeniskās pārvades admitance, kas raksturo izejas sprieguma iedarbību uz ieejas īsslēguma (maiņstrāvai) strāvu,

$y_{21} = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_1}$ , ja  $\Delta u_2 = 0$  ( $U_2 = \text{const}$ ), — tiešās pārvades admitance, kas raksturo ieejas sprieguma iedarbību uz izejas strāvu īsslēgumā (vakuuma lampai tas ir stāvums  $S$ ),

$y_{22} = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_2}$ , ja  $\Delta u_1 = 0$  ( $U_1 = \text{const}$ ), — īsslēguma izejas admitance.

Parametrus  $z$  un  $y$  pielieto ierobežoti. Tā kā  $z$  tiek at-rasti tukšgaitā, tos plaši pielieto punkta tranzistoru aprē-ķinos, kas mazās jaudas dēļ ir ļoti nestabili īsslēguma ap-stākļos. Pašlaik punkta tranzistorus vairs neražo, tādēļ tos tuvāk neapskatīsim. Virsmas tranzistoriem savukārt ir sa-mērā liela izejas impedace, kas apgrūtina tukšgaitas slē-guma izveidošanu izejā. Līdz ar to  $z$  parametri sīkāk ap-skatīti netiek.  $y$  parametrus lietojot, tranzistoru aprēķinus tuvina vakuuma triodu aprēķiniem. Tomēr ne visos slēgu-mos tas izdodas. Bez tam ir samērā grūti mērit  $y$  para-metrus virsmas tranzistoriem, jo tiem ir maza ieejas impe-dance, kas apgrūtina īsslēguma izveidošanu ieejā.

Tranzistoru (četrpolu) galvenie parametri ir  $h$  para-metri, kas tad arī tiek doti katalogos. Tādēļ arī  $h$  para-metri jāapskata sīkāk.

Ieejas impedace jeb ieejas pretestība

$$h_{11} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1}, \text{ ja } U_2 = \text{const}, \quad (4-26)$$

ir maiņstrāvas pretestība starp tranzistora (četrpola) ieejas spailēm, kad izejā ir īsslēgums ( $R_s = 0$ ).

Sprieguma atgriezeniskās saites koeficients

$$h_{12} = \frac{\Delta u_1}{\Delta u_2}, \text{ ja } I_1 = \text{const}, \quad (4-27)$$

parāda, kāda izejas sprieguma daļa nonāk atpakaļ tranzistora ieejā caur iekšējo atgriezenisko saiti. Noteikums  $I_1 = \text{const}$  nozīmē, ka ieejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta un ieejas maiņspriegumu  $\Delta u_1$  rada tikai izejas maiņspriegums  $\Delta u_2$ .

Strāvas pastiprinājuma koeficients

$$h_{21} = \frac{\Delta i_2}{\Delta i_1}, \text{ ja } U_2 = \text{const}, \quad (4-28)$$

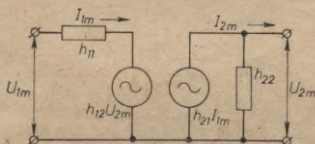
ir jau pazīstams — kopemitera slēgumā  $h_{21} = \beta$ , bet kopbāzes slēgumā  $h_{21} = \alpha$ . Noteikums  $U_2 = \text{const}$  atbilst prasībai  $R_s = 0$ .

Izejas admittance jeb vadītspēja

$$h_{22} = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_2}, \text{ ja } I_1 = \text{const}, \quad (4-29)$$

ir vadītspēja stārp tranzistora izejas spailēm, kad ieejas ķēde maiņstrāvai pārtraukta.  $h_{22}$  mēra sīmensos ( $1 \text{ S} = 1 \Omega^{-1}$ ), lai gan praksē diezgan bieži lieto arī lielumu  $1/h_{22}$ , ko mēra  $\Omega$  vai  $k\Omega$ .

Pēc nosacījumiem  $h$  parametriem var sastādīt tranzistora  $h$  parametru ekvivalento shēmu (4-16. zīm.).



4-16. zīm. Tranzistora  $h$  parametru ekvivalentā shēma.

Jāatzīmē, ka mērīt  $h$  parametrus virsmas tranzistoriem ir samērā viegli, jo tiem maza ieejas un liela izejas pretestība. Līdz ar to nav grūti radīt tukšgaitu (pārtrauktu ķēdi) maiņstrāvai ieejā un īsslēgumu izejā, kas nepieciešams  $h$  parametru noteikšanai.

Tranzistoru kā četrpolu parametri, to skaitā arī  $h$  parametri, atkarīgi no tranzistora slēguma: kopemitera (E), kopbāzes (B) vai kopkolektora (K). Tuvāk aplūkosim kopemitera un kopbāzes slēguma  $h$  parametrus.

**Kopemitera slēgums.** Šim slēgumam  $i_1 = i_B$ ,  $i_2 = i_K$ ,  $u_1 = u_{BE}$  un  $u_2 = u_{KE}$ . Līdz ar to  $h$  parametru izteiksmes ir šādas:

$$h_{11E} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}, \text{ ja } U_{KE} = \text{const}, \quad (4-30)$$

$$h_{12E} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{KE}}, \text{ ja } I_B = \text{const}, \quad (4-31)$$

$$h_{21E} = \beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B}, \text{ ja } U_{KE} = \text{const}, \quad (4-32)$$

$$h_{22E} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{KE}}, \text{ ja } I_B = \text{const}, \quad (4-33 a)$$

vai

$$\frac{1}{h_{22E}} = \frac{\Delta u_{KE}}{\Delta i_K}, \text{ ja } I_B = \text{const}. \quad (4-33 b)$$

**Kopbāzes slēgums.** Šajā gadījumā  $i_1 = i_E$ ,  $i_2 = i_K$ ,  $u_1 = u_{BE}$ ,  $u_2 = u_{KB}$ , tadē]

$$h_{11B} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_E}, \text{ ja } U_{KB} = \text{const}, \quad (4-34)$$

$$h_{12B} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta u_{KB}}, \text{ ja } I_E = \text{const}, \quad (4-35)$$

$$h_{21B} = \alpha = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_E}, \text{ ja } U_{KB} = \text{const}, \quad (4-36)$$

$$h_{22B} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{KB}}, \text{ ja } I_E = \text{const}, \quad (4-37 a)$$

vai

$$\frac{1}{h_{22B}} = \frac{\Delta u_{KB}}{\Delta i_K}, \text{ ja } I_E = \text{const}. \quad (4-37 b)$$

$h$  parametrus var atrast arī no tranzistoru statistiskajām raksturliķnēm. Piemēram, kopemitera slēgumam  $h_{11E}$  var atrast no tranzistora ieejas raksturliķnes (4-17. zīm.):

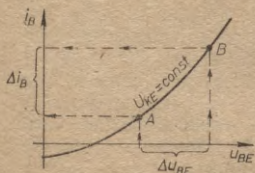
$$h_{11E} = \frac{\Delta u_{BE}}{\Delta i_B}, \text{ ja } U_{KE} = \text{const}. \quad (4-38)$$

Tomēr atrastā  $h_{11E}$  vērtība ir vidēja raksturliķnes posmā  $A-B$ . Lai  $h_{11E}$  vērtība būtu iespējami precīzāka, jācenšas ņemt mazākas  $\Delta u_{BE}$  un tām atbilstošās  $\Delta i_B$  vērtības.

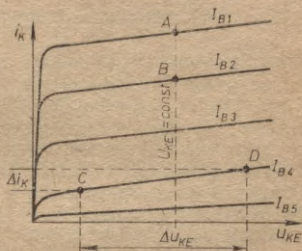
No izejas raksturliknēm (4-18. zīm.) var aprēķināt  $h_{21E}$  un  $h_{22E}$ :

$$h_{21E} = \beta = \frac{\Delta i_K}{\Delta i_B} = \frac{i_{KA} - i_{KB}}{I_{B1} - I_{B2}}, \text{ ja } U_{KE} = \text{const.} \quad (4-39)$$

Kolektora strāvas izmaiņas  $\Delta i_K$  un kolektora — emitera



4-17. zīm.  $h_{11E}$  aprēķināšana no ieejas raksturlieknes.



4-18. zīm.  $h_{21E}$  un  $h_{22E}$  aprēķināšana no izejas raksturlieknes.

sprieguma izmaiņas  $\Delta u_{KE}$  (starp punktiem *C* un *D*) attiecība dod izejas vaditspēju:

$$h_{22E} = \frac{\Delta i_K}{\Delta u_{KE}}, \text{ ja } I_B = \text{const.} \quad (4-40)$$

Lai aprēķinātu  $h_{12E}$ , nepieciešamas vismaz divas tranzistora ieejas raksturlieknes, kas uzņemtas pie dažādiem  $U_{KE}$ , turklāt raksturliekni, kas uzņemta pie  $U_{KE} = 0$ ,  $h_{12E}$  aprēķināšanai lietot nevar. Tā kā tranzistoru katalogos

4-1. tabula

Parametri	Kopemitera slēgums	Kopbāzes slēgums
$h_{11}$	Simti omu — daži kiloomi	Desimti omu
$h_{12}$	$10^{-3} - 10^{-4}$	$10^{-3} - 10^{-4}$
$h_{21}$	$\beta$ — desimti	$\alpha = 0,95 \div 0,998$
$1/h_{22}$	Kiloomi — desimti kiloomu	Desimti un simti kiloomu

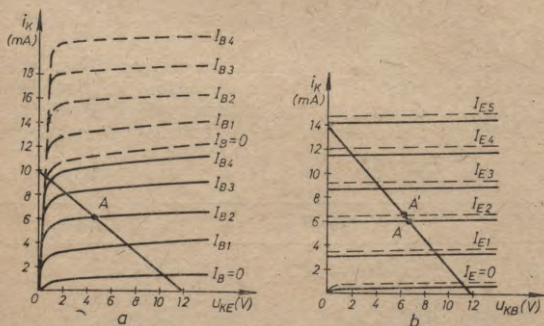
parasti dota tikai viena ieejas raksturlīkne, nav mērķtiecīgi šo jautājumu pētīt.

4-1. tabulā dotas vidējās  $h$  parametru vērtības mazjaušanas virsmas tranzistoriem kopemitera un korbāzes slēgumā.

#### 4-4. Tranzistoru temperatūras stabilitāte

Kā jau norādīts 1. nodaļā, palielinot temperatūru, palielinās pusvadītāja materiāla vadītspēja, tātad palielinās strāva. Uz tranzistoriem iedarbojas apkārtējās vides temperatūra, tie silst arī no strāvām pašā tranzistorā. Temperatūras iespējami ievērojami mainās tranzistoru raksturlīknes un parametri, it īpaši kopemitera slēgumā. 4-19. zīm. attēlotas tranzistora kopemitera un korbāzes slēguma izejas raksturlīkņu saimes un slodzes taisnes, pie tam katrā gadījumā dotas divas raksturlīkņu saimes — viena uzņemta  $+20^{\circ}\text{C}$  (attēlota ar pilnu līniju), otra —  $+70^{\circ}\text{C}$  temperatūrā (attēlota ar svītrlīniju).

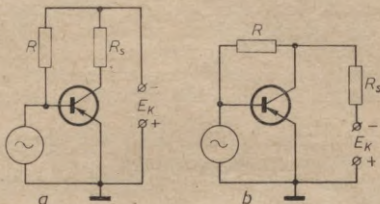
Kā redzams no 4-19. zīm. *a*, kopemitera slēgums ir temperatūras nestabils. Temperatūrai izmainoties par  $50^{\circ}\text{C}$ , izejas raksturlīknes un darba punkts pārvietojas tik tālu, ka praktiski darba režīms tiek pilnīgi izjaukts. Turpretī korbāzes slēgumā (4-19. zīm. *b*) raksturlīknes un



4-19. zīm. Tranzistora izejas raksturlīknes, atkarībā no temperatūras; *a* — kopemitera slēgumam; *b* — korbāzes slēgumam.

darba punkts atkarībā no temperatūras pārvietojas nedaudz. Tātad šī ir temperatūras stabila shēma. No teiktā var secināt, ka tranzistoriem kopemitera slēgumā jāparedz temperatūras stabilizācija.

4-20. zīm. *a* parādīta tranzistora barošana kopemitera



4-20. zīm. Tranzistora kopemitera slēguma barošana no viena līdzsprieguma avota:

*a* — bez temperatūras stabilizācijas; *b* — ar vienkāršāko temperatūras stabilizāciju.

slēgumā no viena sprieguma avota bez jebkādas temperatūras stabilizācijas. Šeit bāzes — emitera līdzspriegumu  $U_{BE}$ , līdz ar to arī tranzistora darba režīmu nosaka rezistors  $R$ :

$$U_{BE} = E_K - I_B R, \quad (4-41)$$

kur  $I_B$  — bāzes līdzstrāva, kas atbilst darba punktam.

Kā jau minēts, šāda shēma ir temperatūras nestabila, tātad praktiski nav izmantojama. Vienkāršākā temperatūras stabilizācijas shēma attēlota 4-20. zīm. *b*. Shēma ir ļoti līdzīga jau aplūkotajai. Šeit tikai rezistors  $R$  nav pieslēgts  $E_K$  avotam, bet gan tranzistora kolektoram, tātad pirms slodzes rezistora  $R_s$ . Stabilizējošā darbība ir ļoti vienkārša. Palielinoties temperatūrai, palielinās  $i_K$ , tātad samazinās  $u_{KE}$  (jo aug sprieguma kritums uz slodzes rezistora  $R_s$ ) un līdz ar to samazinās arī  $u_{BE}$ , kas savukārt samazina  $i_K$ , — un otrādi. Stabilizācijai nepieciešams, lai sprieguma kritums uz slodzes rezistora  $R_s$  būtu lielāks par  $0,5 E_K$ . Pielieto arī citas — sarežģītākas stabilizācijas shēmas.

#### 4-5. Tranzistoru paštrokšņi

Tranzistoru paštrokšņiem ir sarežģīts raksturs, jo tiem ir dažādi cēloņi. Tranzistoru paštrokšņus pirmām kārtām rada termiskie trokšņi, kuru cēlonis ir elektronu termiskā fluktuācija. Tā kā visas tranzistora daļas faktiski ir tilpuma pretestības, tad arī visās trīs daļās rodas trokšņu spriegumi, kas līdzīgi jebkura rezistora trokšņiem. Termiskos trokšņus rada galvenokārt bāzes pretestība  $r_B$ .

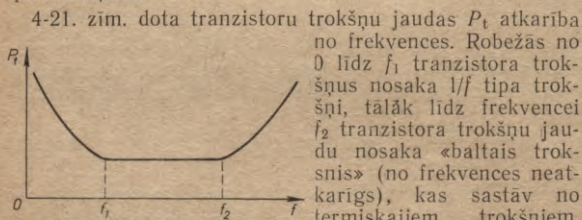
Bez termiskajiem paštrokšņiem tranzistoros sastopami arī skrošu trokšņi, ko rada strāvu fluktuācijas tranzistora pārejās;

strāvas sadalīšanās trokšņi, kas rodas, emitera strāvai sadaloties kolektora un bāzes strāvās;

rekombinācijas trokšņi, kas rodas bāzē rekombinācijas procesa rezultātā;

redundances (virsdaudzuma) trokšņi, kas ir tipiski tranzistoru trokšņi un ievērojami tikai zemās frekvencēs.

Redundances trokšņu spektra amplitūdas ir apgriezti proporcionālas frekvencei, tādēļ tos mēdz saukt par  $1/f$  tipa trokšņiem.



4-21. zīm. Tranzistoru trokšņu jaudas atkarība no frekvences.

šanās trokšņi, kuru jauda proporcionāla frekvences kvadrātam.

Jāatzīmē, ka, jo mazāks tranzistora strāvas pastiprinājuma koeficients, jo lielāki paštrokšņi. Tas izskaidrojams šādi: 1) tranzistoriem ar mazu  $\alpha$  ( $\beta$ ) ir liela bāzes strāva, kuras fluktuācijas izraisa lielu trokšņu spriegumu uz  $r_B$ ; 2) šāda tranzistora bāzē notiek vairāk rekombināciju — pieaug rekombinācijas trokšņi.

Bez tam liels iespaids uz paštrokšņiem ir tranzistora materiālam. Tā, piemēram, silīcija tranzistori «trokšņo» daudz vairāk nekā germānija. Jāievēro, ka tranzistoru paštrokšņi ievērojami pieaug, palielinoties temperatūrai. Nedaudz samazināt paštrokšņus var, ja samazina spriegumu  $U_{KB}$  uz kolektora pārejas un emitera strāvu  $i_E$ . Tomēr to drīkst darīt tikai tīkmēr, kamēr nesamazinās strāvas pastiprinājuma koeficients, jo tad rodas pretējs efekts, par kuru jau minēts.

#### 4-6. Galvenie tranzistoru tipi

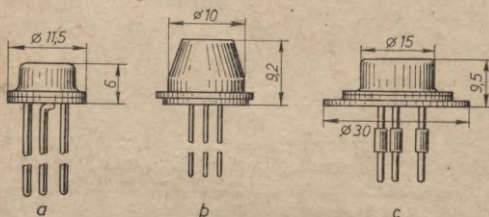
Tranzistorus pieņemts klasificēt pēc uzbūves, materiāla, izgatavošanas tehnoloģijas, pielietojuma, jaudas, frekvenču diapazona un citām īpašībām. Punkta tranzistorus vairs neražo. Visi apskatāmie tranzistori ir virsmas jeb plaknes tranzistori. Par materiāliem patlaban lieto germāniju un silīciju, lai gan nākotnē tiks izmantoti arī citi pusvadītāju materiāli. Pēc izgatavošanas tehnoloģijas tranzistorus šeit neklasificējam, jo tas ir specifisks jautājums. Pēc kolektora pārejā pieļaujamās izkliedes jaudas tranzistorus iedala mazjaudas ( $P_{K\text{ pieļ}} < 0,3$  W), vidējas jaudas ( $0,3 \text{ W} \leq P_{K\text{ pieļ}} \leq 3$  W) un lieljaudas ( $P_{K\text{ pieļ}} > 3$  W) tranzistoros. Atkarībā no maksimālās darba frekvences tranzistorus grupē zemfrekvences (līdz 3 MHz), vidējas frekvences (no 3 MHz līdz 30 MHz), augstfrekvences (no 30 MHz līdz 300 MHz) un supraugstfrekvences (virs 300 MHz) tranzistoros.

**Mazjaudas zemfrekvences tranzistori** ir galvenokārt germānija tranzistori:  $p-n-p$  sērijas МП40—МП42, П20—П21, П25—П26, П42 un  $n-p-n$  sērijas МП36—МП38, kā arī silīcija  $n-p-n$  tranzistori П101—П103 un  $p-n-p$  tranzistori П104—П106. Šie tranzistori konstruktīvi noformēti metāla korpusā ar lokaniem stieples izvadiem (4-22. zīm. a). To pieļaujamā kolektora izkliedes jauda ir 150—200 mW.

Bez tam šai apakšgrupai pieskaitāmi arī jaunie germānija miniatūrie  $p-n-p$  tranzistori ГТ108 un ГТ109. Piemēram, ГТ109 diametrs ir 3,4 mm, augstums 2,5 mm, svars 0,1 G, bet pieļaujamā kolektora izkliedes jauda 30 mW.

Mazjaudas vidējas frekvences tranzistorus pārstāv germānija  $p-n-p$  tipa tranzistori ar  $P_{K\text{ pieļ}} = 30$  mW. Seit pieskaitāmi П12, П29, П30, П406, П407. Ārējie izmēri un noformējums tāds pats kā zemfrekvences tranzistoriem.

Pie mazjaudas augstfrekvences tranzistoriem pieder vesela virkne germānija  $p-n-p$  tranzistoru: П401—П403, П414—П416Б, П420—П423, ГТ308А—ГТ308В, ГТ309А—



4-22. zīm. Tranzistoru konstrukcija:

a — mazjaudas; b — vidējas jaudas; c — lieljaudas.

ГТ309Е, kā arī  $n-p-n$  germānija tranzistori ГТ303А—ГТ303Е un silīcija tranzistori П504—П505, КТ301—КТ301Ж. Visi šie tranzistori konstruktīvi izveidoti līdzīgi jau apskatītajiem (4-22. zīm. a), un to  $P_{K\text{ pieļ}} = 50 \div \div 150$  mW. Bez tam vēl šajā grupā iekļaujami mikrominiatūrie tranzistori ГТ310А—ГТ310Е (germānija  $p-n-p$ ) ar  $P_{K\text{ pieļ}} = 20$  mW.

Vidējas jaudas zemfrekvences tranzistoru grupā iedalāmi ir germānija  $p-n-p$  tranzistori ГТ403А—ГТ403И, kas konstruktīvi noformēti metāla konusveida apvalkā (4-22. zīm. b).

Pie vidējas jaudas vidējas frekvences tranzistoriem pie-skaitāmi germānija  $p-n-p$  tranzistori П601—П602А un П605—П605А, kuru pieļaujamās izkliedes jaudas ir attiecīgi 1 W un 0,5 W. Pielietojot speciālus radiatorus, šīs jaudas var palielināt līdz 5 un 3 W.

Vidējas jaudas augstfrekvences tranzistori arī ir  $p-n-p$  germānija tranzistori П607—П609А ar  $P_{K\text{ pieļ}} = = 1,5$  W.

Lieljaudas zemfrekvences tranzistoru grupā ietilpst ger-

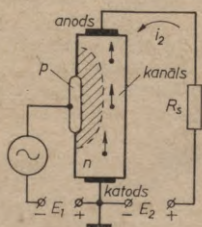
mānija  $p-n-p$  tranzistori П4А—П4Д, kam  $P_{K\text{ pieļ}} = 2 \div 3$  W bez radiatora un 15—25 W ar attiecīgu radiatoru, П201—П203 ( $P_{K\text{ pieļ}} = 1$  W bez radiatora un 10 W ar attiecīgu radiatoru) un П209—П210А ( $P_{K\text{ pieļ}} = 1,5$  W bez radiatora un 60 W ar attiecīgu radiatoru). Bez tam šajā grupā ieskaitāmi silīcija tranzistori П302—П304, kam  $P_{K\text{ pieļ}} = 10$  W (ar radiatoru).

**Lieljaudas vidējas frekvences tranzistori** ir silīcija  $n-p-n$  tranzistori П701—П702А ar pieļaujamo izkliedes jaudu 1—4 W bez radiatora un 10—40 W ar attiecīgiem radiatoriem.

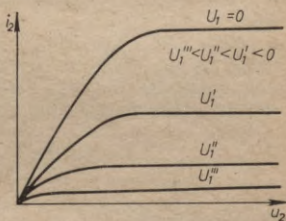
Visi lieljaudas tranzistori noformēti speciālos lielizmēra korpusos (4-22. zīm. *c*), un tos komplektē ar speciālām stiprināšanas detaļām, lai tranzistoru varētu stingri piestiprināt attiecīgajam radiatoram.

#### 4-7. Kanāltransistori

No jaunākā tipa tranzistoriem lielu interesi izraisa t. s. kanāltransistors. Tā kā tā darbības princips atšķiras no jau apskatīto tranzistoru darbības principa un tā parametri ir ļoti tuvi vakuuma lampu parametriem, lietderīgi



4-23. zīm. Kanāltransistora uzbūve un darbības princips.



4-24. zīm. Kanāltransistora izvejas raksturlieknes.

sīkāk iepazīties ar šī tipa tranzistoru. 4-23. zīm. parādīta kanāltransistora shematiska uzbūve un slēgums. Kanāltransistors sastāv no pusvadītāja plāksnītes, piemēram,  $n$  tipa, kurai abos galos piestiprināti elektrodi ar izvadiem.

Vienu elektrodu sauc par anodu, bet otru par katodu. Ar šo elektrodu palīdzību izveido ārējo jeb vadāmo ķēdi, kurā ieslēdz slodzes rezistoru  $R_s$  un sprieguma avotu ar plusu pie anoda un mīnusu pie katoda. Līdz ar to šajā ķēdē plūst elektronu strāva  $i_2$ . Lai šo strāvu varētu vadīt, plāksnītes malā izveidots trešais elektrodus no preteja tipa pusvadītāja materiāla (šajā gadījumā  $p$  tipa). Ieejas ķēdes sprieguma  $E_1$  avots pieslēgts tā, lai šajā vienīgajā  $p-n$  pārejā tas radītu sprostsriegumu  $u_1$ . Zināms, ka sprostsplāņa biezums  $p-n$  pārejā ir atkarīgs no pieslēgtā sprostsrieguma (sk. 1. nodaļu). No zīmējuma redzams, ka sprostsplānis (iesvītrotais laukums) aizņem daļu no tranzistora plāksnītes šķērsriezuma laukuma. Līdz ar to brīvais šķērsriezuma laukums ir atkarīgs no sprostsplāņa izmēriem. Ja pie vadības elektroda sprostsriegums nav pieslēgts, brīvais šķērsriezuma laukums ir maksimāls un arī elektronu strāva  $i_2$  caur plāksnīti ir maksimāla. Pieslēdzot sprostsriegumu  $u_1$  starp vadības elektrodu un plāksnīti, plāksnītes brīvais šķērsriezuma laukums samazinās un pieaug pretestība, tātad samazinās  $i_2$ . Pie pietiekami liela sprostsrieguma  $u_1$  visā šķērsriezuma laukumā izveidojas sprostsplānis un  $i_2=0$ . Kā redzams, mainot  $u_1$ , mainās  $i_2$  (tātad arī sprieguma kritums uz slodzes pretestības), — kanāltransistors darbojas kā pastiprinātājs.

4-24. zīm. attēlotas kanāltransistora izejas raksturlielnes, kas ļoti atgādina pentodes anoda raksturlielnes. Kanāltransistoru pieņemts raksturot ar tādiem pašiem parametriem kā vakuuma lampas: stāvumu

$$S = \frac{\Delta i_2}{\Delta u_1}, \text{ ja } U_2 = \text{const}, \quad (4-42)$$

iekšējo pretestību

$$R_1 = \frac{\Delta u_2}{\Delta i_2}, \text{ ja } U_1 = \text{const}, \quad (4-43)$$

un pastiprinājuma koeficientu

$$\mu = SR_1. \quad (4-44)$$

Kanāltransistoru stāvums ir daži mA/V, bet iekšējā pretestība sasniedz šimtus k $\Omega$ .

Svarīgs parametrs ir arī ieejas pretestība

$$R_{ie} = \frac{\Delta u_1}{\Delta i_1}, \text{ ja } U_2 = \text{const.} \quad (4-45)$$

Sis parametrs kanāltransistoros sasniedz  $M\Omega$  — tātad ir daudzkārt lielāks par parasto tranzistoru ieejas pretestību. Bez tam kanāltransistori var strādāt visai augstās frekvencēs. No teiktā var secināt, ka kanāltransistoriem ir lielas perspektīvas.

## 5. nodaļa

### JONU IERICES

#### 5-1. Vispārīgas ziņas

Par jonu jeb gāzu izlādes ierīcēm sauc tādas ierīces, kuru darbības pamatā ir gāzu izlādes princips. Hermētiskā balonā ievieto elektrodus, kas līdzīgi elektronu ierīcēs esošajiem, un to piepilda ar dzīvsudraba tvaikiem vai cēlgāzēm — hēliju, neonu, argonu vai kriptonu (dažreiz arī ar ūdeņradi). Šie elementi ķīmiski nereaģē ar ierīces elektrodu materiāliem, tādēļ ierīces darbināšanas laikā spiediens tās balonā paliek praktiski nemainīgs.

Gāzu vai tvaiku spiediens jonu ierīces balonā var svārstīties  $10^{-3}$ — $10^3$  mm Hg robežās. Tomēr visbiežāk sastopamās jonu ierīcēs spiediens ir  $10^{-2}$ — $10^{-3}$  mm Hg. Tvaiku pildījuma gadījumā dzīvsudraba tvaiki ir piesātināti, ko panāk, balonā ievietojot dzīvsudraba pilienu vai arī šķidro dzīvsudraba katodu. Tvaiku daudzuma samazināšanos balonā (kondensējoties uz ierīces balona un elektrodiem) kompensē nepārtrauktā iztvaikošana no dzīvsudraba piliena vai katoda virsmas.

Gāzu vai tvaiku spiediena dēļ elektroni, kustoties starp elektrodu telpā, saduras ar gāzes vai tvaiku atomiem. Tā rezultātā notiek jonizācija un jonu ierīču elektriskajos procesos kopā ar elektroniem piedalās arī gāzu vai tvaiku joni.

Jonu strāva, kas parasti nepārsniedz 1 procentu no ierīces kopējās strāvas, jūtami ietekmē procesus ierīcē (galvenokārt tāpēc, ka joni neitralizē elektronu negatīvo telpas lādiņu). Tādēļ caur jonu ierīcēm spēj plūst stipras strāvas arī tad, ja potenciālu starpības uz ierīču elektrodiem ir mazas. Joni var iespaidot arī katoda emisiju, kam dažos ierīču tipos ir izšķiroša nozīme.

## 5-2. Gāzu izlādes fizikālie principi

Jonu ierīcēs brīvie elektroni kustas anoda virzienā. Savā kustības ceļā tie saduras ar cēlgāzes (dzīvsudraba tvaiku) atomiem vai molekulām. Atkarībā no elektrona kustības ātruma tā un cēlgāzes atoma sadursmes rezultāts var būt dažāds. Ja elektrona kustības ātrums ir mazs (maza kinētiskā enerģija), notiek elastīga sadursme ar atomu, kuras rezultātā mainās tikai elektrona kustības ātrums un virziens, bet pašā atomā nekādas pārmaiņas nenotiek.

Ja elektronu ātrumi ir lieli, notiek t. s. neelastīgās sadursmes ar atomiem un atoms var tikt ierosināts vai jonizēts. Lai atomu ierosinātu, vienam no tā elektroniem ārējās enerģijas iedarbības rezultātā jāpāriet no sava normālā enerģētiskā līmeņa uz augstāku enerģētisko līmeni. Taču ierosinātā stāvoklī atoms paliek tikai ļoti mazu laika sprīdi (ap  $10^{-8}$  s) un pēc tam atgriežas savā normālajā stāvoklī, izdalot enerģijas kvantu gaismas veidā. Enerģiju, kas nepieciešama atoma ierosināšanai, sauc par tā ierosmes enerģiju un mēra elektronvoltos. Elektrons iegūst šo enerģiju, ja iziet cauri paātrināšanai potenciālu starpībai, ko sauc par gāzes ierosmes potenciālu.

Ja elektronam ir vēl lielāka kinētiskā enerģija (vēl lielāks kustības ātrums), tas var no gāzes atoma izsist vienu elektronu, tā atomu pārvēršot pozitīvā jonā. Šo procesu sauc par triecienu jonizāciju. Lai elektrons iegūtu jonizācijai nepieciešamo enerģiju, tam jāiziet cauri noteiktai paātrināšanai potenciālu starpībai, ko sauc par jonizācijas potenciālu. Ja elektrons saduras ar jau ierosinātu gāzes atomu, tā jonizēšanai nepieciešama daudz mazāka enerģija.

Ierosinātā atoma izdalītais gaismas kvants var ierosināt citu atomu, tā palielinot ierosināto atomu skaitu ierīcē.

Vienlaikus ar jonizāciju jonu ierīcē norisinās arī pretējs process — rekombinācija. Elektroni un pozitīvie joni starpelektrodu telpā vai arī uz ierīces sienīņām savstarpēji iedarbojas un atjauno neitrālus atomus. Ja izbeidzas jonizācija, rekombinācija var noslēgties ar jonu izžušanu starpelektrodu telpā. Notiek t. s. dejonizācija. Ja rekombinācija notiek starpelektrodu telpā, enerģija izdalās izstarojuma veidā, ja uz ierīces sienīņām, — siltuma veidā.

Jonu ierīču darbības pamatā var būt divu veidu izlāde gāzēs — nepatstāvīgā un patstāvīgā. Nepatstāvīgo izlādi jonu ierīcēs raksturo tas, ka izlādes telpā no kāda ārēja avota, piemēram, kvēlkatoda, ievada elektronus, kuri, elektriskā lauka iespaidā dodoties uz anodu, saduras ar gāzes atomiem un tos jonizē. Pozitīvie joni virzās uz katodu un daļēji neitralizē elektronu telpisko lādiņu katoda tuvumā, kas, kā zināms, ierobežo anodstrāvas lielumu. Tādējādi anodstrāva (to rada uz anodu ejošie elektroni), nemainoties anodspriegumam, pieaug, līdz ar to samazinās jonu ierīces iekšējā pretestība.

Ja gāzu spiediens jonu ierīcē ir mazs ( $10^{-4}$  mm Hg), pat pie anodspriegumiem, kas daudzkārt pārsniedz jonizācijas spriegumu, radušos pozitīvo jonu skaits ir nepietiekams, lai pilnīgi neitralizētu elektronu telpisko lādiņu katoda tuvumā. Ja tūrpreti gāzu spiediens ir lielāks ( $10^{-1}$ — $10^{-3}$  mm Hg), tad notiek daudz intensīvāka jonizācija, kas, sasniedzot attiecīgu anodspriegumu, var pieaugt lavīnveidā — «iedegas» gāzu izlāde. Sai gadījumā elektronu telpiskais lādiņš var tikt pilnīgi neitralizēts un katoda tuvumā var rasties pat pozitīvs telpisks lādiņš. Tādēļ strāva šādā ierīcē jāierobežo ar ārēju rezistoru, kas slēgts virknē ar ierīci un tās anodsprieguma avotu.

No strāvas pārnesšanas viedokļa joniem praktiskas nozīmes nav, jo tie pārnes mazāk par 1 procentu no kopējās strāvas. Pārējo strāvu pārnes elektroni, kuru kustīgums ir daudzkārt lielāks (elektronu masa ir daudzkārt mazāka).

Gāzes jonizācijai un dejonizācijai jonu ierīcē piemīt zināma inerce, tādēļ šīs ierīces var izmantot tikai darbam frekvenču diapazonā līdz apmēram 10 kHz.

Patstāvīgo izlādi jonu ierīcēs raksturo tas, ka daļiņas, kas pārnes elektriskos lādiņus starp ierīces elektrodiem, nepārtraukti rodas gāzu izlādes rezultātā, kuru savukārt izraisa potenciālu starpība uz ierīces elektrodiem. Jonizācija te notiek bez emisijas faktora (kvēlkatoda) iedarbības, jo jebkurā telpā, to skaitā arī jonu ierīcē, vienmēr ir neliels skaits jonu un elektronu, kas rodas, kosmiskajiem stariem un radioaktīvajai radiācijai iedarbojoties uz gāzes atomiem. Ja ierīces elektrodiem piešķir pietiekami lielu potenciālu starpību, kas var izraisīt lavīnveidā pieaugošu jonizāciju, ierīcē rodas patstāvīgā gāzu izlāde. Pozitīvie joni ne tikai likvidē elektronu telpisko lādiņu un piedalās strāvas pārnesšanā starp ierīces elektrodiem, bet arī bom-

bardē katodu un rada elektronu sekundāro emisiju. Tā tiek radīti priekšnoteikumi, lai ierīcē notiktu stacionāra gāzu izlāde, pie tam kvēlkatoda vietā izmantots aukstais katods.

Lai notiktu patstāvīgā izlāde, nepieciešams, lai katrs elektrons, pārvietojoties no katoda uz anodu, izraisītu procesu, kas nodrošinātu vismaz viena jauna elektrona iziešanu no katoda. Tāpēc starp katodu un anodu jāpastāv vismaz potenciālu starpībai, kas atbilst aizdedzes spriegumam. Aizdedzes sprieguma lielums ir atkarīgs no jonizācijas potenciāla, gāzes spiediena jonu ierīcē un attāluma starp ierīces elektrodiem. Noteikta daudzuma ūdeņraža piejaukumi cēlgāzēm pazemina aizdedzes spriegumu.

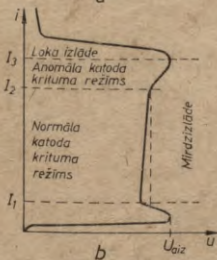
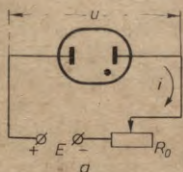
Ja izlādes strāva jonu ierīcē nav liela (līdz mA desmitiem), ko panāk, ierīces ārējā ķēdē ieslēdzot pietiekami lielu ierobežojošu rezistoru  $R_0$  (5-1. zīm. a), tad patstāvīgo izlādi sauc par mirdzizlādi. Mirdzizlādē elektronu sekundāro emisiju izraisa pozitīvo jonu triecieni pret katodu.

Gāzu patstāvīgās izlādes voltampēru raksturliktne attēlota 5-1. zīm. b. Izlāde sākas pēc aizdedzes sprieguma ( $U_{\text{aiz}}$ ) sasniegšanas. Pēc aizdedzināšanas spriegums nedaudz samazinās, jo paaugstinātas jonizācijas intensitātes iespaidā patstāvīgā izlāde iespējama arī tad, ja  $u < U_{\text{aiz}}$  (robežās  $I_1 \leq i \leq I_2$ ). Šī voltampēru raksturliktnes daļa ir gandrīz vertikāla — ierīcei caurplūstošās strāvas pieaugums notiek, anodspriegumam gandrīz nemainoties. Šo ierīces režīmu sauc par normāla katoda krituma režīmu (ierīces katodam ir viegls mirdzums). Normāla katoda krituma režīmā sprieguma lielumu nosaka tikai gāzes sastāvs un katoda materiāls. Gāzu piejaukumi šo spriegumu var ievērojami pazemināt.

5-1. zīm. Gāzu patstāvīgā izlāde:

a — slēgums; b — voltampēru raksturliktne.

Kad viss katods ir pārklājies ar mirdzumu, tad, lai tālāk palielinātu strāvu ierīcē, jāpaaugstina spriegums

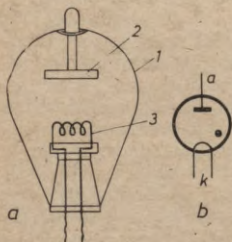


starp elektrodiem. Tad joni iegūst lielāku ātrumu un, atsitoties pret katodu, palielina elektronu sekundārās emisijas intensitāti. Šo režīmu sauc par anomāla katoda krituma režīmu. Spriegums, kura lielumu nosaka strāvas blīvums un gāzes spiediens jonu ierīcē, var daudzkārt pārsniegt normāla katoda krituma spriegumu. Tālākā strāvas un sprieguma palielināšana anomāla katoda krituma režīmā lēciņveidā izraisa loka izlādi. Tā sākas, spriegumam sasniedzot noteiktu vērtību, un raksturojas ar lielu strāvas pieaugumu (voltampēru raksturliknes posms, kur  $i > I_3$ ). Šai laikā pozitīvie joni pienāk tik tuvu katodam, ka ar savu elektrisko lauku izraisa autoelektronu emisiju (elektrostatisko emisiju) — izrauj elektronus no aukstā katoda. Autoelektronu emisija šai laikā nenotiek no visas katoda virsmas, bet gan no nelielas tās daļas — katoda plankuma, kas pastāvīgi pārvietojas pa katoda virsmu. Strāva loka izlādes gadījumā var sasniegt milzīgas vērtības — līdz tūkstošiem A.

### 5-3. Kvēlkatoda (nepatstāvīgas izlādes) jonu ierīces

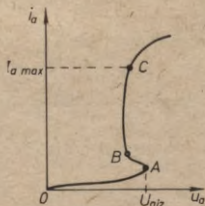
**Gazotroni.** Par gazotronu sauc divielektrodu kvēlkatoda lampu (5-2. zīm.), kuras balonā iepildīta cēlgāze vai dzīvsudraba tvaiki. To spiediens ir mazāks par atmosfēras spiedienu.

Kvēlkatods emitē elektronus, kuri elektriskā lauka



5-2. zīm. Gazotrons:

*a* — uzbūve; *1* — stikla balons, *2* — anods, *3* — katods; *b* — apzīmējums elektriskajos slēgumos.



5-3. zīm. Gazotrona voltampēru raksturlikne.

ietekmē dodas uz pozitīvo anodu. Saduroties ar gāzes molekulām, elektroni tās jonizē. Rodas pozitīvi gāzes joni un sekundārie elektroni. Sekundārie elektroni kopā ar primārajiem elektroniem kustas anoda virzienā, bet pozitīvie joni dodas uz katodu. Jonizēto gāzi, kurā negatīvo un pozitīvo lādiņu koncentrācija ir apmēram vienāda, sauc par plazmu.

Gazotronos parasti izmanto oksīdkatodus, kas paredzēti mazam kvēles spriegumam (ja kvēles spriegumi ir lieli, dzīvsudraba gazotronos starp katoda galiem var rasties loka izlāde). Mazjaudas gazotronos lieto tiešās kvēles spirālveida katodus, bet lieljaudas gazotronos — sildkatodus.

Anodus izgatavo no niķeļa vai grafīta diskveidīgus, pussfēras veidā vai arī kā no augšas segtus cilindrus, kas aptver katodu.

Gazotrona stikla balonu veido no molibdena stikla, kura termiskās izplešanās koeficients ir tāds pats kā elektrodu molibdena izvadiem. Dzīvsudraba gazotronu balonu apakšējā daļā ir speciāls padziļinājums, kurā novietojas dzīvsudraba piliens, kas nodrošina dzīvsudraba tvaiku rašanos ierīcē pēc kvēles ieslēgšanas.

5-3. zīm. attēlota gazotrona voltampēru raksturlikne. Ja maina anodspriegumu  $u_a$  no 0 līdz  $U_{at}$ , gazotrona anodķēdē plūst niecīga strāva, jo elektroni tikai nelielā skaitā nonāk līdz anodam. Elektroni šai laikā jonizāciju nevar izraisīt, jo to ātrumi ir pārāk mazi. Uzņemot šo raksturliknes daļu, ķēdē virknē jāieslēdz ierobežojošs rezistors  $R_0 = 1 \div 2 \text{ k}\Omega$ . Sasniedzot  $u_a = U_{at}$ , gazotrons «aizdegas». Mainot ķēdei pievadāmā sprieguma vērtību  $E$ , mainās gazotrona anodstrāva  $i_a$  (šai laikā ierobežojošā rezistora pretestība jāsamazina līdz  $R_0 = 8 \div 10 \Omega$ ).  $u_a$  mēra kā sprieguma kritumu starp gazotrona anodu un katodu.

Gazotronam aizdegoties, sprieguma kritums tajā nedaudz samazinās (raksturliknes posms  $A-B$ ). Tas notiek tādēļ, ka šai laikā elektroni biežāk saduras ar gāzes atomiem un par svarīgu faktoru kļūst kāpņveida jonizācijas procesi (vispirms atomu ierosināšana, pēc tam jonizācija). Lielas strāvas parādīšanās anodķēdē maina sprieguma kritumus uz gazotrona un ierobežojošās pretestības. Sprieguma  $u_a$  maiņas lielumu raksturliknes posmā  $A-B$  sauc par gazotrona aizdedzes sliekšni. Tā lielums atkarīgs no balonā esošās gāzes tipa, spiediena un piemaisījumiem,

kā arī no katoda emisijas strāvas lielumā un lādiņu rašanās uz balona sienām.

Aiz aizdedzes sliekšņa sākas gazotrona voltampēru raksturliknes darba posms (liknes daļa  $B-C$ ), kurā strāva  $i_a$  strauji pieaug, bet sprieguma  $u_a$  izmaiņas ir niecīgas — raksturliknes posms ir gandrīz vertikāls. Strāvas lielumu darba posmā faktiski nosaka tikai ārējā sprieguma  $E$  un ierobežojošā rezistora  $R_0$  lielumi:

$$i_a = \frac{E - u_a}{R_0} \quad (5-1)$$

Raksturliknes darba posmā galveno anodstrāvas daļu pārnes elektroni, jo savas lielās masas dēļ pozitīvie joni kustas relatīvi lēni. Tādēļ jonu galvenais uzdevums izlādē ir neitralizēt elektronu negatīvo telpas lādiņu, kurš rodas tādēļ, ka katods laika vienībā var emitēt vairāk elektronu, nekā nonāk anodā (stacionārā stāvoklī no katoda uz anodu ejošo elektronu skaits paliek nemainīgs). Šie liekie elektroni ap katodu izveido mākonī, kas var atstarot lēni emitētos elektronus. Jonu iedarbības rezultātā elektronu mākonis samazinās un uz anodu dodas lielāks skaits elektronu. Tas notiek tikmēr, kamēr anodstrāva kļūst vienāda ar katoda emisijas strāvu (punkts  $C$  uz gazotrona voltampēru raksturliknes).

Tālāku anodstrāvas pieaugumu var iegūt, ja palielina katoda emisiju, bombardējot katodu ar pozitīvajiem joniem, ko savukārt var panākt, palielinot spriegumu starp gazotrona elektrodiem. Tādēļ voltampēru raksturlikne aiz punkta  $C$  sāk virzīties pa labi. Tas gan rada intensīvu katoda aktīvās kārtas saīrumu, un līdz ar to stipri samazinās gazotrona lietošanas laiks. Tādēļ gazotronus darbina tikai režīmā, kad  $i_a \leq I_{a \max}$ , t. i., nepārsniedzot normālo katoda emisijas strāvu.

Tā, piemēram, ja gazotronu izmanto par taisngriezi, tad caur gazotronu plūstošās iztaisnotās pulsējošās strāvas amplitūdas vērtība nedrīkst pārsniegt  $I_{a \max}$ . Iztaisnotās vidējās strāvas  $I_{a \text{ v}}$  vērtība ir mazāka par  $I_{a \max}$ , praktiski  $I_{a \text{ v}} : I_{a \max} = 1 : 3$ .

Dzīvsudraba gazotronu voltampēru raksturlikne maina savu formu atkarībā no tvaiku blīvuma, kuru nosaka tvaiku spiediens un temperatūra. Tvaiku spiediens savukārt ir atkarīgs no gazotrona balona apakšējā daļā esošā šķidrā dzīvsudraba temperatūras. Eksperimentāli pierādīts,

ka tvaiku spiedienu balonā ir pietiekams, ja dzīvsudraba temperatūra pārsniedz  $+15^{\circ}\text{C}$ . Ja šis nosacījums nav izpildīts, sprieguma kritums uz gazotrona pārsniedz pieļaujamo (joni iegūst tādu paātrinājumu, ka saārda katoda aktīvo slāni). Lai to novērstu, anodspriegumu gazotronam drīkst pieslēgt tikai tad, kad tā balona apakšējās daļas temperatūra ir pietiekami augsta. Šo temperatūru paaugstina ieslēgtas kvēles starojuma enerģija. Tādēļ kvēle ir jāieslēdz zināmu laiku sprīdi ātrāk nekā anodspriegums. Mazjaudas gazotronos šis laika sprīdis ir 2—3 min, bet lieljaudas — līdz 30 min (speciālos mazjaudas gazotronos šis laika sprīdis var būt samazināts līdz 5—6 s).

Par gazotrona pozitīvu īpašību jāuzskata tā spēja, strādājot taisngrieža režīmā, bez caursītes izturēt lielus sprostspriegumus (negatīvs potenciāls uz anoda, pozitīvs uz katoda). Parādoties sprostsprīgumam, izlāde gazotronā beidzas, taču elektroni un joni izlādes telpā vēl zināmu laiku saglabājas. Daļa no tiem dodas uz balona sienām, kur neitralizējas, daļa kustas uz elektrodiem, izveidojot sprostsprīgu. Šis sprostsprīgas vērtība parasti ir ļoti niecīga. Tomēr, ja augstsprīgums starp elektrodiem ir ļoti liels, joni, lielā ātrumā triecoties pret anodu, var izraisīt elektronu sekundāro emisiju no tā virsmas. Tādējādi rodas sprostvīziena loka izlāde un gazotronam zūd ventīļa īpašības. Tādēļ gazotronus raksturo ar maksimāli pieļaujamo sprostsprīgu, kuru sasniedzot vēl neparādās sprostvīziena loka izlāde. Maksimāli pieļaujamais sprostsprīgums mērāms kV vai to desmitos.

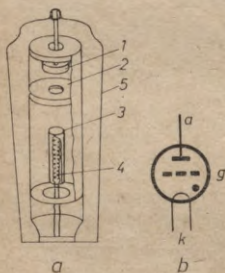
Visbiežāk sastopamie gazotroni ir ГГ1-0,5/5, ГР1-0,25/1,5. Apzīmējuma pirmais burts nozīmē «gazotrons», otrais norāda balona pildījumu (Г — gāze, Р — dzīvsudraba tvaiks), pirmais cipars — ierīces tipa numuru, daļskaitļa skaitītājs —  $I_{av}$  (A), bet saucējs — maksimālo sprostsprīgu (kV).

Gazotronus izmanto vidējas un lielas jaudas taisngriežos. Tās raksturo pietiekami lielas iztāisnotās strāvas, lieli sprostsprīgumi un samērā augsts lietderības koeficients. Gazotronu taisngriežu slēgumi ir identiski kenotronu taisngriežu slēgumiem.

**Kvēlkatoda tiratroni.** Pār tiratronu sauc gāzu izlādes lampu ar kvēlkatodu, kurā bez katoda un anoda ir vēl viens vai vairāki stūrējošie elektrodi — tikliņi. Tiratronus

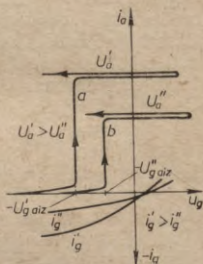
piepilda ar inerti gāzi vai dzīvsudraba tvaikiem. Dažreiz balonā iepilda ūdeņradi, tad tiratronu raksturo mazs dejonizācijas laika sprīdis, kas sevišķi svarīgi, ja tiratronus izmanto augstām darba frekvencēm vai impulsu režīmā.

Tikliņu tiratronos izmanto, lai varētu vadīt loka aizdedzināšanas momentu. Tikliņš pilnīgi izolē katodu no anoda radītā elektriskā lauka ietekmes, jo pretējā gadījumā elektroni ceļā no katoda uz anodu apietu tikliņu, izraisot jonizāciju un līdz ar to arī loka izlādi neatkarīgi no tikliņa potenciāla. Tikliņu veido metālisks cilindrs, kas aptver katodu, un tā augšējā pamatā, kas vērsts pret anodu, ir viens vai vairāki caurumi. Anods un katods izveidoti analogi identiskajiem elektrodiem gazotronā. Tiratrona shematiskā uzbūve parādīta 5-4. zīm.



5-4. zīm. Vientikliņa kvēlkatoda tiratrons:

*a* — dzīvsudraba tvaiku tiratrona uzbūve; 1 — anods, 2 — tikliņš, 3 — katods, 4 — kvēldiegs, 5 — balons; *b* — apzīmējums elektriskajos slēgumos.



5-5. zīm. Tiratrona anoda-tikliņa raksturlieknes.

Tiratrona tikliņa darbība stipri atšķiras no vakuuma triodes tikliņa darbības. Tiratrona anoda-tikliņa raksturliekne attēlota 5-5. zīm. Pietiekami liela negatīva tikliņa potenciāla  $u_g$  un pozitīva anoda potenciāla  $U'_a$  (to pieslēdz pēc tikliņa potenciāla pieslēgšanas) gadījumā tiratrons ir slēgts un anodstrāvas tajā nav. Mainot negatīvo tikliņa potenciālu nulles virzienā ( $-u_g \rightarrow 0$ ), caur tikliņu anoda virzienā sāk pārvietoties elektroni. Kamēr to skaits nav liels un ātrumi pārāk mazi, lai izraisītu jonizāciju,

anodstrāva aug atbilstoši tīkliņa potenciāla pieaugumam. Tomēr jāsaprot, ka šai laikā anodstrāva ir ļoti niecīga, salīdzinot ar tiratrona darba režīma anodstrāvu. Kad  $u_g$  sasniedz noteiktu vērtību —  $U'_{g\text{ aiz}}$  — tiratrona aizdedzes potenciālu, sākas jonizācija (tiratrons «aizdegas») un strāva strauji (lēciņveidīgi) pieaug. Tālākās tīkliņa potenciāla maiņas vairs anodstrāvu neiespaido, pat ja  $u_g$  kļūst negatīvs par tīkliņa aizdedzes spriegumu. Tātad pēc tiratrona aizdedzināšanas tīkliņš zaudē spēju vadīt procesus tiratronā.

Tiratrona aizdedzes potenciāla un anodstrāvas lielumi ir atkarīgi no anoda potenciāla lieluma. Par to viegli pārlicināties, aplūkojot 5-5. zīm. liknes  $a$  un  $b$  — ja anoda potenciāls ir lielāks ( $U'_a > U''_a$ ), tiratronam aizdegoties, tīkliņa negatīvais potenciāls arī ir lielāks.

Tiratronam aizdegoties, tā iekšējā pretestība kļūst samērā maza, spriegums starp anodu un katodu strauji krīt. Līdz ar to anodstrāvas lielumu šai laikā praktiski nosaka tikai ārējais ierobežojošais rezistors (slodzes rezistors). Taču šai laikā parādās arī tiratrona tīkliņstrāva  $i_g$ , ko rada pozitīvie joni, nonākot uz tīkliņa. Šīs tīkliņstrāvas var sasniegt ievērojamas vērtības, tādēļ tīkliņķēdē ieslēdz rezistoru ar pretestību  $10^3$ — $10^5 \Omega$ . Arī tīkliņstrāvu  $i_g$  maiņas atkarībā no  $u_g$  attēlotas 5-5. zīm.

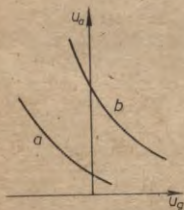
Kamēr tiratrons nav aizdedzināts, tā tīkliņa potenciāla maiņa iespaido anodstrāvu daudz stiprāk nekā vakuuma triodēs. Tas notiek tādēļ, ka tiratronā tīkliņa potenciāls maina ne vien elektronu plūsmas lielumu, bet arī caurējošo pozitīvo jonu skaitu, kas rodas telpā starp anodu un tīkliņu. Šie pozitīvie joni cauri tīkliņa spraugām nonāk telpā pie katoda un daļēji neitralizē negatīvo elektronu telpas lādiņu.

Tiratronam aizdegoties, pozitīvo jonu skaits strauji pieaug. Ap tīkliņa virsmu rodas pozitīvo jonu mākonis, kas neitralizē tīkliņa negatīvo lauku. Elektroni sāk brīvi plūst cauri tīkliņam — anodstrāva lēciņveidā palielinās. Pozitīvie joni, kas atrodas pie tīkliņa, nepārtraukti neitralizējas ar elektroniem, kas pienāk no tīkliņa ārējās ķēdes. Līdz ar to rodas tīkliņstrāva. Mainot tīkliņa potenciālu, mainās tīkliņstrāvas lielums, bet nemainās anodstrāvas lielums, jo pozitīvo jonu mākonis arvien vēl neitralizē tīkliņa radīto negatīvo lauku.

Tīkliņš savu spēju vadīt anodstrāvu atgūst tikai

noteiktu laika sprīdi pēc tiratrona «nodzēšanas», ko parasti izdara, samazinot anodspriegumu  $u_a$  līdz nullei. Šī laika sprīža lielumu nosaka dejonizācijas procesi, kuru ilgums savukārt atkarīgs no balonā iepildītās gāzes (tvaiku) rakstura, spiediena, blīvuma, kā arī no tīkliņa sprieguma un strāvas lieluma. Dzīvsudraba tvaiku tiratronos šis laika sprīdis ir ap  $10^{-3}$  s, ar ūdeņradi pildītajos tiratronos — ap  $10^{-5}$  s, bet tiratronos ar cēlgāzu pildījumu — vidējs starp abiem minētajiem. Tādēļ dzīvsudraba tvaiku tiratronus var izmantot tikai darbam maiņstrāvu ķēdēs, kur sprieguma frekvence nepārsniedz 1 kHz, bet ar cēlgāzēm pildītus tiratronus — ķēdēs, kur frekvence nepārsniedz 10 kHz.

Tiratronus parasti raksturo ar palaišanas (aizdedzes) raksturlīknēm, kas ļauj spriest par tiratronu lietošanas iespējām. Šīs raksturlīknes parāda sakarību starp anodspriegumu un aizdedzes spriegumu uz tīkliņa (5-6. zīm.). Aizdedzes raksturlīknes uzņem, ja iestāda dažādas  $U_a$  vērtības un katru reizi maina  $u_g$  no lielām negatīvām vērtībām līdz tiratrona aizdedzes potenciālam  $U_{g\text{ atz.}}$  Tiratronam ar retu tīkliņu (disks ar platu spraugu) raksturlīkne atrodas  $u_g$  negatīvu vērtību rajonā (šādu līkni sauc par negatīvu palaišanas raksturlīkni — līkne *a* 5-6. zīm.), bet tiratronam ar biežu tīkliņu —  $u_g$  pozitīvu vērtību rajonā



5-6. zīm. Tiratronu palaišanas (aizdedzes) raksturlīknes:  
*a* — negatīvā; *b* — pozitīvā.

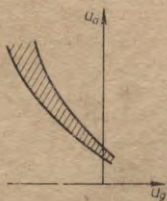
(pozitīva palaišanas raksturlīkne — līkne *b* 5-6. zīm.).

Līkne *b* norāda, ka, ja tīkliņam ir maza caurvere (biežs tīkliņš), tiratrona aizdedzināšanai nepieciešams liels anodspriegums pat tad, ja  $u_g=0$ . Lai aizdegšanās notiktu pie maziem anodspriegumiem, tīkliņam jāpiešķir pat pozitīvs potenciāls. Bet šī tipa tiratroniem parādās lielas tīkliņstrāvas, tādēļ tie sastopami retāk.

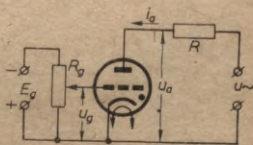
Palaišanas raksturlīknes, kas uzņemtas, darbinot tiratronus statiskajā režīmā (pieslēdzot līdzspriegumus), stipri atšķiras no analogām līknēm, kas uzņemtas, tiratronus darbinot dinamiskā režīmā (pieslēdzot maiņspriegumus, piemēram, taisngriežu shēmās). Atšķirība izskaidrojama ar to, ka, darbinot tiratronu statiskā režīmā, pirms tā aiz-

dedzināšanas tīkliņķēdē nav strāvas un viss spriegums  $u_g$  ir pielikts starp tīkliņu un katodu. Darbinot tiratronu dinamiskā režīmā, tīkliņķēdē pirms tā aizdedzināšanas plūst t. s. pirmsizlādes strāva, kas tiratrona iekšienē plūst no katoda uz tīkliņu. Pirmsizlādes strāva rodas tāpēc, ka, tiratronam nodzīstot, zināmu laika sprīdi norisinās dejonizācijas procesi. Šai laika sprīdi daļa pozitīvo jonu turpina nonākt negatīvi lādētajā tīkliņā un rada strāvu tā ķēdē. Pirmsizlādes strāvu rada arī tīkliņa termoelektronu emisija, ko izraisa tīkliņa sakaršana tīkliņstrāvas iespaidā, kā arī sakarsētā anoda starojums.

Dejonizācijas un tīkliņķēdes termoelektroniskās strāvas (pirmsizlādes strāvas) lielumu iespaido tiratrona slodzes strāva, ārējās tīkliņķēdes pretestība, gāzes vai tvaiku blīvums balonā un pievadītā sprieguma frekvence. Līdz ar to atkarībā no tiratrona darba režīma palaišanas raksturlikne var zināmās robežas pārvietoties. Jo lielākas minēto parametru vērtības, jo vairāk palaišanas raksturlikne nobīdās negatīvu tīkliņspriegumu rajonā. Raksturlikņu galējie stāvokļi nosaka palaišanas joslu, kurā tad arī atrodas iespējamie tiratrona aizdedzināšanas režīmi (5-7. zīm.).



