

RĪGAS TEHNISKĀ UNIVERSITĀTE
Elektrotehnikas un elektronikas katedra

U. Zītars

ELEKTRONIKAS PAMATI

Mācību līdzeklis
Ceturtais izdevums

Rīgas Tehniskā universitāte
Rīga – 2007

UDK 621.38(075.8)

Mācību līdzeklī "Elektronikas pamati" aplūkota pusvadītāju ierīču uzbūve, to darbības principi un izmantošana rūpniecības elektronikā. Dota pastiprinātāju, ģeneratoru, ciparu un impulsu tehnikas, kā arī spēka elektronikas shēmu īsa analīze. Izdevums paredzēts kā mācību līdzeklis augstskolu neelektrotehnisko specialitāšu studentiem.

© Rīgas Tehniskā universitāte, 2007. g.

IEVADS

Elektronika ir zinātnes un tehnikas nozare, kas nodarbojas ar tādu procesu praktisku izmantošanu, kuri saistīti ar elektrisko strāvu vakuumā, gāzēs un pusvadītājos. Ir izstrādāts liels skaits dažādu elektronikas ierīču. Nepārtraukti pilnveidojas gan šo ierīču konstrukcijas un parametri, gan arī to pielietojums.

Galvenās mūsdienu elektronikas nozares ir radioelektronika, rūpniecības, bioloģiskā, medicīniskā u.c. elektronikas. Rūpniecības elektronikā savukārt var izdalīt divas svarīgākās nozares – informatīvo elektroniku, kas nodarbojas ar tehnoloģisko procesu parametru mērījumiem, kontroli un vadību, un enerģētisko elektroniku, kas apskata vidējas un lielas jaudas iekārtas viena strāvas veida pārveidošanai citā.

Elektronika ir viena no tām tehnikas nozarēm, kas pēdējos gadu desmitos iespiedusies visās cilvēka darbības sfērās. Straujā elektronikas attīstība deva iespēju izveidot sarežģītas modernās tehnikas iekārtas – kabatas formāta mikrokalkulatorus un lielas universālās elektroniskās skaitļošanas mašīnas, mazjaudas sprieguma pārveidotājus fotozibspuldžu barošanai un automatizētās piedziņas sistēmas ar simtiem kilovatu jaudu. Praktiski nav tādas nozares, kurā neiznāktu lielākā vai mazākā mērā saskarties ar elektroniku.

Šis darbs iecerēts kā mācību līdzeklis studentiem, kas elektroniku apgūst minimāli – kā elektrotehnikas kursa vienu nodaļu.

Ierobežotais apjoms nedod iespējas izskatīt visus elektronikas jautājumus, kas varētu rasties topošajiem inženieriem, tādēļ aplūkoti tikai paši svarīgākie. Nav iztirzāti, piemēram, vakuuma un gāzēpildīto elektronikas ierīču uzbūves un darbības pamati, virkne elektronikas elementu pielietojumu.

Tā kā modernajā elektronikā galvenokārt izmanto pusvadītāju ierīces, turpmāk apskatītas tikai tās. Formulas dotas galvenokārt tur, kur tās nepieciešamas vielas labākai izpratnei.

Daudzi pusvadītāju ierīču un to izvadu starptautiski pieņemtie apzīmējumi pārņemti no angļu valodas, tāpēc labākai šo apzīmējumu izpratnei iekavās dots angļu valodas nosaukums.

1. PUSVADĪTĀJU IERĪCES

Pusvadītāju ierīcēs elektriskie procesi norisinās pusvadītāja kristālā. Pēdējos gadu desmitos tieši pusvadītāju tehnika attīstījies tik strauji, ka pašlaik moderno elektroniku var raksturot kā pusvadītāju elektroniku. Vakuuma un gāzpidītās ierīces izmanto ierobežotāk. Galvenās pusvadītāju ierīču priekšrocības ir to kompakts, ātrdarbīgums, augsts lietderības koeficients, liels darba drošums, vienkārša ekspluatācija.

1.1. Pusvadītāju materiālu galvenās īpašības

Pusvadītāju ierīcēs visvairāk izmanto periodiskās sistēmas ceturtās grupas elementus: silīciju, germāniju, kā arī dažus citus materiālus (piemēram, selēnu, gallija arsenīdu). Tīrs silīcijs (vai germānijs) kristalizējas telpiskā kristāliskā režģī, kurā katrs atoms ar kovalentās saites starpniecību saistīts ar četriem blakus esošajiem atomiem.

Paaugstinātas temperatūras, starojuma enerģijas un citu ārēju faktoru ietekmē atsevišķas kovalentās saites var pārtrūkt. Šai gadījumā elektrons no atoma atbrīvojas (veidojas brīvais elektrons), bet atomā pēc elektrona aiziešanas rodas caurums. Ar terminu "caurums" saprot vakantu vietu atomā, kas izveidojas pēc elektrona aiziešanas. Brīvais elektrons var pārvietoties kristāliskajā režģī. Caurumu savukārt var aizpildīt elektrons no blakus esošās saites. Tad iepriekšējais caurums rekombinācijas rezultātā izzūd, bet jauns caurums parādās blakus. Tātad arī caurums var pārvietoties.

Tādēļ pusvadītājā iespējami divu veidu lādiņnesēji – elektroni un caurumi. Ja kristāls neatrodas elektriskajā laukā, tad šo lādiņnesēju kustība ir haotiska. Pievadot kristālam spriegumu, elektroni sāk pārvietoties pretēji elektriskā lauka virzienam, bet caurumi – lauka virzienā (caurumu var uzskatīt par pozitīvi lādētu kustīgu daļiņu). Rezultātā pusvadītājā plūst strāva, kura sastāv no divām komponentēm – elektronu un caurumu komponentes.

Pusvadītāju vadītspēja atkarīga no konkrētā materiāla un arī no temperatūras – temperatūrai paaugstinoties, palielinās brīvo elektronu un caurumu skaits un tātad palielinās arī vadītspēja. Šo vadītspēju pieņemts saukt par pašvadītspēju. Elektronu un caurumu pāri var rasties arī starojuma enerģijas ietekmē. Šo parādību izmanto fotoelementos.

Pusvadītāju tehnikā visvairāk lieto nevis pilnīgi tīrus elementus, bet ar dažādām tehnoloģiskām metodēm kristālā ievada vajadzīgajā koncentrācijā noteiktus piejaukuma atomus. Kā piejaukumu germānijam vai silīcijam galvenokārt izmanto periodiskās sistēmas trešās un piektās grupas elementus.

Ja silīcija kristālā ievadīti piektās grupas elementa (piemēram, fosfora) atomi, tad četri piejaukuma atoma valentie elektroni veido saites ar silīcija atomiem, bet piektais valentais elektrons saiti neveido un viegli var atrauties no atoma, kurš kļūst par pozitīvu jonu. Temperatūru diapazonā, kurā parasti izmanto pusvadītāju ierīces

(apmēram no -40°C līdz $+70 \dots 140^{\circ}\text{C}$), praktiski visi piejaukuma atomi izrādās jonizēti. Šādu piejaukumu, kurš kristāliem dod brīvos elektronus, sauc par donorpiejaukumu, bet pusvadītāju ar donorpiejaukumu – par n tipa pusvadītāju.

Ja silīcijā ievadīts trešās grupas elements (piemēram, alumīnijs), tā trīs valentie elektroni veido trīs kovalentās saites ar blakus esošajiem silīcija atomiem, bet ceturtais saites veidošanai alumīnija atoms sev pievieno cita atoma elektronu. Tādēļ piejaukuma atoms kļūst par negatīvu jonu, bet blakus veidojas caurums. Šādu piejaukumu sauc par akceptorpiejaukumu, bet attiecīgo pusvadītāju – par p tipa pusvadītāju.

Pusvadītājos ar piejaukumiem (p un n tipa pusvadītājos) strāvu rada piejaukumu veidotie lādiņnesēji. Šādu pusvadītāja vadītspēju pieņemts saukt par piejaukumvadītspēju. Piejaukumvadītspēja atkarīga no piejaukumu koncentrācijas. Vienlaikus pusvadītājā pastāv arī pašvadītspēja, ar ko sevišķi jārēķinās, ja ir paaugstināta temperatūra. Elektronus n tipa pusvadītājos un caurumus p tipa pusvadītājos sauc par majoritātes lādiņnesējiem jeb vairākumnesējiem. Pretējas zīmes lādiņnesējus, kuri rada pašvadītspēju un parasti ir ievērojami mazākā koncentrācijā, sauc par minoritātes lādiņnesējiem jeb mazākumnesējiem.

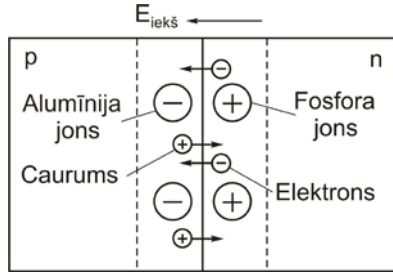
1.2. Elektroncaurumu pāreja

Lielākajā daļā pusvadītāju izmanto elektroncaurumu pārejas (p-n pārejas). Par elektroncaurumu pāreju sauc robežu starp p un n apgabaliem pusvadītāja kristālā. Jāievēro, ka p-n pāreja rodas vienotā kristālā un to nevar iegūt, piemēram mehāniski savienojot divus dažādus kristālus.

Elektroncaurumu pārejas iegūšanai izmanto dažādas tehnoloģiskas metodes, no kurām izplatītākās ir sakausēšanas un difūzijas metodes. Lietojot sakausēšanas tehnoloģiju, n tipa silīcija plāksnītei piespiež klāt silīcija un alumīnija sakausējuma plāksnīti un tās stipri sakarsē. Tad izveidojas zona, kurā izkusušais silīcijs satur alumīnija piejaukumu, bet pēc atdzišanas un silīcija rekristalizācijas rodas p-n pāreja.

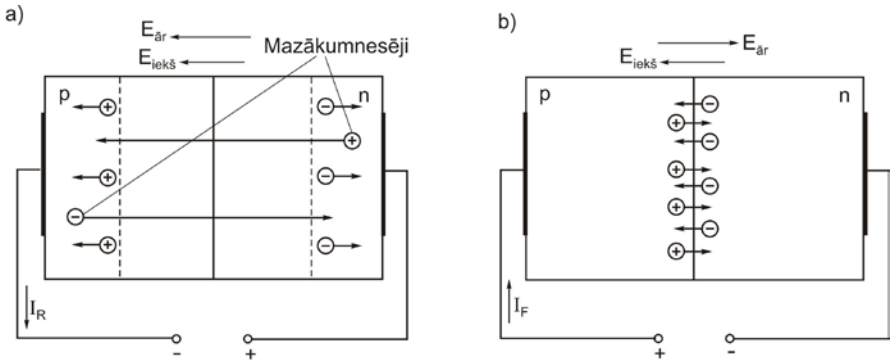
Lai p-n pāreju iegūtu ar difūzijas metodi, uz silīcija uznes bora un alumīnija savienojumus, kuri ilgstošas karsēšanas laikā difundē kristālā, veidojot p tipa apgabalu un p-n pāreju.

Aplūkosim procesus elektroncaurumu pārejā, ja nav pieslēgts ārējs EDS avots (1. zīm.). Apgabalā ar p vadītspēju ir daudz caurumu, bet n apgabalā to ir maz. Tādēļ notiek caurumu difūzija no p apgabala n apgabalā. Caurumi, kas iekļuvuši n apgabalā, tur rekombinē ar elektroniem. Vienlaikus notiek arī elektronu difūzija no n apgabala p apgabalā ar sekojošu rekombināciju. Šo procesu rezultātā p un n apgabalu robežas tuvumā izzūd kustīgie lādiņnesēji – elektroni un caurumi. Turpretī jonizētie piejaukuma atomi nevar pārvietoties, un starp tiem rodas iekšējais elektriskais lauks $E_{iekš}$, kas kavē tālāku lādiņnesēju difūziju. Tādēļ kristālā abās pusēs no p-n pārejas izveidojas slānis, kurā praktiski nav kustīgo lādiņnesēju – t.s. sprosts slānis.



1. zīm. Elektroncaurumu pārejas izveidošanās

Ja p-n pārejai pielikts ārējs EDS ar pozitīvo polu pie n apgabala (2. zīm. a), tad ārējā elektriskā lauka $E_{ār}$ virziens sakrīt ar iekšējā lauka $E_{iekš}$ virzienu. Tādēļ kustīgie lādiņnesēji vēl vairāk attālinās no apgabala robežas, un tātad, sprotslānis paplašinās. Cauri p-n pārejai šajā gadījumā var plūst tikai ļoti neliela strāva – sprotsstrāva I_R (R - reverse). Sprotsstrāvu rada minoritātes lādiņnesēji.



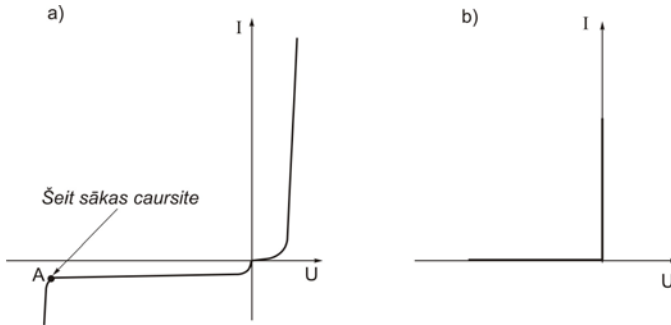
2. zīm. Elektroncaurumu pāreja ar ārēju EDS avotu:
a – sprotsvirzienā; b – caurlaides virzienā

Ja ārējā sprieguma polaritāti izmaina (2. zīm. b), ārējais elektriskais lauks kompensē iekšējo, un sprotslānis izzūd. Tad vairs nav šķēršļu majoritātes nesēju difūzijai cauri p-n pārejai, radot relatīvi lielu caurlaides virziena strāvu I_F (F – forward).

Tātad raksturīga p-n pārejas īpašība ir tās pretestības atkarība no pieliktā sprieguma virziena. Ja pastāv caurlaides spriegums, strāva ir liela (pretestība maza), ja sprotspriegums – otrādi. Elektroncaurumu pārejas voltampēru raksturlīkne attēlota 3. zīmējumā a.

Šīs raksturlīknes caurlaides un sprotsvirziena zarus parasti nevar uzzīmēt vienādos mērogos, jo spriegumi šajos divos virzienos atšķiras desmitiem un simtiem reižu, bet strāvas – simtiem un tūkstošiem reižu. Bieži vienkāršoti pieņem,

ka caurlaides virzienā spriegums uz p-n pārejas vienāds ar nulli (pāreja atvērta). Patiesībā uz atvērta p-n pārejas ir neliels spriegums – parasti robežās no 0,5 līdz 2 V. Tāpat dažreiz var neievērot ļoti nelielu sproststrāvu. Ar šādiem pieņēmumiem iegūstam idealizētu p-n pārejas voltampēru raksturliķni, kas attēlota 3. zīmējumā b.



3. zīm. Elektroncaurumu pārejas voltampēru raksturliķne: a – reālā; b – ideālā

Ja sprostsprriegums pārsniedz noteiktu vērtību, iestājas p-n pārejas caursite, sproststrāva strauji pieaug (punkts A 3. zīmējumā a). Sākumā parasti rodas lavīncaursite, kas raksturīga ar ievērojamu strāvas palielināšanos pie gandrīz nemainīga sprieguma. Pastāvot lavīncaursitei, minoritātes lādiņnesēji, kustoties elektriskajā laukā ar lielu ātrumu, izsauc pusvadītāja atomu triecienjonizāciju. Ļoti plānās p-n pārejās iespējams arī cits caursites veids – tuneļcaursite, kad spēcīgs elektriskais lauks atrauj elektronus no atoma. Abi šie caursites veidi pārtraucas, ja samazinās sprostsprriegums.

Visbiežāk iesākusies lavīncaursite (vai tuneļcaursite) pāriet siltumcaursitē, kas ir saistīta ar p-n pārejas temperatūras neierobežotu paaugstināšanos. Pie augstākas temperatūras rodas vairāk minoritātes lādiņnesēju. Tādā gadījumā pieaug sproststrāva, līdz ar to pārejā izdalās vairāk siltuma, un tās temperatūra kļūst vēl augstāka. Siltumcaursites rezultātā p-n pāreja tiek sabojāta (izkūst).

1.3. Pusvadītāju diode

Pusvadītāju diodē ir viena p-n pāreja. Diodes voltampēru raksturliķne ir līdztīga iepriekš aplūkotajai p-n pārejas raksturliķnei (sk. 3. zīm.). Diodi izmanto gadījumos, kad nepieciešams, lai strāva plūstu tikai vienā virzienā, piemēram, maiņstrāvas taisngriešanai.

1.3.1. Diodes parametri

Diodes galvenie parametri ir pieļaujamā caurlaides strāva un pieļaujamo sprostsprriegums. Pieļaujamo caurlaides strāvu nosaka diodes silšanas apstākļi. To pārsniedzot, diode pārkarst. Nekādā gadījumā nedrīkst pārsniegt arī pieļaujamo

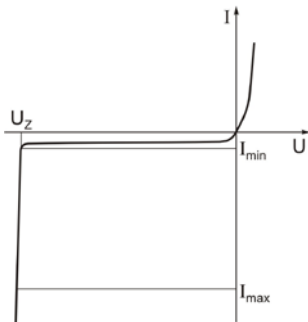
sprostspriegumu. Pat īslaicīga pieļaujamā sprieguma pārsniegšana var izsaukt diodes caursiti.

Pusvadītāju ierīču rūpnīcas gatavo diodes ar nominālo caurlaides strāvu no dažiem miliampēriem līdz vairākiem tūkstošiem ampēru un pieļaujamo sprostspriegumu līdz dažiem tūkstošiem voltu. Pašlaik visplašāk lieto silīcija diodes, kas var strādāt pie temperatūras līdz 140°C . Germānija diodēm darba temperatūra ir zemāka, bet sproststrāva daudz lielāka. Dažreiz lieto arī selēna diodes, kuru elektriskie parametri ir ievērojami sliktāki – daudz zemāks darba spriegums un strāva, kā arī sliktāks lietderības koeficients. Selēna diožu gabarīti ir ievērojami lielāki nekā silīcija vai germānija diodēm.

1.3.2. Pusvadītāju stabilitrone

Stabilitrone (Zēnera diode) ir speciāla silīcija diode, kura var strādāt lavīncaursites režīmā, kas raksturojas ar samērā stabilu spriegumu. Lai novērstu lavīncaursites pāreju siltumcaursītē, stabilitrone konstrukcija nodrošina efektīvu siltuma novadīšanu no p-n pārejas. Bez tam ar speciāliem tehnoloģiskiem paņēmieniem iegūst homogēnāku p-n pāreju, lai caursite varētu sākties vienlaikus visā pārejas laukumā. Tad nenotiek lokāla pārkaršana kādā punktā un tai sekojoša siltumcaursite.

Stabilitrone lavīncaursites režīmā var strādāt tikai pie noteikuma, ka p-n pāreja nepārkarst. Tādēļ viens no būtiskākajiem stabilitrone parametriem ir maksimālā izkliedējamā jauda.

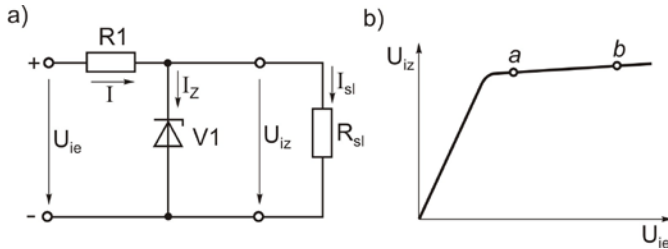


4. zīm. Pusvadītāju stabilitrone voltampēru raksturlīkne

Stabilitrone voltampēru raksturlīkne attēlota 4. zīmējumā. Normālā darba režīmā spriegums uz stabilitrone – stabilizācijas spriegums U_z , mainoties strāvai, gandrīz nemainās. Strāva var mainīties robežās no I_{\min} līdz I_{\max} . Ja tā kļūst mazāka par I_{\min} , lavīncaursite izbeidzas un spriegums sāk samazināties. Ja strāva pārsniedz pieļaujamo vērtību I_{\max} , stabilitrone var pārkarst, kā rezultātā iespējama siltumcaursite.

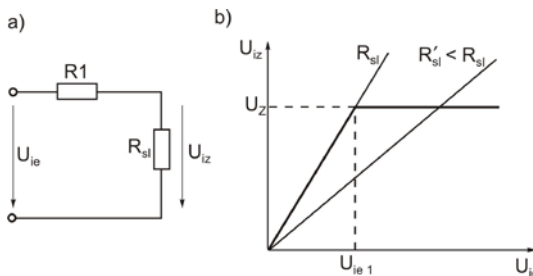
1.3.3. Parametriskais sprieguma stabilizators

Stabilitronu parasti izmanto sprieguma stabilizēšanai. Vienkāršākā stabilizatora, t.s. parametriskā stabilizatora shēma attēlota 5. zīmējumā. Stabilizatora izejas spriegums U_{iz} ir mazāks par ieejas spriegumu U_{ie} . Šo spriegumu starpība krīt uz balasta rezistora R_1 . Ja palielinās ieejas spriegums, tad apmēram par tikpat voltiem palielinās arī spriegums uz balasta rezistora, bet izejas spriegums paliek gandrīz nemainīgs, jo tas ir ne tikai spriegums uz slodzes, bet arī spriegums uz stabilitrona.



5. zīm. Parametriskais sprieguma stabilizators: a – shēma; b – izejas sprieguma atkarība no ieejas sprieguma

Sprieguma stabilizatora darbības analīzei neņemsim vērā nelielo sproststrāvu, kas plūst caur stabilitronu, ja izejas spriegums ir mazāks par stabilizācijas spriegumu U_Z (t.i., nav vēl iestājusies lavīncaursīte). Tad iegūstam aizvietošanas shēmu, kas redzama 6. zīmējumā a. Šai shēmai atbilst proporcionāla sakarība $U_{iz} = f(U_{ie})$. 6. zīmējumā b grafiski attēlotas šīs sakarības divām slodzes pretestības vērtībām. Kad ieejas spriegums kļūst vienāds ar U_{ie1} , sākas lavīncaursīte, un izejas spriegums tālāk vairs nepalielinās. No šā grafika varam secināt, ka lielākas slodzes strāvas (mazākas slodzes pretestības) gadījumā stabilizācijas režīma iegūšanai nepieciešams lielāks ieejas spriegums. Izejas spriegums nosacīti parādīts vienāds ar U_Z (patiesībā izejas spriegums nedaudz palielinās, palielinoties ieejas spriegumam).



6. zīm. Sprieguma stabilizators: a – aizvietošanas shēma; b – izejas sprieguma atkarība no ieejas sprieguma

Stabilizatora shēmas aprēķinam var izmantot Kirhofa likumus (sk. 5. zīm. a):

$$U_{ie} = U_Z + R_1 \cdot I ; \quad (1)$$

$$I = I_Z + I_{sl} . \quad (2)$$

Šeit pieņemts, ka $U_{iz}=U_Z$.

Sprieguma stabilizatora darbības kvalitāti rāda t.s. stabilizācijas koeficients – ieejas un izejas spriegumu relatīvo izmaiņu attiecība (sk. 5. zīm. b):

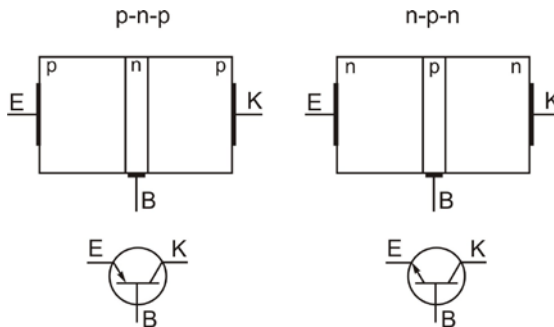
$$K_{st} = \frac{\frac{\Delta U_{ie}}{U_{ie \text{ vid}}}}{\frac{\Delta U_{iz}}{U_{iz \text{ vid}}}} = \frac{(U_{ie b} - U_{ie a})(U_{iz b} + U_{iz a})}{(U_{ie b} + U_{ie a})(U_{iz b} - U_{iz a})} . \quad (3)$$

Lietojot šo formulu, jāievēro, ka punktiem *a* un *b* jāatrodas stabilizācijas diapazonā, tātad sakarības $U_{iz}=f(U_{ie})$ lēzenajā daļā. Parametriskā sprieguma stabilizatora stabilizācijas koeficients nav lielāks par 20 – 50. Ja nepieciešams stabilāks izejas spriegums, lieto kompensācijas stabilizatorus (sk. 2.7. p.).

1.4. Bipolārais tranzistors

1.4.1. Bipolārā tranzistora uzbūve un darbības princips

Bipolārais tranzistors (turpmāk saukts “tranzistors”) ir pusvadītāju ierīce ar divām p-n pārejām, kuru izmanto elektrisko signālu pastiprināšanai un kā bezkontakta slēdzi. Iespējamās tranzistoru struktūras un nosacītie apzīmējumi doti 7. zīmējumā.



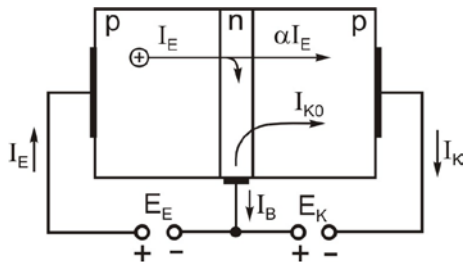
7. zīm. Bipolārā tranzistora struktūra un nosacītais apzīmējums:
a – p-n-p tipa; b – n-p-n tipa

Tranzistors izveidots no silīcija vai germānija monokristāla, kurā radītas divas p-n pārejas nelielā attālumā viena no otras. Iespējamās divas tranzistora struktūras: p-n-p un n-p-n.

Tranzistora izgatavošanas procesā vidējo zonu (bāzi) izveido plānu un ar ievērojami mazāku lādiņnesēju koncentrāciju nekā malējās zonas, kuras sauc par

emiteru un kolektoru. Tranzistoru parasti ieslēdz shēmā tā, lai emitera pārejai (p-n pārejai starp emiteru un bāzi) būtu pielikts caurlaides virziena spriegums, bet kolektora pārejai – sprostsprriegums.

Aplūkosim tranzistora slēgumu, kas redzams 8. zīmējumā. Šeit ieejas strāva ir emitera strāva I_E , bet izejas strāva – kolektora strāva I_K . Attiecīgi, par ieejas spriegumu jāuzskata spriegums starp emiteru un bāzi, bet par izejas spriegumu – spriegums starp kolektoru un bāzi.



8. zīm. Strāvas tranzistora struktūrā

Tā kā emitera pāreja ieslēgta caurlaides virzienā, caur to plūst emitera strāva I_E . Šo strāvu veido caurumi, kas no emitera iekļūst bāzē, un elektroni, kas pārvietojas pretējā virzienā. Tā kā elektronu koncentrācija bāzē salīdzinājumā ar caurumu koncentrāciju emiterā ir niecīga, emitera strāvas elektronu komponenti var neievērot. Lielākā daļa bāzē iekļuvušo caurumu difūzijas rezultātā iziet tai cauri un nokļūst līdz kolektora pārejai. Tā kā caurumi bāzē (n apgabalā) ir minoritātes lādiņnesēji, tie brīvi pārvar kolektora pārejas sprostsprriegumu, iekļūst kolektorā un elektriskā lauka ietekmē turpina ceļu tālāk. Neliela caurumu daļa bāzē rekombinē, radot bāzes strāvu. Lai bāzes strāva būtu maza, nepieciešams samazināt caurumu rekombināciju, tādēļ bāze tiek veidota plāna, lai caurumi pietiekami ātri paspētu iziet tai cauri. Caur bāzi iziet strāva αI_E , kur $\alpha = 0,9 - 0,995$.

Tātad tranzistora darba procesā piedalās gan caurumi, kas difundē cauri bāzei, gan arī elektroni, kas rekombinē ar caurumiem. Tāpēc, atšķirībā no unipolārā tranzistora – lauktranzistora (sk. 1.5. p.) aplūkoto ierīci sauc par bipolāro (divpolāro) tranzistoru.

Bez strāvas galvenās daļas, kas plūst cauri tranzistora struktūrai no emitera uz kolektoru, caur sprostvirzienā ieslēgto kolektora pāreju plūst kolektora sproststrāva I_{K0} . Tādēļ

$$I_K = \alpha I_E + I_{K0} ; \quad (4)$$

$$I_E = I_K + I_B . \quad (5)$$

Koeficientu α (to apzīmē arī ar h_{21B}) sauc par emitera strāvas pārvades koeficientu (arī – strāvas pārvades koeficientu kopbāzes shēmai). No trim strāvām vislielākā ir emitera strāva I_E . Kolektora strāva I_K ir tikai nedaudz mazāka. Tādēļ nebūs pieļauta liela kļūda, ja tuvināti pieņemsim, ka abas šīs strāvas ir aptuveni vienādas. Bāzes strāva ir ievērojami mazāka.

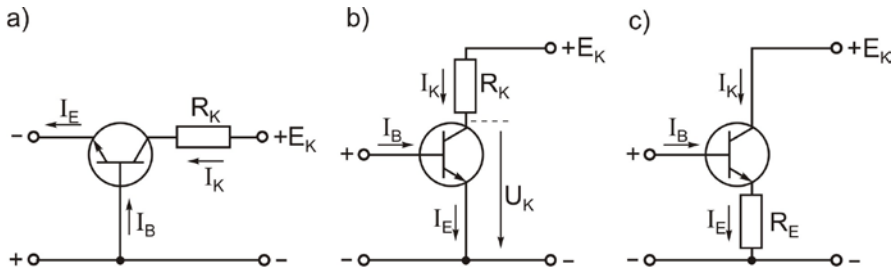
Tādēļ, ja mainās emitera strāva, mainās arī kolektora strāva. Jāpiebilst, ka aplūkotā tranzistora slēguma shēma (kopbāzes shēma) nepastiprina strāvu – izejas strāva I_K ir pat nedaudz mazāka par ieejas strāvu I_E . Kopbāzes shēma var pastiprināt spriegumu, jo ieejā ir atvērta p-n pāreja ar ļoti mazu ieejas spriegumu (volta daļas), bet izejā – aizvērta pāreja, kurai var būt pielikts ievērojami lielāks spriegums (parasti vairāki desmiti voltu).