5-7. zīm. Tiratrona palaišanas josla.



5-8. zīm. Tiratrons regulējamā taisngriezī.

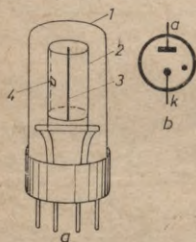
Tiratronus plaši lieto taisngriežu iekārtās, jo tie ļauj regulēt iztaisnotās strāvas stiprumu. Šāda regulējama tiratrona strāvas taisngrieža slēgums parādīts 5-8. zīm. Iztaisnotās strāvas stiprums ir atkarīgs no tiratrona tīkliņa negatīvā potenciāla  $u_g$  lieluma ( $u_g$  iegūst no līdzsprieguma  $E_g$  un maina ar potenciometru  $R_g$ ). Iztaisnotās strāvas stipruma regulēšanas iespēja ir ļabi izprotama,

ja aplūko tiratrona anoda-tikliņa raksturliknes (5-5. zīm.). Jo negatīvāks ir tiratrona tikliņa potenciāls  $u_g$ , jo augstāka anoda potenciāla momentānā vērtība  $u_a$  vajadzīga tiratrona aizdedzināšanai ( $U'_a > U''_a$ , bet  $-U''_{g\text{ aiz}} > -U'_{g\text{ aiz}}$ ). Strāva  $i_a$  cauri tiratronam sāk plūst tikai pēc tam, kad tiratrons aizdedzies. Tāpēc, jo lielāka ir anoda maiņsprieguma pozitīvā pusperioda momentānā vērtība  $u_a$ , tiratronam aizdegoties (jo negatīvāks ir tikliņa potenciāls), jo vēlāk parādās iztaisnotā strāva un jo mazāka kļūst tās vidējā vērtība perioda laikā.

#### 5-4. Patstāvīgas izlādes jonu ierīces

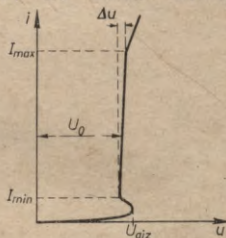
**Stabilitroni.** Par stabilitronu sauc gāzu izlādes ierīci (ar auksto katodu), kas uztur nemainīgu izejas spriegumu līdzstrāvas ķēdē, mainoties tās ieejas sprieguma vai slozdes strāvas lielumam. Pēc gāzu izlādes veida stabilitronus iedala mirdzizlādes un koronās izlādes stabilitronos.

Divelektrodu stabilitrons sastāv no stikla balona



5-9. zīm. Mirdzizlādes stabilitrons:

*a* — uzbūve: 1 — stikla balons, 2 — cilindrisks katods, 3 — anods, 4 — iedeglis; *b* — apzīmējums elektriskajos slēgumos.



5-10. zīm. Stabilitrona voltampēru raksturlikne.

(5-9. zīm.), kas piepildīts ar inerto gāzu maisījumu un kurā atrodas cilindrisks katods un stienveida anods, ko novieto katoda vidū. Katodu izgatavo no niķeļa vai tērauda, retāk — no molibdena, tā iekšējo virsmu aktivizē ar cēziju, bāriju vai retajiem metāliem. Anodu izgatavo

no taisnas niķeļa stieples. Katoda iekšpusē piemetināts niķeļa stieples gabals — t. s. iedeglis. Attālums starp iedegļa galu un anodu ir ļoti mazs, kas atvieglo izlādes aizdegšanos ierīcē. Inerto gāzu spiediens balonā sasniedz dažus desmitus mm Hg.

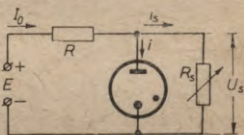
Pieslēdzot stabilitrona elektrodziem spriegumu, kas lielāks par tā aizdedzes spriegumu, ierīcē parādās mirdzizlāde. Stabilitrona voltampēru raksturlikne attēlota 5-10. zīm. Par darba posmu izmanto raksturliknes daļu, kas tuva vertikālei (starp strāvas  $I_{\min}$  un  $I_{\max}$  vērtībām). Šai posmā pietiekami lielām strāvas izmaiņām atbilst ļoti mazas sprieguma izmaiņas  $\Delta u$ . Tas notiek tādēļ, ka strāvas pieaugums šai gadījumā rodas katoda darba virsmas pieauguma, bet ne strāvas blīvuma palielināšanās dēļ. Jo katoda virsma lielāka, jo garāka ir voltampēru raksturliknes vertikālā daļa. Raksturliknes darba posmā stabilitronam ir samērā zema iekšējā pretestība  $R_1$  (ap 100  $\Omega$ ). Vienlaikus ar iekšējo pretestību stabilitronus vēl raksturo aizdedzes spriegums  $U_{\text{aiz}}$ , stabilizācijas spriegums  $U_0$ , normāla darba režīma minimālā ( $I_{\min}$ ) un maksimālā ( $I_{\max}$ ) strāva.

Lai stabilizētu izejas spriegumu, stabilitronu ieslēdz paralēli slodzes rezistoram  $R_s$ . Starp sprieguma avotu un stabilitronu vienmēr jāieslēdz ierobežojoša pretestība  $R$  (5-11. zīm.). Šāds slēgums ļauj uz slodzes rezistora  $R_s$  uzturēt apmēram konstantu sprieguma kritumu  $U_s$ , kaut arī mainās ieejas sprieguma  $E$  vai arī slodzes strāvas  $i_s$  lielums (mainoties  $R_s$  vērtībai).

Ja, mainoties  $R_s$  vērtībai, slodzes strāva mainās robežās  $I_{s \min} < i_s < I_{s \max}$ , tad darba režīmu stabilitronam ieregulē, mainot  $R_s$  līdz vērtībai, kurai atbilst  $i_s = I_{s \min}$ . Pēc tam piemeklē tādu ierobežojošu rezistora  $R$  pretestību, lai normāla darba režīma strāva cauri stabilitronam būtu maksimāla ( $I_{\max}$ ). Šai gadījumā spriegums uz stabilitrona anoda ir

$$U_0 = U_s = E - R(I_{s \min} + I_{\max}) = E - I_0 R. \quad (5-2)$$

Ja samazina  $R_s$ , tātad palielina  $i_s$  vērtību, tad strāvai



5-11. zīm. Stabilitrona ieslēgšanas shēma.

$I_0 = i_s + i$  vajadzētu palielināties, kas savukārt radītu sprieguma krituma palielināšanos uz pretestības  $R$  un samazinātu spriegumu  $U_0 = U_s$ . Tā kā stabilitrons strādā normālā darba režīmā, tad vismazākā tā anodsprieguma izmaiņa (samazināšanās) izraisa stabilitronam caurplūstošās strāvas izmaiņu (samazināšanos). Tā rezultātā gan kopējā strāva  $I_0$ , gan spriegums uz rezistora  $R$  paliek praktiski nemainīgi. Tātad normālā darba režīmā slodzes un stabilitrona strāvas mainās pretējos virzienos (ja vien  $i \geq I_{\min}$ , t. i., stabilitrons «deg») un  $U_0 = U_s$  ir gandrīz konstants.

Ja  $I_s = \text{const}$  un barošanas sprieguma  $E$  lielums mainās robežās  $E_{\min} < E < E_{\max}$ , tad  $R$  jāizvēlas tāds, lai tad, kad  $E = \frac{1}{2}(E_{\max} + E_{\min})$ , cauri stabilitronam plūstu normāla darba režīma vidējā strāva  $i = \frac{I_{\max} + I_{\min}}{2}$ . Tādā gadījumā

$$U_0 = U_s = E - R \left[ I_s + \frac{1}{2}(I_{\max} + I_{\min}) \right]. \quad (5-3)$$

Ja mainās  $E$ , strāva  $i$  un spriegums uz rezistora  $R$  mainās tā, ka  $U_0 = U_s$  paliek praktiski konstants.

Rūpnīcās ražo mirdzizlādes stabilitronus, kuru stabilizētie spriegumi nepārsniedz 150 V. Ja jāstabilizē augstāks spriegums, tad šādus stabilitronus slēdz virknē vai arī lieto koronās izlādes stabilitronus.

Koronas izlāde ir īpašs gāzu izlādes veids. Tā rodas pie palielināta gāzes spiediena (no dažām desmitdaļām mm Hg līdz spiedienam, kas pārsniedz atmosfēras spiedienu), ja viena vai abu stabilitrona elektrodu tuvumā ir stipri nehomogēns elektriskais lauks. Šāds nehomogēns elektriskais lauks var rasties koaksiālā cilindriskā elektrodu sistēmā.

Pieslēdzot elektrodziem spriegumu, gāzes slānī pie mazākā liekuma rādiusa elektroda rodas ļoti intensīvs nehomogēns elektriskais lauks, kas ierosina un jonizē gāzes atomus. Parādās šī gāzes slāņa mirdzums, ko rada vienlaicīgie rekombinācijas procesi un elektronu pāreja no ierosinātajiem uz normālajiem enerģētiskajiem līmeņiem. Šo gāzes mirdzumu sauc par koronu. Pārējā starpelektrodu telpa nemirdz, jo elektriskais lauks tajā nav tik intensīvs, lai ierosinātu un jonizētu gāzes atomus.

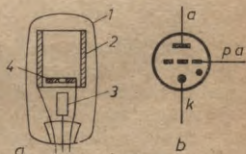
Koronas izlāde ir patstāvīga izlāde, un tai parasti rak-

sturīgi lieli spriegumi uz stabilitrona elektrodiem (kV desmiti) un mazas stabilitronam caurplūstošās strāvas ( $\mu\text{A}$  simti). Pozitīvas koronas gadījumā strāvu pārnes pozitīvie joni, kas rodas gāzes mirdzošajā joslā un cauri tumšajai joslai nonāk uz katoda. Stabilitrona strāvu neierobežo ārējs rezistors, bet gan pati koronas izlāde, jo gāzes tumšās daļas vadītspēja ir maza un plazma te nerodas.

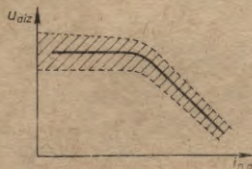
Izvēloties noteiktu stabilitrona gāzes sastāvu, kā arī elektrodu ģeometriskos izmērus, var iegūt samērā lielus voltampēru raksturliķņu vertikālos posmus un līdz ar to koronas izlādi izmantot sprieguma stabilizācijai. Pieaugot caurplūstošajai strāvai, koronas izlāde var pāriet mirdzizlādē.

**Bezkvēles tiratroni.** Tos dažreiz sauc arī par aukstās kvēles tiratroniem. Bezkvēles tiratrons ir mirdzizlādes ierīce, kurā bez anoda un katoda ir vēl arī speciāls elektrodus — palaišanas anods —, ar kuru vada izlādes aizdegšanos. Ierīces shematiskā uzbūve un tās apzīmējums elektriskajos slēgumos attēloti 5-12. zīm.

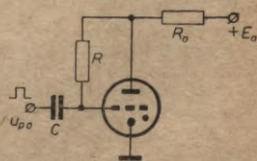
Stikla balons piepildīts ar neona un argona gāzu maisījumu. Starp cilindrisku katodu un stieņveida anodu, kas iekauts stikla caurulītes galā, atrodas gredzenveida palaišanas anods. Anods novietots perpendikulāri katoda cilindra pamatam tādēļ, lai izlāde notiktu tikai no anoda gala. Vispirms izlāde iedegas starp katodu un palaišanas anodu, kam piešķirts pozitīvs potenciāls, bet pēc tam pārsviežas



5-12. zīm. Bezkvēles tiratrons: a — uzbūve: 1 — stikla balons, 2 — katods, 3 — anods, 4 — palaišanas anods; b — apzīmējums elektriskajos slēgumos.



5-13. zīm. Bezkvēles tiratrona palaišanas raksturliķne.



5-14. zīm. Bezkvēles tiratrona ieslēgšanas shēma.

uz anodu, ja tas ir ieguvis pietiekami lielu pozitīvu potenciālu.

Šāda tiratrona palaišanas raksturlikne attēlota 5-13. zīm. Tā rāda aizdedzes anodsprieguma  $u_{\text{aiz}}$  atkarību no palaišanas anoda strāvas  $i_{\text{p.a.}}$ . Iesvītrotā josla atbilst  $u_{\text{aiz}}$  izkļiedei, kas rodas palaišanas izlādes nepastāvīguma dēļ.

5-14. zīm. parādīta bezkvēles tiratrona ieslēgšanas shēma. Palaišanas anodu pievieno anodam caur apmēram 10 MΩ lielu rezistoru  $R$ . Cauri šim rezistoram un palaišanas anoda ķēdei (no barošanas sprieguma  $E_a$  avota) plūst  $\mu\text{A}$  desmitdaļu stipra strāva, kas samazina  $u_{\text{aiz}}$  izkļiedi. Lai tiratronu aizdedzinātu, tā palaišanas anodam cauri kondensatoram  $C$  pievada īslaicīgu pozitīvu sprieguma impulsu.

Bezkvēles tiratronus galvenokārt izmanto mazjaudas releju shēmās automātikā. Praktiski var izmantot 5-14. zīm. parādīto slēgumu, kurā rezistoru  $R_a$  aizvieto ar releja tinumu.

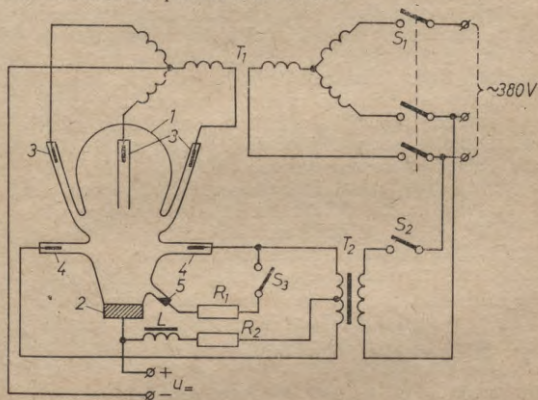
**Gāzpildītās signāllampas.** Mirdzizlādes signāllampas balonā iepildīta inerta gāze un ievietoti divi elektrodi. Pievadot elektrodiem spriegumu, lampā rodas mirdzizlāde, kas izdala gaismas starojuma enerģiju. Atkarībā no gāzes, kas iepildīta lampā, gaismas starojumam ir dažāda krāsa. Tā, piemēram, hēlijs dod dzeltenu starojumu, neons — sārtu, argons — zilganu, Hg tvaiki — zaļi zilganu utt. Gāzpildītās signāllampas galvenokārt ir vizuāli indikatori sprieguma ķēdēs, kas signalizē par sprieguma esamību. Lampu parasti slēdz virknē ar rezistoru, kas ierobežo strāvu līdz noteiktam lielumam, lai mirdzizlāde nepārietu loka izlādē.

**Dzīvsudraba ventiļi.** Par dzīvsudraba ventiļiem sauc jonu ierīces ar dzīvsudraba katodu, kurās rodas patstāvīga loka izlāde dzīvsudraba tvaikos, kas iztvaiko vakuumā no katoda. Dzīvsudraba katods, kam ir praktiski gandrīz neierobežota emisijas spēja, darbojas ļoti ilgi, jo dzīvsudrabs iztvaiko no katoda, kondensējas uz balona sienīnām un notek atpakaļ katodā. Dzīvsudraba ventiļiem ir samērā augsts lietderības koeficients, tie labi iztur pārslodzes, tādēļ tos plaši lieto taisngriežos.

Atkarībā no tā, kā notiek loka iededzināšana ierīcē, izšķir divus dzīvsudraba ventiļu veidus — eksitronus un ignitronus.

Eksitrons sastāv no stikla vai metāla balona (no tā iz-

sūknēts gaiss) ar padziļinājumu apakšējā galā, kurā ieliets dzīvsudrabs. Dzīvsudrabs izveido katodu. Eksitronam darbojoties, dzīvsudrabs iztvaiko no katoda virsmas, tā tvaiku spiediens balonā ir  $(1 \div 1,5) 10^{-3}$  mm Hg. Speciālās caurulēs, kas sakausētas ar balona korpusu, ievietoti viens vai vairāki galvenie darba anodi, kas izgatavoti no tērauda vai grafiņa. Divās īpašās caurulēs, kas piekausētas balona sāniem, ievietoti dežūranodi. Katoda tuvumā iekausēts vēl viens elektrods, ko sauc par iedegli. To izmanto eksitrona palaišanai (iedarbināšanai). Trīsanodu stikla eksitrona uzbūve un tā ieslēgšana trīsfāzu sprieguma taisnošanai parādīta 5-15. zīm.



5-15. zīm. Stikla eksitrons un tā ieslēgšana trīsfāzu sprieguma taisnošanai:

1 — stikla balons, 2 — katods, 3 — caurules ar galvenajiem darba anodiem, 4 — caurules dežūranodiem, 5 — iedeglis.

Galvenajiem darba anodiem pieslēdz taisnojamo spriegumu, ko pievada no trīsfāzu transformatora  $T_1$  sekundārā tinuma (slēgts zvaigznē). Šī tinuma nulles punkts ir iztaisnotā sprieguma negatīvā spāile. Pozitīvo potenciālu noņem no eksitrona katoda.

Dežūranodiem, kas ir ieslēgti divtaktu taisngrieža slēgumā, spriegumu pievada no palīgtransformatora  $T_2$ . Iekārtu iedarbina, noslēdzot slēdžus  $S_2$  un  $S_3$  un sasverot

eksitrona balonu tā, lai dzīvsudrabs savienotu katodu un iedegli. Pēc tam balonu lēni atgriež izejas stāvokli, pār-raujot dzīvsudraba kontaktu starp katodu un iedegli. Pār-rāvuma vietā parādās elektriskais loks, un dzīvsudrabs sāk iztvaikot, piepildot ar tvaikiem visu eksitrona balonu. Loka izlādes gaitā autoelektronu emisijas ietekmē no ka-toda tiek izrauti elektroni, kas dodas uz to dežūranodu, kurš šai brīdī iegūvis pozitīvu potenciālu attiecībā pret katodu (dežūranodi pārmaiņus kļūst pozitīvi katra maiņ-sprieguma perioda laikā). Ja elektroni iegūst pietiekamu enerģiju, tie sāk jonizēt dzīvsudraba tvaiku molekulas un kopā ar iegūtajiem joniem izveido dežūranodu strāvu. Starp dežūranodiem un katodu rodas loka izlāde, tādēļ slēdzi  $S_3$  izslēdz. Loka izlāde pārvietojas no viena dežūr-anoda uz otru atkarībā no tā, kurš dežūranods šai mirklī ir pozitīvs. Taču iespējams ir moments, kad abu dežūr-anodu potenciāli vienādi ar nulli (mainoties potenciālu zīmēm uz tiem). Lai loks acumirklī nenodzistu un nesāk-tos dzīvsudraba tvaiku dejonizācijas process, ķēdē ieslēdz droseli  $L$ , kas iztaisnoto strāvu nobīda fāzē attiecībā pret spriegumu (kavē strāvu attiecībā pret spriegumu). Tādēļ, kaut arī vienam no dežūranodiem spriegums pazeminās līdz nullei, strāva tā ķēdē un līdz ar to arī loka izlāde turpinās, tātad nerodas dejonizācija. Tikko otrs dežūranods iegūst pozitīvu potenciālu, loka izlāde pārmetas uz to.

Ieslēdzot slēdzi  $S_1$ , rodas loka izlāde starp katodu un galvenajiem darba anodiem. Tā pakāpeniski pārvietojas, pārejot no viena anoda uz otru un trešo atkarībā no tā, kuram anodam dotajā momentā ir vispozitīvākais poten-ciāls.

Ja taisngrieža slodzes strāva visu tā darbināšanas laiku paliek konstanta, tad var atslēgt slēdzi  $S_2$  un pār-traukt loka izlādi starp katodu un dežūranodiem. Tas pie-laujams tādēļ, ka loka izlāde starp katodu un galvena-jiem darba anodiem neizdziest (trīsfāzu spriegumam nav iespējams stāvoklis, kad uz visiem galvenajiem darba ano-diem spriegums vienlaikus ir nulle). Ja slodzes strāva taisngrieža darbināšanas laikā mainās (it īpaši, ja tā stipri samazinās), dežūranodu ķēde jāatstāj ieslēgta, jo pretējā gadījumā loka izlāde starp katodu un galvenajiem darba anodiem var nodzist. Lai tas nenotiktu, nepiecie-šams, lai strāva eksitrona balonā būtu 3—4 A.

Laika sprīdī, kad starp attiecīgo galveno darba anodu

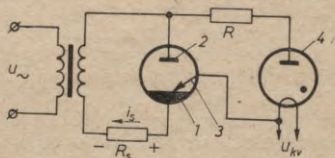
un katodu ir sprostspriegums (anoda potenciāls ir negatīvāks par katoda potenciālu), eksitronā starp šiem elektrodziem plūst neliela (daži desmiti mA) sproststrāva, ko rada joni no blakusesošā galvenā darba anoda loka izlādes un joni, kas palikuši telpā pēc attiecīgā anoda loka izlādes beigšanās. Ja sprostspriegumi ir ļoti lieli, galvenajā anodā var rasties elektronu sekundārā emisija, ko izraisa pozitīvo jonu triecieni pret anodu. Tādā gadījumā sproststrāva var pāriet sprostvirziena loka izlādē, kur elektronus emitē nevis katods, bet galvenais darba anods. Šāda veida loka izlāde parasti sākas, palielinoties dzīvsudraba tvaiku spiedienam eksitrona balonā (temperatūras pieauguma rezultātā), kā arī dzīvsudraba pilieniem vai kāda cita materiāla daļiņām nonākot uz galveno darba anodu virsmām. Reizē ar sprostvirziena loka izlādi var rasties arī loka izlāde starp šo anodu un citiem galvenajiem darba anodiem, kas ir ar pozitīvāku potenciālu. Tas savukārt rada išslēgumu transformatora  $T_1$  sekundārajā tinumā. Tāpēc nepieciešams pēc iespējas radikālāk novērst sprostvirziena loka izlādes rašanās iespējas. To panāk, palielinot anodu un dzīvsudraba tīrības pakāpi, izgatavojot anodus no grafitā un ieviešot eksitrona balonam gaisa vai ūdens piespiedu dzesēšanu.

Sprieguma kritums eksitronā ir samērā mazs un praktiski nav atkarīgs no caurplūstošās strāvas stipruma, tādēļ eksitronus var izmantot taisngriežu iekārtās ar lieliem strāvu stiprumiem (kA) un nelieliem spriegumiem (V simti). Arī lietderības koeficients ir augsts (vairāk par 70%).

Ignitrons ir dzīvsudraba ventilis ar dzīvsudraba katodu un vienu anodu. Tajā vēl ir paligelektrods — iedeglis —, ar kuru iedezina loka izlādi, kā arī regulē iztaisnotā sprieguma lielumu. Šo iedegli izgatavo no pusvadītāja materiāla — silīcijkarbīda (karborunda) vai bora karbīda — stieņa veidā ar konisku galu un iegremdē katoda dzīvsudraba 3—5 mm dziļumā. Iedeglim pievadot 60—80 V pozitīvu potenciālu attiecībā pret katodu, uz iedegļa saskaršanās robežas ar dzīvsudrabu rodas lielas intensitātes elektriskais lauks, kas izraisa autoelektronu emisiju no katoda virsmas. Tūlīt rodas lokveida izlāde starp katodu un iedegli, pie tam loka izlāde no iedegļa gala pārvietojas uz iedegļa augšējiem posmiem, jo to potenciāli ir pozitīvāki. Loka izlādes parādīšanās starp katodu un

iedegli savukārt izraisa loka izlādi starp katodu un anodu, ja dotajā momentā anoda potenciāls ir pozitīvs attiecībā pret katodu.

Ignitrons un tā ieslēgšana sprieguma taisnošanas shēmā attēloti 5-16. zīm. Palaišanas ķēdi, kas sastāv no



5-16. zīm. Ignitrons un tā ieslēgšana sprieguma taisnošanai:

1 — ignitrona katods, 2 — ignitrona anods,  
3 — iedeglis, 4 — gazotrons.

mazjaudas gazotrona un rezistora  $R$ , baro anodspriegums, lai loka aizdedzināšana ignitronā notiktu tikai taisnojamā sprieguma pozitīvā pusperioda laikā. Sākoties pozitīvajam pusperiodam, cauri gazotronam sāk plūst strāva. Kad tā sasniedz dažus ampērus, rodas loka izlāde vispirms starp katodu un iedegli, tad starp katodu un anodu. Cauri ignitronam sāk plūst liela strāva, strauji aug sprieguma kritums uz slodzes rezistora  $R_s$ , tādēļ ignitrona anodspriegums pazeminās līdz 15—20 V un strāva gazotrona un iedegļa ķēdē kļūst ļoti maza. Strāva cauri ignitronam plūst tikmēr, kamēr tā anodspriegums nepazeminās līdz nullei. Katrā nākamā pozitīvā pusperioda laikā process atkārtojas. Iztaisnoto spriegumu noņem no slodzes rezistora  $R_s$ .

Ja gazotrona vietā ieslēdz tiratronu, tad ar to var mainīt ignitrona aizdedzināšanas momentu (regulēt iztaisnoto strāvu), jo rodas iespēja mainīt strāvas plūšanas sākumu cauri iedeglim.

Ignitronos anodu novieto daudz tuvāk katodam nekā eksitronos, jo tajos, kā jau vienanoda ventīļos, nav loka izlādes negatīvā pusperioda laikā. Tādēļ ignitronā šai laikā ir maz jonu un praktiski gandrīz pilnīgi tiek izslēgta sprostvirziena loka rašanās iespēja. Tas stipri samazina ignitronu izmērus, salīdzinot ar eksitroniem.

Ignitronu balonus parasti izgatavo no metāla un stikla sakausējuma vai arī tikai no metāla.

## 6. nodaļa

### FOTOELEKTRISKĀS IERICES

#### 6-1. Vispārīgas ziņas

Par fotoelektriskām ierīcēm sauc tādas ierīces, kas pār-  
vērš gaismas enerģiju elektriskajā. Pēc darbības principa  
fotoelektriskās ierīces iedala ārējā un iekšējā fotoefekta  
ierīcēs. Pirmās bieži sauc par vakuuma fotoelementiem,  
otrās — par pusvadītāju fotoelementiem. Vakuuma foto-  
elementos gaismas ietekmē ierīcē rodas elektronu emisija  
(vai gāzes jonizācija), turpretī pusvadītāju fotoelementos  
gaismas iedarbības rezultātā mainās to vadītspēja vai arī  
inducējas iekšējs EDS.

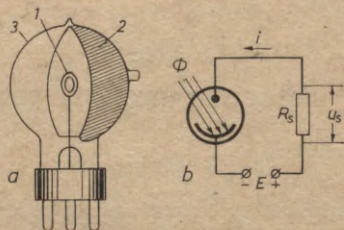
Fotoelektriskās ierīces ļoti plaši lieto visdažādākajās  
zinātnes un tehnikas nozarēs. Tā, piemēram, fotoelektriskā  
ierīce ir neatņemama sastāvdaļa kinoiekārtās, kur to lieto  
skaņas «nolasīšanai» no filmas. Tomēr visplašāk fotoelek-  
triskās ierīces lieto automātikas iekārtās: fotorelejos, vis-  
dažādākajās mēriekārtās, produkcijas skaitītājos, drošības  
tehnikas iekārtās utt.

#### 6-2. Vakuuma fotoelementi

Ir divu tipu vakuuma fotoelementi — elektronu, kuros  
strāvu veido gaismas iespaidā no katoda emitētie elek-  
troni, un jonu, kas pildīti ar inerto gāzi (He, Ne, Ar, Kr  
vai Xe) un kuros strāvu palielina nepatstāvīgā gāzu  
izlāde.

6-1. zīm. a attēlota vakuuma fotoelementa uzbūve.  
Stikla balonā, no kura izsūknēts gaiss, vakuumā vai inertā  
gāzē ievietoti divi elektrodi — anods un katods. Katods  
ir uzputināts uz balona iekšējās sienas, un tā gaismas

jutīgā virsma vērsta uz balona iekšpusi. Katoda izvads parasti iestiprināts tieši stikla balona sienīņā. Anods izveidots niķeļa cilpas vai diska veidā un novietots balona vidū vai arī tā apakšējā daļā. Ja fotoelements paredzēts darbam ar ultravioleto starojumu, balonu vai arī speciālu



6-1. zim. Vakuuma fotoelements un tā ieslēgšana:

*a* — vakuuma fotoelementa uzbūve; *1* — anods, *2* — katods, *3* — balons; *b* — vakuuma fotoelementa ieslēgšanas shēma.

lodziņu tajā izgatavo no kvarca, jo parastais stikls ultravioletos starus stipri absorbē.

Gaismas starojumam ir jāizsit elektroni no katoda. Tādēļ katodus izgatavo no gaismas aktīviem metāliem. Lieto divu veidu katodus: cēzija-skābekļa un cēzija-antimona katodus. Cēzija-skābekļa katods sastāv no balona stikla iekšpusei uzklāta sudraba slāņa, virs kura ir cēzija oksīda slānis (tajā atrodas tīra cēzija un sudraba atomi). Cēzija-antimona katods sastāv no metāliska antimona slāņa balona stikla iekšpusē. Šis slānis pārklāts ar cēzija-antimona kārtu, kurā savukārt atrodas tīra cēzija atomi. Ja vakuuma fotoelementa anodam pieslēdz līdzsprieguma avota pozitīvo potenciālu (6-1. zim. *b*), fotoelementa ķēdē plūst strāva  $i$ , kuras stiprums atkarīgs no gaismas starojuma plūsmas un frekvences. Uz slodzes rezistora  $R_s$  rodas sprieguma kritums  $u_s = iR_s$ .

No katoda izsisto elektronu skaits ir tieši proporcionāls gaismas plūsmai. Tātad fotoemisijas strāva

$$i = k\Phi, \quad (6-1)$$

kur  $k$  — proporcionalitātes koeficients, ko sauc par foto-

elementa integrālo jutību un mēra  $\mu\text{A/lm}$ . Elektronu vakuuma fotoelementiem  $k=20\div 90 \mu\text{A/lm}$ , bet jonu fotoelementiem  $k=150\div 200 \mu\text{A/lm}$ .

Zināms, ka fotokatoda emitētā elektrona maksimālā enerģija ir

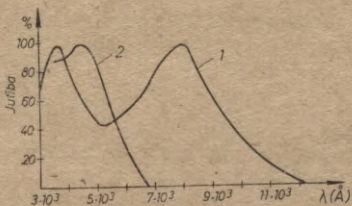
$$\varepsilon_{\max} = h\nu, \quad (6-2)$$

kur  $h$  — Planka konstante,  $\nu$  — starojuma frekvence. Ja starojuma frekvence ir pārāk zema un elektrona saņemtā enerģija ir mazāka par izejas darbu  $e\varphi_0$ , kur  $e$  — elektrona lādiņš,  $\varphi_0$  — katoda potenciāla barjera, tad fotoelektriskā emisija no katoda nenotiek. Ja  $\nu = \nu_0$  un  $e\varphi_0 = h\nu_0$ , tad  $\nu_0$  sauc par fotoefekta sarkano robežu, bet attiecīgo viļņa garumu — par fotoefekta garo viļņu sliksni:

$$\lambda_0 = \frac{1}{\nu_0}. \quad (6-3)$$

Fotoefektu izraisa tikai tāds gaismas starojums, kura viļņa garums ir mazāks par  $\lambda_0$ . Savukārt, jo  $e\varphi_0$  mazāks, jo pie lielāka viļņa garuma sākas fotoelektriskā emisija.

Fotoelementa integrālo jutību nosaka fotokatoda saņemtā summārā gaismas plūsma, kas vispārīgā gadījumā var saturēt frekvenču spektru no ultravioletajiem līdz infrasarkanajiem stariem. Dažādas gaismas frekvences rada dažāda stipruma fotostrāvu, tādēļ fotoelementus raksturo spektrālās jutības raksturlieknes, kas saista fotostrāvas stiprumu ar monohromatiska gaismas starojuma viļņa garumu. Šai raksturlieknei atkarībā no fotokatoda tipa var būt viens vai vairāki maksimumi. 6-2. zīm. redzam cēzija-



6-2. zīm. Fotoelementu spektrālās jutības raksturlieknes:

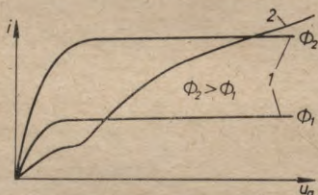
1 — cēzija-skābekļa katodam, 2 — cēzija-antimona katodam.

skābekļa (likne 1) un cēzija-antimona (likne 2) katodu spektrālo jutību raksturliknes.

Fotoelementa dažādo jutību pret dažādiem gaismas viļņu garumiem var izskaidrot ar to, ka katoda virsējais slānis, kas gaismas iedarbības rezultātā emitē elektronus, dažādas frekvences svārstību enerģiju absorbē ar dažādu intensitāti. No 6-2. zīm. attēlotajām raksturliknēm izriet, ka cēzija-antimona katoda fotoelementus izdevīgāk lietot, ja izmanto redzamās gaismas plūsmu [ $\lambda = (4 \div 8) 10^3 \text{ \AA}$ ], bet cēzija-skābekļa fotoelementus, ja izmanto infrasarkanās gaismas plūsmu ( $\lambda > 8 \cdot 10^3 \text{ \AA}$ ).

Vakuuma fotoelementus raksturo arī ar voltampēru raksturliķņu saimēm, kas rāda fotostrāvas  $i$  atkarību no fotoelementa anodam pieslēgtā potenciāla lieluma:  $i = f(u_a)$  pie dažādām konstantām gaismas plūsmām ( $\Phi = \text{const}$ ).

6-3. zīm. parādītas elektronu (liknes 1, pie tam  $\Phi_2 >$



6-3. zīm. Fotoelementu voltampēru raksturliķnes:

1 — elektronu vakuuma fotoelementam,  
2 — jonu vakuuma fotoelementam.

$> \Phi_1$ ) un jonu fotoelementa (likne 2) voltampēru raksturliķnes. Elektronu fotoelementiem ir labi izteikts sātstrāvu rajons, kas sākas tad, kad anods savāc visus katoda emitētos elektronus. Sātstrāva ir atkarīga no gaismas plūsmas — jo tā lielāka, jo sātstrāva lielāka un iestājas, sasniedzot lielākas  $u_a$  vērtības.

Jonu fotoelementiem nav izteikta sātstrāvu rajona. Neliels liķnes horizontāls posms novērojams tad, ja  $u_a$  atbilst fotokatoda emisijas strāvai, bet, palielinot anodspriegumu, sākas gāzes jonizācija — nepatstāvīgā izlāde — un  $i$  strauji aug. Ja  $u_a$  palielina vēl tālāk, tad, sasniedzot aizdedzes spriegumu, ierīcē rodas patstāvīgā mirdzizlāde, kas bojā katodu un tādēļ nav pieļaujama.

Jonu fotoelementu integrālā jutība samazinās, ja gaismas plūsmas maiņas frekvences ir lielas ( $f > 1$  kHz). Izpaužas jonizācijas inerce. Tas ir ievērojams jonu fotoelementu trūkums, kas ierobežo to izmantošanu.

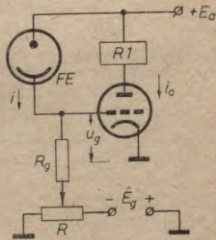
Fotoelementiem ir raksturīga t. s. nogurdināmība, kas izpaužas kā jutības samazināšanās, ja uz fotoelementu ilgstoši iedarbojas gaismas plūsma un fotoelements atrodas zem sprieguma. Cēzija-skābekļa fotoelementiem tas sevišķi izpaužas pirmajās 100—150 darba stundās. Pēc noteikta bezdarbības laika fotoelementa jutība gandrīz pilnīgi atjaunojas. Pārāk intensīvas gaismas plūsmas iedarbība uz fotokatodu var izraisīt tā neatgriezenisku jutības samazināšanos un fotokatoda sabrukumu.

Fotoelementus raksturo arī ar t. s. tumsas strāvu. Tā ir strāva, kas plūst cauri fotoelementam, ja tas ir pilnīgi aptumšots, un var būt  $10^{-3}$ — $10^{-1}$   $\mu$ A. Tumsas strāva rodas katoda termoelektronu emisijas un starpelektrodu noplūdes dēļ, un ar to ir jāreķinās, strādājot ar mazām gaismas plūsmām. Arī ārējās vides stipras temperatūras izmaiņas samazina fotoelementu jutību.

Vakuuma fotoelementus ļoti plaši izmanto rūpniecībā, zinātnē un tehnikā, dažādās automātikas shēmās, mēriekārtās utt.

Ļoti bieži sastopams automātikas elements ir fotorelejs ar vakuuma fotoelementu. Tā shēma attēlota 6-4. zīm. Fotoelementu neapgaismojot, ar potenciometru  $R$  ieregulē tādu negatīvu triodes tīkliņa potenciālu  $u_g$ , lai lampa būtu tik tikko aizvērta. Tad strāva caur elektromagnētiskā releja  $RI$  tinumu neplūst ( $i_a = 0$ ), relejs ir normālā stāvoklī (atvērts). Ja fotoelementu apgaismo, sāk plūst fotostrāva  $i$ , kas uz rezistora  $R_g$  rada pozitīvu spriegumu attiecībā pret lampas tīkliņu un atver lampu. Parādās pietiekami liela anodstrāva  $i_a$ , kas liek nostrādāt elektromagnētiskajam relejam, bet tas ar saviem kontaktiem iedarbojas uz vadāmo ķēdi.

Dažreiz, lai palielinātu fotoreleja jutību (lai tas nostrādātu pie mazākas gaismas plūsmas), fotoelementa tumsas



6-4. zīm. Viena no fotoreleju shēmām.

stāvokli triodi neaizver, bet gan tās tiklīgam ieregulē tādu negatīvu potenciālu  $u_g$ , lai lampas anodstrāva būtu mazāka par elektromagnētiskā releja pievilksšanas strāvu ( $i_a < I_p$ ). Ja fotoelements tiek apgaismots, lampas anodstrāva strauji pieaug. Kad  $i_a = I_p$ , relejs nostrādā.

### 6-3. Fotoelektronu daudzkārsotāji

Fotoelektronu daudzkārsotāji pieder pie vakuuma fotoelementiem. Arī tajos izmanto ārējo fotoefektu (elektronu emisiju). Ja parastajos vakuuma fotoelementos fotoelektriskā strāva ir ļoti maza un to integrālā jutība nepārsniedz  $k = 100 \mu\text{A/lm}$ , tad fotoelektronu daudzkārsotājiem integrālā jutība sniedzas līdz  $10^8 \mu\text{A/lm}$ .

Izšķir vienkāpes un daudzpakāpju fotoelektronu daudzkārsotājus. Vienkāršākā vienkāpes daudzkārsotāja shematiskā uzbūve un ieslēgšanas shēma redzama 6-5. zīm. Stikla balonā vakuumā novietots fotokatods, starpemiters un tīklveida anods. Uz fotokatodu iedarbojas gaismas plūsma  $\Phi$ . No fotokatoda izsistie elektroni dodas uz tīklveida anodu. Lielākā daļa elektronu izskrien anodam cauri un, triecoties pret starpemitēru, izsīt no tā sekundāros elektronus. Tie dodas uz anodu un kopā ar daļu no primārajiem elektroniem izveido anodkēdē (tajā ieslēgts slodzes rezistors  $R_s$ ) strāvu, kas ir ievērojami lielāka par fotokatoda strāvu. Šādu daudzkārsotāju jutība 7–10 reizes pārsniedz parasto vakuuma fotoelementu jutību.

6-5. zīm. Vienkāpes fotoelektronu daudzkārsotājs:

- 1 — fotokatods,
- 2 — starpmiters,
- 3 — anods, 4 — stikla balons.

Daudzpakāpju fotoelektronu daudzkārsotāja shematiskā uzbūve un ieslēgšanas shēma redzama 6-6. zīm. a. Vakuuma balona galos novietots fotokatods un anods, bet starp tiem atrodas virkne starpmitēru. Starp blakusesošajiem elektrodiem ir potenciālu starpība, pie tam katram nākošajam elektrodam ir pozitīvāks potenciāls nekā iepriekšējam. No fotokatoda gaismas plūsmas izsistie elektroni ar lielu ātrumu (to nosaka  $E_1$ ) triecas pret pirmo starpmitēru un izsīt no tā sekundāros elektronus. Tie vir-

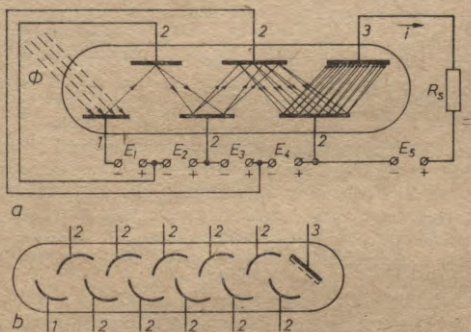
zās uz otro starpemiteru un sāvukārt rada tajā sekundāro emisiju utt., līdz no pēdējā starpemitera sekundārie elektroni nonāk anodā un rada fotostrāvu.

Zināms, ka sekundārajā elektronu emisijā elektrons, kas triecas pret starpemiteru, izsīt no tā vairākus (3—10) elektronus. Ja viena elektrona no starpemitera izsisto sekundāro elektronu skaitu apzīmē ar  $\eta$  un fotokatoda strāvu ar  $i_0$ , tad strāva, kas plūst starp pirmo un otro starpemiteru, ir  $i_1 = \eta i_0$ , starp otro un trešo  $i_2 = i_1 \eta = i_0 \eta^2$ , bet starp pēdējo ( $n$ ) starpemiteru un anodu

$$i = i_n = i_0 \eta^n, \quad (6-4)$$

kur  $n$  — starpemiteru skaits daudzkārsotājā.

Lielumu  $K = \eta^n$  sauc par daudzkārsotāja pastiprinā-



6-6. zīm. Daudzpakāpju fotoelektronu daudzkārsotāji:

*a* — shematiskā uzbūve un ieslēgšanas shēma; *b* — kausveida starpemiteru fotoelektronu daudzkārsotājs; 1 — fotokatods, 2 — starpemiteri; 3 — anods.

juma koeficientu. Ja, piemēram,  $\eta = 10$  un  $n = 10$ , tad  $K = 10^{10}$ . Praktiski fotoelektronu daudzkārsotājos iespējams iegūt tikai  $K \approx 10^6$ . Tas notiek tādēļ, ka nevar izveidot visus starpemiterus ar vienādiem  $\eta$  (dažiem starpemiteriem tas ir zemāks) un nav arī iespējams novirzīt visus elektronus no viena starpemitera uz blakusesošo. Daļa elektronu novirzās uz citiem starpemiteriem, kam ir augstāks pozitīvais potenciāls nekā blakusesošajam. Šī

elektronu izkliede arī samazina daudzkārstāja pastiprinājumu.

Lai samazinātu elektronu izkliedi, fotoelektronu daudzkārstājos bieži lieto fokusejošus elektrodus. Fotokatodu un starpemiterus šādos daudzkārstājos izveido kausu veidā un novieto tā, lai to radītie elektriskie lauki nodrošinātu pēc iespējas maksimālu sekundāro elektronu pāreju uz blakusesošo elektrodu. Šāda daudzkārstāja shematiskā uzbūve attēlota 6-6. zīm. b.

Fotoelektronu daudzkārstāju fotokatoda integrālā jutība  $k$  ir apmēram tāda pati kā vakuuma elektronu fotoelementos. Visa daudzkārstāja integrālo jutību  $\delta$  var izteikt šādi:

$$\delta = kK. \quad (6-5)$$

Praktiski  $\delta = 1 \div 100$  A/lm. Tomēr jāsaprot, ka daudzkārstāja anodstrāva praktiski nepārsniedz mA desmitus, jo stiprāku strāvu gadījumā sabruktu pēdējie starpemiteri.  $K$  un līdz ar to arī  $\delta$  ir atkarīgi no daudzkārstāja elektrodziem pieslēgtā sprieguma  $E_n$  — jo tas lielāks, jo lielāki  $K$  un  $\delta$ .

Pie daudzkārstāju trūkumiem pieder jutības samazināšanās laikā; to sauc par daudzkārstāja novecošanos. Tā ir sevišķi intensīva daudzkārstāja darbināšanas sākuma mēnešos, kad jutība samazinās par 20—25%. Iemesls — balonā pārpalikušo gāzu iedarbība uz fotokatoda un starpemiteru emisijas spēju. Šis process ir neatgriezenisks.

Dauzkārstāju jutība var samazināties arī to ilgstošas darbības procesā pēdējo starpemiteru nogurdināmības dēļ, kas rodas stipru strāvu nepārtrauktas iedarbības rezultātā. Šo jutības samazināšanos var likvidēt, ja daudzkārstāju kādu laiku patur tumsā.

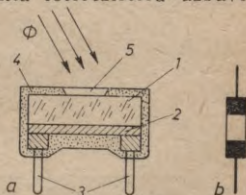
Arī daudzkārstājiem eksistē tumsas strāva, ko mēra anodkēdē, kad fotokatods aptumšots. Šo strāvu rada fotokatoda un starpemiteru termoelektronu emisija, starpelektrodu noplūdes strāvas, autoelektronu emisija u. c. Tumsas strāvas lielumu nosaka kā starpelektrodu spriegums, tā arī daudzkārstāja temperatūra.

Fotoelektronu daudzkārstājus var izmantot tādiem pašiem nolūkiem kā vakuuma fotoelementus, pie tam daudz mazākām gaismas plūsmām. Nav vajadzīgi arī lieli slozdes spriegumu pastiprinājumi.

## 6-4. Pusvadītāju fotoelementi

Izšķir divu veidu pusvadītāju fotoelementus — fotoresistorus un ventiļa tipa fotoelementus. Pirmajos gaismas iedarbības rezultātā mainās to elektriskā vadītspēja, bet otrajos rodas iekšējs EDS starp dažāda tipa ( $p$  un  $n$ ) pusvadītāju slāņiem. Ventiļa tipa fotoelementi iedalās fotodiodēs un fototriodēs (fototranzistoros).

**Fotorezistori.** 6-7. zīm. parādīta fotorezistora uzbūve un shematiskais apzīmējums. Uz stikla vai kvarca plāksnītes atrodas pusvadītāja slānis ar kontaktiem. Pusvadītāja virsmu pārklāj ar plānu caurspīdīgas lakas kārtiņu, lai pasargātos no mitruma iedarbības. Visu konstrukciju ievieto plastmasas aptverē, kurā ir izveidota gaismas sprauga.



6-7. zīm. Fotorezistors:

*a* — uzbūve: 1 — stikla plāksnīte, 2 — pusvadītājs, 3 — kontakti ar izvadu spaiļiem, 4 — plastmasas aptvere, 5 — gaismas sprauga; *b* — shematiskais apzīmējums.

Ja pusvadītājam piemīt  $n$  tipa vadītspēja, tad gaismas enerģijas iedarbības rezultātā elektroni ieiet vadītspējas zonā jo lielākā skaitā, jo intensīvāka ir gaismas plūsma. Elektroni no pusvadītāja ārā neiziet, bet nekārtīgi kļīst starpatomu telpā. Ja šāda pusvadītāja galiem piešķir potenciālu starpību, pusvadītājā plūstošās strāvas stiprums ir atkarīgs no tā apgaismojuma. Analoga parādība novērojama arī  $p$  tipa pusvadītājiem. Fotorezistoram nav ventiļa īpašību, tādēļ ārējā EDS avota pieslēgšanas polaritāte nav svarīga.

Par pusvadītāju fotorezistoros izmanto kadmija, bismuta un svina sulfīdus ( $CdS$ ,  $Bi_2S_3$  un  $PbS$ ), kā arī kadmija selenīdu ( $CdSe$ ). Šiem materiāliem maksimālā spektrālā jutība atrodas dažādās gaismas spektra daļās ( $PbS$  — infrasarkanajā,  $Bi_2S_3$  un  $CdS$  — spektra redzamajā daļā). Fotorezistoriem sakarība starp fotostrāvu  $i_f$  un gaismas plūsmu  $\Phi$  ir nelineāra. Lielākajai daļai fotorezistoru, ja spriegums  $U = \text{const}$ , nelineārā sakarība izsaka šādi:

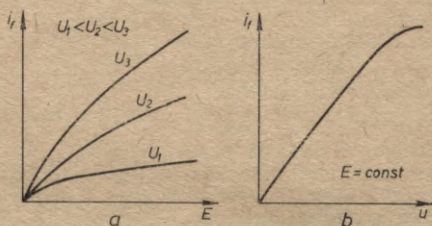
$$i_f = b\Phi^n, \quad (6-6)$$

kur  $b$  un  $n$  ( $0 < n < 1$ ) — koeficienti, kas atkarīgi no  $U$

un fotorezistora tipa. Šis izteiksmes grafiskajos attēlos gaismas plūsmas  $\Phi$  vietā izdevīgāk lietot apgaismojumu

$$E = \frac{\Phi}{S}, \quad (6-7)$$

kur  $S$  — fotorezistora pusvadītāja apgaismotais laukums.  $E$  mēra luksos (lx). 6-8. zīm. *a* parādīts šo līkņu raksturs.



6-8. zīm. *a*) Fotorezistoru apgaismojuma raksturlienes. *b*) Fotorezistoru voltampēru raksturliene.

Redzams, ka pie lielākiem spriegumiem fotostrāva ir lielāka. Fotorezistoru voltampēru raksturlienes (6-8. zīm. *b*) lielākā daļa ir lineāra.

Par fotorezistora integrālo jutību  $k$  sauc fotostrāvas  $i_f$  un gaismas plūsmas  $\Phi$  attiecību

$$k = \frac{i_f}{\Phi}, \quad (6-8)$$

ko mēra  $\mu\text{A}/\text{lm}$ .

Par fotorezistora īpatnējo jutību sauc integrālās jutības attiecību pret nominālo spriegumu:

$$\sigma = \frac{k}{U} = \frac{i_f}{\Phi U} \quad (6-9)$$

un to mēra  $\mu\text{A}/\text{lm} \cdot \text{V}$ .

Nelineārajā voltampēru raksturlienes daļā īpatnējo jutību izsaka šādi:

$$\sigma = \frac{dk}{du} = \frac{di_f}{\Phi du}. \quad (6-10)$$

Neapgaismotam fotorezistoram ir maksimāla pretestība  $R_t$ , bet cauri tam plūst tumsas strāva

$$i_t = \frac{u}{R_t}, \quad (6-11)$$

kur  $u$  — potenciālu starpība uz fotorezistora.

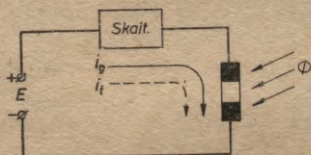
Fotorezistoru apgaismojot, tā pretestība samazinās un strāva pieaug. Apgaismota fotorezistora pretestību sauc par tā gaismas pretestību  $R_g$ , bet strāvu ķēdē — par gaismas strāvu:

$$i_g = \frac{u}{R_g}. \quad (6-12)$$

Līdz ar to fotostrāva

$$i_t = i_g - i_t = u \left( \frac{1}{R_g} - \frac{1}{R_t} \right). \quad (6-13)$$

Salīdzinot ar vakuuma fotoelementiem, fotorezistoriem ir lielāka integrālā jutība, mazāki izmēri un mazāk izteikta nogurdināmība, tādēļ tos plaši lieto, daļēji atvietojojot vakuuma fotoelementus. Piemēram, 6-9. zīm. attēlota



6-9. zīm. Skaitītāja shēma ar fotorezistoru.

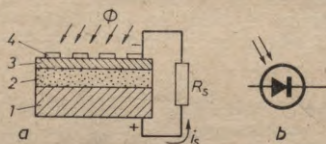
vienkāršākā priekšmetu skaitīšanas shēma ar fotorezistoru. Ja fotorezistors apgaismots (starp fotorezistoru un gaismas avotu neatrodas priekšmets), ķēdē plūst gaismas strāva  $i_g$ . Shēmas parametrus izvēlas tā, lai  $i_g > I_{sk}$  ( $I_{sk}$  — skaitītāja nostrādāšanas strāva). Turpretī, ja fotorezistoru aizsedz priekšmets, skaitītāja ķēdē plūst tumsas strāva  $i_t$  un skaitītāja enkurs atkrit, jo  $i_t \ll i_g$  [parasti  $R_t = (30 \div 50) R_g$ ].

Pie fotorezistoru trūkumiem pieskaitāma to inerce un  $i_t$  atkarība no ārējās temperatūras.

Fotorezistorus, tāpat kā vakuuma fotoelementus, var izmantot visdažādākajās automātiskās regulēšanas un mēriekārtu shēmās.

**Fotodiodes.** Fotodiodei izveido no divu dažāda tipa ( $p$  un  $n$ ) pusvadītāju kārtām. Starp abiem pusvadītājiem izveidojas elektrisks pārejas slānis ar kontaktpotenciālu starpību (sk. 1. nodaļu).

Ja pusvadītājus pārejas slāņa tuvumā apgaismo, gaismas enerģijas ietekmē sākas kristāla atomu jonizācija. Parādās lādiņnesēji — caurumi un elektroni. Kontaktpotenciāla iedarbības rezultātā caurumi pārvietojas uz  $p$  tipa pusvadītāja slāni, bet elektroni — uz  $n$  tipa pusvadītāja slāni. Katrā no slāņiem rodas liela lādiņu vairākumnesēju koncentrācija, tādēļ starp šiem slāņiem veidojas potenciālu starpība, kas ir it kā EDS avots. Pievienojot slāņiem ārēju ķēdi, tajā plūst strāva. Šai gadījumā fotodiodei darbina fotoģenerācijas režīmā, t. i., fotodiode gaismas enerģiju pārveido elektriskajā. 6-10. zīm. *a* parādīta fotodiodes she-

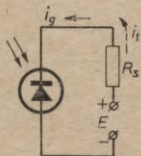


6-10. zīm. Fotodiodes uzbūve, apzīmējums un ieslēgšana fotoģeneratora režīmā:

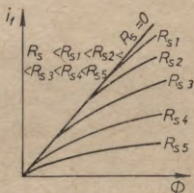
- a* — shematiskā uzbūve un ieslēgšana;
- 1 — metālisks elektrods, 2 — pusvadītājs,
- 3 — metāla slānītis, 4 — kontakta elektrods;
- b* — shematiskais apzīmējums.

matiskā uzbūve un ieslēgšana fotoģenerācijas režīmā. Uz 1—2 mm bieza metāliska elektroda uzklāj plānu slāni (ap 0,1 mm) pusvadītāja. Tam savukārt uztaicē vai uzputina ļoti plānu puscaurspīdīgu metāla slānīti, uz kura novieto kontakta elektrodu. Elektriskais pārejas (ventiļa) slānis rodas starp pusvadītāju un metāla slānīti. Pārejas slāni apgaismojot, cauri fotodiodes slodzes rezistoram  $R_s$  plūst strāva  $i_s$ . Par pusvadītāju elementiem fotodiodes izmanto silīciju, germāniju, selēnu, sudraba sulfīdu un tallija sulfīdu.

Fotodiodi plaši izmanto arī fōtopārveidošanas režīmā, kad fotodiodes ārējā ķēdē ieslēdz atsevišķu ārēju barošanas avotu. Tā pozitīvo elektrodu pieslēdz  $n$  tipa pusvadītāja slānim, bet negatīvo —  $p$  tipa pusvadītāja slānim. Tā kā barošanas avots ieslēgts sprostvirzienā, cauri neapgaismotai fotodiodei plūst maza tumsas strāva, kas atbilst diodes sproststrāvai. Fotodiodi apgaismojot, cauri  $n-p$  pārejai sāk pārvietoties daudz lādiņu mazākumnesēju un līdz ar to stipri pieaug arī strāva fotodiodes ārējā ķēdē. Tās lielumu nosaka ārējā barošanas avota spriegums un gaismas plūsma. Fotodiodes, kas paredzētas darbam fōtopārveidošanas režīmā, par pusvadītājiem izmanto praktiski tikai germāniju un silīciju. Ši režīma slēgums attēlots 6-11. zīm.



6-11. zīm. Fotodiode fōtopārveidošanas režīma slēgumā.



6-12. zīm. Selēna fotodiodes strāvas atkarība no apgaismojuma pie dažādiem  $R_s$ .

Sprieguma starpība  $\Delta u_s$ , kas rodas uz slodzes rezistora  $R_s$ , ja fotodiodi tumsas stāvoklī sāk pēkšņi apgaismot, ir

$$\Delta u_s = (i_g - i_t) R_s, \quad (6-14)$$

kur  $i_g$  — fotodiodes strāva apgaismotā stāvoklī,  $i_t$  — fotodiodes strāva tumsas stāvoklī.

Selēna fotodiode spektrālā raksturliktne praktiski aptver visu spektra redzamo daļu. Tās maksimums atbilst zaļajai un zilajai gaismai. Selēna fotodiodes integrālā jutība, ko izteic kā fotostrāvas attiecību pret gaismas plūsmu diodei ar īsi slēgtiem elektrodiem ( $R_s = 0$ ), ir  $k = 400 \div 600 \mu\text{A/lm}$ . Ieslēdzot slodzi ( $R_s \neq 0$ ),  $k$  samazinās, ko labi parāda 6-12. zīm. attēlotās liknes. Likne ir lineāra

tikai tad, ja  $R_s=0$ . Pieaugot  $R_s$  vērtībai, liknes arvien vairāk izliecas: sasniedzot lielas  $R_s$  vērtības, liknēm ir stipri izteikts piesātinājuma rajons.

Selēna diodes fotoģenerācijas režīmā plaši lieto objektīvajā fotometrijā, piemēram, fotoekspozimetros.

Selēna fotodiodēs fotoģenerācijas EDS rada pozitīvi uzlādēts pusvadītājs un negatīvi uzlādēts metāla slānis, bet tallija sulfīda fotodiodēs EDS polaritāte var būt gan šāda, gan arī pretēja — viss atkarīgs no tallija sulfīda apstrādes. Iegūto fotoefektu sauc attiecīgi par normālu vai pozitīvu.

Tallija sulfīda diodēm integrālā jutība paliek konstanta ne tikai tad, ja  $R_s=0$ , bet arī tad, ja  $R_s \leq 100 \Omega$ . Normālā fotoefekta diodēm integrālā jutība ir ap  $100 \mu\text{A}/\text{lm}$ , bet pozitīvā fotoefekta diodēm — ap  $11 \text{mA}/\text{lm}$ .

Normāla fotoefekta tallija sulfīda fotodiodēm spektrālā raksturlikne ir apmēram tāda pati kā selēna fotodiodēm, bet pozitīvā fotoefekta diodēm tā aptver ne tikai visu spektra redzamo daļu, bet iestiepjas ļoti tālu spektra infrasarkanajā daļā.

Tallija sulfīda fotodiodes ir pietiekami jutīgas plašā frekvenču rajonā, tāpēc tās plaši izmanto skaņu pierakstu vizuālās atskaņošanas aparātūrā.

Silīcija fotodiode izgatavošanas tehnoloģija ir ļoti sarežģīta, toties tām ir daudz lielāks lietderības koeficients nekā visu citu tipu fotodiodēm. Silīcija fotodiodes var savienot gan paralēli, gan virknē, izveidojot fotoelektriskās baterijas.

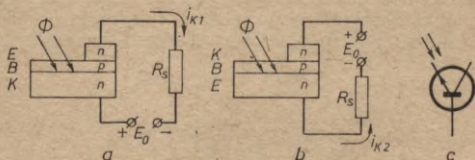
So fotodiode spektrālā raksturlikne aptver visu spektra redzamo un infrasarkanā daļu, tāpēc Si fotodiodes plaši lieto saules bateriju fotoģeneratoros, kur no katra aktīvās virsmas  $\text{cm}^2$  iegūst  $10\text{--}12 \text{mW}$  jaudu. Šāda tipa baterijas ir neatņemama sastāvdaļa gandrīz jebkurā mākslīgajā Zemes, Mēness vai Saules pavadoņi, kā arī starpplanētu kosmiskajos kuģos, kur tās ir galvenie elektroenerģijas avoti.