Ja p-n-p tranzistora vietā izmantots n-p-n tipa tranzistors, tad abu spriegumu polaritātēm jābūt pretējām. Izmainās arī visu strāvu virzieni. Bultiņa emitera nosacītajā apzīmējumā norāda emitera strāvas virzienu. Pārējo divu strāvu virzienus viegli iegūt, izmantojot sakarību (5). Turpmāk aplūkosim n-p-n tipa tranzistorus.

1.4.2. Tranzistora ieslēgšanas shēmas

Izmantojot tranzistoru elektrisko signālu pastiprināšanai vai kā bezkontakta slēdzi, diviem tranzistora izvadiem jāpievada ieejas signāls (pastiprināmais spriegums vai bezkontakta slēdža vadības signāls), bet citiem diviem izvadiem jāpieslēdz slodze. Bez tam shēmā jāparedz barošanas avoti.

Tā kā tranzistoram ir tikai trīs izvadi, kam jāpieslēdz ieejas un izejas ķēdes, tad viens no tranzistora elektrodiem vienlaikus tiek pievienots gan ieejai, gan arī izejai. Līdz ar to pavisam iespējamas trīs dažādas tranzistora slēguma shēmas, kuras attēlotas 9. zīmējumā. Visos gadījumos ieejas ķēde parādīta kreisajā pusē. Zīmējumā redzams arī, kā izejas ķēdē jāieslēdz slodze.



9. zīm. Tranzistora ieslēgšanas shēmas:
a – kopbāzes; b – kopemitera; c – kopkolektora

Kopbāzes shēma tika sīki iztirzāta iepriekš. Šajā gadījumā ieejā ir vislielākā no tranzistora strāvām – emitera strāva, bet izejā nedaudz mazāka – kolektora strāva. Tādēļ šī shēma strāvu nepastiprina. Kopbāzes shēmu lieto speciālos gaadījumos.

Kopemitera shēmas (9. zīm. b) ieejā ir mazākā no strāvām – bāzes strāva, bet izejā daudz lielākā kolektora strāva. Šī shēma dod ievērojamu strāvas pastiprinājumu. Tāpat kā kopbāzes shēmā, ieejā ir atvērta p-n pāreja (emiteris – bāze), tādēļ ieejas spriegums ir mazs. Izejas ķēdē virknē slēgtas divas p-n pārejas – emitera un kolektora, pie tam kolektora pārejai spriegums pielikts sprostvirsienā.

Tā kā p-n pārejas sprostspriegums var būt ievērojami lielāks par caurlaides spriegumu, kopemitera shēmā var iegūt arī sprieguma pastiprinājumu. Šī shēma dod vislielāko jaudas pastiprinājumu. Galvenokārt šī iemesla dēļ kopemitera shēmu lieto visbiežāk.

Izmantojot sakarības (4) un (5), iegūstam

$$I_K = \beta I_B + (\beta + 1) I_{K0}, \quad (6)$$

kur $\beta = \frac{\alpha}{1 - \alpha}$ (arī h_{21E}) – bāzes strāvas pārvades koeficients.

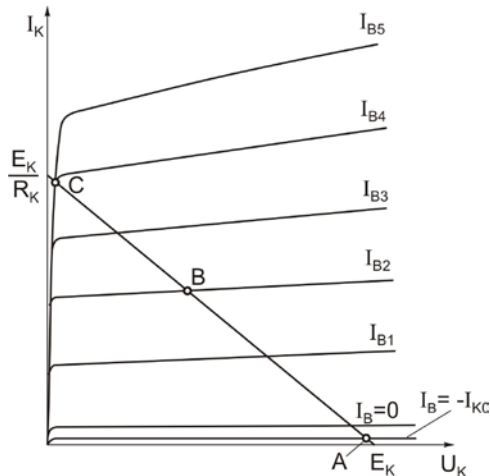
Dažreiz var neņemt vērā kolektora sproststrāvu (galvenokārt impulsu shēmās). Tad

$$I_K \approx \beta \cdot I_B. \quad (7)$$

Kopkolektora shēmā (9. zīm. c) strāvas pastiprinājums ir apmēram tāds pats, kā kopemitera shēmā, bet sprieguma pastiprinājuma nav. Šīs shēmas vērtīga īpašība ir lielā ieejas pretestība, tāpēc tranzistors ļoti maz noslogo ieejas signāla avotu.

1.4.3. Tranzistora izejas raksturlīknes un darba režīmi

No tranzistora voltampēru raksturlīkņēm visbiežāk izmanto izejas raksturlīknes, kuras attēlo izejas strāvas atkarību no izejas sprieguma pie nemainīgas ieejas strāvas. Aplūkosim izejas raksturlīknes visvairāk izmantotajam tranzistora slēguma veidam – kopemitera shēmai, kas uzņemtas pie vairākām bāzes strāvām (10. zīm.).



10. zīm. Kopemitera shēmā slēgta tranzistora izejas raksturlīknes

Tranzistora iespējamo darba režīmu analīzei izmantosim nelineāru līdzstrāvas ķēžu grafiskā aprēķina metodi, kas piemērojama gadījumam, kad virknē ar nelineāru pretestību (šajā gadījumā – tranzistoru) ieslēgta lineāra pretestība (rezistors kolektora ķēdē). Tad jāzīmē slodzes līnija, kas rāda sakarību starp kolektora strāvu un kolektora spriegumu, ja kolektora ķēdē ieslēgts rezistors R_K (sk. 9. zīm. b). Slodzes līniju iegūstam, izmantojot otro Kirhofa likumu

$$U_K = E_K - R_K I_K . \quad (8)$$

Tas ir taisnes vienādojums, ko visvienkāršāk attēlot grafiski, ja zināmi punkti, kas atrodas uz koordinātu asīm. Ja vienādojumā ieliekam $I_K = 0$, iegūstam $U_K = E_K$, bet ja $U_K = 0$, tad $I_K = E_K / R_K$. Šos punktus savienojam ar taisni. Tranzistora darba režīmu nosaka slodzes līnijas krustpunkts ar uzdotajai bāzes strāvai atbilstošo tranzistora izejas raksturliķni. Aplūkosim vairākus raksturīgus režīmus.

1. Nogriešanas režīms (punkts A 10. zīmējumā). Šo režīmu var iegūt, ja izmaina ieejas sprieguma polaritāti – pie bāzes pieslēdz negatīvo polu. Šajā gadījumā var uzskatīt, ka emitera strāva ir tuva nullei (emitera pāreja ir slēgta), bet bāzes strāva maina virzienu un plūst no kolektora uz bāzi. Tad $I_K = I_{K0}$ un $I_B = -I_{K0}$. Spriegums uz tranzistora U_K ir gandrīz vienāds ar barošanas avota spriegumu E_K , bet spriegums uz rezistora R_K tuvs nullei.

2. Aktīvais režīms (piemēram, punkts B 10. zīmējumā). Slodzes līnija krusto izejas raksturliķni tās horizontālajā posmā. Viegli pārliecināties, ka, izmainoties bāzes strāvai (piemēram, no I_{B2} uz I_{B3}), izmainās arī kolektora strāva un spriegumi uz tranzistora un uz rezistora R_K . Tas nozīmē, ka aktīvajā režīmā tranzistors strādā kā pastiprinātājs un $I_K = \beta I_B$.

3. Piesātinājuma režīms (punkts C). Slodzes līnijas un izejas raksturliķnes krustpunkts atrodas raksturliķnes vertikālajā posmā. Šajā gadījumā bāzes strāvas turpmāka palielināšanās (piemēram, no I_{B4} uz I_{B5}) neizsauc kolektora strāvas izmaiņu, tātad tranzistors kļūst nevadāms.

Piesātinājuma režīmā spriegums U_K ir ļoti mazs (germānija tranzistoriem dažas volta desmitdaļas), tādēļ aptuveni var uzskatīt, ka viss barošanas avota spriegums pielikts rezistoram R_K , bet visi trīs tranzistora izvadi savienoti kopā vienā mezgla punktā. Kolektora strāvu tad var noteikt ar formulu

$$I_K = \frac{E_K}{R_K} . \quad (9)$$

Tranzistora darba režīmu ar bāzes strāvu I_{B4} vienlaikus var uzskatīt arī par aktīvo režīmu, jo šeit raksturliķne pāriet no vertikālā posma uz horizontālo. Aktīvajam režīmam ir spēkā sakarība $I_{B4} = I_K / \beta$, bet, lai iegūtu piesātinājuma režīmu, bāzes strāvai jābūt lielākai par I_{B4} . No šejienes iegūstam tranzistora piesātinājuma nosacījumu:

$$I_B > \frac{I_K}{\beta} . \quad (10)$$

Ja tranzistors strādā divos no trim aplūkotajiem darba režīmiem – nogriešanas un piesātinājuma režīmā, bet aktīvais režīms pastāv tikai īslaicīgi, pārejot no viena režīma uz otru, tad iegūstam tranzistora slēdzi. Nogriešanas režīmā šāds slēdzis ir

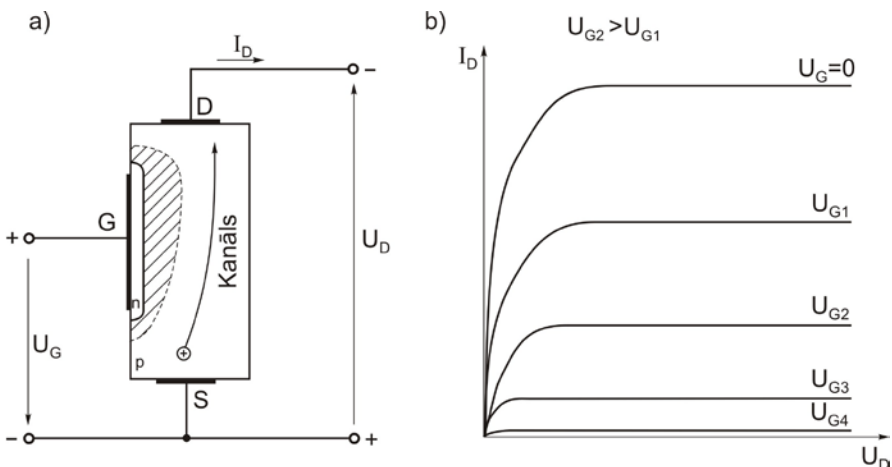
aizvērts (slodzes strāva necīga), bet piesātinājuma režīmā – atvērts (slodze saņem pilnu barošanas avota spriegumu).

Aktīvajā režīmā tranzistors strādā dažādās pastiprinātāju shēmās, bet slēdža režīmā – impulsu tehnikas un digitālās informācijas apstrādes iekārtās.

1.5. Lauktranzistors

Pēdējā laikā plašu pielietojumu ir ieguvuši lauktranzistori, kuros strāvu regulē šķērsvirzienā vērsts elektriskais lauks. Izšķir divus lauktranzistoru veidus – ar p-n pāreju un ar izolētu aizvaru. Sīkāk aplūkosim pirmo no tiem.

Lauktranzistors ar p-n pāreju sastāv no silīcija kristāla, kura vienā malā izveidota p-n pāreja (11. zīm.). Strāva kristālā plūst starp elektrodiem, kurus sauc par izteci S (*source*) un noteci D (*drain*).

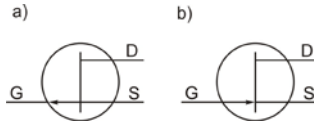


11. zīm. Lauktranzistors ar p-n pāreju: a – struktūra; b – izejas raksturlīknes

Iztece ir elektrods, no kura lādiņnesēji (11. zīmējumā – caurumi) sāk kustību. Starp trešo elektrodu – aizvaru G (*gate*) un izteci pielikts aizvara spriegums U_G , kas regulē lādiņnesēju plūsmu kristālā. Spriegums U_G pielikts p-n pārejai sprostvirzienā. Šis sprostsprriegums p-n pārejas rajonā rada sprotslāni, kurā praktiski nav lādiņnesēju (zīmējumā iesvītrots). Noteces strāva tāpēc var plūst tikai pa to kristāla daļu, līdz kurai nav izplatījies sprotslānis, – pa kanālu.

Ja palielina aizvara spriegumu U_G , sprotslānis paplašinās, tādēļ kanāls sašaurinās. Tā kā šajā gadījumā palielinās kanāla pretestība, noteces strāva I_D samazinās. Lauktranzistora izejas raksturlīknes parādītas 11. zīmējumā b.

Bez aplūkotā lauktranzistora ar p tipa kanālu lieto arī lauktranzistoru ar n tipa kanālu. Šajā gadījumā spriegumu polaritātes un strāvu virzieni būs pretēji. Lauktranzistoru nosacītie apzīmējumi shēmās doti 12. zīmējumā.



12. zīm. Lauktranzistoru ar p-n pāreju nosacītie apzīmējumi:
a – ar p tipa kanālu; b – ar n tipa kanālu

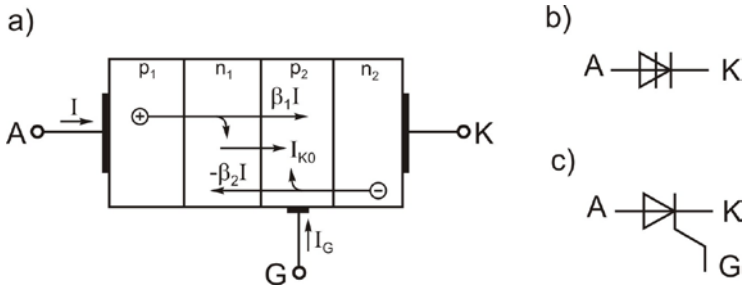
Lauktranzistorā ar izolētu aizvaru, ko sauc arī par MDP tranzistoru (no vārdiem “metāls-dielektrīķis-pusvadītājs”), vai MOP tranzistoru (“metāls-oksīds-pusvadītājs”), aizvars ar silīcija dioksīda slāni ir pilnīgi izolēts no silīcija plāksnes. Mainot aizvara spriegumu, elektrostatiskās indukcijas ietekmē mainās lādiņnesēju koncentrācija kanālā un līdz ar to arī noteces strāva.

Galvenā lauktranzistora priekšrocība ir ļoti lielā ieejas pretestība. Aizvara strāva ir niecīga – daži nanoampēri, jo p-n pārejai spriegums pieslēgts sprostvirzienā. MDP tranzistoriem ieejas strāva ir vēl mazāka (tā ir noplūdes strāva caur izolācijas slāni). Līdz ar to var uzskatīt, ka lauktranzistorā noteces strāvu regulē aizvaram pieliktais spriegums. Turpretim bipolārajā tranzistorā kolektora strāvu regulē, mainot bāzes strāvu. Šeit ieejas strāva ir samērā liela, un ar to jārēķinās.

1.6. Tiristors

Par tiristoru sauc pusvadītāju ierīci ar trim vai vairākām p-n pārejām, kuru var pārslēgt no aizvērtā stāvokļa atvērtā un otrādi. Tiristorus parasti izmanto lielu strāvu komutācijai.

Tiristora struktūra attēlota 13. zīmējumā a. Tāpat kā diodei, tiristoram ir divi galvenie izvadi – anods A un katods K. Parasti ir arī izvads no apgabala p_2 – vadības elektrods G (*gate*). Ja vadības elektroda nav, tad tādu tiristoru sauc par diodtiristoru vai dinistoru. Dinistors ir mazjaudas ierīce, ko izmanto impulsu tehnikas shēmās. Lieljaudas iekārtās lieto tiristorus ar vadības elektrodiem – triodtiristorus. Tiristoru nosacītie apzīmējumi doti 13. zīmējumā b un c.



13. zīm. Tiristors: a – struktūra; b – diodtiristora (dinistora) nosacītais apzīmējums; c – triodtiristora nosacītais apzīmējums

Tiristora struktūrā var izdalīt divas bipolāro tranzistoru struktūras – $p_1-n_1-p_2$ un $n_2-p_2-n_1$. Pieņemsim, ka spriegums tiristoram pielikts ar pozitīvo polu pie anoda. Tiristora struktūrā plūstošās strāvas parādītas 13. zīmējumā a. Tā kā pie norādītās sprieguma polaritātes pāreja p_1-n_1 ir atvērta, caur to pirmā tranzistora bāzē iekļūst caurumi, no kurienes daļa ($\alpha_1 I$) iziet bāzei cauri un nonāk kolektorā p_2 . Šiem caurumiem ir pozitīvs lādiņš, tāpēc tie paaugstina apgabala p_2 potenciālu, tādējādi vairāk atverot pāreju p_2-n_2 un palielinot pretējā virziena elektronu plūsmu no otra tranzistora emitera n_2 uz tā bāzi p_2 . Elektronu, kas izgājuši cauri bāzei (atbilstošā strāva $\alpha_2 I$), pazemina apgabala n_1 potenciālu, tādējādi palielinot caurumu plūsmu.

Šo procesu analīze parāda, ka tiristora struktūrā pastāv divas pretējas lādiņnesēju plūsmas, kuras attiecīgajos tranzistoros viena otru pastiprina. Tā kā jebkurā struktūras šķēlumā kopējai strāvai jābūt vienai un tai pašai, varam uzrakstīt šādu sakarību (pagaidām neņemot vērā vadības strāvu I_G):

$$\alpha_1 I + \alpha_2 I + I_{K0} = I, \quad (11)$$

no kurienes iegūstam

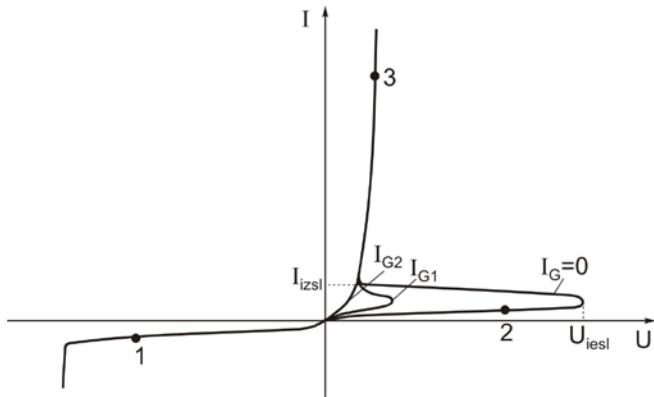
$$I = \frac{I_{K0}}{1 - (\alpha_1 + \alpha_2)}. \quad (12)$$

Tranzistoru strāvas pārvades koeficienti α_1 un α_2 galvenokārt atkarīgi no sproststrāvas pāreju p_2-n_1 . Tiristors ir izveidots tā, lai pārvades koeficientu summa $\alpha_1 + \alpha_2$ būtu mazāka par vienu, tādēļ pēc sprieguma pieslēgšanas tiristorā plūdis samērā neliela strāva (vienas kārtas ar sproststrāvu I_{K0}).

Strāvas pārvades koeficienti α_1 un α_2 , kā arī sproststrāva I_{K0} ievērojami pieaug tikai tad, kad spriegums sasniedz vērtību, pie kuras sākas lavīncaursīte. Ja $\alpha_1 + \alpha_2 = 1$, no formulas (12) iegūstam $I = \infty$, t.i., izveidojas apstākļi, pie kuriem divu pretējo lādiņnesēju plūsmu savstarpējā pastiprināšanās noved pie strāvas neierobežota pieauguma. Tādēļ tiristors atveras – abi tranzistori izrādās piesātināti, spriegums uz tiristora samazinās līdz ļoti nelielai vērtībai (apmēram 1 V), bet strāvu ierobežo ķēdes ārējā pretestība.

Tiristora voltampēru raksturlīknes attēlotas 14. zīmējumā. Sprostvirzienā, tāpat kā diodei, strāva ir ļoti maza – daži miliampēri (punkts 1). Strāva ir neliela arī caurlaides virzienā, kamēr tiristors atrodas aizvērtā stāvoklī (punkts 2). Palielinot spriegumu līdz ieslēgšanās sprieguma vērtībai U_{iesl} , tiristors atveras, strāva lavīnveidīgi palielinās, bet spriegums samazinās (punkts 3). Voltampēru raksturlīkne pēdējā gadījumā neatšķiras no atvērtas diodes voltampēru raksturlīknes (sk. 3. zīm. a).

Tiristoru var atvērt divos veidos. Pirmais no tiem jau bija paskaidrots – jāpalielina spriegums līdz ieslēgšanās sprieguma vērtībai U_{iesl} . Tā parasti atver tikai dinistorus. Triodtiristorus atver, pievadot vadības strāvu vadības elektrodām. 14. zīmējumā attēlotas arī voltampēru raksturlīknes pie divām dažādām vadības strāvām. Ja ir vadības strāva, ieslēgšanās spriegums samazinās (I_{G1}) vai voltampēru raksturlīkne pat pilnīgi iztaisnojas (I_{G2}). Lai tiristoru atvērtu, pilnīgi pietiek ar īslaicīgu vadības strāvas impulsu, jo jau atvērtā tiristorā strāvu uztur iepriekš aprakstītie procesi.



14. zīm. Tiristora voltampēru raksturīknes

Lai tiristoru vai dinistoru aizvērtu, tā anoda strāva, palielinot slodzes pretestību, jāsamazina līdz izslēgšanās strāvas vērtībai I_{izsl} (sk. 14. zīm.) vai arī tiristoram jāpieliek sprostspriegums. Abos gadījumos šis režīms jā saglabā noteiktu laiku – tiristora izslēgšanās laiku (vidēji $100 \mu s$). Ja caurlaides virziena spriegumu atjauno par ātru, kad tiristora vidējās zonās n_1 un p_2 iekļuvušie lādiņnesēji vēl nav paspējuši rekombinēt, tiristors atvērsies no jauna bez vadības strāvas pievadīšanas.

Salīdzināsim diodes, tiristora un bipolārā tranzistora galvenās īpašības. Diode atveras, ja tai pielikts caurlaides virziena spriegums. Lai atvērtu tiristoru, nepieciešams vienlaikus izpildīt divus nosacījumus – pielikt caurlaides virziena spriegumu un vadības elektrodam pievadīt vadības strāvu (kaut vai īslaicīgi).

Kā tiristoru, tā arī tranzistoru var izmantot kā bezkontakta slēdzi, tomēr tiristoru ar vadības strāvas impulsu var tikai atvērt, bet tranzistoru ar bāzes strāvu – atvērt un aizvērt.

Vadības signāls tiristora atvēršanai var būt īslaicīgs, bet tranzistora slēdzim atvēršanas signāls jāpievada visu laiku. Tranzistors var strādāt arī aktīvajā režīmā, bet tiristors tikai slēdža režīmā.

1.7. Modernās spēka pusvadītāju ierīces

Lielas jaudas elektroiekārtās bieži izmanto pusvadītāju ierīces, lai, piemēram, ieslēgtu vai atslēgtu kādu ķēdes daļu, izmainītu spriegumu vai frekvenci, pārveidotu maiņstrāvu līdzstrāvā. Šādos elektriskās enerģijas pārveidotājos var lietot iepriekš aplūkotās ierīces, kuru parametri (galvenokārt – pieļaujamā strāva un pieļaujamais darba spriegums) atbilst slodzei.

Tipiskas lielām jaudām paredzētas pusvadītāju ierīces ir diodes un tiristori. Tie dod iespēju izveidot enerģijas pārveidotājus, kuru jauda mērāma simtos un

tūkstošos kilovatu. Tomēr tiristoru būtisks trūkums ir to ierobežotā ātrdarbība, kas parasti nedod iespēju izveidot lielaudas enerģijas pārveidotājus ar augstu darba frekvenci – lielāku par dažiem simtiem hercu. Bez tam bieži pārveidotāji satur samērā lielas kapacitātes kondensatorus, kas nepieciešami tiristoru komutācijas nodrošināšanai.

Tagad pieejamas arī vairākas lielaudas pusvadītāju ierīces, kurās zināmā mērā novērsti augstāk minētie trūkumi, tāpēc to pielietojuma sfēra ar katru gadu paplašinās.

Viena no tādām modernām ierīcēm ir tiristors, kas aizverams ar pretējas polaritātes vadības signālu – GTO (*gate turn-off*) tiristors. Ilgu laiku šādus tiristorus neizdevās izgatavot darba strāvām, kas lielākas par dažiem ampēriem. Tagad GTO tiristori tiek ražoti strāvām, kas var sasniegt vairākus simtus ampēru. Šādu tiristoru trūkumi – samērā liela vadības impulsu strāva (īpaši, tiristoru aizverot) un joprojām dažiem pielietojumiem nepietiekama ātrdarbība.

Ja būtiska ir ierīces ātrdarbība, var lietot lielaudas bipolāros tranzistorus, kuriem gan nepieciešama samērā liela ieejas (bāzes) strāva.

Pieejami arī lauktranzistori ar izolētu aizvaru, kas pazīstami ar apzīmējumu MOSFET tranzistori (*metal oxide semiconductor field effect transistor*). Viņu priekšrocība – ļoti mazā ieejas strāva, bet trūkums – lielāks kā bipolārajam tranzistoram spriegums atvērtā stāvoklī.

Pēdējā laikā arvien plašāku pielietojumu iegūst kombinēta ierīce, kam piemīt lauktranzistora un bipolārā tranzistora īpašības – izolētā aizvara bipolārie tranzistori jeb IGBT tranzistori (*insulated gate bipolar transistor*). Šim tranzistoram ieeja izveidota kā MOP tranzistoram (tātad ir ļoti maza ieejas strāva), bet izeja kā bipolārajam tranzistoram (piesātinātā stāvoklī mazs spriegums un tātad arī mazi enerģijas zudumi).

1.8. Fotoelektriskās pusvadītāju ierīces

Fotoelektriskās ierīces izmanto gaismas signālu pārveidošanai elektriskajos, un otrādi. No pusvadītāju fotoelektriskajām ierīcēm, kuras paredzētas elektrisko signālu iegūšanai, visvairāk lieto fotorezistorus un fotodiodes.

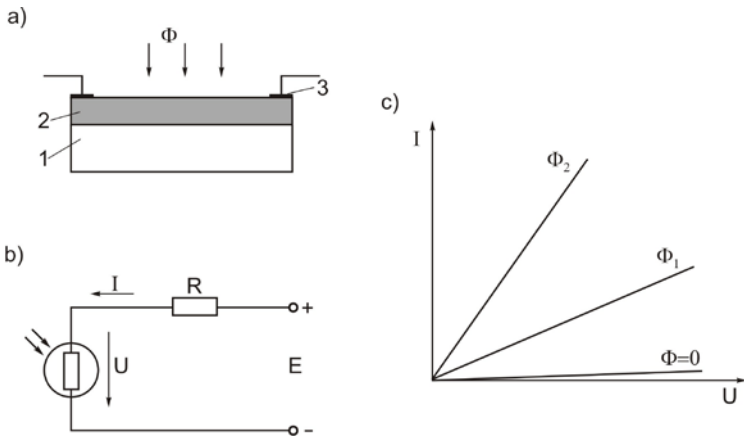
1.8.1. Fotorezistors

Fotorezistora (15. zīm. a) galvenā daļa ir uz izolācijas materiāla pamatnes 1 novietota pusvadītāja plāksnīte jeb plēve 2.

Plāksnītei pievienoti divi izvadi, un aizsardzībai pret atmosfēras ietekmi tā pārklāta ar caurspīdīgu lakas slāni.

Fotorezistora darbības pamatā ir elektronu-caurumu pāru ģenerācija gaismas starojuma ietekmē. Lādiņnesēju koncentrācija atkarīga no gaismas plūsmas. Ja fotorezistoru ieslēdz elektriskajā ķēdē, strāva ir atkarīga no gaismas plūsmas – jo lielāka ir gaismas plūsma, jo vairāk fotorezistorā rodas elektronu un caurumu un jo lielāka ir strāva (15. zīm. c). Ja fotorezistoru neapgaismo, tad strāva ir maza –

tumsas strāva. Izmantojot dažādus pusvadītāju materiālus, var iegūt fotorezistorus ar dažādu spektrālo jutību, t.i., tie reaģē uz dažādu garumu gaismas viļņiem.



15. zīm. Fotorezistors: a – uzbūve; b – ieslēgšanas shēma; c – voltampēru raksturlīknes

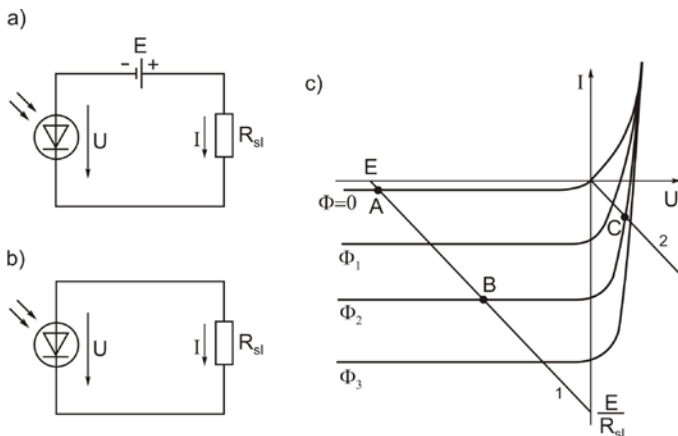
1.8.2. Fotodiode

Plaši izmanto arī fotodiodes, kurās gaismas plūsma rada elektronu-caurumu pārus p-n pārejā. Pārejas elektriskā lauka ietekmē lādiņnesēji sašķirojas – caurumi pārvietojas uz p apgabalu, bet elektroni – uz n apgabalu. Jo lielāka ir gaismas plūsma, jo lielāka radušos lādiņnesēju koncentrācija un strāva caur p-n pāreju.

Fotodiodei var ieslēgt ķēdē ar ārēju EDS avotu vai bez tā. Slēgumu shēmas un voltampēru raksturlīknes parādītas 16. zīmējumā.

Ja izmantots ārējs avots, fotodiode strādā fotopārveidotāja režīmā. Diodi šajā gadījumā slēdz sprostvirzienā, tāpēc spriegums U ir negatīvs – “+” ir pie katoda (16. zīmējumā a ar bultiņu parādīts tā nosacītais pozitīvais virziens). 16. zīmējumā c parādīta slodzes līnija, kas atbilst avota elektrodzinējspēkam E un slodzes pretestībai R_{sl} (līnija 1). Redzam, ka neapgaismotas fotodiodes gadījumā (punkts A) strāva ir neliela – aizvērtas p-n pārejas sproststrāva. Ja fotodiodei apgaismo, strāva ievērojami pieaug (punkts B).

Ja izmainās ārējā avota EDS, slodzes līnija attiecīgi pārvietojas paralēli sev (tās slīpumu nosaka slodzes pretestība). Ja $E = 0$, iegūstam līniju 2, un darba punkts pārvietojas uz C. Tātad strāva plūst arī gadījumā, kad nekādu ārēju avotu nav. Tas nozīmē, ka fotodiodei gaismas enerģija tieši pārveidojas elektriskajā enerģijā. Šādu elektriskās enerģijas iegūšanas paņēmieni izmanto saules baterijās.

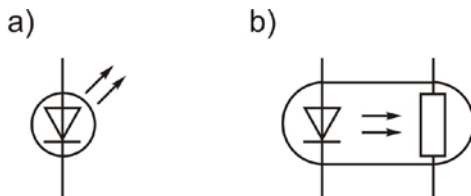


16. zīm. Fotodiode: a – ieslēgšanas shēma fotopārveidotāja režīmā; b – ieslēgšanas shēma fotoģeneratora režīmā; c – voltampēru raksturlīkne

1.8.3. Gaismas diode un optrons

Praktisku pielietojumu gūst arī elektriskās enerģijas pārveidošana gaismas enerģijā. Bez kvēlspuldzes šāds pārveidojums notiek arī gaismas diodē. Gaismas diodes elektroncaurumu pāreja slēgta caurlaides virzienā, tādēļ pārejā lādiņnesēji intensīvi pārvietojas no viena apgabala uz otru un rekombinē. Šajā rekombinācijas procesā izdalās enerģija. Parastajās diodēs šī elektrisko zudumu enerģija izdalās siltuma veidā. Gaismas izstarojumu iegūst, attiecīgi izvēloties materiālus, ko izmanto diodes izgatavošanai. Gaismas diodes visbiežāk izgatavo no gallija arsenīda un gallija fosfīda.

Gaismas diodes izmanto kā indikatorus un kā optrona sastāvdaļu (sk. turpmāk). Salīdzinājumā ar citiem indikatoriem gaismas diodei ir dažas priekšrocības – neliela patērējamā jauda, zems darba spriegums (jo izmantota atvērta p-n pāreja). Gaismas diodes nosacītais apzīmējums dots 17. zīmējumā a.



17. zīm. Gaismas diodes (a) un rezistora optrona (b) nosacītais apzīmējums

Dažādās informācijas pārveidošanas iekārtās lieto speciālas kombinētas ierīces – optronus. Optrons satur gaismas avotu, piemēram, gaismas diodi un blakus novietotu gaismas izstarojuma uztvērēju. Abas šīs optrona sastāvdaļas ievietotas kopējā korpusā. Kā gaismas uztvērēju var izmantot fotorezistoru, fotodiodi, fototiristoru. Optronā starp ieejas un izejas ķēdēm pastāv pilnīga elektriska izolācija, jo informācija starp tām tiek nodota gaismas starojuma veidā. Optrona nosacītais apzīmējums parādīts 17. zīmējumā b.

1.9. Mikroelektronika

Elektronisko iekārtu atfīstība saistās ar to sarežģītības un atsevišķo elementu skaita nepārtrauktu palielināšanos. Pie tam samazinās šo iekārtu kopējais darba drošums, jo pat viena elementa bojājums parasti iekārtu padara nederīgu. Tādēļ rodas nepieciešamība ievērojami paaugstināt atsevišķo elektronisko elementu darba drošumu un vienlaikus samazināt to gabarītus un patērējamo jaudu.

Šīs prasības izdevās apmierināt, radot kvalitatīvi jaunus elektroniskās rūpniecības izstrādājumus – integrālās mikroshēmas. Integrālā mikroshēma satur vairākus savstarpēji saistītus elementus, kas izgatavoti kopējā tehnoloģiskā procesā un veic noteiktu informācijas pārveidošanas funkciju.

Atkarībā no izpildāmajām funkcijām integrālās mikroshēmas pieņemts iedalīt analogajās un ciparu integrālajās shēmās. Analogās integrālās shēmas paredzētas tādu signālu apstrādei, kuri mainās pēc kāda nepārtraukta likuma. Kā piemēru šeit var nosaukt dažādus pastiprinātājus.

Ciparu integrālās shēmas paredzētas darbam ar diskrētiem signāliem. Parasti izmanto divus līmeņus – nosacīti zemu un augstu spriegumu. Pie ciparu integrālajām shēmām pieder, piemēram, automātiskā un skaitļošanas tehnikā izmantojamie loģiskie elementi, impulsu skaitītāji, atmiņas elementi u.c.

Atkarībā no izgatavošanas veida integrālās mikroshēmas var iedalīt divās grupās – hibridshēmās un pusvadītāju integrālajās shēmās.

Hibridshēmu izgatavošanas procesā uz dielektriķa (stikla, sitāla, keramikas) pamatnes uznes vadoša materiāla plēvi. Izmantojot šablonus, plēvi iespējams uzklāt tā, lai izveidotos rezistori, kondensatori un savienojošie vadītāji. Pie tam kondensatoram starp klājumiem jāuznes dielektriķa slānis.

Aktīvos shēmas elementus – diodes un tranzistorus – izgatavo atsevišķi, montāžas gaitā novieto uz jau izgatavotās mikroshēmas plāksnes, bet izvadus ar tievām zelta stieplītēm piemetina shēmā izveidotajiem kontaktlaukumiņiem. Visu plati pēc tam iemontē korpusā un hermetizē. Hibridshēmā iespējams saskatīt atsevišķus shēmas elementus, un daļēji to iespējams pat izjaukt (atdalīt diodes un tranzistorus).

Ievērojami pilnīgākas ir pusvadītāju mikroshēmas. Tajās visi shēmas elementi ir izveidoti silīcija kristālā un uz tā virsmas. Izgatavošanas procesam ir vairāki posmi – silīcija monokristāla sagriešana diskos, slīpēšana, pulēšana, oksidēšana, gaismas jutīgā slāņa uzklāšana, nepieciešamā zīmējuma uznešana fotogrāfiski, kodināšana, silīcija kristāla uzaudzēšana, piejaukumu difūzija u.c. Uz silīcija diska vienlaikus izgatavo simtiem integrālo shēmu. Pēc shēmu pārbaudes nederīgās marķē, disku sagriež gabaliņos un derīgās shēmas montē korpusā.

Izolāciju starp atsevišķiem pusvadītāju integrālo shēmu elementiem izveido vai nu kā oksīda slāni, vai arī izmantojot sprostvirzienā ieslēgtu p-n pāreju. Lai silīcija kristālā radītu rezistoru, vajadzīgajās vietās ievada noteiktā koncentrācijā piejaukummateriālu, tā nodrošinot nepieciešamo vadītspēju. Protams, ka rezistora apgabalam jābūt izolētam no pārējiem shēmas elementiem. Kā kondensatoru izmanto sprostvirzienā slēgtas p-n pārejas kapacitāti vai arī divus silīcija slāņus atdala ar plānu silīcija dioksīda slāni. Rezultātā atsevišķi shēmas elementi atrodas ne tikai uz kristāla virsmas, bet arī tā dziļākajos slāņos.

Pusvadītāju mikroshēmas izgatavošanas process prasa precīzi savietot atsevišķos etapos iegūstamās detaļas, jo shēmas elementu izmēri ir ļoti mazi – piemēram, kristālā ar izmēriem 1 x 1 mm var būt izveidota diezgam sarežģīta elektroniska shēma ar vairākiem desmitiem rezistoru, tranzistoru, diožu un citu detaļu. Mikroshēmu izgatavošanas tehnoloģiskajiem procesiem pilnveidojoties, ievērojami aug arī kvalitāte, mazāk shēmu jābrākē. Tas dod iespēju izgatavot aizvien sarežģītākas shēmas, kas satur tūkstošiem detaļu – t.s. lielās integrālās shēmas. Dažās atmiņas mikroshēmās un mikroprocesoros ir pat vairāk par miljonu lauktranzistoru.

2. PASTIPRINĀTĀJI

2.1. Pastiprinātāju uzdevums un galvenie raksturojumi

Pastiprinātāji paredzēti elektrisko signālu pastiprināšanai, t.i., lielākas jaudas signāla iegūšanai izejā salīdzinājumā ar ieejas signāla jaudu. Pastiprināšanas procesā izejā formējas lielas jaudas signāls, pie tam šim nolūkam tiek izmantota barošanas avota enerģija. Ieejas signāls vada pastiprinātāja darbu tā, lai izejas signāla forma (piemēram, taisnstūrveida impulsi, sinusoīda u.c.) atbilstu ieejas signāla formai.

Pastiprinātāji var pastiprināt kā strāvu, tā arī spriegumu. Visi pastiprinātāji pastiprina signāla jaudu. Svarīgākais pastiprinātāja parametrs ir pastiprinājuma koeficients, kas parāda izejas signāla attiecību pret ieejas signālu. Izšķir sprieguma, strāvas un jaudas pastiprinājuma koeficientu:

$$K_U = \frac{U_{iz}}{U_{ie}}; K_I = \frac{I_{iz}}{I_{ie}}; K_P = \frac{P_{iz}}{P_{ie}}, \quad (13)$$

pie tam $K_P = K_U \cdot K_I$.

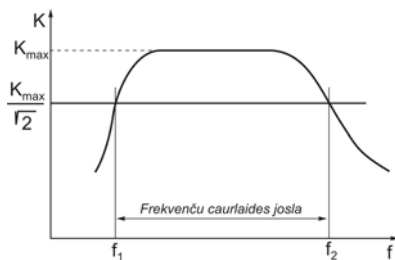
Ja viena pastiprināšanas pakāpe nedod pietiekamu pastiprinājumu, izmanto daudzpakāpju pastiprinātājus, vienas pakāpes izejai pieslēdzot nākamās pakāpes ieeju. Tad kopējo pastiprinājuma koeficientu var iegūt kā atsevišķo pastiprinātājpakāpju pastiprinājuma koeficientu reizinājumu:

$$K = K_1 \cdot K_2 \cdots K_n. \quad (14)$$

Ideālam pastiprinātājam jāpastiprina jebkuru frekvenču signāli. Reāliem pastiprinātājiem tomēr vienāds pastiprinājuma koeficients ir tikai noteiktā frekvenču diapazonā. Pie augstākām frekvencēm pastiprinājuma koeficients samazinās, jo tranzistoru ātrdarbība ir ierobežota. Pie augstām frekvencēm ievērojami palielinās kapacitīvās strāvas starp atsevišķiem pastiprinātāja elementiem. Šīs strāvas šuntē pastiprinātāja daļas, veido parazītiskas saites starp izeju un ieeju, un visa tā rezultātā ievērojami samazinās pastiprinājuma koeficients.

Pastiprinātāju shēmas bieži satur kondensatorus un transformatorus, kas vienu no otras atdala atsevišķas pastiprinātājpakāpes. Tā kā šie elementi nevar strādāt pie ļoti zemām frekvencēm, pastiprinājuma koeficients samazinās arī zemo frekvenču apgabalā.

Pastiprinājuma koeficienta atkarību no frekvences rāda amplitūdu-frekvenču raksturlīkne (18. zīm.).



18. zīm. Pastiprinātāja amplitūdu-frekvenču raksturlīkne

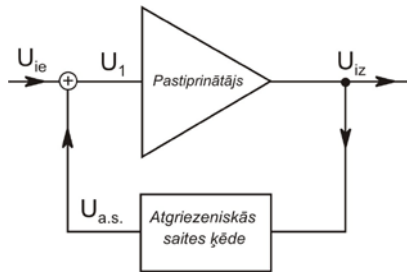
Frekvences, pie kurām pastiprinājuma koeficients samazinās $\sqrt{2}$ reizes, sauc par apakšējo un augšējo robežfrekvenci f_1 un f_2 , bet frekvenču joslu starp tām – par pastiprinātāja frekvenču caurlaides joslu. Tas, protams, nenozīmē, ka pastiprinātāji nevar strādāt arī ārpus caurlaides joslas, bet, kā tas redzams 18. zīmējumā, šajā gadījumā pastiprinājums būs ievērojami mazāks.

Pastiprinātāja izejas signāla formai ir jābūt līdzīgai ieejas signāla formai. Tomēr parasti šo divu signālu formas vairāk vai mazāk atšķiras – novērojami signāla kropļojumi. Viens no šādu kropļojumu cēloņiem – pastiprinātāja amplitūdu-frekvenču raksturlīkne nav ideāla. Visbiežāk jāpastiprina nesinusoidāli signāli, kas satur dažādas harmoniskās komponentes. Atsevišķo harmonisko komponentu frekvences var izrādīties ārpus frekvenču caurlaides joslas, tādēļ šādas harmoniskās komponentes tiks pastiprinātas vāji vai pat vispār nebūs izejas signālā. Šādu kropļojumu veidu sauc par frekvenču kropļojumiem. Lai tos samazinātu, jālieto pastiprinātājs ar pietiekami platu frekvenču caurlaides joslu.

Frekvenču kropļojumi iespējami tikai, pastiprinot nesinusoidālu signālu. Visu veidu signāli (tajā skaitā arī sinusoidāli) izkropļojas tādēļ, ka pastiprinātājs satur nelineārus elementus, piemēram, tranzistorus. Ir zināms, ka, pievadot nelineāram elementam sinusoidālu spriegumu, strāva tajā būs nesinusoidāla. Lai samazinātu nelineāros kropļojumus, jāizmanto raksturlīkņu lineārie posmi. Tādēļ sevišķu nozīmi iegūst tranzistora darba režīma pareiza izvēle un stabilizācija.

2.2. Atgriezeniskā saite pastiprinātājos

Pastiprinātājos bieži lieto atgriezenisko saiti, t.i., daļu no izejas sprieguma pievada atpakaļ pastiprinātāja ieejai. 19. zīmējumā parādīta pastiprinātāja ar atgriezenisko saiti struktūrshēma. Izejas signālu U_{iz} pievada atgriezeniskās saites ķēdei, piemēram, no diviem rezistoriem sastāvošam sprieguma dalītājam. No atgriezeniskās saites ķēdes noņemto atgriezeniskās saites spriegumu $U_{a.s.}$ pievada pastiprinātāja ieejai. Tādēļ pastiprinātāja ieejā atkarībā no atgriezeniskās saites signāla fāzes darbojas divu signālu summa ($U_{ie} + U_{a.s.}$) vai starpība ($U_{ie} - U_{a.s.}$).



19. zīm. Pastiprinātāja ar atgriezenisko saiti struktūrshēma

Ja atgriezeniskās saites signāla fāze sakrīt ar ieejas signāla fāzi, tad tādu saiti sauc par pozitīvu atgriezenisko saiti jeb līdzsaiti. Ja šīs fāzes ir pretējas, tad atgriezeniskā saite ir negatīva (pretsaite).

Atgriezeniskās saites ķēdi var raksturot ar tās pārvades koeficientu γ , ko sauc arī par atgriezeniskās saites koeficientu. Šis koeficients parāda, kāda izejas signāla daļa caur atgriezeniskās saites ķēdi nonāk pastiprinātāja ieejā:

$$\gamma = \frac{U_{a.s.}}{U_{iz}}. \quad (15)$$

Aplūkosim gadījumu, kad darbojas pozitīva atgriezeniskā saite. Ievērojot sakarības $U_{a.s.} = \gamma U_{iz}$ un $U_1 = U_{ie} + U_{a.s.}$ iegūstam

$$U_{iz} = KU_1 = KU_{ie} + KU_{a.s.} = KU_{ie} + \gamma KU_{iz}$$

vai

$$U_{iz} = \frac{KU_{ie}}{1 - \gamma K}.$$

No šejienes iegūstam jauno pastiprinājuma koeficientu (ievērojot atgriezeniskās saites ietekmi):

$$K_{kop} = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = \frac{K}{1 - \gamma K}. \quad (16)$$

Šīs formulas analīze parāda, ka pozitīva atgriezeniskā saite palielina pastiprinājuma koeficientu. Robežgadījumā, ja $\gamma K=1$, pastiprinājuma koeficients tiecas uz bezgalību. Tas nozīmē, ka jebkurš, pat visnecīgākais ieejas signāls izsauks lielu izejas signālu, kurš gan, protams, līdz bezgalībai nepieaugs, jo to ierobežos galīgais barošanas spriegums un shēmas elementu voltampēru raksturlīkņu nelinearitātes. Pie tam tiks ģenerētas nerimstošas svārstības ar frekvencēm, pie kurām veidojas pozitīva atgriezeniskā saite ar nosacījumu $\gamma K=1$. Visi sinusoidālu un nesinusoidālu svārstību elektroniskie ģeneratori ir izveidoti kā pastiprinātāji ar pozitīvu atgriezenisku saiti. Tātad šāda atgriezeniskā saite ir nepieciešama ģeneratoros.

Pastiprinātājos pozitīvā atgriezeniskā saite parasti ir nevēlama. Kaut gan tā palielina pastiprinājuma koeficientu, pārējie pastiprinātāja parametri pasliktinās – sašaurinās frekvenču caurlaides josla, palielinās visu veidu kropļojumi, pastiprinātāja darba stabilitāte pasliktinās, bet dažos gadījumos pastiprinātājs vispār nevar strādāt sakarā ar to, ka iestājusies nerimstošu svārstību ģenerācija. Tādēļ pozitīvo atgriezenisko saiti pastiprinātājos parasti nelieto.

Ja pastiprinātājā izmantota negatīva atgriezeniskā saite, pastiprinājuma koeficientu var iegūt līdzīgi, kā tas tika darīts pozitīvas saites gadījumā, vai arī formulā (16) apmainot zīmi pirms atgriezeniskās saites koeficienta. Tad iegūstam

$$K_{\text{kop}} = \frac{U_{\text{iz}}}{U_{\text{ie}}} = \frac{K}{1 + \gamma K}. \quad (17)$$

Aplūkosim praktiski svarīgu speciālu gadījumu, – kad atgriezeniskajai saitei ir spēcīga ietekme uz pastiprinātāja darbu. Ja $\gamma K \gg 1$, piemēram, $K = 10000$, $\gamma = 0,02$, $\gamma K = 0,02 \cdot 10000 = 200$, tad formulas (17) saucējā varam neievērot vieninieku, iegūstot vienkāršāku sakarību:

$$K_{\text{kop}} = \frac{1}{\gamma}. \quad (18)$$

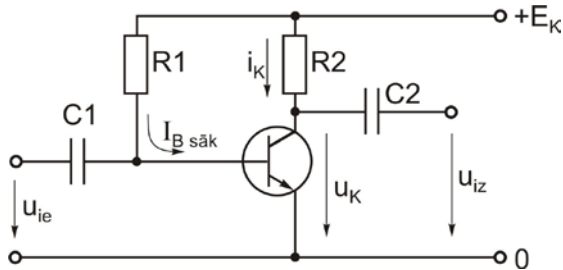
Kā redzams, aplūkojamajā gadījumā visas sistēmas pastiprinājuma koeficients vairs nav atkarīgs no K – to nosaka tikai atgriezeniskās saites ķēdes pārvades koeficients. Tas dod iespēju izveidot pastiprinātājus ar precīzi uzdotu pastiprinājuma koeficientu (kurš atkarīgs, piemēram, no divu rezistoru pretstību attiecības atgriezeniskās saites ķēdē). Pie tam tranzistoru strāvas pārvades koeficienti, temperatūra, barošanas avota sprieguma nestabilitāte neatstāj nekādu jūtamu ietekmi uz pastiprinājuma koeficientu.

Kaut gan negatīvā atgriezeniskā saite pastiprinājuma koeficientu samazina, pastiprinātāja kvalitāte uzlabojas. Pastiprinātāja darbs kļūst stabilāks, režīms mazāk mainās, izmainoties barošanas avota spriegumam, temperatūrai, kā arī shēmas parametriem sakarā ar detaļu novecošanos. Negatīvā atgriezeniskā saite paplašina frekvenču caurlaides joslu, samazina signāla kropļojumus. Visu to ievērojot, kvalitatīvos pastiprinātājos vienmēr izmanto negatīvu atgriezenisko saiti, bet tās izsaukto pastiprinājuma koeficienta samazināšanos kompensē, palielinot pastiprinātājpakāpju skaitu.

2.3. Tranzistora kopemitera pastiprinātājpakāpe

2.3.1. Pastiprinātājpakāpes darbības princips

Elektrisko signālu pastiprināšanai visbiežāk lieto kopemitera shēmu, jo tā dod vislielāko jaudas pastiprinājumu. 20. zīmējumā attēlota vienkāršas maiņsprieguma pastiprināšanai paredzētas pastiprinātājpakāpes shēma.



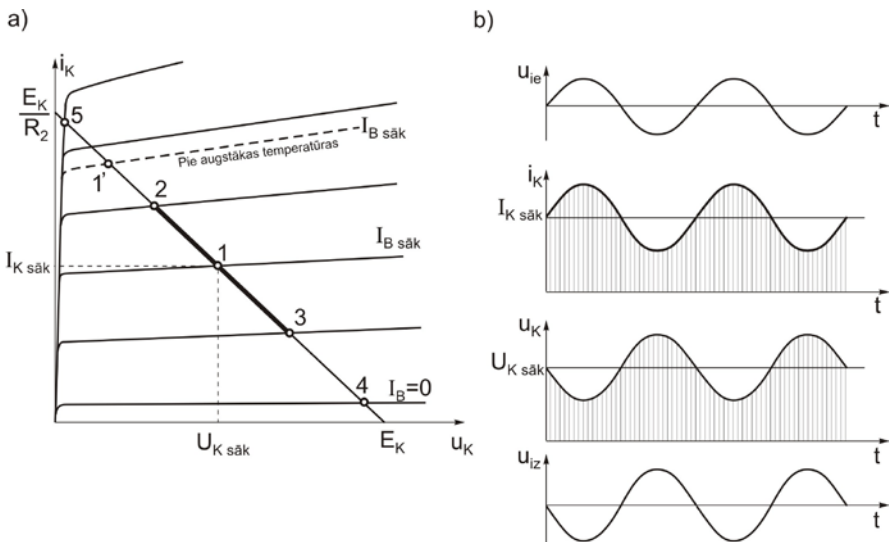
20. zīm. Kopemitera pastiprinātājpakāpes shēma

Ieejas signālu tranzistora bāzei pievada caur kondensatoru C1. Kondensators atdala pastiprinātājpakāpes ieeju no līdzsprieguma, kas darbojas bāzes ķēdē. Ja šo kondensatoru no shēmas izslēgtu, tad līdzspriegums no barošanas avota caur rezistoru R1 nokļūtu pastiprinātāja ieejā un varētu traucēt pastiprināmā signāla avota normālu darbu. Lai kondensators C1 neradītu jūtamu pretestību ieejas signālam, jāizvēlas pietiekami liela kapacitāte. Neskatoties uz to, pie zemām frekvencēm, kad kapacitīvā pretestība $X_C=1/(2\pi fC_1)$ kļūst liela, ieejas strāva caur atdalošo kondensatoru samazinās, un tādēļ samazinās arī pastiprinājuma koeficients (sk. 18. zīm.).

Arī izejas signālu slodzei pievada caur atdalošo kondensatoru C2. Ja slodze ir nākamās pastiprinātājpakāpes ieejas ķēdē, tad pirmās pakāpes izejas kondensators vienlaikus ir arī otrās pakāpes ieejas kondensators. Dažreiz līdzstrāvas un maiņstrāvas atdalīšanai kondensatoru vietā izmanto transformatorus.

Rezistors R1 paredzēts tranzistora darba režīma ieregulēšanai. Ja ieejas spriegums u_{ie} nav pievadīts, bāzes ķēdē plūstošo sākuma strāvu var noteikt pēc Oma likuma, neievērojot nelielo spriegumu starp atvērta tranzistora bāzi un emiteru (dažas volta desmitdaļas): $I_{B\ sāk}=E/R_1$. Režīmu kolektora ķēdē var noteikt, izmantojot tranzistora izejas raksturīknes (21. zīm. a – punkts 1).

Tranzistora bāzei pievadītais signāls liek mainīties arī kolektora strāvai, tāpēc darba režīmu raksturojošais punkts periodiski pārvietojas pa slodzes līniju starp punktiem 2 un 3. Kolektora strāva i_K , plūstot caur rezistoru R3, rada uz tā sprieguma kritumu. Tā kā kolektora strāva satur divas komponentes – nemainīgo un mainīgo, arī spriegums uz rezistora R3 satur šīs komponentes, no kurām mainīgā caur atdalošo kondensatoru C2 nonāk pastiprinātāja izejā (21. zīm. b).



21. zīm. Pastiprinātāja darbība: a – tranzistora darba režīma izmaiņas; b – spriegumu un kolektora strāvas laika diagrammas

Ieejas signāla pozitīvā pusperioda laikā kolektora strāva palielinās, tādēļ palielinās arī sprieguma kritums uz rezistora R3. Tā kā šajā gadījumā kolektora potenciāls samazinās, var izdarīt secinājumu, ka kopemitera pastiprinātājpakāpē ieejas un izejas signālu fāzes ir pretējas (nobīdītas par 180°).

2.3.2. Pastiprinātājpakāpes darba režīma izvēle un stabilizācija

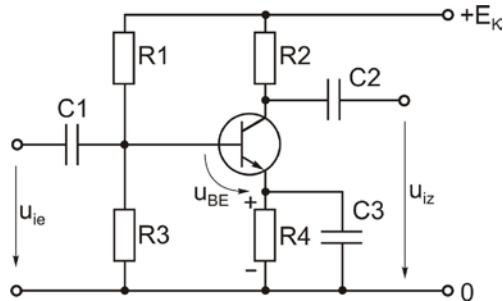
Kā jau bija minēts (sk. 2.1. p.), nelineāro kropļojumu samazināšanai nepieciešams pareizi izvēlēties tranzistora darba režīmu, izmantojot raksturlielņu $I_K=f(I_B)$ lineārās daļas. Aplūkosim šo jautājumu sīkāk. Lai pastiprinātājs varētu darboties, nepieciešams tranzistoru vadīt ar tā bāzes strāvu. Tādēļ tranzistoram noteikti jābūt aktīvajā režīmā, kad kolektora strāva atkarīga no bāzes strāvas:

$$i_K = \beta i_B + (\beta + 1) I_{K0} \quad (19)$$

Parasti darba režīmu izvēlas apmēram slodzes līnijas vidū (punkts 1 21. zīmējumā a). Tad, mainoties ieejas signālam, tranzistora režīms var mainīties no punkta 4 pie $I_B=0$ līdz punktam 5 (tomēr vēl neieejot piesātinājuma režīmā). Ja ieejas signāla amplitūda nepārsniedz šīs pieļaujamās vērtības, tranzistora darba režīms vienmēr paliks aktīvs.

Režīmu izvēloties, tomēr jāievēro, ka uz tranzistora darbu būtisku ietekmi atstāj temperatūra. Temperatūrai paaugstinoties, palielinās strāvas pārvades koeficients β un kolektora sproststrāva I_{K0} . Tāpēc palielinās arī kolektora strāva (19). Atbilstošā sākuma režīma voltampēru raksturlielne 21. zīmējumā parādīta ar

raustītu līniju. Šādā gadījumā ievērojami samazinās pieļaujamā ieejas signāla amplitūda – jau nedaudz palielinoties bāzes strāvai, tranzistors var nonākt piesātinājuma režīmā (punkts 5). Lai izvairītos no lieliem nelineāriem kropļojumiem, kas tad rodas, pastiprinātāpakāpes darba režīmu nepieciešams stabilizēt, ievēdot shēmā negatīvu atgriezenisko saiti. Attiecīgā slēguma shēma dota 22. zīmējumā.



22. zīm. Kopemitera pastiprinātāpakāpe ar temperatūras stabilizāciju

Stabilizējošais negatīvās atgriezeniskās saites signāls rodas, emitera strāvas nemainīgajai komponentei plūstot caur rezistoru R4. Emitera potenciāls u_E tad ir pozitīvs – vienāds ar sprieguma kritumu uz rezistora R4 ($u_E = i_E \cdot R_4$). No sprieguma dalītāja R1, R3 tranzistora bāze saņem tādu spriegumu u_B , lai starpība $u_{BE} = u_B - u_E$ (dažas volta desmitdaļas) izsauktu bāzes strāvu I_B sāk.

Paaugstinoties temperatūrai, palielinās emitera strāva, tāpēc paaugstinās emitera potenciāls u_E , bet tad spriegums u_{BE} kļūst mazāks un attiecīgi samazinās bāzes strāva. Mazāka bāzes strāva izsauc arī kolektora un emitera strāvu samazināšanos, tādā veidā daļēji kompensējot temperatūras ietekmi. Tāpēc tranzistora režīms gandrīz nemainīgi paliek punktā 1.

Lai negatīvā atgriezeniskā saite darbotos tikai uz strāvas nemainīgo komponenti, rezistoram R4 paralēli slēdz kondensatoru C3. Ja šī kondensatora kapacitīvā pretestība izvēlēta ievērojami mazāka par pretestību R4, emitera strāvas mainīgā komponente plūdis galvenokārt caur kondensatoru C3, neradot uz tā jūtamā atgriezeniskās saites spriegumu (kapacitīvā pretestība ir maza). Tomēr, ievērojot negatīvās atgriezeniskās saites labvēlīgo ietekmi uz pastiprinātāja kvalitāti, dažreiz šo kondensatoru nepieslēdz. Tad pastiprinājuma koeficients būs mazāks, bet frekvenču caurlaides josla platāka un signāla kropļojumi mazāki.

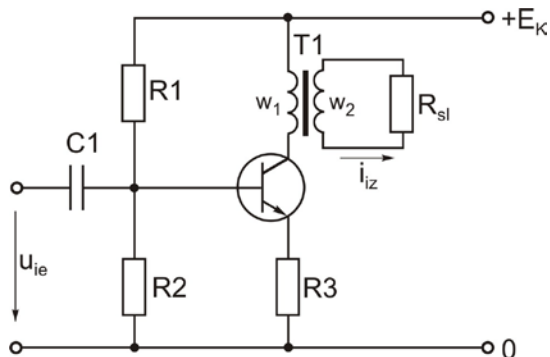
2.4. Jaudas pastiprinātāji

Par jaudas pastiprinātāju pieņemts saukt pastiprinātāja pēdējo (izejas) pakāpi, pie kuras jau tieši pieslēdz slodzi. Šīs pakāpes galvenais uzdevums ir nodrošināt slodzē nepieciešamo jaudu (t.i. spriegumu un strāvu). Parasti vajadzīgo signāla

spriegumu dod jau iepriekšējās pastiprinātājpakāpes, kurās izmanto kopemitera slēgumu (piemēram 22. zīm.). Tādēļ izejas pakāpei galvenokārt jāpastiprina strāva.

Izejas pakāpei jābūt saskaņotai ar slodzi, kurai bieži ir maza pretestība. Tas nozīmē, ka slodzes strāvai jābūt lielai. Lai saskaņotu pastiprinātāja izejas pretestību ar slodzes pretestību, izmanto pazeminošo transformatoru, kura sekundārā strāva ir lielāka par primāro.