Germānija fotodiode spektrālā raksturlikne ietver spektra garākos redzamos viļņus un spektra infrasarkanā daļu (liknes maksimums). To integrālā jutība ir ap  $30 \text{mA}/\text{lm}$ , tām ir maza inerģe. Germānija fotodiodes izmanto galvenokārt fotopārveidošanas režīmā.

**Fototranzistori.** Silīcija vai germānija trīsslāņu ( $n-p-n$ ) pusvadītāju fotoelementus, kas, pārveidojot gais-

mas enerģiju elektriskajā, vēl arī pastiprina fotoelektrisko strāvu, sauc par fototranzistoriem.

6-13. zīm. parādīta fototranzistoru shematiskā uzbūve, apzīmējums un ieslēgšanas shēma.  $n-p-n$  tipa tranzistoros vienam  $n$  slānim ir stipri mazāks laukums nekā pa-



6-13. zīm. Fototranzistori:

*a* — ar apgaismojamu kolektora pāreju; *b* — ar apgaismojamu emitera pāreju; *c* — shematiskais apzīmējums.

rējiem diviem slāņiem, tāpēc gaismā caur plāno  $p$  slāni nonāk  $p-n$  pārejā, kas radusies starp  $p$  slāni un otro  $n$  slāni.  $p$  slānis veido tranzistora bāzi ( $B$ ), lielais un mazais  $n$  slānis — kolektoru ( $K$ ) vai emiteru ( $E$ ) atkarībā no tā, kādā polaritātē pieslēgts ārējais barošanas avots. Pievienojot lielākajam  $n$  slānim ārējā barošanas sprieguma  $E_0$  avota pozitīvo spaili (6-13. zīm. *a*), tas kļūst par kolektoru un apgaismota tiek fototranzistora kolektora pāreja. Gaismas enerģija ierosina fotostrāvu  $i_f$ , kas plūst no kolektora uz bāzi un pēc virziena sakrīt ar neapgaismota tranzistora kolektora sproststrāvu  $i_{K0}$ , kuru rada lādiņu mazākumnesēju pārvietošanās cauri šai kolektora pārejai ( $E_0$  ietekmē). Emitera pāreja injicē bāzē lādiņu vairākumnesējus un līdz ar to, tāpat kā parastā tranzistorā, pastiprina strāvu  $i_{K0} + i_f$  apmēram  $\beta$  reizes. Tādēļ kopējā strāva slodzē  $R_s$  ir

$$i_{K1} = (i_{K0} + i_f)(1 + \beta). \quad (6-15)$$

Pievienojot lielākajam  $n$  slānim ārējā barošanas sprieguma  $E_0$  avota negatīvo spaili (6-13. zīm. *b*), šis slānis kļūst par emiteru un apgaismota tiek fototranzistora emitera pāreja. Arī šai gadījumā fotostrāva  $i_f$  plūst no  $n$  slāņa uz  $p$  slāni (cauri emitera pārejai). Šai strāvai preti cauri pārejai (no  $p$  slāņa uz  $n$  slāni) plūst arī tiešā

strāva  $i_0$ , ko rada ārējais līdsspriegums  $E_0$ . Līdz ar to emitera kopējā strāva atbilst abu šo strāvu starpībai un ir maza. Strāvu  $i_{K2}$  kolektorā var izteikt šādi:

$$i_{K2} = (i_0 - i_f) \beta. \quad (6-16)$$

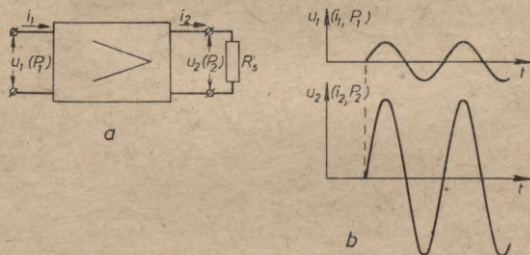
Pirmo slēgumu lieto, ja jāiegūst iespējami lielāka strāva apgaismotam fototranzistoram, bet otro — ja jāiegūst minimāla neapgaismota fototranzistora strāva.

## 7. nodaļa

### PASTIPRINĀTAJI

#### 7-1. Vispārīgas ziņas

Elektriskā signāla pastiprinātājs vispārīgā gadījumā ir četrpols, bet pastiprināšanas būtība ir skaitliski lielāka elektriskā parametra — sprieguma, strāvas vai jaudas — iegūšana šī četrpola izejā (uz slodzes rezistora) nekā ieejā, pie tam izejas signāla maiņa laikā atbilst ieejas signāla maiņai (7-1. zīm.).



7-1. zīm. a) Pastiprinātāja simboliskais apzīmējums. b) Signālu oscilogrammas.

Lai gan elektriskie parametri (spriegums, strāva un jauda) ir organiski saistīti kopīgā enerģētiskā procesā, tomēr atkarībā no tā, kurš no tiem ir ņemts par pamatparametru, pastiprinātājus iedala sprieguma, strāvas un jaudas pastiprinātājos.

Pastiprinātāja sprieguma pastiprinājuma koeficients ir izejas sprieguma attiecība pret ieejas spriegumu:

$$K_U = \frac{u_2}{u_1} \quad (7-1)$$

Analogi strāvas pastiprinājuma koeficients ir

$$K_I = \frac{i_2}{i_1} \quad (7-2)$$

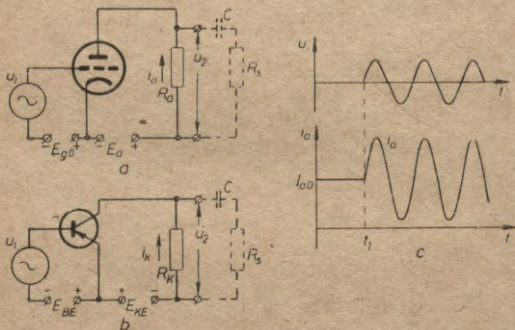
bet jaudas pastiprinājuma koeficients —

$$K_P = \frac{P_2}{P_1} = \frac{u_2^2 R_{10}}{u_1^2 R_s} \quad (7-3)$$

kur  $R_s$  — slodzes rezistora pretestība,

$R_{10}$  — pastiprinātāja ieejas pretestība.

Pēc pastiprināmā signāla formas pastiprinātājus iedala līdzstrāvas, maiņstrāvas un impulsu pastiprinātājos. Maiņstrāvas pastiprinātājus savukārt iedala zemfrekvences, platjoslas un augstfrekvences pastiprinātājos.



7-2. zīm. Vienkāršākā pastiprinātājpakāpe:

*a* — ar elektronu lampu; *b* — ar tranzistoru; *c* — signāla un anodstrāvas oscilogrammas.

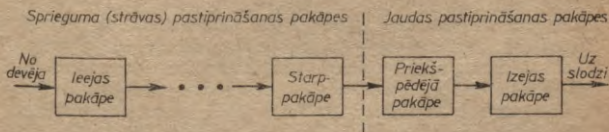
Vienkāršākā pastiprinātājpakāpe (7-2. zīm.) sastāv no pastiprinošā elementa — elektronu lampas vai tranzistora, barošanas avota un pastiprinošā elementa režīma rezistora  $R_a$  ( $R_K$ ).

Kā redzams no zīmējuma, vienkāršākajai pastiprinātājpakāpei ir divas noslēgtas elektriskās ķēdes — galvenā jeb jaudas ķēde un vadības ķēde. Elektronu lampu shēmās galvenā ķēde noslēdzas caur lampu (starp anodu un katodu) un anodslodzes rezistoru  $R_a$ , bet tranzistoru shēmās — caur tranzistoru (starp kolektoru un emiteru) un kolektora slodzes rezistoru  $R_K$ . Turpretī vadības ķēdes noslēdzas attiecīgi starp tīkliņu un katodu un starp bāzi un emiteru.

Kamēr vadības ķēdē signāla nav, galvenajā ķēdē plūst līdzstrāva  $I_{a0}$  ( $I_{K0}$ ) — t. s. miera strāva. Šīs strāvas lielumu tad arī nosaka režīma rezistors  $R_a$  ( $R_K$ ). Kad vadības ķēdē sāk darboties ieejas signāls  $u_1$ , mainās elektriskais lauks starp tīkliņu un katodu, kas rada anodstrāvas maiņu (sk. 2.—3. nodaļu). Līdz ar to uz anoda miera strāvas  $I_{a0}$  «uzklājas» maiņstrāva  $i_{a\sim}$ , kas mainās laikā proporcionāli signālam  $u_1$  (7-2. zīm.c). Analogi darbojas tranzistora shēmā (sk. 4. nodaļu).

Jaudas patērētājs jeb slodzes rezistors  $R_s$  pieslēgts paralēli režīma rezistoram  $R_a$  ( $R_K$ ). Ja slodzē jāplūst tikai maiņstrāvai, slodzes rezistoru pieslēdz caur pārejas jeb atdalītājkondensatoru  $C$ . Caur režīma rezistoru  $R_a$  ( $R_K$ ) plūst kā līdzstrāva, tā arī maiņstrāva, bet, ja  $R_a$  ( $R_K$ )  $\gg R_s$ , praktiski tikai līdzstrāva.

Lai iegūtu pietiekami lielu pastiprinājumu, parasti pielieto daudzpakāpju pastiprinātājus, kas var sastāvēt kā no viena tipa (piemēram, sprieguma pastiprināšanas) pakāpēm, tā arī no dažāda tipa pakāpēm. Parasti šādos



7-3. zīm. Daudzpakāpju pastiprinātāja blokshēma.

daudzpakāpju pastiprinātājos ir priekšpastiprinātāju pakāpes — sprieguma vai strāvas pastiprinātāji — un jaudas pastiprināšanas pakāpes (7-3. zīm.).

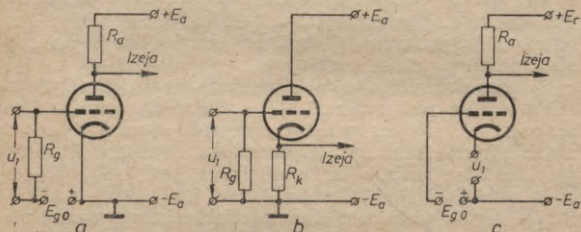
Bieži izejā ir tikai viena jaudas pastiprināšanas pakāpe. Priekšpēdējo pakāpi izmanto, ja izejas (gala) pakāpes

vadišanai nepieciešama liela jauda, ko nedod sprieguma (strāvas) pastiprināšanas pakāpe. Ja izejas pakāpe veidota pēc divtaktu shēmas (7-20. zīm.), nepieciešama priekšpēdējā pakāpe ar divfāzu izeju.

## 7-2. Elektronu lampu pastiprinātājpakāpes

Atkarībā no pastiprināmā signāla un slodzes rezistora pieslēgšanas vietām var izveidot trīs dažādas elektronu lampu pastiprinātājpakāpes (7-4. zīm.).

7-4. zīm. *a* attēlotajā shēmā pastiprināmais signāls  $u_1$  padots tiklīņķēdē, bet slodzes rezistors  $R_a$  (precīzāk —  $R_a$  un  $R_s$  paralēlslēgums) ieslēgts anodķēdē. Šādu pakāpi



7-4. zīm. Elektronu lampu pastiprinātājpakāpes:

*a* — ar kopīgu katodu; *b* — ar kopīgu anodu; *c* — ar kopīgu tiklīņu.

sauc par anodslodzes pakāpi jeb par pakāpi ar kopīgu katodu, jo šeit katods ir kopīgs elektrods ieejas un izejas ķēdēm. Anodslodzes pakāpe pastiprina kā spriegumu, tā arī strāvu un tādēļ dod vislielāko jaudas pastiprinājumu.

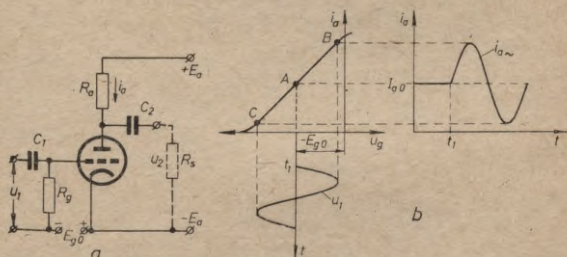
7-4. zīm. *b* attēlotajā shēmā signāls padots tiklīņķēdē, bet slodzes rezistors  $R_k$  ieslēgts katodķēdē. Šādu slēgumu sauc par pakāpi ar katodslodzi jeb par pakāpi ar kopīgu anodu, jo signālam anods ir kopīgs ieejas un izejas ķēdei (taisngrieža filtra kondensatori ir isslēgums maiņstrāvai). Pakāpe ar katodslodzi spriegumu nepastiprina ( $u_2 < u_1$ ,  $K_U < 1$ ), toties šeit notiek strāvas pastiprināšana un līdz ar to arī jaudas pastiprināšana, kas gan ir mazāka nekā iepriekšējā shēmā.

7-4. zīm. *c* attēlotajā shēmā pastiprināmais signāls pa-

dots katodķēdē, bet slodze ieslēgta anodķēdē. Šeit kopīgais elektrodns ir tīkliņš — tātad tā ir pakāpe ar kopīgu tīkliņu (priekšsprieguma  $E_{g0}$  avots ir išslēgums maiņstrāvai). Pakāpe ar kopīgu tīkliņu nepastiprina strāvu, bet tikai spriegumu un tātad arī jaudu. Tā kā signāls  $u_1$  ievadīts katodķēdē, nepieciešama ievērojama signāla strāva (jo signāla strāva ir lampas katodstrāva). Minēto pakāpi pielieto specifiskās augstfrekvences pastiprināšanas shēmās, tādēļ tā sīkāk apskatīta netiek.

### 7-3. Pastiprinātājpakāpe ar anodslodzi

Pakāpe ar anodslodzi sastāv no elektronu lampas, anoda rezistora  $R_a$ , tīkliņa noplūdes rezistora  $R_g$ , pārejas jeb atdalītājkondensatoriem  $C_1$  un  $C_2$ , anoda barošanas sprieguma  $E_a$  avota un priekšsprieguma  $E_{g0}$  avota (7-5. zīm. a). Pārejas kondensators  $C_1$  nelaiž priekšsprie-

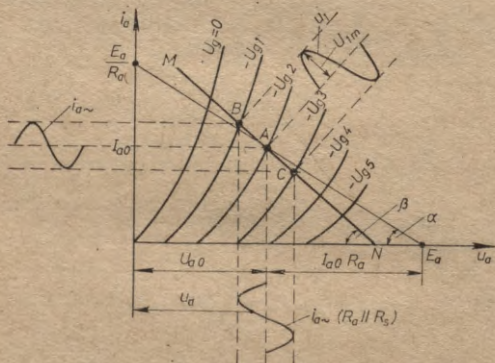


7-5. zīm. a) Pastiprinātājpakāpe ar anodslodzi. b) Darbības grafisks attēlojums.

gumu signāla avota ķēdē, kā arī signāla līdzstrāvas komponenti (ja tāda ir) uz lampas tīkliņu. Tīkliņa noplūdes rezistors  $R_g$  padod priekšspriegumu uz lampas tīkliņu, novada uz tīkliņa nosēdušos elektronus un jonus uz katodu un vienlaikus ir pārejas kondensatora  $C_1$  izlādes pretestība. Pārejas kondensators  $C_2$ , kā jau minēts, nelaiž anodsprieguma līdzsprieguma komponenti slodzes ķēdē. Anoda

rēzistors  $R_a$  ir pastiprinātājpakāpes slodze līdzstrāvai, bet maiņstrāvai slodze ir  $R_a$  un  $R_s$  paralēlslēgums ( $R_a \parallel R_s$ ). Lamps darba raksturliķni nosaka  $R_a$ , bet darba punktu uz šīs raksturliķnes — priekšspriegums  $E_{g0}$  (sk. 2. nodaļu).

7-5. zīm. *b* grafiski attēlota apskatāmās pastiprinātājpakāpes darbība. Līdz laika momentam  $t_1$  signāls  $u_1$  nav padots un caur lampu plūst anoda miera strāva  $I_{a0}$ , ko nosaka priekšspriegums  $-E_{g0}$  darba punktā *A* ( $u_g = -E_{g0}$ ). Laika momentā  $t_1$  tiek padots pastiprināmais signāls  $u_1$  un spriegums uz lampas tīkliņa kļūst mainīgs:  $u_g = -E_{g0} + u_1$  (sinusoidāla signāla gadījumā  $u_g = -E_{g0} + U_{1m} \sin \omega t$ ). Līdz ar to darba punkts uz raksturliķnes pārvietojas un anodstrāva mainās proporcionāli padotajam signālam:  $i_a = I_{a0} + I_{am} \sin \omega t$ .



7-6. zīm. Grafisks pastiprinātājpakāpes darbības attēlojums anoda raksturliķņu koordinātes.

Lai pilnīgāk un precīzāk izsektu anodslodzes pastiprinātājpakāpes darbību, izdevīgāk šo darbību attēlot grafiski anoda raksturliķņu koordinātu sistēmā (7-6. zīm.). Taisne  $E_a, \frac{E_a}{R_a}$  ir slodzes taisne līdzstrāvai (sk. 2. nodaļu).

Līdz ar to tās slīpumu nosaka anodslodzes rezistora  $R_a$  vērtība:

$$\text{ctg } \alpha \sim R_a. \quad (7-4)$$

Izvēloties attiecīgu priekšspriegumu (dotajā attēlā  $-E_{g0} \doteq -U_{g2}$ ), iegūst darba punktu  $A$  uz šīs slodzes taisnes. Tā kā tomēr signālam slodze ir  $R_a$  un  $R_s$  paralēlslēgums (ja vien kondensatora  $C_2$  kapacitāte ir pietiekami liela), darba raksturlikne  $M-N$  arī ir taisne, kas iet caur darba punktu  $A$ , tikai ar citu slīpumu:

$$\text{ctg } \beta \sim R_a \parallel R_s. \quad (7-5)$$

Darba posmu  $B-C$  uz raksturliknes nosaka signāla amplitūdas vērtība  $\overline{BC} = 2 U_{1m}$ .

Grafiski pastiprināmo signālu attēlo uz laika ass, kas iet caur darba punktu  $A$  un ir perpendikulāra slodzes taisnei  $M-N$ .

Grafiskajā attēlā skaidri parādās anoda miera strāva  $I_{a0}$  un maiņstrāvas komponente  $i_{a\sim}$ , kā arī spriegumu sadalījums lampas anodķēdē. Miera stāvoklī ( $u_1=0$ ) darba punkts  $A$  nosaka līdzsprieguma sadalījumu — sprieguma kritumu uz anodslodzes rezistora ( $I_{a0}R_a$ ) un uz pašas lampas ( $U_{a0}$ ). Darba režīmā šis sprieguma sadalījums ir mainīgs, jo darba punkts uz raksturliknes pārvietojas. Maiņsprieguma lielumu nosaka anodstrāvas maiņstrāvas komponente un kopējā slodzes pretestība:

$$u_{a\sim} = i_{a\sim} (R_a \parallel R_s). \quad (7-6)$$

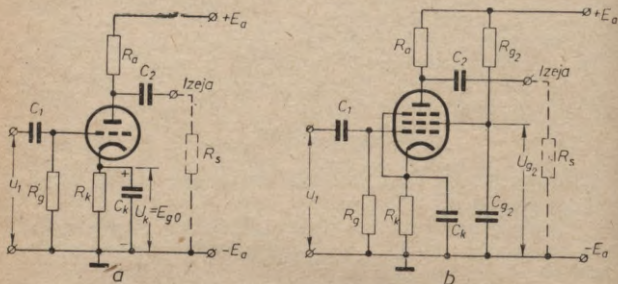
No grafiskā attēla redzams, ka, palielinoties signālam uz lampas tīkliņa ( $u_1 > 0$ ), lampas anodspriegums  $u_a$  samazinās, jo darba punkts uz raksturliknes pārvietojas virzienā no  $A$  uz  $B$ , — un otrādi. Līdz ar to spriegums  $u_a$  uz lampas anoda ir pretfāzē ar pastiprināmo signālu. Patiesām, palielinoties signālam uz lampas tīkliņa, samazinās tā negatīvais potenciāls un anodstrāva pieaug. Līdz ar to pieaug arī sprieguma kritums uz slodzes rezistora (pēc Oma likuma), bet lampas anodspriegums samazinās, jo

$$u_a + u_{R_a} = E_a = \text{const.} \quad (7-7)$$

Līdzšinējā pakāpes analizē tika pieņemts, ka priekšspriegumu lampas darba punkta ieregulēšanai padod no atsevišķa  $E_{g0}$  avota. Patiesībā gan šādu paņēmieni

pielieto ļoti reti un priekšspriegumu iegūst automātiski ar katoda rezistora  $R_k$  palīdzību (7-7. zīm. a).

Anoda līdzstrāvas komponente  $I_{a0}$ , plūstot caur  $R_k$ , rada sprieguma kritumu  $U_k$ , kas caur noplūdes rezistoru



7-7. zīm. a) Shēma automātiskai priekšsprieguma iegūšanai.  
b) Shēma pentodes ekrāntīkliņa barošanai.

$R_g$  tiek padots uz lampas tīkliņu. Līdz ar to lampas tīkliņam attiecībā pret katodu ir negatīvs potenciāls, kas vienāds ar  $U_k$ . Tātad, ja izvēlas

$$R_k = \frac{E_{g0}}{I_{a0}}, \quad (7-8)$$

sprieguma krituma  $U_k$  vērtība ir vienāda ar nepieciešamo priekšspriegumu  $E_{g0}$  un darba punkts  $A$  uz raksturlienes ieregulējas automātiski. Lai anodstrāvas maiņstrāvas komponente neplūstu caur katoda rezistoru un neradītu sprieguma krituma maiņu, kas savukārt mainītu darba režīmu,  $R_k$  šuntē ar katoda kondensatoru  $C_k$ , kura vērtību izvēlas pēc sakarības

$$C_k \geq \frac{2 \div 3}{F_z \left( R_k \parallel \frac{R_1 + R_a}{\mu + 1} \right)}, \quad (7-9)$$

kur  $F_z$  — pastiprināmā signāla zemākā frekvence,  
 $R_1$  — lampas iekšējā pretestība,  
 $\mu$  — lampas statistiskais pastiprinājuma koeficients.

Ja apskatītājā pastiprinātājpakāpē lieto tetrodi, staru tetrodi vai pentodi (7-7. zīm. b), shēmā jāparedz ekrān-

tikliņa barošana (sk. 3. nodaļu). Nepieciešamo ekrāntikliņa barošanas spriegumu  $U_{g_2}$  parasti iegūst no anoda barošanas sprieguma  $E_a$  avota caur rezistoru  $R_{g_2}$ . Rezistora  $R_{g_2}$  pretestību izvēlas tādu, lai sprieguma kritums uz tās būtu vienāds ar dzēšamo sprieguma vērtību  $E_a - U_{g_2}$ . Tā kā caur rezistoru  $R_{g_2}$  plūst tikai ekrāntikliņa strāva,

$$R_{g_2} = \frac{E_a - U_{g_2}}{I_{g_2}}. \quad (7-10)$$

Lai caur  $R_{g_2}$  neplūstu ekrāntikliņa strāvas maiņstrāvas komponente un tā potenciāls nemainītos, ekrāntikliņu iezemē caur kondensatoru  $C_{g_2}$ . Šī kondensatora kapacitāti izvēlas līdzīgi  $C_k$  kapacitātei:

$$C_{g_2} \geq \frac{2 \div 3}{F_z (R_{g_2} \| R_{i_{g_2}})}, \quad (7-11)$$

kur  $R_{i_{g_2}}$  — lampas iekšējā pretestība starp ekrāntikliņu

$$\text{un katodu } \left( R_{i_{g_2}} = \frac{dU_{g_2}}{di_{g_2}} \right).$$

Anodslodzes rezistoru  $R_a$  izvēlas tā, lai iegūtu pietiekami lielu pastiprinājuma koeficientu pie iespējami zemākas miera režīmā patērējamās jaudas  $P_0 = U_{a0} I_{a0}$ . Parasti triodēm

$$R_a = (2 \div 5) R_{i_1}, \quad (7-12)$$

bet pentodēm un tetrodēm

$$R_a = (0,05 \div 0,15) R_{i_1}. \quad (7-13)$$

Anodslodzes pakāpes sprieguma pastiprinājuma koeficients ir

$$K_U = \frac{u_2}{u_1} = S \frac{R_{i_1} R_a}{R_{i_1} + R_a}, \quad (7-14)$$

bet tetrodes un pentodes gadījumā, kad  $R_{i_1} \gg R_a$ ,

$$K_U = S R_a. \quad (7-15)$$

Pārejas kondensatorus  $C_1$  un  $C_2$  aprēķina no pieļaujamiem frekvenču kropļojumiem.

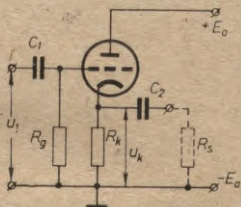
Tikliņa noplūdes pretestības  $R_g$  vērtību vēlams ņemt iespējami lielāku (tad iespējams samazināt pārejas kondensatora  $C_1$  kapacitāti). Katalogos dotas  $R_g$  maksimālās vērtības (parasti  $10^5 - 10^6 \Omega$ ) — ja  $R_g$  vērtība ir liela,

caur to noplūstošie elektroni un joni var radīt ievērojamu sprieguma kritumu, kas maina lampas darba režīmu — pārbīda darba punktu uz raksturliknes.

#### 7-4. Pastiprinātājpakāpe ar katodslodzi

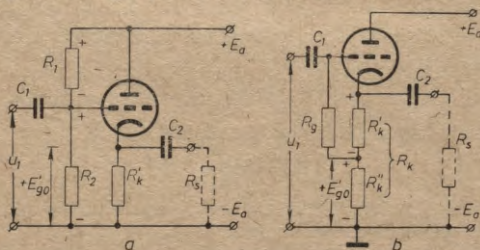
7-8. zīm. attēlota vienkāršākā pastiprinātājpakāpe ar katodslodzi. Kā jau minēts, režīma rezistors  $R_k$  ieslēgts katodķēdē un tam paralēli caur atdalītājcondensatoru  $C_2$  pieslēgta slodze  $R_s$ . Tātad pastiprinātājpakāpes slodze maiņstrāvai ir  $R_k \parallel R_s$ .

Tā kā katoda rezistors  $R_k$  ir kopīgs ieejas un izejas ķēdei, sprieguma kritums  $u_k$ , kas vienlaikus ir izejas spriegums, darbojas ieejas ķēdē kā atgriezeniskās saites spriegums. Miera režīmā sprieguma kritums  $I_{k0} R_k$  ir lampas priekšspriegums. Vienkāršāko shēmu pielieto reti, jo uz nepieciešamā lieluma režīma rezistora  $R_k$  rodas ievērojams priekšspriegums, kas nobīda darba punktu, neļaujot izmantot visu lampas raksturliknes lineāro daļu. Lai tas notiktu, pakāpes tīkliņķēdē padod nelielu pozitīvu priekšspriegumu  $+E'_{g0}$  (7-9. zīm.). 7-9. zīm. *a* attēlota shēma,



7-8. zīm. Pastiprinātājpakāpe ar katodslodzi.

7-9. zīm. *b* attēlota shēma, kas nodrošina pozitīvu priekšspriegumu  $+E'_{g0}$  katoda ķēdē, nodrošinot tīkliņķēdes darbu.



7-9. zīm. Pastiprinātājpakāpes ar katodslodzi pozitīvā priekšsprieguma nodrošināšana:

*a* — shēma ar sprieguma dalītāju; *b* — shēma ar dalītu katoda prettestību.

kurā pozitīvo priekšspriegumu iegūst ar dalītāja  $R_1, R_2$  palīdzību, pie tam sprieguma dalītāja apakšējā pleca rezistors  $R_2$  vienlaikus ir tikliņa noplūdes rezistors. Nepieciešamo priekšsprieguma vērtību  $+E'_{g0}$  iegūst, izvēloties dalītāja plecu rezistoru attiecību, jo

$$\frac{R_1}{R_2} = \frac{E_a - E'_{g0}}{E'_{g0}}. \quad (7-16)$$

Otrs paņēmieni, kā iegūt papildu pozitīvo priekšspriegumu, attēlots 7-9. zīm. *b*. Šeit katoda pretestību veido divu virknē slēgtu rezistoru pretestības, bet tikliņa noplūdes rezistors pievienots starp katoda rezistoriem. Tāpēc sprieguma kritums, ko katodstrāva rada uz rezistora  $R'_k$ , tiek padots uz lampas tikliņu negatīvā polaritātē (kā jau parasti priekšspriegums  $-E_{g0}$ ), turpretī sprieguma kritums no rezistora  $R''_k$  — pozitīvā polaritātē un tas ir pozitīvais priekšspriegums  $+E'_{g0}$ . Šādās shēmās parasti rezistora  $R'_k$  vērtība ir tikai  $(0,02 \div 0,05)R_k$ . Tātad praktiski  $R''_k$  vērtība arī nosaka katodslodzi. Kā vienā, tā otrā shēmā kopējais spriegums starp lampas tikliņu un katodu, tātad spriegums, kas vada lampu, ir

$$u_g = u_1 + E'_{g0} - i_k R'_k. \quad (7-17)$$

Pastiprinātājpakāpei ar katoda slodzi sprieguma pastiprinājuma koeficients nedaudz mazāks par vienu. Precīzāk to var aprēķināt no izteiksmes

$$K_U = \frac{SR_k}{1 + SR_k}. \quad (7-18)$$

Tātad izejas sprieguma vērtība gandrīz sakrīt ar ieejas spriegumu. Arī fāzē šie spriegumi sakrīt. Tādēļ pastiprinātājpakāpes ar katodslodzi parasti sauc par katoda atkārtotājiem. Katoda atkārtotāji pastiprina strāvu (tātad arī jaudu), pie tam 7-9. zīm. *b* attēlotajā slēgumā strāvas pastiprinājuma koeficients ir ievērojami lielāks nekā pakāpei ar līdzsprieguma dalītāju (7-9. zīm. *a*). Arī ieejas pretestības šīm divām pakāpēm ir dažādas. Slēgumā ar sprieguma dalītāju ieejas pretestību nosaka  $R_1 \parallel R_2$ , un tā nevar būt lielāka par  $0,5 R_2$ :

$$R_{ie} \leq \frac{R_2}{2}. \quad (7-19)$$

Turpreti shēmā ar dalītu katoda pretestību

$$R_{ie} = \frac{R_g}{1 - K_U} \quad (7-20)$$

Tā kā parasti  $K_U = 0,95 \div 0,98$ , ieejas pretestība var būt līdz 100 reizēm lielāka nekā iepriekšējā shēmā.

Izejas pretestības abās shēmās ir vienādas. Tās nosaka katoda pretestības un katoda ķēdē pārrēķinātas lampas iekšējās pretestības  $\frac{R_i}{\mu + 1}$  paralēlslēgums, bet praktiski tikai pēdējā. Ievērojot, ka  $\mu \gg 1$ ,

$$R_{iz} \approx \frac{1}{S} \quad (7-21)$$

Tāpat katoda atkārtotājiem ir liela ieejas pretestība (līdz  $10^8 \Omega$ ) un maza izejas pretestība (piemēram, ja  $S = 10 \text{ mA/V}$ ,  $R_{iz} = 100 \Omega$ ), līdz ar to liels jaudas pastiprinājuma koeficients.

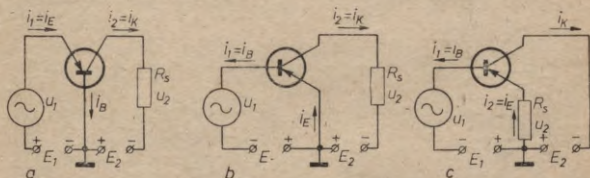
Šo īpašību dēļ katoda atkārtotāji tiek ļoti plaši lietoti kā pretestību salāgotāji, piemēram, ja pakāpe vai devējs ar lielu izejas pretestību jāsalāgo ar pakāpi, kam ieejas pretestība maza. Bez tam katoda atkārtotājus lieto dažādu priekšpastiprinātāju izejās, kas ar nākamām pastiprinātāju pakāpēm savienotas caur koaksiāliem kabeļiem, piemēram, mērtausti elektronu voltmetros, mikrofonu pastiprinātāji utt. Šajā gadījumā, tā kā katoda atkārtotāja izejas pretestība ir maza, koaksiālā kabeļa kapacitāte nerada frekvenču kropļojumus (sk. 7-6. §).

### 7-5. Tranzistoru pastiprinātājpakāpes

Jau 4. nodaļā aplūkoti trīs tranzistoru slēgumi — kopbāzes, kopemitera un kopkolektora slēgumi. 7-10. zīm. a attēlota pastiprinātājpakāpe ar tranzistoru kopbāzes slēgumā. Šeit signāls  $u_1$  ievadīts emitera ķēdē, bet slodzes rezistors iēslēgts starp kolektoru un bāzi. Tāpat abu ķēžu kopīgais elektrodos ir bāze. Kopbāzes slēguma pastiprinātājpakāpe nepastiprina strāvu (jo  $i_K \approx i_E$ ), bet tikai spriegumu. Līdz ar to arī jaudas pastiprinājuma koeficients šai pakāpei ir mazs. Bez tam kopbāzes pastiprinātājpakāpei ir maza ieejas pretestība (daži desmiti  $\Omega$ ) un liela izejas pretestība, kas ir šī slēguma galvenais trūkums.

Toties kopbāzes pastiprinātājpakāpe ir visstabilākā — tranzistora režīms, mainoties temperatūrai vai apmainot tranzistoru, mainās maz. Šo slēgumu visbiežāk izmanto lieljaudas gala pakāpēm, kā arī augstfrekvences pastiprinātājos.

7-10. zīm. *b* attēlota kopemitera pastiprinātājpakāpe. Ieejas signāls šeit padots bāzes ķēdē (starp bāzi un emiteru), bet slodzes rezistors ieslēgts kolektora ķēdē. Tātad



7-10. zīm. Tranzistoru pastiprinātājpakāpes:  
*a* — kopbāzes; *b* — kopemitera; *c* — kopkolektora.

abu ķēžu kopīgais elektrods ir emitters. Kopemitera pastiprinātājpakāpe pastiprina kā spriegumu, tā arī strāvu, līdz ar to jaudas pastiprinājums ir vislielākais. Arī ieejas pretestība kopemitera pastiprinātājpakāpei ir lielāka — līdz dažiem kiloomiēm. Bez tam šo pakāpi ērti barot no viena avota, jo bāzei un kolektoram jāpievada vienas polaritātes barošanas spriegums. Minēto priekšrocību dēļ kopemitera slēgumi pastiprinātājos plaši izplatīti, tādēļ apskatīsim tos nedaudz sīkāk.

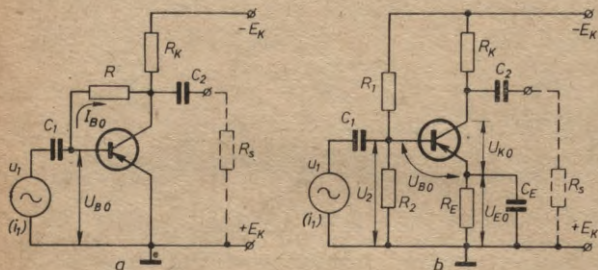
Kā jau norādīts 4. nodaļā, tranzistoru galvenais trūkums ir temperatūras nestabilitāte. Ipaši temperatūras nestabila ir kopemitera shēma, tādēļ kopemitera pastiprinātājpakāpēs jāparedz temperatūras stabilizācija.

7-11. zīm. *a* attēlots kopemitera slēgums, kurā bāzes priekšsprieguma rezistors  $R$  vienlaikus ir temperatūras stabilizācijas elements. Bāzes priekšspriegumu  $U_{B0}$  vai arī bāzes miera strāvu  $I_{B0}$  nosaka kolektora rezistors  $R_K$ , priekšsprieguma jeb atgriezeniskās saites (savieno pastiprinātājpakāpes izeju ar ieeju) rezistors  $R$  un tranzistora ieejas pretestība  $R_{ie}$ . Priekšsprieguma rezistora  $R$  pretestību

izvēlas tādu, lai pie normālas apkārtējās vides temperatūras bāzes miera strāva būtu

$$I_{B0} = \frac{I_{K0}}{B}, \quad (7-22)$$

kur  $I_{K0}$  — kolektora miera strāva (strāva darba punktā),  
 $B$  — tranzistora līdzstrāvas pastiprinājuma koeficients.



7-11. zīm. Priekšsprieguma iegūšana un temperatūras stabilizācija kopemitera tranzistoru pastiprinātājpakāpēs.

Ja sasilšanas rezultātā palielinās kolektora strāva, palielinās arī sprieguma kritums uz kolektora rezistora  $R_K$ , bet savukārt attiecīgi samazinās  $u_{KE}$ . Līdz ar to samazinās bāzes priekšspriegums  $U_{B0}$  un bāzes strāva, kas savukārt samazina kolektora strāvu. Tādā veidā  $i_K$  izmaiņas vienlaikus noris divos pretējos virzienos un rezultātā tās lielums gandrīz nemainās. Tomēr šai vienkāršajai stabilizācijas shēmai ir ievērojams trūkums — tā samazina pakāpes pastiprinājuma koeficientu, jo caur rezistoru  $R$  uz ieeju tiek padota daļa pastiprinātā signāla, kas ir pretfāzē ar pastiprināmo signālu. Tātad rezistors  $R$  rada pretsaiti.

Sarežģītāka, bet ekonomiskāka kopemitera pakāpes shēma attēlota 7-11. zīm. *b*. Šeit priekšspriegumu iegūst no dalītāja  $R_1, R_2$ , bet stabilizējošais rezistors  $R_E$  ieslēgts emitera ķēdē. Emitera strāvas izraisītais sprieguma kritums uz šī rezistora ( $U_{E0} = I_{E0} R_E$ ) darbojas pretēji dali-

tāja spriegumam  $U_2 = I_d R_2$ . Līdz ar to kopējais bāzes priekšspriegums ir

$$U_{B0} = U_2 - U_{E0}. \quad (7-23)$$

Tātad rezistors  $R_E$  rada līdzstrāvas pretsaiti. Ja temperatūras ietekmē  $i_E$  palielinās, attiecīgi palielinās sprieguma kritums uz  $R_E$  un samazinās bāzes priekšspriegums, kas savukārt izraisa strāvu samazināšanos.

Lai rezistors  $R_E$  neradītu maiņstrāvas pretsaiti, to šuntē ar lielas kapacitātes (parasti desmiti mikrofaradu) kondensatoru  $C_E$ .

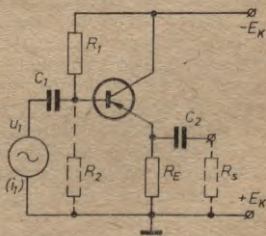
7-10. zīm. *c* attēlota kopkolektora pastiprinātājpakāpe. Arī šo pakāpi ērti barot no viena avota, jo bāzes un kolektora barojošo spriegumu polaritāte ir vienāda. Kopkolektora pakāpes galvenā priekšrocība ir lielā ieejas pretestība (simti kiloomu). Izejas pretestība turpretī ir maza (simti omu). Tranzistoru kopkolektora pastiprinātājpakāpes ir analogas elektronu lampu katoda atkārtotājiem. Arī šeit sprieguma pastiprinājuma koeficients ir nedaudz mazāks par vienu, bet izejas un ieejas spriegumu fāzes sakrīt. Tādēļ kopkolektoru shēmas bieži sauc par emitera atkārtotājiem. Emitera atkārtotāja strāvas pastiprinājuma koeficients arī nav liels un praktiski vienāds ar tranzistora strāvas pastiprinājuma koeficientu  $\beta$ .

Patiešām

$$K_I = \frac{i_E}{i_B} = \frac{i_K + i_B}{i_B} = \beta + 1 \approx \beta. \quad (7-24)$$

Kopkolektora pakāpē vajadzīgo priekšspriegumu parasti iegūst ar sprieguma dalītāju  $R_1, R_2$  (7-12. zīm.), pie tam dalītāja apakšējā pleca rezistoru  $R_2$  shēmā neieslēdz, lai nesamazinātu pakāpes ieejas pretestību. Šajā gadījumā  $R_2$  funkcijas pilda  $R_{ie}$ .

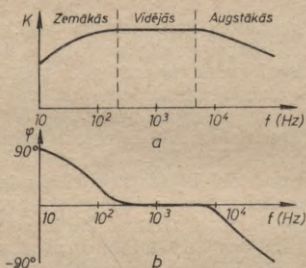
Emitera atkārtotāju, līdzīgi katoda atkārtotājam, galvenokārt lieto par pretestību salāgošanas pakāpi. Bez tam emitera atkārtotājus plaši lieto sprieguma stabilizatoros par līdzstrāvas pastiprinātājiem (sk. 10. nodaļu).



7-12. zīm. Emitera atkārtotājs.

## 7-6. Pastiprinātājpakāpju frekvenču un fāzu kropļojumi

Līdzšīņējā pastiprinātājpakāpju analizē pieņemām, ka katrai pakāpei ir noteikts pastiprinājuma koeficients, kas atkarīgs no elektronu lampas vai tranzistora un attiecīgā slēguma parametriem. Tomēr slēgumu reaktīvo elementu (pārejas kondensatoru, parazitisko kapacitāšu utt.) dēļ izejas sprieguma amplitūda un fāze ir atkarīga arī no frekvences.



7-13. zīm. Pastiprinātājpakāpes raksturlieknes:  
*a* — frekvenču raksturliekne; *b* — fāzu raksturliekne.

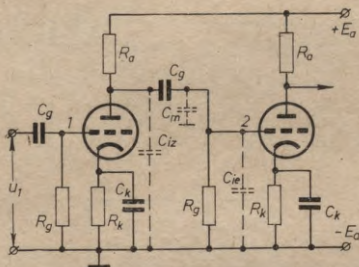
7-13. zīm. attēlotas reālas pastiprinātājpakāpes frekvenču un fāzu raksturlieknes. Kā redzams, pastiprinājuma un fāzu kropļojumu nav vidējām frekvencēm, bet tie eksistē zemākām un augstākām frekvencēm. Zemāko frekvenču rajonā kropļojumus rada galvenokārt pārejas kondensatori, kā arī katodu kondensatori un daudzelektrodu lampu ekrāntikliņu kondensatori. Turpretī augstāko frekvenču rajonā kropļojumus rada parazitiskās kapacitātes. Lai novērstu šos kropļojumus un varētu pareizi izvēlēties shēmas elementus, izanalizēsim no šī viedokļa sprieguma pastiprinātājpakāpi, kas ietilpst vairākpakāpju pastiprinātājā (7-14. zīm.).

Daudzpakāpju pastiprinātājā par vienu pakāpi uzskata lampu ar shēmas elementiem no stūrējošā tīkliņa  $I$  līdz

nākamās lampas stūrējošam tīkliņam 2. Pirmā lampa slo-gota ar otrās lampas tīkliņa pretestību  $R_g$  caur pārejas kondensatoru  $C_g$ . Pārejas kondensatora reaktīvā pretes-tība vidējām un augstākām frekvencēm ir niecīga un uz-skatāma par īsslēgumu, turpretī zemām frekvencēm tā ir ievērojama. Bez tam pastiprinātājpakāpes slodzi šuntē pa-razītiskās kapacitātes: pirmās pakāpes izejas kapacitāte  $C_{iz}$ , nākamās pakāpes ieejas kapacitāte  $C_{ie}$  un montāžas kapacitāte  $C_m$ . Visas šīs parazitiskās, paralēli slēgtās ka-pacitātes var summēt:

$$C_0 = C_{iz} + C_m + C_{ie}. \quad (7-25)$$

Kopējā parazitiskā kapacitāte  $C_0$  triodu shēmām ir 50—100 pF, bet pentodu shēmām 20—40 pF.



7-14. zīm. Divpakāpju sprieguma pastiprinātājs.

Zemām un vidējām frekvencēm parazitiskā kapacitāte  $C_0$  pastiprinājuma koeficientu neietekmē, jo tās reaktīvā pretestība ir liela. Turpretī augstām frekvencēm parazitiskās kapacitātes reaktīvā pretestība stipri iespaido pastiprinātājpakāpju darbību, jo slodze kļūst kompleksa un tās pretestība samazinās. Līdz ar to samazinās pakāpes pastiprinājums un rodas fāzes kropļojumi.

7-15. zīm. attēlotas apskatāmās pastiprinātājpakāpes ekvivalentās shēmas vidējām, zemākām un augstākām frekvencēm. No ekvivalentām shēmām maksimālais pakāpes

sprieguma pastiprinājums (pastiprinājums vidējām frekvencēm) ir

$$K_{U \max} = \frac{\mu}{1 + \frac{R_1}{R_a} + \frac{R_1}{R_g}}, \quad (7-26)$$

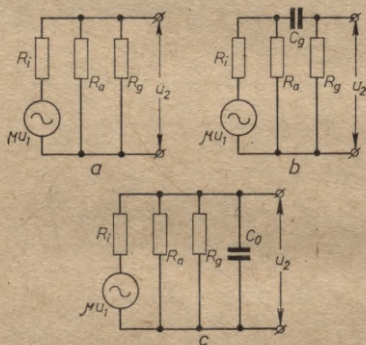
zemākām frekvencēm

$$\dot{K}_{Uz} = \frac{K_{U \max}}{1 - j \frac{1}{\omega \tau_z}}, \quad (7-27)$$

kur

$$\tau_z = C_g \left( \frac{R_1 R_a}{R_1 + R_a} + R_g \right) \quad (7-28)$$

ir pastiprinātājpakāpes zemfrekvences laika konstante (7-15. zīm. b).



7-15. zīm. Sprieguma pastiprinātājpakāpes ekvivalentās shēmas:  
a — vidējām; b — zemākām; c — augstākām frekvencēm.

Turpreti augstākām frekvencēm

$$\dot{K}_{Ua} = \frac{K_{U \max}}{1 + j\omega \tau_a}, \quad (7-29)$$

kur

$$\tau_a = C_0 \frac{R_a R_1 R_g}{R_a R_1 + R_g R_1 + R_a R_g} \quad (7-30)$$

ir pastiprinātājpakāpes augstfrekvences laika konstante (7-15. zīm. c).

Pakāpes sprieguma pastiprinājuma koeficienta vispārīgā izteiksme visam frekvenču diapazonam ir

$$\dot{K}_U = \frac{K_{U\max}}{1 + j\left(\omega\tau_a - \frac{1}{\omega\tau_z}\right)}. \quad (7-31)$$

Šis kompleksās izteiksmes arguments nosaka pakāpes fāzu raksturlielni šajā frekvenču diapazonā:

$$\varphi = \arctg\left(\frac{1}{\omega\tau_z} - \omega\tau_a\right). \quad (7-32)$$

No izteiksmēm (7-31) un (7-32) redzams, ka pastiprinātājpakāpes frekvenču un fāzu raksturlieknes ir cieši saistītas.

Pieļaujamā pastiprinājuma koeficienta samazināšanās ierobežo pastiprinātājpakāpes frekvenču caurlaides joslu

$$\Delta F = F_a - F_z. \quad (7-33)$$

Pieļaujamo pastiprinājuma koeficienta samazināšanos izsaka kā skaitlisku koeficientu  $M_a$  ( $M_z$ ). Zemākām frekvencēm

$$M_z = \frac{1}{\sqrt{1 + \left(\frac{1}{\omega\tau_z}\right)^2}}, \quad (7-34)$$

bet augstākām

$$M_a = \frac{1}{\sqrt{1 + (\omega\tau_a)^2}}. \quad (7-35)$$

Parasti pastiprinātājos pieņem

$$M_z = M_a = \frac{1}{\sqrt{2}}, \quad (7-36)$$

tad

$$F_z = \frac{1}{2\pi\tau_z}, \quad F_a = \frac{1}{2\pi\tau_a}. \quad (7-37)$$

Tranzistoru pastiprinātājpakāpēs gluži tāpat notiek pastiprinājuma koeficienta samazināšanās pie zemām un augstām frekvencēm un šo kroplojumu novērtēšanai var izvest līdzīgus vienādojumus.

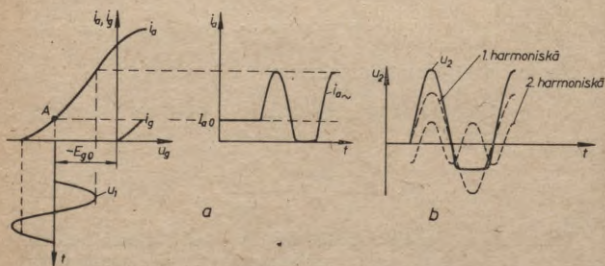
Daudzpakāpju pastiprinātājos frekvenču un fāzu kropļojumus rada katra pakāpe. Līdz ar to rezultējošie pastiprinājuma samazināšanās koeficienti ( $M_z, M_a$ ) ir atsevišķu pakāpju koeficientu reizinājums:

$$M = M_1 M_2 \dots M_n. \quad (7-38)$$

Arī fāzu kropļojumi summējas, kas daudzpakāpju pastiprinātājos ir ļoti bīstama parādība, jo atsevišķām zemākām vai augstākām frekvencēm fāzu kropļojumi sasniedz  $\varphi = 180^\circ$ . Šādā gadījumā pastiprinātājā esošās pretsaites pārvēršas līdzsaitēs un pastiprinātājā ierosinās pašsvārstības ar frekvenci, pie kuras  $\varphi = 180^\circ$ . Pastiprinātājs kļūst par ģeneratoru (sk. 8. nodaļu).

### 7-7. Pastiprinātājpakāpju nelineārie kropļojumi

Līdz šim pieņēmām, ka pastiprinātājpakāpes izejas spriegums atkārtō signāla formu. Patiesībā pat pilnīgi pareizi izraudzītā pastiprinātājelementa (elektronu lampas vai tranzistora) darba režīmā izejas sprieguma forma ir nedaudz kropļota, jo kā elektronu lampām, tā arī tranzistoriem darba raksturlīknes nav ideāli lineāras. Sevišķi lieli nelineārie kropļojumi rodas pastiprinātājelementa nepareizā darba režīmā. 7-16. zīm. *a* attēlota elektronu lampas pastiprinātājpakāpes darbība nepareizi izraudzītā darba režīmā. Šeit lampas tīkliņam pievadīts pārlietu liels



7-16. zīm. *a*) Pastiprinātājpakāpes nelineāro kropļojumu rašanās.  
*b*) Kropļotā signāla harmoniskais sastāvs.

negatīvais priekšspriegums  $-\bar{E}_{g0}$  un darba punkts  $A$  vairs neatrodas raksturlīknes lineārās daļas vidū. Kā redzams, anodstrāvai rodas nelineārie kropļojumi — anoda maiņstrāva  $i_{a\sim}$  tiek ierobežota no apakšas. Līdzīgi kropļojumi rodas arī ļoti maza negatīvā priekšsprieguma gadījumā, kad tīkliņstrāvas ietekmē notiek komponentes  $i_{a\sim}$  ierobežošana no augšas.

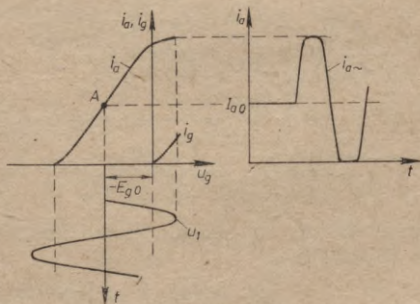
Tātad arī pastiprinātājpakāpes izejas sprieguma forma ir kropļota. Nelineārie kropļojumi rada papildu harmoniskās svārstības (7-16. zīm. *b*). Kā redzams, apskatītajā piemērā izejas signāls bez pamatharmoniskās (pirmās harmoniskās) satur ievērojami lielas amplitūdas otro harmonisko (bez tam, protams, arī vēl citas augstākās harmoniskās).

Pastiprinātāju nelineāros kropļojumus vērtē pēc nelineāro kropļojumu koeficienta

$$K_t = \frac{\sqrt{U_2^2 + U_3^2 + \dots + U_n^2}}{U_1} \cdot 100\%, \quad (7-39)$$

kur  $U_1$  — izejas signāla pamatharmoniskās amplitūda,  
 $U_n$  — izejas signāla  $n$ -tās harmoniskās amplitūda.

Izteikti nelineārie kropļojumi iespējami arī pilnīgi pareizi izraudzītā pastiprinātājpakāpes darba režīmā, ja izejas signāla  $u_1$  amplitūda ir pārlietu liela (7-17. zīm.). Šai gadījumā notiek abpusēja anodstrāvas ierobežošana. Daudzpakāpju pastiprinātājos atsevišķu pakāpju



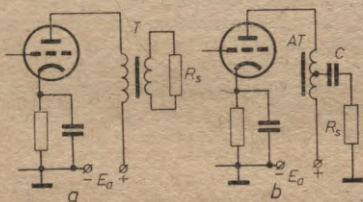
7-17. zīm. Nelineāro kropļojumu rašanās, ja pareizi izraudzīts darba punkts.

nelineārie kropļojumi summējas. Bez tam gala pakāpes rada lielākus nelineāros kropļojumus nekā sprieguma pastiprinātājpakāpes. Ja, piemēram, zemfrekvences pastiprinātāja nelineārie kropļojumi pārsniedz 5%, auss jūt skaņas kropļojumus.

Lai samazinātu nelineāros kropļojumus, pastiprinātājos pielieto pretsaites, kas aptver atsevišķas pastiprinātājpakāpes vai to grupas (sk. 7-10. §).

### 7-8. Jaudas pastiprinātāji

Jaudas pastiprinātājiem ar minimāliem kropļojumiem jāpastiprina jauda un tā jāpievada slodzei. Atkarībā no jaudas pastiprinātājpakāpes slodzes ieslēgšanas veida rodas dažādas izejas shēmas. Augstomīgas slodzes gadījumā pielieto tiešo izeju, kad slodze ieslēgta gala pakāpes anoda vai kolektora ķēdē, kā tas ir sprieguma pastiprinātājpakāpēs. Zemomīgas slodzes gadījumā pielieto transformatora vai autotransformatora izeju slodzes pretestības pārveidošanai (7-18. zīm.). Transformācijas koeficientu nosaka



7-18. zīm. Jaudas pastiprinātāja izejas shēmas:

*a* — pastiprinātājam ar transformatoru; *b* — pastiprinātājam ar autotransformatoru.

slodzes pretestības  $R_s$  un pakāpes nepieciešamās anoda pretestības  $R_a$  vērtības:

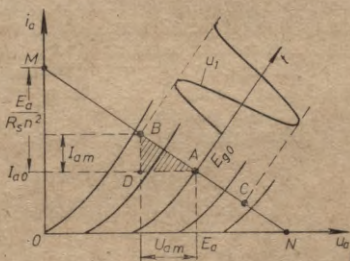
$$n = \sqrt{\frac{R_a}{R_s}}. \quad (7-40)$$

Piemēram, ja  $R_a = 8 \text{ k}\Omega$  un  $R_s = 20 \text{ }\Omega$ ,  $n = 20$ .

Gala pakāpes lampai ar transformatora izeju ir darba raksturliktne ar dažām īpatnībām. Transformators rada lielu pretestību tikai anoda maiņstrāvas komponentei, turpretī līdzstrāvas komponentei primārā tinuma pretestība ir niecīga. Tādēļ transformatora pastiprinātājā darba punkts atbilst anodspriegumam, kas vienāds ar barošanas spriegumu  $E_a$ . Konstruējot transformatora pastiprinātājpakāpes anoda darba raksturliktni, vispirms atliek darba punktu  $A$  (7-19. zīm.). To nosaka  $E_a$  un tīkliņa priekšspriegums  $E_{g0}$ . Šim punktam atbilst anoda miera strāva  $I_{a0}$ . Otru raksturliktnes punktu var atrast no vienādojuma

$$u_a = E_a - i_a R_s n^2. \quad (7-41)$$

Ja  $u_a = 0$ , tad no šī vienādojuma var izteikt  $i_a = \frac{E_a}{R_s n^2}$ . Piešķaitot šo vērtību strāvai  $I_{a0}$ , uz vertikālās ass iegūst punktu  $M$ . (Sis punkts neatbilst reālam režīmam, jo nevar būt maksimāla anodstrāva pie lampas anodsprieguma  $u_a = 0$ .) Velkot taisni no punkta  $M$  caur darba punktu  $A$  līdz krustpunktam  $N$  ar abscisu asi, iegūst darba raksturliktni. Punkts  $N$  atbilst režīmam, kad lampa aizveras ar



7-19. zīm. Jaudas pastiprinātājpakāpes darbības grafisks attēlojums.

pietiekami lielu negatīvu tīkliņspriegumu. Punktā  $N$  anodspriegums ir lielāks par barošanas spriegumu  $E_a$ . Sis papildu spriegums ir pašindukcijas EDS, kas rodas

transformatora tinumā anodstrāvas izmaiņas rezultātā. Pakāpes lietderīgo jaudu var izteikt šādi:

$$P = \frac{U_{am}}{\sqrt{2}} \cdot \frac{I_{am}}{\sqrt{2}} = \frac{1}{2} U_{am} I_{am}, \quad (7-42)$$

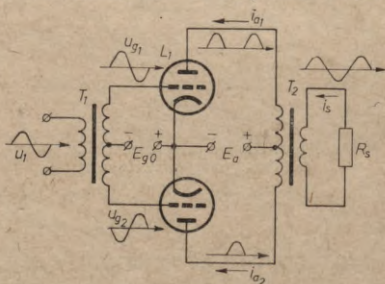
kas grafiskajā attēlā atbilst iesvītrotā trīsstūra  $ADB$  laukumam.

Vienkāršāko gala pakāpi ar vienu lampu jeb t. s. vientakta jaudas pastiprinātāju pielieto, ja izejas jauda nepārsniedz dažus vatus. Šis pakāpes galvenais trūkums ir zems lietderības koeficients

$$\eta = \frac{P}{P_0}, \quad (7-43)$$

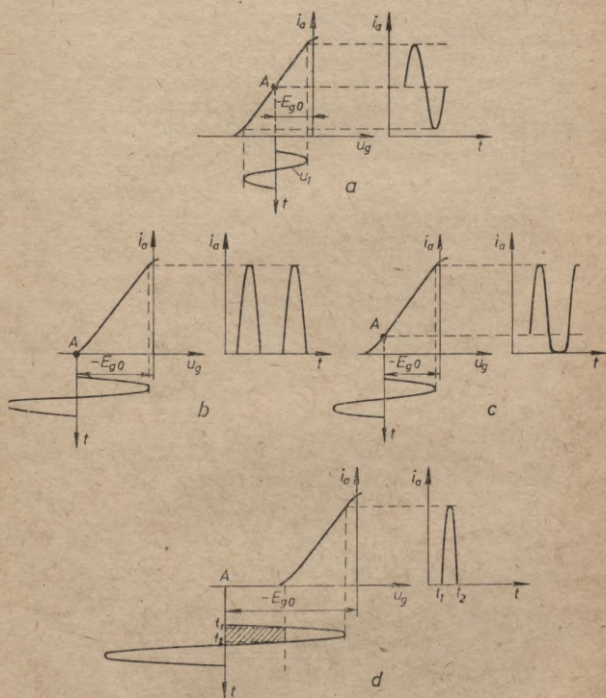
kur  $P_0$  — kopējā jauda, ko pakāpe patērē no barošanas avota. Lai palielinātu izejas pakāpes lietderīgo jaudu  $P$  un lietderības koeficientu  $\eta$ , pielieto divtaktu jeb prettakta izejas pakāpes (7-20. zīm.). Divtaktu izejas pakāpes var darboties īpašos režimos ar lieliem tīkliņa priekšspriegumiem.