Viena no jaudas pastiprinātājpakāpju shēmām dota 23. zīmējumā. Tā ir vientakta pastiprinātājpakāpe. Tranzistoram ir kopemitera slēgums (tāpat kā agrāk aplūkotajā sprieguma pastiprinātājā), bet slodze ieslēgta caur transformatoru. Rezistors R3 emitera ķēdē stabilizē tranzistora darba režīmu. Lai novērstu negatīvo atgriezenisko saiti strāvas mainīgajai komponentei, šo rezistoru var šuntēt ar lielas kapacitātes kondensatoru. Pastiprinātājpakāpes darba režīmu izvēlas tā, lai pie jebkurām ieejas strāvas izmaiņām tranzistors paliktu aktīvajā režīmā (sk. 21. zīmējumu – darba punkts 1). Tādu darba režīmu sauc par A klases režīmu, un tas nodrošina vismazākos nelineāros kropļojumus.



23. zīm. Vientakta jaudas pastiprinātājpakāpes shēma

Ievērojot jaudas pastiprinātāja samērā lielo izejas jaudu, būtisku nozīmi iegūst pakāpes lietderības koeficients. Pastiprinātāja lietderības koeficientu var noteikt kā lietderīgās izejas jaudas attiecību pret jaudu, ko pastiprinātājs saņem no barošanas avota:

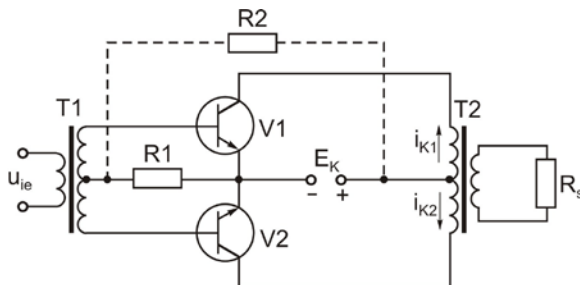
$$\eta = \frac{P_{iz}}{P_{bar}} = \frac{R_{sl} I_{iz}^2}{E_K I_K sak}, \quad (20)$$

kur I_{iz} – izejas strāva (slodzes strāva);

$I_K sak$ – kolektora strāva, ja nav pievadīts ieejas signāls.

Formulā (20) ņemts vērā, ka kolektora strāvas vidējā vērtība (t.i., nemainīgā komponente) nav atkarīga no ieejas signāla amplitūdas, tāpēc patērētās jaudas noteikšanai ņemta kolektora strāvas vērtība, kad ieejai signāls nav pievadīts. Vientakta jaudas pastiprinātājpakāpes lietderības koeficients nepārsniedz 0,3 - 0,4, kas uzskatāms par šāda pastiprinātāja būtisku trūkumu.

Palielināt lietderības koeficientu var, izmantojot citu pastiprināšanas režīmu (B klases režīmu). Šajā režīmā, ja nav ieejas signāla, tranzistora strāva ir vienāda ar nulli (tranzistors atrodas nogriešanas režīmā). Tādā gadījumā tranzistors var pastiprināt tikai vienu signāla pusperiodu (ja signāla polaritāte ir pretēja, tranzistors paliek nogriešanas režīmā). Lai varētu pastiprināt abus pusperiodus, izmanto prettakta shēmu (24. zīm.). Šī shēma satur divus tranzistorus, pie tam katrs pastiprina savu pusperiodu.



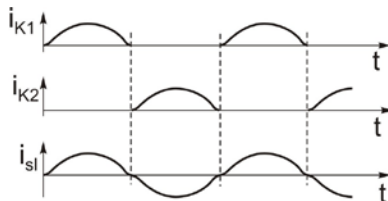
24. zīm. Prettakta jaudas pastiprinātājpakāpes shēma

Ieejas transformatora T1 sekundārajā pusē izveidojas divi signāli, kuri fāzē nobīdīti par 180° . Šos signālus pievada tranzistoru V1 un V2 bāzēm. Tas tranzistors, kura bāzei pievadīts pozitīvs signāls, atveras, un caur izejas transformatoru T2 rada strāvu slodzē. Otrs tranzistors šajā pusperiodā atrodas nogriešanas režīmā (tā bāzei pielikts negatīvs spriegums). Izejas transformatora sekundārajā tinumā slodzes strāva veidojas kā divu strāvu i_{k1} un i_{k2} starpība:

$$i_{sl} = (i_{k1} - i_{k2}) \cdot \frac{w_1}{w_2},$$

kur w_1 un w_2 – primārā tinuma vienas puses un sekundārā tinuma vijumu skaits.

Tā kā nogriešanas režīma tuvumā tranzistora raksturīgnes ir nelineāras, pastiprinātājpakāpes darba laikā rodas nelineārie kropļojumi (25. zīm.). Lai tos samazinātu, bieži izmanto AB klases režīmu, kad sākuma stāvoklī tranzistori nav nogriešanas režīmā, bet cauri tiem plūst nelielas strāvas. Šādu režīmu iegūst, caur rezistoru R2 pievadot bāzes strāvu (sk. 24. zīm.).



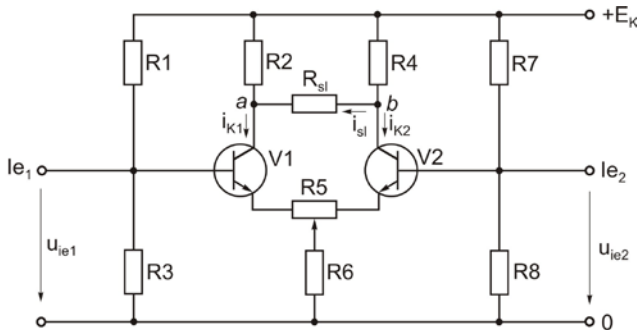
25. zīm. Izejas signāla veidošanās prettakta pastiprinātājpakāpē

Abām aplūkotajām shēmām ir kopējs trūkums - nepieciešams transformators, kas palielina pastiprinātāja gabarītus, masu un izmaksu. Palielinās arī frekvenču kropļojumi. Tādēļ bieži lieto shēmas bez transformatora. Tādā gadījumā tranzistoriem parasti izmanto kopkolektora slēgumu, kurš raksturojas ar mazu ieejas pretestību.

2.5. Līdzstrāvas pastiprinātāji

Bieži (sevišķi automātikas iekārtu un mērīšanas shēmās) nepieciešams pastiprināt ļoti lēni mainīgus signālus. Protams, ka šādā gadījumā nav izmantojama 2.3. punktā apskatītā pastiprinātājpakāpe, jo līdzstrāva nevar tikt cauri atdalošajiem kondensatoriem. Pirmajā brīdī liekas, ka no shēmas var vienkārši izslēgt kondensatorus. Tomēr tad pastiprinātājs gan varēs strādāt, bet tā kvalitāte nebūs apmierinoša.

Šādas pastiprinātājpakāpes izejā noteikti parādīsies kaut kāds spriegums pat tad, ja ieejas sprieguma nebūs. Šo spriegumu sauc par dreifa spriegumu, un tā rašanās izskaidrojama ar to, ka pastiprinātāja shēmā ieslēgts līdzstrāvas barošanas avots. Dreifa spriegums ir daļa no barošanas sprieguma. Ne ar kādiem regulēšanas paņēmieniem no dreifa atbrīvoties nevar, jo sakarā ar barošanas sprieguma, temperatūras un citu faktoru izmaiņu noregulētā pastiprinātājā pēc kāda laika dreifa spriegums parādīsies atkal no jauna. Visnepatīkamāk, ka nav nekādu iespēju noteikt, kādēļ pastiprinātāja izejā ir spriegums, – sakarā ar dreifu vai tādēļ, ka parādījies ieejas signāls. Tātad, dreifa spriegumu nekā nevar atdalīt no lietderīgā signāla.



26. zīm. Līdzstrāvas pastiprinātāja diferenciālā shēma

Dreifs ir raksturīgs tikai līdzstrāvas pastiprinātājiem. Pat visvienkāršākajā maiņstrāvas pastiprinātājā dreifs nav iespējams, jo atdalošais kondensators neļauj cauri nekādu līdzspriegumu no barošanas avota, bet maiņspriegums shēmā var parādīties tikai tad, ja ir ieejas signāls. Dreifa samazināšanai visbiežāk lieto diferenciālo (balansa) shēmu (26. zīm.). Tranzistori V1, V2 un rezistori R2, R4

veido līdzsvarotu tilta shēmu, tāpēc sākuma stāvoklī slodzē R_{sl} strāva nepļūst. Tilts paliek līdzsvarots arī, izmainoties temperatūrai vai barošanas spriegumam. Tieši šī shēmas īpašība nodrošina samērā nelielu dreifū.

Diferenciālajam pastiprinātājam ir divas ieejas, kuras pievienotas abu tranzistoru bāzēm. Ja, piemēram, tranzistora V1 bāzei pievada pozitīvu spriegumu U_{ie1} , tad šā tranzistora kolektora strāva palielinās, tādēļ pazeminās kolektora potenciāls φ_a . Tā kā rezistors R6, kas rada negatīvo atgriezenisko saiti, ieslēgts abu emiteru kopējā ķēdē, stabilizējas abu tranzistoru kopējā strāva. Tādēļ reizē ar strāvas i_{K1} palielināšanos samazinās strāva i_{K2} un paaugstinās tranzistora V2 kolektora potenciāls φ_b . Tas nozīmē, ka tilta līdzsvars izzūd un slodzē parādās strāva i_{sl} . Tieši tādu pašu efektu dod arī negatīvs spriegums u_{ie2} otrā ieejā.

Ja vienu no iespējamām slodzes strāvas virzieniem nosacīti uzskatām par pozitīvu (piemēram, to, kas shēmā parādīts ar bultiņu), tad redzam abu ieeju pretēju darbību. Pozitīvs spriegums ieejā ie_1 izsauc pozitīvu slodzes spriegumu, tādēļ šo ieeju sauc par tiešo jeb neinvertējošo.

Otrai ieejai – inversajai (invertējošajai) pievadītais pozitīvais spriegums izsauc negatīvu izejas spriegumu. Viegli pārliecināties, ka spriegums izejā vienāds ar nulli, ja jebkuras polaritātes spriegumu vienlaikus pievada tiešajai un inversajai ieejai. Šajā gadījumā tilts paliek līdzsvara stāvoklī. Rezumējot visu teikto, par diferenciālā pastiprinātāja ieejas spriegumu var uzskatīt tiešās un inversās ieejas spriegumu starpību $u_{ie} = u_{ie1} - u_{ie2}$.

2.6. Operacionālie pastiprinātāji

2.6.1. Operacionālo pastiprinātāju uzbūve un īpašības

Operacionālos pastiprinātājus sākumā izmantoja dažādu matemātisku operāciju veikšanai (piemēram, vairāku spriegumu saskaitīšanai, integrēšanai u.c.). Kad attīstījās integrālā mikroelektronika un parādījās operacionālie pastiprinātāji integrālā izpildījumā, tie kļuva par universāliem pastiprināšanas elementiem, kurus izmanto, lai izveidotu visdažādākos pastiprinātājus, impulsu iekārtu elementus, dažādas formas svārstību generatorus utt.

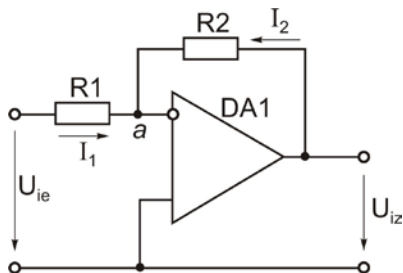
Operacionālais pastiprinātājs ir līdzstrāvas pastiprinātājs ar ļoti lielu pastiprinājuma koeficientu, kas sasniedz pat miljonu. Pastiprinātāja pirmo pakāpi veido pēc diferenciālās shēmas, tāpēc operacionālajiem pastiprinātājiem ir divas ieejas – tiešā un inversā. Inverso ieeju shēmā apzīmē ar aplīti. Lai varētu iegūt kā pozitīvu, tā arī negatīvu izejas spriegumu, operacionālo pastiprinātāju parasti baro no diviem pretējas polaritātes avotiem.

Tikai speciālos gadījumos (impulsu tehnikas iekārtās) operacionālos pastiprinātājus var izmantot bez stipras negatīvās atgriezeniskās saites. Parasti negatīvā atgriezeniskā saite ir nepieciešama gan ļoti lielā pastiprinājuma koeficienta samazināšanai, gan arī, lai palielinātu parametru stabilitāti un precizitāti. Negatīvo atgriezenisko saiti izveido, pastiprinātāja izejai pieslēdzot sprieguma dalītāju un no tā atgriezeniskās saites signālu pievadot inversajai ieejai.

Turpmāk aplūkosim vairākas shēmas ar operacionālajiem pastiprinātājiem. Šo shēmu pastiprinājuma koeficienta noteikšanai pieņemsim, ka paša operacionālā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients ir bezgalīgs. Tas nozīmē, ka pie galīga izejas sprieguma ieejas spriegums (tātad, tiešajai un inversajai ieejai pievadīto spriegumu starpība) ir vienāds ar nulli. Bez tam uzskatīsim par bezgalīgu arī pastiprinātāja ieejas pretestību un saskaņā ar šo pieņēmumu neievērosim ieejas strāvu.

2.6.2. Invertējošais un neinvertējošais pastiprinātājs

Invertējošā pastiprinātāja slēguma shēma attēlota 27. zīmējumā. Operacionālā pastiprinātāja tiešā ieeja savienota ar shēmas kopējo punktu, bet ieejas spriegums pievadīts inversajai ieejai. Shēmā nav parādīti barošanas avoti un korekcijas elementi (kondensatori un rezistori), ko dažreiz pieslēdz speciāliem operacionālā pastiprinātāja izvadiem, lai uzlabotu pastiprinātāja frekvenču raksturlīknes.



27. zīm. Invertējošā pastiprinātāja shēma

Tā kā tiešās ieejas spriegums vienāds ar nulli (šī ieeja savienota ar shēmas kopējo punktu), bet operacionālā pastiprinātāja pilno ieejas spriegumu, kā tas bija parādīts iepriekš, arī var pieņemt vienādu ar nulli, secinām, ka nullei līdzinās arī punkta a potenciāls (inversās ieejas spriegums). Tāpēc saskaņā ar Oma likumu

$$I_1 = \frac{U_{ie}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{iz}}{R_2}.$$

Tā kā operacionālā pastiprinātāja ieejas strāvu var neievērot, iegūstam

$$I_2 = -I_1$$

vai

$$K_1 = \frac{U_{iz}}{U_{ie}} = -\frac{R_2}{R_1}. \quad (21)$$

Redzam, ka shēmas pastiprinājuma koeficients atkarīgs tikai no pretestībām R1 un R2, bet ne no paša operacionālā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficienta. Šāds secinājums pilnīgi atbilst agrāk aplūkotajām negatīvās atgriezeniskās saites īpašībām (sk. 2.2. p.).

Mīnusa zīme formulā (21) norāda, ka pastiprinātājs ir invertējošs – ja ieejai pievada pozitīvu spriegumu, izejā parādās negatīvs. Ja tādu pastiprinātāju izmanto maiņsprieguma pastiprināšanai, tad izejas signāls izrādās nobīdīts fāzē par 180° attiecībā pret ieejas signālu.

Ieejas spriegumu var pievadīt arī tiešajai ieejai (28. zīm.). Tā kā spriegumam starp operacionālā pastiprinātāja ieejām jābūt vienādam ar nulli, ieejas spriegums U_{ie} iznāk vienāds ar atgriezeniskās saites spriegumu $U_{a.s.}$, bet pēdējo var atrast kā spriegumu, kas rodas uz rezistora R_1 , ja pa to plūst strāva I :

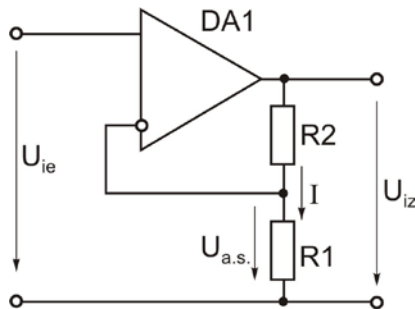
$$U_{a.s.} = I \cdot R_1 = \frac{U_{iz}}{R_1 + R_2} \cdot R_1.$$

Tātad

$$U_{ie} = \frac{R_1}{R_1 + R_2} \cdot U_{iz}$$

vai

$$K_n = \frac{R_1 + R_2}{R_1} = 1 + \frac{R_2}{R_1}. \quad (22)$$



28. zīm. Neinvertējošā pastiprinātāja shēma

Tāds pastiprinātājs neapvērš izejas signāla fāzi. Viena no neinvertējošā pastiprinātāja īpatnībām ir ļoti lielā ieejas pretestība (mēs pat pieņemām, ka ieejas strāvas nav, t.i., ieejas pretestība ir bezgalīga).

Salīdzinot invertējošā un neinvertējošā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientus, iegūstam sakarību

$$K_n = |K_i| + 1. \quad (23)$$

No formulas (22) izriet, ka neinvertējošā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients nevar būt mazāks par vienu.

2.6.3. Summējošais pastiprinātājs

Operacionālo pastiprinātāju var izmantot arī vairāku ieejas spriegumu summēšanai. Aplūkosim shēmu, kas iegūta no invertējošā pastiprinātāja shēmas, pievienojot tai papildu ieejas (29. zīm.). Šajā gadījumā iegūstam:

$$I_1 = \frac{U_{ie1}}{R_1}; \quad I_2 = \frac{U_{ie2}}{R_2}; \quad I_3 = \frac{U_{ie3}}{R_3};$$

Strāva atgriezeniskās saites rezistorā

$$I_4 = \frac{U_{iz}}{R_4}.$$

Tā kā operacionālā pastiprinātāja ieejas strāva vienāda ar nulli,

$$I_1 + I_2 + I_3 = -I_4,$$

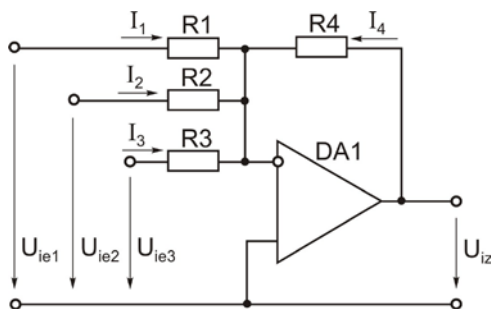
no kurienes iegūstam spriegumu summēšanas izteiksmi:

$$U_{iz} = -U_{ie1} \frac{R_4}{R_1} - U_{ie2} \frac{R_4}{R_2} - U_{ie3} \frac{R_4}{R_3}. \quad (24)$$

Ja izvēlēsimies $R_1 = R_2 = R_3$, formula vienkāršojas:

$$U_{ie} = -\frac{R_4}{R_1} (U_{ie1} + U_{ie2} + U_{ie3}), \quad (25)$$

t.i., izejas spriegums izrādās proporcionāls ieejas spriegumu summai.



29. zīm. Summējošā pastiprinātāja shēma

Neskatoties uz vienkāršojumiem, kas bija pieņemti, izvedot iepriekš iegūtās formulas (bezgalīgs pastiprinājuma koeficients, bezgalīga ieejas pretestība), šīs formulas ir pietiekami precīzas, un tās var izmantot uz operacionālo pastiprinātāju bāzes veidoto shēmu aprēķiniem.

Visas aplūkotās shēmas derīgas kā līdzsprieguma, tā arī maiņsprieguma pastiprināšanai, pie tam vairumā gadījumu dreifs ir neliels (sakarā ar negatīvās atgriezeniskās saites efektu), tādēļ šādus pastiprinātājus var izmantot arī mērīšanas iekārtās. Ja nepieciešams pastiprināt tikai maiņspriegumu, shēmas var papildināt ar atdalošajiem kondensatoriem.

2.6.4. Integrējošais pastiprinātājs

Automātiskās regulēšanas iekārtās un dažādu procesu elektriskajai modelēšanai plaši izmanto integrējošos pastiprinātājus (30. zīm.). Tāda pastiprinātāja shēma atšķiras no agrāk aplūkotā invertējošā pastiprinātāja shēmas ar kondensatoru atgriezeniskās saites ķēdē. Tāpat kā iepriekš, iegūstam

$$i_1 = \frac{u_{ie}}{R}; \quad i_2 = C \frac{du_{iz}}{dt}; \quad i_2 = -i_1,$$

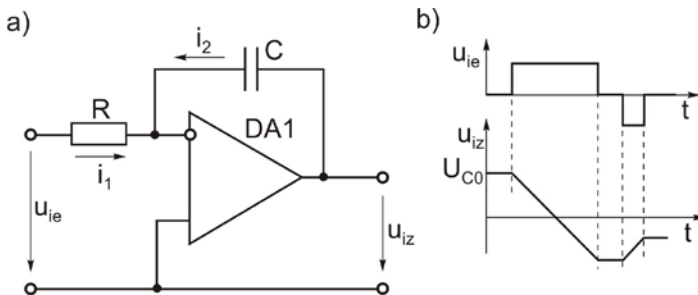
no kurienes seko

$$\frac{du_{iz}}{dt} = -\frac{u_{ie}}{RC}$$

vai

$$u_{iz} = -\frac{1}{RC} \int_{t_1}^{t_2} u_{ie} dt + U_{C0}, \quad (26)$$

kur U_{C0} – spriegums uz kondensatora integrēšanas procesa sākumā (momentā t_1).



30. zīm. Integrējošais pastiprinātājs: a – shēma; b – darbības diagramma

Integrējošā pastiprinātāja darbības piemērs parādīts 30. zīmējumā b. Ja ieejas signāls nav pievadīts, integrāļa vērtība formulā (26) ir nulle, tāpēc izejas signāls nemainās. Jāievēro, ka integrējošā pastiprinātāja izejā ir kondensators, tātad izejas spriegums nekad nevar izmainīties ar lēcieni.

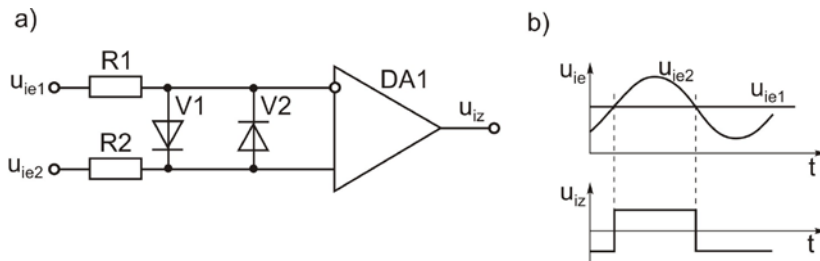
Izmantojot integrējošo pastiprinātāju, viegli izveidot lineāri mainīga sprieguma ģeneratorus. Šādā gadījumā ieejai jāpievada taisnstūra formas impulsi.

2.6.5. Komparators

Par komparatoru sauc iekārtu divu spriegumu salīdzināšanai. 31. zīmējumā attēlota komparatora shēma, kas izveidota uz operacionālā pastiprinātāja bāzes. Šī shēma atšķiras no citām iepriekš aplūkotajām shēmām ar to, ka nav izmantota negatīvā atgriezeniskā saite. Šajā gadījumā, pat ja ieejas spriegums ir vienāds ar nulli, sakarā ar neizbēgamo dreifu pastiprinātāja izejā noteikti parādās pozitīvs vai

negatīvs spriegums, bet tā kā operacionālā pastiprinātāja pastiprinājuma koeficients ir ļoti liels, šis spriegums maz atšķiras no shēmas barošanas sprieguma.

Ja inversajai ieejai pievadītais spriegums U_{ie1} , ir lielāks par tiešās ieejas spriegumu U_{ie2} , pastiprinātāja izejas spriegums ir negatīvs (sk. komparatora darbības diagrammu 31. zīmējumā b). Ja spriegums U_{ie2} palielinās, tad momentā, kad $U_{ie2} = U_{ie1}$, izejas spriegums kļūst pozitīvs.



31. zīm. Komparator: a – shēma; b – darbības princips

Rezistori R1, R2 un diodes V1, V2 aizsargā pastiprinātāja ieeju. Neatkarīgi no ieejas spriegumu starpības $U_{ie2} - U_{ie1}$ polaritātes viena no diodēm būs atvērta, Tāpēc spriegums starp operacionālā pastiprinātāja ieejām nevar kļūt lielāks par spriegumu uz atvērtās diodes (dažām volta desmitdaļām). Ja diodes V1 un V2 nav pieslēgtas, ieejas signāliem jābūt ierobežotiem līdz tādiem līmeņiem, kas neizsauc operacionālā pastiprinātāja caursiti.

Komparatorus izgatavo arī kā atsevišķas integrālās shēmas. Tādiem komparatoriem ir lielāka ātrdarbība – tie pārslēdzas straujāk. Šo mikroshēmu izejas signāla līmeņi ir tādi paši kā ciparu integrālajām shēmām (sk. 4. nodaļu).

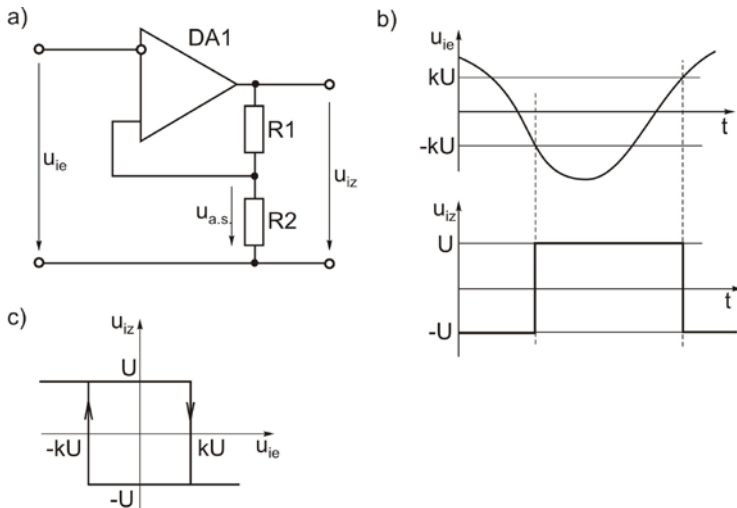
Aplūkotajā komparatorā izejas signāls dažreiz var iznākt kļūdaini. Tas iespējams tad, ja ieejas signālu starpība ir ļoti maza un šajā laikā uz ieejām iedarbojas kaut kādi ķēdē inducēti traucējumi vai izmainās barošanas spriegums. Šādā situācijā iespējama vairākkārtīga izejas signāla pārslēgšanās no pozitīvas vērtības uz negatīvu un atpakaļ. Ja pēc komparatora seko trigeri vai skaitītāji (sk. 4. nodaļu), tad tas var izsaukt shēmas nepareizu nostrādi, piemēram, viena impulsa vietā skaitītājs saskaita piecus. Šo vienkāršā komparatora trūkumu var novērst, ja pievieno pozitīvu atgriezenisko saiti, kas pēc pārslēgšanās neļauj tūlīt shēmai atgriezties iepriekšējā stāvoklī. Ja atgriezeniskā saite ir spēcīgāka, iegūstam jau citu iekārtu – Šmita trigeru.

2.6.6. Šmita trigers

Šmita trigers, tāpat kā komparator, mainoties ieejas signālam, pārslēdzas no pozitīvas izejas signāla vērtības uz negatīvu. Tomēr, atšķirībā no komparatora, šī pārslēgšanās uz vienu vai otru pusi notiek pie dažādiem ieejas spriegumiem.

Apskatīsim tāda Šmita trigerā darbību, kuram ir tikai viena ieeja (32. zīm.). Pieņemsim, ka sākumā operacionālā pastiprinātāja inversajai ieejai pievadīts pozitīvs spriegums (32. zīm. b). Tādā gadījumā izejā būs negatīvs spriegums $-U$ (pēc absolūtās vērtības apmēram par vienu voltu mazāks kā negatīvais barošanas spriegums). Pastiprinātāja izejā pieslēgts sprieguma dalītājs, no kura atgriezeniskās saites spriegums $U_{a.s.}$ pievadīts operacionālā pastiprinātāja tiešajai ieejai. Tā kā dalītājā spriegumi ir proporcionāli pretestībām, iegūstam:

$$u_{a.s.} = \frac{R_2}{R_1 + R_2} u_{iz} = k u_{iz} \quad (27)$$



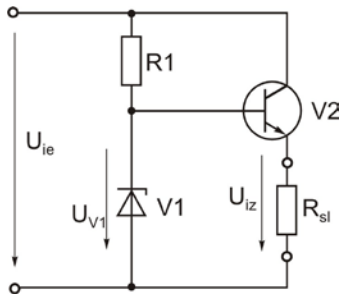
32. zīm. Šmita trigers: a – shēma; b – laika diagramma; c – izejas signāla atkarība no ieejas signāla

Tātad sākumā tiešās ieejas spriegums ir $-kU$. Izejas spriegums mainīs polaritāti tikai tad, kad ieejas spriegums kļūs vēl negatīvāks par šo vērtību. Savukārt, atgriešanās iepriekšējā stāvoklī notiks pie ieejas sprieguma, kas ir pozitīvāks par $+kU$. Tātad pārslēgšanās uz pozitīvu izejas signālu un atpakaļ notiek pie dažādām ieejas sprieguma vērtībām (32. zīm. c).

2.7. Kompensācijas tipa sprieguma stabilizatori

Parametriskajam sprieguma stabilizatoram (sk. 1.3.3. p.) ir vairāki trūkumi: samērā neliels stabilizācijas koeficients, neliela iespējamā slodzes strāva, neregulējams izejas spriegums. Tādēļ neskatoties uz parametriskā stabilizatora shēmas vienkāršību un drošumu, plaši izmanto arī pilnīgākus – kompensācijas tipa stabilizatorus.

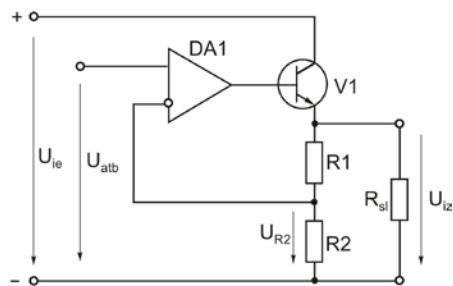
Stabilizatora slodzes strāvu var palielināt, papildinot parametriskā stabilizatora shēmu ar strāvas pastiprinātāju. 33. zīmējumā attēlota stabilizatora shēma, kurā slodze pieslēgta caur tranzistora pastiprinātāju. Tranzistors slēgts kopkolektora shēmā (sk. 1.4.2. p.), ko sauc arī par emitera atkārtotāju. Šāda shēma nepastiprina spriegumu (izejas spriegums aptuveni ir vienāds ar tranzistora bāzei pievadīto spriegumu). Rezistors R1 un stabilitrons V1 veido parametrisko sprieguma stabilizatoru, kura izejas spriegums U_{V1} tiek pievadīts emitera atkārtotājam. Tādēļ shēmas izejas spriegums U_{iz} ir aptuveni vienāds ar stabilizēto spriegumu U_{V1} .



33. zīm. Sprieguma stabilizators ar emitera atkārtotāju

Ja izejas spriegumu nepieciešams regulēt, tad tranzistora V2 bāzei nav jāpievada viss spriegums U_{V1} , bet gan tā daļa, ko var noņemt no paralēli stabilitronam V1 pieslēgta potenciometra.

Stabilizācijas koeficientu var vēl vairāk palielināt, ja shēmu papildina ar pastiprinātāju, kurš seko mazākajām izejas sprieguma izmaiņām un tā iedarbojas uz izejas tranzistoru, lai uzturētu spriegumu nemainīgu. Viens no kompensācijas tipa stabilizatoru shēmu variantiem attēlots 34. zīmējumā. Paralēli slodzei R_{sl} pieslēgts sprieguma dalītājs (rezistori R1 un R2), no kura spriegums tiek pievadīts operacionālā pastiprinātāja DA1 inversajai ieejai. Tiešā ieeja saņem stabilizētu atbalstsprriegumu U_{atb} . Tādā veidā negatīvā atgriezeniskā saite aptver abas pastiprinātājpakāpes – operacionālo pastiprinātāju D1 un emitera atkārtotāju.



34. zīm. Kompensācijas tipa sprieguma stabilizatora shēma

Tā kā spriegumu, kas ir starp operacionālā pastiprinātāja abām ieejām (ja izmantota negatīva atgriezeniskā saite), var pieņemt vienādu ar nulli, spriegumam U_{R2} noteikti jāiznāk vienādam ar atbalstspriegumu U_{atb} . Tādēļ izejas spriegums U_{iz} ir proporcionāls spriegumam U_{atb} (spriegums U_{R2} ir daļa no sprieguma U_{iz}). Ja sprieguma dalītāja $R1, R2$ vietā ņem potenciometru, tad stabilizatora izejas spriegumu var regulēt.

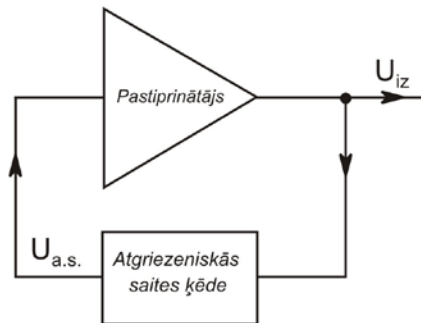
Aplūkotajām shēmām nav aizsardzības pret īsslēgumiem. Ja izejā rodas īsslēgums, tad caur tranzistoru $V2$ (33. zīm.) plūst ļoti liela strāva, un tranzistors sadeg. Tādēļ nepieciešams paredzēt automātisku izejas strāvas ierobežošanu.

Kompensācijas tipa sprieguma stabilizatorus izgatavo arī mikroshēmu veidā. Šādi stabilizatori parasti ir nodrošināti ar aizsardzību pret īsslēgumiem, un to izejas spriegumu var regulēt.

3. ĢENERATORI

3.1. Nerimstošu svārstību iegūšanas princips

Elektroniskajās iekārtās bieži izmanto periodiskus signālus – sinusoidālus, taisnstūra vai trīsstūra formas u.c. Ģeneratoros, kuri formē šādus signālus, izmanto pastiprinātājus ar pozitīvu atgriezenisko saiti. Iepriekš jau bija parādīts (sk. 2.2. p.), ka pozitīva atgriezeniskā saite noteiktos apstākļos var izsaukt nerimstošu svārstību ierosināšanos. Aplūkosim šo procesu tuvāk.



35. zīm. Nerimstošu svārstību ģeneratora struktūrshēma

Atšķirībā no pastiprinātāja, nerimstošu svārstību ģeneratoram ieejas signālu nepievada, tādēļ agrāk aplūkotā pastiprinātāja ar atgriezenisko saiti struktūrshēma (sk. 19. zīm.) vienkāršojas (35. zīm.). Lai izejas signāls nerimtu, pastiprinātāja pastiprinājuma koeficientam jābūt tādā, kas kompensē signāla vājinājumu atgriezeniskās saites ķēdē. Izmantojot formulas

$$K = \frac{U_{iz}}{U_{a.s.}} \quad \text{un} \quad \gamma = \frac{U_{a.s.}}{U_{iz}},$$

iegūstam svārstību ierosināšanas nosacījumu:

$$K = \frac{1}{\gamma}. \quad (28)$$

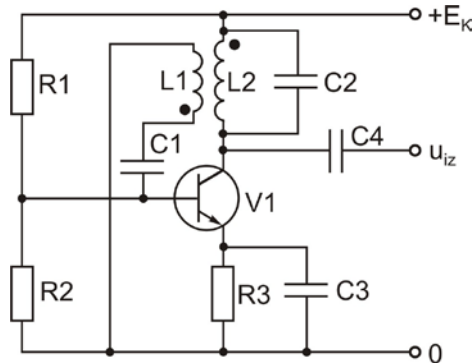
Ja pastiprinājuma koeficients ir mazāks, tad svārstības norimst, un šāds ģenerators strādāt nevar. Ja pastiprinājuma koeficients izrādās lielāks nekā iegūtais no formulas (28), svārstību amplitūda pakāpeniski palielinās. Šādu amplitūdas pieaugumu ierobežo voltampēru raksturliķņu nelinearitāte. Tad pastiprinājuma koeficients samazinās, līdz atkal iegūstam sakarību (28).

Nerimstošo svārstību iegūšanai bez nosacījuma (28) vēl nepieciešams, lai atgriezeniskā saite būtu pozitīva, t.i., pēc izešanas caur atgriezeniskās saites ķēdi un caur pastiprinātāju svārstību fāzei jābūt iepriekšējai.

Ja abi šie nosacījumi ir spēkā tikai vienai frekvencei, tad ģenerēts tiks tieši šīs frekvences spriegums. Tomēr bieži pašierosināšanās nosacījumi izpildās vienlaikus daudzām frekvencēm. Tādā gadījumā rodas nesinusoidālas svārstības.

3.2. Sinusoidālu svārstību ģeneratori

Sinusoidālu svārstību iegūšanai izmanto LC un RC tipa ģeneratorus. LC ģenerators shēma attēlota 36. zīmējumā. Tā satur tranzistora pastiprinātāju, kura kolektora ķēdē rezistora vietā ieslēgts svārstību kontūrs L2, C2. Ar spoli L2 induktīvi saistīta otra spole L1, kura kopā ar L2 veido transformatoru. No transformatora sekundārā tinuma (spoles L1) tiek noņemts atgriezeniskās saites signāls, kuru caur atdalošo kondensatoru C1 pievada tranzistora bāzei.



36. zīm. Sinusoidālu svārstību LC ģenerators shēma

Ģenerators darbības pamatā ir paralēlā kontūra rezonanses īpašības. Pie rezonanses frekvences kontūra pilnā pretestība ir maksimāla. Šajā gadījumā maksimāls ir arī pastiprinājuma koeficients. Bez tam, ja frekvence kļūst lielāka vai

mazāka par rezonanses frekvenci, kontūra pretestība iegūst reaktīvu raksturu, bet tādā gadījumā atgriezeniskās saites signāla fāze neapmierina iepriekš minēto nosacījumu. Tādēļ ģeneratorā rodas sinusoidālas svārstības ar kontūra rezonanses frekvenci:

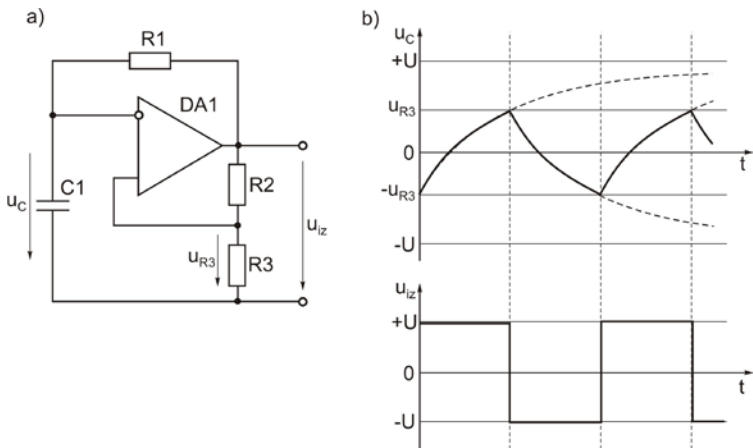
$$f_{\text{rez}} = \frac{1}{2\pi\sqrt{L_2 C_2}} \quad (29)$$

Lai frekvenci stabilizētu, dažreiz svārstību kontūrā bez kondensatora ieslēdz arī kvarca rezonatoru – no kvarca kristāla izgrieztu plāksnīti. Kvarca rezonatorā rodas mehāniskas svārstības ar ļoti asu rezonanses līkni un ļoti stabilu frekvenci. Pjēzoelektriskā efekta dēļ mehāniskās svārstības ierosina elektriskās (un otrādi).

Ja nepieciešama zema frekvence (desmiti un simti hercu), tad LC ģeneratori nav piemēroti, jo svārstību kontūram nepieciešama ļoti liela kapacitāte un induktivitāte. Tādēļ zemfrekvences sinusoidālu svārstību ģeneratoros parasti izmanto citu principu – atgriezeniskajā saitē ieslēdz kondensatorus un rezistorus tā, lai nepieciešamā fāžu nobīde rastos tikai pie noteiktas frekvences. RC ģeneratoru darba frekvenci var regulēt, mainot rezistoru pretestības vai kondensatoru kapacitātes.

3.3. Multivibrators

Multivibrators ir taisnstūra formas impulsu ģenerators, kurā impulsu formēšanas laikā notiek periodiski kondensatora uzlādes un izlādes procesi. Aplūkosim tāda multivibratora darbību, kura shēma veidota uz operacionālā pastiprinātāja bāzes (37. zīm.). Shēma satur agrāk apskatīto Šmita trigeru (sk. 2.6.6. punktu), kurš papildināts ar RC ķēdi – rezistoru R1 un kondensatoru C1. Šī ķēde veido negatīvu atgriezenisko saiti no izejas uz inverso ieeju.



37. zīm. Multivibrators: a – shēma; b – darbības diagramma

Pieņemsim, ka sākumā ($t=0$) ir notikusi operacionālā pastiprinātāja pārslēgšanās no negatīvā sprieguma $-U$ uz pozitīvo spriegumu $+U$. Līdz ar to spriegums tiešajā ieejā ir

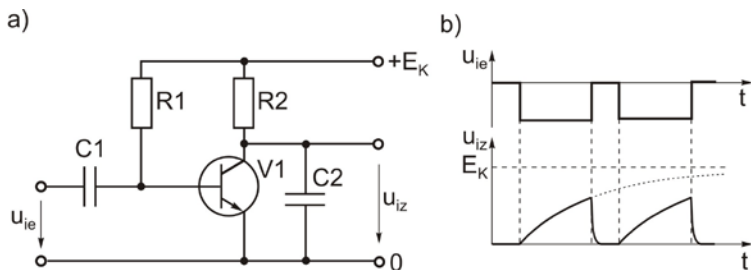
$$u_{R3} = \frac{R_3}{R_2 + R_3} u_{iz} = k u_{iz} = kU. \quad (30)$$

Caur rezistoru $R1$ sākas kondensatora $C1$ pārlādes process no negatīvas sākuma vērtības uz pozitīvu vērtību. Ja šis pārlādes process varētu turpināties līdz beigām, tad spriegums uz kondensatora u_C sasniegtu vērtību $+U$ (pārtrauktā līnija 37. zīmējumā, b). Patiesībā tomēr pārejas process pārtraucas momentā, kad spriegums u_C kļūst vienāds ar spriegumu u_{R3} , jo šajā mirklī spriegumi uz abām operacionālā pastiprinātāja ieejām kļūst vienādi, un tūlīt pēc tam izejas spriegums lēcienveidīgi izmainās uz negatīvo vērtību $-U$. Arī spriegums u_{R3} maina zīmi. Tā kā izejas spriegums tagad ir negatīvs, arī kondensators caur rezistoru $R1$ sāk pārlādēties uz negatīvu polaritāti – sākas nākamais multivibratora svārstību pusperiods.

Multivibratora ģenerēto svārstību periods ir atkarīgs no sprieguma dalītāja pretestību attiecības $k=R_3/(R_2+R_3)$ un no kondensatora uzlādes ķēdes laika konstantes $\tau=R_1C_1$.

3.4. Lineāri mainīga sprieguma ģeneratori

Spriegums, kas mainās lineāri, nepieciešams, piemēram, elektronu stara izvēršanai pa oscilogrāfa ekrānu, regulējamas laika aiztures iegūšanai un dažos citos gadījumos. Visbiežāk sprieguma lineāru atkarību no laika iegūst, uzlādējot vai izlādējot kondensatoru.



38. zīm. Lineāri mainīga sprieguma ģenerators:
a – shēma; b – darbības diagramma

Vienkārša lineāri mainīga sprieguma ģenerators shēma dota 38. zīmējumā. Ģenerators darbu vada ar ārējiem impulsiem. Transistors $V1$ strādā slēdža režīmā. Ja nav pievadīts ieejas signāls, tranzistors ir piesātināts, tādēļ izejas spriegums vienāds ar nulli. Ja caur atdalošo kondensatoru $C1$ bāzei pievada negatīvu impulsu, tranzistors aizveras un kondensators $C2$ sāk uzlādēties caur rezistoru $R2$.

No tā varam secināt, ka izejas spriegums mainās eksponenciāli. Tomēr, ja izmantojam tikai eksponentes sākuma daļu, iegūtā līkne diezgan maz atšķiras no taisnes (38. zīm., b).

Izejas sprieguma linearitāti var uzlabot, uzlādējot kondensatoru ar nemainīgu strāvu. Par tādas strāvas avotu var izmantot tranzistoru, jo aktīvajā režīmā kolektora strāva maz atkarīga no kolektora sprieguma. Lineāri mainīgu spriegumu var iegūt arī, izmantojot integratoru uz operacionālā pastiprinātāja bāzes (sk. 2.6.4. p.).

4. CIPARU AUTOMĀTIKAS IEKĀRTU ELEMENTI

Ražošanas procesu automatizācijas iekārtās plaši izmanto elektroniskas shēmas, kurās darbojas dažādas formas impulsi. Šādas impulsu tehnikas shēmas izmanto, piemēram, tiristoru atvēršanai dzinēju rotācijas frekvences regulēšanas sistēmās, loģisko operāciju veikšanai ražošanas procesu automatizācijas shēmās, skaitļošanas tehnikā un citur.

Ciparu automātikas iekārtās informāciju parasti kodē ar diviem dažādiem sprieguma līmeņiem. Vienu no tiem pieņemts uzskatīt par loģisko nulli (turpmāk apzīmēsim ar 0), bet otru – par loģisko vieninieku (1). Aplūkosim tādas iekārtas, kurās loģiskajai nullei atbilst zems potenciāls (piemēram, spriegums uz piesātināta tranzistora), bet loģiskajam vieniniekam – augsts pozitīvs potenciāls (attiecīgi – spriegums uz aizvērtā tranzistora). Tā, piemēram, plaši lietojamajās ciparu integrālo mikroshēmu sērijās K155, K133 u.c. loģiskajai nullei mikroshēmas izejā atbilst sprieguma vērtības no nulles līdz +0,4 V, bet loģiskajam vieniniekam no +2,4 V līdz +5 V.

4.1. Loģiskie elementi

Loģiskie elementi ir shēmas, kuru izejas signāls ir atkarīgs no ieejas signālu kombinācijas un var pieņemt divas dažādas vērtības – 0 vai 1. Loģiskie elementi informāciju apstrādā pēc loģikas algebras likumiem. Aplūkosim galvenās loģiskās funkcijas un to realizāciju loģiskajos elementos.

Loģiskajai funkcijai VAI (loģiskajai saskaitīšanai) ir vairāki argumenti. Funkcija pieņem vērtību 1 tad, ja kaut viena argumenta vērtība ir 1 (39. zīm. a). Funkciju VAI attēlo ar “+” zīmi vai “V”. Tā, piemēram, funkciju, kuras vērtību tabula dota 39. zīmējumā a, var pierakstīt:

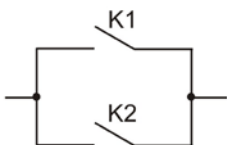
$$y=x_1+x_2.$$

Tādu funkciju viegli realizēt ar shēmu (39. zīm. c), kura satur paralēli slēgtus mehāniskus kontaktus (slēdžus vai releju kontaktus) – strāva ķēdē var plūst, ja saslēgts kaut viens no šiem kontaktiem. Kontaktu shēmu galvenie trūkumi – lieli izmēri, neliels darba drošums un daudziem pielietojumiem nepietiekams darbības ātrums.

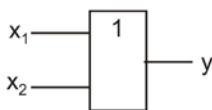
a)

x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	1
1	0	1
1	1	1

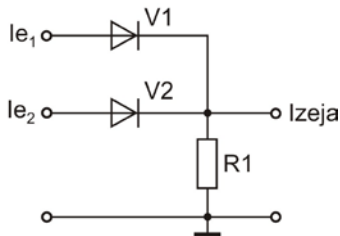
c)



b)



d)



39. zīm. Loģiskais elements VAI: a – loģiskās funkcijas VAI vērtību tabula;
 b – elementa nosacītais apzīmējums; c – realizācija ar kontaktiem;
 d – realizācija ar diodēm

Bezkontakta loģiskā elementa VAI shēma attēlota 39. zīmējumā d. Ja vienā no ieejām ir loģiskais vieninieks (pozitīvs potenciāls), tad atbilstošā diode atveras un šis potenciāls nokļūst loģiskā elementa izejā. Diode shēmā nepieciešama, lai atdalītu vienu ieeju no otras – strāva nevar plūst starp divām ieejām, jo šajā ķēdē viena no diodēm izrādās ieslēgta sprostvirzienā.

Loģiskajai funkcijai UN (loģiskajai reizināšanai) arī ir vairāki argumenti. Šī funkcija pieņem vērtību 1 tikai tad, ja visi argumenti ir loģiskie vieninieki (40. zīm. a). Funkciju UN attēlo ar zīmēm "·", "∧" vai "&", piemēram,

$$y = x_1 \cdot x_2 .$$

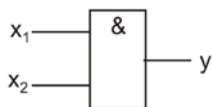
Funkciju UN var realizēt ar kontaktiem, savienojot tos virknē (40. zīm. c). Tad ķēde noslēdzas tikai vienā gadījumā – kad saslēgti visi kontakti. Loģiskā elementa UN bezkontakta variants attēlots 40. zīmējumā d. Par loģisko nulli ieejā jāuzskata spriegums, kas vienāds ar nulli. To var iegūt, savienojot attiecīgo ieeju ar shēmas kopīgo punktu. Šādā gadījumā diode ir atvērta, tādēļ spriegums uz tās un arī izejas spriegums vienāds ar nulli. Tikai tad, ja visām ieejām pievadīti signāli 1, visas diodes būs aizvērtas un izejā parādīsies spriegums +E.

Loģiskā funkcija NE (loģiskais noliegums) atšķirībā no funkcijām VAI, UN ir viena argumenta funkcija. Ja arguments ir 0, funkcija pieņem vērtību 1, un otrādi (41. zīm. a). Loģisko funkciju NE pieraksta kā $y = \bar{x}$. Lai šādu funkciju realizētu, var izmantot atslēdzošo kontaktu (41. zīm. c) vai tranzistora pastiprinātāju, kas darbojas slēdža režīmā (41. zīm. d). Pēdējā shēmā sākuma stāvoklī (ja ieeja saslēgta Iši) spriegums $-E_B$ tranzistoru aizver, tāpēc elementa izejā ir augsts potenciāls $+E_k$ (signāls 1). Pievadot ieejai pozitīvu signālu, tranzistors piesātinās, un spriegums izejā kļūst vienāds ar nulli.

a)

x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

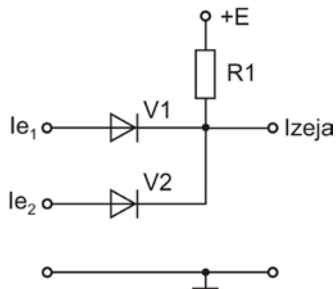
b)



c)



d)

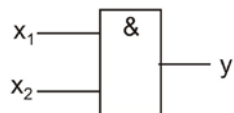


40. zīm. Loģiskais elements UN: a – loģiskās funkcijas UN vērtību tabula;
b – elementa nosacītais apzīmējums; c – realizācija ar kontaktiem;
d – realizācija ar diodēm

a)

x_1	x_2	y
0	0	0
0	1	0
1	0	0
1	1	1

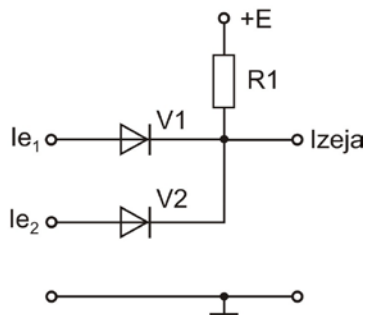
b)



c)



d)



41. zīm. Loģiskais elements NE: a – loģiskās funkcijas NE vērtību tabula;
b – elementa nosacītais apzīmējums; c – realizācija ar atslēdzošo kontaktu;
d – realizācija ar tranzistora slēdzi

Sarežģītākas loģiskās funkcijas var pierakstīt kā loģiskas izteiksmes, kuras satur funkcijas VAI, UN, NE. Tādēļ jebkuru, pat ļoti sarežģītu, loģisko funkciju var realizēt ar iepriekš aplūkotajiem loģiskajiem elementiem.

Diožu elementiem VAI, UN ir būtisks trūkums – tos var slogot tikai ar nelielu strāvu. Lai palielinātu šo elementu jaudu, nepieciešams izejai pieslēgt tranzistoru pastiprinātājus. Tā izveidojas kombinēti loģiskie elementi VAI-NE un UN-NE. Izrādās, ka tikai ar vienu šādu elementu tipu (piemēram, VAI-NE) var realizēt jebkuru loģisko funkciju. Loģisko mikroshēmu sērijā K155, piemēram, ir UN-NE tipa loģiskie elementi ar dažādu ieeju skaitu (no 2 līdz 8).

4.2. Loģisko shēmu sintēze

Izmantojot augstāk apskatītos loģiskos elementus VAI, UN, NE, VAI-NE, UN-NE un citus, iespējams izveidot shēmu, kuras izejas signāls, mainoties ieejas signāliem, iegūst jebkuras iepriekš uzdotas vērtības.

Pieņemsim, ka mums jāizveido loģiskā shēma ar trim ieejām a, b un c, kuras darbība atbilst šādai vērtību tabulai:

a	b	c	y
0	0	0	1
0	0	1	0
0	1	0	1
0	1	1	0
1	0	0	1
1	0	1	0
1	1	0	1
1	1	1	1

Tabulai atbilstošo loģisko funkciju var iegūt šādā veidā. Aplūkojam tikai tās rindas, kurās y=1, un pierakstām ieejas lielumu loģiskos reizinājumus. Pie tam, ja šajā rindā a=1, reizinājumā liekam a, bet, ja a=0, tad \bar{a} . Visus iegūtos loģiskos reizinājumus apvienojam ar funkciju VAI. Rezultātā iegūstam izteiksmi:

$$y = \bar{a} \bar{b} \bar{c} + \bar{a} b \bar{c} + a \bar{b} \bar{c} + a b \bar{c} + a b c \quad (31)$$

Šādas funkcijas realizēšanai ar loģiskajiem elementiem nepieciešami trīs elementi NE (lai iegūtu inversās ieejas signālu vērtības \bar{a} , \bar{b} un \bar{c}), pieci elementi UN ar trim ieejām katru un viens elements VAI ar piecām ieejām. Tātad, pavisam vajadzīgi 9 loģiskie elementi. Tomēr ir iespējams, izmantojot loģikas algebras formulas, vienkāršot šo funkciju. Var izmantot, piemēram, šādas formulas:

$$\bar{\bar{a}} = a \quad (a) \quad a \cdot \bar{a} = 0 \quad (g)$$

$$a + 1 = 1 \quad (b) \quad a + a = a \quad (h)$$

$$a \cdot 1 = a \quad (c) \quad a \cdot a = a \quad (i)$$

$$a + 0 = a \quad (d) \quad (a + b)c = ac + bc \quad (j)$$

$$a \cdot 0 = 0 \quad (e) \quad a + b = \overline{\bar{a} \cdot \bar{b}} \quad (k)$$

$$a + \bar{a} = 1 \quad (f) \quad a \cdot b = \overline{\bar{a} + \bar{b}} \quad (l)$$

Tad izteiksmi (31), izmantojot formulas (g), (f) un (c), varam pārrakstīt šādā formā:

$$y = \bar{a} \bar{c} (\bar{b} + b) + a \bar{c} (\bar{b} + b) + abc = \bar{a} \bar{c} \cdot 1 + a \bar{c} \cdot 1 + abc = \\ = \bar{a} \bar{c} + a \bar{c} + abc = \bar{c} + abc$$

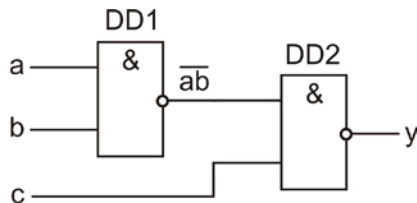
Šo izteiksmi iespējams tālāk vienkāršot, izmantojot formulu (h) apgrieztā veidā – $a = a + a$. Tas nozīmē, ka loģiskās izteiksmes vērtība nemainās, ja kādu loģiskās summas komponenti atkārtu vairākas reizes. Pierakstīsim iegūtajai izteiksmei klāt sākotnējās izteiksmes (31) ceturto locekli:

$$y = \bar{c} + abc + abc = \bar{c} + ab(c + \bar{c}) = \bar{c} + ab.$$

Pieņemsim, ka gribam šo loģisko funkciju realizēt ar loģiskajiem elementiem UN-NE. Izmantojot formulu (k), iegūstam:

$$y = \bar{c} + ab = \overline{\overline{c \cdot ab}}. \quad (32)$$

Šo loģisko funkciju var realizēt ar diviem loģiskajiem elementiem (42. zīm.).



42. zīm. Loģiskā shēma funkcijas $y = \overline{c \cdot ab}$ realizēšanai

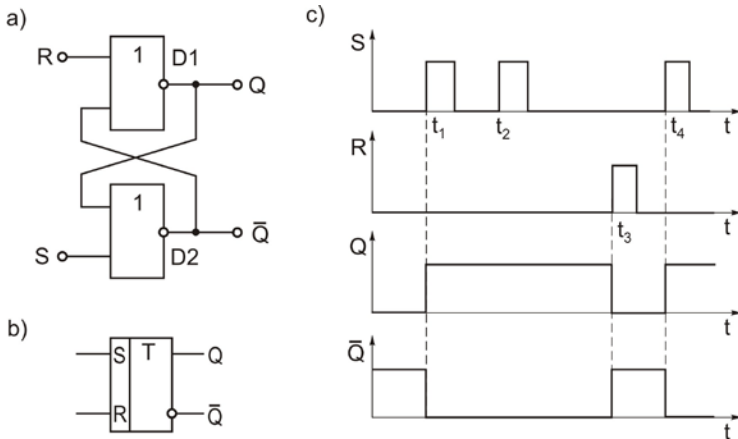
Var pārliecināties, ka izejas signāls atbilst uzdotajai vērtību tabulai. Piemēram, 1. rindā $a=b=c=0$. Elementa DD1 abu ieeju loģiskais reizinājums ir 0, bet pēc invertēšanas – 1. Elementa DD2 vienā ieejā tāpat ir 1, bet otrā – 0 (mainīgais c). So divu lielumu loģiskais reizinājums ir 0, bet pēc invertēšanas – 1. Tāpat var pārbaudīt arī pārējās tabulas rindas.

4.3. Trigeri

Trigeri ir iekārta, kurai ir divi stabili stāvokļi. Ieejas signālu ietekmē trigers var lēcienvēidā pāriet no viena stāvokļa otrā. Parasti trigeram ir divas izejas – galvenā (tiešā) Q un inversā \bar{Q} . Statiskos stāvokļos signāli šajās izejās ir pretēji: ja $Q = 1$, tad $\bar{Q} = 0$, un otrādi.

Trigeri var būt asinhroni un sinhroni. Asinhronais trigers pārslēdzas momentā, kad pienāk ieejas signāls. Sinhronā trigeru jauno stāvokli arī nosaka ieejas signāls, bet pati pārslēdzšanās notiek tad, kad īpašai sinhronizācijas ieejai C (*clock*) tiek pievadīts takta impulss. Pie tam vienkāršākie vienpakāpes trigeri pārslēdzas takta impulsa sākumā, bet divpakāpju trigeri (to nosacītajā apzīmējumā shēmā ir divi burti – TT) – takta impulsam izbeidzoties.

Vienkāršākais ir asinhronais RS trigers, kas ir arī citu trigeru shēmu sastāvdaļa. RS trigeru struktūrshēma satur divus VAI-NE tipa loģiskos elementus, pie tam viena elementa izeja savienota ar otra elementa ieeju (43. zīm. a). Viegli pārliecināties, ka tad, ja ieejas signālu nav, trigers neierobežoti ilgi atradīsies vienā no diviem iespējamajiem stāvokļiem.



43. zīm. RS trigers: a – struktūrshēma; b – nosacītais apzīmējums; c – darbības diagramma

Pieņemsim, ka loģiskā elementa D1 izejā ir loģiskā nulle ($Q = 0$). Tas nozīmē, ka abās elementa D2 ieejās signāli ir vienādi ar nulli (pieņemts, ka ieejā S nav ieejas signāla). Tādēļ loģiskā shēma VAI izstrādā loģisko nulli, bet pēc invertēšanas (shēmā izmantoti elementi VAI-NE) izejā \bar{Q} ir loģiskais vieninieks, kas nonāk elementa D1 ieejā. Tāpēc elementā D1 loģiskā shēma VAI formē loģisko vieninieku, bet pēc invertēšanas izejā būs loģiskā nulle. Tātad loģiskā nulle elementa D1 izejā izsauc loģisko vieninieku elementa D2 izejā, bet šis vieninieks savukārt uztur elementu D1 nulles stāvoklī. Tāds trigeru stāvoklis var saglabāties ilgi. Tā kā shēma ir simetriska, trigers var atrasties arī otrā stāvoklī ($Q = 1, \bar{Q} = 0$).