Sprieguma pastiprinātājpakāpes un vientakta jaudas pastiprinātājpakāpes darbojas A klases režīmā, kad darba punkts atrodas raksturliknes lineārās daļas vidū, bet signāla amplitūda nepārsniedz pusi no darba posma uz šīs raksturliknes (7-21. zīm. a). Turpretī divtaktu shēmas parasti darbojas B klases režīmā, kad darba punkts atrodas raksturliknes apakšējā punktā un anoda miera strāva  $I_{a0} = 0$ , vai AB režīmā, kad darba punkts atrodas nedaudz



7-20. zīm. Divtaktu izejas pakāpes shēma.

augstāk (7-21. zīm. *b* un *c*). 7-20. zīm. attēlotajā divtaktu slēgumā attiecīgajās shēmas ķēdēs parādītas spriegumu un strāvas oscilogrammas, kas atbilst B klases režīmam. Kā redzams no oscilogrammām, lampas strādā pēc kārtas, katra pastiprinot vienu signāla pusperiodu. Izejas transformatorā šie pusperiodi summējas. Lai lampas darbotos ar  $180^\circ$  nobīdi, uz to ieejām signāls jāpadod



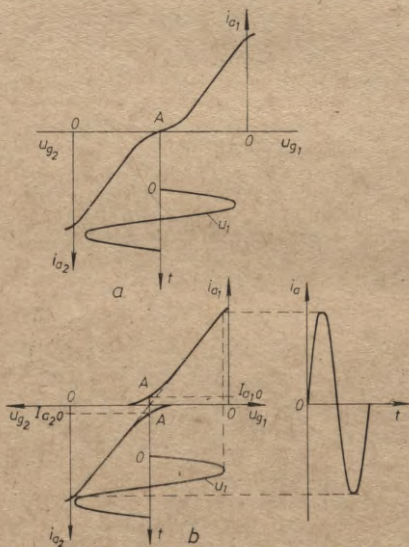
7-21. zīm. Lampas darbība:

*a* — A klases režīmā; *b* — B klases režīmā; *c* — AB klases režīmā; *d* — C un D klases režīmā.

pretfāzē, ko panāk ar fāzgriezēja transformatoru vai speciālu pastiprinātājpakāpi ar divām izejām (sk. 7-9. §).

Divtaktu pakāpes izejas transformatora primārā tinuma pusēs anodu līdzstrāvas komponentes plūst pretējos virzienos un vienas lampas anoda līdzstrāvas komponentes magnetizējošo darbību iznīcina otras lampas anodstrāva. Rezultātā izejas transformatora serdē nerodas magnētiskais piesātinājums un nelineārie kropļojumi, kā tas ir vienkāršā pastiprinātājos ar transformatora izeju. Bez tam izejas transformatorā iznīcinās barošanas sprieguma pulsācijas un nelineāro kropļojumu radītās pārskaitļu augstākās harmoniskās. Slodzē plūst tikai nepārskaitļu harmoniskās, un galvenā no tām ir trešā harmoniskā, kas tad arī nosaka divtaktu pakāpes nelineāros kropļojumus.

A klases režīmu divtaktu izejas pakāpes praktiski ne-



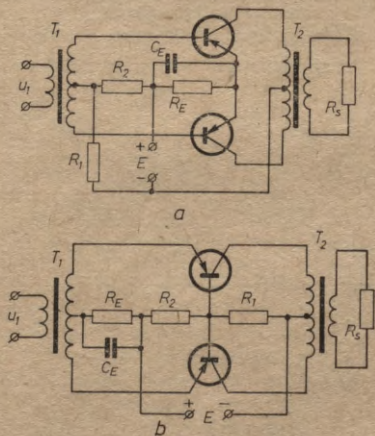
7-22. zīm. Divtaktu pastiprinātājpakāpes summārās raksturlieknes:

a — B klases režīmā; b — AB klases režīmā.

pielieto, jo tam ir zems lietderības koeficients. Visaugstākais lietderības koeficients ir B klases režīmam, kur  $I_{a0} = 0$ , tātad anodstrāva neplūst, ja nav signāla. B klases režīms ir izdevīgs tranzistoru gala pakāpēs, piemēram, pārnēsājamā aparatūrā, kas barojas no autonoma barošanas avota. Tomēr B klases režīmam ir lielāki kropļojumi nekā AB klases režīmam, jo abu lampu summārā raksturlikne ir nelineāra (7-22. zīm.). Bez tam AB un B klases režīmā lampas var darboties tikai ar speciālu priekšspriegumu  $E_{g0}$  avotu. Automātiski priekšspriegumu ar katoda rezistoru nevar iegūt tādēļ, ka  $I_{a0}$  ir niecīga vai arī  $I_{a0} = 0$ .

Praksē pielieto arī pastiprinātājus, kas darbojas C un D klases režīmā (7-21. zīm. d). Šajos pastiprinātājos negatīvais priekšspriegums  $-E_{g0}$  ir lielāks par lampas slēgšanas spriegumu un lampa pastiprina tikai signāla  $u_1$  pozitīvā pusperioda daļu (laikā no  $t_1$  līdz  $t_2$ ).

Tranzistoru divtaktu gala pakāpes pielieto divos variantos — kopemitera vai korbāzes slēgumā (7-23. zīm.).

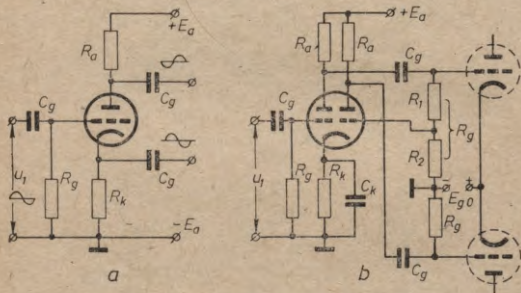


7-23. zīm. Tranzistoru divtaktu gala pakāpes:  
a — kopemitera; b — korbāzes,

Rezistori  $R_1$  un  $R_2$  šajās shēmās darbojas kā sprieguma dalītāji, lai starp bāzi un emiteru radītu nepieciešamo nobīdes spriegumu. Rezistors  $R_E$  ieslēgts režīma stabilizēšanai. Tā kā tranzistoru raksturlieknes un parametri ir visai atšķirīgi, divtaktu shēmai paredzētie tranzistori jāpiemeklē vai arī shēmas simetrizēšanai emitera ķēdē jāieslēdz nelielas pretestības potenciometrs. Tranzistoru divtaktu gala pakāpes, tāpat kā elektronu lampu divtaktu gala pakāpes, var darboties A, B un AB klases režīmos. Tomēr, lai palielinātu lietderības koeficientu, pat mazjaušanas aparatūrā pielieto galvenokārt B un AB klases režīmus. B klases režīms kopemitera slēgumā dod ievērojami lielākus nelineāros kropļojumus nekā kopbāzes shēmā. Tranzistoru gala pakāpes par fāzgriezēju bieži lieto transformatoru, lai gan var lietot arī speciālas tranzistoru fāzgriezēju pakāpes.

### 7-9. Fāzgriezēju pakāpes

Fāzgriezēja pakāpe darbojas kā priekšpakāpe divtaktu gala pakāpei un rada izejā divus vienāda lieluma, bet pretēju fāzu maiņspriegumus. 7-24. zīm. a attēlota vienkār-



7-24. zīm. Fāzgriezēju pakāpes:

a — ar anoda un katoda slodzi; b — ar dubulttriādi.

šākā fāzgriezēja pakāpe ar anoda un katoda slodzi, pie tam  $R_a = R_k$ . Maiņspriegumi no šīm slodzēm caur pārejas kondensatoriem tiek padoti uz divtaktu pakāpes lampu

tikliņiem. Šie spriegumi attiecībā pret nulles potenciāla punktu ir pretējās fāzēs. Galvenais trūkums šai vienkāršākajai fāzgriezēja pakāpei ir tas, ka praktiski nenotiek sprieguma pastiprināšana ( $K_U=1$ ).

7-24. zīm. *b* attēlota fāzgriezēja pakāpe, kas veidota no divām triodēm (praktiski no dubulttriodes). Pirmās triodes pastiprinātais signāls caur pārejas kondensatoru tiek padots uz vienas divtaktu gala pakāpes lampas tikliņu. Šī tikliņa noplūdes pretestību veido rezistori  $R_1$  un  $R_2$ , kas vienlaikus ir sprieguma dalītāji. Neliela tikliņsprieguma daļa no dalītāja apakšējā pleca rezistora  $R_2$  tiek padota atpakaļ uz otrās fāzgriezēja lampas tikliņu. Šo spriegumu otrā fāzgriezēja lampa pastiprina un apvērš fāzē. No otrās fāzgriezēja lampas anoda caur pārejas kondensatoru signālu padod uz gala pakāpes apakšējās lampas tikliņu. Sprieguma dalītājs  $R_1, R_2$  jāizvēlas tā, lai uz abu divtaktu gala pakāpes lampu stūrejošajiem tikliņiem spriegumi būtu vienāda lieluma.

Tranzistoru divtaktu gala pakāpēm signālu parasti pievada caur fāzgriezēja transformatoru. Tādēļ šajā no daļā tranzistoru fāzgriezēju pakāpes iztirzātas netiek.

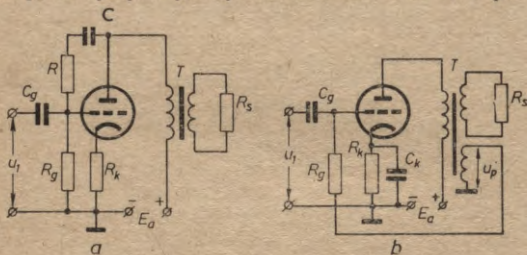
### 7-10. Pretsaite pastiprinātājos

Pastiprinātāju darbības kvalitāti var ievērojami uzlabot, ja lieto pretsaiti, t. i., daļu izejas sprieguma pievada pastiprinātāja ieejai pretējā fāzē salīdzinājumā ar ieejas spriegumu. Pretsaite samazina nelineāros un frekvenču kropļojumus (paplašina pastiprinātāja caurlaides joslu), palielina pastiprinātāja ieejas pretestību un stabilizē pastiprinājuma koeficientu (pretojas temperatūras iespaidam tranzistoru shēmās, barošanas avotā sprieguma svārstībām utt.). Tomēr galvenais pretsaites uzdevums ir samazināt nelineāros kropļojumus. Tā kā nelineārie kropļojumi rodas galvenokārt gala pakāpē, tad tajā arī jāveido pretsaite. Praksē bieži cenšas ar pretsaiti aptvert vairākas pastiprinātājpakāpes un pat visu pastiprinātāju. Tomēr ne vienmēr tas izdodas, jo, kā jau minēts, fāzu kropļojumu dēļ pretsaite pie atsevišķām frekvencēm var pārvērsties līdzsaitē un iestāties ģenerācijas režīms.

7-25. zīm. *a* attēlota pastiprinātājpakāpes shēma ar divām pretsaitēm — sprieguma pretsaiti, kas caur atdali-

tājkondensatoru  $C$  un rezistoru  $R$  padod signāla spriegumu no lampas anoda uz tikliņu, pie tam padotā signāla lielumu nosaka dalītājs  $R, R_g$  (ja kondensatora  $C$  kapacitāte pietiekami liela, turpretī, ja tā nav liela, pretsaite ir atkarīga no frekvences), un strāvas pretsaiti, kuru rada katoda rezistors  $R_k$ , jo tas nav šuntēts ar kondensatoru.

7-25. zīm. *b* attēlota shēma, kurā pretsaites spriegums  $u_p$  tiek ņemts no izejas transformatora papildu tinuma. Ar šādu pretsaiti parasti aptver vairākas pastiprinātājpakāpes, kā arī divtaktu izejas pakāpes. Pretsaite samazina pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientu. Ja  $K$  ir pastip-



7-25. zīm. Gala pakāpes ar pretsaiti.

rinājuma koeficients pakāpei bez pretsaites, tad ar pretsaiti

$$K' = \frac{K}{1 + \beta K}, \quad (7-44)$$

kur  $\beta = \frac{u_p}{u_a}$  — koeficients, kas rāda, kāda izejas maiņsprieguma daļa tiek pievadīta atpakaļ ieejā.

Tātad pastiprinājuma koeficients samazinājies  $1 + \beta K$  reizes. Tikpat reīžu samazinās nelineārie un frekvenču kropļojumi. Nelineārie kropļojumi ir

$$K'_r = \frac{K_r}{1 + \beta K}. \quad (7-45)$$

Lai pastiprinātāja izejas jauda nemainītos, pastiprinājuma koeficienta samazināšanās jākompensē ar ieejas signāla palielināšanu  $1 + \beta K$  reizes, kas atbilst pastiprinātāja ieejas pretestības palielināšanai arī  $1 + \beta K$  reizes.

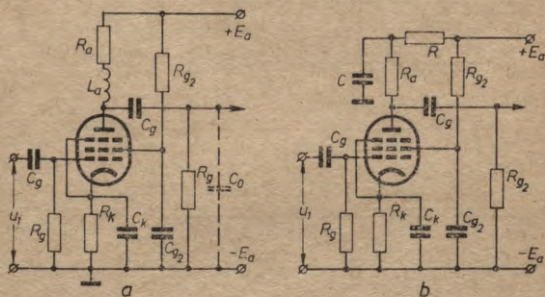
No sacītā redzams, ka pretsaite ievērojami uzlabo pastiprinātāja darbību, tā ir vēlama un pašlaik praktiski tiek lietota visos pastiprinātajos.

### 7-11. Platjoslas pastiprinātāji

Kā jau pierādīts, pārejas kondensatori ierobežo pastiprinātāja frekvenču joslu zemāko, bet parazitiskās kapacitātes — augstāko frekvenču rajonā. Praksē bieži nepieciešams pastiprinātāja caurlaides joslu paplašināt, piemēram, oscilogrāfu pastiprinātajos, kur ar lielu precizitāti jāpastiprina dažādu sarežģītu formu signāli, kas aptver plašu frekvenču spektru.

Lai paplašinātu pastiprinātāja caurlaides joslu, lieto lampas ar lielu stāvumu un mazu ieejas kapacitāti — speciālas platjoslas pentodes, kā arī lieto speciālas korekcijas ķēdes zemākām un augstākām frekvencēm (7-26. zīm.).

7-26. zīm. *a* attēlota pastiprinātājpakāpes augstfrekven-



7-26. zīm. Pastiprinātājpakāpes:

*a* — ar augstfrekvences korekciju; *b* — ar zemfrekvences korekciju.

ces korekcijas shēma, kas paplašina pastiprinātāja frekvenču joslu augstāko frekvenču virzienā. Virknē ar anodslodzes rezistoru  $R_a$  ir ieslēgta korekcijas drosele  $L_a$ . Tā veido paralēlo svārstību kontūru kopā ar šuntējošo kapacitāti  $C_0$  un rezistoru  $R_a$ . Sis kontūrs veido lampas slodzes pretestību augstākās frekvencēs. Sasniedzot kādu noteiktu

frekvenci, kontūrā iestājas strāvas rezonanse, kontūra ekvivalentā pretestība pieaug un līdz ar to pakāpes pastiprinājuma koeficients palielinās.

Lai kontūrā izveidotos rezonanse, rezistora  $R_a$  pretestībai jābūt relatīvi nelielai (simti omu līdz daži kiloomi). Tādēļ platjoslas pastiprinātājpakāpei pastiprinājuma koeficients ir ievērojami mazāks nekā parastajai pastiprinātājpakāpei.

7-26. zīm. *b* attēlota pastiprinātājpakāpes zemfrekvences korekcijas shēma. Korekcijas elementi ir virknē ar anodslodzi ieslēgtais rezistors  $R$  un šuntējošā kapacitāte  $C$ . Kapacitāti izvēlas tādu, lai tās reaktīvā pretestība vidējām un augstākām frekvencēm būtu niecīga, un to var uzskatīt par isslēgumu šo frekvenču signāliem. Tātad vidējām un augstākām frekvencēm pakāpes pastiprinājumu nosaka anodslodzes rezistors  $R_a$ . Turpretī zemām frekvencēm kondensatora  $C$  reaktīvā pretestība ievērojami pieaug. Zemo frekvenču anodstrāva plūst caur virknē slēgtiem rezistoriem  $R_a$  un  $R$ . Pakāpes slodzes pretestība pieaug, un palielinās pastiprinājuma koeficients.

## 7-12. Augstfrekvences šaurjoslu pastiprinātāji

Ļoti daudzās elektroniskās iekārtās nepieciešams, lai pastiprinātājpakāpēm būtu maksimāls pastiprinājums kādā noteiktā šaurā frekvenču diapazonā, bet minimāls — ārpus šī diapazona, piemēram, radiouztvērējos, dažādās mēraparatūrās utt. Šaurjoslu jeb selektīvie pastiprinātāji ļauj noskaņot radiouztvērēju uz noteiktu uztveramās raidstacijas frekvenci, bet pārējās frekvences (raidstacijas un traucējumi) tiek nomāktas.

Parasti šaurjoslu (selektīvie) augstfrekvences pastiprinātāji ar elektronu lampām vai tranzistoriem satur paralēlu svārstību kontūru slodzē. 7-27. zīm. attēlota šāda pastiprinātājpakāpe ar elektronu lampu. Paralēlam svārstību kontūram var aprēķināt ekvivalento pretestību

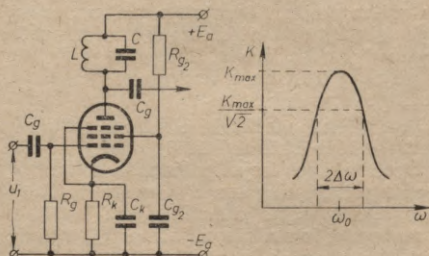
$$R_c = \frac{(\omega_0 L)^2}{r} = \frac{L}{rC}, \quad (7-46)$$

kur  $\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$  — ideāla svārstību kontūra (bez zudumiem) leņķiskā rezonanses frekvence,  
 $r$  — kontūra zudumu pretestība.

Šī kontūra ekvivalentā pretestība ir pastiprinātājpakāpes slodze rezonanses gadījumā. Ja rezonanses nav, svārstību kontūra pretestība samazinās un pakāpes pastiprinājuma koeficients arī samazinās. Pastiprinājuma koeficienta samazināšanās straujums ir atkarīgs no kontūra labuma

$$Q = \frac{\omega_0 L}{r} = \frac{1}{r} \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (7-47)$$

Kontūra labums  $Q$  kopā ar lampas iekšējo pretestību  $R_1$  nosaka pastiprinātājpakāpes frekvenču caurlaides joslu



7-27. zīm. Selektīvas augstfrekvences pastiprinātājpakāpes shēma un frekvenču raksturliktne.

$2\Delta\omega$ , kurā pakāpes pastiprinājums samazinās  $\sqrt{2}$  reizes. Lai lampas iekšējā pretestība neietekmētu kontūra frekvenču raksturliktni, augstfrekvences pastiprinātajos lieto lampas ar iespējami lielāku  $R_1$  — pentodes.

Augstfrekvences šaurjoslas pastiprinātājpakāpes pastiprinājuma koeficients ir

$$\dot{K}_U = \frac{SR_e}{1 + jQ \frac{2\Delta\omega}{\omega_0}}, \quad (7-48)$$

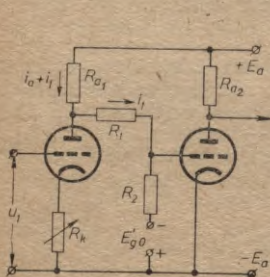
bet rezonanses frekvencei, kad  $\Delta\omega = 0$ ,

$$K_{U \max} = SR_e. \quad (7-49)$$

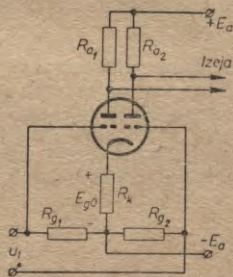
### 7-13. Līdzsprieguma pastiprinātāji

Līdzstrāvas vai līdzsprieguma pastiprināšanai lieto pastiprinātājus ar tiešo jeb galvanisko saiti starp pakāpēm (bez pārejas kondensatoriem). Līdz ar to tiek pārvadīta ne tikai signāla maiņstrāvas, bet arī līdzstrāvas komponente. Šādas pakāpes pastiprina arī ļoti lēni mainīgus signālus. Tomēr līdzsprieguma pastiprinātājpakāpes darbību nosaka ne tikai lietderīgais signāls, bet arī dažādi traucējumi, fluktuācijas un barošanas avota nestabilitāte. Līdz ar to līdzsprieguma pastiprinātājpakāpes izejas spriegums ar laiku mainās pat bez signāla ieejā. Šo parādību sauc par nulles dreifu. Līdzsprieguma pastiprinātājpakāpēs paredz speciālu potenciometru režīma maiņai, ar kuru var kompensēt nulles dreifu. Tranzistoru līdzsprieguma pastiprinātājos nulles dreifs ievērojami lielāks, jo to palielina temperatūras izmaiņas.

7-28. zīm. attēlota vienkārša elektronu lampu līdzsprieguma pastiprinātāja shēma. Pirmās pakāpes izejas potenciāla un otrās pakāpes ieejas potenciāla saskaņošanai šeit lieto speciālu priekšsprieguma  $E'_{g0}$  avotu. Pirmās pakāpes priekšspriegums veidojas automātiski uz katoda rezistora  $R_k$ , kura pretestība ir maināma. Mainot  $R_k$ , mainās pastiprinātāja režīms, līdz ar to var kompensēt nulles dreifu. Tā kā pirmās pakāpes pastiprinātais signāls tiek padots



7-28. zīm. Līdzsprieguma pastiprinātājpakāpe ar potenciometrisku saiti.



7-29. zīm. Līdzsprieguma pastiprinātājpakāpe pēc balansa shēmas.

uz otro pakāpi caur potenciometrisku sprieguma dalītāju, kopējais pastiprinājuma koeficients ir

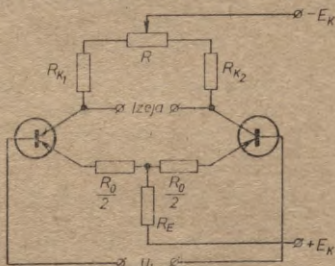
$$K_U = \gamma K_{U1} K_{U2}, \quad (7-50)$$

kur  $\gamma = \frac{R_1}{R_1 + R_2}$  — sprieguma dalījuma koeficients,

$K_{U1}$  un  $K_{U2}$  — pirmās un otrās pakāpes pastiprinājuma koeficienti.

Ievērojami mazāku nulles dreifu rada līdzsprieguma pastiprinātāji, kas veidoti pēc balansa shēmas (7-29. zīm.). Šeit lampas slēgtas paralēli un katodiem ir kopīgs rezistors  $R_k$ . Ieejas signālu padod starp abu lampu stūrējošiem tīkliņiem. Līdz ar to signāls uz vienas lampas tīkliņa summējas ar priekšspriegumu  $E_{g0}$ , bet uz otras lampas tīkliņa samazina to. Tātad signāls vienai lampai strāvu samazina, bet otrai palielina par tādu pašu lielumu. Izejas spriegums tiek noņemts starp abu lampu anodiem. Balansa shēmā nulles dreifs ievērojami samazināts, jo barošanas avota nestabilitāte un fluktuācijas rada uz abu lampu anodiem vienādas zīmes maiņu, bet spriegumu starpību starp anodiem nemaina.

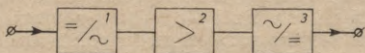
Tranzistoru līdzstrāvas pastiprinātāji (emitera atkārtotāja shēmas) ir visai stabili un apskatīti 10. nodaļā. Turpretī pusvadītāju līdzsprieguma pastiprinātāji ir ļoti nestabili. Tajos jāparedz speciālas temperatūras kompensācijas shēmas (parasti ar termorezistoriem) un barošanas avota stabilizācijas shēmas. Tādēļ parastas tranzistoru līdzsprieguma pastiprinātājpakāpes nav izplatītas. Pielieto tikai balansa līdzsprieguma pastiprinātājus (7-30. zīm.).



7-30. zīm. Tranzistoru līdzsprieguma pastiprinātājpakāpe pēc balansa shēmas.

Seit, līdzīgi iepriekš apskatītajai shēmai, nestabilitātes, kas rodas vienlaikus abās pakāpēs, izejas spriegumu neiespaido. Pastiprināmo signālu padod starp abu tranzistoru bāzēm. Shēmas sākotnējai simetrizēšanai izmanto potenciometru  $R$ .

Diezgan bieži līdzsprieguma (lēni mainīgu signālu) pastiprināšanai lieto stabilus maiņstrāvas pastiprinātājus.



7-31. zīm. Pārveidotāja tipa līdzsprieguma pastiprinātāja blokshēma:

1 — modulators, 2 — maiņstrāvas pastiprinātājs,  
3 — detektors.

Sajā gadījumā pastiprināmo signālu ar modulatoru pārveido maiņspriegumā, kura amplitūda proporcionāla signālam, pastiprina un pēc tam detektorā atkal pārvērš līdzspriegumā (7-31. zīm.). Par modulatoriem lieto vibropārveidotājus vai tranzistoru pārveidotājus. Tā kā maiņstrāvas pastiprinātājiem ir stabils pastiprinājuma koeficients, izejas signāls ar lielu precizitāti ir proporcionāls ieejas signālam.

## 8. nodaļa

# HARMONISKO SVĀRSTĪBU ĢENERATORI

### 8-1. Vispārīgas ziņas

Par harmonisko svārstību ģeneratoru sauc iekārtu, kuras pamatelements ir elektronu lampa vai pusvadītāju ierīce un kas līdzstrāvas vai maiņstrāvas enerģiju pārveido noteiktas frekvences sinusoidālās svārstībās. Svārstību ģeneratorus raksturo to galvenie parametri: frekvence, jauda, lietderības koeficients, frekvences stabilitāte un svārstību forma. Ģeneratorus var izveidot ļoti plašā frekvenču diapazonā — no Hz desmitdaļām līdz GHz tūkstošiem. Arī ģeneratoru jauda var svārstīties ļoti plašās robežās — no  $\mu\text{W}$  desmitdaļām līdz MW tūkstošiem. Šai nodaļā tiek apskatīti tikai sinusoidālu svārstību ģeneratori.

Izšķir svešierosmes un pašierosmes harmonisko svārstību ģeneratorus. Svešierosmes ģeneratori harmoniskās svārstības ģenerē tad, ja to ieejā darbojas kāds maiņspriegums. To uzbūves pamatā ir rezonanses pastiprinātājs. Pašierosmes ģeneratori ir pastiprinātāji ar līdzsaiti vai negatīvu pretestību. Tie harmoniskās svārstības ģenerē bez ārējā maiņsprieguma iedarbes.

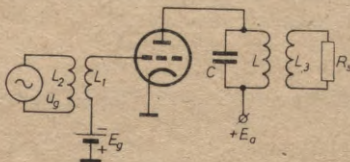
Harmonisko svārstību ģeneratorus plaši lieto ne tikai radiotehnikā un mērtehnikā, bet arī daudzās citās zinātnes un rūpnieciskās ražošanas nozarēs.

### 8-2. Svešierosmes ģeneratori

Svešierosmes ģeneratoru uzbūves pamatā parasti ir vienkāpes rezonanses pastiprinātājs, kam izejas ķēdē ieslēgts paralēlais svārstību kontūrs. Šādus ģeneratorus bieži sauc par sinusoidālo svārstību LC tipa ģeneratoriem.

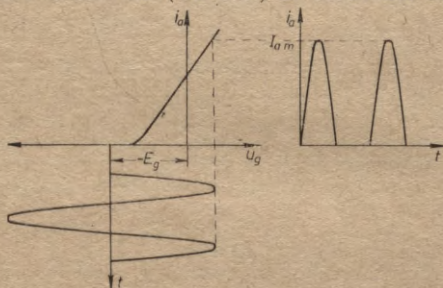
8-1. zīm. attēlota vienkāršākā lampu svešierosmes LC ģenerators shēma.

Lampas tīkliņķēdē ieslēgts negatīvas nobīdes  $E_g$  avots, kas nodrošina lampas darbību C vai D klases pastiprinājuma režīmā. Bez tam vēl lampas tīkliņķēdē darbojas



8-1. zīm. Lampu svešierosmes LC ģenerators.

maiņspriegums  $u_g = U_g \sin \omega t$ . Lampas anodu baro sprieguma  $E_a$  avots cauri induktivitātei  $L$ , kas līdzstrāvai rada necīgu pretestību. Līdz ar to lampas anodķēdē plūst impulsveida anodstrāva (8-2. zīm.) ar maksimālo amplitūdu



8-2. zīm. Lampu LC ģenerators spriegumu un strāvu laika diagrammas.

$I_{a\ m}$ . Izvirzot šāda anodstrāvas impulsa analitisko izteiksmi Furjē rindā, var pārliecināties, ka anodstrāva satur līdzstrāvas komponenti  $I_{a\ 0}$  un bezgalīgu virkni maiņstrāvas komponentu (harmonisko):  $I_{a\ 1m} \sin \omega t$ ,  $I_{a\ 2m} \sin 2\omega t$ , ...  $I_{a\ nm} \sin n\omega t$ . Ja, piemēram, svārstību kontūru noskaņo re-

zonansē ar pirmo anodstrāvas harmonisko, t. i.,  $\omega = \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$ , tad kontūram ir maksimālā pretestība šīs harmoniskās strāvai:  $Z_0 = R_0 = \frac{L}{Cr}$ , kur  $r$  — induktivitātes aktīvā pretestība. Pārējām strāvas harmoniskajām kontūra pretestība strauji krīt, par ko liecina izteiksme

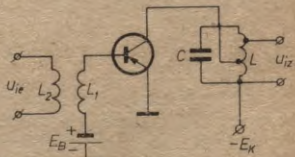
$$Z_n = \frac{R_0}{Q} \cdot \frac{n}{n^2 - 1}, \quad (8-1)$$

kur  $Z_n$  — kontūra pretestība  $n$ -tai harmoniskajai,  $Q$  — kontūra labums,  $n$  — harmoniskās kārtā. Līdzstrāvas komponentei kontūra pretestība tuva nullei. Tātad izejas ķēdes svārstību kontūrā praktiski rodas tikai anodstrāvas pirmās harmoniskās radītais sinusoidālais spriegums  $u = I_{a1m} R_0 \sin \omega_0 t$ , ko induktīvā ceļā pārvada uz slodzes rezistoru  $R_s$ . Pārējo anodstrāvas harmonisko radītie spriegumi uz kontūra ir ļoti niecīgi, un tos var neievērot.

Ja svārstību kontūru noskaņo uz vienu no augstākajām harmoniskajām, tad iegūst t. s. frekvenču reizinātāju (daudzskāršotāju).

Tranzistoru svešierosmes harmonisko svārstību ģeneratori principā neatšķiras no lampu ģeneratoriem. Praktiski izmanto gandrīz tikai kopemitera slēgumus, jo tie nodrošina vislielāko jaudas pastiprinājumu un ir precīzāk aprēķināmi. Atšķirīga īpatnība tranzistoru slēgumiem ir tā, ka svārstību kontūru kolektora ķēdē slēdz daļēji, jo to šuntē samērā zema tranzistora izejas pretestība. Jāpiezīmē, ka tranzistoram eksistē spēcīga iekšējā atgriezeniskā saite, kas izraisa tā nestabilu darbību un dažreiz arī pašierosmi. Šis parazītsvārstības pazemina ģeneratora enerģētiskos rādītājus un pasliktina izejas sprieguma spektru.

8-3. zīm. redzams kopemitera svešierosmes sinusoidālo svārstību LC tipa ģeneratora slēgums. Tā darbības princips analogs lampu slēgumam. Vienīgi rezonanses kontūrs kolektora ķēdē ir slēgts autotransformatora veidā, lai gan to var slēgt arī transformatora veidā.

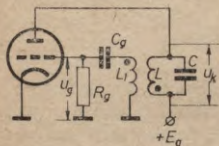


8-3. zīm. Kopemitera svešierosmes LC ģenerators.

### 8-3. Pašierosmes ģeneratori

Lai iegūtu svārstību ģeneratoram pašierosmes režīmu, starp tā izejas un ieejas ķēdēm jāizveido līdzsaite. Šo līdzsaiti var realizēt gan ar induktivitāšu un kondensatoru palīdzību, gan arī ar kondensatoru un rezistoru palīdzību. Ģeneratorus, kuros realizēta pirmā tipa līdzsaite, sauc par pašierosmes *LC* ģeneratoriem, bet ģeneratorus ar otru tipa līdzsaiti — par pašierosmes *RC* ģeneratoriem.

**Pašierosmes *LC* ģeneratori.** Šāda tipa ģeneratoru ļoti vienkārši iegūt no svešierosmes *LC* ģeneratora, izveidojot līdzsaiti starp tā tīkliņa vai bāzes un anoda vai kolektora ķēdēm. Saiti var izveidot transformatora, autotransformatora vai kapacitātes veidā.



8-4. zīm. Lampu pašierosmes transformatora saites *LC* ģenerators ar svārstību kontūru anodķēdē.

8-4. zīm. redzams lampu pašierosmes transformatora saites *LC* ģenerators ar svārstību kontūru anodķēdē. Pieslēdzot shēmai anodsprieguma  $E_a$  avotu, svārstību kontūra kondensators  $C$  uzlādējas un kontūrā sākas rimstošas svārstības, ja vien kontūra aktīvā parazitiskā pretestība

$r < 2 \sqrt{\frac{L}{C}}$ . Šo pašsvārstību leņķiskā frekvence ir

$$\omega = \sqrt{\frac{1}{LC} - \frac{r^2}{4L^2}}. \quad (8-2)$$

Ja pietiekami augsts kontūra labums, tad  $\frac{r^2}{4L^2} \ll \frac{1}{LC}$  un var uzskatīt, ka kontūra pašsvārstību frekvence  $\omega$  aptuveni vienāda ar tā rezonanses frekvenci  $\omega_0$ :

$$\omega \approx \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}. \quad (8-3)$$

Svārstību strāva, plūstot cauri kontūra induktivitātei  $L$ , inducē EDS tīkliņķēdes induktivitātē  $L_1$ . Tā kā šis EDS ir nobīdīts fāzē par  $\pi$  attiecībā pret anodstrāvas maiņkomponentes radīto spriegumu uz induktivitātes  $L$  (iestāties fāzu balanss), tad atgriezeniskā saite ir pozitīva (līdzsaite) — anodstrāvas maiņkomponente pastiprina tīkliņa

svārstību kontūra strāvu, kas savukārt izraisa tīkliņa maiņsprieguma pieaugumu utt. Tomēr anodstrāvas maiņkomponente nevar augt bezgalīgi, jo reālai lampas anodtīkliņa raksturliknei, palielinoties tīkliņspriegumam, samazinās raksturliknes stāvums. Tādēļ, kad anodstrāvas amplitūda sasniedz zināmu vērtību (to sauc par amplitūdu balansu), tās pieaugums izbeidzas un iestājas nerimstošu svārstību režīms.

No teiktā izriet, ka pašerosmes LC ģeneratoru var izveidot no rezonanses pastiprinātāja, kam izeja savienota ar ieeju (šai gadījumā ar transformatora saiti). Var pierādīt, ka svārstību process shēmā rodas, ja

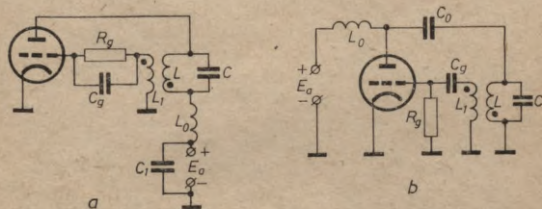
$$K_V \beta > 1, \quad (8-4a)$$

kur  $K_V$  — pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients,  
 $\beta$  — atgriezeniskās saites koeficients.

Iestājoties stacionārām svārstībām,

$$K_V \beta = 1. \quad (8-4b)$$

Eksistē divi lampu LC ģeneratoru anodķēžu barošanas veidi — virknes (8-5. zīm. a) un paralēlais (8-5.



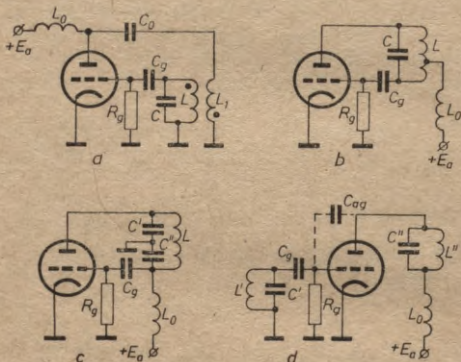
8-5. zīm. Lampu LC ģeneratoru anodķēžu barošana:  
 a — virknes; b — paralēlā.

zīm. b). Pirmajā gadījumā anodstrāva plūst no  $E_a$  avota cauri svārstību kontūram un lampai. Lai maiņstrāvas komponente nenonāktu  $E_a$  avotā, to parasti nošuntē ar lielas kapacitātes kondensatoru  $C_1$  un virknē ar avotu slēdz lielu inductivitāti  $L_0$ .  $E_a$  avota negatīvo spaili parasti

iezemē, tādēļ svārstību kontūram ir augsts pozitīvs potenciāls attiecībā pret zemējumu.

Otrajā gadījumā anodķēdes barošanas sprieguma  $E_a$  avots ieslēgts paralēli svārstību kontūram. Lamps anodstrāvas maiņkomponentē noslēdzas caur  $C_0$  un svārstību kontūru, bet  $E_a$  avotam cauri to nelaiž drosele  $L_0$ . Savukārt līdzstrāvas komponentei noslēgties caur svārstību kontūru neļauj atdalītājkondensators  $C_0$ .

Lai iegūtu augstāku lietderības koeficientu, lampu pašierosmes LC ģeneratorus parasti darbina B vai C klases režīmos. Šiem režīmiem nepieciešamo negatīvo priekšspriegumu iegūst ar tīkliņķēdē ieslēgtajiem elementiem  $R_g$  un  $C_g$  (8-5. zīm.). Laika intervālā, kad līdzsaite tīkliņķēdē plūst strāva, kuras līdz-



8-6. zīm. Lampu pašierosmes LC ģeneratoru slēgumu veidi:

*a* — slēgums ar transformatora saiti un svārstību kontūru tīkliņķēdē; *b* — induktīvais trīspunktu slēgums; *c* — kapacitatīvais trīspunktu slēgums; *d* — divu svārstību kontūru slēgums.

strāvas komponente uz rezistora  $R_g$  rada sprieguma kritumu, kas ir negatīvs attiecībā pret tīkliņķēdi.

Pašierosmes ģeneratora slēgums ar svārstību kontūru anodķēdē nav vienīgais. Bez šī slēguma eksistē vēl četri citi pamatslēgumu veidi (8-6. zīm.).

Slēgums ar transformatora saiti un svārstību kontūru tīkliņķēdē no iepriekšējā atšķiras tikai ar svārstību kontūra ieslēgšanas vietu (8-6. zīm. a).

Induktīvajā trīspunktu slēgumā (8-6. zīm. b) svārstību kontūrs pievienots lampas trīs elektrodiem (ja uzskata, ka anoda barošanas sprieguma  $E_a$  avots maiņstrāvas komponentei praktiski veido īsslēgumu). Kontūra svārstību polaritāte abos spoles galos vienmēr ir pretfāzē, tādēļ atgriezeniskā saite saglabā fāzu balansu. Amplitūdu balansu iegūst, regulējot saites ciešumu (mainot spoles nozarojuma vietu).

Kapacitatīvajā trīspunktu slēgumā (8-6. zīm. c) nozarojumu iegūst no kontūra kapacitatīvā zara, sadalot kondensatoru  $C$  divos kondensatoros  $C'$  un  $C''$ , pie tam

$$C = \frac{C'C''}{C'+C''} \quad (8-5)$$

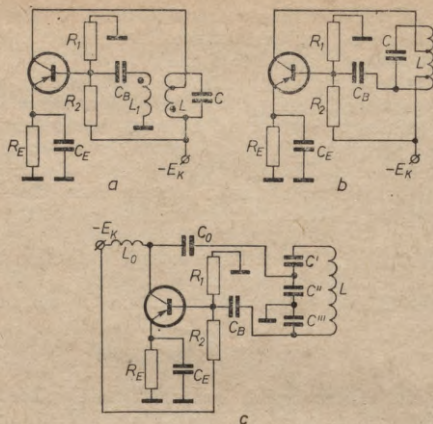
Amplitūdu balansu iegūst, mainot  $C'$  un  $C''$  attiecību.

Visās minētajās shēmās ģeneratoru svārstību frekvences nosaka izteiksme (8-3).

Divu svārstību kontūru slēgums (8-6. zīm. d) ir reducējams uz induktīvo trīspunktu slēgumu. Kontūrus  $L'C'$  un  $L''C''$  parasti noskaņo rezonansē ar frekvenci, kas ir nedaudz augstāka par ģeneratora ģenerēto svārstību frekvenci. Tādā gadījumā abiem kontūriem ir induktīva rakstura reaktance (reaktīvā pretestība) un tie it kā izveido 8-6. zīm. b attēlotā slēguma svārstību kontūra induktīvītāti  $L$ . Svārstību kontūra kapacitāti ( $C$ ) veido lampas tīkliņa — anoda parazitiskā kapacitāte  $C_{a.g.}$  Amplitūdu balansu iegūst, mainot atsevišķo kontūru parametrus.

Tranzistoru pašierosmes  $LC$  ģeneratoru shēmas (8-7. zīm. a, b, c) ārēji stipri līdzīgas attiecīgajām lampu ģeneratoru shēmām. Atšķirības kļūst lielākas, palielinoties ģenerējamo svārstību frekvencei. Te atgriezenisko saiti realizē kā strāvas līdzsaiti. Kā jau minēts, tranzistora zemās izejas pretestības dēļ svārstību kontūru kolektora ķēdē slēdz daļēji. Lai palielinātu ģenerējamo svārstību jaudu, tranzistoru darbina B vai C klases režīmā. Darba punktu uz tranzistora raksturliknes iestāda ar automātiskās nobīdes elementiem ( $R_E$  un  $C_E$ ) un rezistoru sprieguma dalītāju ( $R_1, R_2$ ) bāzes ķēdē.

Tranzistoru pašierosmes ģeneratoros dažreiz lieto arī korbāzes slēgumu (8-8. zīm.). Bāzi maiņstrāvas kompo-

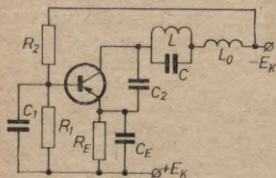


8-7. zīm. Tranzistoru pašierosmes LC ģeneratori: a — ar transformatora saiti un svārstību kontūru kolektora ķēdē; b — ar induktīvo trīspunktu slēgumu; c — ar kapacitatīvo trīspunktu slēgumu.

nentei izemē kondensators  $C_1$ , bet kondensators  $C_2$  realizē līdzsaiti.

Tranzistoru pašierosmes ģeneratoru shēmas stabili darbojas tikai tad, ja netiek pārsniegta tranzistora robežfrekvence. Ja ģenerējamo svārstību frekvence tuvojās tranzistora robežfrekvencei, tranzistoros rodas fāzu nobīde, kas

izjauc ģeneratora fāzu balansu. Šo fāzu nobīdi var zināmā mērā kompensēt ar reaktīvu vai aktīvu elementu ģeneratora līdzsaites ķēdē. Sādās augstās frekvencēs daudz stabilāk darbojas korbāzes slēgumi.



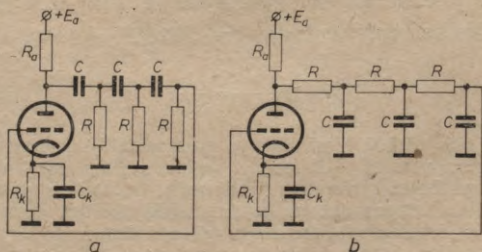
8-8. zīm. Korbāzes pašierosmes LC ģenerators.

**Pašierosmes RC ģeneratori.** Ģenerējot harmonis-

kās svārstības toņfrekvenču (skaņu frekvenču) diapazonā,  $LC$  tipa ģeneratoru svārstību kontūra induktivitātei un kapacitātei jābūt ar samērā lielām vērtībām. Šādu vērtību induktivitātēm un kapacitātēm ir lieli izmēri, tādēļ harmonisko svārstību ģenerēšanai toņfrekvenču un vēl zemāku frekvenču (līdz Hz daļām) diapazonā parasti izdevīgāk lietot  $RC$  tipa ģeneratorus. Tie nodrošina stabilu harmonisko svārstību iegūšanu plašā frekvenču joslā — no Hz daļām līdz MHz.

$RC$  tipa ģeneratoros par slodzi izmanto rezistoru, bet līdzsaiti realizē ar kāpņveida ķēdi vai tiltu, kas ietver rezistorus un kondensatorus. To izmēri, svars un pašizmaksas ir mazākas nekā  $LC$  tipa ģeneratoriem, pie tam šīs priekšrocības sevišķi izpaužas zemo frekvenču diapazonā.

Visvienkāršākie  $RC$  ģeneratori ir vienlāmpas ģeneratori. Tajos līdzsaiti visbiežāk realizē ar  $RC$  kāpņveida ķēdi vai retāk ar T-veida tiltu. Vienpakāpes rezistorpastiprinātājā (ar anodslodzi) starp ieejas un izejas spriegumiem rodas fāzu nobīde  $\varphi(\omega) = \pi$ . Tādēļ atgriezeniskajai saitei, kas ieslēgta starp šī pastiprinātāja izeju un ieeju, fāzē jāpagriež par  $\pi$ . To var panākt ar  $RC$  kāpņveida ķēdi. Vienkāršāko vienpakāpes  $RC$  ģeneratoru slēgumi redzami 8-9. zīm. 8-9. zīm. *a* parādīts slēgums ar virknē slēgtiem  $C$ , bet 8-9. zīm. *b* — ar virknē slēgtiem  $R$ . Tā kā kāpņveida ķēdē rodas sprieguma zudumi, tad, lai saglabātos amplitūdas balanss, lampai šie zudumi jākompensē. Realizēt fāzu balansu shēmā ar vienu vai diviem kāpņveida ķēdes posmiem nevar, jo viens posms spēj nobīdīt sprieguma fāzi



8-9. zīm. Lāmpu vienpakāpes pašierosmes  $RC$  ģeneratori:  
*a* — ar virknē slēgtiem  $C$ ; *b* — ar virknē slēgtiem  $R$ .

tikai par lielumu  $\varphi < \frac{\pi}{2}$ , bet līdzsaitei sprieguma fāze jānobīda par lielumu  $\varphi = \pi$ . Lietojot līdzsaitē, piemēram, trīs  $RC$  posmus un izvēloties to parametrus tā, lai katrs posms sprieguma fāzi nobīdītu par  $\varphi' = \frac{\pi}{3}$ , var panākt, ka visa kāpņveida ķēde nodrošina fāzu nobīdi starp spriegumiem pastiprinātāja izejā un ieejā par lielumu  $\pi$ . Jāpiezīmē, ka ikviena  $RC$  posma radītais sprieguma fāzu nobīdes lielums ir atkarīgs no šī sprieguma frekvences.

Var pierādīt, ka 8-9. zīm.  $a$  slēgums ģenerē harmoniskas svārstības ar frekvenci

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{6}RC}, \quad (8-6)$$

bet slēgums 8-9. zīm.  $b$  — ar frekvenci

$$\omega_0 = \frac{\sqrt{6}}{RC}. \quad (8-7)$$

Sādu slēgumu pašierosmes nosacījums ir

$$K(\omega) \cdot \beta(\omega) \geq 1, \quad (8-8)$$

kur  $K(\omega)$  — pastiprinātāja pakāpes sprieguma pastiprinājuma koeficients,

$\beta(\omega)$  — atgriezeniskās saites sprieguma pārvades koeficients.

Var pierādīt, ka abu tipu kāpņveida ķēžu sprieguma pārvades koeficients ir  $\beta(\omega) = -\frac{1}{29}$ . Tādēļ

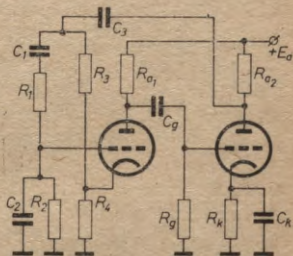
$$K(\omega) \geq \frac{1}{\beta(\omega)} = -29, \quad (8-9)$$

un shēmas strādā tikai tad, ja pastiprinātājs spriegumu pastiprina vismaz  $-29$  reizes (mīnusa zīme norāda uz izejas un ieejas spriegumu pretfāzēm). Svārstības parasti noņem no lampas anoda. Automātiskās nobīdes elementi  $R_k$  un  $C_k$  iestāda pastiprinātāja darba režīmu.

Vienpakāpes  $RC$  ģeneratoros līdzsaiti var realizēt arī ar izskaņotu dubult-T-veida tiltu, kas nodrošina sprieguma fāzu nobīdi  $\pi$ .

Divpakāpju RC ģeneratoros līdzsaiti parasti realizē ar Vina tiltu (8-10. zīm.). Tas nodrošina pašierosmes nosacījumus tikai vienai noteiktai frekvencei. Tilta, kas sastāv no elementiem  $C_1$ ,  $C_2$ ,  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$  un  $R_4$ , ieejai caur kondensatoru  $C_3$  pievada spriegumu no labējās pastiprinātāja pakāpes izejas (anoda). Tilta izejas spriegumu pievada kreisās pastiprinātāja pakāpes ieejai (tikliņam). Ģeneratoram fāzu balansu nodrošina tas, ka tilta balansā gadījumā (kādai noteiktai frekvencei  $\omega_0$ ) fāzu nobīdes starp Vina tilta ieejas un izejas spriegumiem nav. Amplitūdas balansu panāk, izvēloties atbilstošus  $R_3$  un  $R_4$  lielumus.

Var pierādīt, ka slēgums ģenerē harmoniskās svārstības ar frekvenci



8-10. zīm. Lampu divpakāpju pašierosmes RC ģenerators.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{C_1 C_2 R_1 R_2}} \quad (8-10)$$

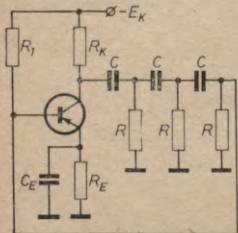
Tā pašierosmes nosacījumi atbilst izteiksmei (8-8), kur

$$\beta(\omega_0) = \frac{1}{\frac{C_2}{C_1} + \frac{C_2 R_1}{C_1 R_2} + 1} \quad (8-11)$$

Slēgumā izmantotais divpakāpju rezistorpastiprinātājs nespēj nodrošināt lielu pastiprinājuma koeficientu  $K(\omega)$ , jo, lai palielinātu labējās pakāpes pastiprinājuma koeficientu, jāpalielina šīs pakāpes anodslozdes rezistors  $R_{a_2}$ , bet tā lielumu savukārt nosaka tilta rezistori  $R_3$  un  $R_4$ . Palielinot  $R_{a_2}$ , jāpalielina arī  $R_3$  un  $R_4$ , taču  $R_4$  palielināšana rada pastiprinātāja kreisās pakāpes pastiprinājuma koeficienta stipru pazemināšanos (pretsaites pieaugums). Ja turpretī cenšas paaugstināt kreisās pakāpes pastiprinājuma koeficientu (samazinot  $R_4$ ), tad samazinās labējās pakāpes pastiprinājuma koeficients. Optimālie rezultāti sasniedzami, ja katras pakāpes pastiprinājuma koeficients ir ap 9—10. Līdz ar to  $K(\omega_0) = 90 \div 100$ .

Ģenerēto spriegumu parasti aizvada no labējās pakāpes anoda.

Tranzistoru  $RC$  ģeneratoru shēmas ir līdzīgas lampu ģeneratoru shēmām. Tā kā tranzistoram ieejas pretestība stipri zemāka nekā lampai, tā iespaido fāzes nobīdes ķēdes darbību. Izteiksmēs, kas nosaka ģenerēto harmonisko svārstību frekvenci un vajadzīgo pakāpes sprieguma pastiprinājuma koeficientu, ietilpst arī tranzistora ieejas un izejas pretestības.



8-11. zīm. Tranzistoru vienkāpes pašierosmes  $RC$  ģenerators.

8-11. zīm. attēlots tranzistoru vienkāpes  $C$  virknes  $RC$  ģenerators slēgums. Elementi  $C_E$ ,  $R_E$  un  $R_1$  ieregulē tranzistora darba punktu raksturlienes lineārajā daļā. Ģenerēto svārstību frekvenci nosaka izteiksme

$$\omega_0 \approx \frac{1}{RC\sqrt{3(1+a)}} \quad (8-12)$$

kur  $a = \frac{r_{ie}}{r_{ie} + R}$  un

$r_{ie}$  — tranzistora ieejas pretestība.

Ģenerators atgriezeniskās saites strāvas pārvades koeficients

$$\beta \approx \frac{1}{h_{21}}, \quad (8-13)$$

bet vajadzīgais pakāpes pastiprinājums

$$h_{21} \approx 23 + \frac{29R}{R_K} + \frac{4R_K}{R} \quad (8-14)$$

Ja tranzistora faktiskais pastiprinājums ir lielāks, tranzistora raksturlienes liekuma dēļ tiek ierobežota ģenerēto svārstību amplitūda, kas savukārt rada ģenerēto svārstību kropļojumus.

#### 8-4. Pašierosmes ģeneratoru frekvences stabilizācija

**Destabilizējošie faktori.** Praksē ļoti bieži ir vajadzīgi pašierosmes harmoniskie ģeneratori ar ļoti stabilu ģenerēto svārstību frekvenci. Tā, piemēram, radiofonijas vidējo

un garo viļņu raidītāju nesējfrekvencei novirze nedrīkst pārsniegt 0,02—0,001%. Ļoti stabilas frekvences ģeneratori vajadzīgi arī daudzās mēriekārtās.

Ģenerēto svārstību frekvenci galvenokārt nosaka ģeneratora svārstību sistēmas pašsvārstību frekvence (šīs frekvences nav vienādas!).  $LC$  ģeneratora svārstību sistēmas pašsvārstību frekvenci ietekmē ne tikai svārstību kontūra spoles induktivitāte un kondensatora kapacitāte, bet arī šai sistēmai pievienotie reaktīvie elementi: lampas vai tranzistora ieejas, izejas un caurejošās reaktances un shēmas palīgķēžu reaktances (bloķējošie un atdalītājkondensatori, droseles utt.). Dažādu destabilizējošu faktoru iedarbība uz šiem elementiem izraisa ģenerētās frekvences maiņu, ko raksturo ar relatīvo nestabilitāti

$$\sigma = \frac{\Delta\omega}{\omega}, \quad (8-15)$$

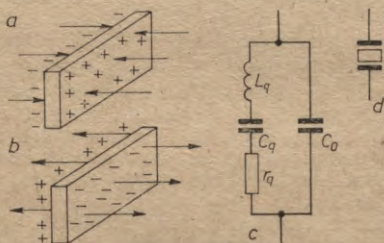
kur  $\Delta\omega$  — absolūtā novirze no vajadzīgās frekvences.

Pie destabilizējošiem faktoriem pieder temperatūras, mitruma pakāpes un gaisa spiediena maiņas, mehāniska iedarbe (vibrācijas), kapacitāšu lieluma maiņa starp shēmas elementiem un apkārtējās vides priekšmetiem, lampas vai tranzistora darba režīma maiņa barojošo spriegumu nestabilitātes dēļ utt.

**Stabilizācijas paņēmieni.** Lai stabilizētu ģeneratora svārstību frekvenci, vispirms jāpanāk tā shēmas elementu parametru pastāvīgums — jāveic parametriskā stabilizācija. Piemēram, apkārtējās vides temperatūras maiņa rada spoļu un kondensatoru ģeometrisko izmēru un šajos elementos ietilpstošo izolatoru dielektrisko konstanšu izmaiņas, kas savukārt ietekmē svārstību sistēmas parametrus. Minēto trūkumu novērš ar īpašām šo elementu konstrukcijām un kompensācijas paņēmieniem. Elementus izgatavo no speciāliem materiāliem un cenšas panākt, lai kondensatora kapacitātes izmaiņa  $\Delta C$  un spoles induktivitātes izmaiņa  $\Delta L$ , ko rada temperatūras maiņa par  $1^\circ\text{C}$ , būtu pēc iespējas mazākas un ar savstarpēji pretējām zīmēm, jo tādā gadījumā temperatūras izraisītās parametru svārstības savstarpēji kompensējas.

Gaisa mitruma iespaidu novērš, elementus hermetizējot vai arī piesūcinot ar vaskveida vielām, bet apkārtejo priekšmetu un shēmas elementu kapacitāti likvidē ar iezēmētu ekrānu, kas aptver ģeneratoru.

Pašerosmes ģeneratoros, kam svārstību frekvence  $f \geq 10^5$  Hz, izmanto t. s. kvarca stabilizāciju. Šai gadījumā par svārstību sistēmu izmanto attiecīgi slīpētu kvarca plati. Šis kvarca plates izgriež no kvarca heksagonālas formas kristāla noteiktā leņķī attiecībā pret kristāla elektriskajām un mehāniskajām asīm, kā arī optisko asi. Šādai platei piemīt tiešais un apgrieztais pjezoelektriskais efekts. Plati mehāniski saspiežot (8-12. zīm. *a*), uz tās sānu plaknēm parādās dažādu zīmju elektriskie lādiņi. Kopējā lādiņa lielums ir proporcionāls deformējošam spēkam. Plati mehāniski stiepjot (8-12. zīm. *b*), elektrisko lādiņu zīmes uz sānu plaknēm mainās uz pretējo. Ja šādu plati ievieto elektriskajā laukā, tad tā saraujas vai izplešas atkarībā no elektriskā lauka virziena. Mainīgā elektriskā laukā pla-



8-12. zīm. Pjezokvarcs:

*a* — pjezoelektriskais efekts, plati saspiežot; *b* — pjezoelektriskais efekts, plati izstiepjot; *c* — kvarca ekvivalentā shēma; *d* — kvarca shematiskais apzīmējums.

tes izmēri svārstīsies ar šī lauka frekvenci. Ja ārējā lauka elektriskā frekvence sakrīt ar kvarca plates mehāniskās rezonanses frekvenci, plates mehānisko svārstību amplitūda ir maksimāla. Savukārt, ja ārējā deformējošā lauka frekvence sakrīt ar kvarca plates mehāniskās rezonanses frekvenci, elektrisko lādiņu lielums uz kvarca sānu plaknēm ir maksimāls. Tā elektriskās svārstības ģeneratora shēmā var saistīt ar kvarca plates mehāniskajām svārstībām.

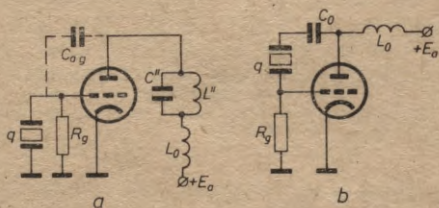
Kvarca plates rezonanses frekvence ir apgriezti proporcionāla plates biežumam. Kvarca plates ekvivalentā shēma,

ja svārstību frekvence ir tuva rezonansei, attēlota 8-12. zīm. *c*, kvarca shematiskais apzīmējums — 8-12. zīm. *d*. Plates ekvivalentā shēma sastāv no virknes kontūra ( $L_q, C_q, r_q$ ), kas šuntēts ar kvarca plates turētāju kapacitāti  $C_0$ . Ekvivalentajam virknes kontūram ir ļoti augsts labums ( $Q=10^4 \div 10^5$ ), kas simtiem un tūkstošiem reižu pārsniedz elektrisku kontūru labumu, tāpēc rezonanses frekvence ir spilgti izteikta. Tā kā praktiski  $C_q \ll \ll C_0$ , tad ekvivalentās shēmas rezonanses frekvence

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L_q C_q}} \quad (8-16)$$

Dažreiz, lai iegūtu ļoti augstu frekvences stabilitāti, kvarcu ievieto termostatā.

Visizplatītākās ir divas lampu ģeneratoru shēmas ar kvarca stabilizāciju (8-13. zīm.). Shēma ar kvarcu starp



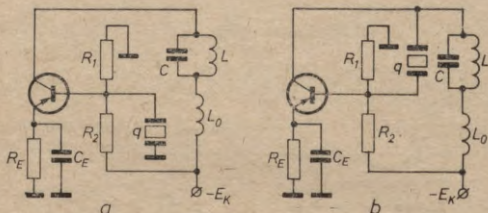
8-13. zīm. Lampu pašerosmes LC ģeneratori ar kvarca stabilizāciju:

*a* — ar kvarcu starp tīkliņu un katodu; *b* — ar kvarcu starp tīkliņu un anodu.

tīkliņu un katodu ir identiska divu svārstību kontūru ģeneratora slēgumam (8-6. zīm. *d*), bet shēma ar kvarcu starp tīkliņu un anodu — kapacitatīvajam trīspunktu slēgumam (8-6. zīm. *c*). Pirmajā gadījumā ar kvarcu  $q$  aizvietots tīkliņķedes kontūrs. Lai šāds ģenerators sāktu ģenerēt svārstības, tā abiem kontūriem jābūt ar induktīvu raksturu. Kvarca ekvivalentajam kontūram induktīvs raksturs ir tikai ļoti šaurā frekvenču joslā — praktiski pie tā rezonanses frekvences. Anoda kontūram induktīvu raksturu panāk, to noskaņojot uz frekvenci, kas nedaudz augstāka par ģenerējamo. Šai slēgumā anoda kontūra parametri

visai maz izmaina ģenerētās frekvences lielumu, tādēļ lampas slodzes maiņa necīgi iespaido ģenerētās frekvences stabilitāti.

Otrajā slēgumā kvarca ekvivalentajam kontūram arī jābūt ar induktīvu raksturu. Kapacitāšu  $C'$  un  $C''$  (8-6. zīm. c) funkcijas te izpilda lampu parazitiskās kapacitātes  $C_{ak}$  un  $C_{gk}$ . Kondensators  $C_0$  nodrošina, lai kvarcam netiktu pievadīta anoda līdzsprieguma komponente.



8-14. zīm. Tranzistoru pašierosmes LC ģeneratori ar kvarca stabilizāciju:

a — ar kvarcu starp bāzi un emiteru; b — ar kvarcu starp bāzi un kolektoru.

Aplūkojot (8-14. zīm.) tranzistoru pašierosmes LC ģeneratoru shēmas ar kvarca stabilizāciju, redzams, ka tās nedaudz atšķiras no lampu ģeneratoru shēmām. Tranzistoru starpelektrodu kapacitātes ir mazākas par lampu starpelektrodu kapacitātēm, tāpēc ar tām realizēt saites ir samērā grūti. Tādēļ šo shēmu kolektoru ķēdēs slēdz izskatītus svārstību kontūrus, kas imitē saites reakcenes.

Shēmā ar kvarcu starp bāzi un emiteru svārstību kontūram kolektora ķēdē ir jābūt ar induktīvu raksturu (kontūra rezonanses frekvencei jābūt lielākai par ģeneratora pašsvārstību frekvenci, kas praktiski ir vienāda ar kvarca pašfrekvenci). Tad šī shēma kļūst identiska induktīvajam trīspunktu slēgumam (8-7. zīm. b). Sai slēgumā dažreiz svārstību kontūru aizvieto ar vienkāršu induktivitāti.

Shēmā ar kvarcu starp bāzi un kolektoru svārstību kontūram kolektora ķēdē ir jābūt ar kapacitatīvu raksturu (kontūra rezonanses frekvencei jābūt mazākai par ģeneratora pašsvārstību frekvenci), jo tad šī shēma kļūst iden-

tiska kapacitatīvajam trīspunktu slēgumam (8-7. zīm. c). Sai slēgumā svārstību kontūru dažreiz aizvieto ar kondensatoru, ko šuntē rezistors, tā izveidojot ceļu kolektora līdzstrāvas komponentei.

Palielinoties svārstību ģenerators frekvencei, jāsamazinās kvarca plates biezumam. Ļoti plānu kvarca plāksņu, kas atbilst par 10 MHz augstākām frekvencēm, izgatavošanas tehnoloģija ir ļoti sarežģīta. Pie tam, samazinoties kvarca plāksnes biezumam, palielinās kvarca turētāju kapacitāte, kas samazina ekvivalentā svārstību kontūra labumu. Tādēļ ģeneratoros, kas paredzēti par 10 MHz augstāku frekvenci ģenerēšanai, lieto citus frekvences stabilizācijas veidus.

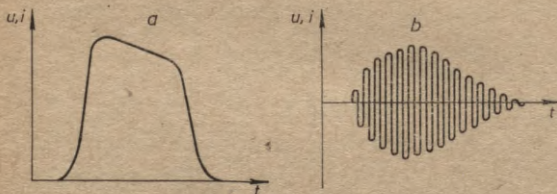
## 9. nodaļa

### IMPULSU TEHNIKAS ELEMENTI

#### 9-1. Jēdziens par impulsveida signāliem

Par elektrisku impulsu sauc spriegumu vai strāvu, kas elektriskajā ķēdē darbojas tikai īsu laika sprīdi. Par īsu laika sprīdi jāuzskata tāds, kas mazāks vai samērojams ar pārejas procesu ilgumu šai ķēdē. Pārejas procesi elektriskajā ķēdē rodas, ja tajā strauji izmaina stacionāro režīmu, un to ilgums atkarīgs no ķēdes parametriem. Stacionāro režīmu var mainīt gan ar ārēju signālu iedarbi, gan izdarot pārslēgšanu ķēdē. Tātad elektriskā impulsa jēdziens saistās arī ar ķēdes parametriem.

Izšķir videoimpulsus un radioimpulsus. Videoimpulsus



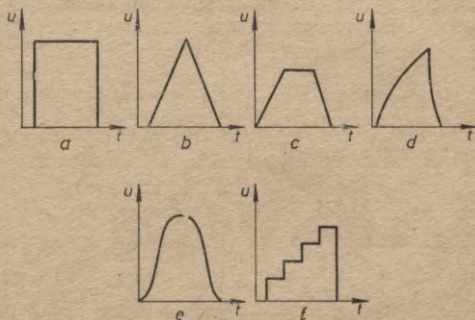
9-1. zīm. Impulsu signālu tipi:

*a* — videoimpulss; *b* — radioimpulss.

veido īslaicīgas spriegumu vai strāvu maiņas līdzstrāvas ķēdē, bet radioimpulsus — īslaicīgas sinusoidāla sprieguma vai strāvas maiņas. 9-1. zīm. parādīti abu impulsu tipi. Impulsu tehnikā galvenokārt sastopami videoimpulsi. Videoimpulsu forma var būt ļoti dažāda. Visbiežāk pie-

lieto taisnstūra, trīsstūra, trapecveida, zāģveida, zvanveida, kāpņveida u. c. formas impulsus (9-2. zīm.).

Praksē jāstopas gan ar atsevišķiem impulsiem, gan impulsu virknēm. Ļoti bieži impulsu virknei ir periodiskas



9-2. zīm. Biežāk sastopamo impulsu formu piemēri:  
*a* — taisnstūra; *b* — trīsstūra; *c* — trapecveida; *d* — zāģveida;  
*e* — zvanveida; *f* — kāpņveida.

secības raksturs. Periodisku impulsu virkni raksturo šādi parametri (9-3. zīm.):

$U_m$  — impulsa amplitūda,

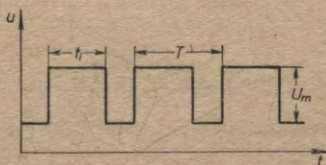
$t_1$  — impulsa ilgums,

$T$  — impulsu sekošanas periods,

$F = \frac{1}{T}$  — impulsu sekošanas frekvence,

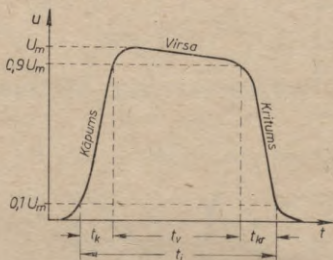
$Q = \frac{T}{t_1}$  — impulsu samērs,

$\lambda = \frac{t_1}{T}$  — impulsu aizpildes koeficients.



9-3. zīm. Periodisku impulsu signāls.

Atsevišķa impulsa formu nosaka tā pamatparametri — kāpuma, virsas un krituma ilgumi, virsas slidējums un amplitūda. Aplūkojot reālas formas impulsu (9-4. zīm.), tam var izšķirt trīs galvenās daļas — kāpumu, virsu un kritumu. Sprieguma straujā maiņa impulsa sākumā veido tā kāpumu. Lēzenā impulsa daļa veido tā virsu, bet straujā



9-4. zīm. Atsevišķs impulss un tā parametri.

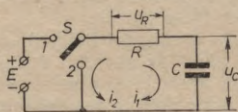
sprieguma maiņa tā beigās — kritumu. Impulsa sprieguma maksimālo vērtību  $U_m$  sauc par tā amplitūdu. Kvantitatīvi kāpumu, virsu un kritumu raksturo to ilgumi. Parasti reāliem impulsiem nevar precīzi noteikt kāpuma, virsas un krituma sākuma un beigu momentu. Tāpēc kāpuma, virsas un krituma ilgumu noteikšanai lieto nosacītus šo lielumu atskaites līmeņus. Tā kāpuma ilgumu  $t_k$  un krituma ilgumu  $t_{kr}$  mēra starp  $0,1 U_m$  un  $0,9 U_m$  līmeņiem, virsas ilgumu  $t_v$  — virs  $0,9 U_m$  līmeņa. Visu trīs minēto laika sprīžu summa sastāda impulsa ilgumu  $t_i = t_k + t_v + t_{kr}$ . Impulsa virsas slīpuma lielumu sauc par virsas slīdējumu. Dažādas formas impulsiem atsevišķu parametru vērtības var mainīties visdažādākās attiecībās.

## 9-2. Pārejas procesi lineārās ķēdēs

Par lineāru sauc tādu elektrisku ķēdi, kas satur tikai lineārus elementus. Par lineāriem savukārt sauc ķēdes fizikālos elementus, kuru parametri nav atkarīgi no ķēdē darbojošos spriegumu un strāvu virziena un lieluma. Pie

šādiem elementiem un to parametriem ar pietiekamu tuvinājumu pieskaitāms kondensators un tā kapacitāte  $C$ , rezistors un tā aktīvā pretestība  $R$ , indukcijas spole un tās induktivitāte  $L$ , kā arī indukcijas spoles un to mijinduktivitāte  $M$ . Lineāro ķēžu sprieguma un strāvas funkcionālā sakarība (voltampēru raksturlikne) tātad vienmēr ir lineāra. Par lineāru ķēžu piemēriem var minēt svārstību kontūrus, filtrus, homogēnās un mākslīgās linijas u. c.

**Pārejas procesi RC ķēdēs.** Vienkāršāko RC ķēdi var izveidot no virknē slēgtiem kondensatora un rezistora (9-5. zīm.). Pieslēdzot šai ķēdei līdzsprieguma  $E$  avotu (kādā laika momentā  $t_0$  slēdzi  $S$  pārslēdzot stāvokli 1),



9-5. zīm. EDS pieslēgšana un atslēgšana RC ķēdei.

ķēdē sākas pārejas process, kas fizikāli izpaužas kondensatora  $C$  pakāpeniskā uzlādē caur rezistoru  $R$ . No elektrotehnikas zināms, ka spriegums uz kondensatora ( $u_C$ ) nevar mainīties lēcienveidā, jo sprieguma pieslēgšanas momentā  $u_C=0$ , bet spriegums uz rezistora  $u_R=E$  un ķēdē plūstošās strāvas  $i_1$  stiprumam ir maksimālā vērtība  $i_1 = \frac{E}{R}$ . Pakāpeniski kondensators uzlādējas, pie tam spriegums uz tā aug pēc eksponentlikuma:

$$u_C = E \left( 1 - e^{-\frac{t}{\tau}} \right), \quad (9-1)$$

kur  $e \approx 2,71 \dots$  — naturālo logaritmu bāze,

$\tau = RC$  — ķēdes laika konstante.

Pēc Kirhhofa likuma, jebkuram laika momentam, kamēr slēdzis atrodas stāvoklī 1,

$$E = u_C + u_R. \quad (9-2)$$

Izsakot no (9-2)  $u_R$  un ievietojot  $u_C$  vērtību no (9-1), iegūstam

$$u_R = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (9-3)$$

Tā tad spriegums uz rezistora samazinās pēc eksponentlikuma. Kopējā strāva ķēdē ir

$$i_1 = \frac{u_R}{R} = \frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (9-4)$$

Teorētiski  $u_C = E$ ,  $u_R = 0$  un  $i_1 = 0$  ir tikai tad, ja  $t = \infty$ , jo visi šie parametri ir eksponentfunkcijas. Tomēr praksē uzskata, ka pārejas process ir beidzies, ja augoša eksponente sasniegusi 0,95—0,99 no savas maksimālās amplitūdas vērtības vai arī kritoša eksponente sasniegusi 0,05—0,01 no savas sākuma vērtības. Tas notiek pēc  $\Delta t = (3 \div 5)\tau$ , tā tad var uzskatīt, ka kondensators praktiski ir uzlādējies vai izlādējies pēc šī laika sprīža.

Ja, kondensatora  $C$  uzlādei beidzoties, kādā laika momentā  $t_1$  slēdzi  $S$  pārslēdz stāvokli 2, tad kondensatoram pieslēdzas rezistors  $R$  un ķēdē plūst kondensatora izlādes strāva  $i_2$  (tās virziens pretējs kondensatora uzlādes strāvai  $i_1$ ). Spriegums uz kondensatora tagad samazinās pēc eksponentlikuma

$$u_C = E e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (9-5)$$

Ķēdei šai laika sprīdī ir spēkā spriegumu vienādojums

$$u_C + u_R = 0. \quad (9-6)$$

No (9-5) un (9-6) izriet, ka

$$u_R = -E e^{-\frac{t}{\tau}}, \quad (9-7)$$

bet izlādes strāvas stiprums

$$i_2 = -\frac{E}{R} e^{-\frac{t}{\tau}}. \quad (9-8)$$

Visas šīs spriegumu un strāvu maiņas ķēdē attēlotas 9-6. zīm.

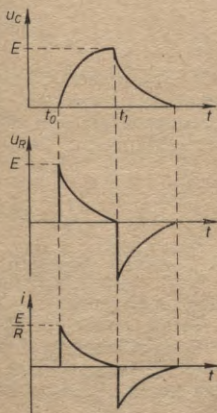
9-5. zīm. attēloto EDS avota pieslēgšanu un atslēgšanu var aizvietot ar ekvivalentu taisnstūra impulsu generatoru (9-7. zīm. a), kas ģenerē taisnstūra impulsus ar amplitūdu  $E$ , ilgumu  $t_1 = t_1 - t_0 \geq (3 \div 5)\tau$  un impulsu samēru  $Q \geq 2$  (9-7. zīm. b). Impulsu generatora iekšējo pretestību

pieņem tuvu nullei. Šai gadījumā spriegumi un strāvas ķēdē ir pilnīgi identiski 9-6. zīm. attēlotajiem.

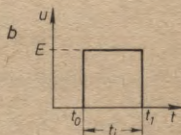
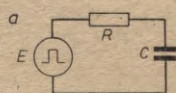
**Diferencējošās ķēdes.** Par diferencējošu ķēdi sauc četropolu, kam izejas spriegums  $u_2$  ir proporcionāls ieejas sprieguma  $u_1$  atvasinājumam:

$$u_2 = A \frac{du_1}{dt}, \quad (9-9)$$

kur  $A$  — proporcionalitātes koeficients.

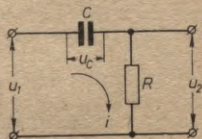


9-6. zīm. Spriegumu un strāvu maiņas  $RC$  ķēdē.



9-7. zīm. EDS avota pieslēgšanas un atslēgšanas aizvietošana ar ekvivalentu taisnstūra impulsu ģeneratoru:

$a$  — slēgums;  $b$  — ģenerētais impulss.



9-8. zīm.  $RC$  diferencējošā ķēde.

Šo operāciju četropoli realizē gan tikai mazākā vai lielākā mērā tuvināti. Visbiežāk praksē izmanto vienkāršāko diferencējošo ķēdi, kas sastāv no kondensatora  $C$  un rezistora  $R$  (9-8. zīm.). Spriegumu vienādojums šai ķēdei ir

$$u_1 = u_C + u_2. \quad (9-10)$$

Bet zināms, ka

$$u_C = \frac{1}{C} \int i dt \quad (9-11)$$

un

$$i = \frac{u_2}{R}. \quad (9-12)$$

Ievietojot (9-12) izteiksmē (9-11), to savukārt vienādojumā (9-10) un abas jaunā vienādojuma puses atvasinot, iegūst

$$\frac{du_1}{dt} = \frac{du_2}{dt} + \frac{u_2}{RC}. \quad (9-13a)$$

Tālāk pārveidojot,

$$u_2 = CR \frac{d(u_1 - u_2)}{dt}. \quad (9-13b)$$

Salīdzinot izteiksmes (9-9) un (9-13b), redzams, ka  $RC$  ķēde precīzi nediferencē, jo spriegums tās izejā nav proporcionāls ieejas sprieguma atvasinājumam, bet gan ieejas un izejas spriegumu starpības atvasinājumam. Bet, ja  $u_2 \ll u_1$ , tad tuvināti

$$u_2 \approx CR \frac{du_1}{dt}, \quad (9-14)$$

līdz ar to izteiksme (9-14) aptuveni sakrīt ar (9-9). Šī sakrišana ir jo precīzāka, jo mazāks ir  $u_2$  salīdzinājumā ar  $u_1$ . Samazināt  $u_2$  var, samazinot  $R$  un  $C$  vērtības, — tas izriet no (9-10), (9-11) un (9-12). Tātad, samazinot ķēdes laika konstanti  $\tau = RC$ , uzlabojas diferencēšanas kvalitāte.

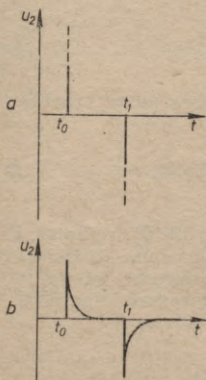
Redzams, ka ķēdes darbībā rodas zināma pretruna — lai sasniegtu labāku diferencēšanas kvalitāti, jāsamazina izejas signāla amplitūda.

Aplūkosim 9-7. zīm. *b* attēlotā taisnstūra impulsa diferencēšanu. Teorētiski šāda impulssignāla funkcijas atvasinājumiem ir jābūt bezgalīgām vertikālēm (9-9. zīm. *a*), taču 9-8. zīm. attēlotās ķēdes izejas signālam ir 9-9. zīm. *b* redzamā forma. Jo  $\tau$  lielāks, jo izejas signāla eksponenciālā daļa ir lēzenāka, tātad diferencēšanas kvalitāte sliktāka.

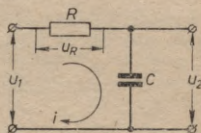
Var pierādīt, ka diferencēšanas kvalitāte ir jo labāka, jo mazāks ir ieejas signāla amplitūdas maiņas ātrums. Tā kā piemērā aplūkotā ideāla taisnstūra impulsa amplitūdas maiņas ātrums ir ļoti liels, tad arī diferencēšanas kvalitāte ir samērā zema.

Diferencējošās ķēdes izmanto, lai samazinātu impulsu

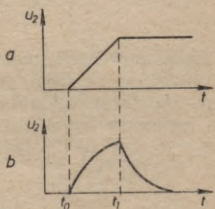
ilgumu un formētu īslaicīgus asus abu polaritāšu impulsus, kurus var izmantot dažādu impulsiekārtu palaišanai un sinhronizācijai, kā arī sarežģītu funkciju laika atvasinājuma iegūšanai analogās elektronu skaitļošanas mašīnās, mēraparatūrā, automatiskās regulēšanas iekārtās u. c.



9-9. zīm. Taisnstūra impulsa atvasinājumi:  
*a* — teorētiskais; *b* — praktiskais *RC* diferencējošās ķēdes izejā.



9-10. zīm. *RC* integrējošā ķēde.



9-11. zīm. Taisnstūra impulsa integrāļi:  
*a* — teorētiskais; *b* — praktiskais *RC* integrējošās ķēdes izejā.

**Integrējošās ķēdes.** Par integrējošu ķēdi sauc četrpolu, kam izejas spriegums  $u_2$  ir proporcionāls ieejas sprieguma  $u_1$  integrālim:

$$u_2 = B \int_0^t u_1 dt, \quad (9-15)$$

kur  $B$  — proporcionalitātes koeficients.

Arī šo operāciju var realizēt tikai mazākā vai lielākā mērā tuvināti. Vienkāršākas integrējošās ķēdes slēgums redzams 9-10. zīm. Spriegumu vienādojums šai ķēdei ir

$$u_1 = u_R + u_2 = iR + u_2. \quad (9-16)$$

Bet

$$i = C \frac{du_2}{dt}, \quad (9-17)$$

tāpēc

$$u_1 = CR \frac{du_2}{dt} + u_2 \quad (9-18a)$$

vai

$$\frac{du_2}{dt} = \frac{1}{CR} (u_1 - u_2). \quad (9-18b)$$

Integrējot vienādojuma (9-18b) abas puses robežās no 0 līdz  $t$ , iegūst

$$u_2 = \frac{1}{CR} \int_0^t (u_1 - u_2) dt. \quad (9-19)$$

Salīdzinot izteiksmes (9-15) un (9-19), redzams, ka arī šai gadījumā nenotiek precīza integrēšana, jo izejas spriegums nav proporcionāls ieejas sprieguma integrālim, bet gan ieejas un izejas spriegumu starpības integrālim. Bet, ja  $u_2 \ll u_1$ , tad (9-19) tuvināti pārveidojas par

$$u_2 \approx \frac{1}{CR} \int_0^t u_1 dt \quad (9-20)$$

un aptuveni sakrīt ar (9-15). Sakrišana ir jo precīzāka, jo  $u_2$  ir mazāks salīdzinājumā ar  $u_1$ . Bet  $u_2$  var samazināt, palielinot  $R$  un  $C$  vērtības, — tas izriet no izteiksmēm (9-16) un (9-17). Tādēļ, palielinot ķēdes laika konstanti  $\tau = RC$ , uzlabojas integrēšanas kvalitāte.

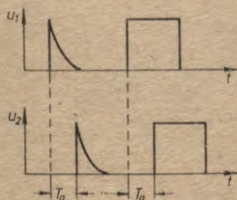
Arī šai ķēdei piemīt zināma pretruna — lai sasniegtu labāku integrēšanas kvalitāti, jāsamazina izejas signāla amplitūda.

Tagad aplūkosim 9-7. zīm. *b* attēlotā atsevišķa taisnstūra impulsa integrēšanu. Teorētiski šāda impulssignāla integrālim jābūt funkcijai, kas attēlota 9-11. zīm. *a*, bet faktiski 9-10. zīm. redzamās ķēdes izejā ir signāls ar formu, kas attēlota 9-11. zīm. *b*. Jo  $\tau$  lielāks, jo eksponenciālās izejas signāla daļas ir ar mazāku liekumu. Salīdzinot 9-11. zīm. *a* un *b*, redzam, ka tuvināta integrēšana notiek tikai integrējamā signāla laikā.

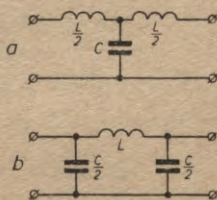
Var pierādīt, ka integrēšanas kvalitāte ir jo labāka, jo stiprāka ir nevienādība  $\tau \gg t_1$  (ja ieejas signāls ir taisnstūra impulss).

Integrējošās ķēdes lieto lineāri mainīgu spriegumu iegūšanai, funkciju integrēšanai, sprieguma maiņkomponentes filtrācijai u. c.

**Aiztures līnijas.** Par aiztures līniju sauc četrpolu, kam izejas signāls  $u_2$  atkārto ieejas signālu  $u_1$  un tiek kavēts attiecībā pret to par noteiktu laika sprīdi  $T_a$ . Ideālas aiztures līnijas spriegumu laika diagrammas attēlotas 9-12. zīm.



9-12. zīm. Ideālas aiztures līnijas ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas.



9-13. zīm. Zemfrekvences filtru posmi:  
a — T-veida; b — Π-veida.

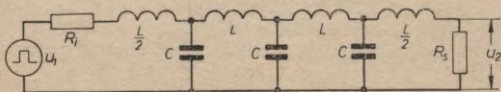
Par gandrīz ideālu aiztures līniju, kas nekropļo aizturētā impulsa formu, var izmantot izkliedētu parametru garās līnijas nogriezni, kas galā noslogots ar rezistoru, kura lielums vienāds ar šīs līnijas viļņu pretestību. Sādu līnijas nogriežņu izveidošanai var izmantot jebkuru augstfrekvences kabeli. Bet ļoti lielais šo kabeļu garums, kas nepieciešams, lai iegūtu pat nelielas laika aiztures, ierobežo šīs metodes pielietojumu. Tā, piemēram, lai iegūtu  $T_a = 1 \mu\text{s}$ , vajag vairākus simtus m garu kabeļa nogriezni.

Tādēļ lielāku aiztures laiku iegūšanai ar pieņemamiem aiztures līniju izmēriem izmanto koncentrētu parametru mākslīgās līnijas. Tās sastāv no virknē slēgtiem T vai Π-veida zemfrekvences filtru posmiem (9-13. zīm.). No filtru teorijas izriet, ka kavētajam signālam ir vismazākie frekvenču un fāzu kropļojumi, ja filtru posmu ķēde abos galos ir salāgota, t. i., gan kavējamo signālu ģenerators iekšējā pretestība  $R_i$ , gan arī filtru ķēdes slodze  $R_s$  ir tīri

aktīvas pretestības, kuru lielums vienāds ar filtru viļņu pretestību:

$$R_1 = R_s = \rho = \sqrt{\frac{L}{C}}. \quad (9-21)$$

Šādas mākslīgas aiztures līnijas slēgums parādīts 9-14. zīm.



9-14. zīm. Mākslīgā aiztures līnija.

Viens līnijas posms aiztur signālu par laiku

$$t_a = \sqrt{LC}, \quad (9-22)$$

bet  $n$  virknē slēgti posmi — par

$$T_a = n t_a = n \sqrt{LC}. \quad (9-23)$$

No izteiksmes (9-23) izriet, ka lielāku  $T_a$  iegūšanai jāpalielina  $L$  un  $C$  lielumi. Bet  $L$  un  $C$  palielināšana palielina aizturamā signāla kropļojuma pakāpi, jo  $L$  un  $C$  nosaka arī filtra caurlaides joslas augstāko robežfrekvenci  $\omega_a$ :

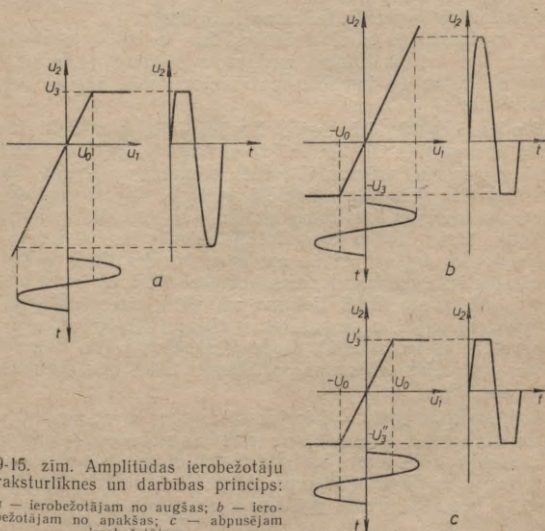
$$\omega_a = \frac{2}{\sqrt{LC}}. \quad (9-24)$$

Jo  $L$  un  $C$  lielāki, jo filtra caurlaides joslas augstākā robežfrekvence ir zemāka. Bet, jo zemāka ir  $\omega_a$ , jo mazāka aizturamā signāla spektra daļa iziet cauri filtram — signāls izejā tiek vairāk kropļots. Sevišķi aktuāls šis jautājums ir signāliem ar plašu frekvenču spektru (taisnstūrim tuvas formas signāliem), jo tādā gadījumā, signālam ejot cauri filtru virknei, tiek nogrieztas tā spektra augstākās harmoniskās. Līdz ar to  $L$  un  $C$  lielumus nosaka aizturamā signāla spektra lielums, kā arī pieļaujamā kropļojuma pakāpe līnijas izejā. Lai iegūtu lielāku signāla aiztures laiku  $T_a$ , jāpalielina līnijas posmu skaits  $n$ . Praktiski mākslīgās aiztures līnijas dod iespēju iegūt aiztures laikus līdz desmitiem μs.

### 9-3. Amplitūdas ierobežošana

Par amplitūdas ierobežotāju sauc četrpolu, kam izejas signāla amplitūda  $u_2$  ir konstanta un neatkarīga no ieejas signāla amplitūdas  $u_1$ , ja ieejas sprieguma amplitūda ir pārsniegusi noteiktu līmeni  $|U_0|$ , ko sauc par ierobežošanas sliekšni. Ja ieejas signāla amplitūda  $u_1$  nesasniedz ierobežošanas sliekšni  $|U_0|$ , tad izejas sprieguma amplitūda  $u_2 \sim u_1$ . No definīcijas izriet, ka amplitūdas ierobežotāja raksturliknei jābūt nelineārai — tātad ierobežotājam jāsaturs nelineārs elements (elektronu lampa, pusvadītāju ierīce u. c.).

Ja spriegums  $u_2$  amplitūdas ierobežotāja izejā paliek konstants, ieejas sprieguma amplitūdai  $u_1$  mainoties pozitīvā virzienā, tad to sauc par ierobežošanu no augšas. Šāda ierobežotāja raksturlikne un darba princips attēloti 9-15. zīm. *a*. Redzams, ka  $u_2 \sim u_1$ , kamēr  $u_1 < U_0$ . Tikko  $u_1 > U_0$ , tā tūdaļ  $u_2 = U_3$ , kur  $U_3$  sauc par ierobežošanas līmeni.



9-15. zīm. Amplitūdas ierobežotāju raksturliknes un darbības princips: *a* — ierobežotājam no augšas; *b* — ierobežotājam no apakšas; *c* — abpusējam ierobežotājam.

Ja spriegums  $u_2$  amplitūdas ierobežotāja izejā paliek konstants, ieejas sprieguma amplitūdai  $u_1$  mainoties negatīvā virzienā, tad to sauc par ierobežošanu no apakšas. Šāda ierobežotāja raksturlikne un darba princips attēloti 9-15. zīm. *b*. Redzams, ka  $u_2 \sim u_1$ , kamēr  $u_1 > -U_0$ . Bet, kad  $u_1 < -U_0$ , tā tūdaļ  $u_2 = -U_3$ .

Divu iepriekšējo gadījumu apvienojumu sauc par abpusēju ierobežošanu. Šī ierobežotāja raksturlikne un darba princips attēloti 9-15. zīm. *c*. Te  $u_2 \sim u_1$ , kamēr  $-U_0 < u_1 < U_0$ . Bet, ja  $u_1 > U_0$ , tad  $u_2 = U'_3$ , kā arī, ja  $u_1 < -U_0$ , tad  $u_2 = -U''_3$ .

Amplitūdas ierobežotājus izmanto daudzās radioelektronikas nozarēs. Plaši tos izmanto taisnstūra impulsu formēšanai no sinusoidāla sprieguma, impulsu selekcijai (izdalīšanai) pēc to amplitūdas un polaritātes, impulsu virsu nogludināšanai, modulētas frekvences svārstību norobežošanai no impulsveida trokšņiem u. c.

Amplitūdas ierobežotājus var iedalīt divās grupās:

1) ierobežotājos, kas tikai ierobežo signāla amplitūdu (par nelineāro elementu te izmanto diodes);

2) ierobežotājos-pastiprinātājos, kas ne tikai ierobežo signālu, bet arī pastiprina ierobežoto signālu (par nelineāro elementu te izmanto vairākelektrodu lampas vai tranzistorus).

**Diodes ierobežotāji.** Sajos ierobežotājos praktiski izmanto pusvadītāju diodes. Izšķir virknes un paralēlo diodes ierobežotāju shēmas. Parasti slēgumos pieņem, ka ieejas signālu ģenerators iekšējā pretestība ir niecīga un sprieguma kritumu, kas rodas uz tās, var tuvināti uzskatīt par nulli. Visās diodes ierobežotāju shēmās to, vai ierobežošana ir no augšas vai no apakšas, nosaka tikai diodes polaritātes ieslēgšanas virziens, bet ierobežošanas līmeni — nobīdes  $U_3$  avota EDS lielums un polaritātes ieslēgšanas virziens. 9-16. zīm. attēlotas virknes (9-16. zīm. *a*) un paralēlā (9-16. zīm. *b*) diodes ierobežotāja no augšas shēmas un ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas (9-16. zīm. *c*).

Ja laika momentā  $t=0$  ieejas spriegums  $u_1=0$ , tad vienīgais EDS avots abās shēmās ir ārējās nobīdes  $U_3$  avots. Virknes shēmā  $U_3$  avots ieslēgts tā, ka diode  $D$  ir atvērta, tādēļ rodas noslēgta ķēde, pa kuru plūst strāva. Strāva plūst pa ķēdi:  $U_3$  avota pozitīvais elektrods, rezistors  $R$ , diode  $D$ , ieejas signālu  $u_1$  avota iekšējā pretestība,  $U_3$

avota negatīvais elektrods. Ja pieņem, ka diodes pretestība ir ļoti neliela, salīdzinot ar  $R$  vērtību, tad

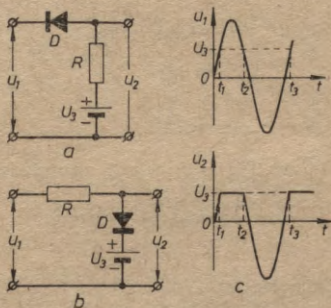
$$u_2 = U_3 - u_R = U_3 - U_3 = 0. \quad (9-25)$$

Laika sprīdī no 0 līdz  $t_1$

$$u_2 = U_3 - u_R = U_3 - (U_3 - u_1) = u_1, \quad (9-26)$$

tātad spriegums izejā atbilst ieejas spriegumam.  $u_1$  augot, laika momentā  $t_1$  diodes anoda un katoda potenciāli kļūst vienādi ( $U_3 = u_1$ ), tādēļ diode tiek sprostota. Tādā gadījumā strāva ķēdē beidzas un  $u_2 = U_3$ . Tas turpinās laika sprīdī  $\Delta t = t_2 - t_1$ , jo visā šai laikā diode ir sprostota (tās katoda potenciāls  $u_1$  ir pozitīvāks par anoda potenciālu  $U_3$ ). Laika momentā  $t_2$  diode atveras, un tūdaļ stājas spēkā izteiksme (9-26).

Paralēlajā shēmā laika momentā  $t = 0$  diode ir sprostota, tādēļ  $u_2 = 0$ . Laika sprīdī no 0 līdz  $t_1$  diode paliek sprostota, tādēļ ieejas signāls brīvi nonāk shēmas izejā,



9-16. zīm. Diodes ierobežotāji no augšas:

a — virknes diodes ierobežotājs; b — paralēlais diodes ierobežotājs; c — ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas.

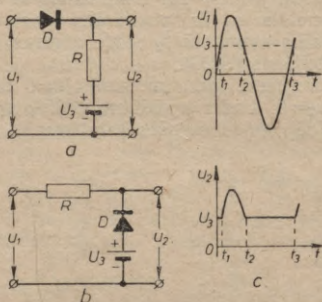
t. i.,  $u_2 = u_1$ . Laika momentā  $t_1$  diode atveras, ķēdē parādās strāva, pie tam viss šis strāvas radītais spriegums krīt uz rezistora  $R$ . Tādēļ laika sprīdī  $\Delta t = t_2 - t_1$  diode vada strāvu un

$$u_2 = u_1 - u_R + U_3 = u_1 - u_1 + U_3 = U_3. \quad (9-27)$$

Laika momentā  $t_2$  diode tiek sprostota un, kamēr  $t_2 < t < t_3$ ,  $u_2 = u_1$ . Viss teiktais ir spēkā, ja  $U_3$  avota iekšējā pretestība ir niecīga un sprieguma kritumu uz tās var neievērot.

Ja apmaina  $U_3$  avota ielēgšanas polaritāti, ierobežošanas līmenis pārvietojas negatīvu spriegumu rajonā (zem abscisu ass) un ierobežots tiek ne vien viss ieejas sprieguma pozitīvais pusperiods, bet arī daļa no negatīvā pusperioda.

9-17. zīm. attēlotas virknes (9-17. zīm. a) un paralēlā (9-17. zīm. b) diodes ierobežotāja no apakšas shēmas un



9-17. zīm. Diodes ierobežotāji no apakšas:

a — virknes diodes ierobežotājs; b — paralēlais diodes ierobežotājs; c — ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas.

ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas (9-17. zīm. c). Laika sprīdī no 0 līdz  $t_1$  virknes shēmā diode ir sprostota, ķēdē strāva neplūst un tādēļ  $u_2 = U_3$ . Laika sprīdī  $\Delta t = t_2 - t_1$  diode ir atvērta ( $u_1 > U_3$ ) un

$$u_2 = U_3 + u_R = U_3 + (u_1 - U_3) = u_1, \quad (9-28)$$

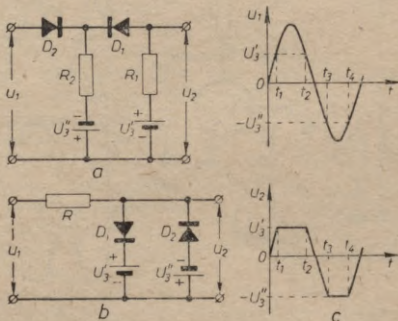
t. i., izejas spriegums šai laika sprīdī atkārtoti ieejas spriegumu.

Paralēlajā shēmā diode atvērta laika sprīdī no 0 līdz  $t_1$ , tādēļ  $u_2 = U_3$ . Laika momentā  $t_1$  diode aizveras, tādēļ laika sprīdī  $\Delta t = t_2 - t_1$  izejas spriegums  $u_2 = u_1$ . Laika mo-

mentā  $t_2$  diode atkal atveras, un  $u_2 = U_3$  līdz laika momentam  $t_3$ .

Ja apmaina  $U_3$  avota ieslēgšanas polaritāti, ierobežošanas limenis parvietojas negatīvu spriegumu rajonā un tiek ierobežota tikai daļa no negatīvā pusperioda.

Abpusējus ierobežotājus iegūst, ja saslēdz virknē ierobežotāju no augšas un ierobežotāju no apakšas (kā virknes, tā arī paralēlajās shēmās). 9-18. zīm. redzamas virknes (9-18. zīm. *a*) un paralēlā (9-18. zīm. *b*) abpusējā diodu ierobežotāja shēmas un ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas (9-18. zīm. *c*).



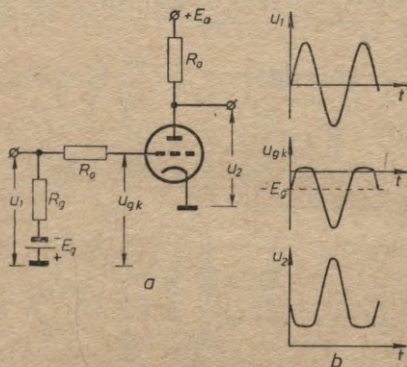
9-18. zīm. Abpusēji diodu ierobežotāji:

*a* — virknes shēma; *b* — paralēlā shēma; *c* — ieejas un izejas spriegumu laika diagrammas.

Analogi jau aplūkotajām shēmām virknes slēgumā diode  $D_1$  ir sprostota laika sprīdī  $\Delta t' = t_2 - t_1$ , bet diode  $D_2$  — laika sprīdī  $\Delta t'' = t_4 - t_3$  un šajos laika sprīžos attiecīgi  $u_2 = U_3$  un  $u_2 = -U_3$ . Pārējā laikā abas diodes ir atvērtas un  $u_2 = u_1$ . Paralēlajā shēmā diode  $D_1$  ir atvērta laika sprīdī  $\Delta t' = t_2 - t_1$ , bet diode  $D_2$  — laika sprīdī  $\Delta t'' = t_4 - t_3$ . Pārējā laikā abas diodes ir sprostotas un tādēļ  $u_2 = u_1$ .

**Amplitūdas ierobežotāji-pastiprinātāji.** Ierobežotajos pastiprinātājos izmanto kā elektronu lampas, tā arī tranzistorus. Te vienlaikus ar signāla ierobežošanu notiek arī ierobežotā signāla pastiprināšana. Ierobežošanai no augšas

izmanto t. s. tīkliņierobežošanu. 9-19. zīm. attēlota tīkliņierobežotāja shēma un spriegumu laika diagrammas. Atšķirībā no parasta anodslodzes rezistorpastiprinātāja pakāpes tīkliņierobežotāja shēmā ir ieslēgts rezistors  $R_0$ . Ierobežotājs strādā tīkliņstrāvu režīmā, tādēļ rezistoru  $R_0$  izvēlas daudzkārt lielāku par triodes iecirkņa tīkliņš — katods pretestību ( $R_{gk}$ ), kad pa šo iecirkni plūst tīkliņstrāva ( $R_{gk} \approx 1 \text{ k}\Omega$ ). Stacionārā stāvoklī ( $u_1 = 0$ ) triodes



9-19. zīm. Tīkliņierobežotājs:  
a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

darba punktu uz anoda-tīkliņa raksturlīknes nosaka tikai negatīvā statistiskā nobīde  $-E_g$ . Pievadot shēmas ieejai ierobežojamā signāla pozitīvo pusperiodu ( $u_1 > 0$ ), spriegums starp triodes tīkliņu un katodu ( $u_{gk}$ ) vispirms pieaug līdz nullei. Tikko šis spriegums pārsniedz nulles vērtību, triodes iecirknis tīkliņš — katods sāk vadīt — parādās tīkliņstrāva. Bet, tā kā  $R_0 \gg R_{gk}$ , tad tīkliņstrāvas radītajiem spriegumu kritumiem spēkā ir nevienādība  $u_{R_0} \gg u_{gk}$ , t. i., tīkliņstrāvas parādīšanās un pieaugums praktiski neizraisa sprieguma  $u_{gk}$  tālākas maiņas — ja arī  $i_g > 0$  ( $u_1 \gg 0$ ),  $u_{gk} \approx 0$ . Notiek signāla ierobežošana no augšas, jo arī triodes anodstrāva un anodpotenciāls šai laikā paliek ap-

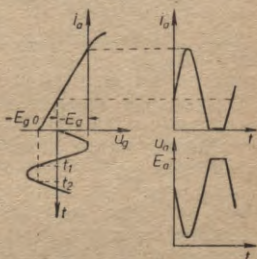
tuveni konstanti. Shēmas izejā spriegums ir pretfāzē ar ieejas spriegumu (sk. 7. nodaļu) un pastiprināts.

Ierobežošanai no apakšas izmanto t. s. anodierobežotāju shēmas. Tās ir parastas anodslodzes rezistorpastiprinātāja pakāpes, kas atkarībā no vajadzīgā ierobežošanas līmeņa darbojas AB, B vai C režīmos, tātad ar anodstrāvas nogriezumu. Kā redzams no 9-20. zīm. attēlotajām

anodstrāvas un spriegumu diagrammām, triode ir slēgta laika spridī  $\Delta t = t_2 - t_1$ , jo  $u_g < -E_{g0}$ , kur  $-E_{g0}$  — lampas aizvēršanās potenciāls. Notiek signāla ierobežošana no apakšas. Anodstrāva šai laikā  $i_a = 0$ , anodpotenciāls  $u_a = E_a$  ( $E_a$  — shēmas anoda barošanas avota potenciāls). Pārējā laikā anodstrāva  $i_a$  un anodspriegums  $u_a$  mainās atbilstoši ieejas spriegumam  $u_1 = u_g$  un pakāpes anoda-tiklīņa darba raksturliknei.

Vienpusējai vai abpusējai ierobežošanai un pastiprināšanai var izmantot arī tranzistorus.

Te lieto kopemitera vai korbāzes rezistorpastiprinātāja shēmu (sk. 7. nodaļu). Ierobežošanai no apakšas izmanto kolektora strāvas nogriezuma rajonu, bet ierobežošanai no augšas — kolektora strāvas piesātinājuma rajonu. Abpusēja ierobežošana iespējama tad, ja ieejas strāvas amplitūdas pilnais vēziens pārsniedz tranzistora aktīvā rajona platumu.



9-20. zīm. Anodierobežotāja anodstrāvas un spriegumu laika diagrammas.

#### 9-4. Blokingģeneratori

Blokingģenerators ir vienpakāpes relaksācijas ģenerators ar ciešu induktīvu līdzsaiti, kas ģenerē īslaicīgus pozitīvus vai negatīvus impulsus, kuru forma ir tuva taisnstūrim. Ģenerēto impulsu samērs mēdz būt no divi (tranzistoru shēmām) līdz simtiem tūkstošu (lampu shēmām). Lampu shēmu izveido ar vakuuma triodi, kas tiek darbināta t. s. impulsu režīmā, bet par induktīvu līdzsaiti

izmanto impulsu transformatoru. Lampas impulsu režīmu nosaka tas, ka lampa atvērta tikai impulsa ģenerācijas laikā. Tas ļauj iegūt ļoti lielas jaudas impulsus, kaut gan signāla vidējā jauda, kuru ierobežo lampas siltuma režīms — vidējā izkliedes jauda uz anoda —, ir maza.

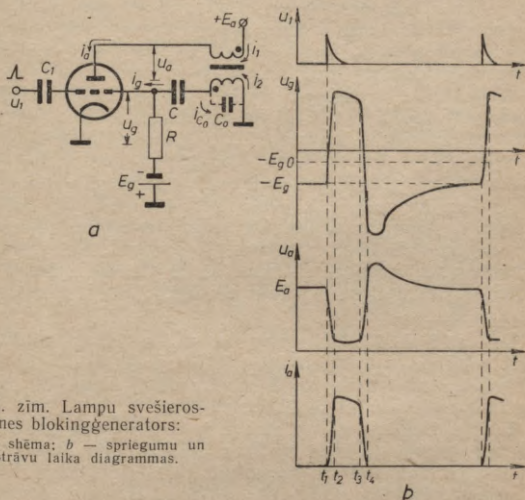
**Impulsu transformatori.** Transformatorus ar feromagnētisku serdi, kuri kalpo īslaicīgu (no  $\mu$ s daļām līdz  $\mu$ s desmitiem) impulsu pārvadei, sauc par impulsu transformatoriem. Atšķirībā no parastajiem transformatoriem impulsu transformatoriem jābūt ar platu frekvenču caurlaides joslu, jo impulsveida signāli satur daudz augstfrekvences harmonisko. Impulsveida signālu kāpumu un kritumu izraisītās straujās strāvu un spriegumu izmaiņas transformatoru tinumos paaugstina prasības transformatora starpvijumu un starptinumu izolācijai, jo šis maiņas var tinumos radīt augstsprieguma impulsus. Impulsveida signālu augstākās harmoniskās savukārt var palielināt aktīvos enerģijas zudumus transformatora serdes materiālā, tādēļ tas jāizvēlas ar ļoti augstu īpatnējo pretestību. Starpvijumu un starptinumu parazitiskās kapacitātes, kā arī parazitiskā izkliedes induktivitāte pasliktina transformatora darbību signāla augstāko harmonisko rajonā. Šī iemesla dēļ tinumu veidi un transformatora konstruktīvā uzbūve jāizvēlas tā, lai šie parazitiskie parametri būtu minimāli.

Parasti impulsu transformatora serdes materiālu izvēlas ar ļoti lielu magnētisko permeabilitāti (magnētisko caurlaidību)  $\mu$ , jo impulssignālu kāpumu un kritumu iedarbes rezultātā serdē rodas t. s. magnētiskais virsmas efekts (skinefekts) — signāla sākuma momentā magnētiskās spēka līnijas koncentrējas pie serdes virsmas un tikai pēc zināma laika spriža vienmērīgi izdalās pa visu šķērsgriezumu. Tas īslaicīgu impulsu darbības laikā rada serdes efektīvā šķērsgriezuma samazināšanos salīdzinājumā ar faktisko šķērsgriezumu. Pie seržu materiāliem ar lielu  $\mu$  un lielu īpatnējo pretestību jāpieskaita permalojs, ferīts, hipersils u. c. Serdes plāksnišu vai lentas biežums — no mikronu desmitiem līdz simtiem.

Minimālo parazitisko kapacitāti nodrošina vienkārtas tinumi un transformācijas koeficients, kas nav lielāks par 3—5.

**Blokingģeneratora darbības princips.** Blokingģeneratorus var izveidot ar pašierosmi vai svešierosmi. Pirmajā

gadījumā shēma pati ģenerē relaksācijas svārstības, tātad impulsa ilgumu un svārstību (impulssu sekošanas) periodu nosaka tikai shēmas elementi, bet otrajā gadījumā impulsu, kura ilgums ir atkarīgs no shēmas parametriem, shēma ģenerē tikai tad, ja uz to iedarbojas ārējs palaišanas impulss. Svārstību periodu šai gadījumā parasti nosaka palaišanas impulsa sekošanas periods.



9-21. zīm. Lampu svešierosmes blokingģenerators:  
 a — shēma; b — spriegumu un strāvu laika diagrammas.

9-21. zīm. attēlota lampu svešierosmes blokingģenerators shēma un spriegumu un strāvu laika diagrammas. Stacionārā stāvoklī, kad ieejas impulss  $u_1$  vēl nav pienācis, negatīvās nobīdes  $E_g$  avots slēdz lampu. Tādā gadījumā lampas anodstrāva  $i_a$  un tīkliņstrāva  $i_g$  ir vienādas ar nulli, bet anoda potenciāls  $u_a = E_a$ . Transformatora serde nav magnetizēta (magnetizācijas strāva  $i_m = ni_1 - i_2 = 0$ , kur  $n$  — transformatora transformācijas koeficients).

Ja laika momentā  $t_1$  lampas tīkliņam pievada pozitīvu impulsu, kas atver lampu, anodķēdē parādās strāva  $i_a = i_1$ ,

kas transformatora sekundārajā tinumā inducē strāvu  $i_2$ . Lampu atverošā palaišanas impulsa radītais tīkliņspriegums var nesasniegt nulli ( $u_g < 0$ ), tādēļ lampas iecirknis tīkliņš — katods strāvu nevada. Praktiski šajā laikā transformatora tīkliņķēdes tinuma strāva  $i_2$  var noslēgties tikai cauri transformatora ekvivalentajai parazitiskajai kapacitātei  $C_0$  paralēli tīkliņa tinumam. Tā kā rezistora  $R$  vērtība ir liela ( $k\Omega$  desmiti un simti), cauri tam plūst ļoti niecīga strāvas  $i_2$  daļa, kuru praktiski var neievērot. Šai laika sprīdī  $i_2 \approx i_{C_0}$ . Bet, ja cauri  $C_0$  plūst strāva, kapacitāte uzlādējas, pie tam pozitīvais potenciāls pieaug uz  $C_0$  kreisās plates. Šis pozitīvais potenciāls cauri lielajam kondensatoram  $C$  viegli nonāk uz lampas tīkliņa, paaugstinot tā potenciālu. Lampas tīkliņa potenciāla pieaugums savukārt rada strāvas  $i_a = i_1$  pieaugumu, kas inducē vēl lielāku strāvu  $i_2$ . Līdz ar to pieaug  $C_0$  pozitīvais lādiņš un lampas tīkliņa pozitīvais potenciāls, kas rada vēl lielāku strāvas  $i_a$  pieaugumu, utt. Tā sākas lavīnveida process, ko sauc par tiešo blokingprocesu. Šo procesu izraisa transformatora kā līdzsaites darbība. Tā kā process ir ļoti ātrs, tā norises laikā  $C$  nespēj kaut cik ievērojami mainīt savu potenciālu.

Drīz pēc tiešā blokingprocesa sākuma lampas tīkliņš kļūst pozitīvs ( $u_g > 0$ ), lampas iecirknis tīkliņš — katods sāk vadīt strāvu, tādēļ daļa no strāvas  $i_2$  atzarojas cauri šim lampas iecirknim kā tīkliņstrāva  $i_g$ .

Tīkliņspriegums  $u_g$  un strāva  $i_g$  aug tikmēr, kamēr  $i_g$  vēl nav katoda emisijas strāvas lielākā daļa. Anoda potenciāls šai laikā stipri pazeminās, jo sprieguma kritums uz transformatora anodķēdes tinuma ir liels. Lampas anoda-tīkliņa raksturliknes stāvums šai laikā tik stipri samazinās, ka strāva kļūst neatkarīga no pozitīvā potenciāla  $u_g$  pieauguma, t. i., strāva  $i_a$  gandrīz nemaz nepieaug, pieaugot  $u_g$  pozitīvajam potenciālam. Līdz ar to tiešais blokingprocess tiek bremsēts un impulsa kāpuma formēšana (laika intervālā no  $t_1$  līdz  $t_2$ ) beidzas.

Pēc tiešā blokingprocesa beigām sākas impulsa virsas formēšanas process. Šis process (laika intervālā no  $t_2$  līdz  $t_3$ ) ir daudz ilgāks par tiešo blokingprocesu, tādēļ šai laika sprīdī tīkliņstrāva  $i_g$  uzlādē kondensatoru  $C$ . Augot kondensatora  $C$  potenciālam, tīkliņa potenciālam  $u_g$  ir jāsamazinās, jo tīkliņš un kondensators  $C$  slēgti virknē un summā veido potenciālu  $u_{C_0}$ . Šis potenciāls savukārt

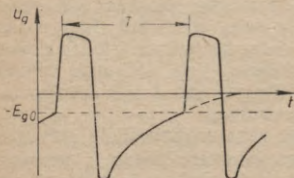
impulsa virsas formēšanas laikā paliek konstants, jo strāva  $i_a$  vairs neaug un neaug arī strāva  $i_2$ . Tomēr šai laikā triodes darba punkts uz anoda-tikliņa raksturlīknes atrodas maza stāvuma rajonā, tādēļ strāva  $i_a$  un spriegums  $u_a$ , samazinoties  $u_g$ , praktiski mainās ļoti maz. Impulsa virsas formēšana beidzas tikai tad, kad spriegums  $u_g$  ir pazeminājies tik tālu, ka ievirza triodes darba punktu anoda-tikliņa raksturlīknes liela stāvuma rajonā (laika moments  $t_3$ ). Virsas ilgums tātad ir atkarīgs no kondensatora  $C$  uzlādēšanās ātruma.

Darba punktam ievirzoties raksturlīknes liela stāvuma rajonā, sprieguma  $u_g$  maiņas izraisa strāvas  $i_a$  maiņas. Samazinoties spriegumam  $u_g$ , samazinās arī strāva  $i_a$  un transformatora tikliņķēdes tinumā inducējas negatīvs spriegums, kas izraisa gan kapacitātes  $C_0$  izlādi, gan arī strauju sprieguma  $u_g$  samazināšanos, kas savukārt rada strāvas  $i_a$  tālāku samazināšanos. Notiek pretēja virziena lavīnveida process, ko sauc par apgriezto blokingprocesu. Tā rezultātā triode strauji aizveras. Apgrieztā blokingprocesa laikā tiek formēts impulsa kritums (laika sprīdis  $t_3 - t_4$ ). Kā tiešā, tā arī apgrieztā blokingprocesa ilgumu nosaka galvenokārt shēmas parazitiskā kapacitāte  $C_0$ .

Apgrieztajam blokingprocesam beidzoties, strāva transformatora tinumos pašindukcijas dēļ nevar acumirkli izbeigties, bet turpinās vēl neilgu laiku, radot negatīvu potenciāla uzsitumu (parasti aperiodisku) uz tikliņa un pozitīvu uz anoda. Pēc tam kondensators  $C$  sāk lēni izlādēties. Tā izlādes strāva plūst cauri transformatora tikliņķēdes tinumam, nobīdes  $E_g$  avotam un rezistoram  $R$ . Pēc zināma laika tikliņspriegums sasniedz savu stacionāro nozīmi  $-E_g$ . Tad lampas tikliņam var pievadīt nākamo palaišanas impulsu  $u_1$ .

**Pašierosmes režīms.** Svešierosmes blokingģeneratora shēmu var ļoti vienkārši pārveidot pašierosmes shēmā. Šim nolūkam jālikvidē stabilais izejas stāvoklis, kad lampu noslēdz ārējās nobīdes  $E_g$  avots. Tātad rezistors  $R$  nav jāpieslēdz ārējās nobīdes  $E_g$  avotam, bet gan vienkāršākā gadījumā tieši jāieņemē. Procesi shēmā gandrīz pilnīgi analogi tiem, kas norisinās svešierosmes shēmā. Vienīgi nedaudz atšķiras kondensatora  $C$  izlādes process pēc impulsa formēšanas. Ja shēmā ar svešierosmi kondensatora  $C$  izlādes eksponente tiecas uz vērtību  $u_g = -E_g$  (9-21. zīm.  $u_g = \varphi(t)$  grafika), tad pašierosmes shēmā šī

pati izlādes eksponente tiecas uz vērtību  $u_g=0$  (9-22. zīm.). Eksponentei krustojoties ar lampas aizvēršanas potenciāla  $-E_{g0}$  horizontāli, sākas tiešais blokingprocess. Var pierādīt, ka pašsvārstību periodu aprēķina pēc formulas



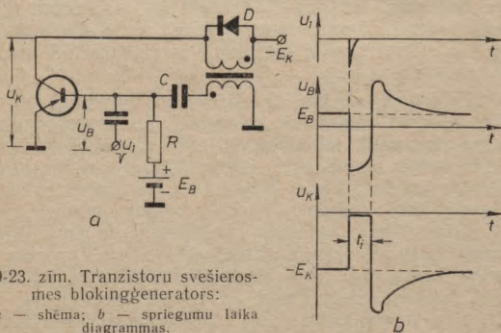
$$T = RC \ln \frac{U_{C \max}}{E_{g0}}, \quad (9-29)$$

kur  $U_{C \max}$  — maksimālais potenciāls, līdz kuram uzlādējas kondensators  $C$ ,  $E_{g0}$  — lampas aizvēršanas potenciāls.

9-22. zīm. Lampu pašerosmes blokingģenerators tīkļsprieguma laika diagramma.

**Tranzistoru blokingģeneratori.** Blokingģenerators shēmā vakuuma triodes

vietā var izmantot arī tranzistoru. 9-23. zīm. a parādīta tranzistoru svešerosmes blokingģenerators shēma, kurā izmantots  $p-n-p$  tipa tranzistors. Ārēji shēmai ir ļoti liela līdzība ar lampu blokingģenerators shēmu. Ja izmanto  $n-p-n$  tipa tranzistoru, jāpmaina abu barošanas avotu un diodes polaritāte. Arī procesi, kas norisinās shēmā, ļoti tuvi procesiem lampu blokingģenerators shēmā. Impulsa formēšanas laikā tranzistors atvērts un atrodas dziļā piesātinājumā. Tā kolektora spriegums  $u_K$  tuvs nullei. Impulsam ir ļoti horizontāla virsa, jo kolektora sprieguma  $u_K$  vērtību nelielās bāzes sprieguma  $u_B$



9-23. zīm. Tranzistoru svešerosmes blokingģenerators:  
a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

maiņas neiespaido. Impulsa amplitūda tuva  $E_K$  vērtībai (9-23. zīm. b).