Lai trigeru pārslēgtu no viena stāvokļa otrā, vajag īslaicīgi pievadīt signālus tā ieejām. RS trigeram ir divas ieejas – ieeja S (set) trigeru ieslēgšanai stāvoklī $Q = 1$ un ieeja R (reset) ieslēgšanai stāvoklī $Q = 0$. Pieņemsim, ka trigers bija stāvoklī $Q = 0$ (sk. laika diagrammu 43. zīmējumā c). Ja momentā t_1 pienāk ieejas signāls $S = 1$, loģiskais elements D2 pāriet stāvoklī $\bar{Q} = 0$. Bet, tā kā šajā gadījumā loģiskās nulles būs elementa D1 abās ieejās, pēdējais pāriet stāvoklī $Q = 1$. Pēc tam ieejas S signālu var noņemt, bet trigers tomēr paliks jaunajā stāvoklī ($Q = 1, \bar{Q} = 0$).

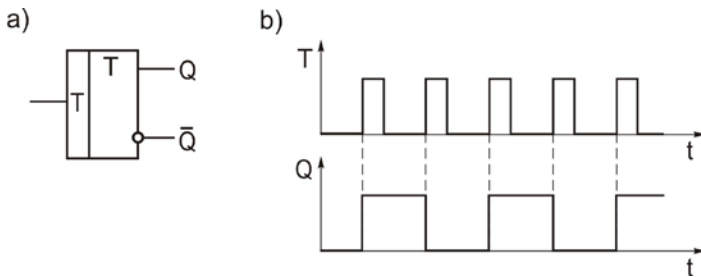
Ja signāls $S = 1$ pienāk atkārtoti (moments t_2), trigeru stāvoklis vairs nemainās. Signāls atgriešanas ieejā $R = 1$ (moments t_3) pārslēdz trigeru stāvoklī

$Q = 0$. Tātad, lai RS trigeru pārslēgtu no viena stāvokļa otrā, signāli jāpievada pārmaiņus ieejām S un R.

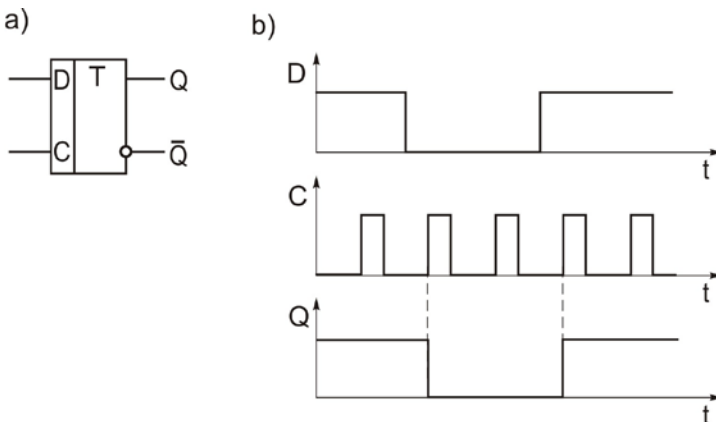
RS trigeru var izveidot arī, izmantojot loģiskos elementus UN-NE.

Ja signālu 1 pievada reizē abām ieejām, tad pēc ieejas signālu izbeigšanās tālākais RS trigeru stāvoklis kļūst nenoteikts. Tādēļ šādu ieejas signālu kombināciju neizmanto.

Bez RS trigeriem izmanto arī citus trigeru tipus. Impulsu skaitīšanai noder T trigers (trigers ar skaitīšanas ieeju). Tāda trigeru nosacītais apzīmējums dots 44. zīmējumā. Turpat redzama arī trigeru darbības diagramma. Atšķirībā no RS trigeru, T trigeram ir tikai viena ieeja T. Katrs impulss, kas pienāk šajā ieejā, pārslēdz trigeru pretējā stāvoklī. Tādēļ izejas signāla frekvence ir divas reizes mazāka par ieejas signāla frekvenci (trigers atgriežas iepriekšējā stāvoklī pēc divu ieejas impulsu saņemšanas).



44. zīm. T trigers: a – nosacītais apzīmējums; b – darbības diagramma



45. zīm. D trigers: a – nosacītais apzīmējums; b – darbības diagramma

D trigers (aiztures trigers) ir sinhronais trigers ar divām ieejām (45. zīm.). Ieejai D tiek pievadīti ieejas signāli, bet ieejai C – takta impulsi. D trigeru izejā

izveidojas tāds pats signāls, kāds ir D ieejā, taču trigeru pārslēgšanās notiek nevis ieejas signāla parādīšanās momentā, bet nedaudz vēlāk – pēc kārtējā takta impulsa pienākšanas. Tāpēc izejas signāls attiecībā pret ieejas signālu ir aizturēts.

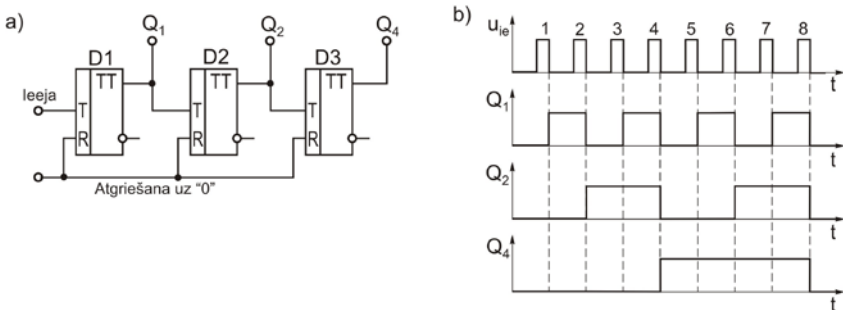
Ja ieejai C pievada tikai vienu takta impulsu, tad trigeru izejā parādās tas pats signāls, kāds bija ieejā takta impulsa pienākšanas brīdī. Pēc tam šis izejas signāls vairs nemainās. Tāpēc D trigeru var izmantot informācijas glabāšanai, piemēram, reģistros (sk. 4.4. p.) un atmiņas iekārtās (sk. 5.3. p.).

Plaši izmanto arī universālo JK trigeru. Tas ir divpakāpju sinhronais trigers. Pēc darbības principa JK trigers atgādina sinhrono RS trigeru (ieeja J strādā tāpat kā RS trigeru ieeja S, bet ieeja K – kā ieeja R). Tomēr JK trigeram, atšķirībā no RS trigeru, nav neatļauto ieejas signālu kombināciju – ja signālu 1 pievada vienlaikus abām ieejām (J un K), trigers pārslēdzas pretējā stāvoklī, t.i., strādā kā T trigers. Pati pārslēgšanās notiek, izbeidzoties takta impulsam.

4.4. Skaitītāji, dešifratori un reģistri

Automātikas un skaitļošanas tehnikas iekārtās bieži rodas nepieciešamība saskaitīt impulsus. Tādēļ izmanto impulsu skaitītājus. Vienkāršāko skaitītāja shēmu var izveidot, savienojot virknē vairākus T trigerus (46. zīm.). Trigeru skaits ir vienāds ar binārā skaitļa kārtu skaitu.

Pieņemsim, ka trigeri pārslēdzas momentā, kad izbeidzas ieejas impulss. Tāda īpašība piemīt divpakāpju trigeriem. Pēc pirmā impulsa trigers D1 būs stāvoklī $Q_1 = 1$, bet pārējie paliks sākotnējā nulles stāvoklī (46. zīm. b). Otrs impulss atgriezīs trigeru D1 stāvoklī $Q_1 = 0$, bet šī izmaiņa izsauks trigeru D2 pārslēgšanos. Tādēļ katrs nākamais trigers pārslēdzas ar divas reizes zemāku frekvenci.



46. zīm. Binārais skaitītājs: a – shēma; b – darbības diagramma

Aplūkosim trigeru stāvokļus pēc noteikta impulsu skaita, piemēram, sešu impulsu pienākšanas. No skaitītāja darbības diagrammas redzams, ka pēc sestā impulsa $Q_1 = 0$, $Q_2 = 1$, $Q_4 = 1$. Ja saskaitīsim četriniekus Q_4 , divniekus Q_2 un

vieniniekus Q_1 , iegūsim bināru skaitli 110, t.i., 6 decimālajā skaitīšanas sistēmā. Tāpat trigeru stāvokļu kombinācija atbilst noteiktam ieejas impulsu skaitam. Pirms skaitīšanas uzsākšanas visi trigeri jāpārslēdz nulles stāvoklī. To var izdarīt, īslaicīgi pievadot signālu 1 atgriešanas ieejām R.

Ne vienmēr aplūkotā skaitītāja izejas informācijas forma ir ērta tālākai izmantošanai. Tā, piemēram, var izrādīties nepieciešams pievadīt loģiskā vieninieka signālu kādai izejas iekārtai (relejam, gaismas diodei u.c.) pie noteikta skaitītāja stāvokļa, bet citai iekārtai pie cita stāvokļa (t.i., pie cita saskaitīto impulsu skaita).

Tādai informācijas pārveidošanai izmanto iekārtas, ko sauc par dešifratoriem. Dešifratoriem ir vairākas ieejas un izejas. Parasti vieninieka signāls ir tikai vienā no dešifratora izejām (visās pārējās izejās ir nulle). Ja izmainās ieejas signālu kombinācija, vieninieka signāls parādās citā dešifratora izejā. Katrai ieejas signālu kombinācijai atbilst vieninieks vienā noteiktā izejā.

Ja, piemēram, 46. zīmējumā attēlotā impulsu skaitītāja izejām pieslēgsim dešifratoru, tad pēc katra saskaitāmā impulsa (kad izmainīsies skaitītāja trigeru stāvoklis) vieninieka signāls pāries uz citu dešifratora izeju. Pieslēdzot dešifratora izejām indikatorus (piemēram, gaismas diodes), radīsies iespēja ļoti uzskatāmi noteikt pienākušo impulsu skaitu – ja iedegsies ceturtā gaismas diode, tad tas nozīmē, ka skaitītājs ir saskaitījis četrus impulsus.

Ciparu automātikas shēmās plaši izmanto īpašas iekārtas informācijas glabāšanai – reģistrus. Reģistrā var ierakstīt kādu bināru skaitli. Šis skaitlis reģistrā saglabājas līdz brīdim, kad to nomaina ar citu. Reģistrā glabājamo informāciju jebkurā momentā var nodot citai iekārtai. Parasti reģistrs sastāv no D trigeriem (uz katra glabājamā binārā skaitļa kārtu viens trigers), kuri pārslēdzas stāvokļos 0 vai 1, ierakstot informāciju. Dažreiz reģistri dod iespēju arī glabājamo informāciju pārveidot, piemēram, pārbīdīt skaitli pa labi vai pa kreisi par vienu vai vairākām kārtām.

4.5. Ciparu-analogu un analogu-ciparu pārveidotāji

Pašlaik ražošanas procesu automatizācijas iekārtās visvairāk izmanto informācijas ciparu apstrādes metodes. Datoru izmantošana tādās iekārtās prasa pirms informācijas apstrādes to pārveidot ciparu formā. Tas nepieciešams tādēļ, ka daudzi automātikas iekārtu ieejas lielumi ir analogi (nepārtraukti mainīgi) lielumi. Tādi ir, piemēram, ūdens tvaika spiediens un temperatūra, šķidrums līmenis rezervuārā, vārpstas rotācijas frekvence. Analogo lielumu pārveidošanai ciparu formā izmanto analogu-ciparu pārveidotājus.

Bieži nepieciešams arī pretējs signālu pārveidojums – no ciparu formas uz analogo formu. Tāds uzdevums rodas, piemēram, regulējot līdzstrāvas dzinēja rotācijas frekvenci – automātikas iekārtas izejas signāls no ciparu formas jāpārveido analogā un pēc pastiprināšanas jāpievada dzinējam. Tādu signālu pārveidošanu veic ciparu-analogu pārveidotāji.

Īsi aplūkosim dažus šo pārveidotāju principus. Ciparu-analogu pārveidotāju var izveidot uz summējošā operacionālā pastiprinātāja bāzes (sk. 29. zīm.). Šādā gadījumā pastiprinātāja ieejām pievada pārveidojamā binārā skaitļa atsevišķas

kārtas. Pastiprinātāja ieejas ķēžu pretestībām jābūt tādām, lai, piemēram, otra kārtā ietekmētu izejas spriegumu divas reizes vairāk nekā pirmā kārtā. Tas nozīmē, ka pretestībai, kurai pievada ieejas signāla otro kārtu, jābūt divas reizes mazākai par pirmās kārtas pretestību. Bez tam ieejas signālu līmeņiem visās ieejās jābūt vienādiem un stabiliem.

Nedaudz sarežģītāk ir pārveidot analogo signālu ciparu formā. Var, piemēram, salīdzināt pārveidojamo analogo signālu ar dažādiem etalonspriegumiem, no kuriem katram atbilst noteikts izejas kods. Lai iegūtu astoņu kārtu bināru izejas signālu (pārveidošanas precizitāte tad būs $1/256 \approx 0,4\%$), ieejas signāls jāsalīdzina ar 256 dažādiem fiksētiem spriegumiem, Tādēļ tāds pārveidotājs saturēs 256 komparatorus. Galvenais šāda pārveidotāja trūkums ir sarežģītība un līdz ar to dārgums, bet tas darbojas ļoti ātri.

Izmanto arī citas, vienkāršākas metodes analogo signālu pārveidošanai ciparu formā. Piemēram, integrēšanas metode balstās uz stabilizēta ģenerators izstrādāto impulsu skaitīšanu. Pārveidošanas sākumā tiek palaists lineāri mainīga sprieguma ģenerators, bet, kad šis mainīgais spriegums kļūst vienāds ar ieejas spriegumu, pārveidošanas process izbeidzas. Šajā laika posmā skaitītājam tiek pievadīti impulsi. Jo augstāks būs ieejas spriegums, jo ilgāks būs arī pārveidošanas laiks, kamēr lineāri mainīgais spriegums sasniegs šo līmeni, un tātad vairāk impulsu tiks saskaitīti skaitītājā. Šāda pārveidošanas principa trūkums ir samērā nelielais darbības ātrums.

Dažādu darbības principu ciparu-analogu un analogu-ciparu pārveidotājus gatavo integrālo mikroskāmu veidā.

5. MIKROPROCESORU SISTĒMAS

5.1. Mikroprocesori un mikroskaitļotāji

Izmantojot iepriekš aplūkotos automātikas elementus – loģiskos elementus, triggerus, skaitītājus u.c., var izveidot jebkuru sarežģītu informācijas apstrādes shēmu, piemēram, iekārtu kāda tehnoloģiskā procesa automātiskai vadībai vai elektronisko skaitļošanas mašīnu. Šos (un arī vēl citus) elementus izgatavo integrālo mikroskāmu veidā; tās ir universālas detaļas, no kurām var izveidot sarežģītākas iekārtas.

Modernās mikroelektronikas iespējas tomēr ir daudzkārt lielākas – vienā korpusā var ievietot mikroskāmu ar nesalīdzināmi sarežģītākām funkcijām nekā, piemēram, skaitītāja funkcijas. Tomēr šeit rodas pretruna – sagatavošanās mikroskāmu ražošanai (shēmas izstrāde, fotošablonu izgatavošana utt.) izmaksā ļoti dārgi, tādēļ ekonomiski attaisnojas šādas mikroskāmas ražot tikai ļoti lielā eksemplāru skaitā. Tieši tādēļ nav izdevīgi gatavot šauri specializētas sarežģītas

integrālās shēmas, kas būtu paredzētas, piemēram, kāda noteikta tipa sūkņu stacijas vadībai, jo šādu mikroshēmu nepieciešamais skaits nevar būt liels.

No teiktā izriet, ka būtu vēlams izmantot universālas sarežģītas integrālās shēmas, kuras atkarībā no konkrētā pielietojuma varētu izpildīt visdažādākās funkcijas. Tāda uzdevuma nostādne noveda pie mikroprocesoru – informācijas ciparu apstrādes iekārtu ar maināmu darbības loģiku radīšanas.

Galvenā mikroprocesora īpatnība ir tā darbība pēc programmas, kas glabājas īpašā atmiņas iekārtā. Pietiek izmainīt programmu, un mikroprocesors izpildīs jau citu uzdevumu. Tādēļ arī mikroprocesors ir universāls automātiskās vadības sistēmas elements, kuru var izmantot visdažādākajām vajadzībām. Mikroprocesors, piemēram, ir personālo datoru galvenā sastāvdaļa, tas vada automobiļa dzinēja režīmu vai rūpnieciskā robota darbu. Ja sistēmas darbības loģiku nepieciešams izmainīt, parasti pietiek pārveidot tikai programmu.

Mikroprocesoru izgatavo vienas vai vairāku mikroshēmu veidā. Tā kā tas parasti nesatur atmiņas iekārtas programmu un datu glabāšanai, lai izveidotu darboties spējīgu iekārtu, bez paša mikroprocesora nepieciešamas arī citas sistēmas sastāvdaļas. Atkarībā no uzdevuma tādai sistēmai var būt dažāds sastāvs.

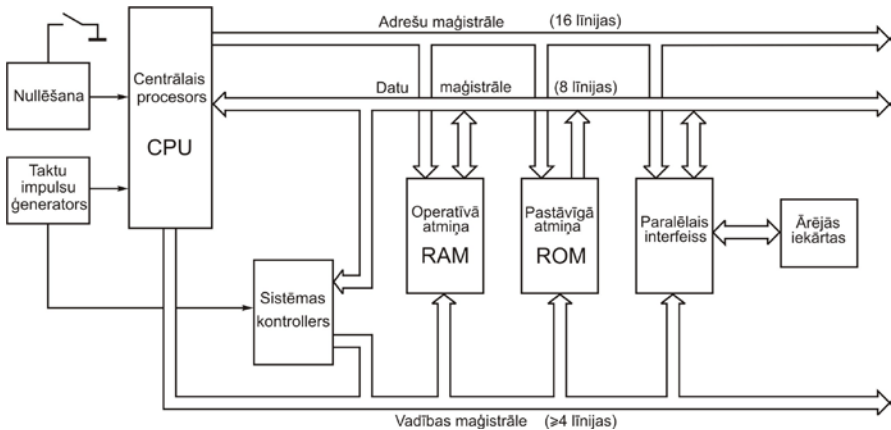
Mikroprocesoru sistēmām, kas paredzētas skaitļošanas operāciju veikšanai, ir samērā ietilpīga atmiņa, un tās komplektē ar atbilstošām ārējām iekārtām – displejiem, drukājamām ierīcēm u.c. Tādas mikroprocesoru iekārtas sauc par mikroskaitļotājiem. Ja mikroprocesoru izmanto ražošanas procesu vadībai, tad parasti nav nepieciešama liela atmiņas ietilpība. Nav vajadzīgas arī skaitļotājiem tipiskas ārējās iekārtas. Bieži tāda sistēma satur samērā maz elementu, bet dažreiz to var pat iebūvēt vadības iekārtā. Tādu mikroprocesoru iekārtu sauc par mikrokontrolleru.

5.2. Mikroskaitļotāja un mikrokontrollera uzbūve

Apskatīsim uz mikroprocesora I8080 bāzes izveidota mikrokontrollera vienkāršotu struktūrshēmu (47. zīm.). Bez paša mikroprocesora kā obligātas sastāvdaļas sistēmā ietilpst atmiņas iekārtas, kurās glabājas programmas un dati. Ārējās iekārtas (devējus, vadības pultis, indikatorspuldzes u.c.) sistēmai parasti pieslēdz caur īpašām saskaņošanas iekārtām – interfeisiem.

Mikroprocesors I8080 vienlaikus apstrādā binārus skaitļus, kuru garums ir 8 biti (t.i., skaitļus ar 8 kārtām). Tādu astoņu bitu bināro skaitli sauc par baitu. Dati zema vai augsta līmeņa sprieguma (nulļu vai vieninieku) veidā nonāk mikroprocesorā vai tiek izvadīti no tā pa astoņiem izvadiem (pavisam mikroshēmai ir 40 izvadu). Pie šiem izvadiem pieslēdz datu maģistrāli – astoņus vadus, pa kuriem mikroprocesors savienojas ar pārējiem sistēmas elementiem (atmiņas iekārtām, interfeisiem u.c.).

Tā kā visas atmiņas mikroshēmas un citas sistēmas sastāvdaļas pievienotas paralēli datu maģistrālei, nepieciešams kaut kādā veidā atšķirt vienu atmiņas iekārtas šūnu no citas vai vienu ārējo iekārtu no citas iekārtas. Tādēļ katrai astoņu kārtu atmiņas šūnai, kas glabā vienu informācijas baitu, tiek piešķirts noteikts numurs – adrese. Dažādas adreses ir arī visām ārējām iekārtām.



47. zīm. Mikrokontrolera blokshēma

Kad programmas izpildes gaitā mikroprocesoram jāvēršas pie kādas atmiņas šūnas, tas izvada adrešu maģistrālē noteiktu nulli un vieninieku kombināciju – vajadzīgās šūnas adresi. Tad datu maģistrālei pieslēdzas tikai šī šūna (pārējās atmiņas šūnas šajā laikā no datu maģistrāles ir atvienotas). Tāpēc katrā laika momentā mikroprocesors apmainās ar informāciju tikai ar vienu atmiņas šūnu vai ar vienu ārējo iekārtu.

Adrešu maģistrāle sastāv no 16 vadiem. Tā kā katram maģistrāles vadam var būt augsts vai zems potenciāls (tātad divi atšķirīgi stāvokļi), iegūstam adrešu maģistrāles atšķirīgo stāvokļu skaitu – $2^{16} = 2^6 \cdot 2^{10} = 64K$, kur $1K = 2^{10} = 1024$. Aplūkojamā mikroprocesora sistēma var saturēt atmiņas iekārtas ar kopējo ietilpību ne lielāku par 64K baitiem.

Bez adreses mikroprocesoram jāpaziņo atmiņas iekārtai arī tas, kāda operācija tiks veikta, – informācijas ierakstīšana atmiņā vai tās nolasīšana. Tā kā viena un tā pati adrese var būt piešķirta vienlaikus kādai atmiņas šūnai un arī kādai ārējai iekārtai, nepieciešami arī signāli, kas norāda iekārtas veidu, pie kuras mikroprocesors vēršas. Visus šos papildus signālus, kuri vada sistēmas darbu, mikroprocesors izvada sistēmas vadības maģistrālē. No vadības maģistrāles nepieciešamie vadības signāli nokļūst pie dažādām sistēmas iekārtām. Dažus vadības signālus formē īpaša iekārtā – sistēmas kontrolleurs.

Vadības maģistrālē var būt dažāds līniju skaits, bet parasti minimāli nepieciešamas četras. Pa šīm līnijām tiek pārraidīti signāli, kuri vada datu nolasīšanu no atmiņas iekārtām, datu ierakstīšanu atmiņā, datu ievadi no ārējām iekārtām un izvadi uz ārējām iekārtām.

Sistēmas darba sinhronizēšanai nepieciešams taktu impulsu ģenerators, kurš izstrādā impulsus ar 2 – 2,5 MHz frekvenci.

5.3. Atmiņas iekārtas

Mikroprocesora darbības programma un dati, kurus tas apstrādā, glabājas atmiņas iekārtās. Mikroprocesoru sistēmās izmanto divus pusvadītāju atmiņas iekārtu veidus – operatīvo atmiņu un pastāvīgo atmiņu.

Operatīvo atmiņu (brīvpieejas atmiņu) lieto gan informācijas ierakstīšanai, gan arī tās nolasīšanai. Tā, piemēram, ierakstot datu baitu operatīvajā atmiņā, mikroprocesors adresu maģistrālē izvada nepieciešamās atmiņas šūnas adresi, datu maģistrālē – atmiņā ierakstāmos datus un vadības maģistrālē – signālus, kas operatīvās atmiņas mikroshēmu pārslēdz datu ierakstīšanas režīmā.

Statiskajās operatīvās atmiņas mikroshēmās katra atmiņas šūna, kas var glabāt vienu informācijas bitu, izveidota kā triggers. Ierakstot informāciju, triggers pārslēdzas nulles vai vieninieka stāvoklī. Pēc tam šis stāvoklis saglabājas bez izmaiņām līdz brīdim, kad tiek ierakstīta jauna informācija. Operatīvās atmiņas mikroshēmai ar ietilpību 1K bitu tiek pievadītas adresu maģistrāles 10 jaunākās kārtas ($1K = 2^{10}$). Nepieciešamās atmiņas šūnas (vienas no 1024) izvēlei mikroshēmā ir iekšējs adreses dešifrators. Operatīvās atmiņas iekārtu var izveidot no astoņām mikroshēmām – pa vienai uz katru kārtu.

Ja atslēdz barošanas avotu, visa operatīvajā atmiņā ierakstītā informācija izzūd. Tādēļ operatīvo atmiņu parasti izmanto tikai skaitļošanas starprezultātu glabāšanai. Programmas visbiežāk glabājas cita tipa atmiņas iekārtās – pastāvīgajā atmiņā (lasāmatmiņā). Informāciju no pastāvīgās atmiņas var tikai nolasīt. Praktiski izmanto vairākus pastāvīgās atmiņas veidus. Dažās iekārtās, piemēram, mikrokalkulatoros, datus pastāvīgajā atmiņā ieraksta, mikroshēmu izgatavojot. Tāds paņēmiens izmantojams tikai tad, ja jāizgatavo liels skaits atmiņas mikroshēmu ar vienādu informāciju.

Ir arī pastāvīgās atmiņas mikroshēmas, kuras programmē lietotājs. Tādās mikroshēmās katrā atmiņas elementā ievietots viegli kūstošs drošinātājs, kuru informācijas ierakstīšanas procesā var pārdedzināt. Atkarībā no tā, vai šis drošinātājs ir atstāts vesels vai arī ir pārdedzināts, tāda atmiņas šūna satur informāciju 1 vai 0.

Plaši izmanto pastāvīgās atmiņas mikroshēmas ar informācijas elektrisko ierakstīšanu un ultravioleto dzēšanu. Šajās mikroshēmās katrs atmiņas elements satur īpašu MOP tranzistoru, kura aizvaram nav izvada. Informāciju ierakstot, ar paaugstinātu spriegumu tiek caursista izolācija, un aizvars uzlādējas. Pēc tam dielektriķis (silīcija dioksīds) pilnīgi atjauno savas izolatora īpašības, un lādiņš saglabājas ļoti ilgi (2 – 10 gadus). Nepieciešamības gadījumā ierakstīto informāciju var izdzēst, kristālu apstarojot ar ultravioletajiem stariem. Tādēļ mikroshēmas korpusā ir lodziņš.

5.4. Ārējo iekārtu pieslēgšana

Ārējās iekārtas parasti sistēmai pieslēdz caur saskaņošanas iekārtām – interfeisiem. Tas vispirms ir saistīts ar ārējo iekārtu – devēju, izpildorgānu, indikācijas iekārtu u.c. lielo daudzveidību. Ārējo iekārtu darbības ātrums ir samērā neliels, tādēļ interfeiss nepieciešams arī tādu iekārtu un ļoti ātrdarbīgā

mikroprocesora saskaņošanai. Visbiežāk izmanto paralēlo interfeisu, caur kuru vielaikus tiek pārraidīti visi astoņi biti.

Integrālo mikroshēmu sērijā bez paša mikroprocesora ietilpst arī paralēlais interfeiss ar trim ievades-izvades kanāliem. Katru no šiem kanāliem var ieprogrammēt informācijas ievadei vai arī tās izvadei. Šim nolūkam mikroshēmā ir vadības reģistrs, kurā sistēmas darba sākumā jāieraksta īpašs informācijas baits. Šis vadības vārds nosaka katra interfeisa kanāla uzdevumu. Tā, piemēram, kanālu A var ieprogrammēt informācijas ievadei, bet kanālus B un C – tās izvadei.

Katrs interfeisa kanāls satur astoņu kārtu reģistru. Ja tiek izpildīta datu izvades komanda, informācijas baits no mikroprocesora pa datu maģistrāli nonāk šajā reģistrā un saglabājas tur līdz jaunai izvades operācijai. Ja tādām interfeisa kanālam pieslēgtas ārējās iekārtas, piemēram, gaismas diodes indikācijai, tās saņems izvadīto informāciju.

Izmantojot interfeisa kanālu datu ievadei, mikroprocesors nolasa reģistra saturu, t.i., nolasa informāciju, kas reģistrā pienāk no ārējās iekārtas.

Vienam paralēlam interfeisam var pieslēgt 3 astoņu bitu ārējās iekārtas vai 24 neatkarīgas ievades-izvades līnijas. Ja šāds līniju skaits izrādās nepietiekams, mikroprocesora sistēmas maģistrālēm var pievienot vairākas interfeisa mikroshēmas.

Bez jau aplūkotajiem elementiem mikroprocesora sistēma (mikrokontrolers vai mikroskaiļotājs) parasti satur arī dažus citus, kuri struktūrshēmā nav parādīti. Noteiktas atmiņas mikroshēmas izvēlei izmanto adreses dešifratorus, kuriem pievada adresu maģistrāles vecākās kārtas (jaunākās kārtas pieslēdz tieši atmiņas mikroshēmai).

Dažreiz sistēmai papildus pieslēdz iekārtas speciālu funkciju veikšanai. Tā, piemēram, uzdotu laika intervālu iegūšanai izmanto taimerus. Bieži nepieciešams pārtraukumu kontrolers, kas organizē mikroprocesora pāreju uz citu programmu, ja parādās kāds ārējs signāls (piemēram, ja tiek nospiests vadības pults taustiņš). Pēc šīs jaunās programmas izpildes mikroprocesors atkal atgriežas uz pārtraukto programmu. Tā kā mikroprocesora izejas jauda nav liela, parasti ir nepieciešami adresu un datu maģistrāļu pastiprinātāji.