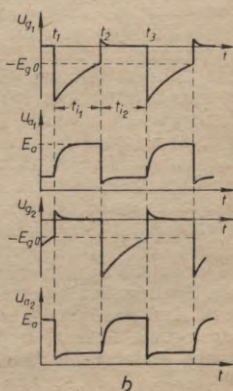
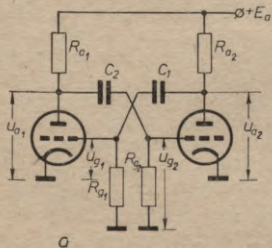
Tranzistoru blokingģeneratora shēmā transformatora kolektorķedes tinums jāšuntē ar diodi  $D$ . Diode uz shēmu impulsa ģenerācijas laikā neiedarbojas, jo ir slēgta. Tā atveras tikai apgrieztā blokingprocesa beigās, kad parādās negatīvais uzsitums, un samazina tā amplitūdu, jo šis negatīvais uzsitums summējas ar negatīvo kolektora barošanas spriegumu  $-E_K$ , radot tranzistora caursītes draudus.

Tranzistoru blokingģeneratora darbības stabilitāti stipri pazemina ārējās temperatūras svārstības, sevišķi pašierosmes režīmā.

### 9-5. Multivibratori

Multivibrators ir divpakāpju relaksācijas ģenerators, kas ģenerē taisnstūrim tuvas formas impulsus. Tā pamatā ir divpakāpju lampu vai tranzistoru maiņsprieguma rezistorpastiprinātājs, kura izeja savienota ar ieeju, tātad shēmā realizēta pilna līdzaite. Multivibratori var darboties kā pašierosmes, tā arī svešierosmes režīmā.

**Lampu pašierosmes multivibratori.** 9-24. zīm. a redzama lampu pašierosmes multivibratora shēma. Multivibratoru sauc par simetrisku, ja attiecīgi simetriskie elementi ir



9-24. zīm. Lampu pašierosmes multivibrators:

a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

vienādi:  $R_{a_1} = R_{a_2} = R_a$ ,  $C_1 = C_2 = C$ ,  $R_{g_1} = R_{g_2} = R_g$  (pie tam  $R_g > R_a$ ) un abas triodes identiskas. Jāatzīmē, ka simetriskā multivibratora shēmas iekšējie procesi nav simetriski. Pašerosmes režīmā multivibratoram nav elektriski stabili stāvokļi, bet gan ir divi elektriski kvazistabili stāvokļi. Shēma no viena kvazistabilā stāvokļa otrā pāriet lēcienveidā.

Attēlotā lampu pašerosmes multivibratora darbības principu visērtāk iepazīt no spriegumu laika diagrammām, kas redzamas 9-24. zīm. *b*. Pieņemsim, ka noteiktā laika momentā shēmā eksistē elektriska asimetrija — labējā triode slēgta, bet kreisā atvērta. Cauri labējai triodei anodstrāva neplūst ( $i_{a_2} = 0$ ), tās anoda potenciāls  $u_{a_2} = E_a$ . Kondensatora  $C_1$  labējā plate uzlādēta līdz  $E_a$  potenciālam. Tā kā triodu tīkliņķēdēs nekādas strāvas neplūst, kondensatora  $C_1$  kreisās plates potenciāls ir nulle. Kreisajai triodei plūst cauri tās anodstrāva ( $i_{a_1} \neq 0$ ), radot spriegumu uz rezistora  $R_{a_1}$ . Līdz ar to šīs triodes anoda potenciāls ir zems:  $u_{a_1} = u_{a_1, \min}$ . Kondensatora  $C_2$  kreisā plate tādēļ tiek uzlādēta līdz potenciālam  $u_{a_1, \min}$ .

Pieņemsim, ka laika momentā  $t_1$  labējā triode atveras (pagaidām nezināmu iemeslu dēļ). Tūdaļ sākas kondensatora  $C_1$  izlāde. Izlādes strāva plūst no kondensatora  $C_1$  labējās plates cauri labējās triodes un anodslodzes  $R_{a_2}$  paralēlajam slēgumam, zemējumam un rezistoram  $R_{g_1}$  uz kondensatora  $C_1$  kreiso plati. Kondensatora  $C_1$  izlādes strāvai plūstot cauri rezistoram  $R_{g_1}$ , uz tā rodas sprieguma kritums, kas ar savu negatīvo polaritāti pielikts kreisās triodes tīkliņķam (9-24. zīm. *b*  $u_{g_1} = \varphi(t)$  grafikā laika moments  $t_1$ ). Šis spriegums ir pietiekami negatīvs, lai kreiso triodi aizvērtu. Aizvēršanās notiek lēcienveidā. Līdz ar to arī kreisās triodes anoda potenciāls  $u_{a_1}$  lēcienveidā paaugstinās līdz  $E_a$  vērtībai, un tūlīt sākas kondensatora  $C_2$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no  $E_a$  avota pozitīvās spaiļes cauri rezistoram  $R_{a_1}$ , kondensatoram  $C_2$  un rezistoram  $R_{g_2}$  uz zemējumu.

Plūstot cauri rezistoram  $R_{a_1}$ ,  $C_2$  uzlādes strāva rada uz tā negatīvu sprieguma kritumu attiecībā pret lampas anodu. Šis negatīvais potenciāls, mainoties pēc eksponentlikuma, darbojas pretī anoda potenciāla lēcienam. Tādēļ arī sprieguma lēcieni lampas anodā nav ideāls, bet gan eksponentveida (9-24. zīm. *b*  $u_{a_1} = \varphi(t)$  grafikā laika moments  $t_1$ ).

Uz rezistora  $R_{g_2}$   $C_2$  uzlādes strāva rada pozitīvu sprieguma kritumu attiecībā pret labējās triodes tīkliņu, tā lampu atverot vēl vairāk. Bet, ja triodes tīkliņa potenciāls ir pozitīvs, tad parādās tīkliņstrāva, t. i., triodes iecirknis tīkliņš — katods sāk vadīt. Šī iecirkņa pretestība ir daudzkārt mazāka par rezistora  $R_{g_2}$  pretestību, tādēļ kondensatora  $C_2$  uzlādes strāvas lielākā daļa plūst cauri triodei.

Kondensators  $C_1$  izlādējas pēc eksponentlikuma. Tātad kreisās triodes tīkliņa negatīvais potenciāls pakāpeniski samazinās, līdz kādā laika momentā  $t_2$  kļūst vienāds ar lampas aizvēršanas potenciālu  $-E_{g_0}$ . Kreisā triode lēcienveidā atveras, sāk plūst tās anodstrāva ( $i_{a_1} \neq 0$ ), rodas sprieguma kritums uz rezistora  $R_{a_1}$ , samazinās triodes anoda potenciāls  $u_{a_1}$  un sākas kondensatora  $C_2$  izlāde. Izlādes strāva plūst no kondensatora  $C_2$  kreisās plātes cauri kreisās triodes un anodslodzes  $R_{a_1}$  paralēlajam slēgumam, zemējumam un rezistoram  $R_{g_2}$  uz kondensatora  $C_2$  labējo plati. Tagad uz rezistora  $R_{g_2}$  rodas sprieguma kritums, kas ir negatīvs attiecībā pret labējās triodes tīkliņu un aizver šo triodi (9-24. zīm. *b*  $u_{g_2} = \varphi(t)$  grafikā laika moments  $t_2$ ). Tās anoda potenciāls  $u_{a_2}$  cenšas lēcienveidā paaugstināties līdz  $E_a$  vērtībai, sākas kondensatora  $C_1$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no  $E_a$  avota pozitīvās spaiļes cauri rezistoram  $R_{a_2}$ , kondensatoram  $C_1$ , rezistoram  $R_{g_1}$  un tam paralēlajam kreisās triodes iecirknim tīkliņš — katods uz zemējumu. Šis kvazistabīlais stāvoklis ilgst līdz laika momentam  $t_3$ , tad labējās triodes tīkliņa potenciāls kondensatora  $C_2$  izlādes procesā pārsniedz lampas aizvēršanas potenciālu  $-E_{g_0}$ . Tad labējā triode atveras un procesa atkārtojas.

Shēmas sākotnējo nonākšanu vienā no kvazistabīlajiem stāvokļiem pēc  $E_a$  avota pieslēgšanas nosaka abu triodu anodstrāvu fluktuācijas. Kādā momentā, kaut arī triodes ir identiskas, anodstrāvas var nedaudz atšķirties. Tā triode, kurai fluktuāciju rezultātā anodstrāva pieaug, atveras, bet tā, kurai anodstrāva samazinās, aizveras.

Var konstatēt, ka kondensatoru izlāde notiek ilgāk par uzlādi. To nosaka attiecīgās laika konstantes  $\tau_{uzl}$  un  $\tau_{izl}$ . Tā kā uzlādes laikā kopējo pretestību veido rezistors  $R_a$ , kā arī paralēlās  $R_g$  un  $R_{gk}$ ,

$$\tau_{uzl} = C \left( R_a + \frac{R_g R_{gk}}{R_g + R_{gk}} \right) \approx C (R_a + R_{gk}) \approx C R_a,$$

jo  $R_g \gg R_a \gg R_{gk}$ , kur  $R_{gk}$  — atvērtas lampas iecirkņa tik-  
liņš — katods pretestība.

Izlādē attiecīgi

$$\tau_{lzl} = C \left( \frac{R_a R_1}{R_a + R_1} + R_g \right) \approx C R_g,$$

jo  $R_g \gg R_a \approx R_1$ , kur  $R_1$  — triodes iekšējā pretestība. Tā kā  
vienmēr  $R_g > R_a$ , tad  $\tau_{lzl} < \tau_{lzl}$ .

Simetriskam multivibratoram impulsa ilgums ir

$$t_1 = t_{i_1} = t_{i_2} \approx R_g C \ln S R_0, \quad (9-30)$$

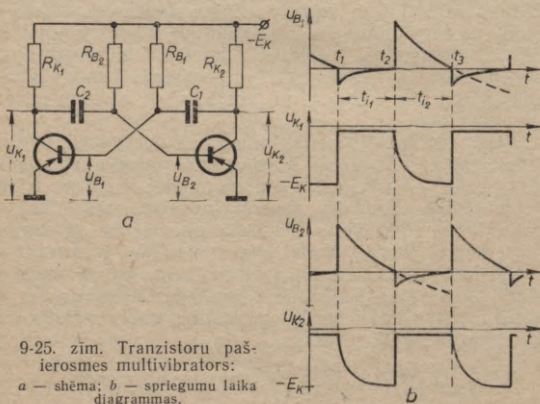
kur  $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_1} + \frac{1}{R_a} + \frac{1}{R_g}$ , bet  $S$  — lampu raksturlienes stā-  
vums.

Svārstību frekvence izsakāma šādi:

$$F = \frac{1}{2t_1} = \frac{1}{2R_g C \ln S R_0}. \quad (9-31)$$

Impulsu ilgumu un svārstību frekvenci var mainīt,  
mainot  $C$  un  $R_g$  elementus. Svārstības parasti noņem no  
lampu anodiem, kur impulsu forma ir vistuvāka taisn-  
stūrim.

**Tranzistoru pašerosmes multivibratori.** Ar tranzisto-  
riem var izveidot pašerosmes multivibratoru shēmas, kas  
analogas lampu multivibratoru shēmām. 9-25. zīm. re-



9-25. zīm. Tranzistoru paš-  
ierosmes multivibrators:  
a — shēma; b — spriegumu laika  
diagrammas.

dzama kolektora-bāzes saišu pašierosmes  $p-n-p$  tipa tranzistoru multivibratora shēma. Analogija lampu multivibratoram būtu vēl lielāka, ja shēmā izmantotu  $n-p-n$  tipa tranzistorus, kurus gan lieto retāk.

Apskatot fizikālos procesus, kas norisinās shēmā, lietderīgi neievērot aizvērto tranzistoru mazās miera stāvokļa strāvas ( $i_{K0}$  un  $i_{B0}$ ). Tāpat kā lampu shēmā, arī te tranzistori secīgi atveras un aizveras. Ja laika momentā  $t_1$  (9-25. zīm. *b* attēlotas tranzistoru multivibratora spriegumu laika diagrammas) kreisais tranzistors atveras, tad šai mirklī sākas kondensatora  $C_2$  izlāde (pirms kreisā tranzistora atvēršanās kondensatora  $C_2$  kreisajai plātei bija potenciāls  $-E_K$ , bet labējai — nulles potenciāls). Izlādes strāva plūst no  $C_2$  labējās plātes cauri rezistoram  $R_{B_2}$ ,  $E_K$  avotam, zemējumam un kreisajam tranzistoram uz  $C_2$  kreiso plati. Izlādes strāva rada lēcienveida sprieguma kritumu uz rezistora  $R_{B_2}$ . Šis sprieguma kritums ir pozitīvs attiecībā pret labējā tranzistora bāzi un tādēļ šo tranzistoru lavīnveidā aizver. Tūdaļ sākas kondensatora  $C_1$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no zemējuma cauri kreisajam tranzistoram, kondensatoram  $C_1$  un rezistoram  $R_{K_2}$  uz  $E_K$  avota minusa spaili.  $C_1$  uzlādes strāva rada sprieguma kritumu uz rezistora  $R_{K_2}$ , tāpēc sprieguma lēcieni kolektorā ( $u_{K_2}$ ) nav ideāls, bet gan eksponentveida.

Arī kondensatora  $C_2$  izlāde notiek pēc eksponentlikuma, t. i., labējā tranzistora bāzes pozitīvais potenciāls  $u_{B_2}$  samazinās eksponentveidā. Kad kondensators pilnīgi izlādējies (laika moments  $t_2$ ), spriegums  $u_{B_2} = 0$ . Šai brīdī atveras labējais tranzistors, jo  $C_2$  izlādes eksponente šķērso  $u_{B_2}$  nulles vērtību. Faktiski vajadzētu notikt kondensatora  $C_2$  pārlādei, tādēļ  $C_2$  eksponente teorētiski tiecas uz  $-E_K$  vērtību (9-25. zīm. *b*  $u_{B_2} = f(t)$  grafikā ar svītrliniju), jo tad, kad labējais tranzistors slēgts,  $C_2$  labējā plāte cenšas uzlādēties līdz potenciālam  $-E_K$ . Šo pārlādes procesu pārtrauc labējā tranzistora atvēršanās.

Laika momentā  $t_2$  aizveras kreisais tranzistors, atveras labējais, sākas kondensatora  $C_1$  izlāde un  $C_2$  uzlāde.

Tātad, tranzistoram aizveroties, tā kolektora spriegums tiecas sasniegt  $-E_K$  vērtību, bet atveroties spriegums kļūst ļoti tuvs nullei. Shēmas simetriju iegūst analogi kā lampu multivibratoru shēmās. Impulsu ilgumu nosaka izteiksmes

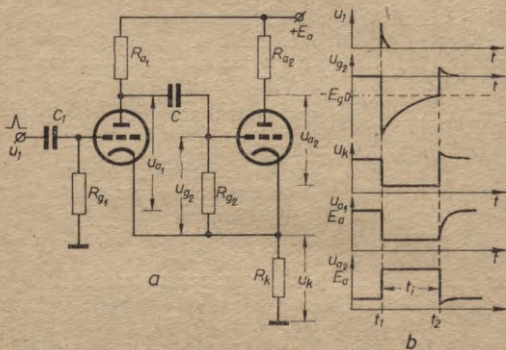
$$t_{11} \approx C_2 R_{B_2} \ln 2 \text{ un } t_{12} \approx C_1 R_{B_1} \ln 2, \quad (9-32, 9-33)$$

bet svārstību frekvenci — izteiksme

$$F = \frac{1}{t_{11} + t_{12}} = \frac{1}{(C_1 R_{B1} + C_2 R_{B2}) \ln 2} \quad (9-34)$$

**Lampu svešerosmes multivibratori.** Svešerosmes multivibratorus raksturo viens elektrisks līdzsvara un viens kvazilīdzsvara stāvoklis. Izejas stāvokļi shēma ir elektriskā līdzsvarā, kurā var atrasties bezgalīgi ilgi. Kvazistabilā stāvokļi shēma pāriet ārēja signāla iedarbības rezultātā un šai laikā ģenerē svārstību. Pēc signāla ģenerēšanas shēma pati pāriet atpakaļ elektriskā līdzsvara stāvoklī. Šādas shēmas bieži sauc par gaidošām vai arī uni-stabilām.

Visplašāk lieto katodsaites lampu svešerosmes multivibratoru, ko bieži sauc par «kīp-releju». Tā shēma un spriegumu laika diagrammas attēlotas 9-26. zīm. Starp-



9-26. zīm. Katodsaites lampu svešerosmes multivibrators:  
a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

pakāpju saiti te veido kondensators  $C$  un kopīgais katodu rezistors  $R_k$ . Elektriski stabilajā izejas stāvoklī labējā triode ir atvērta, jo tās tīkliņa un katoda potenciāli ir vienādi. Cauri šai triodei, kā arī rezistoriem  $R_{a2}$  un  $R_k$  plūst triodes anodstrāva  $i_{a2}$ . Uz rezistora  $R_k$  esošais sprieguma kritums, ko rada anodstrāva, ir pozitīvs attiecībā

pret abu lampu katodiem un negatīvs pret kreisās lampas tīkliņu. Šis negatīvais potenciāls lampas tīkliņam ir pietiekams, lai šī lampa būtu aizvērta, tādēļ tās anodstrāva  $i_{a1} = 0$ . Kondensatora  $C$  kreisajai platei ir potenciāls  $E_a$ , bet labējai  $u_k$  (kondensators  $C$  ir uzlādēts).

Ja kādā laika momentā  $t_1$  kreisās triodes tīkliņam pievada pozitīvu impulsu  $u_1$ , kas šo triodi atver, tad tai cauri sāk plūst anodstrāva  $i_{a1}$ , rodas sprieguma kritums uz rezistora  $R_{a1}$ , pazeminās kreisās triodes anoda potenciāls un kondensators  $C$  sāk izlādēties. Izlādes strāva plūst no kondensatora  $C$  kreisās plates cauri kreisajai triodei un rezistoram  $R_{g2}$  uz kondensatora  $C$  labējo plati. Daļa no kondensatora izlādes strāvas nozarojas pa triodei paralēlu ķēdi — caur rezistoru  $R_{a1}$ , barošanas sprieguma  $E_a$  avotu, zemējumu, rezistoru  $R_k$ . Izlādes strāvai plūstot cauri rezistoram  $R_{g2}$ , uz tā rodas sprieguma kritums, kura pozitīvais potenciāls pieslēgts labējās triodes katodam, bet negatīvais — tīkliņam. Šis potenciāls lēcienveidā aizver labējo triodi. Tā aizvērta tik ilgi, kamēr tīkliņa negatīvais potenciāls  $u_{g2}$  ir negatīvāks par triodes aizvēršanas potenciālu  $-E_{g0}$ . Bet, kondensatoram  $C$  eksponentveidā izlādējoties, pēc šī paša likuma samazinās arī labējās triodes tīkliņa negatīvais potenciāls un kādā laika momentā  $t_2$  (9-26. zīm. *b*) sasniedz triodes aizvēršanas potenciāla vērtību. Lidz ar to šī triode lēcienveidā atveras, tai cauri sāk plūst anodstrāva  $i_{a2}$ , radot palielinātu sprieguma kritumu  $u_k$  uz rezistora  $R_k$  un aizverot kreiso triodi. Šis triodes anoda potenciāls aug līdz  $E_a$  vērtībai un vienlaikus sākas kondensatora  $C$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no  $E_a$  avota pozitīvās spāiles cauri rezistoram  $R_{a1}$ , kondensatoram  $C$ , rezistoram  $R_{g2}$  (uz tā rodas pozitīvs sprieguma kritums attiecībā pret labējās triodes tīkliņu, un tāpēc šīs triodes iecirknis tīkliņš — katods kļūst vadošs) un tam paralēli pieslēgtajam triodes iecirknim tīkliņš — katods, rezistoram  $R_k$  uz zemējumu. Kreisās triodes anodā nav ideāla potenciāla lēciena, bet kāpumam ir eksponentes raksturs, ko rada sprieguma kritums uz rezistora  $R_{a1}$ , kad tam cauri plūst kondensatora  $C$  uzlādes strāva. Kad kondensators  $C$  ir uzlādējies, shēma nonāk savā izejas stāvoklī un tai var pievadīt nākamo palaišanas impulsu.

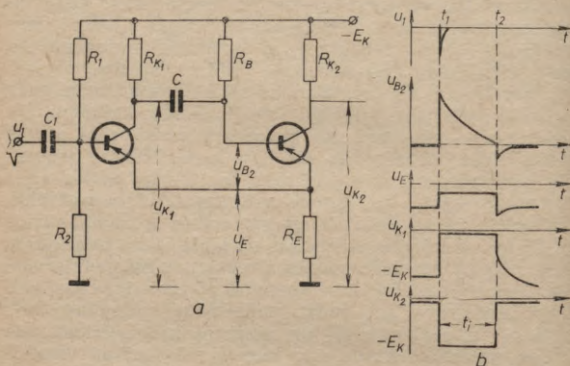
Šādā shēmā var iegūt taisnstūrim tuvas formas pozitīvus vai negatīvus impulsus, noņemot tos no lampu anodiem vai katodiem.

Ģenerētā impulsa ilgumu aprēķina no izteiksmes

$$t_1 = CR_{g_2} \ln \left( 1 + \frac{R_0}{\mu R_k} \right), \quad (9-35)$$

kur  $\frac{1}{R_0} = \frac{1}{R_{g_2}} + \frac{1}{R_{a_1}} + \frac{1}{R_1 + \mu R_k}$ , bet  $R_1$  — triodes iekšējā pretestība,  $\mu$  — triodes pastiprinājuma koeficients. Impulsa ilgumu regulē, mainot  $C$  vai  $R_{g_2}$  vērtības.

**Tranzistoru svešierosmes multivibratori.** Praksē bieži sastop svešierosmes multivibratoru ar emiteru saiti. Tā shēma un spriegumu laika diagrammas redzamas 9-27. zīm.



9-27. zīm. Emiteru saites tranzistoru svešierosmes multivibrators:  
a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

Šīs shēmas prototips ir katodsaites lampu svešierosmes multivibrators, tādēļ tās darbības princips līdzīgs lampu multivibratora shēmas darbības principam.

Elektriskajā līdzsvara stāvoklī labējais tranzistors ir atvērts un piesātināts, jo tā bāzei pievadīts attiecībā pret emiteru negatīvs potenciāls, bet kreisais tranzistors slēgts, jo tā pārejā bāze — emiteru potenciāls ir pozitīvs. Šo potenciālu veido pozitīvais sprieguma kritums  $u_E$  un negatīvais sprieguma kritums uz rezistora  $R_2$ . Pārsvārā ir pozitīvais potenciāls, tādēļ arī kreisais tranzistors slēgts. Kondensators  $C$  uzlādēts līdz potenciālam  $u_C = u_E - E_K$ . Ja

laika momentā  $t_1$  (9-27. zīm. *b*) kreisā tranzistora bāzei pievada negatīvu impulsu  $u_1$ , kas šo tranzistoru atver, tad sākas kondensatora  $C$  izlāde. Izlādes strāva plūst no kondensatora  $C$  labējās plates cauri rezistoram  $R_B$ , barošanas  $E_K$  avotam, rezistoram  $R_E$  un kreisajam tranzistoram uz kondensatora  $C$  kreiso plati. Izlādes strāva rezistorā  $R_B$  rada pozitīvu sprieguma  $u_{B_2}$  lēcieni attiecībā pret labējā tranzistora bāzi, tādēļ šis tranzistors tiek lavīnveidā aizvērts. Tā kolektorā notiek sprieguma lēcieni līdz vērtībai  $-E_K$ . Kondensatora  $C$  izlāde notiek pēc eksponentlikuma. Kad kondensators pilnīgi izlādējies (laika moments  $t_2$ ), spriegums  $u_{B_2} \approx 0$  un labējais tranzistors sāk vērties vaļā, jo  $C$  izlādes eksponente šķērso sprieguma  $u_{B_2}$  nulles vērtību (vajadzētu notikt ne tikai  $C$  izlādei, bet arī pārlādei, bet to pārtrauc labējā tranzistora atvēršanās). Labējais tranzistors arī atveras lavīnveidā, un tūlīt sākas kondensatora  $C$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no zemējuma cauri rezistoram  $R_E$ , labējā tranzistora atvērtajam iecirknim emīters — bāze, kondensatoram  $C$  un rezistoram  $R_{K_1}$  uz  $E_K$  avota negatīvo spaili. Spriegums  $u_E$  kļūst tik pozitīvs attiecībā pret kreisā tranzistora bāzi, ka lavīnveidā aizver šo tranzistoru. Bet spriegums šī tranzistora kolektorā ( $u_{K_1}$ ) lēcienveidā izmainīties nevar, jo cauri rezistoram  $R_{K_1}$  plūst kondensatora  $C$  uzlādes strāva, kas samazinās eksponentveidā, radot uz rezistora  $R_{K_1}$  sprieguma lēcienam pretējas polaritātes sprieguma kritumu. Līdz ar to šai laikā sprieguma maiņai kreisā tranzistora kolektorā ir eksponentes raksturs. Nākamo palaišanas impulsu drīkst pievadīt tad, kad kondensators  $C$  ir pilnīgi uzlādējies.

Generētā impulsa ilgumu (impulsu parasti aizvada no labējā tranzistora kolektora) var noteikt pēc izteiksmes

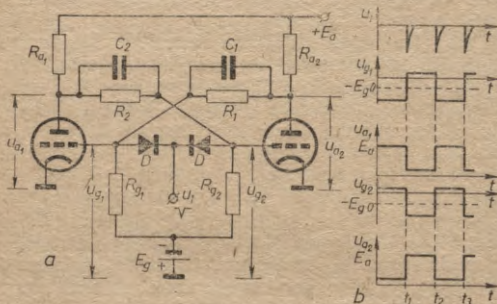
$$t_1 \approx R_B C \ln 2. \quad (9-36)$$

## 9-6. Trigeri

Par trigeru sauc līdzsaites divpakāpju shēmu, kas var bezgalīgi ilgi atrasties vienā no diviem elektriskā līdzsvara stāvokļiem un pāriet no viena stāvokļa otrā lēcienveidā katru reizi, kad ieejā pienākošā signāla amplitūda sasniedz noteiktu līmeni. Trigerus sauc arī par bivibratoriem vai elektronu relejiem. Trigeru shēmās var izmantot

elektronu lampas, tranzistorus, jonu ierīces, tūņēdiodes un magnētiskos elementus ar taisnstūrveida histerēzes cilpu.

**Elektronu lampu trigeri.** Visbiežāk sastop anoda-tikliņa saišu trigeru (9-28. zīm. *a*). Šī trigeru shēmas pamatā ir



9-28. zīm. Anoda-tikliņa saišu lampu trigeris:

*a* — shēma; *b* — spriegumu laika diagrammas.

divpakāpju anodslodzes līdzsprieguma pastiprinātājs, kam ieeja savienota ar izeju — tātad izveidota pilna sprieguma līdzsaite. Katrā no diviem elektriskā līdzsvara stāvokļiem viena triode ir slēgta, otra — atvērta.

Vienu no elektriskajiem līdzsvara stāvokļiem, kur, piemēram, kreisā triode slēgta, bet labējā atvērta, nodrošina attiecīgi šo lampu tīkliņspriegumi. Ja kreisā triode ir slēgta, tad tās anodstrāva ir nulle un anoda potenciāls tuvs  $E_a$  vērtībai (jo praktiski  $R_{a1} \ll R_2 + R_{g2}$ ). Daļu no šī augstā anoda potenciāla ar dalītāja  $R_2$ ,  $R_{g2}$  palīdzību pievada labējās triodes tīkliņam. Bez šī pozitīvā potenciāla uz labējās triodes tīkliņu iedarbojas arī negatīvais  $E_g$  avota potenciāls. Rezultējošais potenciāls  $u_{g2}$  nedaudz pārsniedz nulli (9-28. zīm. *b* pirms laika momenta  $t_1$ ). Tādēļ labējā triode ir atvērta, tai cauri plūst anodstrāva, kas rada sprieguma kritumu uz rezistora  $R_{a2}$ . Līdz ar to šai triodei ir zems anoda potenciāls  $u_{a2}$ . Daļu no šī zemā anoda potenciāla ar dalītāju  $R_1$ ,  $R_{g1}$  pievada kreisās triodes tīkliņam, uz kuru iedarbojas arī negatīvais  $E_g$  avota

potenciāls. Rezultējošais kreisās triodes tīkliņa potenciāls  $u_{g_1}$  ir negatīvāks par šīs triodes aizvēršanas potenciālu  $-E_{g_0}$ , tādēļ lampa ir slēgta.

Šis līdzsvara stāvoklis ilgst tikmēr, kamēr abu lampu tīkliņiem cauri diodēm  $D$  pievada negatīvu palaišanas impulsu  $u_1$  (laika momentā  $t_1$ ). Uz slēgto triodi šis impulss nekādu iespaidu neatstāj (tā iedarbības rezultātā triode paliek slēgta), bet atvērto triodi impulss aizver. Triodei aizveroties, tās anodstrāva kļūst vienāda ar nulli un anoda potenciāls lēciņveidā pieaug līdz  $E_a$  tuvas nozīmes vērtībai. Šis pozitīvā potenciāla pieaugums tiek daļēji pievadīts kreisajai triodei, kuras tīkliņa rezultējošais potenciāls  $u_{g_1}$  kļūst pozitīvs. Triode atveras, sāk plūst anodstrāva, radot sprieguma kritumu uz rezistora  $R_{a_1}$ . Šīs triodes anodspriegums  $u_{a_1}$  lēciņveidā samazinās. Līdz ar to samazinās pozitīvais potenciāls, ko pievada labējās lampas tīkliņam. Kaut arī īslaicīgais ieejas impulss  $u_1$  beidzas, labējā triode paliek aizvērta, jo tās tīkliņa rezultējošais potenciāls  $u_{g_2}$  kļuvis negatīvāks par šīs triodes aizvēršanas spriegumu. Līdz ar to shēma lēciņveidā ir nonākusi otrajā elektriskā līdzsvara stāvoklī. To pārsviet atpakaļ iepriekšējā līdzsvara stāvoklī var tikai nākamais palaišanas impulss  $u_1$ , kura iedarbība ir analoga pirmajam.

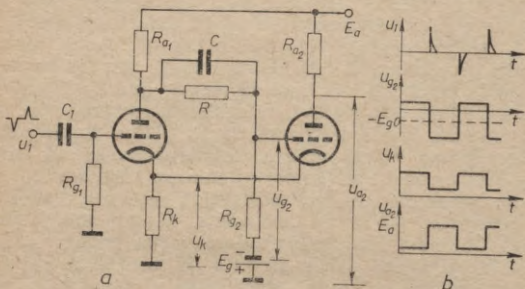
Tīkliņkēdēs diodes slēdz tādēļ, lai novērstu trigeru iedarbi uz palaišanas impulsu ģeneratoru. Paralēli rezistoriem  $R_1$  un  $R_2$  slēdz kondensatorus  $C_1$  un  $C_2$ , kas sprieguma lēcieni momentos šuntē šos rezistorus it kā ar īsslēgumu. Ja nebūtu šo kondensatoru, tad triodu tīkliņspriegumu maiņām būtu eksponentes raksturs, nevis lēcienveida raksturs (cauri lielas vērtības rezistoriem  $R_1$  un  $R_2$  būtu jāuzlādējas lampu parazitiskajām ieejas kapacitātēm) un, ja palaišanas impulsi ļoti īslaicīgi, tad shēma šo spriegumu lēnās augšanas dēļ varētu nepaspēt pārsvieties otrā līdzsvara stāvoklī.

Kā redzams no spriegumu laika diagrammām, trigeru lampu anodos tiek ģenerēti taisnstūrim tuvas formas impulsi, kuru ilgums vienāds ar palaišanas impulsu periodu.

Šāda tipa trigerus plaši izmanto dažādās impulsu skaitīšanas un dalīšanas shēmās, par elektronu slēdzi un daudzās citās iekārtās.

Automātiskā ļoti plaši izmanto katodsaites trigeru

(9-29. zīm.). Arī tam ir divi elektriskā līdzsvara stāvokļi. Ja kreisā triode ir slēgta, tās anoda potenciāls ir tuvs  $E_a$  vērtībai. Daļu šī augstā anoda potenciāla ar rezistoru sprieguma dalītāju  $R$ ,  $R_{g2}$  pievada labējās lampas tīkliņam, uz kuru iedarbojas arī  $E_g$  avota un  $u_k$  negatīvie po-



9-29. zīm. Katodsaites lampu trigers:  
a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

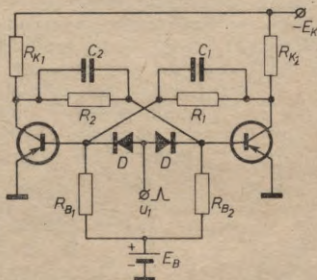
tenciāli ( $u_k$  rada labējās triodes anodstrāvu). Rezultējošais  $u_{g2}$  potenciāls šai gadījumā ir nedaudz pozitīvāks par nulli, tādēļ labējā triode ir atvērta. Viegli saskatāms arī faktors, kas noslēdz kreiso triodi, — pietiekami liels negatīvais  $u_k$  potenciāls attiecībā pret šīs lampas tīkliņu.

Otrajā elektriskā līdzsvara stāvoklī shēmu var pārsviet pozitīvs palaišanas impulss  $u_1$ , ko pievada kreisās triodes tīkliņam. Šī lampa tiek atvērta, tās anoda potenciāls pazeminās, pazeminās arī labējās triodes tīkliņa pozitīvais potenciāls, tādēļ rezultējošais potenciāls te kļūst negatīvāks par triodes aizvēršanas potenciālu un labējā triode aizveras. Līdz ar to pazeminās arī potenciāls  $u_k$  un kreisā triode paliek atvērta.

Iepriekšējā elektriskā līdzsvara stāvoklī shēmu var atgriezt tikai negatīvs palaišanas impulss  $u_1$ , kas aizver kreiso triodi. Tūdaļ iedarbojas saite, kas atver labējo triodi.

Shēmas pārsviešanās arī te norisinās lēcienveidā. Pāātrinātu shēmas pārsviešanos veicina kondensators  $C$ , kam ir tāda pati loma kā kondensatoriem  $C_1$  un  $C_2$  anoda-tīkliņa saišu trigerā.

Katodsaites trigeru darbības īpatnība ir tā, ka palaišanu var izdarīt tikai ar divpolāru signālu, bet shēmas darbība nav atkarīga no palaišanas signāla formas (to var palaist pat ar sinusoidālu signālu). Nav svarīgs arī labējās triodes anodslopes ( $R_{a_2}$ ) raksturs. Tā var būt arī



9-30. zīm. Kolektora-bāzes saišu tranzistoru trigers.

induktīva. Tāpēc šādu shēmu ļoti vienkārši sasaistīt ar dažādām elektromehāniskām ierīcēm, piemēram, ar relejiem, skaitītājiem, soļu meklētājiem u. c., tos ieslēdzot rezistora  $R_{a_2}$  vietā.

Ļoti bieži šo shēmu izmanto arī taisnstūra impulsu formēšanai no sinusoidāla sprieguma.

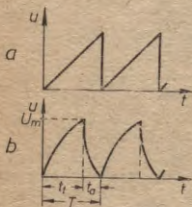
**Tranzistoru trigeri.** Tranzistoru trigeru pamatshēmas ārēji maz atšķiras no lampu trigeru shēmām, kaut arī dažreiz ir sastopamas pilnīgi citādas shēmas. 9-30. zīm. attēlota kolektora-bāzes saišu tranzistoru trigeru shēma. Tā ir analoga anoda-fikliņa saišu lampu trigeru shēmai. Analogija ir vēl lielāka, ja izmanto  $n-p-n$  tipa tranzistorus. Arī darbības princips līdzīgs lampu trigeram. Elektriski stabilā stāvoklī viens tranzistors ir slēgts, bet otrs — atvērts un piesātināts.

Vienu no svarīgākajiem trigeru raksturīgajiem lielumiem — ātrdarbību — ierobežo tranzistoru inerce. Atrdarbību nosaka tranzistora efektīvās pastiprināšanas robežfrekvence  $f_{\alpha}$ .

Eksistē arī emiteru saišu trigeru shēmas, kas ir līdzīgas katodsaites lampu trigeru shēmām.

## 9-7. Lineāri mainīga sprieguma ģenerācija

Ļoti plaši impulsu tehnikā izmanto lineāri mainīgu spriegumu, sevišķi periodisku. To lieto katodstaru lampās izvērsei, salīdzināšanas iekārtās, maināmas aiztures iegūšanai u. c. Ideāls periodisks lineāri mainīgs spriegums attēlots 9-31. zīm. *a*. Reāli šādu spriegumu iegūt nevar. To var ģenerēt tikai tuvināti. Tādēļ reāls lineāri mainīgs spriegums, ko bieži sauc arī par zāģveida spriegumu tā



9-31. zīm. Periodisks lineāri mainīgs spriegums:  
*a* — ideāls; *b* — reāls.

līdzības dēļ ar zāģa zobiem, nedaudz atšķiras no ideālā (9-31. zīm. *b*). Reālu zāģveida spriegumu raksturo šādi parametri:

$U_m$  — sprieguma amplitūda,  
 $t_t$  — tiešās gaitas ilgums,  
 $t_a$  — atpakaļgaitas ilgums,  
 $T$  — sprieguma periods,

$v = \frac{U_m}{t_t}$  — tiešās gaitas augšanas ātrums,

$$\rho = \frac{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0} - \left. \frac{du}{dt} \right|_{t=t_t}}{\left. \frac{du}{dt} \right|_{t=0}} \text{ — tiešās}$$

gaitas nelinearitātes koeficients.

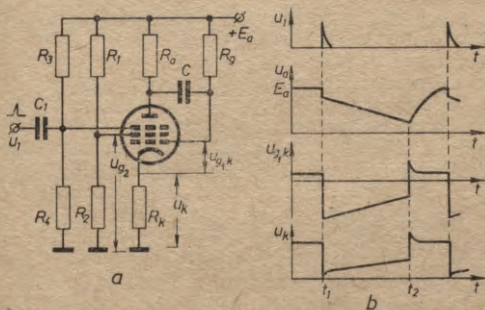
Salīdzinot zīmējumā attēlotos ideālo un reālo (zāģveida) spriegumu, redzams, ka ideālajam lineāri mainīgajam spriegumam  $t_a=0$  un arī  $\rho=0$ . Tātad galvenā atšķirība starp ideālo un reālo lineāri mainīgo spriegumu ir tā, ka reāla sprieguma tiešajai gaitai piemīt zināma nelinearitāte un atpakaļgaitas ilgumam ir galīga vērtība.

9-31. zīm. attēlotie spriegumi ir lineāri augoši. Praksē jāstopas arī ar lineāri kritošiem spriegumiem. Sai gadījumā lineārās daļas momentānā amplitūda proporcionāli (vai tam tuvināti) samazinās laikā.

Lineāri mainīga (krietoša) sprieguma ģenerācijai ļoti bieži izmanto fantastronu shēmas. Salīdzinot ar visām citām lineāri mainīgā sprieguma ģeneratoru shēmām, fantastroni ģenerē zāģveida spriegumu ar viszemāko nelinearitātes koeficientu.

9-32. zīm. attēlota katodsaites fantastrona shēma un spriegumu laika diagrammas. Shēma raksturīga ar to, ka

rezistori  $R_a$  un  $R_g$  ir ap megomu,  $R_k$  — daži  $k\Omega$ , bet  $C$  var mainīties ļoti plašās robežās — no 100 pF līdz 100  $\mu$ F. Sprieguma dalītājs  $R_1, R_2$  aprēķināts tā, lai uz rezistora  $R_2$  būtu ap 80 V liels spriegums, kas pozitīvs attiecībā pret lampas ekrāntīkliņu. Spriegumu dalītājs  $R_3, R_4$  aprēķināts tā, lai uz rezistora  $R_4$  būtu ap 20 V liels spriegums, kas arī ir pozitīvs attiecībā pret pentodes aizsargtīkliņu.



9-32. zīm. Katodsaites fantastrons:  
 a — shēma; b — spriegumu laika diagrammas.

Pentodes stūrējošā tīkliņa potenciāls ir pozitīvs, tādēļ plūst šī tīkliņa strāva. Taču starp stūrējošo tīkliņu un katodu ir tikai dažu mV liels spriegums (ši iecirkņa pretestība ir niecīga, salīdzinot ar rezistoru  $R_g$ ). Pentodē plūst arī ekrāntīkliņa strāva. Abas šīs strāvas summējas samērā lielā katoda emisijas strāvā, kas plūst cauri rezistoram  $R_k$ , radot uz tā ap 40 V lielu sprieguma kritumu, kas ir pozitīvs attiecībā pret pentodes katodu.

Lampas režīmus nosaka spriegumi starp tās attiecīgajiem tīkliņiem un katodu. Tādēļ ekrāntīkliņa potenciāls attiecībā pret katodu ir pozitīvs un ap 40 V liels, bet aizsargtīkliņa potenciāls — negatīvs un ap  $-20$  V liels. Šāds negatīvs aizsargtīkliņa potenciāls attiecībā pret lampas katodu ir pilnīgi pietiekams, lai pentode ar šo tīkliņu tiktu slēgta. Tādēļ lampā anodstrāva neplūst un tās anoda potenciāls ir vienāds ar  $+E_a$ . Arī kondensatora  $C$  kreisajai plātei ir šis pats potenciāls. Kondensatora labējai

platei ir lampas stūrējošā tīkliņa potenciāls, kas, ja neievēro necīgo sprieguma kritumu lampas iecirknī stūrējošais tīkliņš — katods, ir vienāds ar  $u_k$ . Šīs shēmas stāvoklis ir elektriski stabils.

Ja kādā laika momentā  $t_1$  (9-32. zīm. *b*) pentodes aizsargtīkliņam pievada pozitīvu impulsu  $u_1$ , kura amplitūda ir tik liela, ka var atvērt lampu aiz šī tīkliņa, tad pentodē sāk plūst anodstrāva. Anoda potenciāls lēcienvēidā nedaudz pazeminās, un sākas kondensatora  $C$  izlāde. Izlādes strāva plūst no kondensatora  $C$  kreisās plates cauri pentodei, rezistoram  $R_k$ , barošanas  $E_a$  avotam un rezistoram  $R_g$  uz kondensatora labējo plati. Kondensatora izlādei cauri pretestībām būtu jānotiek pēc eksponentlikuma (izlādes strāva sākumā liela, pēc tam strauji samazinās). Bet, izlādes strāvai plūstot cauri rezistoram  $R_g$ , uz tā rodas sprieguma kritums, kas ievirza darba punktu stūrējošā tīkliņa raksturliknes negatīvajā daļā. Tādēļ uzreiz izbeidzas stūrējošā tīkliņa strāva, samazinās katoda emisijas strāva un spriegums  $u_k$  samazinās līdz apmēram 10—20 V. Kaut arī īslaicīgā palaišanas impulsa iedarbība jau izbeigusies, aizsargtīkliņš lampu vairs nenoslēdz, jo aizsargtīkliņa potenciāls ir kļuvis pozitīvs attiecībā pret katodu.

Stūrējošā tīkliņa negatīvais potenciāls attiecībā pret katodu bremzē kondensatora izlādi (pieaugot izlādes strāvai, pieaug stūrējošā tīkliņa negatīvais potenciāls, kas savukārt ierobežo izlādes strāvu). Tātad shēmā izveidota pretsaite, kas realizē kondensatora izlādi ar konstantu strāvu. Bet, ja kondensators izlādējas ar konstantu strāvu, tad spriegums uz tā samazinās lineāri.

Kādā laika momentā  $t_2$  kondensators ir pilnīgi izlādējies, tādēļ tā izlādes strāva kļūst vienāda ar nulli. Pentodes stūrējošā tīkliņa potenciāls atkal kļūst pozitīvs, parādās šī tīkliņa strāva, pieaug katoda emisijas strāva, pieaug arī spriegums  $u_k$  un aizsargtīkliņš aizver lampu. Tūdaļ sākas kondensatora  $C$  uzlāde. Uzlādes strāva plūst no  $E_a$  avota pozitīvās spaiļes cauri rezistoram  $R_a$ , kondensatoram  $C$ , lampas iecirknim stūrējošais tīkliņš — katods un rezistoram  $R_k$  uz zemējumu. Kad kondensators uzlādējies, var pievadīt nākamo palaišanas impulsu.

Lineāri krītošo spriegumu parasti noņem no lampas anoda.

## 10. nodaļa

### LIDZSPRIEGUMA UN LIDZSTRĀVAS STABILIZĀCIJA

#### 10-1. Vispārīgas ziņas

Daudzos elektronikas slēgumos nepieciešami līdzstrāvas avoti ar ļoti stabilu spriegumu (strāvu), lai nemainītos shēmas vai atsevišķa elementa darba režīms. Praksē nepieciešami divu tipu barošanas avoti: stabilizēta līdzsprieguma avoti ar ļoti mazu iekšējo pretestību, lai to izejas spriegums praktiski nemainītos atkarībā no slodzes strāvas maiņām, un stabilizētas līdzstrāvas avoti ar ļoti lielu iekšējo pretestību, lai strāvas stiprums slodzes ķēdē praktiski nemainītos, ja mainās slodzes pretestība. Bez tam jebkuram no šiem avotiem nedrīkst mainīties izejas spriegums tikla (ieejas) sprieguma svārstību rezultātā.

Līdzsprieguma stabilizatoru pamatelements ir stabilitrons. 1. nodaļā apskatīti pusvadītāju stabilitroni jeb t. s. Zenera diodes. 1-32. zīm. attēlota vienkāršākā sprieguma stabilizācijas shēma ar Zenera diodi un grafiski attēlota tās darbība. 5. nodaļā apskatīti jonu stabilitroni, to darbība un vienkāršākais slēgums (sk. 5-11. zīm.). Kā redzams, gan jonu stabilitronu un Zenera diodu slēgumi, gan arī sprieguma stabilizācijas principi ir visai līdzīgi. Parasti jonu stabilitronus lieto relatīvi lielu spriegumu gadījumā (virs 100 V), bet pusvadītāju stabilitronus — pie attiecīgi zemākiem spriegumiem, kaut gan pēdējā laikā ir konstruētas pusvadītāju stabilitronu diodes ar Zenera (caursites) spriegumu virs 100 V, piemēram, Zenera diodei 2C980A caursites spriegums  $U_z = 180$  V.

Vienkāršākās stabilizācijas shēmas pielieto samērā reti, jo tās ir mazjaudas un parasti «baro» tikai vienu pakāpi, piemēram, heterodīnu radiouztvērējos. Lai iegūtu lielākas jaudas stabilizētu spriegumu, lieto speciālus stabilizatorus, kuros ietilpst arī līdzstrāvas pastiprinātāji.

## 10-2. Stabilizēta līdzsprieguma avoti

Stabilizēta līdzsprieguma avotu galvenie parametri ir stabilizācijas koeficients un avota iekšējā pretestība, Stabilizācijas koeficients

$$K_{st} = \frac{\Delta u_1 / u_1}{\Delta u_s / u_s}, \text{ ja } R_s = \text{const}, \quad (10-1)$$

kur  $u_1$  — stabilizējamais līdzspriegums,  
 $u_s$  — spriegums uz slodzes,  
 parāda, cik reizu mazāk svārstās stabilizētais (izejas) spriegums salīdzinājumā ar ieejas spriegumu.

Stabilizēta līdzsprieguma avota iekšējā pretestība ir

$$R_{st} = \frac{\Delta u_s}{\Delta i_s}, \text{ ja } U_1 = \text{const}. \quad (10-2)$$

Stabilizēta līdzsprieguma avotos stabilizācijas koeficients sasniedz tūkstošus, bet iekšējā pretestība parasti ir daži omi vai pat omu daļas.

Vienkāršākajā sprieguma stabilizācijas shēmā (sk. 1-32. zīm. *a* vai 5-11. zīm.) var samērā viegli aprēķināt stabilizācijas koeficientu atkarībā no shēmas parametriem.

1-32. zīm. *a* attēlotās shēmas ieejas un izejas spriegumus saista izteiksme

$$u_1 = u_s + (i_z + i_s)R = u_s + i_z R + \frac{u_s}{R_s} R. \quad (10-3)$$

Diferencējot izteiksmi pēc  $u_s$ , iegūst

$$\frac{du_1}{du_s} = 1 + \frac{di_z}{du_s} R + \frac{R}{R_s} = 1 + \frac{R}{R_z} + \frac{R}{R_s}, \quad (10-4)$$

kur  $R_z = \frac{du_s}{di_z}$  — stabilitrona maiņstrāvas iekšējā pretestība (jo  $u_s = u_z$ ).

Ievietojot (10-3) un (10-4) izteiksmē (10-1) un sāsinot ar  $u_s$  (pēc tam ar  $R$ ), iegūst

$$K_{st} = \frac{1 + \frac{R}{R_z} + \frac{R}{R_s}}{1 + \frac{i_z}{u_s} R + \frac{R}{R_s}} = \frac{1}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_z} + \frac{1}{R_s}}, \quad (10-5)$$

kur  $R_0 = \frac{u_s}{i_z}$  — stabilitrona līdzstrāvas pretestība.

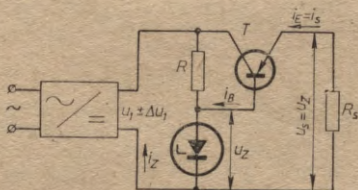
Stabilitrona maiņstrāvas pretestība ir ļoti maza salīdzinājumā ar shēmas elementu pretestību ( $R_Z \ll R$  un  $R_Z \ll \ll R_s$ ), tāpēc

$$K_{st} = \frac{\frac{1}{R_Z}}{\frac{1}{R} + \frac{1}{R_0} + \frac{1}{R_s}} \quad (10-6)$$

No izteiksmes (10-6) redzams, ka stabilizācijas koeficients ir jo lielāks, jo lielākas ir  $R$  un  $R_s$  vērtības — tāpat jo mazāka strāva tiek aizvadīta no šī vienkāršākā sprieguma stabilizatora.

Jau 1. nodaļā atzīmēts, ka šāda stabilizatora shēma darbojas normāli, ja  $i_s \leq (0,1 \div 0,2) i_Z$ .

Lai varētu palielināt slodzes strāvu, jālieto līdzstrāvas pastiprinātājs. 10-1. zīm. attēlotajā shēmā līdzstrāvas



10-1. zīm. Līdzsprieguma stabilizācija ar Zenera diodi un līdzstrāvas pastiprinātāju.

pastiprinātāja funkcijas izpilda tranzistors emitera atkārtotāja slēgumā. Kā zināms, šādam slēgumam sprieguma pastiprinājuma koeficients ir  $K_U \approx 1$ , turpretī strāvas pastiprinājuma koeficients  $K_I = \frac{i_E}{i_B} \approx \frac{i_K}{i_B} = B$ . Tā kā  $i_E = i_s$  un  $i_B \leq (0,1 \div 0,2) i_Z$ , tad

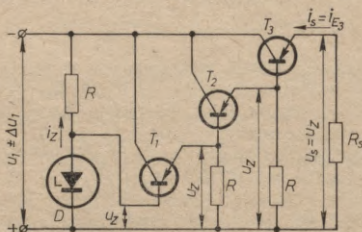
$$i_s = B i_B = 0,1 i_Z B \quad (10-7)$$

Ja jāiegūst vēl lielāka slodzes strāva, jālieto vairākas anālogas tranzistoru pakāpes. Tad kopejais līdzstrāvas

pastiprinājuma koeficients  $K_I = B_1 B_2 \dots B_n$ . Trīspakāpju līdzstrāvas pastiprinātāja gadījumā (10-2. zīm.)

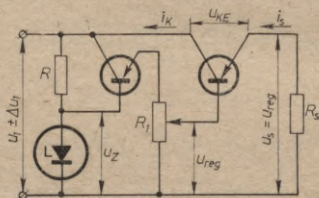
$$i_s = 0,1 i_z B_1 B_2 B_3. \quad (10-8)$$

Piemēram, ja  $B_1 = B_2 = B_3 = 20$ , tad  $i_s = 8 \cdot 10^2 i_z$ .



10-2. zīm. Daudzpakāpju līdzstrāvas pastiprinātāja lietošana līdzsprieguma stabilizācijā.

Lai gan stabilizēta spriegumā avotu shēmas ar Zenera diodēm un līdzstrāvas tranzistoru pastiprinātājiem ir ļoti vienkāršas, samērā lielas grūtības rada pareiza tranzistoru izvēle, it īpaši gala pakāpei regulējamu sprieguma avotu gadījumā.



10-3. zīm. Regulējama stabilizēta sprieguma avota shēma.

10-3. zīm. attēlota regulējama stabilizēta sprieguma avota shēma, kurā izejas spriegumu regulē ar potenciometru  $R_1$ , kas ieslēgts jaudas tranzistora bāzes ķēdē (ar

mazjaudas potenciometru regulē spriegumu lielas jaudas ķēdē). No shēmas redzams, ka

$$u_1 = u_{KE} + u_s. \quad (10-9)$$

Izejas spriegums ir regulējams no  $U_{s \text{ min}}$  līdz  $U_{s \text{ max}}$ , līdz ar to mainās arī spriegums  $u_{KE}$ , jo

$$u_{KE} = u_1 - u_s. \quad (10-10)$$

Jaudai

$$P = u_{KE} i_K, \quad (10-11)$$

ko izkļiedē tranzistora kolektora pāreja, jābūt mazākai par pieļaujamo izkļiedes jaudu. Tā kā, regulējot izejas spriegumu, mainās  $u_{KE}$ , tad mainās arī izkļiedējamā jauda. Ācīm redzot, pie noteiktas kolektora strāvas maksimālā izkļiedes jauda ir

$$P_{\text{max}} = U_{KE \text{ max}} I_K, \quad (10-12)$$

kur

$$U_{KE \text{ max}} = u_1 - U_{s \text{ min}}, \quad (10-13)$$

bet, ievērojot tikla sprieguma svārstības,

$$U_{KE \text{ max}} = u_1 + \Delta u_1 - U_{s \text{ min}}. \quad (10-14)$$

Tā kā stabilizētā sprieguma avota slodzes strāva var mainīties — tātad mainās tranzistora kolektora strāva —, tad vislielākā izkļiedējamā jauda ir

$$P_{\text{max max}} = (u_1 + \Delta u_1 - U_{s \text{ min}}) I_{K \text{ max}}, \quad (10-15)$$

kur  $I_{K \text{ max}} \approx I_{s \text{ max}}$ .

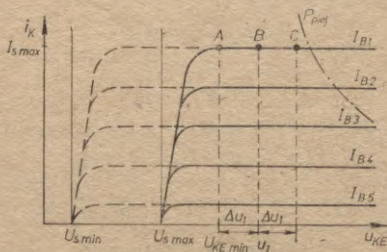
Tāpēc izejas tranzistoru izvēlas pēc noteikuma

$$P_{\text{max max}} < P_{\text{pieļ.}} \quad (10-16)$$

Precīzai un ātrai izejas tranzistora izvēlei ērti lietot grafisku aprēķinu (10-4. zīm.). Dekarta koordinātēs uz ordinātu ass jāatliek maksimālā slodzes strāva  $I_{s \text{ max}}$  (tādā pašā mērogā kā kolektora strāva tranzistora raksturliņēs), bet uz abscisu ass — stabilizētā avota spriegumi  $U_{s \text{ min}}$  un  $U_{s \text{ max}}$  (atbilstoši  $u_{KE}$  mērogam). Tālāk šajā pašā koordinātu sistēmā jāattēlo tranzistora rakstur-

līkņu saime  $i_K = \varphi(u_{KE})$  ar koordinātu sākumu punktā, kas atbilst  $U_{s \max}$ .

Lai notiktu sprieguma stabilizācija, minimālajam stabilizatora ieejas spriegumam  $U_{1 \min} = u_1 - \Delta u_1$ , ja  $i_K = I_{s \max}$ , jāatrodas tranzistora raksturlienes lineārajā daļā. Tai pašā



10-4. zīm. Izejas tranzistora grafisks aprēķins.

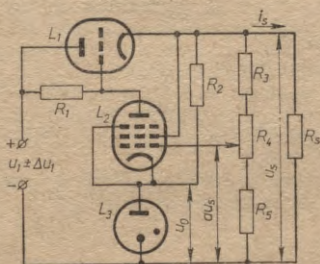
laikā no lietderības koeficienta palielināšanas viedokļa šim spriegumam jāatbilst minētās raksturlienes lineārās daļas sākumam (punkts A). Tātad taisngrieža izejas spriegumam jeb stabilizatora ieejas spriegumam jābūt

$$u_1 = U_{s \max} + U_{KE \min} + \Delta u_1. \quad (10-17)$$

Tālāk atliek tikai pārliecināties, vai tranzistors ir derīgs no izkliedes jaudas viedokļa. Šo pārbaudi var izdarīt analītiski atbilstoši izteiksmēm (10-15) un (10-16) vai arī grafiski. Grafiskai pārbaudei tranzistora raksturliķņu saimes jāattēlo ar koordinātu sākumu punktā  $U_{s \min}$ . Tad pareizi izraudzīta tranzistora gadījumā punktam C, kas atbilst  $u_1 + \Delta u_1$  un  $I_{s \max}$ , jāatrodas pa kreisi no pieļaujamās izkliedes jaudas parabolas.

Praktiski šāds grafisks aprēķins ir ne tikai precīzs, bet arī ātrs un ērts. Uz pauspapīra atliekot lielumus  $I_{s \max}$ ,  $U_{s \min}$ ,  $U_{s \max}$  atbilstošos mērogos, pēc tam savietojot attiecīgos punktus ( $U_{s \max}$  un  $U_{s \min}$ ) ar tranzistora raksturliķņu saimes koordinātu sākumu, var atrast punktus A, B un C, kā arī pārbaudīt, vai  $P_{\max \max} < P_{pl}$ .

Stabilizēta līdzsprieguma avotus ar tranzistoriem lieto galvenokārt relatīvi zemiem spriegumiem (parasti desmiti voltu). Turpretī lielāku spriegumu gadījumā (simti voltu) stabilizēta sprieguma avotus veido ar elektronu lampām. 10-5. zīm. attēlota šāda avota pamatshēma. Kā redzams,



10-5. zīm. Stabilizēta sprieguma avots ar vakuuma lampām.

virknē ar slodzes rezistoru ieslēgta elektronu lampa  $L_1$  (parasti tetrode triodes slēgumā vai lielaudas triode). Šī lampa darbojas kā regulējama pnestība, jo  $L_1$  iekšējā pnestība atkarīga no tās stūrējošā tīkliņa potenciāla, ko regulē vadības lampa  $L_2$ . Pentodes  $L_2$  katodā ieslēgts stabilitrons  $L_3$  (parasti jonu, lai gan var būt arī Zenera diode), kas rada tā saucamo atbalstspriegumu  $u_0$ . Pati pentode darbojas kā atgriezeniskās saites pastiprinātājs, jo uz tās stūrējošo tīkliņu no dalītāja  $R_3, R_4, R_5$  (rezistors  $R_2$  ir stabilitrona balasta pnestība) tiek padota izejas sprieguma daļa  $au_s$ . Tātad starp lampas  $L_2$  tīkliņu un katodu pastāv potenciālu starpība

$$u_{gk} = au_s - u_0. \quad (10-18)$$

Piemēram, ja ieejas spriegums  $u_1$  palielinās līdz  $u_1 + \Delta u_1$ , sākumā palielinās arī spriegums uz slodzes, tātad arī dalītāja spriegums  $au_s$ , kas palielina lampas  $L_2$  tīkliņa potenciālu. Lampā  $L_2$  palielinās anodstrāva, attiecīgi palielinās arī sprieguma kritums uz  $L_2$  slodzes rezistora  $R_1$ . Tā rezultātā samazinās regulējamās lampas  $L_1$  tīkliņa

potenciāls, tātad palielinās šīs lampas pretestība. Sprieguma kritums uz  $L_1$  pieaug, bet uz slodzes rezistora samazinās līdz stabilizējamai vērtībai.

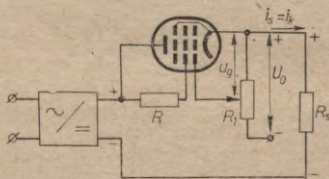
Ja ieejas spriegums  $u_1$  samazinās līdz  $u_1 - \Delta u_1$ , shēma darbojas analogi, tikai šai gadījumā anodstrāva atgriezeniskās saites lampā  $L_2$  samazinās un arī regulējamās lampas  $L_1$  iekšējā pretestība samazinās, tātad samazinās sprieguma kritums uz  $L_1$ , bet slodzes spriegums palielinās līdz stabilizējamai vērtībai.

Šī shēma analogi darbojas arī slodzes strāvu maiņas gadījumā, jo arī tad sprieguma izmaiņa uz slodzes rezistora caur atgriezeniskās saites pastiprinātāju iedarbojas uz regulējamo lampu  $L_1$ .

Pēc šāda principa darbojas arī plaši pazīstamie universālie stabilizētie barošanas avoti УИП-1.

### 10-3. Stabilizētas līdzstrāvas avoti

Kā jau norādīts, stabilizētas līdzstrāvas avotam jābūt ar ļoti lielu iekšējo pretestību, lai slodzes strāva nemainītos, mainoties slodzes pretestībai. Vienkāršākais stabilizētas līdzstrāvas avota piemērs ir taisngrieža izejā ieslēgta pentode (10-6. zīm.). Kā zināms, pentodei ir liela iekšējā



10-6. zīm. Stabilizētas līdzstrāvas avota shēma.

pretestība — parasti virs megoma. Tai pašā laikā pentodes emisijas strāva gandrīz nav atkarīga no anodsprieguma, bet tikai no stūrējošā tīkliņa potenciāla (sk. 3. nodaļu). Tāpēc attēlotajā shēmā slodzes strāva, kas vienāda ar pentodes emisijas strāvu, nav atkarīga ne no slodzes

pretestības, ne arī no taisngrieža sprieguma svārstībām (to skaitā no pulsācijām).

Slodzes strāvu regulē ar stūrējošā tikliņa potenciālu. Šim nolūkam shēmā lietots potenciometrs  $R_1$  un atsevišķs stabilizēta sprieguma  $U_0$  avots.

Ja pentodes slēgumā vēl izveido strāvas pretsaiti, tad līdzstrāvas avota iekšējo pretestību var palielināt pat līdz  $30 \text{ M}\Omega$ .

## 11. nodaļa

### KATODSTARU OSCILOGRĀFS

#### 11-1. Vispārīgas ziņas

Katodstaru oscilogrāfus, kurus sauc arī par elektronstaru vai vienkārši par elektronu oscilogrāfiem, izmanto dažādu elektrisko procesu tiešai vizuālai novērošanai vai fotografēšanai. Pētāmā elektriskā procesa ainu te iegūst uz luminiscējoša ekrāna, pret kuru triecas asi fokusēts elektronu kūlis (stars). Sadursmes vietā uz luminiscējošā ekrāna rodas spīdošs punkts. Spīdošā punkta pārvietošanos pa ekrānu panāk ar mainīga elektriskā lauka iedarbi uz šo elektronu staru. Elektronu stara kustība praktiski ir neinerciāla pat pie samērā augstām šī lauka frekvencēm. Ja frekvences ir ļoti augstas (virs 1000 MHz), katodstaru oscilogrāfs kļūst inerciāls.

Katodstaru oscilogrāfs ir viena no visuniversālākajām dažādu elektrisko procesu pētījumu un mērījumu iekārtām. To izmanto sprieguma, strāvas, frekvences, pretestības, impedances, jaudas, fāzu nobīdes u. c. elektrisko lielumu novērošanai un mērīšanai. Izmantojot speciālas palīgiekārtas, uz oscilogrāfa ekrāna var novērot radiolampu, tranzistoru, rezonanses kontūru, pastiprinātāju u. c. ierīču raksturlīknes, neperiodiskus, nenostabilizējusos vai arī reti atkārtotošos procesus. Mazās inerces dēļ katodstaru oscilogrāfu izmanto dažādu mainīgu lielumu pētīšanai ļoti plašā frekvenču diapazonā.

Sakarā ar to, ka oscilogrāfisko pētījumu metodes ļauj izdarīt kā kvalitatīvu, tā arī kvantitatīvu pētāmā procesa novērtējumu, tās plaši lieto ne tikai elektronikā un radio tehnikā, bet arī daudzās citās zinātnes un tehnikas nozarēs: fizikā, ķīmijā, medicīnā, mehānikā, metalurgijā, bioloģijā, ģeoloģijā utt. dažādu neelektrisku lielumu pētījumos un mērījumos, iepriekš neelektriskos lielumus pārveidojot elektriskajos.

Oscilogrāfu var labi izmantot tikai tad, ja ir priekšstats par tā uzbūvi un dažādo bloku darbības principiem. Oscilogrāfa vispārīgā funkcionālā shēma attēlota 11-1. zīm.

Pētāmā procesa attēlu iegūst uz katodstaru lampas ekrāna. Ja pēta signāla spriegumu (vai strāvu) kā laika funkciju  $u=f(t)$ , tad šīs funkcijas grafiku var ļoti uzskatāmi attēlot Dekarta koordinātu sistēmā. Lampā elektronu staru noliec divos savstarpēji perpendikulāros virzienos, kurus var uzskatīt par koordinātu asīm. Nepieciešams, lai stara noliece pa abscisu asi būtu proporcionāla laikam, bet pa ordinātu asi —

proportcionāla sprieguma (strāvas) momentānajai vērtībai. Proportcionāli laikam elektronu staru noliec, liekot tam kustēties horizontāli ar konstantu ātrumu un izejas stāvokli atgriezties ļoti ātri. Šis process veido oscilogrāfa laika bāzi.

Pētāmā sprieguma (vai strāvas) radītais lauks noliec elektronu staru vertikālā virzienā. Tādējādi elektronu stara vertikālā izvirze katrā laika momentā viennozīmīgi atbilst pētāmā signāla momentānajai vērtībai. Ar laika bāzi uz katodstaru lampas ekrāna iegūtā signāla attēlu sauc par oscilogrammu.

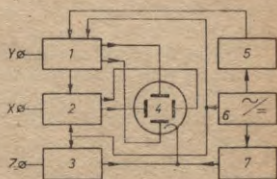
Stara vertikālās nolieces kanāls jeb vienkārši signāla kanāls kalpo pētāmā signāla sprieguma (vai strāvas) pārveidošanai atbilstošā elektronu stara vertikālajā noliecē.

Stara horizontālās nolieces kanāls jeb izvērses un sinhronizācijas kanāls kalpo laika bāzes signāla ģenerēšanai un pārvadei. Bez tam šis kanāls pastiprina elektronu stara horizontālās nolieces sinhronizācijas signālus.

Stara intensitātes vadības kanāls domāts signālu pārvadei uz katodstaru lampas stūrējošo elektrodu, lai modulētu elektronu staru pēc intensitātes (spilgtuma).

Amplitūdas kalibratoru un laika kalibratoru izmanto pētāmā signāla parametru mērīšanai.

Barošanas iekārta baro visus oscilogrāfa mezglus.



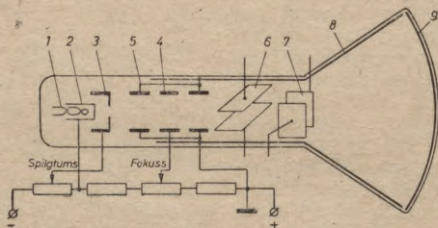
11-1. zīm. Oscilogrāfa vispārīgā funkcionālā shēma:

1 — stara vertikālās nolieces kanāls, 2 — stara horizontālās nolieces kanāls, 3 — stara intensitātes vadības kanāls, 4 — katodstaru lampa, 5 — amplitūdas kalibrators, 6 — barošanas iekārta, 7 — laika kalibrators.

## 11-2. Katodstaru lampa

Praktiski katodstaru oscilogrāfos izmanto tikai lampas, kurās stara fokusēšana un vadīšana notiek ar elektrostatiskā lauka palīdzību.

Garā cilindriskas formas stikla balonā, kura vienā galā ir konusveida paplašinājums, ievietotas trīs galvenās sastāvdaļas — elektronlielgabals (dažreiz to sauc arī par elektronprožektoru), noliecošās plātes un ekrāns (11-2. zīm.).



11-2. zīm. Katodstaru lampa:

- 1 — kvēle, 2 — katods, 3 — modulators, 4 — pirmais anods,  
5 — otrais anods, 6 — vertikāli noliecošās plātes, 7 — hori-  
zontāli noliecošās plātes, 8 — akvadags, 9 — ekrāns.

Elektronlielgabals, kurš atrodas balona tievajā galā, rada elektronu staru, t. i., tievu elektronu kūli, kurā elektroni kustas aksiālā virzienā ar ļoti lielu ātrumu. Elektronlielgabals sastāv no katoda, modulatora, pirmā un otrā anoda. Kvēdiega sakarsētais katods emitē elektronus. Modulators (stūrējošais elektrods) daļu katoda emitēto elektronu noformē virzītā starā. Bez tam modulators atkarībā no tam pievadītā potenciāla maina stara intensitāti. Pirmais un otrais anods paātrina elektronu kustību un fokusē staru.

Parasti modulatoram ir neliels negatīvs potenciāls attiecībā pret katodu. Mainot šī potenciāla lielumu, var mainīt caur modulatoru ejošo elektronu skaitu laika vienībā. Līdz ar to mainās stara radītā spīdošā punkta spilgtums uz lampas ekrāna.

Aiz modulatora novietoti abi anodi, pie tam otrais anods ir sadalīts divās daļās, starp kurām ievietots pir-

mais anods. Pirmajam anodam ir pozitīvs vairākus simtus voltu liels potenciāls, bet otrajam anodam — pozitīvs vairāku kV potenciāls attiecībā pret katodu. Elektriskais lauks starp abiem anodiem izveido elektrostātiskās lēcas, kas elektronu staru fokusē uz ekrāna, t. i., uz ekrāna ir minimāls spidošā punkta laukums. Elektronu stara fokusēšanas pakāpi var mainīt, ja maina pirmā anoda potenciālu. Parasti otrais anods ir savienots ar iekārtas šasiju, tāpēc lampas katodam pret šasiju ir augsts negatīvs potenciāls. 11-2. zīm. attēlotā pretestību ķēde parāda potenciālu kvalitatīvo sadalījumu uz elektronlielgabala elektrodēm.

Aiz elektronlielgabala atrodas divi savstarpēji perpendikulāri stara nolieces plašu pāri. Starp platēm ir samērā maza kapacitāte (1—3 pF). Horizontālajām platēm pievada zāģveida spriegumu, kura elektriskais lauks izvērš staru pa abscisu asi ( $X$  asi). Vertikālajām platēm pievada pētāmo spriegumu, kas noliec staru pa ordinātu asi ( $Y$  asi).

Katram plašu pārim vēl pievada līdzspriegumu, lai varētu staru statiski pārvietot horizontālā un vertikālā virzienā. So potenciālu lielumus maina ar atsevišķiem potenciometriem no oscilogrāfa priekšējā paneļa.

Katodstaru lampas raksturo noliecošo plašu statiskā sprieguma jutība. Tā izsaka stara nolieci milimetros no ekrāna centra, ja līdzspriegums uz noliecošajām platēm mainās par 1 V:

$$S = \frac{a}{U}, \quad (11-1)$$

kur  $a$  — stara novirzes attālums no lampas ekrāna centra pa horizontāli vai vertikāli (mm),

$U$  — horizontāli vai vertikāli noliecošajām platēm pievadītais līdzspriegums (V).

Katodstaru lampām jutība atkarīga no lampas konstrukcijas, otrā anoda sprieguma un ir konstants lielums. Jāatzīmē, ka vispār  $S_y \neq S_x$ , jo abi lielumi ir funkcijas no attāluma starp plašu pāri un ekrānu, bet šis attālums katram plašu pārim ir citāds.

Lampas ekrānu izveido, pārklājot balona gala iekšpusi ar vienu vai vairākām ļoti plānām luminiscējošas vielas kārtām.

Ja oscilogrāfs paredzēts galvenokārt signāla vizuālai

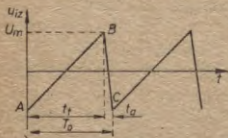
novērošanai, lieto katodstaru lampas, kuru ekrāniem ir gaiši zaļš attēla spīdums, jo cilvēka acs ir jutīgāka pret zaļu krāsu. Turpretī oscilogrāfos, kas domāti signāla attēla fotografēšanai, izmanto katodstaru lampas ar zilu ekrāna spīdumu.

Atsevišķos gadījumos izmanto ekrānus ar ilgu pēcspīdumu. Uz šāda ekrāna signāla attēls lēni izzūd. Tas nepieciešams vienreizēju (neatkārtojošos) signālu novērošanai.

Elektronu stara sadursmes vietā ar ekrānu rodas spīdošs punkts, kā arī sekundārā elektronu emisija — no ekrāna tiek izsisti elektroni. Sekundārie elektroni ekrāna priekšā izveido negatīvu telpas lādiņu, kas kavē stara elektronu kustību. Tādēļ balona iekšpusi pārklāj ar grafīta slāni, ko sauc par akvadagu. Tas ir elektriski savienots ar otro anodu. Akvadāgs neitralizē telpas lādiņu, kā arī ekrānizē lampu no ārēju elektrisko un magnētisko lauku iedarbes. Ekranizācijas efekta palielināšanai katodstaru lampu parasti ievieto metāliskā čaulā.

### 11-3. Katodstaru oscilogrāfa uzbūve

**Stara izvērse.** Spriegumu, kas oscilogrāfā pārvirza elektronu staru noteiktā atkarībā no laika, sauc par izvērses spriegumu, bet spīdošā punkta trajektoriju uz lampas ekrāna, kad nedarbojas pētāmais spriegums, — par izvērsi. Dažādu periodisku procesu atveidošanai uz oscilogrāfa ekrāna Dekarta koordinātu sistēmā lieto nepārtraukto lineāro izvērsi: stars nepārtraukti un periodiski pārvietojas horizontālā virzienā proporcionāli laikam. To panāk ar periodisku zāģveida spriegumu (11-3. zīm.). Punkti *A* un *B* atbilst stara galējiem stāvokļiem uz abscisu ass. Laika sprīdī  $t_t$  stars ar konstantu ātrumu pārvietojas no viena abscisu ass galējā stāvokļa uz otru (parasti virzienā no kreisās puses uz labo) —



11-3. zīm. Nepārtrauktā lineāra izvērse.

notiek stara tiešā gaita. Kad ir sasniegta zāģveida sprieguma maksimālā amplitūda  $U_m$ , stars laikā  $t_a$  atgriežas sākuma stāvoklī (punkts *C*) — notiek stara atpakaļgaita. Nākamā perioda laikā

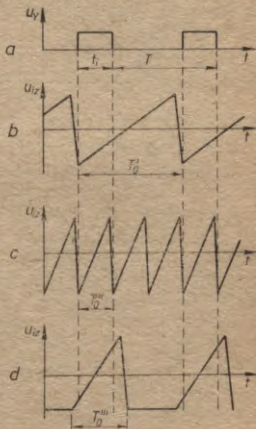
process atkārtojas. Lai iegūtu pilnvērtīgu periodiskā procesa attēlu uz katodstaru lampas ekrāna, jāpanāk, lai  $t_a \ll t_i$ . Lielumu  $U_m$  sauc par izvērse sprieguma amplitūdu, bet  $T_0$  — par izvērse sprieguma periodu.

Pētāmā signāla attēls uz ekrāna ir nekustīgs tikai tad, ja stars katra sava tiešā gājiena laikā zīmē uz ekrāna vienu un to pašu likni. Tas notiek, ja izvērse frekvence  $F_0$  ir sinhrona ar pētāmā sprieguma frekvenci  $F_y$ , t. i., ja tās ir vienādas vai atšķiras veselu skaitu reižu ( $F_y = nF_0$ , kur  $n=1, 2, 3, \dots$ ). Tātad zāģveida sprieguma ģeneratoriem jābūt ar regulējamu ģenerētā sprieguma frekvenci.

Nepārtrauktu lineāru izvērsi ir grūti izmantot dažādu pārejas procesu, neperiodisku un islaicīgu periodisku procesu, kā arī atsevišķu impulsu pētīšanai. Ja, piemēram, jāizvērs liela samēra periodiski impulsi (11-4. zīm. a), tad, izvēloties izvērse periodu  $T'_0$ , kas vienāds ar pētāmo impulsu sekošanas periodu  $T$  (11-4. zīm. b), pētāmā impulsa izvērsei tiek izmantota niecīga izvērse sprieguma daļa — impulss uz ekrāna ir ļoti šaurs un līdz ar to grūti novērojams. Ja savukārt nepārtrauktas lineāras izvērse periodu  $T''_0$  izvēlas vienādu

ar pētāmā impulsa ilgumu  $t_i$  vai tuvu tam (11-4. zīm. c), tad impulss gan tiek izvērsts pa visu ekrānu, bet impulsu starplaikā stars vairākkārt tiek izvērsts pa horizontāli, tāpēc impulsa spilgtums ir daudzreiz vājāks par izvērse horizontāles spilgtumu. Tas rada grūtības oscilogrammas novērošanā un fotografēšanā. Visas šīs grūtības rodas arī tad, ja jāizvērs pārējas un neperiodiski procesi.

Sādos gadījumos lieto lineāro palaižamo izvērsi. Zāģveida izvērse sprieguma periodu  $T'''_0$  izvēlas nedaudz lielāku par pētāmā impulsa ilgumu  $t_i$  un izvērsi iedarbina tajā laikā, kad impulss ir pienācis oscilogrāfa



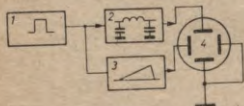
11-4. zīm. Palaižamās izvērse izmantošana liela samēra impulsu izvēršanai.

ieejā. Izvērsi pārtrauc drīz pēc pētāmā impulsa izbeigšanās (11-4. zīm. *d*) un no jauna palaiž tad, kad pienāk nākamais impulss. Šai gadījumā impulsa attēlu var izvērst pa visu lampas ekrānu.

Lai uz lampas ekrāna attēlotos impulss ar visu kāpumu, izvērsei jāšākas nedaudz agrāk par pētāmā impulsa pienākšanas momentu uz vertikāli noliecošajām platēm. Tāpēc lineārās palaižamās izvēršanas sprieguma ģeneratoriem jābūt ar svešierosmi. To uzbūves pamatā ir univibrators, kas vada kapacitātes lineāru uzlādi vai izlādi caur strāvas ierobežotāja ķēdi. Dažos oscilogrāfos lieto atsevišķus nepārtrauktas lineārās izvēršanas un palaižamās izvēršanas ģeneratorus, bet citos abu veidu izvēršanas spriegumus ģenerē viena un tā pati iekārta. Otrajā gadījumā pašierosmes ģeneratoru pārslēdz svešierosmes slēgumā.

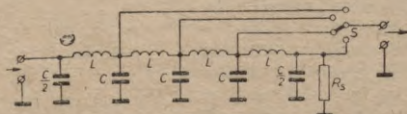
**Signāla aizture.** Parasti palaižamās izvēršanas ģeneratorus iedarbina pats pētāmā signāls. Bet tādā gadījumā netiek pilnīgi attēlots pētāmā impulsa kāpums, jo vajadzīgs noteikts laika sprīdis (kaut arī niecīgs), lai palaižamās izvēršanas ģenerators sāktu darboties. Tāpēc izvēršanas sākums nokavējas attiecībā pret pētāmā signāla pienākšanas momentu.

Lai novērstu šādu pētāmā signāla kropļojumu, pētāmā signāls ceļā starp oscilogrāfa ieeju un vertikāli noliecošajām platēm jāaiztur kādu laika sprīdi  $T_a$ . Šim laika sprīdim jābūt nedaudz lielākam par to laiku, kas vajadzīgs palaižamās izvēršanas ģeneratora iedarbināšanai. To panāk, shēmā ieslēdzot aiztures ķēdi (11-5. zīm.).



11-5. zīm. Signāla kavēšana ar aiztures ķēdes palīdzību: 1 — pētāmo impulsa avots, 2 — aiztures ķēde, 3 — palaižamās izvēršanas ģenerators, 4 — katodstaru lampas.

Par aiztures ķēdēm izmanto reālu kabeļu nogriežņus, taču biežāk veido mākslīgās aiztures



11-6. zīm. Mākslīgā aiztures linija.

līnijas (11-6. zīm.). Posmu skaitu līnijā, tātad arī kavējuma laiku maina ar slēdzi S.

**Stara dzēšana un pagaisma.** Nepārtrauktās izvērse gadījumā uz ekrāna redzams stara atpakaļgaitas attēls, kas gan ir ar ievērojami mazāku spilgtumu, taču attēlu uz ekrāna it kā pārsvītro: Tas ir sevišķi neērti, pētot augstfrekvences signālus.

Palaižamās izvērse gadījumā laikā, kad ģenerators vēl nav palaists, stara radītais spīdošais punkts uz ekrāna ir nekustīgs. Ja šī punkta spilgtums uz ekrāna ir liels, t. i., stara strāva ir liela, ekrāns šai punktā tiek bojāts. Lai nebūtu atpakaļgaitas attēla vai ekrāna bojājumu, abos gadījumos stars noteiktā laika sprīdī ir jādzēš. To panāk, lampas modulatoram pievadot pietiekami lielu negatīvu potenciālu, kuru parasti iegūst no izvērse ģenerators.

Sākoties izvērsei, modulatora negatīvo potenciālu likvidē. Lai uz ekrāna iegūtu pietiekami spilgtu pētāmā procesa oscilogrammu, izvērse laikā no izvērse ģenerators uz lampas modulatoru padod nelielu pozitīvu spriegumu. Šis process veido elektronu stara pagaismu.

**Sinhronizācija.** Lai uz katodstaru lampas ekrāna iegūtu kāda periodiska procesa nekustīgu attēlu, nepieciešams, lai pētāmā procesa frekvence  $F_y$  būtu sinhrona ar izvērse sprieguma frekvenci  $F_0$ . Ja  $F_y$  ir nedaudz lielāka par  $nF_0$ , tad katras izvērse laikā uz ekrāna attēlojas nedaudz vairāk kā  $n$  pētāmā sprieguma periodu. Tas nozīmē, ka ikviens nākamais procesa attēls tiek nedaudz pārbīdīts pa kreisi attiecībā pret iepriekšējo. Līdz ar to likne uz ekrāna plūstoši pārvietojas uz kreiso pusi. Savukārt, ja  $F_y$  ir nedaudz mazāka par  $nF_0$ , tad likne uz ekrāna plūstoši pārvietojas uz labo pusi.

Noteiktā laika momentā  $F_0$  un  $F_y$  sinhronismu var ieregulēt, mainot nepārtrauktās izvērse ģenerators frekvenci. Tomēr sinhronisms nesaglabājas ilgi, jo parasti zāģveida sprieguma ģenerators frekvences stabilitāte nav augsta. To ietekmē barošanas sprieguma svārstības, shēmas parametru nestabilitāte, fluktuācijas procesi u. c. Bez tam arī pētāmo periodisko signālu frekvence ne vienmēr ir augsti stabila. Ilgstošu abu spriegumu frekvenču sinhronismu iegūst ar nepārtrauktās izvērse ģenerators sinhronizāciju jeb t. s. frekvences līdzvilkšanu. Izvērse ģenerators piešķir ģenerēt frekvenci, kas ir vienāda ar pētāmā procesa frekvenci vai veselu skaitu reizi mazāka par to. Sai

gadījumā izvēršes ģenerators svārstību pašfrekvencei jābūt gandrīz vienādai ar pētāmā sprieguma frekvenci, bet sinhronizācija ir it kā ārējs ierosinājums, kas papildina ģenerators pašierosmi. Sinhronizācijas spriegumu, kas parasti ir pats pētāmais spriegums, ievada nepārtrauktas izvēršes ģeneratorā, tādējādi spiežot to ģenerēt stingri noteiktu frekvenci, kas var mainīties nelielās robežās (tātad frekvences līdzvilkšana iespējama tikai nelielās robežās). Šādu sinhronizāciju sauc par iekšējo sinhronizāciju. Oscilogrāfos izmanto arī sinhronizāciju ar tikla frekvenci (sinhronizācija ar tīklu) un sinhronizāciju no kāda ārēja signālu avota (ārējā sinhronizācija).

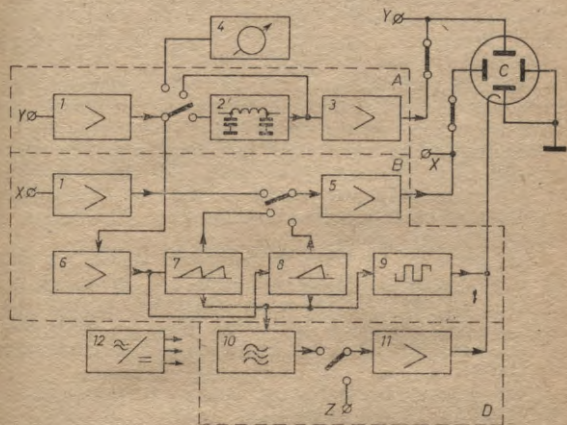
Lai izvēršes ģenerators labi sinhronizētos, nepieciešama optimāla sinhronizācijas sprieguma amplitūda. Ja amplitūda ir pārāk maza, tad sinhronizācija var izbeigties pat pie nelielām frekvences izmaiņām. Pārāk liela sinhronizācijas sprieguma amplitūda var radīt neperiodisku zāģveida spriegumu vai arī kropļot tā formu. Tādēļ oscilogrāfos sinhronizācijas sprieguma vērtību var regulēt.

**Blokslēma un galvenie mezgli.** 11-7. zīm. attēlota tipveida katodstaru oscilogrāfa vienkāršota blokslēma. Stara vertikālās nolieces kanāls (to bieži sauc arī par *Y* kanālu) sastāv no ieejas bloka, aiztures līnijas un stara vertikālās nolieces pastiprinātāja. Šī kanāla ieejas bloka izeju var pieslēgt vertikālās nolieces pastiprinātājam tieši vai arī caur aiztures līniju. Bez tam ir arī iespējams pētāmo signālu pievadīt tieši vertikālajam platēm, atslēdzot no tām vertikālās nolieces pastiprinātāju. Šo plašu izvadi parasti atrodas oscilogrāfa mugurpusē.

Ieejas bloks sastāv no sprieguma dalītāja un katoda atkārtotāja. Ar sprieguma dalītāju var vājināt ieejas signālu veselu skaitu reižu vai salāgot šī kanāla ieeju ar pētāmā signāla pievadīšanas kabeli. Sprieguma dalītāja pārvades koeficients ir stabils ļoti plašā frekvenču diapazonā, tāpat augsta ir tā ieejas pretestība. Pārslēdzot sprieguma dalītājus no viena dalījuma koeficienta uz otru, dalītāju ieejas pretestība izmainās nedaudz. Parasti vienā no dalītāja pārslēgšanas stāvokļiem paralēli tā ieejai pieslēdzas  $50 \Omega$  vai  $75 \Omega$  rezistors, lai salāgotu kanāla ieeju ar kabeli, pa kuru pievada pētāmo signālu. Šai gadījumā pētāmais signāls netiek vājināts. Ieejas bloka katoda atkārtotājs atsaista kanālu no pētāmā signāla avota.

Stara vertikālās nolieces pastiprinātāju izmanto pē-

tāmā signāla pastiprināšanai līdz tādām lielumiem, kāds vajadzīgs, lai iegūtu elektronu stara pietiekamu vertikālo nolieci katodstaru lampā. Te lieto platjoslas pastiprinātājus, jo pētāmā signāla frekvenču spektrs var būt visai plašās robežās. Parasti tie ir rezistorpastiprinātāji ar korekcijām augsto un zemo frekvenču rajonā. To frekvenču raksturliktne ir vienmērīga, sākot no dažiem Hz līdz 10—20 MHz.



11-7. zim. Katodstaru oscilgrāfa blokshema:

*A* — stara vertikālās nolieces kanāls, *B* — stara horizontālās nolieces kanāls, *C* — katodstaru lampā, *D* — stara intensitātes vadības kanāls un laika kalibrators, 1 — ieejas bloks, 2 — aiztures līnija, 3 — stara vertikālās nolieces pastiprinātājs, 4 — amplitūdas kalibrators, 5 — stara horizontālās nolieces pastiprinātājs, 6 — sinhronizācijas pastiprinātājs, 7 — nepārtrauktās izvērses ģenerators, 8 — palaižamās izvērses ģenerators, 9 — stara dzēšanas un pagaismas bloks, 10 — laika atzīmju ģenerators, 11 — modulatora pastiprinātājs, 12 — barošanas iekārta.

Arī oscilgrāfa stara horizontālās nolieces kanālā var ietilpt ieejas bloks un horizontālās nolieces pastiprinātājs. Ja stara horizontālajai izvēsei lieto ārēju signālu, ieejas bloku pieslēdz horizontālās nolieces pastiprinātājam. Abi šie bloki pēc uzdevuma un uzbūves ir analogi attiecīgajiem blokiem stara vertikālās nolieces kanālā. Vienīgi

pastiprinātājam nav vajadzīga tik plata frekvenču caurlaides josla. Vienkāršākajos oscilogrāfos ieejas bloka nav, bet izvērse spriegumu pievada tieši stara horizontālās nolieces pastiprinātājam.

Gadījumam, kad izvērsei veic iekšējs signāls, bez šiem diviem blokiem stara horizontālās nolieces kanālā ieslēgta arī elektronu stara izvērse sistēma, kurā ietilpst sinhronizācijas pastiprinātājs, nepārtrauktās izvērse ģenerators, palaižamās izvērse ģenerators, laika kalibrators un stara dzēšanas un pagaismas bloks. Horizontālās nolieces pastiprinātāja ieeju var pieslēgt vai nu nepārtrauktās, vai arī palaižamās izvērse ģenerators izejai.

Ļoti kā vertikālās nolieces, arī horizontālās stara nolieces plates ir pievienotas attiecīgajām spailēm oscilogrāfa mugurpusē, un tās var atslēgt no pastiprinātāja.

Sinhronizācijas signāla pastiprinātājs ir parasts rezistorpastiprinātājs ar regulējamu pastiprinājuma koeficientu. Ar šo pastiprinātāju var mainīt sinhronizējošā sprieguma amplitūdu pirms tā pievades izvērse ģeneratoriem, lai tos sinhronizētu vai palaistu.

Spriegums no izvērse ģeneratoriem nonāk ne tikai stara horizontālās nolieces pastiprinātāja ieejā, bet tiek pievadīts arī stara dzēšanas un pagaismas blokam. Tas stara atpakaļgaitu laikā formē negatīvus, bet tiešo gaitu laikā — pozitīvus impulsus, ko saņem katodstaru lampas modulators.

Stara intensitātes vadības kanālā ir pastiprinātājs, kas vienlaikus var mainīt modulējošā sprieguma polaritāti un pievadīt to katodstaru lampas modulatoram. Ievadot šī pastiprinātāja ieejā ( $Z$ ) mainīgas amplitūdas modulējošu signālu, attēla spilgtums uz ekrāna mainās tāpat kā modulējošā sprieguma amplitūda. Šo procesu sauc par elektronu stara vadišanu pa  $Z$  asi.

Modulācijas sprieguma pastiprinātājam var pieslēgt laika kalibratoru, ko sauc arī par laika atzīmju ģeneratoru. Tas ģenerē sinusoidālu spriegumu ar ļoti stabilu frekvenci. Šis spriegums, ko uzklāj katodstaru lampas modulatora priekšspriegumam, modulē elektronu stara intensitāti, tāpēc oscilogramma uz lampas ekrāna tiek pārklāta ar tumšiem punktiem, kuru savstarpējais attālums atbilst konstantiem, vienādiem laika sprīžiem. Ja pētāmā procesa oscilogrammā ir  $n$  šādu punktu un laika kalibrators ģenerē signālu ar frekvenci  $f_k$ , tad pētāmā procesa ilgums

ir  $t_x = \frac{n}{f_k}$ . Laika atzīmju vērtību (tām atbilstošo laika sprīdi) parasti var mainīt diskrēti, to pārslēgs graduēts atbilstoši vienas laika atzīmes ilgumam. Lai laika atzīmes nepārvietotos pa oscilogrammu, nepieciešams, lai to sprieguma fāze nemainītos attiecībā pret izvērses sprieguma fāzi. Tādēļ arī laika atzīmju generatoru sinhronizē ar izvērses generatoru.

Amplitūdas kalibrators kalpo ieejas signālu amplitūdas mērīšanai. Stara vertikālās nolieces kanālam pievada kalibrētu regulējamu spriegumu un pēc tam to uz ekrāna salīdzina ar pētāmo spriegumu.

Oscilogrāfa barošanas iekārta sastāv no zemsprieguma un augstsprieguma barošanas blokiem. Zemsprieguma barošanas bloks baro visus oscilogrāfa blokus. Tā izejas spriegums parasti ir stabilizēts, lai oscilogrāfa darbība būtu stabilāka. Augstsprieguma barošanas bloks baro katodstaru lampas otro anodu.

#### 11-4. Katodstaru oscilogrāfa izmantošana

**Dažādu signālu oscilografēšana.** Oscilografējamā signāla attēlam uz ekrāna jābūt nekropļotam. To var realizēt tad, ja atkarībā no pētāmā signāla rakstura izvēlas piemērotu oscilogrāfa tipu, iestāda pareizus tā darba režīmus un pareizi pieslēdz to pētāmā signāla avotam.

Izvēloties oscilogrāfu, jāzina pētāmā signāla raksturs un oscilogrāfu galvenie raksturlielumi. Atkarībā no pētāmā signāla amplitūdas lieluma jāizvēlas tāds oscilogrāfs, kam stara vertikālās nolieces kanāla maksimālā jutība nodrošina pietiekami lielu attēla augstumu uz ekrāna. So jutību var samazināt, ja palielina sprieguma dalītāja dalījuma koeficientu vai samazina stara vertikālās nolieces kanāla pastiprinājuma koeficientu. Ja ieejas signāls ir tik mazs, ka oscilogrāfa stara vertikālās nolieces kanāla maksimālā jutība nespēj nodrošināt pietiekami lielu attēla augstumu, pirms oscilogrāfa ieejas jāieslēdz papildu pastiprinātājs.

Ja pētāmo signālu amplitūdas ir ļoti lielas, jāzina pieļaujama spriegums, ko drīkst pievadīt oscilogrāfa ieejai. Ja signāls pārsniedz pieļaujamo ieejas spriegumu, jālieto papildu ārēji sprieguma dalītāji. Dažu tipu oscilogrāfiem ir speciāli ārēji sprieguma dalītāji tausta veidā ar lielu ieejas impedanci.

Arī oscilogrāfu ieejas impedances aktivajai un reaktīvajai (kapacitīvajai) komponentei jāatbilst pētāmā signāla un signāla avota parametriem. Sevišķa nozīme ieejas kapacitātei ir, ja jāpēta impulsi ar stāvu kāpumu. Jo šī kapacitāte lielāka, jo ilgāk tā uzlādējas un līdz ar to tiek vairāk kropļots impulsu kāpums. Tādēļ šādos gadījumos jāizvēlas oscilogrāfi ar iespējami mazāku stara vertikālās nolieces kanāla ieejas kapacitāti. Vislabākie rezultāti ir tad, ja pētāmo signālu pievada tieši vertikāli noliecošajām platēm, jo tām ir ļoti maza kapacitāte. Tikai signāla amplitūdai tadā gadījumā jābūt simtos voltu. Zemas frekvences nepārtrauktus signālus oscilogrāfa ieejai pievada ar parastu savienojošu vadu, turpretī augstas frekvences un impulsu signālus — ar salāgotu koaksiālu kabeli.

Pieslēdzot oscilogrāfu pētāmajai iekārtai, jāievēro, ka dažos gadījumos tā ieejas impedance var izmainīt iekārtas darba režīmu. Tā, piemēram, oscilogrāfa ieejas kapacitāte dažreiz var ievērojami ietekmēt rezonanses ķēdes darbību, bet aktivā ieejas pretestība — augstomīgas ķēdes darba režīmu.

Ja oscilogrāfa vertikālās nolieces kanāla frekvenču caurlaides josla nav pietiekami plata, tad rodas lineārie (frekvenču un fāzu) signāla kropļojumi. Caurlaides joslas platums ( $\Delta f$ ) nedrīkst būt mazāks par pētāmā signāla frekvenču spektra aktīvo platumu (josla, kurā sakopoti 95% signāla enerģijas).

Stara horizontālās nolieces kanāla caurlaides joslas platumam jāpievērš uzmanība tikai tad, ja pētāmo procesu izvērš ar ārējiem signāliem. Tādā gadījumā jāpārbauda, vai caurlaides josla ir pietiekami plata, lai nekropļotu ārējās izvēršes signālu.

Lai uz oscilogrāfa ekrāna iegūtu augstas kvalitātes un stabilu pētāmā signāla attēlu, pareizi jāizvēlas izvēršes un sinhronizācijas veids. Harmonisku procesu pētīšanai izmanto nepārtraukto lineāro izvērsi, iestādot tās frekvenci aptuveni sinhronu ar pētāmā signāla frekvenci. Vislabāk sinhronizēt ar pašu pētāmo signālu, t. i., lietojot iekšējo sinhronizāciju. Ārējo sinhronizāciju lieto tikai tad, ja pētāmā signāla forma nav derīga izvēršes ģeneratora sinhronizācijai. Sinhronizāciju ar tiklu izdevīgi lietot tad, ja pētāmā procesa frekvence ir vienāda vai veselu skaitu reižu lielāka par tikla frekvenci.

Optimālo attēla kvalitāti uz ekrāna iegūst, ja izvērse generatora frekvenci  $F_0$  vispirms ieregulē nedaudz mazāku par lielumu  $\frac{F_u}{n}$  (attēls slid pa kreisi) un pēc tam paliekina sinhronizācijas amplitūdu tik ilgi, kamēr attēls uz ekrāna kļūst nekustīgs.

Palaižamo izvērsi lieto iepriekš aprakstītajos gadījumos. Izvērse ātrumu izvēlas tā, lai iegūtu pētāmā procesa optimālos izmērus horizontālā virzienā. Sinhronizēt palaižamās izvērse generatoru var vai nu iekšēji (ar pašu pētāmo signālu), vai ārēji (ja vertikālās nolieces kanālā izmanto aiztures līniju, tad tikai iekšēji).

Attēla augstums uz ekrāna nedrīkst būt pārāk liels, jo stara lineārās nolieces dēļ var rasties attēla kropļojumi ekrāna malās. Signāla optimālo lielumu jācenšas panākt pie maksimāla sprieguma dalījuma koeficienta, lai vertikālās nolieces pastiprinātāja ieejā nenonāktu pārāk liels signāls.

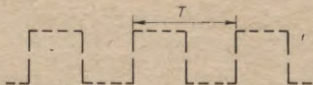
Arī attēla spilgtumam jābūt optimālam. Ja novēro procesus ar mazu impulsu aizpildes koeficientu vai arī vienkāršus procesus, bieži vien oscilogrammas dažādo posmu spilgtums ir dažāds. Tā kā attēla spilgtums ir apgriezti proporcionāls elektronu stara kustības ātrumam, tad sevišķi tumši būs impulsu kāpumi un kritumi. Novērošanu var uzlabot, ja izmanto ekrānam izbīdāmu jeb uzliekamā tubusu.

**Sprieguma amplitūdas mērīšana.** Lai izmērītu sprieguma amplitūdu, to pievada oscilogrāfa vertikālās nolieces kanāla ieejai. Ar sprieguma dalītāju un pastiprinātāju ieregulē tādu pētāmā signāla augstumu uz ekrāna, ko viegli var mērīt (parasti vienādu ar ekrāna priekšā novietotā caurspīdīgā tīkla veselu iedaļu skaitu). Pēc tam stara vertikālās nolieces kanāla ieejai pievada sinusoidālu spriegumu no palīgģeneratora. Ar potenciometru regulējot palīgģeneratora sprieguma amplitūdu, panāk, lai tā attēla augstums uz ekrāna būtu vienāds ar mērāmā signāla attēla augstumu (sprieguma pastiprinājuma un dalījuma koeficientus oscilogrāfam šai laikā nedrīkst mainīt). Ja palīgģeneratora spriegums ir kalibrēts, tad no potenciometra skalas izdara nolasījumu un izdala ar uzstādīto sprieguma dalītāja dalījuma koeficientu, iegūstot rādījumu.

Oscilogrāfos, kuros palīgģeneratora spriegums nav

kalibrēts, to izmēra ar oscilogrāfā speciāli iebūvētu elektronu voltmetru.

**Frekvences mērīšana ar oscilogrāfu.** Visvienkāršāk frekvenci var izmērit, izmantojot laika kalibratoru. Ja, piemēram, jānosaka impulsvēida signāla frekvence (11-8. zīm.),



11-8. zīm. Frekvences mērīšana ar laika atzīmēm.

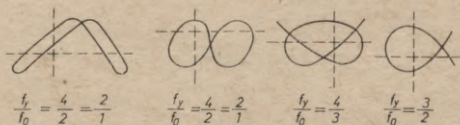
tad vispirms jāiegūst optimāls šī signāla attēls uz oscilogrāfa ekrāna. Pēc tam jāieslēdz laika atzīmju ģenerators un jāsaskaita gaišo vai tumšo iecirkņu skaits  $n$  vienā signāla periodā  $T$  (11-8. zīm. to ir 8). Ja vienas laika atzīmes vērtība ir  $\Delta t$ , tad mērāmā signāla perioda ilgums ir  $T = n\Delta t$ , bet frekvence  $F = \frac{1}{T} = \frac{1}{n\Delta t}$ . Absolūtā mērīšanas kļūda ar šo metodi ir samērā liela ( $\pm 0,5\Delta t$ ).

Precīzāka ir t. s. interferences figūru metode, kur oscilogrāfu izmanto par indikatoru. Ja katodstaru lampas horizontāli noliecošajām platēm pievada sinusoidālu spriegumu, bet vertikāli noliecošajām — tādas pašas frekvences  $\omega$  sinusoidālu spriegumu ar atšķirīgu amplitūdu  $U$  un fāzi  $\psi$ , tad uz oscilogrāfa ekrāna parādās elipse. Ja fāzu nobīde starp abiem spriegumiem ir  $\varphi = 0$  vai  $\varphi = \pi$ , elipse deformējas slīpā taisnē. No šejienes izriet vienkārša frekvences mērīšanas metodika: vienai no oscilogrāfa ieejām pievada pētāmās frekvences  $f_y$  spriegumu, bet otrai — etalongenerators spriegumu ar frekvenci  $f_0$ . Frekvenci  $f_0$  maina, kamēr uz oscilogrāfa ekrāna parādās nekustīga taisne vai elipse. Tādā gadījumā  $f_y = f_0$ .

Ja oscilogrāfa ieejām pievada divus mainīspriegumus, kuru frekvences, amplitūdas un fāzes atšķiras, tad uz oscilogrāfa ekrāna parādās nevis elipse, bet gan daudz sarežģītākas figūras, ko sauc par Lissajū figūrām. Šo figūru veids atkarīgs no spriegumu formas, to frekvenču, fāžu un amplitūdu attiecības. Figūras ir nekustīgas tikai tad, ja abu spriegumu frekvences attiecas kā veseli skaitļi:

$\frac{f_y}{f_0} = \frac{m}{n}$ , kur  $m = 1, 2, 3, \dots$  un  $n = 1, 2, 3, \dots$ . Ja pētāmā

frekvence nav etalongenerators frekvenču diapazonā, tad etalongenerators frekvence jāmaina, kamēr uz oscilogrāfa ekrāna iegūst kādu vienkāršu nekustīgu Lisažū figūru. Pēc šādas nekustīgas Lisažū figūras var noteikt abu spriegumu frekvenču attiecību. To izdara tadējādi, ka Lisažū figūru krusto ar taisnstūra koordinātu asīm (11-9. zīm.),



11-9. zīm. Lisažū figūras.

pie tam koordinātu asis jācenšas novilkt tā, lai tās neietu cauri Lisažū figūras mezglu punktiem (punkti, kuros figūras līnijas krustojas). Tādā gadījumā

$$\frac{f_y}{f_0} = \frac{k}{r}, \quad (11-2a)$$

kur  $k$  — abscisu ass krustojumu skaits ar Lisažū figūru,  
 $r$  — ordinātu ass krustojumu skaits ar Lisažū figūru.

Zinot etalongenerators frekvenci  $f_0$ , var aprēķināt mērāmās frekvences vērtību:

$$f_y = f_0 \frac{k}{r}. \quad (11-2b)$$

Ja  $k$  un  $r$  vērtības ir lielas, Lisažū figūras kļūst ļoti sarežģītas — ar daudziem mezglu punktiem, šo metodi tad izmantot grūti.

Lai ar oscilogrāfu pētītu neelektriskus procesus, jāpielieto speciāli pārveidotāji neelektrisko parametru pārveidošanai elektriskajos parametros, kā arī sarežģītāki mērīšanas slēgumi. Šīs mērīšanas metodes aprakstītas speciālā literatūrā par oscilogrāfu pielietošanu radioelektroniskos mērījumos.

## 12. nodaļa

### ELEKTROSAKARU PAMATI

#### 12-1. Sakaru teorijas jēdzieni

Sakaru uzdevums ir pārraidīt ziņojumu no sūtītāja saņēmējam. Sakarus var realizēt ar dažādas fizikālas dabas signāliem: elektriskajiem, skaņas, gaismas utt.

Sakarus realizē ar sakaru sistēmu. Sakaru sistēma sastāv no raidītāja un uztvērēja, kas savstarpēji saistīti ar sakaru kanālu. Sakaru kanāls ir fizikāla vide, pa kuru pārraida signālu. Ja sākotnēji par sakaru kanālu izmantoja divvadu līniju, tad tagad bezvadu sakaros par sakaru kanālu izmanto telpu, kurā no raidītāja uz uztvērēju izplatās elektromagnētiskie viļņi.

Sakaru sistēmas darbojas tādejādi, ka raidītājā pienāk ziņojums no sūtītāja. Sūtītājs var būt cilvēks, automātiska iekārta, devējs utt., tātad jebkurš ziņojumu avots. Ziņojums ir informācijas kopa, kas jāpārraida saņēmējam. Tātad ziņojums ir pārraides objekts. Piemēram, pārraidot telegrammu, ziņojums ir tās teksts, bet, sarunājoties pa telefonu, ziņojumā ietilpst ne tikai sarunas frāzes, bet arī intonācija, ritms un tamlīdzīgas runas īpašības. Raidītājs pārveido ziņojumu atbilstošā elektriskajā (vai kāda cita veida) signālā, kuru pa sakaru kanālu pārraida uz uztvērēju. Šo pārveidošanu var sadalīt vairākos etapos: 1) ziņojuma pirmatnējā pārveidošana pārraidāmos lielumos (piemēram, mikrofonā skaņas spiediena maiņas pārveido elektriskās strāvas maiņās), 2) kodēšana (šis etaps var arī nebūt), 3) modulācija. Tādejādi no raidītāja sakaru kanālā nonāk signāls, kas pilnīgi raksturo ziņojumu. Sakaru kanāla otrā galā atrodas uztvērējs, kas signālu atkal pārveido ziņojumā.

Vienu un to pašu ziņojumu var pārraidīt pa dažādām

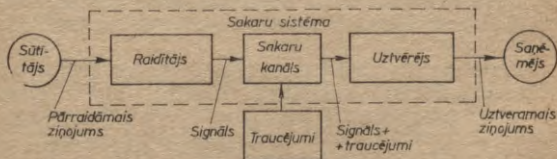
sakaru sistēmām, bet skaidrs, ka lietderīgi to pārraidīt pa tādu sistēmu, kas nodrošina viskvalitatīvāko un ātrāko pārraidi. No šī viedokļa izriet, ka par sakaru sistēmas svarīgāko raksturlielumu jāuzskata t. s. sakaru sistēmas caurlaides spēja. Par sakaru sistēmas caurlaides spēju sauc ziņu daudzumu, ko var pārraidīt laika vienībā pa doto sistēmu, nodrošinot vajadzīgo pārraides precizitātes pakāpi. Pēdējais faktors ir ļoti svarīgs, jo, piemēram, ļoti ātri runājot pa telefonu, iegūst sliktu runas saprotamību. Tātad sakaru sistēmas īpatnība ir tā, ka, palielinot pārraides ātrumu jeb sakaru sistēmas caurlaides spēju, pasliktinās pārraides precizitātes pakāpe. Tāpēc jau pirmajām sakaru sistēmām radās problēma, kā vienlaikus palielināt sistēmas caurlaides spēju un pārraides precizitātes pakāpi.

Reālos apstākļos ziņojums, ko pārraidījis sūtītājs, atšķiras no ziņojuma, ko uztvēris saņēmējs. Tas notiek tādēļ, ka uz signālu gan sakaru kanālā, gan raidītājā un uztvērējā iedarbojas traucējumi. Pēc fizikalās dabas traucējumi ir analogi signālam un dažādā veidā tam «uzklājas». Traucējumi rodas kā pašā sistēmā, tā arī nokļūst tajā no ārienes.

Vēlams, lai sakaru sistēma spētu pretoties kaitīgajai traucējumu iedarbībai uz lietderīgo signālu, t. i., lai sakaru sistēma būtu traucējumnoturīga. Jācenšas sakaru sistēmas realizēt ar iespējami augstāku traucējumnoturību.

Sakaru sistēmu caurlaides spēja un traucējumnoturība atrodas savstarpējā pretrunā — paaugstinot (pazeminot) vienu, pazeminās (paaugstinās) otra. Tādēļ praksē lietderīgi šo jautājumu risināt kompromisa ceļā — iegūt maksimālo sistēmas caurlaides spēju, vienlaikus nodrošinot nepieciešamo traucējumnoturību.

12-1. zīm. attēlota sakaru sistēmas blokshēma, kurā pieņemts, ka visu traucējumu avots ir kopīgs un tie uz signālu iedarbojas sakaru kanālā.



12-1. zīm. Sakaru sistēmas blokshēma.

Pēc fizikālās dabas sūtītāji, t. i., ziņojumu avoti, var būt visdažādākie. Tāpēc arī ziņojumi ir ļoti dažādi. Tomēr visus daudzveidīgos ziņojumus iespējams klasificēt divās grupās — nepārtrauktajos un diskrētajos ziņojumos. Piemēram, nepārtraukts ziņojums ir telefona saruna, kur skaņas spiediens uz mikroфона membrānu mainās nepārtraukti. Kā raksturīgu diskrēta ziņojuma piemēru var minēt tekstu, ko pārraida pa telēgrāfu, jo šeit ziņojumu veido atsevišķu burtu virkne, bet signālu — punktu, svītru un paužu secība.

Pārraidāmie ziņojumi parasti ir neelektriski lielumi — skaņa ir spiediena maiņa laikā, teksts — simbolu kopa (burti, cipari, pieturas zīmes), kustošs attēls — apgaismojuma maiņa laikā utt. Bet pa sakaru kanāliem visbiežāk pārraida tikai ziņojumu elektriskos attēlus — signālus —, tādēļ, pārraidot ziņojumu, tas jāpārveido signālā. Vispirms ziņojumu pārveido elektriskā procesā. Sādi pārveidotāji ir mikrofons, pārraidot runu vai mūziku, fotoelements, pārraidot attēlus, u. c. So iekārtu izejā elektriska sprieguma vai strāvas atsevišķi parametri atbilst ziņojuma elementiem.

Pa jebkura tipa sakaru līniju dažādi elektriskie lielumi izplatās ar dažādu efektivitāti. Piemēram, pa sakaru kanālu, kuru veido vadi vai kabelis, visefektīvāk izplatās līdzspriegums vai arī zemu frekvenču maiņspriegums, bet pa radiokanālu — tikai augstfrekvences elektromagnētiskās svārstības. Tādēļ, lai izveidotu signālu, ir jābūt t. s. nesējam, kas labi izplatās pa attiecīgu sakaru kanālu. Par nesēju vadu un kabeļu kanālos izmanto līdzstrāvu vai maiņstrāvu, bet radiokanālos — elektromagnētiskos viļņus. Nesēja īpašības raksturo tā parametri. Tā, piemēram, līdzstrāvu raksturo tās virziens un lielums (stiprums), bet maiņstrāvu un elektromagnētiskās svārstības — amplitūda, frekvence un fāze. Kamēr nesēja parametri paliek konstanti, tas nekādu ziņojumu nevar pārnest, izņemot to, ka raidītājs ieslēgts un sagatavots ziņojuma pārraidei.

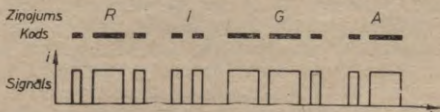
Otrs etaps ziņojuma pārveidošanai signālā ir ziņojuma elektriskā procesa «uzklāšana» nesējam. Šim nolūkam vienu no nesēja parametriem maina tā, lai katrs no iespējamajiem ziņojumiem viennozīmīgi izteiktos šī maināmā parametra vērtībā. So procesu sauc par modulāciju. Nesēju, kura parametrus modulē, t. i., maina atbilstoši ziņojumam,

sauc par signālu. Tā, piemēram, mainot radiatoritāja nesējfrekvences svārstību amplitūdu, iegūst modulētas amplitūdas signālu, mainot frekvenci vai fāzi — attiecīgi modulētas frekvences vai fāzes signālu. Modulēto signālu radiatoritāja antena pēc tam izstaro apkārtējā vidē, un tas izplatās uz radiouztvērēju antenām.

Modulāciju var realizēt, ziņojumam uz nesēja parametriem iedarbojoties tieši vai arī atbilstoši noteiktam kodam. Jebkuru ziņojumu var pārraidīt ar simbolu virkni, kur jebkuru simbolu savukārt veido dažādu koda elementu kombinācija. Par koda elementiem sauc dažādus elementārus signālus. Elementārajiem signāliem jābūt tādiem, lai uztverošā iekārta varētu pareizi atšķirt elementāros signālus citu no cita. Sai gadījumā ziņojumu var uzskatīt par elementāru signālu kombināciju virkni.

Pārraidāmā ziņojuma katram burtam, ciparam vai palīdzīmei atbilstoši kodam viennozīmīgi piesaista noteiktu signālu, ko veido koda elementu kombinācija. Jāpiebilst, ka, piemēram, vienu un to pašu teksta burtu var pārraidīt ar dažādiem signāliem atkarībā no izraudzītā koda. Izmantojot pārraidei Mórzes kodu, katram burtam vai ciparam atbilst ilgstošu un īslaicīgu elektrisku impulsu (svītru un punktu) kombinācijas, turpretī, izmantojot vienmērīgo Bodo kodu, tiem pašiem burtiem vai cipariem atbilst viena ilguma, bet dažādi kombinēti elektriski impulsi.

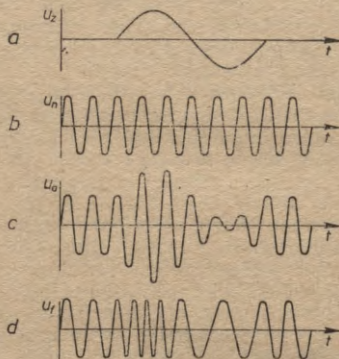
Tātad vispārīgā gadījumā atkarībā no tā, vai pirms modulācijas ziņojuma elektrisko attēlu kodē vai ne, viena un tā paša ziņojuma attēlošanai var iegūt dažādus signālus. Līdz ar to starp abiem minētajiem etapiem, kas nepieciešami ziņojuma pārvēršanai signālā, var ievietot arī kodēšanas etapu. Tā, piemēram, ja pa radio sakaru kanālu jāpārraida kaut kāds teksts, katru teksta burtu vispirms pārveido koda nosacītā kombinācijā (ja pārraidei izmanto Mórzes kodu, tad punktu un svītru kombinācijā). Pārveidojumu diagramma attēlota 12-2. zīm. So teksta pārveidošanu kodētos elektriskos sūtījumos veic operators vai nu



12-2. zīm. Ziņojuma kodēšana un pārveidošana signālā.

tieši, vai arī ar kaut kādas iekārtas (piemēram, telegrāfa aparāta) palīdzību.

Radiopārraides gadījumā par nesēju izmanto augstfrekvences svārstības, kuru frekvenci sauc par nesējfrekvenci. Lai izveidotu signālu, nesējs jāmodulē ar kodētu vai nekodētu elektriskā procesā pārveidotu ziņojumu, t. i., jāmaina nesēja parametri atbilstoši ziņojumam vai tā koda kombinācijām. Var izmantot kā amplitūdas, tā arī frekvences vai fāzes modulāciju. Šādu modulētu signālu oscilogrammas redzamas 12-3. zīm.



12-3. zīm. Modulācijas oscilogrammas:  
*a* — ziņojuma funkcija; *b* — nesējs; *c* — modulētas amplitūdas signāls; *d* — modulētas frekvences signāls.

Par nesēju var izmantot arī videoimpulsu virkni. Modulējot tos pēc amplitūdas, ilguma un sekošanas frekvences, iegūst dažāda veida impulsu modulāciju.

Signālu raksturo ar tā galvenajiem parametriem — ilgumu, spektra platumu un jaudas dinamisko diapazonu. Signāla pārraidei vienmēr tiek dots galīgs un noteikts laika intervāls. Tādēļ signālu, kas pārnes noteiktu ziņojumu, raksturo ar tā ilgumu  $T_s$ , ko mēra sekundēs. Nesēja modulācijas dēļ signālam vienmēr rodas noteikts frekvenču spektrs ar platumu  $F_s$ , ko mēra Hz. Signāla spektra

platums ir atkarīgs no modulācijas veida. Jebkura fizikāli realizējama iekārta, kas pārveido ziņojumus signālos, var radīt tikai signālus ar ierobežotām tā jaudas maiņām. Apakšējo robežu nosaka traucējumu vidējā jauda  $P_t$  sakaru kanālā, jo minimālajai signāla vidējai jaudai vienmēr jābūt lielākai par  $P_t$ . Augšējo robežu nosaka maksimālā signāla vidējā jauda, ko iespējams pārraidīt pa kanālu. Tādējādi signālu var vēl raksturot ar jaudas dinamisko diapazonu

$$H_s = \log_2 \frac{P_s}{P_t}, \quad (12-1)$$

kur  $P_s$  — signāla vidējā jauda.

Ar šo trīs parametru palīdzību var raksturot galvenās signāla īpašības, kas nepieciešamas tā pārraidei pa sakaru kanālu. Ērtības labad signālu dažreiz raksturo ar tā tilpumu

$$V_s = H_s F_s T_s. \quad (12-2)$$

12-1. tabulā sakopoti dažādu sakaru veidu frekvenču spektru platumi.