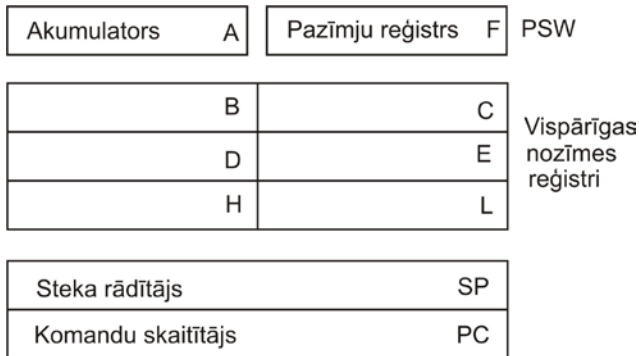
5.5. Mikroprocesora darbība

Mikroprocesors I8080 ir samērā sarežģīta iekārta, kas veic daudz dažādu funkciju. Galvenās no tām: aritmētiskās un loģiskās operācijas ar astoņu bitu datiem, sešpadsmit bitu atmiņas adreses (vai astoņu bitu ārējās iekārtas adreses) formēšana un tās izvade adresu maģistrālē, informācijas ievade un izvade caur datu maģistrāli u.c.

Izpildot lielāko daļu komandu, tiek izmantoti mikroprocesora iekšējie reģistri (48. zīm.). Galvenais reģistrs ir akumulators. Šajā astoņu bitu reģistrā nonāk aritmētisko un loģisko operāciju rezultāti, no akumulatora informācija tiek izvadīta uz ārējām iekārtām, bet, informāciju ievadot, datu baits tiek ievietots akumulatorā.

Bez akumulatora mikroprocesorā ir vēl 6 astoņu bitu reģistri – B, C, D, E, H un L, kurus sauc par vispārīgas nozīmes reģistriem. Mikroprocesora komandu sistēmā ietilpst arī tādas komandas, kuras operē ar sešpadsmit bitu datiem. Šādi dati

glabājas reģistru pāros – BC, DE, un HL. Reģistru pāri HL parasti ievieto sešpadsmit bitu adresi, vēršoties pie atmiņas.



48. zīm. Mikroprocesora I8080 reģistri

Steka rādītāju SP (*stack pointer*) izmanto, organizējot steka atmiņu (steku). Steka rādītājs satur tās atmiņas šūnas adresi, kurā ierakstīts pēdējais stekā ievietotais informācijas baits. Ierakstot stekā jaunu informāciju (noteikti divus baitus pēc kārtas), tā tiek novietota adresēs (SP)-1 un (SP)-2. Pēc tam steka rādītāja saturs (SP) samazinās par 2. Tas nozīmē, ka steka rādītājs atkal satur pēdējā ierakstītā baita adresi. Informāciju izņemot no steka, tiek nolasiṭi baiti, kas atrodas adresēs (SP) un (SP)+1, bet pēc tam steka rādītāja saturs palielinās par 2. Šo darbību analīze parāda, ka steka atmiņai ir šāda īpašība: kā pirmo vienmēr nolasa to baitu, kas stekā bija ierakstīts pēdējais. Steku parasti izmanto mikroprocesora reģistru satura saglabāšanai programmas pārtraukuma gadījumos un vēršoties pie apakšprogrammām.

Komandu skaitītājs PC (*program counter*) satur tās atmiņas šūnas adresi, kurā glabājas kārtējā izpildāmā komanda. Mikroprocesora darbības sākumā speciāla ārējā shēma izstrādā nomešanas impulsu, kas komandu skaitītāju iestāda nulles stāvoklī. Tas nozīmē, ka vispirms mikroprocesors izpilda to komandu, kurai atmiņā ir vismazākā (nulles) adrese. Pēc katra saņemtā komandas baita komandu skaitītāja saturs palielinās par vienu. Tādēļ arī komandas tiek izpildītas tādā secībā, kādā tās ierakstītas atmiņā. Šo dabisko secību var izmainīt ar komandām, kuras maina komandu skaitītāja saturu.

Pazīmju (arī – karodziņu) reģistram F (*flags*) ir speciāla nozīme – pieci tā biti satur informāciju par izpildītās operācijas rezultātiem. Izmantojot pazīmju reģistra saturu, var uzzināt, vai operācijas izpildes rezultāts bija pozitīvs, negatīvs vai arī vienāds ar nulli, vai bija pārnesums no vecākās kārtas utt. Šī informācija tiek izmantota, izpildot nosacītās pārejas komandas.

Mikroprocesora I8080 komandu garums var būt viens, divi vai trīs baiti. Jebkurā gadījumā pirmais komandas baits satur operācijas kodu, kas nosaka procesora izpildāmo funkciju veidu. Ja nepieciešams (tas atkarīgs no operācijas koda), mikroprocesors saņem no atmiņas vēl vienu vai divus baitus. Šie papildu

baiti satur atmiņas vai ārējās iekārtas adresi (ja komanda prasa vēršanos pie atmiņas vai ārējām iekārtām) vai datus, ar kuriem komanda operē.

Atkarībā no sarežģītības (galvenokārt no tā, cik reižu nepieciešams vērsties pie atmiņas) komandas izpildīšana prasa dažādu laiku. Īsās operācijas (piemēram, datu pārsūtīšana no viena reģistra uz otru, aritmētiskās operācijas u.c.) tiek izpildītas četros taktos periodos. Ja taktu impulsu frekvence ir 2 MHz, mikroprocesors vienā sekundē veic 500 000 tādu operāciju. Vidējais darbības ātrums gan būs mazāks, jo dažas komandas tiek izpildītas lēnāk.

5.6. Mikroprocesora programmēšana

Lai mikroprocesoru varētu izmantot automātikas iekārtās, nepieciešams sastādīt programmu. Parasti vajadzīgi šādi programmas veidošanas posmi: algoritma izstrādāšana, programmas uzrakstīšana, translācija, programmas skaņošana, programmas ierakstīšana pastāvīgajā atmiņā.

Principā programmu var rakstīt tieši mašīnas kodos, bet tas prasa daudz darba un viegli iespējams kļūdīties. Tādēļ parasti programmas raksta algoritmiskajās valodās. Plaši izmanto assemblera valodu, kur katram šīs valodas operatoram atbilst viena mikroprocesora komanda. Lai iegūtu programmu mašīnas kodos, pietiek katru assemblerā uzrakstītās programmas operatoru aizstāt ar tam atbilstošās komandas kodu un, ja nepieciešams, papildināt šo kodu ar komandas sastāvā esošajiem operandiem (adreses vai datiem).

Garas programmas mašīnas valodā parasti pārveido, izmantojot translatoru – speciālu programmu, kura pārveido algoritmiskā valodā uzrakstītu tekstu izpildīšanai derīgā programmā. Lai varētu izmantot mašīnas translāciju, nepieciešams mikroskaitļotājs ar pietiekami lielu operatīvo atmiņu, kas nokomplektēts ar nepieciešamajām ārējām iekārtām (piemēram, displeju programmas teksta ievadīšanai un kādu izvades iekārtu).

Bez assemblera programmu uzrakstīšanai izmanto arī citas algoritmiskās valodas, kuras sauc par augsta līmeņa valodām – Fortranu, Beisiku, PL/M. Šajā gadījumā katram valodas operatoram atbilst vairākas mikroprocesora komandas. Šajās valodās programmu sastādīt ir ievērojami vienkāršāk, bet translācijai noteikti nepieciešams dators ar attiecīgu matemātisko nodrošinājumu. Izmantojot augsta līmeņa valodas, grūti noteikt programmas izpildes laiku, bet tas var būt nepieciešams, ja mikroprocesors strādā kāda procesa vadības iekārtā.

Lai iegūtu priekšstatu par mikroprocesora komandām un programmu sastādīšanu, aplūkosim nelielu piemēru. Pieņemsim, ka nepieciešams ievadīt informāciju četru kārtu bināra skaitļa veidā (piemēram, no četriem pārslēgiem vadības pultī) un pieskaitīt šo skaitli datiem, kas glabājas operatīvās atmiņas desmit šūnās.

Turpmāk dots tādas programmas fragments, kas izpilda šīs darbības. Kreisajā pusē norādīta atmiņas adrese, kurā atrodas katras komandas pirmais baits (operācijas kods). Tālāk seko operācijas kods un pārējie viens vai divi komandas baiti (ja tie nepieciešami). Visi komandas baiti atmiņā tiek ievietoti pēc kārtas: ... DB 02 E6 0F 4F 06 0A ... Labajā pusē redzams programmas teksts assemblerā un komentāri.

Adrese	Komanda	Iezīme	Operācija	Komentāri
.....				
2300	DB 02		IN 02H	; baita ievade
2302	E6 0F		ANI 0FH	; četru jaunāko kārtu izdalīšana
2304	4F		MOV C,A	; akumulatora satura pārsūtīšana uz reģistru C
2305	06 0A		MVI B,0AH	; skaitļa 10 iesūtīšana reģistrā B
2307	21 00 20		LXI H,2000H	; atmiņas pirmās šūnas adreses iesūtīšana reģistru pārī HL
230A	7E	CKL:	MOV A,M	; atmiņas satura pārsūtīšana uz akumulatoru
230B	81		ADD C	; akumulatora un C reģistra satura saskaitīšana
230C	77		MOV M,A	; akumulatora satura pārsūtīšana uz atmiņu
230D	23		INX H	; adreses palielināšana par 1
230E	05		DCR B	; B reģistra satura samazināšana par 1
230F	C2 0A 23		JNZ CKL	; ja B≤0 (cikls vēl nav beidzies), pāreja uz adresi 230AH
.....				

Adrešu, komandu un datu pierakstam apskatāmajā piemērā izmantota sešpadsmitiskā (heksadecimālā) skaitīšanas sistēma. Šim nolūkam baitu sadala uz pusēm un katru pusi attēlo ar vienu heksadecimālo zīmi. Tā, piemēram, astoņu kārtu bināro skaitli 11110010 pieraksta kā F2H. Šeit burts H skaitļa beigās nozīmē heksadecimālo pierakstu. Ciparus no 10 līdz 15 attēlo ar burtiem no A līdz F. Viena baita pierakstam nepieciešami divi heksadecimālie cipari. Tā kā atmiņas adrese aizņem sešpadsmit kārtas (divus baitus), to pieraksta ar četriem heksadecimālajiem cipariem.

Pirmā komanda IN 02H (operācijas kods DB) ievada akumulatorā datu baitu no ārējās iekārtas ar adresi 02. Nākamā komanda ANI 0FH izpilda loģisko operāciju UN. Divi operandi, kas piedalās šajā operācijā ir akumulatora saturs un skaitlis, kas tieši dots komandā – 0FH. Pēdējais skaitlis binārajā formā ir 00001111. Tā kā loģiskais reizinājums ar nulli rezultātā arī dod loģisko nulli (sk. 40. zīm. a), pēc šīs komandas izpildīšanas vecākās četras kārtas akumulatorā aizpildīsies ar nullēm (t.i., paliks tikai četras jaunākās kārtas). Šī operācija nepieciešama tādēļ, ka mums bija jāievada tikai četru kārtu skaitlis. Attiecīgā interfeisa kanāla pārējās četras kārtas var būt pievienotas citām ievades iekārtām (piemēram, devējiem), tādēļ ievadītā baita četras vecākās kārtas jāatdala nost.

Nākamā komanda MOV C,A pārsūta datus no akumulatora uz reģistru C (šie dati saglabājas arī akumulatorā). Tātad, turpmāk reģistrā C atradīsies skaitlis, kurš jāpieskaita desmit atmiņas šūnu saturam.

Lai organizētu vairākkārtēju dažu tālāko komandu atkārtošānu, šo ciklu skaitu (10) iesūtām reģistrā B. Operāciju veic komanda MVI B,0AH (heksadecimālajā skaitīšanas sistēmā skaitli 10 attēlo ar burtu A).

Komanda LXI H,2000H iesūta reģistru pārī HL tā atmiņas iecirkņa pirmā baita adresi, kur glabājas mūs interesējošie dati. Šeit pieņemts, ka šie desmit skaitļi ierakstīti atmiņas šūnās ar adresēm no 2000H līdz 2009H.

Komanda MOV A,M pārsūta datus no atmiņas šūnas, kuras adrese atrodas reģistru pārī HL (t.i., no šūnas ar adresi 2000H) uz akumulatoru.

Aritmētiskā komanda ADD C izpilda saskaitīšanas operāciju – saskaita akumulatora un reģistra C saturu un rezultātu ievieto akumulatorā. Pēc tam šos datus komanda MOV M,A nosūta atpakaļ uz atmiņu ar to pašu adresi, kas atrodas reģistru pārī HL.

Komanda INX H reģistru pāra HL saturu palielina par vienu, t.i., pēc šīs komandas izpildīšanas reģistru pārī HL būs nākamās atmiņas šūnas adrese.

Komanda DCR B no reģistra B satura atskaita vieninieku. Ja pēc tam reģistrā B izrādīsies nulle, viens pazīmju reģistra bits tiks iestādīts vieninieka stāvoklī. Šo informāciju pēc tam var izmantot nosacītās pārejas komandās. Pie tādām pieder pēdējā komanda šajā piemērā – JNZ CKL. Izpildot šo komandu, tiek analizēts nulles rezultāta bits pazīmju reģistrā. Ja iepriekšējās operācijas rezultāts nebija nulle, tad notiek pāreja uz komandā norādīto adresi, t.i., uz adresi, kas apzīmēta ar iezīmi CKL (230AH). Ja, turpretim, rezultāts būs nulle (tas nozīmē, ka cikls beidzies), tiek izpildīta nākamā komanda.

6. ELEKTRISKĀS ENERĢIJAS PĀRVEIDOTĀJI

Elektrostacijās uzstādītie sinhronie ģeneratori dod maiņstrāvu. Maiņstrāva pa elektropārvades līnijām tiek piegādāta patērētājiem. Tomēr daudzi patērētāji paredzēti citiem elektriskās enerģijas veidiem, piemēram, līdzstrāvai vai maiņstrāvai, kuras frekvence atšķiras no 50 Hz. Tādēļ nepieciešami arī elektriskās enerģijas pārveidotāji.

Vecākais paņēmieni, kā maiņstrāvas enerģiju pārvērst līdzstrāvas enerģijā, ir līdzstrāvas ģenerators izmantošana. Praktiski šim nolūkam nepieciešamas divas mašīnas – dzinējs (asinhronais vai sinhronais) un līdzstrāvas ģenerators. Kopējais iekārtas lietderības koeficients ir zems, gabarīti lieli un lieli ir arī ekspluatācijas izdevumi. Pāšlaik šādu līdzstrāvas iegūšanas metodi lieto ļoti reti. Izmantojot pusvadītāju ierīces – diodes un tiristorus, var samērā vienkārši un ekonomiski elektrisko enerģiju no viena veida pārveidot otrā. Iespējams arī pārveidot līdzstrāvu maiņstrāvā, kas var būt nepieciešams patērētājiem, kuri saņem elektrisko enerģiju no autonomiem avotiem, piemēram, no akumulatoriem. Šajā nodaļā apskatīti daži biežāk izmantotie enerģijas pārveidotāji.

6.1. Taisngrieži

Taisngrieža uzdevums ir pārveidot maiņstrāvu līdzstrāvā. Jebkura taisngrieža obligāta sastāvdaļa ir viens vai vairāki ventīļi – ierīces, kas laiž strāvu tikai vienā virzienā, piemēram, diodes, tiristori u.c. Bez tam parasti taisngriežī ietilpst transformators maiņstrāvas sprieguma transformēšanai un vajadzības gadījumā arī fāžu skaita izmaiņai. Dažos gadījumos, kad slodzes spriegumam un strāvai nedrīkst būt pulsācijas, taisngrieža izejā pieslēdz gludinātājfiltro.

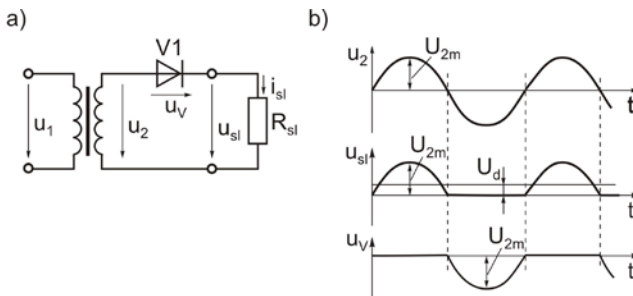
Atkarībā no izmantotās maiņstrāvas veida izšķir vienfāzes un trīsfāžu taisngriežus. Visplašāk lieto nevadāmus taisngriežus, kam izejas spriegums nav regulējams. Ja izejas spriegums jāmaina, var izmantot vadāmo taisngriezi.

Analizējot dažādu taisngriežu shēmu darbību, turpmāk pieņemts, ka spriegums uz atvērta diodes vienāds ar nulli. Netiek ievērotas sproststrāvas, diodes un transformatora tinumu pretestības.

6.1.1. Vienfāzes taisngrieži

Vienkāršākā vienfāzes taisngrieža shēma ir viena pusperioda shēma (49. zīm. a). Viena pusperioda laikā (kad spriegums u_2 pozitīvs) diode ir atvērta un viss spriegums u_2 pielikts slodzei. Otrā pusperioda laikā diode aizvērta un spriegums pielikts diodei. Vidējo taisngrieztā sprieguma vērtību U_d var noteikt, integrējot slodzes sprieguma izteiksmi:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_0^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{\pi}. \quad (33)$$

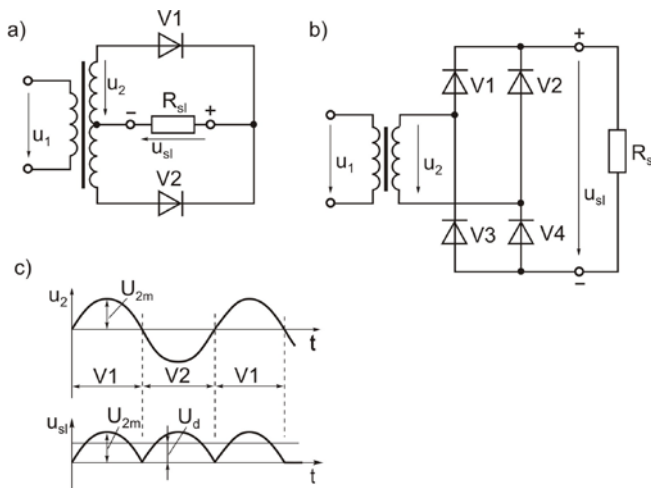


49. zīm. Vienfāzes viena pusperioda taisngriezis:
a – shēma; b – spriegumu diagrammas

Shēmas trūkums ir lielas taisngrieztā sprieguma pulsācijas, kuras grūti nogludināt. Bez tam transformatora sekundārajā tinumā plūst ne tikai maiņstrāva, bet arī līdzstrāva, kas var novest pie transformatora magnētva da piesātināšanās. Šo trūkumu dēļ shēmu lieto reti.

Divu pusperiodu taisngriežus var izveidot ar transformatora neitrāles izvadu vai lietojot tilta shēmu (50. zīm.). Abos gadījumos slodzes sprieguma forma ir viena un tā pati. Taisngrieztā sprieguma vidējā vērtība

$$U_d = \frac{2}{\pi} U_{2m} . \quad (34)$$



50. zīm. Vienfāzes divu pusperiodu taisngrieži: a – ar transformatora neitrāles izvadu; b – tilta shēma; c – spriegumu diagrammas

Shēmā ar transformatora neitrāles izvadu sprieguma u_2 pozitīvā pusperioda laikā atvērta diode V1, bet negatīvā pusperioda laikā – diode V2. Kad diode aizvērta, tai pieliktā sprostsprieguma maksimālā vērtība ir $2U_{2m}$ (pilns transformatora sekundārā tinuma abu pušu spriegums).

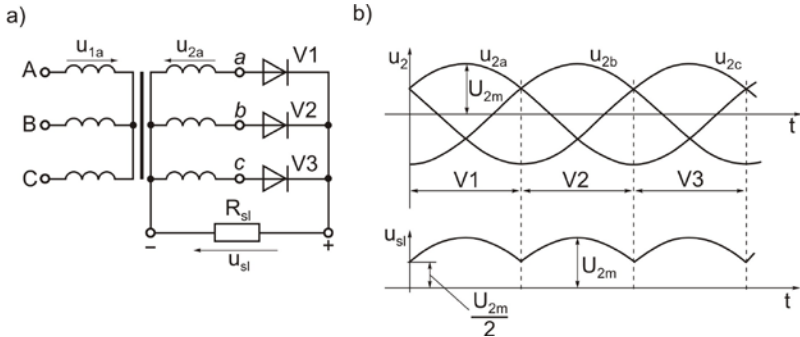
Tilta shēmā u_2 pozitīvā pusperioda laikā atvērta diodes V1 un V3. Tātad strāva plūst caur divām virknē saslēgtām diodēm. Aizvērto diožu maksimālais sprostspriegums ir U_{2m} , tātad mazāks nekā iepriekšējā shēmā. Kaut gan tilta shēma satur vairāk diožu, tomēr tā tiek lietota biežāk, jo diožu sprostspriegums ir mazāks un transformators tiek izmantots labāk.

6.1.2. Trīsfāžu taisngrieži

Trīsfāžu strāvas taisngriešanai izmanto vairākas shēmas. Šeit aplūkosim tikai divas no tām: shēmu ar transformatora neitrāles izvadu un trīsfāžu tilta shēmu.

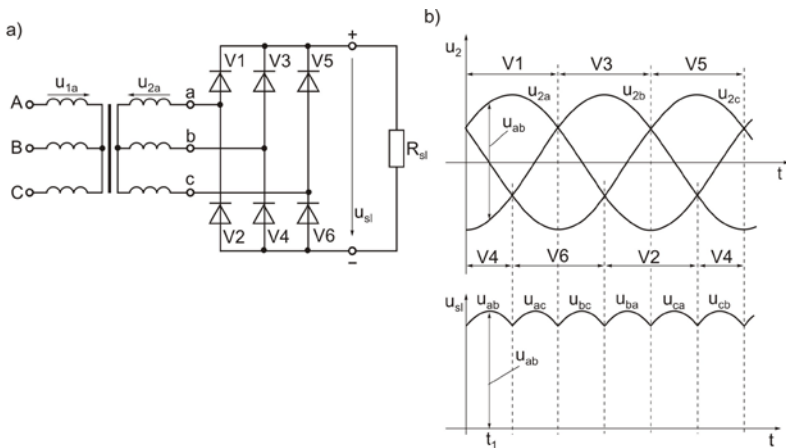
Trīsfāžu taisngriezī ar transformatora neitrāles izvadu (51. zīm.) katrā fāzē ieslēgta viena diode. Slodzi pieslēdz starp diožu un transformatora neitrālēm.

Shēmas darbības raksturīga īpatnība ir tā, ka jebkurā momentā atvērta ir tikai viena diode – tā kuras anodam šai laikā ir visaugstākais potenciāls. Ja, piemēram, kaut kādā momentā punkta *a* potenciāls ir +300 V, bet punkta *b* potenciāls +200 V, tad atveras tikai diode V1. Diode V2 ir aizvērta, kaut gan tās anoda potenciāls ir pozitīvs, jo atvērta diodes V1 gadījumā visu trīs diožu katodu potenciāls arī ir +300 V – tātad diodei V2 pielikts 100 V liels sprostspriegums.



51. zīm. Trīsfāžu taisngriezis ar transformatora neitrāles izvadu; a – shēma; b – spriegumu diagrammas

Slodze jebkurā momentā saņem tās fāzes spriegumu, kuras diode atvērta. Katra diode strāvu vada vienu trešo daļu perioda.



52. zīm. Trīsfāžu taisngrieža tilta shēma: a – shēma; b – spriegumu diagrammas

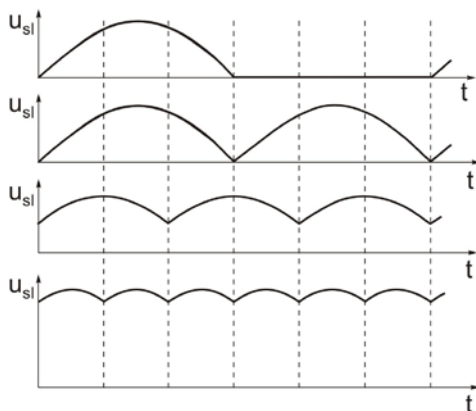
Trīsfāžu tilta shēmā (52. zīm.) ieslēgtas 6 diodes, kas sadalītas divās grupās. Tāpat kā iepriekšējā gadījumā, no trim kopā savienotām diodēm katrā laika

momentā atvērta tikai viena – tā, kuras anodam pievadīts visaugstākais potenciāls, un tā, kuras katodam pievadīts viszemākais potenciāls. Tā, piemēram, laika momentā t_1 atvērta diodes V1 un V4, tāpēc slodze saņem līnijas spriegumu u_{ab} (diagrammā šis spriegums parādīts ar bultiņu).

Trīsfāžu tilta shēmu lieto biežāk, jo ievērojami labāk šai gadījumā tiek izmantots transformators. Shēmu ar transformatora neitrāles izvadu lielas jaudas taisngriežos vispār nevar izmantot, jo transformatora visu fāžu tinumos plūst vienā virzienā vērstas strāvas, kas izsauc transformatora darba pasliktināšanos. Tilta shēma dod mazākas pulsācijas.

6.1.3. Taisngrieztā sprieguma pulsācijas un filtri

Taisngrieža izejā iegūstam nevis tīru līdzspriegumu, bet gan pulsējošu spriegumu, kurš satur gan līdzsprieguma, gan arī maiņsprieguma komponenti. Sprieguma forma apskatītajām taisngriežu shēmām salīdzināšanai dota 53. zīmējumā.



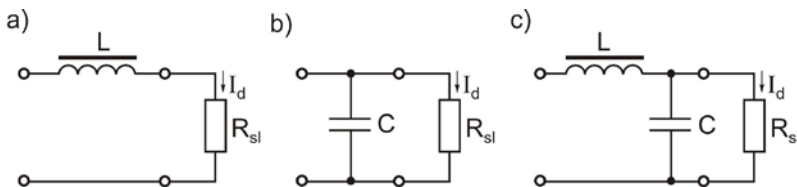
53. zīm. Dažādu taisngriežu shēmu izejas sprieguma forma:

- a – vienfāzes viena pusperioda; b – vienfāzes tilta;
- c – trīsfāžu ar transformatora neitrāles izvadu; d – trīsfāžu tilta

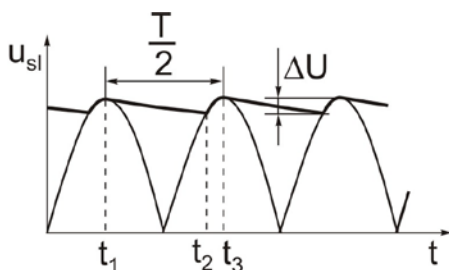
Lai sprieguma pulsācijas samazinātu, starp taisngriezi un slodzi ieslēdz gludinātājfiltu. Vienkāršākās gludinātājfiltu shēmas parādītas 54. zīmējumā.

Induktīvais filtrs laiž cauri līdzstrāvu, bet samazina maiņstrāvas komponentes, pie tam, jo augstāka frekvence, jo lielāka filtra induktīvā pretestība. Filtrs labi nogludina strāvas līkni tikai tad, ja ir lielas slodzes strāvas. Tukšgaitā filtrs nestrādā.

Kapacitīvais filtrs laiž cauri uz slodzi strāvas nemainīgo komponenti I_d , bet mainīgās komponentes galvenokārt aizplūst caur kondensatoru. 55. zīmējumā parādīta sprieguma forma uz slodzes (un tāpat arī uz kondensatora C), ja izmantota vienfāzes divu pusperiodu taisngrieža shēma ar kapacitīvu filtru.



54. zīm. Gludinātājfiltro shēmas: a – induktīvā; b – kapacitīvā; c – LC filtra



55. zīm. Sprieguma forma uz kapacitīva filtra kondensatora

Kondensators uzlādējas līdz barojošā transformatora sekundārā sprieguma amplitūdas vērtībai. Laika momentā t_1 , kad pievadītais spriegums sāk samazināties, tas kļūst mazāks par spriegumu uz kondensatora, tādēļ taisngrieža diodes aizveras (šajā gadījumā tām pielikts sprostsprriegums). Tad kondensators sāk izlādēties caur slodzi ar laika konstanti $\tau = R_{sl}C$. Momentā t_2 diodes atveras un kondensators atkal uzlādējas līdz amplitūdas vērtībai.

Lai noteiktu slodzes sprieguma izmaiņu ΔU , var aptuveni pieņemt, ka kondensators izlādējas visa pusperioda laikā (no t_1 līdz t_3) ar nemainīgu strāvu I_d (patiesībā šī strāva arī pulsē). Tad laika intervālā $T/2$ kondensatora lādiņš samazināsies par vērtību $\Delta q = I_d \cdot T/2$, un, tātad, spriegums samazināsies par

$$\Delta U = \frac{\Delta q}{C} = \frac{I_d T}{2C} = \frac{I_d}{2fC}. \quad (35)$$

Šo formulu var izmantot, lai noteiktu nepieciešamo filtra kondensatora kapacitāti, ja zināma slodzes strāva un uzdots pieļaujamais sprieguma pulsācijas līmenis ΔU . Jāpiebilst, ka taisngriezim ar kapacitīvo filtru nevar piemērot formulu (34), bet jāuzskata, ka

$$U_d \approx U_{2m}. \quad (36)$$

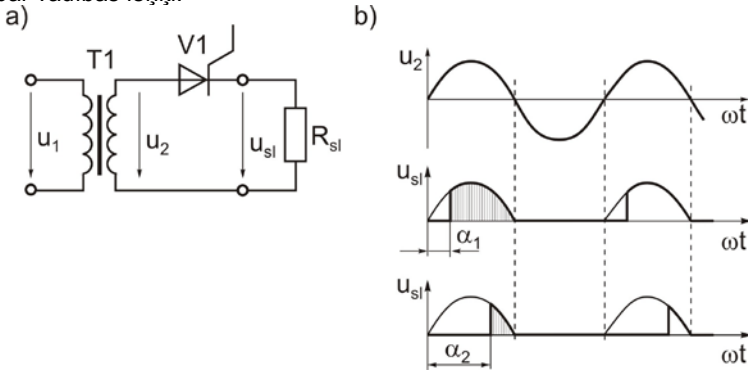
Kapacitīvais filtrs sevišķi labi strādā pie mazas slodzes un tukšgaitā. Ja palielinās slodzes strāva, kondensators izlādējas ātrāk, un saskaņā ar formulu (35) pulsācijas palielinās.

LC filtrā it kā apvienoti induktīvais un kapacitīvais filtrs. Šai gadījumā pulsācijas būs mazākas kā iepriekš apskatītajos filtros.

Visi filtri strādā labāk, ja pulsāciju frekvence augstāka. Salīdzinot 53. zīmējumā parādītās spriegumu līknes, redzam, ka visaugstākā pulsāciju pirmās harmoniskās frekvence (sešas reizes lielāka par tīkla sprieguma frekvenci) ir trīsfāžu tilta shēmai. Bez tam pulsāciju amplitūda šeit vismazākā. Tādēļ, ja vēlam iegūt spriegumu ar ļoti mazām pulsācijām, vislabāk izmantot tieši šo shēmu.

6.1.4. Vadāmie taisngrieži

Vadāmos taisngriežus izmanto, ja nepieciešams regulēt slodzes spriegumu. Šai gadījumā var lietot visas iepriekš apskatītās shēmas, vienīgi nevadāmo diožu vietā jāieslēdz vadāmās diodes – tiristori. Kā piemēru apskatīsim viena pusperioda vadāmā taisngrieža darbību aktīvas slodzes gadījumā (56. zīm.). Shēmā nav parādīts tiristora vadības bloks – iekārta, kurā tiek izstrādāti impulsi tiristora atvēršanai. Šie impulsi jāformē sinhroni ar maiņstrāvas frekvenci un tiem jābūt nobīdītiem fāzē attiecībā pret pozitīvā pusperioda sākumu par leņķi α . Šo leņķi sauc par vadības leņķi.



56. zīm. Vienfāzes viena pusperioda vadāmais taisngriezis:
a – shēma; b – spriegumu diagramma

Momentā, kad tiristora vadības elektrodam pienāk impulss, tiristors atveras un slodze saņem to spriegumu, kāds šai brīdī ir uz transformatora sekundārā tunuma. Tiristors aizveras, kad spriegums samazinās līdz nullei. 56. zīmējumā b parādīta slodzes sprieguma līkne, ja ir divi dažādi vadības leņķi. Taisngrieztā sprieguma vidējo vērtību var iegūt, integrējot izejas spriegumu no α līdz π un dalot ar periodu:

$$U_d = \frac{1}{2\pi} \int_{\alpha}^{\pi} U_{2m} \sin \omega t \, d(\omega t) = \frac{U_{2m}}{2\pi} (1 + \cos \alpha). \quad (37)$$

Redzam, ka, izmainot vadības leņķi no nulles līdz 180° , taisngrieztā sprieguma vidējā vērtība mainās no maksimuma U_{2m}/π līdz nullei.

Vadāmo taisngriežu trūkums ir palielinātais pulsāciju līmenis. Pulsācijas kļūst lielākas, palielinoties vadības leņķim α . Pie lielāka vadības leņķa jaudas koeficients $\cos \varphi$ samazinās (palielinās fāžu nobīdes leņķis starp spriegumu un strāvu).

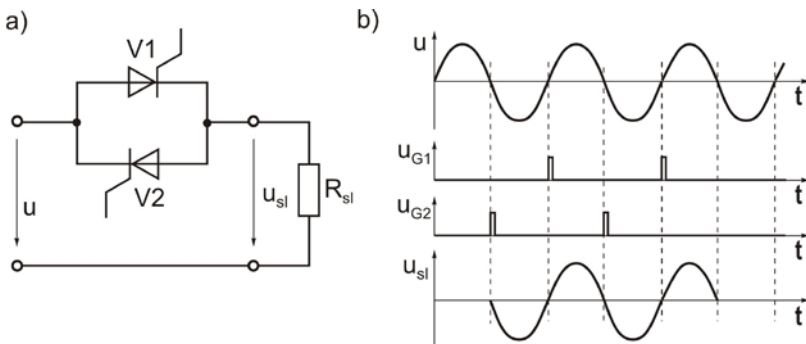
6.2. Statiskie slēdži un sprieguma regulatori

Būtisks visu elektrisko slēdžu trūkums ir to kontaktu bojāšanās ekspluatācijas laikā. Atslēdzot ķēdi, kura satur induktīvus elementus, starp slēdža kontaktiem rodas elektriskais loks. Tādēļ slēdža kontakti apdeg. Izmantojot ķēdes ieslēgšanai tiristorus, iespējams izveidot bezkontakta slēdžus, kuru darbība ir ievērojami drošāka.

Bieži rodas arī nepieciešamība regulēt slodzei pievadāmo spriegumu. To var izdarīt, piemēram, ar regulējamu transformatoru maiņstrāvas ķēdē vai ar reostatu līdzstrāvas ķēdē. Kopējs šo paņēmieni trūkums ir kustīgie mehāniskie kontakti un lielle enerģijas zudumi, izmantojot reostatus. Modernā elektronika dod iespēju izveidot sprieguma regulatorus bez kustīgiem kontaktiem.

6.2.1. Maiņstrāvas slēdži

Maiņstrāvas ķēdē slēdzim jālaiž cauri strāva abos virzienos. To var panākt, ieslēdzot virknē ar slodzi divus paralēli savienotus tiristorus (57. zīm.).



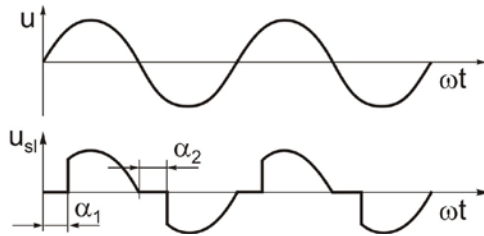
57. zīm. Maiņstrāvas tiristor-slēdzis: a – shēma; b – spriegumu diagramma

Positīvā pusperioda laikā strāvu vada tiristors $V1$, negatīvā – $V2$. Tiristori atveras tikai tad, ja to vadības elektrodiem attiecīgā pusperioda sākumā pievada vadības signālus u_{G1} un u_{G2} . Tiristori atveras, tikko tas saņem vadības signālu, un aizveras pusperioda beigās, kad spriegums kļūst vienāds ar nulli. Ja šai momentā atver otru tiristoru, slodze saņem sprieguma nākošo pusperiodu. Lai ķēdi pārtrauktu, jāpārtrauc vadības signālu padeve tiristoriem.

6.2.2. Maiņstrāvas regulatori

Lai izmainītu slodzes spriegumu maiņstrāvas ķēdē, var izmantot tiristor-slēdža shēmu (sk. 57. zīm. a). Slēdža gadījumā tiristoriem vadības signāli pienāk katra

pusperioda sākumā. Ja šo shēmu izmanto kā sprieguma regulatoru, vadības blokam jāstrādā citādi – vadības signāliem jābūt aizturētiem attiecībā pret pusperioda sākumu. Atbilstošās spriegumu diagrammas attēlotas 58. zīmējumā.



58. zīm. Maiņsprieguma regulatora laika diagrammas

Abu tiristoru vadības leņķiem α_1 un α_2 jābūt vienādiem, pretējā gadījumā sprieguma līknē parādīsies līdzstrāvas komponente. Mainot vadības leņķi, iespējams izmainīt sprieguma efektīvo vērtību. Šāda tiristoru regulatora trūkums ir nesinusoidālā izejas sprieguma forma.

Bieži maiņstrāvas slēdžos un regulatoros divu tiristoru vietā izmanto vienu pusvadītāju ierīci – simetrisko tiristoru (to sauc arī par simistoru vai triaku). Šim tiristoram ir simetriska voltampēru raksturliktne, un tas var vadīt strāvu abos virzienos.

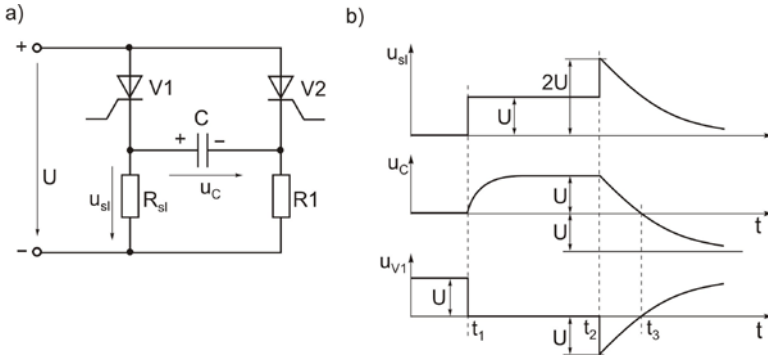
6.2.3. Līdzstrāvas slēdži

Līdzstrāvas ķēdēs galvenā problēma saistīta ar tiristoru atslēgšanu – maiņstrāvas ķēdē tiristors pārstāj vadīt strāvu pusperioda beigās, turpretim līdzstrāvas gadījumā tiristora izslēgšanās jāpanāk citā veidā. Ar vadības signālu tiristoru var tikai ieslēgt. Tiristora izslēgšanai parasti izmanto iepriekš uzlādētu kondensatoru, ko vajadzīgajā brīdī pieslēdz tiristoram paralēli – tā, lai tam būtu pielikts sprostspriegums. Kondensatoru var pieslēgt, atverot otru – dzēšanas tiristoru.

Līdzstrāvas tiristor-slēdža shēma dota 59. zīmējumā. Shēma satur galveno tiristoru V1, ar kuru slodzi R_{sl} pieslēdz spriegumam. Galvenā tiristora atslēgšanai paredzēts komutējošais kondensators C1, dzēšanas tiristors V2 un palīgrezistors R1. Slodzes ieslēgšanai tiristora V1 vadības elektrodām pievada vadības impulsu (moments t_1). Tiristors atveras, un slodze saņem pilnu spriegumu U. Vienlaikus pa ķēdi "+", V1, C1, R1, "-" uzlādējas kondensators C1 (sprieguma polaritāte uz tā parādīta shēmā).

Kad slodze jāatslēdz (moments t_2), padod vadības impulsu tiristoram V2, kuram atveroties, uzlādētais kondensators izrādās pieslēgts paralēli tiristoram V1, pie tam ar pozitīvo izvadu pie katoda, bet ar negatīvo – pie anoda. Tādēļ šai mirklī tiristors V1 aizveras, bet kondensators sāk pārlādēties uz pretēju polaritāti pa ķēdi "+", V2, C1, R_{sl} , "-". Pārlādes procesā mainās arī spriegums uz tiristora V1.

Kondensatora kapacitāte jāizvēlas tik liela, lai sprostsprieguma pielikšanas laiks (no t_2 līdz t_3) būtu lielāks par tiristora izslēgšanās laiku t_G . Jāpiebilst, ka atslēgšanas momentā spriegums uz slodzes dubultojas – tas kļūst vienāds ar barošanas avota un uzlādētā kondensatora spriegumu summu.

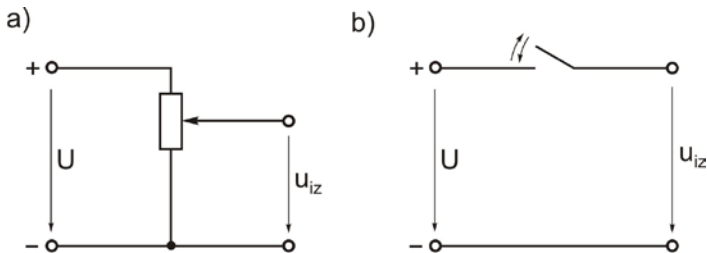


59. zīm. Līdzstrāvas tiristorslēdzis: a – shēma; b – spriegumu diagramma

Kad pārlādes procesā kondensatora spriegums sasniedz sprieguma U vērtību, strāva caur kondensatoru izbeidzas. Parasti vēlams, lai tiristors $V2$ pēc tam izslēgtos. Tad rezistora $R1$ pretestība jāizvēlas pietiekami liela, lai strāva caur to būtu mazāka par tiristora izslēgšanās strāvu.

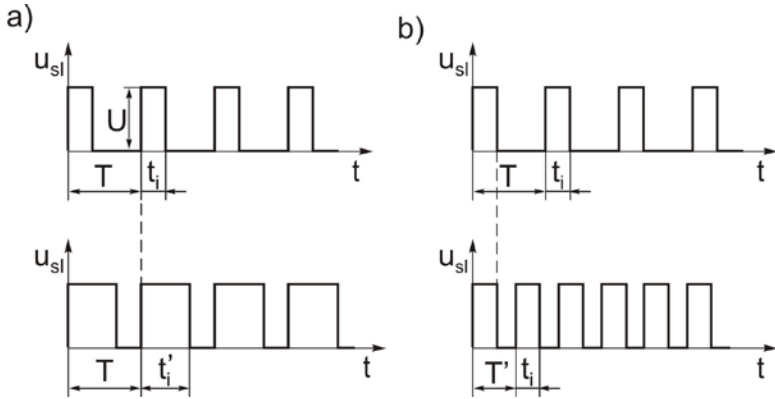
6.2.4. Līdzsprieguma regulatori (impulsregulatori)

Slodzes spriegumu līdzstrāvas ķēdē var regulēt, piemēram, ar potenciometru (60. zīm. a). Šādas shēmas normālam darbam nepieciešams, lai strāva potenciometra rezistorā $R1$ būtu lielāka par slodzes strāvu, bet, ievērojot šo noteikumu, potenciometrā zūd lielākā daļa pievadītās enerģijas. Tāpēc sprieguma regulēšanai lielas jaudas ķēdēs šis paņēmiens neder.



60. zīm. Līdzsprieguma regulēšanas paņēmieni:
a – ar potenciometru; b – periodiski ieslēdzot un atslēdzot slēdzi

Cits regulēšanas veids shēmatiski attēlots 60. zīmējumā b – slēdzi periodiski ieslēdzot un atslēdzot, līdzspriegumu pārveido sprieguma impulsos. Mainot impulsa vai pauzes ilgumu, iespējams izmainīt sprieguma vidējo vērtību. 61. zīmējumā parādīti divi sprieguma impulsregulēšanas paņēmieni. Impulsa un pauzes ilguma attiecību var izmainīt, regulējot impulsa ilgumu, bet nemainot to frekvenci. Impulsa ilgumu var arī nemainīt, bet, izmainot frekvenci, izmainīt pauzes ilgumu.



61. zīm. Sprieguma impulsregulēšanas veidi:
a – impulsu ilguma regulēšana; b – impulsu frekvences regulēšana

Izejas sprieguma vidējo vērtību var iegūt, integrējot slodzes sprieguma līkni. Ja ir taisnstūra formas impulsi,

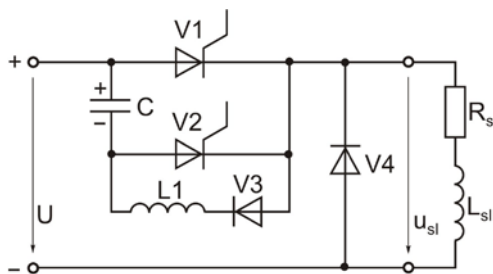
$$U_{\text{vid}} = U_m \frac{t_i}{T}, \quad (38)$$

kur U_m – impulsa amplitūda, kas vienāda ar regulatora ieejai pievadīto spriegumu.

60. zīmējumā b parādītā slēdža vietā var izmantot 6.2.3. p. apskatīto tiristor-slēdzi (sk. 59. zīm.). Augstāku frekvenču gadījumā tomēr nepieciešams panākt, lai kondensatora pārlādes procesi norisinātos ātrāk. Tādēļ praksē parasti lieto citas shēmas.

Viena no impulsregulatoru shēmām parādīta 62. zīmējumā. Ieslēdzot tiristoru V1, spriegums tiek pievadīts slodzei. Tiristora V1 aizvēršanai izmantota komutācijas shēma, kura satur komutējošo kondensatoru C1, dzēšanas tiristoru V2 un komutējošā kondensatora pārlādes kontūru L1, V3. Diode V4 (to sauc arī par izlādes diodi) vajadzīga tikai tad, ja slodze ir induktīva. Tad laikā, kad galvenais tiristors V1 aizvērts (pauze), slodzes strāva plūst caur diodi V4.

Shēmas darbības sākumā jāuzlādē komutējošais kondensators, atverot dzēšanas tiristoru V2. Kondensators uzlādējas pa ķēdi "+", C1, V2, R_{sl}, L_{sl}, "-" līdz tīkla sprieguma vērtībai U. Pēc tam tiristors V2 aizveras, jo strāva caur to izbeidzas.



62. zīm. Impulsregulatora shēma

Atverot galveno tiristoru V1, vienlaikus ar slodzes pieslēgšanos spriegumam sākas kondensatora izlāde pa ķēdi +C1, V1, V3, L1, -C1. Tā kā šajā kontūrā pretestība ir maza, izlādei būs svārstību raksturs. Pēc tam, kad kondensators būs izlādējies līdz nullei, induktivitātē L1 uzkrātā enerģija uzturēs strāvu iepriekšējā virzienā, tādēļ kondensators pārlādēsies uz pretēju polaritāti. Pēc tam strāva mainīs virzienu, bet tādā gadījumā diode V3 aizvērsies un kondensators paliks uzlādēts ar polaritāti, kas pretēja zīmējumā norādītajai.

Atverot dzēšanas tiristoru V2, kondensators C1 pieslēdzas paralēli galvenajam tiristoram V1, to aizverot. Pēc tam kondensators atkal no jauna uzlādējas caur slodzi, un shēma ir sagatavota jaunam ciklam.

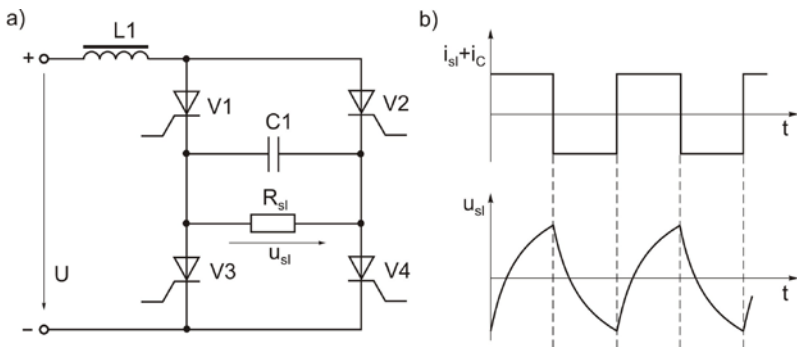
Ja ir aktīva slodze, tās sprieguma impulsa forma ir līdzīga 59. zīmējumā parādītajai.

6.3. Invertori

Invertors ir elektroniska iekārta, kura pārveido līdzstrāvu maiņstrāvā. Tātad, invertora darbība ir pretēja taisngrieža darbībai. Mazjaudas ietaisēs (ar jaudu līdz dažiem desmitiem vatu) parasti izmanto tranzistoru invertorus. Lielas jaudas elektroietaisēs kā komutējošos elementus var lietot tiristorus.

Izšķir divu veidu invertorus – ar maiņstrāvas tīklu saistītos un autonomos. Pirmie strādā kopā ar maiņstrāvas tīklu, nododot līdzstrāvas avota enerģiju šajā tīklā. Šāda invertora shēma ir tāda pati kā vadāmam taisngriezim. Ja, piemēram, līdzstrāvas dzinējs enerģiju saņem caur vadāmu taisngriezi, tad dzinēja bremsēšanai taisngriezi var pārslēgt invertēšanas režīmā. Tādēļ nepieciešams izmainīt vadības leņķus un dzinēja inducētā EDS polaritāti (piemēram, izmainot ierosmes strāvas virzienu). Tad dzinējs sāks strādāt ģeneratora režīmā, pārveidojot rotējošo masu kinētisko enerģiju elektriskajā, bet pēdējā caur invertoru tiks nodota atpakaļ maiņstrāvas tīklā. Modernajās regulējamās elektropiedziņas sistēmās plaši izmanto šādu rekuperatīvo bremsēšanu.

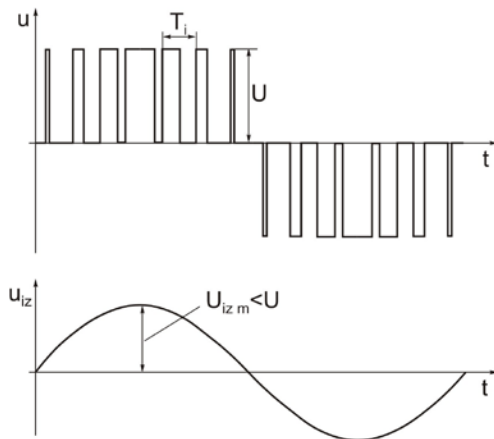
Autonomo invertoru maiņstrāvas pusē nav EDS avotu. Darba frekvenci nosaka no tiristoru vadības bloka pienākošo vadības impulsu frekvence. Kā piemēru apskatīsim paralēlo strāvas invertoru (63. zīm.).



63. zīm. Paralēlais strāvas invertors:
a – shēma; b – strāvas un sprieguma diagramma

Tiristori slēgti tilta shēmā. Lai atvērtos tiristorus varētu perioda beigās aizvērt, paralēli slodzei pieslēgts komutējošais kondensators. Spole $L1$ paredzēta strāvas pulsāciju nogludināšanai līdzstrāvas tīklā. Ja induktivitāte ir liela, līdzstrāvas pusē strāva praktiski nemainās. Ja atvērti tiristori $V1$ un $V4$, strāva slodzē plūst vienā virzienā, pie tam uzlādējas kondensators. Kad vadības impulsus saņem tiristori $V2$ un $V3$, uzlādētais kondensators pieslēdzas paralēli tiristoriem $V1$ un $V4$, tādējādi tos aizverot. Vienlaikus sākas kondensatora pārlāde uz pretējo polaritāti, strāva slodzē maina virzienu. Kopējā slodzes un kondensatora strāva $i_{sl} + i_C$ mainās lēcienveidīgi.

Lai izolētu maiņstrāvas ķēdi no barošanas avota, slodzi parasti ieslēdz caur transformatoru (63. zīmējumā tas nav parādīts).



64. zīm. Invertēšanas princips, izmantojot pārtraucēju ar impulsu ilguma regulēšanu

Var izmantot arī citu paņēmienu līdzstrāvas pārveidošanai maiņstrāvā (64. zīm.) – ar elektronisku pārtraucēju slodzei spriegumu pievada impulsu veidā. Mainot impulsu ilgumu, iespējams iegūt sinusoidālu izejas spriegumu. Šeit būtisku problēmu rada nepieciešamība pārtraucējam strādāt ar ļoti augstu frekvenci, lai izejas sprieguma forma daudz neatšķirtos no sinusoīdas. Tāpēc šo invertēšanas principu nevar realizēt ar tiristoriem. Lietojot pārveidotājā IGBT tranzistorus, var iegūt samērā augstu impulsu frekvenci – vairākus kilohercus. Piemēram, ja pārveidotājs strādā ar 10 kHz frekvenci (impulsu periods $T_i=0,1$ ms), izejas 50 Hz maiņsprieguma pusperiods sastāv no 100 impulsiem.

Pārveidotāja darbība 64. zīmējumā paskaidrota, pieņemot, ka slodze ir rezistīva. Izejas sprieguma sinusoidālo formu var iegūt, pārtraucēja izejā pieslēdzot filtru, kas nogludina pulsācijas.

Izmantojot taisngriezi un invertoru, iespējams vispirms 50 Hz maiņstrāvu pārveidot līdzstrāvā, bet pēdējo pēc tam atkal maiņstrāvā, bet jau ar citu frekvenci. Tādu iekārtu var izmantot, piemēram, asinhronā dzinēja ātruma regulēšanai, mainot dzinējam pievadītā sprieguma frekvenci.

Piekšmetu rādītājs

- Aizvars 15
- Akceptorpiejaukums 5
- Akumulators 58
- Atgriezeniskā saite 25, 29
- Atmiņa 57
- Caursite, p-n pārejas 7
- Caurums 4
- Dešifrators 53, 58
- Dinistors 16
 - aizvēršana 18
 - atvēršana 17
- Diode 7
 - Zēnera 8
- Donorpiejaukums 5
- Dreifs 32
- Elements, loģiskais 45
- Filtrs 66
- Fotodiode 20
- Fotorezistors 19
- Gaismas diode 21
- Gludinātājfiltrs 66
- Ģenerators 41
- Hibrīdshēma 22
- Impulsregulators 71
- Interfeiss 55, 58
- Invertors 73
- Iztece 15
- Koeficients
 - atgriezeniskās saites 25
 - pastiprinājuma 23
 - stabilizācijas 10
 - strāvas pārvades 11, 13
- Kontrollers, sistēmas 56
- Kondensators
 - atdalošais 27
 - komutējošais 70, 72, 74
- Kropļojumi, signāla 24, 31
- Lādiņnesēji
 - majoritātes 5,6
 - minoritātes 5,6
- Lauktranzistors 15
- Lavīncaurite 7
- Leņķis, vadības 68
- Līdzsaite 25, 41
- Līnija, slodzes 14, 27
- Loģiskais elements 45
- Maģistrāle
 - adrešu 56
 - datu 55
 - vadības 56
- Mazākumnesējs 5
- Mikrokontrolers 55
- Mikroprocesors 54
- Multivibrators 43
- Notece 15
- Optrons 22
- Pāreja, p-n 5
 - – emitera 11
 - – kolektora 11
- Pārveidotājs
 - analogu-ciparu 53
 - ciparu-analogu 53
 - elektriskās enerģijas 62
- Pastiprinātājs 23
 - darba režīmi 28, 30
 - diferenciālais 32
 - integrējošais 37
 - invertējošais 34
 - jaudas 29
 - klasifikācija 30, 31
 - līdzstrāvas 32
 - neinvertējošais 35
 - operacionālais 33
 - summējošais 36
- Pašvadītspēja 4
- Piejaukums
 - akceptora 4
 - donora 5
- Piejaukumvadītspēja 5
- Pretsaite 25, 26, 33
- Pulsācijas, sprieguma 66
- Pusvadītājs 4, 5
- Raksturliktne
 - frekvenču 24
 - voltampēru 7, 8, 13, 15, 18, 20, 21
- Regulators
 - impulsu 71
 - maiņstrāvas 70

Reģistrs 53
– pazīmju 59
– vispārīgas nozīmes 58
Saite, atgriezeniskā 25, 29
Saules baterija 20
Shēma
– integrālā 22
– – hibrīda 22
– – pusvadītāju 22
– kopbāzes 11, 12
– kopemitera 12, 13
– kopkolektora 12, 32
– tilta 64, 65
Siltumcaursite 7
Skaitītājs 52
– komandu 59
Slēdzis
– tiristora 69, 70
– tranzistora 14, 46
Sprostslānis 5
Sproststrāva 6
– kolektora 11
Stabilitrons 8
Stabilizators
– kompensācijas 40
– parametriskais 9
Steks 59

Taisngriezis 63
– tilta 64, 65
– trīsfāžu 64
– vadāms 68
– vienfāzes 63, 64
– – divu pusperiodu 64
– – viena pusperioda 63
Tiristors 16
– aizvēršana 18
– atvēršana 17
– dzēšanas 70, 72
– GTO 19
– izslēgšanās laiks 18
Tranzistors
– bipolārais 10
– darba režīmi 14
– IGBT 19
– lauka 15
– MOP 16
– MOSFET 19
– slēgumu veidi 12
Trigers 49
– D 51
– JK 52
– RS 50
– Šmita 38
– T 51
Tuneļcaursite 7
Vadības leņķis 68
Vairākumnesējs 5

Saturs

Ievads	3
1. Pusvadītāju ierīces	4
1.1. Pusvadītāju materiālu galvenās īpašības	4
1.2. Elektroncaurumu pāreja	5
1.3. Pusvadītāju diode	7
1.3.1. Diodes parametri	7
1.3.2. Pusvadītāju stabilitrons	8
1.3.3. Parametriskais sprieguma stabilizators	9
1.4. Bipolārais tranzistors	10
1.4.1. Bipolārā tranzistora uzbūve un darbības princips	10
1.4.2. Tranzistora ieslēgšanas shēmas	12
1.4.3. Tranzistora izejas raksturīknes un darba režīmi	13
1.5. Lauktranzistors	15
1.6. Tiristors	16
1.7. Modernās spēka pusvadītāju ierīces	18
1.8. Fotelektriskās pusvadītāju ierīces	19
1.8.1. Fotorezistors	19
1.8.2. Fotodiode	20
1.8.3. Gaismas diode un optrons	21
1.9. Mikroelektronika	22
2. Pastiprinātāji	23
2.1. Pastiprinātāju uzdevums un galvenie raksturojumi	23
2.2. Atgriezeniskā saite pastiprinātājos	25
2.3. Tranzistora kopemitera pastiprinātājpakāpe	27
2.3.1. Pastiprinātājpakāpes darbības princips	27
2.3.2. Pastiprinātājpakāpes darba režīma izvēle un stabilizācija	28
2.4. Jaudas pastiprinātāji	29
2.5. Līdzstrāvas pastiprinātāji	32
2.6. Operacionālie pastiprinātāji	33
2.6.1. Operacionālo pastiprinātāju uzbūve un īpašības	33
2.6.2. Invertējošais un neinvertējošais pastiprinātājs	34
2.6.3. Summējošais pastiprinātājs	36
2.6.4. Integrējošais pastiprinātājs	37
2.6.5. Komparators	37
2.6.6. Šmita triggers	38
2.7. Kompensācijas tipa sprieguma stabilizatori	39
3. Ģeneratori	41
3.1. Nerimstošu svārstību iegūšanas princips	41
3.2. Sinusoidālu svārstību ģeneratori	42
3.3. Multivibrators	43
3.4. Lineāri mainīga sprieguma ģeneratori	44
4. Ciparu automātikas iekārtu elementi	45
4.1. Loģiskie elementi	45
4.2. Loģisko shēmu sintēze	48

4.2. Trigeri	49
4.3. Skaitītāji, dešifratori un reģistri.	52
4.4. Ciparu-analogu un analogu-ciparu pārveidotāji	53
5. Mikroprocesoru sistēmas	54
5.1. Mikroprocesori un mikroskaitļotāji	54
5.2. Mikroskaitļotāja un mikrokontrolera uzbūve	55
5.3. Atmiņas iekārtas	57
5.4. Ārējo iekārtu pieslēgšana.	57
5.5. Mikroprocesora darbība	58
5.6. Mikroprocesora programmēšana	60
6. Elektriskās enerģijas pārveidotāji	62
6.1. Taisngrieži	63
6.1.1. Vienfāzes taisngrieži	63
6.1.2. Trīsfāžu taisngrieži	64
6.1.3. Taisngrieztā sprieguma pulsācijas un filtri	66
6.1.4. Vadāmie taisngrieži	68
6.2. Statiskie slēdži un sprieguma regulatori	69
6.2.1. Maiņstrāvas slēdži.	69
6.2.2. Maiņstrāvas regulatori	69
6.2.3. Līdzstrāvas slēdži	70
6.2.4. Līdzsprieguma regulatori (impulsregulatori)	71
6.3. Invertori	73
Piešķmetu rādītājs	76