12-1. tabula

Sakaru veids	$F_s$ (Hz)
Telegrāfs ar Morzes kodu	400
Telegrāfs ar Bodo kodu	40
Fototelegrāfs	3000
Telefons	$\approx 4000$
Televīzija	$6 \cdot 10^6$
Impulsu pārraide	$\approx 10^6$

Jebkura signāla pārraidei ir nepieciešams atbilstošs sakaru kanāls, ko raksturo ar līdzīgiem pamatparametriem kā signālus. Sakaru kanāls efektīvi pārvada tikai ierobežota spektra platuma  $F_k$  signālus, pie tam pieļaujamais jaudas dinamiskais diapazons ir  $H_k$ . Skaidrs arī, ka sakaru kanālu sūtītājs ziņojuma pārraidei var izmantot tikai noteiktu laika sprīdi  $T_k$ . Tādēļ analogi signālam sakaru kanālu var raksturot ar lielumu

$$V_k = H_k F_k T_k, \quad (12-3)$$

nosaucot to par kanāla tilpumu.

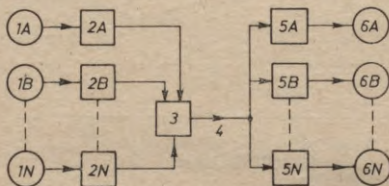
Acīmredzams nosacījums, lai signālu ar tilpumu  $V_s$  varētu pārraidīt pa kanālu ar tilpumu  $V_k$ , ir

$$V_k \geq V_s \text{ vai } H_k F_k T_k \geq H_s F_s T_s. \quad (12-4 \text{ a, b})$$

No šīm izteiksmēm izriet, ka, lai signālu salāgotu ar kanālu, signāla parametri jāmaina tā, lai tā tilpums saglabātos. Tā, piemēram, palielinot signāla pārraides ilgumu  $T_s$ , var samazināt frekvenču spektra platumu  $F_s$  utt.

Apvienojot vairākus sakaru kanālus, izveidojas daudzkanālu sakaru līnija. Par daudzkanālu sakariem sauc vairāku korespondentu pāru (sūtītāju un saņēmēju) sakarus pa kopīgu sakaru līniju, pie tam katram korespondentu pārim izdalīts atsevišķs sakaru kanāls. Daudzkanālu sakaru līnijām ir lielas ekonomiskas priekšrocības salīdzinājumā ar vienkānā līnijām, jo vienas  $N$  kanālu sakaru līnijas pašizmaksa ir daudz mazāka par  $N$  vienkānā līniju kopējo pašizmaksu.

Daudzkanālu sakaru sistēmas vispārīgā shēma attēlota 12-4. zīm. Visu  $N$  kanālu signālus summē un pārraida pa



12-4. zīm. Daudzkanālu sakaru sistēmas vispārīgā shēma:

$1A-1N$  — sūtītāji,  $2A-2N$  — raidītāji,  $3$  — summators,  $4$  — sakaru līnija,  $5A-5N$  — uztvērēji,  $6A-6N$  — saņēmēji.

vienu daudzkanālu sakaru līniju. Līnijas uztverošajā galā signāli atkal jāatdala cits no cita atbilstoši noteiktajiem sūtītājiem (kanāliem), t. i., katrai uztverošajai iekārtai no signālu summas jāizdala tikai tie signāli, kas atbilst divu attiecīgo korespondentu ziņojumiem. Jābūt nodrošinātai arī pilnīgi neatkarīgai sūtītāju ziņojumu pārraidei, lai katram sūtītājam būtu iespējams pārraidīt savu ziņojumu neatkarīgi no tā, vai notiek signālu pārraide pa citiem kanāliem. No minētā izriet, ka daudzkanālu sakaros ļoti nozīmīga

ir dažādu sūtītāju signālu izdališana pēc ziņojumu pār-  
raides pa kopīgu sakaru līniju. So uztverošo iekārtu īpa-  
šību sauc par selektivitāti.

Visplašāk izplatīti ir divi daudzkanālu sakaru līnijas  
kanālu sadales pamatgadījumi — frekvenču transponēšana  
un laiciskā sadale.

Frekvenču transponēšanas gadījumā atsevišķu kanālu  
frekvenču spektrus transponē augstāko frekvenču virzienā  
tā, lai tie novietotos cits citam blakus. Visu šo frekvenču  
spektru summa pa daudzkanālu sakaru līniju tiek pārrai-  
dīta uz uztverošo līnijas galu. Katrs uztvērējs ar filtru  
palīdzību izdala tikai tam vajadzīgo spektru, kuru atkal  
transponē (šoreiz zemāko frekvenču virzienā), novietojot  
spektru tā agrākajā vietā.

Kanālu laiciskās sadales gadījumā katram signālam  
[auj pēc kārtas īsu laika sprīdi izmantot visus līnijas ka-  
nālus, t. i., visu kanālu spektru summu. Te izmanto galve-  
nokārt impulsu modulāciju. Noteiktā laika momentā līnijai  
tiek pieslēgts noteikts raidītājs. Uztvērējā, pareizi sagrupē-  
jot signālus pēc laika, izdala atsevišķu sūtītāju ziņojumus.

## 12-2. Modulācija

**Amplitūdas modulācija.** Visvienkāršākā amplitūdas mo-  
dulācija ir tad, ja nesējfrekvences  $\omega_0$  signāla amplitūda  
mainās pēc sinusoidāla likuma ar frekvenci  $\Omega \ll \omega_0$  un sā-  
kuma fāzi  $\varphi = 0$ . Tātad, ja nesēja funkcionālā izteiksme ir

$$u = U_m \sin(\omega_0 t + \varphi), \quad (12-5)$$

bet modulējošo spriegumu izsakām kā

$$U_m = U_0 + \Delta U \cos \Omega t, \quad (12-6)$$

kur  $U_0$  — līdzsprieguma komponente,

$\Delta U$  — maiņsprieguma komponentes amplitūda (12-5.  
zīm. a), tad, ievietojot (12-6) izteiksmē (12-5), iegūst mo-  
dulētā sprieguma momentāno vērtību

$$\begin{aligned} u &= (U_0 + \Delta U \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= U_0 (1 + m \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi), \end{aligned} \quad (12-7)$$

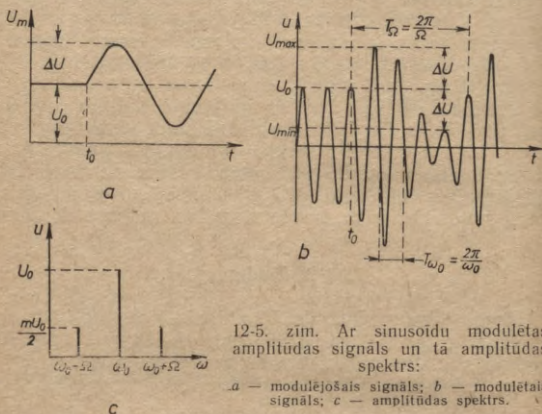
kur  $m = \frac{\Delta U}{U_0}$  — amplitūdas modulācijas koeficients (12-5.  
zīm. b). Frekvenci  $\Omega$  sauc par modulācijas frekvenci,  $\omega_0$  —

par nesējfrekvenci, bet  $U_0$  — par nesējfrekvences amplitūdu. 12-5. zīm. *b* modulācija sākas laika momentā  $t_0$ .

Izteiksmē (12-7) izdarot trigonometrisku pārveidojumu

$$\begin{aligned} u &= U_0(1 + m \cos \Omega t) \sin(\omega_0 t + \varphi) = \\ &= U_0 \sin(\omega_0 t + \varphi) + \frac{mU_0}{2} \sin[(\omega_0 + \Omega)t + \varphi] + \\ &\quad + \frac{mU_0}{2} \sin[(\omega_0 - \Omega)t + \varphi], \end{aligned} \quad (12-8)$$

iegūst trīs sin funkciju summu. Tādēļ var uzskatīt, ka ar



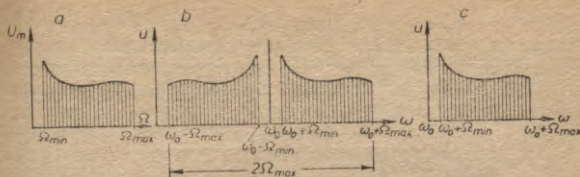
12-5. zīm. Ar sinusoīdu modulētas amplitūdas signāls un tā amplitūdas spektrs:

*a* — modulējošais signāls; *b* — modulētais signāls; *c* — amplitūdas spektrs.

sinusoīdu modulētā svārstība ir nesējfrekvences  $\omega_0$  sprieguma (ar amplitūdu  $U_0$ ) un divu sānfrekvenču  $\omega_0 \pm \Omega$  spriegumu (ar amplitūdām  $\frac{mU_0}{2}$ ) summa (12-5. zīm. *c*).

Ja modulējošā signāla frekvence mainās joslā no  $\Omega_{max}$  līdz  $\Omega_{min}$ , tad divu sānfrekvenču vietā ir divas sānjoslas (12-6. zīm. *a* un *b*) un viss modulētā signāla amplitūdas spektrs aizņem frekvenču joslu  $\Delta\omega = 2 \Omega_{max}$ .

Modulētas amplitūdas signāla spektra joslu var samazināt nedaudz vairāk nekā uz pusi, ja nomāc vienu sānjoslu un nesējfrekvenci (12-6. zīm. *c*). Sai gadījumā pa sakaru kanālu nav jāpārveda nelietderīgā nesēja jauda. Šādu modulāciju sauc par viensānjoslas modulāciju. Tās trūkums — sarežģīta detektēšana.



12-6. zīm. Modulējošā un modulētā signāla amplitūdas spektri:  
*a* — modulējošā signāla spektrs; *b* — modulētā signāla spektrs; *c* — viensān-  
 joslās modulēta signāla spektrs.

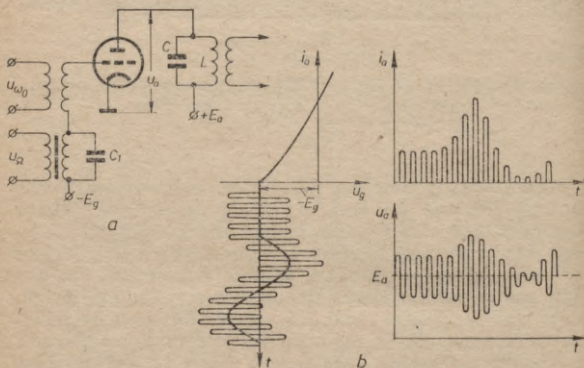
**Amplitūdas modulatori.** Amplitūdas modulatoru shēmas var izveidot gan ar lampām, gan tranzistoriem. Shēmu pamatā ir rezonanses jaudas pastiprinātājs (parasti C klases), kam svārstību kontūrs ieslēgts anoda vai kolektora ķēdē un noskaņots rezonansē ar nesējfrekvenci  $\omega_0$ , ko pievada pastiprinātāja ieejā. Modulējošo signālu pastiprinātājam var pievadīt dažādi. Tā, piemēram, ja pastiprinātājs veidots ar pentodi, modulējošo spriegumu var pievadīt gan anoda un katoda ķēdēm, gan stūrējošā, ekrāntikliņa vai aizsargtikliņa ķēdēm. Ja pastiprinātāja pamatā ir tranzistors, tad modulējošo spriegumu var pievadīt emitera, bāzes un kolektora ķēdēm. Atkarībā no tā, kurā ķēdē ievada modulējošo spriegumu, attiecīgi arī nosauc modulācijas veidu (piemēram, anoda, katoda, ekrāntikliņa, emitera, kolektora u. c. modulācijas).

Lampu shēmās visplašāk pielieto stūrējošā tikliņa modulāciju (parasti to sauc vienkārši par tikliņmodulāciju) un anodmodulāciju.

12-7. zīm. *a* redzama tikliņmodulatora shēma, bet 12-7. zīm. *b* — tā spriegumu un strāvu laika diagrammas. Lampas tikliņam pievada nesējfrekvences spriegumu  $u_{\omega_0}$  (no pašierosmes augstfrekvences ģenerators) un modulējošo spriegumu  $u_{\Omega}$ . Transformatora tinumu, kas ieslēgts modulatora tikliņķēdē, šuntē kondensators  $C_1$ , kam piemīt maza pretestība attiecībā pret nesējfrekvenci, bet liela pretestība modulējošam spriegumam. Negatīvā nobīdes sprieguma  $E_g$  avots tikliņķēdē nodrošina pastiprinātāja darbību C režīmā. Anodķēdē esošais svārstību kontūrs noskaņots uz frekvenci  $\omega_0$ .

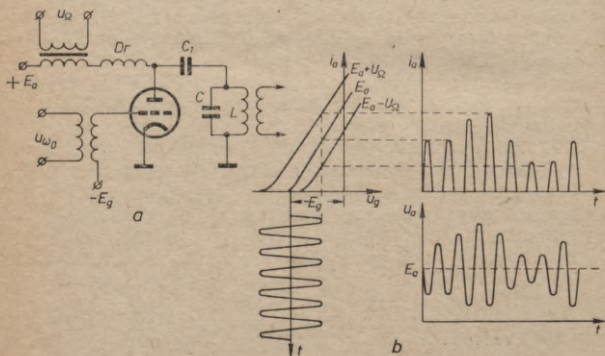
Tā kā  $\omega_0 \gg \Omega$ , tad tuvināti var uzskatīt, ka modulējo-

šais spriegums  $u_{\Omega}$  it kā maina nobīdes sprieguma vērtību (treknā  $u_g = f(t)$  likne). Tādējādi nesējfrekvences «laika ass» izliecas atbilstoši modulējošam spriegumam. Kontūrs anodkēdē izdala nesējfrekvenci un sānjoslas, ko aizvada inductīvā ceļā.



12-7. zīm. Tikliņmodulators:

a — shēma; b — strāvu un spriegumu laika diagrammas.



12-8. zīm. Anodmodulācija:

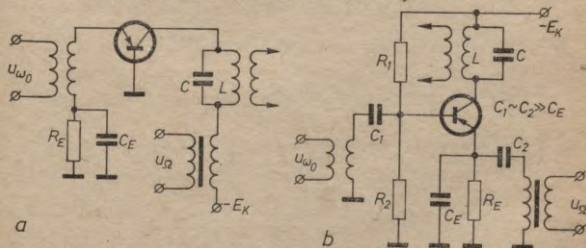
a — shēma; b — spriegumu un strāvu laika diagrammas.

Anodmodulācijas gadījumā modulējošo spriegumu ievada pastiprinātāja lampas anodķēdē. Šāda modulatora shēma attēlota 12-8. zīm. *a*, bet spriegumu un strāvu laika diagrammas redzamas 12-8. zīm. *b*. C režīma augstfrekvences pastiprinātāja lampas tīkliņķēdei pievada nesējfrekvences spriegumu  $u_{\omega_0}$  un nobīdes spriegumu  $-E_g$ . Modulējošo spriegumu  $u_{\Omega}$  (to vispirms pastiprina ar zemfrekvences pastiprinātāju) ievada lampas anodķēdē. Tādā gadījumā anodspriegums mainās no  $E_a + U_{\Omega}$  līdz  $E_a - U_{\Omega}$ . Līdz ar to rodas pulsējoša anodstrāva  $i_a$ , kas kontūrā izdala modulētu signālu. Kondensators  $C_1$  ieslēgts, lai lampas anoda līdzsprieguma komponente nenonāktu uz kontūra, bet drosele  $Dr$  — lai augstfrekvences svārstībām nebūtu īsslēguma cauri barošanas sprieguma  $E_a$  avotam uz zemējumu.

Anodmodulācijas shēmas ļauj ar mazākiem kropļojumiem iegūt lielāku modulācijas koeficientu, un tās lieto mazākas jaudas raidītājos.

Tranzistoru modulatoriem ir zināma ārēja līdzība ar lampu modulatoru shēmām. Arī te lieto pastiprinātāja pakāpi ar rezonanses kontūru izejas (kolektora) ķēdē. Lai realizētu amplitūdas modulāciju, jāiegūst tiešas proporcionalitātes sakarība starp modulēto svārstību strāvu tranzistora kolektora ķēdē ( $i_K$ ) un tā bāzes ( $u_B$ ), kolektora ( $u_K$ ) vai emitera ( $u_E$ ) spriegumu. Tātad var realizēt bāzes, kolektora un emitera modulāciju. Kolektormodulatorus lieto tad, ja jāiegūst signāls ar augstu jaudas līmeni, bet bāzes un emitermodulatorus — ja signālam jābūt ar zemu jaudas līmeni.

12-9. zīm. redzamas kolektormodulācijas un emitermo-



12-9. zīm. Tranzistoru amplitūdas modulatori:

*a* — kolektormodulācija; *b* — emitermodulācija.

dulācijas shēmas. Pirmajā gadījumā modulējošais spriegums  $u_{\Omega}$  maina kolektora spriegumu  $u_K$ , bet tas savukārt maina kolektora strāvu  $i_K$ . Ar automātiskās nobīdes ķēdes ( $R_E$  un  $C_E$ ) palīdzību, ja  $u_{\Omega}=0$ , darba punktu uz raksturliknes  $i_K=f(u_K)$  iestāda tās lineārās daļas vidū (sk. 4. nodaļu). Otrajā gadījumā modulējošais spriegums  $u_{\Omega}$  maina emitera spriegumu  $u_E$ , bet tas savukārt maina kolektora strāvu  $i_K$ . Arī te automātiskās nobīdes ķēde ( $R_E$  un  $C_E$ ), ja  $u_{\Omega}=0$ , ievirza darba punktu raksturliknes  $i_K=f(u_E)$  lineārās daļas vidū.  $C_1$  un  $C_2$  — atdalītājkondensatori.

**Frekvences un fāzes modulācija.** Frekvences modulācijā sinusoidālā sprieguma (12-5) frekvence  $\omega$  ir laika funkcija. Vienkāršākajā gadījumā

$$\omega = \omega_0 + a\Delta U \cos \Omega t = \omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t, \quad (12-9)$$

kur  $\omega_0$  — modulējamo svārstību vidējā frekvence (ja modulācijas nav),

$\Delta U$  un  $\Omega$  — modulējošā sprieguma amplitūda un frekvence,

$a$  — proporcionalitātes koeficients,

$\Delta\omega = a\Delta U$  — frekvences deviācija — modulēto svārstību leņķiskās frekvences novirze no vidējā lieluma  $\omega_0$ , kas proporcionāla tikai modulējošā sprieguma amplitūdai  $\Delta U$ .

Ja izteiksmi (12-5) pārraksta

$$u = U_m \sin(\omega t + \varphi) = U_m \sin \alpha, \quad (12-10)$$

tad fāzi  $\alpha$  izsaka

$$\begin{aligned} \alpha &= \int_0^t \omega dt + \varphi = \int_0^t (\omega_0 + \Delta\omega \cos \Omega t) dt + \varphi = \\ &= \omega_0 t + \frac{\Delta\omega}{\Omega} \sin \Omega t + \varphi. \end{aligned} \quad (12-11)$$

Lielumu

$$\frac{\Delta\omega}{\Omega} = m_f \quad (12-12)$$

sauc par frekvences modulācijas indeksu.

Spriegums ar modulētu frekvenci izsakāms

$$u = U_m \sin(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t + \varphi). \quad (12-13)$$

Ja sākuma fāze ir nulle ( $\varphi=0$ ), tad izteiksme (12-13) kļūst vienkāršāka:

$$u = U_m \sin(\omega_0 t + m_f \sin \Omega t). \quad (12-14)$$

Saskaņā ar Beseļa funkciju teoriju izteiksme (12-14) ir ekvivalenta sinusoidālu svārstību summai:

$$u = U_m \left\{ J_0(m_f) \sin \omega_0 t + \sum_{n=1}^{\infty} [J_n(m_f) \sin(\omega_0 + n\Omega)t + (-1)^n J_n(m_f) \sin(\omega_0 - n\Omega)t] \right\}, \quad (12-15)$$

kur  $J_0(m_f)$  un  $J_n(m_f)$  — pirmā veida nulltās un  $n$ -tās kārtas Beseļa funkcija, kuras arguments ir frekvences modulācijas indekss  $m_f$ .

Izteiksme (12-15) rāda, ka ar sinusoidālas formas signālu modulētas frekvences svārstību spektrs sastāv no nesējfrekvences un bezgalīga skaita tai simetrisku sānfrekvenču. Bet Beseļa funkciju vērtības ļoti strauji krīt, palielinoties kārtai, tādēļ praktiski pieņem, ka sānfrekvenču skaits ir  $2n = 2(m_f + 1)$ , t. i., Beseļa funkcijas augstākā kārtā ir  $n = m_f + 1$ .

Fāzes modulācijā sinusoidāla spriegumā (12-5) fāze ir laika funkcija. Vienkāršākajā gadījumā

$$\varphi = \varphi_0 + \Delta\varphi \sin \Omega t, \quad (12-16)$$

kur  $\varphi_0$  — modulējamo svārstību sākuma fāze,

$\Delta\varphi = m_\varphi$  — fāzes modulācijas indekss.

Tātad spriegumu ar modulētu fāzi var izteikt šādi:

$$\begin{aligned} u &= U_m \sin(\omega t + \varphi_0 + \Delta\varphi \sin \Omega t) = \\ &= U_m \sin(\omega t + \varphi_0 + m_\varphi \sin \Omega t). \end{aligned} \quad (12-17)$$

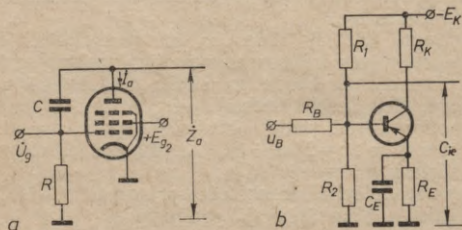
Redzams, ka izteiksme (12-17) formāli līdzīga izteiksmei (12-13). Tas liecina par frekvences un fāzes modulācijas lielo līdzību.

Fāzes modulācijā indekss  $\Delta\varphi = m_\varphi$  nav atkarīgs no modulējošās frekvences, bet frekvences modulācijas gadījumā tās indekss  $m_f = \frac{\Delta\omega}{\Omega}$  ir atkarīgs no modulējošās frekvences (apgriezti proporcionāls tai). Lai fāzes modulāciju pārvērstu frekvences modulācijā, jāpanāk  $m_\varphi$  atkarība no modulējošās frekvences.

Praksē galvenokārt lieto frekvences modulāciju, kura ļauj ievērojami samazināt traucējumu iedarbi uz signālu sakaru kanālā.

**Frekvences modulatori.** Visplašāk lietotie elementi frekvences modulācijas iegūšanai ir reaktīvā lampa un reaktīvais tranzistors, kuri maina ierosmes ģeneratora kontūra reaktīvo parametru  $L$  vai  $C$  vērtību. Tā rezultātā kontūra rezonanses frekvence mainās saskaņā ar modulējošā sprieguma parametru maiņām.

Reaktīvās lampas darbības pamatā ir pentodes izmantošana ar tās stūrējošā tīkliņa raksturlieknes stāvuma maiņu. Biežāk sastopamais reaktīvās lampas principiālais slēgums redzams 12-10. zīm. *a*. Izmantojot pentodi, var



12-10. zīm. Reaktīvo ierīču principiālais slēgums:  
*a* — reaktīvā lampa; *b* — reaktīvais tranzistors.

pieņemt, ka tās iekšējā pretestība  $R_1 \rightarrow \infty$  (sk. 3. nodaļu). Tādā gadījumā

$$I_a = \dot{U}_g S \quad (12-18)$$

un

$$\dot{U}_g = \dot{U}_a \frac{R}{R + \frac{1}{j\omega C}} \quad (12-19)$$

No (12-19) izsakot  $\dot{U}_a$  un izmantojot (12-18), var rakstīt

$$\dot{Z}_a = \frac{\dot{U}_a}{\dot{I}_a} = \frac{R + \frac{1}{j\omega C}}{SR} \quad (12-20a)$$

kur  $\dot{Z}_a$  — lampas izejas impedances,  
 $\omega$  — tīkliņam pievadītā sprieguma frekvence.

Ja parametrus izvēlas tā, lai  $\frac{1}{j\omega C} \gg R$ , izteiksme (12-20a) tuvināti pārveidojas sakarībā

$$\dot{Z}_a \approx \frac{1}{jSR\omega C}. \quad (12-20b)$$

No tās redzams, ka lampas anodķēdei, kuru nosaka lielumi  $C$ ,  $R$  un  $S$ , ir kapacitatīvs raksturs. Kā zināms, lampas raksturliknes stāvums  $S$  (līdz ar to arī  $\dot{Z}_a$  lielums) ir atkarīgs no stūrējošā tīkliņa priekšsprieguma, ko var mainīt.

Reaktīvā tranzistora shēmas (12-10. zīm. b) ieejas kapacitāte ir

$$C_{ie} \approx C_{BE} + C_{KB} \left( 1 + \frac{h_{21} R_K}{h_{11}} \right), \quad (12-21)$$

kur  $C_{BE}$  un  $C_{KB}$  — tranzistora emitera un kolektora pārēju kapacitātes,

$h_{11}$  — ieejas impedances,

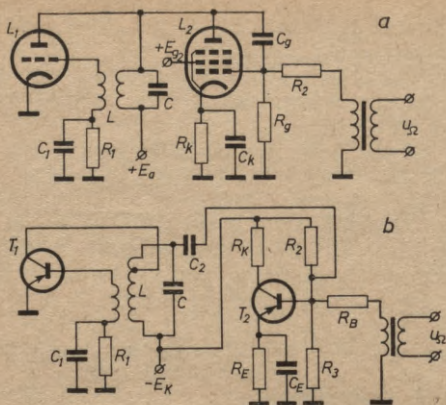
$h_{21}$  — strāvas pastiprinājuma koeficients.

Bet, tā kā  $h_{11}$  ir bāzei pieliktā sprieguma funkcija, tad, šim spriegumam mainoties, mainās arī  $C_{ie}$ .

Frekvences modulatoru shēmas izveido tā, ka reaktīvo lampu vai reaktīvo tranzistoru slēdz paralēli pašierosmes ģenerators svārstību kontūram. Modulējošā sprieguma iedarbībā mainās reaktīvo lampu vai tranzistoru izejas vai ieejas kapacitātes. Līdz ar to mainās arī pašierosmes ģenerators kontūra kapacitāte, kas izraisa ģenerētā sprieguma frekvences maiņu.

12-11. zīm. a attēlota lampu frekvences modulācijas shēma. Te lampa  $L_1$  ar svārstību kontūru  $LC$  un elementiem  $C_1$ ,  $R_1$  veido pašierosmes ģenerators, kura ģenerēto svārstību frekvenci nosaka  $L$  un  $C$  lielumi. Reaktīvās lampas  $L_2$  izeja pieslēgta paralēli pašierosmes ģenerators kontūram. Modulējošais spriegums  $u_{\Omega}$ , ko pievada reaktīvās lampas tīkliņam, modulācijas ritmā maina lampas stāvumu  $S$ . Līdz ar to mainās arī lampas kapacitatīvā reaktance, kas šuntē pašierosmes ģenerators kontūru, modulācijas ritmā mainot tā rezonanses frekvenci.

12-11. zīm. b redzama tranzistoru frekvences modulācijas shēma. Tranzistors  $T_1$  ar svārstību kontūru  $LC$  un elementiem  $R_1$ ,  $C_1$  veido pašierosmes ģenerators ar transformatora līdzsaiti. Reaktīvā tranzistora  $T_2$  ieejas kapacitāte, ko maina modulējošais spriegums  $u_{\Omega}$ , šuntē



12-11. zīm. Frekvences modulatori:  
*a* — lampu; *b* — tranzistoru.

pašerosmes ģeneratora kontūru un modulācijas ritmā maina tā rezonanses frekvenci.

Eksistē arī vairāki citi paņēmieni frekvences modulācijas iegūšanai.

### 12-3. Signālu detektēšana

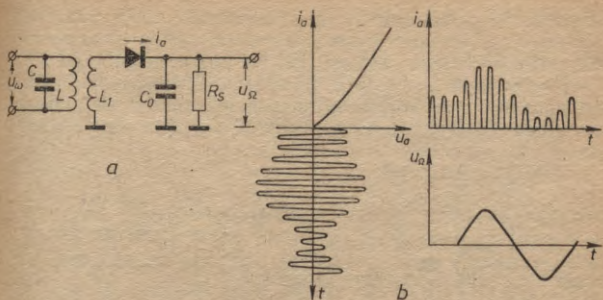
Detektorī (tos dažreiz sauc arī par demodulatoriem) no modulēta signāla izdala modulējošo spriegumu. Detektoru pamatā ir nelineārs četrpols.

**Amplitūdas detektorī.** Šie detektorī detektē modulētas amplitūdas signālu. Par nelineāriem elementiem četrpols izmanto diodes, daudzelektrodu lampas un tranzistorus.

Svarīgākais amplitūdas detektora parametrs ir sprieguma pārvades koeficients

$$K_d = \frac{U_{\Omega}}{mU_{\omega}}, \quad (12-22)$$

kur  $U_{\Omega}$  — modulējošā sprieguma amplitūda,



12-12. zīm. Diodes detektors:

a — shēma; b — spriegumu un strāvu laika diagrammas.

$m$  — amplitūdas modulācijas koeficients,

$U_\omega$  — nesējfrekvences sprieguma amplitūda.

Visplašāk lieto diodes virknes detektorus (12-12. zīm. a). Tie labi strādā pie lielas amplitūdas signāliem, nebaidās pārslodzes un rada nelielus nelineāros kropļojumus.

Modulēto signālu detektora ieejā parasti pievada caur saistītiem kontūriem ( $LC$  un  $L_1$ ). Modulētais spriegums diodes ķēdē rada pulsējošu strāvu  $i_a$  (12-12. zīm. b). Diodei caurplūstošā modulētā signāla amplitūda, kam jābūt pietiekami lielai, lai izmantotu diodes voltampēru raksturliķnes  $i_a = f(u_a)$  lineāro daļu, mainās ar modulējošo frekvenci  $\Omega$ .

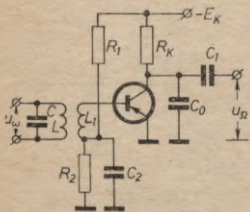
Ja izvēlas  $\frac{1}{\omega C_0} \ll R_s \ll \frac{1}{\Omega_{\max} C_0}$ , diodes strāvas zemfrekvences komponente noslēdzas cauri slodzes rezistoram  $R_s$ , bet augstfrekvences komponente — cauri kondensatoram  $C_0$ .

Lai detektēšana notiktu bez kropļojumiem, jābūt  $U_\Omega \gg 1$  V. Praktiski diodes detektoros izmanto tikai pusvadītāju diodes. Diodes detektoriem sprieguma pārvades koeficients  $K_d \approx 1$ .

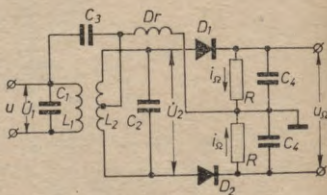
Lai vienlaikus ar detektēšanu realizētu arī detektētā signāla pastiprināšanu, t. i., iegūtu  $K_d > 1$ , izmanto vairākelektrodu lampas vai tranzistorus (praktiski galvenokārt tranzistorus). Lampu shēmās atkarība no tā, vai

detektēšana notiek anoda vai tīkliņa ķēdē, izšķir anoddetektorus un tīkliņdetektorus. Tiem ir augsts sprieguma pārvades koeficients, bet arī lieli nelineārie kropļojumi.

Plašāk lieto tranzistoru detektorus. Shēmas veido gan kopemitera, gan korbāzes, gan kopkolektora slēgumos. Praktiski visbiežāk lieto kopemitera slēguma amplitūdas



12-13. zīm. Tranzistoru kopemiterdetektors.



12-14. zīm. Diskriminators.

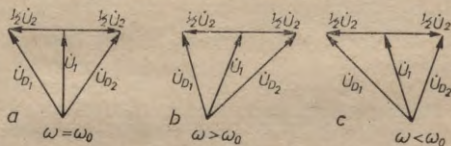
detektoru (12-13. zīm.), jo tam ir augstāka ieejas pretestība. Shēma līdzīga zemfrekvences pastiprinātāja pakāpei. Pamatatšķirība — tranzistora darba režīma izvēle. Tā bāzei pievada nelielu negatīvu potenciālu (0,05—0,1 V), tranzistora raksturliknē darba punktu aizvirzot aktīvā rajona apakšējā daļā. To panāk ar rezistoriem  $R_1$  un  $R_2$ . Rezistoru  $R_2$  šuntē ar kondensatoru  $C_2$ , lai  $R_2$  nepazeminātu tranzistora ieejas ķēdes labumu, t. i., izvēlas  $C_2 \geq \frac{5 \div 10}{\Omega_{\min} R_2}$ .

Taisngrieža funkcijas shēmā izpilda tranzistora pāreja emitters — bāze, bet slodzes rezistora funkcijas —  $R_K$ , uz kuru krīt detektētā un pastiprinātā sprieguma zemfrekvences komponente. Augstfrekvences komponente noslēdzas caur kapacitāti  $C_0$ . Detektēto spriegumu noņem no slodzes rezistora cauri atdalītājkondensatoram  $C_1$ .

**Frekvences detektori.** Frekvences detektoru uzdevums ir detektēt modulētas frekvences svārstības. Shēmu uzbūves pamatā ir diodes. Visplašāk pielieto divu veidu frekvences detektorus — diskriminatorus un attiecību detektorus. Šajās shēmās signāla frekvences maiņa pārveidojas atbilstoši tā amplitūdas maiņā, ko detektē ar parastu amplitūdas detektoru.

Diskriminatora shēma redzama 12-14. zīm. Tās pamatā ir divtaktu taisngriezis, kuru izveido diodes  $D_1$  un  $D_2$ , un divi noskaņoti kontūri  $L_1C_1$  un  $L_2C_2$ . Abu kontūrus noskaņo rezonansē ar vidējo frekvenci  $\omega_0$ . Detektēto spriegumu  $u_\Omega$  noņem no detektora slodzes, ko veido virknē slēgti rezistori  $R$ . Pa šiem rezistoriem pretējos virzienos plūst abu diodu detektētā strāva. Drosele  $Dr$  noslēdz diodu līdzstrāvas ķēdes, kā arī atsaista diodu izejas no kontūra  $L_2C_2$  (augstfrekvences strāvām). Bloķējošie kondensatori  $C_4$  rada niecīgu pretestību vidējās frekvences strāvām. Tādēļ diodu katodos nav augstfrekvences komponentes (attiecībā pret zemējumu). Kondensators  $C_3$  atdala kontūrus  $L_1C_1$  un  $L_2C_2$  (līdzstrāvas komponentei).

Viegli pārliecināties, ka katras diodes anodam tiek pievadīta kontūra  $L_1C_1$  pilna maiņsprieguma (caur  $C_3$ ) un kontūra  $L_2C_2$  maiņsprieguma puses summa, pie tam kontūra  $L_1C_1$  pilnais maiņspriegums attiecībā pret kontūra  $L_2C_2$  maiņspriegumu pusēm ir nobīdīts fāzē. No saistīto kontūru teorijas var viegli pierādīt, ka spriegumu vektoru diagrammām ir 12-15. zīm. redzamais veids, kur  $\dot{U}_{D_1}$  un  $\dot{U}_{D_2}$  — diodu anodspriegumi,  $\dot{U}_1$  un  $\dot{U}_2$  — spriegumi uz attiecīgajiem kontūriem. Rezonanses gadījumā (kad modulācijas nav, t. i.,  $\omega = \omega_0$ ) vektoru diagrammai ir 12-15.



12-15. zīm. Diskriminatora vektoru diagrammas:

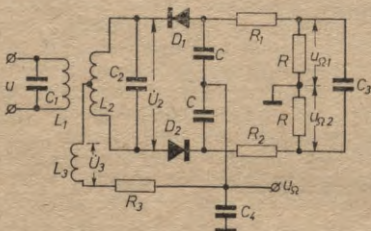
a — modulācijas nav; b un c — modulācija ieslēgta.

zīm. a attēlotais veids. Tā kā fāzes leņķis starp  $\dot{U}_1$  un  $\dot{U}_2$  ir  $\varphi = \frac{\pi}{2}$ , tad simetriskai shēmai  $\dot{U}_{D_1}$  un  $\dot{U}_{D_2}$  ir vienādi pēc amplitūdas. Līdz ar to vienādas ir arī detektētās strāvas  $i_\Omega$  un šo strāvu radītie sprieguma kritumi uz vienādajiem slodzes rezistoriem  $R$ . Tā kā šie spriegumi ir pretfāzē (strāvas  $i_\Omega$  plūst pretējos virzienos), tad detektētais spriegums  $u_\Omega$  shēmas izejā ir nulle.

Ieslēdzot modulāciju ( $\omega \neq \omega_0$ ), fāzes leņķis starp

spriegumiem  $\dot{U}_1$  un  $\dot{U}_2$  kļūst  $\varphi \neq \frac{\pi}{2}$  un  $U_{D_1} \neq U_{D_2}$ . Tātad detektētie spriegumi uz rezistoriem  $R$  vairs nav vienādi (12-15. zīm. *b* un *c*). Tādēļ arī detektētais izejas spriegums  $u_{\Omega} \neq 0$ . Jo vairāk  $\omega$  atšķiras no  $\omega_0$ , jo vairāk  $u_{\Omega}$  atšķiras no nulles. Tātad shēmas darbības rezultātā iegūst zemfrekvences spriegumu.

Diezgan līdzīga aplūkotajai shēmai ir attiecību detektora shēma (12-16. zīm.). Spriegums uz katras diodes sa-



12-16. zīm. Attiecību detektors.

stāv no kontūra  $L_2C_2$  sprieguma puses ( $1/2 \dot{U}_2$ ) un papildu tinuma  $L_3$  sprieguma ( $\dot{U}_3$ ) summas. Mainot tinuma  $L_3$  vijumu skaitu, var iegūt tādu spriegumu  $\dot{U}_3$ , pie kura vērtības maksimāli tiek nomākta parazitiskā amplitūdas modulācija. Detektēto spriegumu  $u_{\Omega 1}$  un  $u_{\Omega 2}$  vērtību attiecība uz slodzes rezistoriem  $R$  ir proporcionāla spriegumu vērtību attiecībai uz diodēm, jo detektēto spriegumu summa  $u_{\Omega 1} + u_{\Omega 2}$  gandrīz nav atkarīga no samērā ātrām signāla amplitūdas maiņām, t. i., no amplitūdas modulācijas. Jāatceras, ka amplitūdas modulāciju ierobežo spriegums uz kondensatora  $C_3$ .  $C_3$  kapacitāte ir ļoti liela (vairāki  $\mu\text{F}$ ), tādēļ spriegums uz slodzes rezistoriem  $R$  maz mainās laikā.

Ja signālam nav parazitiskās amplitūdas modulācijas, tad  $u_{\Omega 1} + u_{\Omega 2} = \text{const}$  un  $C_3$  neietekmē detektora darbu. Ja signālam ir parazitiskā amplitūdas modulācija, tad  $u_{\Omega 1} + u_{\Omega 2}$  cenšas vai nu pieaugt, vai samazināties, kā rezultātā mainās strāva cauri  $C_3$ . Bet šī strāva plūst arī caur diodēm, tāpēc, šai strāvai pieaugot vai samazinoties, svār-

stību kontūrs  $L_2C_2$  tiek vairāk vai mazāk slogots, kas savukārt rada  $U_2$  samazināšanos vai palielināšanos. Tātad te zināmā mērā rodas pretsaites efekts.

Rezistori  $R_1$  un  $R_2$ , kas ir it kā daļa no slodzes rezistoriem  $R$ , iznesi ārpus  $C_3$  stabilizējošās darbības sfēras, lai ar  $R_1$  un  $R_2$  palīdzību varētu simetrizēt shēmu. Kondensatori  $C$  izpilda analogu lomu kā  $C_4$  diskriminātorā — cauri tiem noslēdzas vidējās frekvences strāvas.

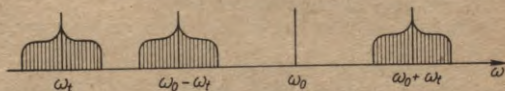
Rezistors  $R_3$  nogludina diodu strāvu galotnes, ja signāla līmeņi ir lieli, bet kondensators  $C_4$  rada vidējās frekvences strāvu išslēgumu ar zemējumu.

Pie attiecību detektora pozitīvajām īpašībām pieder augsta jutība, liels pastiprinājuma koeficients un laba parazitiskās amplitūdas modulācijas nomākšana.

#### 12-4. Signālu frekvences pārveidošana

Pie signālu frekvences pārveidošanas pieskaitāma frekvences transponēšana, daudzkārhošana un dalīšana.

Par frekvences transponēšanu (jaukšanu) sauc vienas frekvences vai vesela frekvenču spektra signālu pārvietošanu citā frekvenču spektra daļā. Shēmas, kas realizē šo procesu, sauc par frekvences transponētājiem, jaucējiem vai pārveidotājiem. To pamatā ir nelineārs četrpols. Lai realizētu transponēšanu, vajadzīgs vēl otrs noteiktas un konstantas frekvences  $\omega_0$  avots (ģenerators). Iedarbojoties uz nelineāru ķēdi ar transponējamās frekvences  $\omega_t$  un konstantas frekvences  $\omega_0$  signāliem, četrpola izejā parādās signāls, kas satur abu frekvenču dažādu harmonisko kombinācijas  $n\omega_0 \pm k\omega_t$ , kur  $n$  un  $k$  — jebkurš vesels



12-17. zīm. Frekvences transponēšanas princips.

skaitlis. Vienkāršākajā gadījumā transponēto frekvenci  $\omega$  iegūst, ja  $k=n=1$ , t. i.,  $\omega = \omega_0 \pm \omega_t$ . Uzskatāmi transponēšana redzama 12-17. zīm., kur signāls ar frekvenču joslu  $\omega_t$  tiek pārvietots augstāku frekvenču virzienā.

Par signāla frekvences daudzkārsšošanu sauc šī signāla frekvences palielināšanu veselu skaitu reizi. Tātad, ja frekvences daudzkārsotāja ieejā ir signāls ar frekvenci  $\omega$ , tad izejā parādās signāls ar frekvenci  $n\omega$ , kur  $n=1, 2, 3, 4, \dots$ .

Par signāla frekvences dalīšanu sauc šī signāla frekvences samazināšanu veselu skaitu reizi.

**Frekvences transponētāji (jaucēji).** Tātad frekvences transponētāju pamatā ir nelineārs četrpols. Tā voltampēru raksturlielni  $i=f(u)$  var aprakstīt ar pakāpju rindu:

$$i=f(u) = a_0 + a_1u + a_2u^2 + a_3u^3 + \dots + a_nu^n. \quad (12-23)$$

Ja pieņem, ka uz šādu nelineāru četrpolu iedarbojas divi virknē slēgti kosinusoidāli spriegumi

$$u = U_0 \cos \omega_0 t + U_t \cos \omega_t t, \quad (12-24)$$

tad, ierobežojoties ar trīs pirmajiem rindas locekļiem, strāva ir

$$\begin{aligned} i = & a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + a_2 (U_0 \cos \omega_0 t + \\ & + U_t \cos \omega_t t)^2 + \dots = a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + \\ & + a_2 U_0^2 \cos^2 \omega_0 t + 2a_2 U_0 U_t \cos \omega_0 t \cos \omega_t t + \\ & + a_2 U_t^2 \cos^2 \omega_t t + \dots = a_0 + a_1 U_0 \cos \omega_0 t + a_1 U_t \cos \omega_t t + \\ & + a_2 U_0^2 \cos^2 \omega_0 t + a_2 U_0 U_t \cos (\omega_0 + \omega_t) t + \\ & + a_2 U_0 U_t \cos (\omega_0 - \omega_t) t + a_2 U_t^2 \cos^2 \omega_t t + \dots \end{aligned} \quad (12-25)$$

No izteiksmes (12-25) redzams, ka strāva nelineāra četrpola izejā satur harmoniskās ar frekvencēm  $\omega_0$ ,  $\omega_t$ ,  $\omega_0 + \omega_t$ ,  $\omega_0 - \omega_t$  u. c. Jaucēju izejās parasti izdala harmoniskās ar frekvencēm  $\omega_0 + \omega_t$  vai  $\omega_0 - \omega_t$ , rezonansē ar vienu no tām noskaņojot svārstību kontūru.

Nelineāras voltampēru raksturlieknes ir gan pusvadītāju, gan vakuuma ierīcēm. Visbiežāk jaucējos izmanto pentodes, heptodes un tranzistorus.

Izmantojot jaucēju shēmā pentodi, abus signālus var pievadīt stūrējošajam tīkliņam (12-18. zīm. a), bet, izmantojot heptodi (12-18. zīm. b), vienu no signāliem pievada pirmajam tīkliņam, bet otru — trešajam tīkliņam. Abās shēmās svārstību kontūri lampu anodķēdēs noskaņoti rezonansē ar harmonisko  $\omega_0 + \omega_t$  vai  $\omega_0 - \omega_t$ . Transponēto signālu no slodzes kontūriem  $L_3 C_3$  noņem induktīvi ar kontūru  $L_4 C_4$  palīdzību. Rezistori  $R_k$  un kondensatori  $C_k$



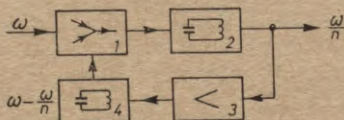
tikliņiem pievada automātiskās nobīdes spriegumu.  $C_6$  ir atdalītājkondensators.

Retāk lampu jaucējos izmanto triodes. Tad vienu no signāliem parasti ievada stūrējošā tikliņa ķēdē, bet otru — katoda ķēdē.

Tranzistoru jaucējos parasti izmanto statiskās raksturliknes  $i_K = \varphi(u_{BE})$  sākuma nelineāro daļu. Abus signālus ievada vai nu vienā tranzistora elektroda ķēdē, vai arī divās elektrodu ķēdēs. 12-19. zīm. redzama tranzistoru jaucēja shēma, kurā vienu no signāliem ievada bāzes, bet otru — emitera ķēdē. Signālu  $U_0 \cos \omega_0 t$  ievada no kontūra  $L_1 C_1$  tieši bāzes ķēdē cauri atdalītājkondensatoram  $C_3$ . Režistori  $R_1$  un  $R_2$  ieregulē bāzes režīmu, bet elementi  $R_E$  un  $C_E$  rada automātisko nobīdi. Signālu  $U_t \cos \omega_t t$  ievada emitera ķēdē inductīvi (kontūri  $L_5$  un  $L_2 C_2$ ). Tranzistora kolektora slodzi rada kontūrs  $L_3 C_3$ , kas noskaņots rezonansē ar harmonisko  $\omega_0 + \omega_t$  vai  $\omega_0 - \omega_t$ . Izejas spriegumu no šī kontūra noņem inductīvi (kontūrs  $L_4 C_4$ ).

**Frekvences daudzkārstotāji.** Frekvenču daudzkārstošānai praksē parasti lieto C klases pastiprinātāju, kuram izejas signāls ir stipri kropļots attiecībā pret ieejas signālu. Par pastiprinātāja slodzi izmanto rezonanses kontūru, kas noskaņots uz vienu no signāla augstākajām harmoniskajām. Elektriskā frekvences daudzkārstotāja shēma kā ar elektronu lampām, tā ar tranzistoriem ne ar ko neatšķiras no parastās C klases pastiprinātāja pakāpes (sk. 7. nodaļu), kam slodze ir noskaņots rezonanses kontūrs.

**Frekvences dalītāji.** Visplašāk pielieto t. s. reģeneratīvo frekvences dalītāju. Tā blokshēma redzama 12-20. zīm. Jaucēja pakāpei 1 pievada dalāmo frekvenci  $\omega$  un frekvenci  $\omega - \frac{\omega}{n}$ . Rezonanses sistēma (kontūrs) 2 jaucēja iz-



12-20. zīm. Reģeneratīvais frekvences dalītājs:

1 — jaucējs, 2 — rezonanses sistēma, 3 — pastiprinātājs, 4 — rezonanses sistēma.

ejā noskaņota rezonansē ar frekvenci  $\omega - \omega + \frac{\omega}{n} = \frac{\omega}{n}$ . Daļu no dalītās frekvences signāla pastiprina nelineārs pastiprinātājs 3, kura izejā rezonanses sistēma (kontūrs) noskaņota uz harmonisko  $\omega - \frac{\omega}{n}$ . Šīs frekvences signālu tad arī caur kontūru 4 pievada vienai no jaucēja ieejām. Dalītās frekvences signālu noņem no jaucēja rezonanses sistēmas 2. Shēma sāk darboties, tikko tai pievada dalāmo frekvenci  $\omega$ . Rezonanses sistēmu kontūriem jābūt ar augstu labumu, lai nomāktu nevajadzīgās blakusharmoniskās.

## LITERATŪRA

- 1) *A. Akmentiņš*. Radioelektronikas elementi. LVI, 1960.
- 2) *A. Grundulis* un *H. Stanke*. Radioelektroniskie mērījumi. Izd. «Liesma», 1966.
- 3) *A. Hesins*. Impulsu iekārtas. Izd. «Liesma», 1965.
- 4) *A. Lielturks*. Teorētiskā elektrotehnika un radiotehnika. Izd. «Zvaigzne», 1966.
- 5) *V. Kārklīņš* un *A. Snore*. Tune|diodes. LPSR ZA, 1963.
- 6) Tehniskā rokasgrāmata, IV daļa. Izd. «Liesma», 1966.
- 7) *I. Zerebcovs*. Radiotehnika. Izd. «Liesma», 1968.
  
- 8) *С. Г. Блантер*. Промышленная электроника. Гостоптехиздат, 1963.
- 9) *В. Ф. Власов*. Электронные и ионные приборы. Связьиздат, 1963.
- 10) *Л. М. Гольденберг*. Основы импульсной техники. Связьиздат, 1960.
- 11) *С. М. Герасимов* и др. Элементы общей теории связи. Связьиздат, 1965.
- 12) *Е. Ф. Доронкин* и *В. В. Воскресенский*. Транзисторные генераторы импульсов. Изд. «Связь», 1966.
- 13) *Р. А. Казарян* и др. Элементы общей теории связи. ГЭИ, 1957.
- 14) *Г. Лепарц* и *В. Таэгер*. Конструирование схем на транзисторах. Изд. «Энергия», 1964.
- 15) Радиотехнические схемы на транзисторах и туннельных диодах. Изд. «Связь», 1966.
- 16) *Джон Райдер*. Техническая электроника. Изд. «Судпромгиз», 1961.
- 17) *И. П. Жеребцов*. Основы электроники. Изд. «Энергия», 1967.
- 18) *Я. С. Кублановский*. Схемы на четырехслойных полупроводниковых приборах. Изд. «Энергия», 1967.
- 19) *Р. Ф. Ши*. Расчет транзисторных цепей. Изд. «Энергия», 1964.
- 20) *Андре Анго*. Математика для электро и радиоинженеров. Изд. «Наука», 1964.
- 21) *В. В. Тащиян*. Полупроводниковые переключающие приборы. Изд. «Энергия», 1967.
- 22) *С. В. Свечников*. Основы технической электроники. Гостехиздат УССР, 1963.

## SATURS

Priekšvārds . . . . .	3
Ievads . . . . .	4
<b>1. nodaļa. Diodes</b> . . . . .	<b>5</b>
1-1. Vakuuma diodes . . . . .	5
1-2. Pusvadītāju diodes . . . . .	9
1-3. Diodu lietošana taisngriežos . . . . .	16
1-4. Taisngriežu filtri . . . . .	24
1-5. Speciālas pusvadītāju diodes un to lietošana . . . . .	28
<b>2. nodaļa. Triodes</b> . . . . .	<b>36</b>
2-1. Triodu uzbūve un darbība . . . . .	36
2-2. Triodu statiskās raksturliknes . . . . .	37
2-3. Triodu statistiskie parametri . . . . .	43
2-4. Triodes darba režīmā . . . . .	46
<b>3. nodaļa. Daudzelektrodu lampas</b> . . . . .	<b>52</b>
3-1. Tetrodes . . . . .	52
3-2. Pentodes . . . . .	55
3-3. Pentodu raksturliknes un parametri . . . . .	56
3-4. Staru tetrodes . . . . .	61
3-5. Speciālās daudzelektrodu lampas un kombinētās lampas . . . . .	66
<b>4. nodaļa. Tranzistori</b> . . . . .	<b>75</b>
4-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	75
4-2. Tranzistoru raksturliknes . . . . .	80
4-3. Tranzistoru parametri . . . . .	87
4-4. Tranzistoru temperatūras stabilitāte . . . . .	96
4-5. Tranzistoru paštrokšņi . . . . .	98
4-6. Galvenie tranzistoru tipi . . . . .	99
4-7. Kanāltransistori . . . . .	101
<b>5. nodaļa. Jonu ierīces</b> . . . . .	<b>104</b>
5-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	104
5-2. Gāzu izlādes fizikālie principi . . . . .	105
5-3. Kvēlkatoda (nepatstāvīgas izlādes) jonu ierīces . . . . .	108
5-4. Patstāvīgas izlādes jonu ierīces . . . . .	116
<b>6. nodaļa. Fotoelektriskās ierīces</b> . . . . .	<b>125</b>
6-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	125
6-2. Vakuuma fotoelementi . . . . .	125
6-3. Fotoelektronu daudzkārtotāji . . . . .	130
6-4. Pusvadītāju fotoelementi . . . . .	133
<b>7. nodaļa. Pastiprinātāji</b> . . . . .	<b>141</b>
7-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	141
7-2. Elektronu lampu pastiprinātājpakāpes . . . . .	144
7-3. Pastiprinātājpakāpe ar anodslozdi . . . . .	145

7-4. Pastiprinātājpakāpe ar katodslozdi . . . . .	150
7-5. Tranzistoru pastiprinātājpakāpes . . . . .	152
7-6. Pastiprinātājpakāpju frekvenču un fāzu kropļojumi . . . . .	156
7-7. Pastiprinātājpakāpju nelineārie kropļojumi . . . . .	160
7-8. Jaudas pastiprinātāji . . . . .	162
7-9. Fāzgriezēju pakāpes . . . . .	168
7-10. Pretsaite pastiprinātajos . . . . .	169
7-11. Platjoslas pastiprinātāji . . . . .	171
7-12. Augstfrekvences šaurjoslu pastiprinātāji . . . . .	172
7-13. Līdzsprieguma pastiprinātāji . . . . .	174
8. nodaļa. Harmonisko svārstību generatori . . . . .	177
8-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	177
8-2. Svešierosmes generatori . . . . .	177
8-3. Pašierosmes generatori . . . . .	180
8-4. Pašierosmes generatoru frekvences stabilizācija . . . . .	188
9. nodaļa. Impulsu tehnikas elementi . . . . .	194
9-1. Jēdziens par impulsveida signāliem . . . . .	194
9-2. Pārejas procesi lineārās ķēdēs . . . . .	196
9-3. Amplitūdas ierobežošana . . . . .	205
9-4. Blokingeneratori . . . . .	211
9-5. Multivibratori . . . . .	217
9-6. Trigeri . . . . .	225
9-7. Lineāri mainīga sprieguma ģenerācija . . . . .	230
10. nodaļa. Līdzsprieguma un līdzstrāvas stabilizācija . . . . .	233
10-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	233
10-2. Stabilizēta līdzsprieguma avoti . . . . .	234
10-3. Stabilizētas līdzstrāvas avoti . . . . .	240
11. nodaļa. Katodstaru oscilogrāfs . . . . .	242
11-1. Vispārīgas ziņas . . . . .	242
11-2. Katodstaru lampa . . . . .	244
11-3. Katodstaru oscilogrāfa uzbūve . . . . .	246
11-4. Katodstaru oscilogrāfa izmantošana . . . . .	253
12. nodaļa. Elektrosakaru pamati . . . . .	258
12-1. Sakaru teorijas jēdzieni . . . . .	258
12-2. Modulācija . . . . .	265
12-3. Signālu detektsana . . . . .	274
12-4. Signālu frekvences pārveidošana . . . . .	279
Literatūra . . . . .	284

*A. Grundulis, H. Stanke*  
ELEKTRONIKA

Vāku zīmējis *G. Ezernieks*.

Redaktors *J. Čirulis*. Māksl. redaktore *A. Ozoliņa*.  
Tehn. redaktore *L. Vasīļevska*. Korektore *M. Svān-  
felde*.

Nodota salikšanai 1970. g. 13. martā. Parakstīta  
iespiešanai 1970. g. 4. novembrī. Papīra formāts  
84×108<sup>1</sup>/<sub>32</sub>. 9 fiz. iespiedl.; 15,12 uzsk. iespiedl.;  
13,85 izdevn. l. Tip. pap. Nr. 3. Metiens 3000 eks.  
JT 04267. Maksā 63 kap.

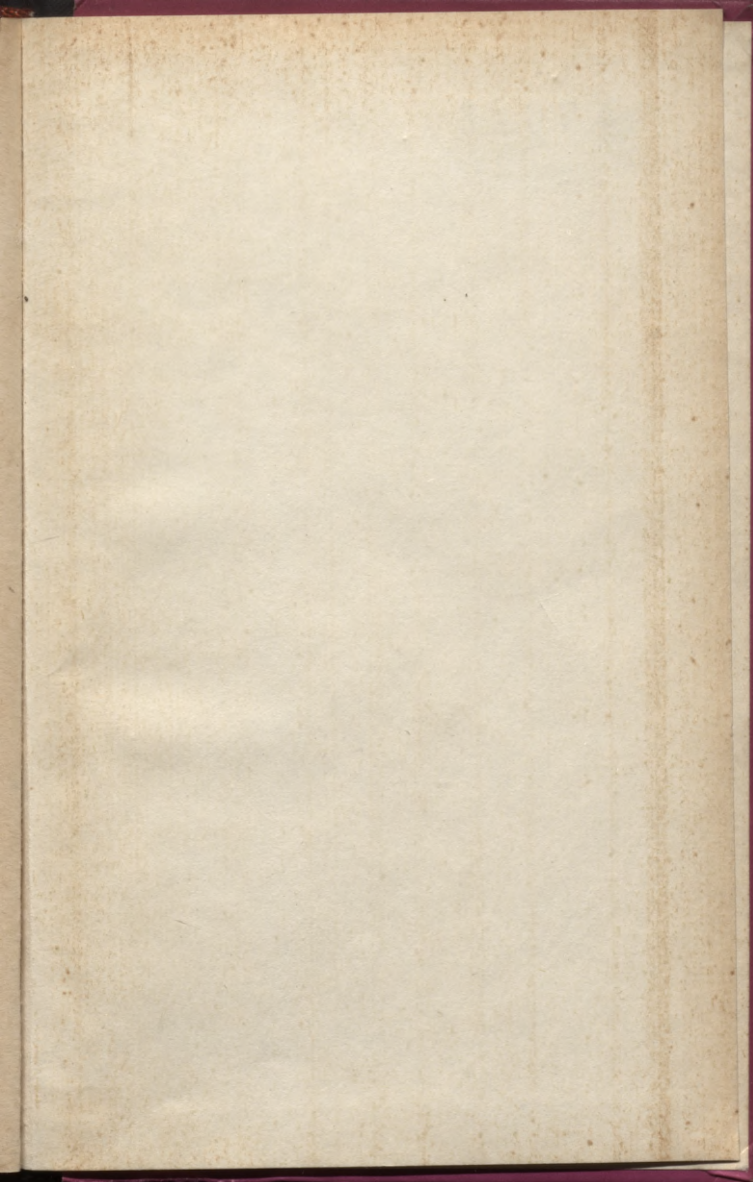
Izdevniecība «Zvaigzne» Rīgā, Gorkija ielā 105.  
Izdevn. Nr. 1395-A-335. Iespiesta Latvijas PSR Mi-  
nistru Padomes Preses komitejas 3. tipogrāfijā  
Rīgā, Ļeņina ielā 137/139. Pasūt. Nr. 160.

*А. О. Грундулис, Г. С. Станке*

ЭЛЕКТРОНИКА

Издательство «Звайгзне»

На латышском языке



870267

LATVIJAS NACIONĀLĀ BIBLIOTĒKA



0308105196

63 kap.